

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

人类环境

 **BOOK**
中国期刊网 中国图书网

内容提要

本书以人口—资源—环境—发展为主线，系统地阐述人类与环境的关系。首先从论述地理环境的发生与演变和人口运动的基本规律入手，研究人类与环境这对矛盾的两方面，并概述了历史上有关人地关系的各种论点和流派，以及当代协调论的环境观，然后分别叙述人类与地球表面各个圈层——生物圈、大气圈、水圈、土壤圈和岩石圈——的关系，阐述上述各环境要素给人类生存、发展的可能提供的条件和制约，以及人类对它们的影响和由此产生的环境问题和这些问题的严重性与紧迫性。

本书是高等院校地理专业的基础教材，也可供环保和理、工、农、医以及文史、语言等专业师生环境教育的参考。

前 言

第二次世界大战以后，发达国家工业迅速发展带来的环境污染问题引人瞩目，使成千上万人罹致疾病以至死亡的“公害”事件更使公众震惊；发展中国家因人口迅速增长与经济发展迟缓同样带来严重的环境问题。全人类面临环境恶化的挑战。作为这一挑战的反应，乃是环境科学和生态学的大发展。不仅自然科学和工程技术科学涉足这个领域，社会学、经济学与法学等社会科学部门也把环境问题列入日程。现在，“环境保护”和“生态平衡”已成为公众最为关心和经常议论的问题。

然而，环境问题并非始自第二次世界大战以后，也并非局限于环境污染问题。环境问题古而有之。环境是相对于中心事物而言的，与某一中心事物有关的周围事物，就是这个事物的环境。环境科学所研究的环境，是以人类为主体的外部世界，即人类赖以生存和发展的物质条件的综合体，包括自然环境和社会环境。就这个意义上说，环境问题是和人类的诞生与发展相伴随的，只不过问题的规模与性质随人类发展的各阶段而有所不同罢了。当代的“八大公害”事件是严重的环境问题，古代物产丰饶、灌渠纵横的西亚美索不达米亚沦为沙漠，中华文明摇篮黄河流域变成沟壑密布、水土流失严重的地区也是严重的环境问题。所不同的是古代世界人口数量不多，技术水平不高，生产规模较小，所产生的环境问题较为局部；而现代世界人口数量剧增，并且掌握了强大的技术力量，“征服”自然的能力大大增强，使得环境问题更具有全球性，某些趋势更难以扭转，许多困难更难以克服——或者说，需要全人类的良知和合作方能克服。

既然环境问题是人类这个主体及其周围环境这个客体双方所组成的，则主体和客体两方面质和量对比关系的改变就会使环境问题的性质与程度发生变化。当远古的猿人刚从类人猿脱胎出来的时候，由于他们的数量是如此之少，而且除了原始的狩猎以外几乎没有什么技术，他们茹毛饮血的生活方式对环境并未发生什么影响。甚至可以说，人类这个主体尚未完全从环境客体中分离出来。

随着工具的改进和火的利用，牧业与农业的产生，人类的生活有了较大的保障，人口的数量与质量有了显著的提高，人类终于从环境中彻底分离出来，成为一个完全独立的主体，成为环境的对立物而存在。

在人类发展的漫长历史中，环境曾经极其宽容地对待人类。无论是人类的渔猎樵采、刀耕火种，还是任意排放废水、废气、堆置废物，大自然一概慷慨地支付、容纳和同化了。自然界一切可更新的和不可更新的资源，如同空气、阳光和水一样，曾经似乎是永无穷尽的。在中国语言中，我们正确地使用“大地”、“大海”与“大气”等词语来形容这些自然体之大。然而，大并不等于无穷。当工业革命带来的技术进步与人口急剧增长时，几十亿用现代技术武装起来的人口对环境的干预就逐渐接近甚至超过了环境所能容受的程度。于是，环境不客气地抗议了、报复了。我们面临的问题是一个有限的、敏感的系统与一种无限的、在一定时期内呈指数增长的需求的矛盾。这个矛盾目前已达到了相当严重的程度：世界人口的增长早已达到“起飞”阶段，每年人口的净增长数超过 9 000 万，本世纪末世界人口超过 60 亿已成定局，而且在下个世纪内还可能翻一番或两番；全世界的水、土、生物、能源和非燃料矿物等资源的供求关系日趋紧张，其中有些资源肯定将在一二个

世纪内开采殆尽；人类在生活与生产过程中排出的废弃物种类和数量均大量增加，环境污染成为全球性的大问题，空气、饮用水与食物中的有害有毒成分增加，造成对人体健康和对整个生物圈的伤害；世界一分为二，一方面是发达国家集团，人口占世界的 1/4，却过量地消费着世界物质与能量的 3/4；另一方面是发展中国家集团，人口占世界的 3/4，许多人过着难以温饱的生活，人口的重负与发展缓滞成为社会不安定的主要因素，社会矛盾与民族矛盾成为政局动荡与国际争端的根源。

上述各方面，即人口、资源、环境与发展（相应的英文为 Population, Resource, Environment, and Development，组成一个首母缩写词 PRED）构成了当代世界的主要问题之一。二次世界大战以后西方发达国家工业的急剧增长造成了环境污染，大约经过 20 多年的争论，世界各国对环境污染问题取得了共识，具体表现为 1972 年在瑞典首都斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议，会后发表的斯德哥尔摩人类环境宣言成为全球环境保护运动的里程碑。在这次会议上，许多发达国家的代表惊呼环境问题的严重性，但是大多提不出有效的解决办法，而发展中国家却大都未予响应，甚至认为环境问题是发达国家的问题，发展中国家的当务之急是发展经济。斯德哥尔摩会议的主要功绩在于唤醒了世人的环境意识，使人们开始认识环境问题的严重性，并且许多发达国家开展了以污染治理为中心的环境保护工作，有些已取得显著的效果。但是，这次会议更多地是从环境污染的角度来讨论环境保护，未能把环境问题与社会经济发展联系起来。此后又经过了 20 年的实践和探索，人们逐渐扩展了对环境问题认识的范围和深度，把环境问题与社会经济发展问题联系起来，并以此为名，于 1992 年在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，成为世界环境保护运动的第二座里程碑。全世界 183 个国家——联合国有史以来第一次这样多的国家坐在一起，本着合作的精神和共同的责任感，探讨解决全球环境与发展问题的方法。

20 世纪是一个伟大的世纪，也是一个充满问题和矛盾的世纪。在这个世纪里人类在多方面发生了质的飞跃，包括人口增长的飞跃、科学技术的飞跃和生产力的飞跃。所有这些飞跃都会带来新的问题和矛盾，例如人口、资源与环境的矛盾就是其中较突出的矛盾；另一方面也必然带来观念上的飞跃，例如关于持续发展观念的形成。在可以预见的未来，人类还只能生存在地球上，地球虽然非常巨大，但其容量毕竟有限。人类自身（人口）的增长以及人类需求的增长都应该有一个限度，这个限度应考虑到地球资源与环境的承载能力和再生能力，使之既能满足当代人的需求，又不妨碍子孙后代的利益。如果我们能够把增长限制在上述范围以内，则人类及其生存环境这两个相互依存的系统就能够长期共存下去，地球资源能够持续地被利用，环境能够持续地保持生态平衡，而人类本身也能够持续地发展。

本书将自始至终地贯穿人口—资源—环境—发展这条线索，对人类及其环境这对矛盾的两个方面进行研究，试图定量地说明环境的各个要素及其整体究竟有多大的容量，人类在其生存斗争中怎样地影响了环境，而环境又如何反过来制约了人类的发展，甚至对人类进行了毫不留情的报复。总的目的是向现在的当班者和未来的接班人反复说明人类与环境的矛盾业已尖锐到何种程度。如果本书能唤起人们的某种危机感或紧迫感，进而在各自的岗位上采取必要的行动，从各方面爱护人类的家园——地球，则人类幸甚，子孙幸甚！

本书编写过程中，始终得到高等教育出版社地理编辑室的支持和鼓励，书中插图承该社尹文君同志清绘和复制。对于他们的帮助，谨表示衷心的感谢。

编者
一九九四年元月于燕园

第一章 绪论

第一节 环境和环境问题

一、人类的环境

环境，就其词义而言，是指周围的事物。但是当我们讲周围事物的时候，必然暗含着一个中心事物，否则，环境一词就失去明确的含义。本书所涉及的是人类的环境，即以人或人类作为中心事物，其他生物和非生命物质被视为环境要素，构成人类的生存环境。也有人把人类和整个生物界作为环境的中心事物，而把其他非生命物质看作生物界的环境，生态学家往往持这种看法。

人类的环境有别于其他生物的环境，它包括社会环境与自然环境两部分。社会环境是指人类的社会制度等上层建筑条件，包括社会的经济基础、城乡结构以及同各种社会制度相适应的政治、经济、法律、宗教、艺术、哲学的观念与机构等。本书所要讨论的环境问题，则主要为自然环境。

自然环境是人类赖以生存和发展的各种自然因素的总和，即通常所称的自然界。事实上，人类对自然环境的依存关系以及人类对自然环境的理解随人类文明的进步而有所不同。远古时代人类的自然环境是一个比较狭窄的范畴，而当代人们所理解的自然环境则要广泛得多。因此，也可以把自然环境理解为一个由近及远和由小到大的有层次的系统，这就是：

(1) 生存环境 由人类赖以生存的空气、水、土壤、阳光和食物等基本环境要素所组成，这也是人类文明初期所了解和利用的自然环境。

(2) 地理环境 由地球表层的大气圈、水圈、土壤圈、岩石圈和生物圈组成，上达大气圈对流层顶部，下至岩石圈底部，是现代文明所认识的自然环境，也是环境科学和地理科学研究的对象。

(3) 地质环境 包括地表以下直至地核的各地质圈层（详见第八章），与地理环境有着物质和能量的交流。它主要是地质学和地球物理学的研究对象。

(4) 宇宙环境 指地球以外的宇宙空间，与地理环境之间也存在着物质、能量和信息的交流。它主要是天文学研究的对象。

本书所研究的环境就是上述的地理环境，包括地球表层的动物、植物和微生物等全部有机体以及同它们相互作用的其他非生物要素，其范围大体上与生物圈相当（见第四章）。

世界各国的一些环境保护法规中，往往把环境要素或应保护的對象称为环境，这可能是为了适应立法时技术上的需要。例如《中华人民共和国环境保护法》明确指出：“本法所称环境是指：大气、水、土地、矿藏、森林、草原、野生动物、野生植物、水生生物、名胜古迹、风景游览区、温泉、疗养区、自然保护区、生活居住区等。”这就以法律的语言准确地规定了应予保护的环境要素和对象。

总之，从哲学上讲，与某一中心事物有关的周围事物，就是该中心事物的环境。二者构成了矛盾的两个方面，二者之间经常进行着物质、能量和信息的交流（图 1.1）。

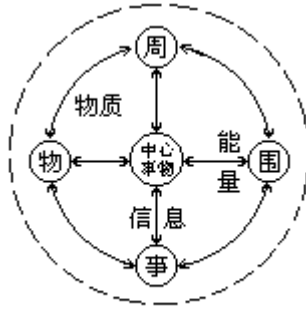


图1.1 中心事物与环境的关系

二、当代环境问题的特点

所谓环境问题，是指作为中心事物的人类与作为周围事物的环境之间的矛盾。人类生活在环境之中，其生产和生活不可避免地对环境产生影响。这些影响有些是积极的，对环境起着改善和美化的作用；有些是消极的，对环境起着退化和破坏的作用。另一方面，自然环境也从某些方面（例如严酷的环境和自然灾害）限制和破坏人类的生产和生活。上述人类与环境之间相互的消极影响就构成环境问题。

环境问题的具体内涵随社会的发展而不同。原始社会人口稀少、生产力水平低下，这时的环境问题表现为洪水、猛兽、林火、风暴以及种种自然灾害对人类生存的威胁；农业社会人类生活以种植业和养殖业为中心，主要的环境问题表现为以气象灾害为中心的自然灾害（包括病虫害）对农业生产的破坏，另一方面，过度垦殖引起的水土流失和环境退化又成为环境问题的另一方面，并且一直延续至今仍然是当代主要环境问题之一；人类于近 300 年来进入工业社会以后，环境问题又增加了新的内容，这就是自然资源的大量消耗和破坏，以及工业“三废”引起的环境恶化直接地构成了对全人类生存的威胁。本世纪中叶以后，因环境污染而造成人群中中毒的公害事件明显增加，表 1.1 列举了国外一些著名的公害事件，其中多数发生在第二次世界大战以后西方国家工业迅速发展的时期。值得注意的是这类事件至今仍时有发生，例如众所周知的印度博帕尔市美国联合碳化物公司所属农药厂的毒气泄漏事件（1984 年 12 月）和前苏联契尔诺贝利核电站的核泄漏事件（1986 年 4 月），这些事件均造成几千人死亡，几万人严重受害，几十万人受不同程度的影响。

可以说，当代的环境问题主要是由于环境污染而不断发生的公害事件以及人类生存环境质量的恶化而引起公众的警觉。但是，问题却绝不局限于环境污染及其治理，即狭义的环境保护。它的范畴要广泛得多。如果说，1972 年召开的联合国人类环境会议还较局限于狭义的环境保护的话，则从此以后，人们越来越清楚地认识到环境问题只有和人口与发展问题联系起来才能找到正确的解决办法。1991 年 6 月在北京举行的发展中国家环境与发展部长级会议，发表了《北京宣言》，指出当代“严重而且普遍的环境问题包括空气污染、气候变化、臭氧层耗损、淡水资源枯竭、河流、湖泊及海洋和海岸环境污染、海洋和海岸带资源减退、水土流失、土地退化、沙漠化、森林破坏、生物多样性锐减、酸沉降、有毒物品扩散和管理不当、有毒有害物品和废弃物的非法贩运、城区不断扩展、城乡地区生活和工作条件恶化特别是生活条件不良造成疾病蔓延，以及其它类似问题。而且发展中国家的贫困加剧，妨碍他们满足人民合理需求与愿望的努力，对环境造成更大压力。”

与过去的环境问题相比，当代环境问题有如下特点：

(1) 人类自身的发展达到了一个关键的时刻。在人地系统(或人类与环境关系)中,人口的数量与质量(或素质,主要指所掌握的科学技术力量)的增长速度与水平超过了历史上任何时代,人口的增长早已达到了“起飞”点。

(2) 因此,当代的许多人为过程达到了可以同自然过程相匹敌的程度,例如大气圈中 CO_2 的增加和 O_3 层的破坏、大规模的土壤侵蚀与荒漠化、大量物种的加速灭绝等等。

(3) 原来深埋于地下的许多矿物被采掘出来,散布世界各地,其中多种重金属已查明有毒性和有致癌、致畸变作用。同时,又人工合成了多种自然界原来并不存在的物质,如 DDT、聚氯联苯和氟利昂等,其中有些已散布全世界或进入大气层。象 DDT 等化学品不仅毒性大,而且难降解,将长期残留于环境之中。更为严重的是这类人工合成的物质中有一部分未经长期毒理试验即已投放市场,它们在环境中的行为与后果尚难预料。

(4) 人类大规模干预环境的行动中,有一些可能造成某些自然过程不可逆转的改变。例如,有的科学家担心大气中 CO_2 浓度的持续增高使大气层温室效应加强,全球气温上升,全球性的变暖加速极冰的消融,进而使两极对阳光的反照率降低、吸收率增高,使气温进一步升高,形成一个正反馈,最后使两极冰帽全部消融,造成全球海平面上升。尽管不少人对此持反对意见,但未能排除这种可能性。而且,这种大规模长期性的过程还难以进行准确的实验模拟,更增加了大规模干预环境行动的风险性。

(5) 由上述可见,在当代人类与环境的矛盾中,人口增长成为矛盾的主要方面。如何在尽可能短的时期内控制世界人口的增长,使世界人口稳定在适度的规模,成为解决环境问题的关键。在人口—资源—环境—发展(PRED)模式中,把人口放在首位也是必然的。人口问题在发展中国家尤为突出,象中国和印度这样的人口大国,人口问题就不仅是本国和本民族的问题,而且也是具有世界意义的问题。

(6) 环境保护发展到空前的规模,成为公众、政府和国际都十分关切的问题,并深入到日常生活和经济、政治各领域。迄至 80 年代末期,全世界群众性的环境保护组织已成立了 15000 多个,有 140 多个国家成立了全国性环境保护机构,签订了 250 多项国际性环境保护协议,包括联合国在内的一切主要国际组织都有和环境事务有关的项目和计划。更为令人瞩目的是环境保护进入了政治领域,1972 年新西兰率先成立了绿党,以谋求环境问题的政治地位为目标。至 1988 年已有 14 个国家成立了真正起作用的绿党,其中有 8 个在本国参政,欧洲议会中绿党占有 11 个席位。

上述各方面表明,当代的环境问题已处于一个历史性的关键时刻,成为全人类所面临的生存和发展的关键问题,人类不得不重新认识自身和休戚与共的环境。人类要重新了解我们周围的环境,了解在人口压力下环境发展和演化的规律,这种巨大的需求呼唤着一门全新的科学——环境科学的诞生。

表 1.1 国外八大

公害事件名称	主要污染物	发生时间	发生地点
马斯河谷 烟雾事件	烟尘及 SO ₂	1930 年 12 月 (1911 年 发生过但无死亡)	比利时马斯河谷 (长 24km, 两侧山高约 90m)
洛杉矶光化 学烟雾事件	光化学烟雾	1943 年 5 — 10 月	美国洛杉矶市 (三面环山)
多诺拉烟 雾事件	烟尘及 SO ₂	1948 年 10 月	美国多诺拉镇 (马蹄形 河弯, 两岸山高 120m)
伦敦烟雾 事件	烟尘及 SO ₂	1952 年 12 月	英国伦敦市
水俣事件	甲基汞	1953 — 1961 年	日本九州南部熊 本县水俣镇
四日事件 (哮喘病)	SO ₂ 、煤尘、 重金属粉尘	1955 年以来	日本四日市, 并蔓 延几十个城市
米糠油事件	多氯联苯	1968 年	日本九州爱知县 等 23 个府县
富山事件 (骨痛病)	镉	1931 — 1975 (集中在五六十年代)	日本富山县神通 川流域, 并蔓延至群马 县等地 7 条河的流域

资料来源：1. 王翊亭等编：《环境学导论》；2. 中国大百科全书：环境科学；3. Anne Nadakavukaren：Man and Environment
公害事件

中毒情况	中毒症状	致害原因	公害成因
几千人中毒,60人死亡	咳嗽、呼吸短促、流泪、喉痛、恶心、呕吐、胸闷窒息	SO ₂ 、SO ₃ 和金属氧化物颗粒进入肺部深处	谷地中工厂集中烟尘量大,逆温天气且有雾
大多数居民患病,65岁以上老人死亡400人	刺激眼、喉、鼻,引起眼病和咽喉炎	石油工业和汽车废气在紫外线作用下生成光化学烟雾	该城400万辆汽车每天耗油2400升,排放烃类1000多吨,盆地地形不利空气流通
4天内43%居民(6000人)患病,20人死亡	咳嗽、喉痛、胸闷、呕吐、腹泻	SO ₂ 、SO ₃ 和烟尘生成硫酸盐气溶胶,吸入肺部	工厂密集于河谷形盆地中,又遇逆温和多雾天气
5天内死亡4000人,历年共发生12起,死亡近万人 截至1972年有180多人患病,50多人死亡,22个婴儿生来神经受损	胸闷、咳嗽、喉痛、呕吐 口齿不清、步态不稳、面部痴呆、耳聋眼瞎、全身麻木,最后精神失常	SO ₂ 在金属颗粒物催化下生成SO ₃ 、硫酸和硫酸盐,附着在烟尘上吸入肺部 海鱼中富含甲基汞,当地居民食用含毒的鱼而中毒	居民取暖燃煤中含硫量高,排出大量SO ₂ 和烟尘,又遇逆温天气 氮肥厂含汞催化剂随废水排入海湾,转化成甲基汞被鱼、贝类摄入
患者500多人,其中36人因哮喘病死亡	支气管炎、支气管哮喘、肺气肿	重金属粉尘和SO ₂ 随煤尘进入肺部	工厂大量排放SO ₂ 和煤粉,并含钴、锰、钛等重金属微粒
患病者5000多人,死亡16人,实际受害者超过1万人	眼皮浮肿、多汗、全身有红丘疹,重者恶心呕吐、肝功能下降、肌肉疼痛、咳嗽不止,甚至死亡	食用含多氯联苯的米糠油	米糠油生产中用多氯联苯作热载体,因管理不善,多氯联苯进入米糠油中
截至1968年5月确诊患者258例,其中死亡128例,至1977年12月又死亡79例	开始关节痛,继而神经痛和全身骨痛,最后骨骼软化萎缩、自然骨折、饮食不进,衰弱疼痛至死	食用含镉的米和水	炼锌厂未经处理的含镉废水排入河中

第二节 环境科学

一、环境科学的研究对象和任务

虽然人类自远古时代就开始了对环境的研究，而且如同下文将要讨论的那样，发展了关于人类与自然界（自然环境）相互关系的认识（即所谓自然观），然而，环境科学的兴起，却是本世纪70年代的事。

一门科学的诞生，取决于它是否有特定的研究对象以及社会的需要。环境科学是以人类—环境系统为其特定的研究对象，既不是逐个地研究环境的各要素，那是许多自然科学部门（如地质学、气象学、海洋学、土壤学、生物学等）的研究对象；也不仅是综合地研究人类的环境，那又是其他自然科学部门（如自然地理学和生态学等）的任务。环境科学主要研究环境在人类活动强烈干预下所发生的变化和为了保持这个系统的稳定性所应采取的对策与措施。在宏观上，它研究人类与环境之间的相互作用、相互促进、相互制约的对立统一关系，揭示社会经济发展和环境保护协调发展的基本规律；在微观上，它研究环境中的物质，尤其是人类排放的污染物在有机体内迁移、转化和积累的过程与运动规律，探索其对生命的影响及作用机理等。可见，环境科学是一门综合性很强的科学，不仅牵涉到自然科学与工程技术科学的许多部门，而且还涉及经济学、社会学和法学等社会科学方面，要充分运用地学、生物学、化学、物理学、医学、工程学、数学、计算科学，以及社会学、经济学和法学等多种学科的知识。因此，毫不奇怪，环境科学家一般具有上述一门或数门学科的背景。

人类与环境构成了一对矛盾，环境科学的任务就是揭示这一对矛盾的实质，研究二者之间的辩证关系，掌握其发展规律，调控二者之间物质、能量与信息的交换过程，寻求解决矛盾的途径和方法，以求人类—环境系统的协调和持续发展。因此，环境科学的主要任务应包括：

（1）了解人类与环境的发展规律。这是研究环境科学的前提。在环境科学诞生以前，有关的科学部门已经为此积累了丰富的资料，例如人类学、人口学、地质学、地理学、气候学等。环境科学必须从这些相关学科中吸取营养，从而了解人类与环境的发展规律。

（2）研究人类与环境的关系。这是环境科学研究的核心。在人类与环境的矛盾中，人类作为矛盾的主体，一方面从环境中获取其生产与生活所必需的物质与能量，另一方面又把生产与生活中所产生的废弃物排放到环境之中，这就必然引起资源消耗与环境污染的问题。而环境作为矛盾的客体，虽然消极地承受人类对资源的开采与废弃物的污染，但这种承受力是有一定限度的，这就是所谓的环境容量。这个容量就是对人类发展的制约，超过这个容量就会造成环境的退化和破坏，从而给人类带来意想不到的灾难，即恩格斯所称的大自然的报复。本书后面各章的内容大体上按照这一思路展开。

（3）探索人类活动强烈影响下环境的全球性变化。这是环境科学研究的长远目标。环境是一个多要素组成的复杂系统，其中有许多正、负反馈机制。人类活动造成的一些暂时性的与局部性的影响，常常会通过这些已知的和未知的反馈机制积累、放大或抵消，其中必然有一部分转化为长期的和全球性的影响，例如上文述及的大气中 CO_2 浓度增加的问题。因此，关于全球变化（global change）的研究已成为环境科学的热点之一。

（4）开发环境污染防治技术与制订环境管理法规。这是环境科学的应用

方面。在这方面，西方发达国家已取得一些成功的经验：从 50 年代的污染源治理，到 60 年代转向区域性污染综合治理，70 年代则更强调预防为主，加强了区域规划和合理布局。同时，又制订了一系列有关环境管理的法规，利用法律手段推行环境污染防治的措施。近年来我国在这两方面都取得了可喜的成就，但是要达到控制污染、改善环境的目标，还需作出更大的努力。

二、环境科学的分科

环境科学是一门新兴的学科，而且还处在蓬勃发展之中，对环境科学的分科体系迄今尚未有一致的看法。但如上文所述，由于环境问题的重要性与综合性，许多自然科学、社会科学和工程科学部门都已积极参加环境科学的研究，形成了许多相互渗透、相互交叉的分支学科。其中属于自然科学方面的有环境地学、环境生物学、环境化学、环境物理学和环境医学等；属于社会科学方面的有环境法学、环境经济学和环境管理学等；属于工程科学方面的有环境工程学等。而且，其中许多学科又进一步发展了一些二级分支学科。现摘其要者分述于后。

1. 环境地学 研究人—地系统的发生、发展、组成、结构、运行、演化、调控与改造等。较成熟的二级分支学科有环境地质学、环境地球化学、环境地理学、环境海洋学、环境土壤学、污染气象学等。

2. 环境生物学 研究生物与受人类干预的环境之间相互作用的机理和规律，它以生态系统为研究对象，在宏观上研究污染物在生态系统中的迁移、转化和归宿，以及其对生态系统结构和功能的影响；在微观上研究污染物对生物的毒理作用和遗传变异影响的机理。环境生物学有两个主要研究领域：污染生态学和自然保护。前者研究生物与受污染环境之间相互作用的机理和规律；后者研究自然环境与自然资源的保护、增殖（可更新资源）和合理利用。

3. 环境化学 鉴定与测量化学污染物在环境中的含量，研究其存在形态和迁移、转化规律，研究污染物无害化处理与回收利用的机理等。其二级分支学科有环境分析化学和环境污染化学等。

4. 环境物理学 主要研究声、光、热、电磁场和射线等物理环境对人类的影响，似及消除其不良影响的技术途径与措施。由此又分化为环境声学、环境光学、环境热学、环境电磁学、环境空气动力学等二级分支学科。

5. 环境医学 主要研究污染环境对人群健康的有害影响及其预防措施，包括探索污染物在人体内的动态和作用机理，查明环境致病因素和致病条件，阐明污染物对健康损害的早期反应和潜在远期效应等，为制定环境卫生标准和预防措施提供科学依据。其分支学科包括环境流行病学、环境毒理学、环境医学监测等。

6. 环境法学 研究保护自然资源和防治环境污染的立法体系、法律制度和法律措施。

7. 环境经济学 研究经济发展和环境保护之间的相互关系，探索合理调节经济活动和环境之间物质交换的基本规律，使经济活动取得最佳经济效益与环境效益。

8. 环境管理学 研究采用行政、法律、经济、教育和科学技术等各种手段调整社会经济发展同环境保护之间的关系，处理国民经济各部门、各社会团体和个人有关环境问题的相互关系，通过全面规划和合理利用自然资源，达到保护环境和促进经济发展的目的。

9.环境工程学 运用工程技术的原理和方法,防治环境污染,合理利用自然资源,保护和改善环境质量。除了研究具体污染物(如污水、废气、固体废物、噪声等)与污染对象(如水、土和空气等)的防治技术外,还研究环境污染综合防治技术和进行技术发展的环境影响评价等。

总之,环境科学仍处在发展阶段,其理论基础与研究方法日趋成熟,更多的分支学科仍会出现,在此基础上进行全面综合的研究更加可行。这种发展趋势终将使环境科学成为一个完整的科学体系。

第三节 人类的环境观

人类在长期与环境的共存与斗争中逐渐认识了环境。人类对其赖以生存的地球环境及人类与环境相互关系的基本认识就是人类的环境观，在一些相邻的学科中或称之为自然观，或人地关系论。它决定了人类对环境的态度并制约着人类在生产和生活中的行为。环境观是建立在自然科学和社会科学的综合知识基础上的，因此它随着社会与科学的发展而改变。一个民族或一个社会在某一历史时期的环境观指导和制约着该民族或该社会的行为（生产和生活）；社会行为作用于环境，造成环境的变化，这种变化又反过来影响和制约人类社会的发展。因此，在研究当代的环境问题之前，不妨回顾一下历史上人类环境观或自然观的变化。

一、天命论的自然观

远古时代生产力水平低下，人类对自然界处于一种依附或顺应的关系。科学技术的发展限于直觉地和表面地观察和记述自然现象，对自然规律尚无正确认识。对林火、洪水、火山、地震等自然力的恐惧产生了原始宗教——从图腾、自然神、祖先神到人格神，都反映了人类对自然的屈服；另一方面，征服自然的幻想与欲望产生了美丽的神话——大禹治水、夸父逐日、精卫填海、女娲补天，以及西方神话中的巨人安泰等，均属征服自然幻想的体现。

虽然某些先哲凭其“天才直觉”而具有自发唯物主义和朴素辩证法的自然观，但占统治地位的哲学思潮是唯心主义和宗教神学的天命论，把一切自然现象及其对人类生产与生活的影响归结为某种超自然力量的作用。殷虚卜辞中有“帝其令雨”、“帝其令风”、“帝令雨足年，帝令雨弗其足年”，把晴雨变化和年成好坏都归结为上帝的旨意。《诗经》云：“敬之敬之，天维显思。命不易哉！毋曰高高在上；陟降厥土，日监在兹！”告诫人们敬天，不要以为苍天高高在上不管事，其实它每日临凡监视着苍生。孔子主张“君子三畏”，第一就是“畏天命”。古希腊哲学家也有类似的观点，柏拉图认为地球上一切可以观察到的事物不过是理念的拙劣的摹象。泰勒斯则认为神用水创造出万物。这些神创造论者认为自然界是上帝创造的，主观唯心论者则认为自然界是人类精神的产物，都否认自然界固有的客观规律和人类对自然界的影响。

二、地理环境决定论

在天命论占统治地位的远古时代，地理环境决定论（Determinism，又称决定论）早已埋下了种子，这就是恩格斯在《自然辩证法》中所说的“在希腊哲学的多种多样的形式中，差不多可以找到以后各种观点的胚胎、萌芽”。环境决定论把自然环境看作社会发展的决定因素。例如，希波克拉底（Hippokrates，公元前约460—前377年）在其著作《论空气、水和地方》里这样论述人类与环境的关系：“（居住在酷热气候里的）人们比北方人活泼和健壮，声音较清明、性格较温和、智慧较敏锐。”我国古代哲学家老子提出“人法地、地法天、天法道、道法自然”也同样具有环境决定论的思想。

欧洲文艺复兴运动以后，环境决定论又进一步发展。法国哲学家孟德斯鸠（Montesquieu，1689—1755）在其名著《论法的精神》（*Esprit des lois*，1748）中，强调了地区特征特别是气候对种族生理、心理的影响。他认为“气候的王国才是一切王国的第一位……异常炎热的气候有损于人的力量和勇气，居住在炎热气候下的民族秉性懦弱，必然引导他们落到奴隶的地

位……”。英国历史学家巴克尔(Henry Thomas Buckle, 1821—1862)在其《英国文明史》(1857)一书中,专门论述了环境对社会组织和个人气质的影响,并把个人和民族特征归之于自然环境的效果。该书认为“高大的山脉和广阔的平原(如在印度)使人产生过度的幻想和迷信。”“当自然形态较小而变化较多时(如在希腊),就使人早期发展了理智。”“生活在极北纬度的人民从来不曾有过温带地区居民那样卓著的稳定的事业。”他还论证了气候不仅能激励人或使人衰弱,也对人的工作与能力的坚定性产生影响。他的历史学体系的基本框架是:地理环境、气候条件影响人的生理,生理差异导致人的不同精神和气质,因而形成不同的社会历史。

上述这些学者可看作环境决定论的先驱,而公认的环境决定论的倡导者乃是德国地理学家拉采尔(Friedrich Ratzel 1844—1904)。在他的主要著作中大量探讨自然环境对人类活动的影响。其两卷本《人类地理学》(1882—1892)探讨了三个方面的问题:(1)地球表面居民的分布和集团;(2)作为人类迁移结果的这些分布对自然环境的依赖性;(3)自然环境对个人和社会所产生的影响,例如气候对民族特性的影响。他在该书中把人说成是环境的产物,认为人和生物一样,其活动、发展和分布均受环境的严格限制,环境“以盲目的残酷性统治着人类的命运”。

拉采尔还通过一种不恰当的生物学类比,把国家看成是“附着在地球上的一种有机体”,认为国家是地球表面上具有确定组织和生命分布的人类集团。因此,“每一个国家都是人类的一部分,地球的一部分”。并从这一观念中产生了“生存空间”的概念。认为作为空间有机体的国家总是想要达到它的自然界限。如果没有强大的邻国给以有效的反对,它就要越过这些界限。认为随着人口的增加,人类集团和社会总是不可避免地要向外扩张,直到碰上自然的或人为的障碍为止。拉采尔的这些观点,都是受到斯宾塞社会达尔文主义的深刻影响,而后来又成为法西斯服务的地缘政治学所利用。

应该指出,地缘政治学是在帝国主义阶段资本主义总危机下环境决定论的一个变种,是为帝国主义再分割世界与侵吞弱小民族服务的。这种学说主要偷换了拉采尔关于国家有机体与生存空间的概念,将其由类比转换成实体,再加上德意志民族至上的反动种族主义邪说而形成的。地缘政治学的首倡者应推瑞典政治学家歌伦(R·Kjellen)与英国的麦金德,而后为德国的豪斯霍费所完成。豪氏主张国际关系中的“弱肉强食”规律,为30年代法西斯主义的侵略野心服务,沦落为世人所不齿的伪科学。

拉采尔的海外女弟子森普尔(Ellen Churchill Semple, 1863—1932)把决定论的思想传播到美国。她在1911年出版的巨著《地理环境的影响》一书中,表达了拉采尔《人类地理学》第一卷中的观点,认为生活在相同环境下不同种族的民族,如果具有相似或相关的社会、经济或历史的发展,就可以合理地说明这种相似性是由于环境、而不是由于种族造成的。她还认为不同的地理环境不仅影响当地居民四肢和肌体的发育,而且对他们的性格、思想与宗教信仰也起着决定性的影响:“在河谷中,它(按指地球)让他接触肥沃的土壤,但单调、平静而按时作息的生活限制了他的思想与雄心,农庄的狭小天地封闭了他的胸襟。在风尘飞扬的高原上,在一望无际的草原和干燥的荒漠中,人们放牧牛羊,逐水草而居,生活虽然艰苦,却避免了起居单调的折磨;与牛羊为伴时,可以闲情逸致地思索,而天地广阔,生活多样,他的思想博大而单纯;宗教是一神教,上帝只有一个,就象一片无垠的荒沙、

草地一样地独一无二。他反复咀嚼他的这个单一信仰，作为一种空虚的心灵的食粮。他崇拜偶像，在不断的定期游牧生活所形成的广大空间思想，使他远离乡土，在广泛的征服中获得合法的果实”。她甚至说住在驿道上的居民都会成为抢劫过客的强盗，靠盗劫为生。

其后，美国地理学者亨丁顿（Ellsworth Huntington, 1876—1947）在其《气候与文明》（1915）一书中，特别强调了气候对人类文明的决定性作用。他认为人类文化只能在具有刺激性气候的地区才能有所发展，而热带气候单调，居民生活将永远陷于相对贫困。

总之，环境决定论是生产力比较低下，科学不甚发达的条件下的环境观或自然观，反映了人类对大自然的畏惧和顺从的态度，和天命论的自然观是一脉相承的。

三、征服论的自然观

人类必将征服自然的思想古而有之，即使在天命论占主导地位的原始社会就已产生了征服自然的幻想和神话，有如上文所述。战国时代孟子（公元前约 372—前 289）主张“天时不如地利，地利不如人和”（《孟子·公孙丑下》），即具有人定胜天的思想。荀子（公元前约 313—前 238）进一步发挥这一思想，主张“制天命而用之”。这些伟大的思想有力地抨击了无所作为的天命论，为人类认识自然环境及其发展规律的研究减少了思想障碍，鼓舞人们更好地认识、利用和改造自然。

然而，征服论的进一步发展并付诸行动还有待生产力的发展与科学的进步。18 世纪的工业革命带来了这样的契机，以蒸汽机为代表的机械革命大大解放了生产力，人类进一步征服了海洋，开采了更多的矿产，砍伐森林、耕垦草原、拦河筑坝、移山填海……人类似乎真正征服了自然，成了自然的主人。俄国的米丘林提倡“我们不能等待大自然的恩赐，向大自然索取是我们的任务”。我国则有过“人有多大的胆，地有多高的产”的口号，更把征服论发挥到极致，陷入唯意志论的境地。其他国家在其经济发展史上几乎也都经过征服论盛行的阶段，不顾自然规律，掠夺式开发自然资源，忽视环境保护，从而引起环境恶化，人类最终自食恶果。这就是恩格斯的著名论断：“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利，对于每一次这样的胜利，自然界都报复了我们。每一次胜利，在第一步都确实取得了我们预期的结果，但是在第二步和第三步却有了完全不同的、出乎预料的影响，常常把第一个结果又取消了。美索不达米亚、希腊、小亚细亚以及其它各地的居民，为了想得到耕地，把森林都砍光了，但是他们梦想不到，这些地方今天竟因此成为荒芜不毛之地，因为他们使这些地方失去了森林，也失去了积聚和贮存水分的中心。”

四、协调论的环境观

第二次世界大战以后，人类的自然观或环境观有了新的发展。因为一方面，以资源耗竭和环境恶化为中心的环境问题使人们不得不更为冷静地思考人类同环境的关系；另一方面，当代科学正在走向整体化和综合化，突出表现在系统论的建立，人们开始从系统的角度研究事物的结构、关系和整体，而不是零碎地观察问题。在系统论里，事物之间的关系不再是简单的因果链的两端，而是一个相互交叉影响的网络。就人类与环境的关系而言，人类社会是一个大系统，可以分为若干子系统；环境更是一个大系统，也可以分为许多子系统；人类与环境的关系，当然是一个巨大的复杂系统，地理学家称

之为人地关系系统，生态学家称之为社会经济自然复合生态系统(SENCE——Social - Economic - Natural Complex Ecosystem, 马世骏, 1984)。

上述两方面的进展，使一种全新的协调论(或和谐论)的环境观应运而生。它既摒弃了“天定胜人”的天命论和决定论的环境观，也摒弃了“人定胜天”的征服论环境观。前者认为自然界是主人，人类必须畏惧和服从它；后者认为人类是主人，而自然界是被“改造”和“征服”的对象。新的环境观则认为人类是自然的儿子而不是主人，人类只有保持同自然界(环境)的平衡与协调才能生存与发展。“人”与“天”的关系不再是谁战胜谁，而应是“人天共存”或“人地归一”。有人形象地把人与环境的关系比作不再是“我同它”，而应该是“我同您”的关系，并称之为“人地归一”(Earthmanship)的世界观。

恩格斯早就从哲学的高度指出了人类应同自然界相协调：“我们统治自然界，决不象征服者统治异民族一样，决不象站在自然界以外的人一样——相反地，我们连同我们的肉、血和头脑都是属于自然界、存在于自然界的；我们对自然界的统治，是在于我们比其他一切动物强，能够认识和正确运用自然规律。事实上，我们一天天地学会更正确地理解自然规律，学会认识我们对自然界的惯常行程的干涉所引起的比较近或比较远的影响……但是这种事情发生得愈多，人们愈会重新地不仅感觉到，而且也认识到自身和自然界的一致，而那种把精神和物质、人类和自然、灵魂和肉体对立起来的荒谬的、反自然的观点，也就愈不可能存在了。”(恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1971年，p·159)

综观历史上环境观(自然观)的演变，从“天定胜人”到“人定胜天”，最后发展为“人天共存”或“人地归一”，走过了“正—反—合”的曲折道路。当然，目前的认识并不等于发现了终极真理，随着人类文明的发展，人类的环境观(自然观)还将继续发展。

复习思考题

1. 什么叫环境？
2. 当代环境问题有何特点？
3. 环境科学研究的对象与有关的自然科学部门有何区别？
4. 当前环境科学的主要任务有哪些？
5. 历史上的环境观有过哪几种主要论调？

第二章 人类环境的发生与演变

在具体研究人类及其环境之前，本章将从宏观的角度，简略介绍宇宙、星系、恒星、地球以及人类的起源与演化。

第一节 宇宙、星系与恒星

一、宇宙起源新说

宇宙是否有一个起点？这是一个涉及时空观念的哲学问题。以牛顿力学为基础的经典物理学和哲学认为，宇宙在时间上和空间上都是无穷无尽的。随着现代科学技术的进步，这个传统观点受到了挑战。

本世纪之初，天文望远镜和光谱分析技术的进步使天文学家能够根据对恒星和星系的光谱，判断该行星或星系在向地球和太阳系靠近，还是背离我们而去。到了20世纪30年代，天文学家所研究过的许多星系表明：几乎所观测到的所有星系，均以极高的速度远离我们而去。而且，星系或星系团距离我们越遥远，其背离我们的运动速度也越大。例如离地球7百万光年的M64星系，其运动速度为150千米每秒，离地球38百万光年的M60星系，其速度为1100千米每秒，离地球5700百万光年的3c295星系团，则以138000千米每秒的速度离开我们。

如果我们改变一下观测的立场，以任意一个星系为中心，则其他的星系和星系团也同样以极高的速度远离这个星系而去。好象每个星系都位于宇宙的中心，而宇宙则以极高的速度在膨胀。

有了这个膨胀着的宇宙模型以后，无需多么丰富的想象力就可以作这样的设想：假如我们象放录相一样把星系的运动定格，并倒放回去，则最终所有的星系必将聚集在一起。那时候可能发生了一次大爆炸，于是所有的星系互相分离。天文学家还推算出了这次大爆炸的时间是距今150亿 \pm 30亿年以前，这就是我们目前这个宇宙诞生的时间。这就是宇宙大爆炸学说。这一学说已被天文观测的事实所支持。例如，长蛇座星团如果于100多亿年前从目前地球所在的空间区域出发，其运行速度经测定为每秒钟60500千米，则它现在距地球应为20亿光年。天文观测表明，这正是长蛇座与地球的距离。

二、大爆炸与“超级弹簧”

根据大爆炸假说，宇宙起源于一个比质子还小的、密度与温度（即能量）极高的小火球。天文学家还推断了宇宙起源最初的进程大体如下：

(1) $t = 0$ 秒，温度 $T =$ ，这时作为一个质点的宇宙是能量与物质未分化的混合物，引力、核力、弱相互作用力和电磁力四者全部融合在一起。大爆炸开始。

(2) $t = 10^{-43}$ 秒， $T = 10^{32}K$ ，此即普朗克（Planck）时间，这时引力同其他三种力分离，并独立出来。

(3) $t = 10^{-35}$ 秒， $T = 10^{28}K$ ，核力分离出来。

(4) $t = 10^{-35}—10^{-32}$ 秒，这瞬间宇宙体积可能迅速膨胀而温度无显著下降。

(5) $t = 10^{-10}$ 秒， $T = 10^{15}K$ ，电磁力与弱相互作用力分离。至此，四种力均已全部相互分离。

(6) $t = 10^{-6}$ 秒， $T = 10^{13}K$ ，“核子—反核子”停止产生，质子（氢）形成。

(7) $t = 5$ 秒， $T = 60 \times 10^9K$ ，He 形成，它是由2个质子加2个中子形成的： $2p^+ + 2n \rightarrow He^{2+}$ ，这时宇宙由75%的 H_2 与25%的 He 组成。

此后，宇宙的演化减缓。50万年以后，温度降至4000K，以辐射为主的时期结束，物质占优势的时期开始。因为随着温度的下降，辐射强度下降比

物质密度下降更快。此后 20 万年（大爆炸以后 70 万年），温度降至 3000K，电子与离子重新结合为中性原子。

根据这一假说，大爆炸结束时，宇宙是由氢（75%）和氦（25%）组成的巨大星云。它因不断膨胀和冷却而分裂成较小的星云，并逐渐形成比较稳定的星云体，称为原星系。随后由于自身的收缩形成最早的行星，称为群体恒星，其质量非常巨大，比太阳大 100 倍以上，但寿命较短，约为 100 万年，即变为超新星而爆炸。爆炸时产生了原子量比氢和氦大的元素，即超氢—氦元素。它们回到原星系中，参与其他行星的形成。这种短寿命的群体恒星现在均已消失。

随之而形成的是群体恒星，形成于 100—160 亿年以前，其组成物质中含有 0.01%—0.03% 的超氢氦元素。这时原银河系已略具规范，其大小与现在的银河系相似，但仍然保持球形。以后原星系由于引力的作用逐渐收缩，并由于角动量守恒原理而使其旋转加速，原银河系星云体就逐渐因收缩旋转而成为盘状。由银河系核心部分和盘状部分构成的恒星称为群体恒星，含有 1% - 3% 的超氢氦元素。太阳及其相邻的恒星均属这一范畴。正是由于 1%—3% 的超氢氦元素的存在，因而能产生象地球这样的重元素占优势的星球，并使生命的产生成为可能。

在我们的银河系中，群体恒星的历史可以追溯到 100 亿年以前，而地球只有 45—47 亿年的历史。由此可以推断：在地球上生命出现以前的大约 50 亿年期间，银河系中也可能产生过生命。这就是生命在时间上可能延续的范围。

宇宙大膨胀的过程迄今仍在进行中，这个运动过程的结局无非有两种可能：一是无休止地膨胀，逐渐解体向遥远的地方散去，宇宙终于变成一个物质分布极其稀薄的地方；二是膨胀的速度终于逐渐变慢以至停止，由于引力的作用逐步退回，终于又聚集到一处，密度的增加使温度不断升高，又发生物质向能量的转化，最后又聚集为能量无穷大的一个超微质点，再次发生大爆炸。这样的过程反复进行，就象一根弹簧不断地被压缩又膨胀一样。这后一种假说被称为“超级弹簧”说。

第二节 地球与人类

通过多年的天文观测，尤其是近几十年来使用了先进的 200 英寸天文望远镜和射电天文望远镜，乃至最近安置在空间的哈勃望远镜，天文学家已经了解到，象我们所在的银河系这样的星系大约有一千亿个，每一个星系（天河系）中又有约一千亿颗恒星。而且，在每一个旋转着的星系内部，还存在着、并不断形成着高度稠密的中心，每个这样的中心又围绕着它的重力中心而收缩，这就是新星球的诞生地。

地球所处的银河系由 1000—1500 亿颗恒星组成，形状象两把合并在一起的钹，从一端到另一端距离约 10 万光年，从中心到边缘约 5 万光年，中心近似圆球的部分厚度约 2 万光年，周围较扁平的圆盘部分厚度约 3000 光年。我们的太阳系就位于这个扁平圆盘的外侧，距银河系中心约 3 万光年（图 2.1）。地球只是太阳系九大行星中不大的一颗。可见，在无垠的宇宙之中，即使用沧海一粟来形容我们的地球，都未免有些夸大了。

图 2.1 银河系和太阳系在银河系中的位置

一、地球与生命的起源

地球的起源可以追溯到 60—100 亿年以前，在距离太阳大约 150×10^6 千米处（这个长度称为一个天文单位，A.U.，用以表示星球之间的距离），开始形成一个稠密的中心，这就是地球的雏形，也是宇宙中无穷无尽的偶然事件中的一件。

到了 45—47 亿年以前，地球的轮廓已初步形成。这时，环绕地球的原始大气圈中完全没有 O_2 ， CO_2 也非常稀少，可能是一个由 H_2 、 CH_4 、 NH_3 和 H_2O 等组成的还原性大气圈。地球还不断地向外排出一些气体，主要成分为 CO 、 CO_2 和水蒸汽等，这个过程称为出气作用或排气作用。水星、金星和火星这类地行星（即包括地球在内的离太阳最近的这 4 颗行星）在其演化的早期都经历过这一过程，有些学者认为这个过程在地球生命演化中起着很大作用，因为一方面，出气作用给大气圈增加了对生命至关重要的碳元素，另一方面，出气过程还会造成一种“流体化”的物理状态，即外溢的气体与致密的颗粒状固体相作用，使固体颗粒微微升起，整个固体层向上扩张，呈现出某种流体的特征。实验证明， H_2 和 CO 在使铁陨石粉流体化的过程中，能产生许多碳氢化合物，包括脂肪族、芳香族和异戊二烯。有人推测，现在发现的碳质球粒陨石中的有机物就是由类似的过程合成的。也就是说，这种流体化过程有可能是实现由无机物向有机物转变的途径之一。

然而，在地球形成的早期，原始大气圈对太阳辐射的屏蔽作用很微弱，强烈的辐射直射地表，频率高达 22 赫兹，其威力足以毁灭一切生命。如果不是由于后来出现了某种防护和调节的作用，则地球上的生命就无从发生。

这种作用的第一个阶段是水的出现。尽管其机制尚不清楚，但有地质学的证据说明，至少在 38 亿年以前，在某种作用下，地球出现了水，因为现在发现地球上最古老沉积岩的年龄约为 38 亿年。这时地球的温度仍然很高，处于近乎熔融状态，加上强烈的太阳辐射，使水分完全变成蒸汽，在地球上空形成射线难以穿透的浓云。在云层的荫蔽下，地表温度逐渐下降，并冷却凝固，形成地壳，互相挤压，产生折皱和断裂，但地球内部仍处于炽热熔融状

态。随着地壳的形成，近地层气温降低，云中的水蒸汽冷凝成水，开始出现降雨，而且倾盆大雨连续了几千年，使地壳进一步冷却，洼地与鸿沟都充满了水，产生了海洋这个生命的摇篮，也产生了最古老的沉积岩。

第二个阶段是生命的诞生，大约从 30 亿年前开始。这时由于地表坚硬地壳的形成，温度降低，蒸发作用减弱，降雨变得时断时续。流水作用把各种悬浮物与溶解物质带至海洋中，使海水成为含有多种成分的汤液 (broth)，其中包括具有四个价键的碳元素。它具有同其他元素相结合，形成链状和环状化合物的能力，为有机物的形成创造了前提。

至于生命究竟如何从原始海洋的汤液中产生，迄今还有各种不同的看法。恩格斯认为：“生命的起源必然是通过化学的途径实现的”（《反杜林论》）。1928 年维勒用无机物氰酸铵制成尿素，消除了无机物和有机物之间的鸿沟。1953 年美国学者米勒 (S.L.Miller) 和尤里 (H.Urey) 首次模拟地球原大气的成分，用甲烷、氨、氢和水蒸汽，通过火花放电，合成了 11 种氨基酸，其中有四种是天然蛋白质的组成部分：甘氨酸、丙氨酸、门冬酸和谷氨酸。此后，其他学者又实现了更多有机物在模拟条件下的合成，如嘌呤、嘧啶碱基、核糖与脱氧核糖、核苷酸、脂肪酸、卟啉和菸酰胺等。这些实验和上文所述的流体化过程均证明了生命起源的化学进化阶段，证明了从无机物转化为简单有机物，不仅完全可能，也是地球历史发展的必然产物。

然而，上述实验尚未能证明这些氨基酸是怎样进一步演化与发展成为生命的。生命的诞生至少要有 2000 个酶，这些酶又是成百上千个氨基酸按一定的规律组合而成的。在原始海洋上靠偶然的碰撞要把它们组合到一起，有人计算过其成功的概率为 $1/40000$ ！。相当于一个投骰子的人连续 5 万次都投上“6”一样困难，这种可能性即使存在，也是微乎其微的。

不少人企图用天外来客的假说来弥补生命进化中这个关键性阶段。早在 1908 年，著名的瑞典化学家阿伦纽斯 (1859—1927) 就提出宇宙芽孢传播说，认为芽孢受光的压力，从宇宙空间飞抵地球。到了 80 年代，英国剑桥大学理论天文学院创始人弗雷德·霍伊尔 (他因对天文学的杰出贡献而荣膺爵士衔) 又以新的论据重新提倡生命的宇宙起源假说。他在《聪慧的宇宙》一书 (1983 年伦敦出版) 中提出了生命并非偶然地在地球上出现，而是在一种具有创造性智慧引导下从太空来到地球的假说。他引证了许多天文学上的新发现，例如许多陨石上都含有大量微型球状炭粒，而这些炭粒有可能是孢子或细菌转化而成的，他还指出星际粒子同细菌的大小极其相似。1981 年日本天文学家对彗星的观察也发现彗星粒子同细菌的大小完全相同。同年，美国天文学者又指出，彗星粒子同有机物所释放的辐射光完全一样。后来，在金星、木星和水星的大气层中也发现了与细菌相似的粒子。根据这些事实，人们完全有理由提出这样的问题：象彗星那样的天体是否会把带有生命的粒子带到地球上来？有人甚至提出了更大胆的假设：几十亿年以前来自天外文明的宇宙飞船溅落在地球原始海洋上，来自太空的生命种子就被接种到了地球上，从此开始了地球生命的演化。地球史的宇宙演化阶段告一段落 (图 2.2A)。

图 2.2 宇宙、地球和生命史大事记

(据 G.H.Dury: An Introduction to Environmental Systems, 1981)

这种天外起源的假说看起来很诱人，但其中仍然存在着致命的弱点：它并未能从根本上回答生命起源的问题，如果地球上的生命起源于天外，那么，

天外的生命又是怎样起源的？

二、地球上生命的进化

尽管生命起源的真谛仍有待探讨，但是，南非岩石中所发现的 30 亿年以前的细菌化石却已提供了确凿的证据，证明至少从那时起，地球上已经存在着细菌。生命起源的时间还可能更早一些，大约 40 亿年以前，开始了地球的生命时代（图 2.2B）。有生命的细菌和蓝藻等生物的出现开始了一种新的生命过程——光合作用，使大气圈中出现 O_2 ，以后又逐渐形成能抵御紫外线辐射的 O_3 层，为更高级生物的出现创造了条件。

此后，生物进化的化石证据逐渐增加。上述细菌化石已具有简单的分裂作用，美国加利福尼亚州东部发现了距今 20 亿年的更为进化的原始细菌化石，并有类似于藻类的生物，内部已含有细胞核。这时含氧的大气圈开始形成。

又经过 10 亿年的进化，至距今 10 亿年以前，即中元古代结束、晚元古代开始之时（表 2.1），在温暖的海岸和河口地带，类似海藻的生物大量繁殖，通过光合作用放出大量的氧气。

迄今所发现最早的多细胞生物是澳大利亚爱迪阿加拉山脉的蠕节虫化石，距今 7 亿年，属震旦纪中后期。这时虽然已经存在不少生物，但因其身体缺乏坚硬的部分，因此所保存的化石很少。

到了大约 6 亿年以前（较确切的数字是 5.7 亿年），即前寒武纪结束，寒武纪开始之时，发生了大规模的海侵，陆缘浅海分布广泛，生长着大量的浮游生物，同时无脊椎动物兴盛，其中属于节肢动物的三叶虫种类最多，占寒武纪海洋动物已知种类的 70%。此外还有水生腕足类贝壳动物生长于海底。化石的大量出现开始了地球史上化石记录的时代（图 2.2c）。文献资料尚未记载过脊椎动物的存在，但 1985 年我国地质学家发现了距今 6 亿年的被囊虫化石，它已开始向脊椎动物转化。这一发现把脊椎动物的历史上溯了 1 亿年。

奥陶纪（距今 4.4—5.0 亿年）时无脊椎动物大量发育，但三叶虫的相对比例急剧下降，腕足类增加，笔石明显增多。但更为主要的事件是脊椎动物的出现，发现了空气呼吸的七鳃鳗和八目鳗。

志留纪（距今 4.0—4.4 亿年）出现了珊瑚礁。由于大气层中 O_3 的保护作用，发生了生命史上的又一次飞跃——生命登陆。迄今所发现最原始的陆生植物化石顶囊蕨（*cooksonia*），距今约 4.5 亿年。这些最早的陆生植物可能是从河口沿着河流上溯而登陆的。

泥盆纪（距今 3.5—4.0 亿年）珊瑚礁达到鼎盛期，海洋腕足类也达到了其多样性的顶峰。陆地上开始出现森林，蕨类植物刚登上陆地时个体较小，无叶，只限于阴湿处生长，但泥盆纪末期已进化成繁茂的大树，最高者可达 10 米。林中出现昆虫，并从无翅发育至有翅。脊椎动物开始分化，一支成为用鳃呼吸的鱼类，鳞片开始发育；另一支仍属鱼类，但已向两栖类进化，成为介于鱼类与两栖类之间的物种。

石炭纪（距今 2.8—3.5 亿年）发生第二次海侵，雨量的增多加强了河流的侵蚀作用，许多大河的河口形成巨大的三角洲，间歇性沉降地区沼泽森林中泥炭不断积累，并被沉积物掩埋，形成了大煤田，其中的植物化石表明，除了原有的蕨类和灌木外，树木的种类增多。陆地上有些昆虫发育成巨大的

个体，蜗牛大量增加。以栖息在陆地上为主的两栖类发育成最初的爬行类，日后进化为恐龙并在动物界占据统治地位。在浅水的边缘海中，属于棘皮动物的海百合在数量上和种类上均发生了空前的爆发性增长。

二叠纪(距今 2.3—2.8 亿年)首次出现恐龙(源自希腊语,意为可怕的蜥蜴)化石,但个体仍然很小,无法和日后的巨兽相比拟。与此同时,在软体动物门头足纲中出现了菊石。二叠纪的重大事件是一些物种的大规模灭绝:两栖类灭绝了约 75%,爬行类灭绝了 80%,同时急剧减少的还有苔藓虫、棘皮动物、菊石和腕足类等。其中苔藓中虽免于完全灭绝,但已大伤元气,此后再也未能恢复,三叶虫则从此消失。

表 2.1 地质年代表

代	纪	世	距今年龄 (百万年)	主要现象
新生代	第四纪	全新世	0.01	
		更新世	2	冰川广布,黄土生成
	第三纪	上新世	12	第三纪山系形成
		中新世	25	地势分异显著
		渐新世	40	哺乳类动物分化
		始新世	60	被子植物繁盛
	古新世	65	哺乳动物大发展	
中生代	白垩纪		140	海侵扩大,火山活动强烈,生物界变化显著
	侏罗纪		190	爬行动物兴盛,大煤田生成
代	三叠纪		230	陆地扩大,爬行动物发育,哺乳动物出现
	二叠纪		280	陆地增大,生物变化明显
古生代	石炭纪		350	珊瑚礁发育,爬行动物出现,森林广布,煤田形成,地势差异大
	泥盆纪		400	鱼类极盛,两栖类出现,植物登陆
	志留纪		440	地势与气候变化大,造山运动强烈
	奥陶纪		500	海水广布,无脊椎动物大量发育
	寒武纪		570	浅海扩大,生物大量发育
元古	晚元古代	震旦纪	1000	冰川广布,蠕节虫化石(距今 7 亿年),被囊动物化石(距今 6 亿年)
	中元古代		1800	火山活动强烈,真核细胞(距今 12 亿年)
	早元古代		2500	燧石藻(距今 20 亿年)
最古老的沉积岩			3800	原始细菌(Eobacterium)化石(距今 30 亿年)
地球形成			4600	
地球形成初期			6000	

二叠纪物种大规模灭绝的原因有可能是海洋的脱盐作用,这种作用多发生在陆缘的浅海盆中。强烈的蒸发作用浓缩了海水,而海盆外缘的海底山脊阻止了外海海水与之混合。据现代估算,这个时期可能有多达 500000km³ 的海水被蒸发,留下了巨大的盐类沉积,使大洋的含盐度降低,一些不能忍受盐度长期大幅度变化的物种灭绝。但是,二叠纪末陆地植物也灭绝了相当多,这却难以用海水盐度的变化来解释。

三叠纪(距今 1.9—2.3 亿年)中,劫后余生的物种重新发育。陆地上出现了针叶林,林下奔跑着恐龙,个体已较大,部分为草食兽,部分为肉食兽,它们形如现今的袋鼠,前肢短小,后肢长大,长于奔跑但不能跳跃。海洋中残存的菊石及其状若鱿鱼的近亲笔石大量繁殖,成为海洋中爬行动物的主食。这时在生态上有重要意义的发展是软体动物门瓣鳃纲的一些蛤类发育了硬化的外壳和伸长了的呼吸管,这一变化使其可以钻入海底沉积物中,占据原先只有软体动物才能生存的小生境,使软体动物在海洋无脊椎动物中占了优势。

三叠纪初在地球史上的重大事件是“大陆漂移”开始。图 2.3 表示 2.25 亿年以前开始的这个过程。大陆漂移以前,存在着一个联合古陆(又称泛古陆)和世界洋,联合古陆东面是三面被该古陆包围的特提斯海(古地中海)。至三叠纪末联合古陆开始分裂,北半球部分称为劳亚古陆,南半球部分称为冈瓦纳古陆。以后这两个古陆继续漂移,并且进一步分裂与拼接,逐渐形成现在的面貌。

图 2.3 大陆漂移的五个阶段。图中箭头示板块运动的方向。

(资料来源:Strahler《现代自然地理学》第 3 版,1987 年)

侏罗纪(距今 1.4—1.9 亿年)开始出现哺乳动物。爬行类向哺乳类的进化开始于二叠纪,并于三叠纪继续进行,到侏罗纪最终完成了这一进程。但哺乳类这时并未占优势,居统治地位的仍旧是恐龙,种类很多,有的个体很大,如雷龙长达 20 米,生活在沼泽中,以草木为食。陆地上生长着许多常绿树种,昆虫也明显增多,包括象蛾和蝇这样高度特化的生活型。海上菊石极丰富,而且演化迅速,成为划分地层极好的化石。箭石同样丰富,是海上鱼龙的主食。

这时期动物对空气产生了两种适应性:其一是翼龙,能以膜状翼飞翔,或者更可能是象今天的蝙蝠一样滑翔;其二是真正的鸟类,原先鳞状的覆盖层演化成羽毛,并发育了五趾翼,更适于起飞和飞行。

白垩纪(距今 0.65—1.4 亿年)发生第三次大海侵,海洋中无数细小的固钙生物遗体的沉积形成了白垩岩。浅海中棘皮动物演化迅速,成为详细划分白垩纪地层理想的化石。陆地上开始出现有花植物,后来把无花植物排挤到无足轻重的地位。为花朵授粉的昆虫随之出现,鸟类也有较大发展。恐龙中产生了有角和甲冑的素食的三角恐龙和魁伟凶猛的肉食的猛龙(tyrannosaurus)。这时出现了人类的远祖灵长类,具有对立的拇指。还出现了有袋的哺乳类,它们是现代有袋类动物(如袋鼠和,即负鼠)的祖先。

白垩纪以生物又一次大规模灭绝而告结束,其中众所周知的是恐龙的灭绝,这个巨大的家族统治了动物界长达 1.6 亿年。同期灭绝的还有海洋动物中的笔石、箭石和菊石,它们在二叠纪末的上一次物种灭绝中曾大量减少过,但在随后的 1.3 亿年中又极为繁衍,到白垩纪末完全灭绝了。这些物种大规模灭绝的原因仍旧是一个谜。

第三纪是地球史上最近的 6500 万年,哺乳类动物上升到统治地位。化石记录表明,许多哺乳动物的个体都有大型化的趋势。例如马的始祖,5800 万年前平均身高只有 25cm,像今天的小狗,人类和大猩猩的远祖,在 600 万年前也只有象老鼠一样大,但是所有灵长类动物都已发育了对立的拇指和前视的眼睛,后者可产生立体的映像。草本植物的进化与广泛分布使草食兽成倍

地增加。

三、人类的进化

地球史上最最近的 200 万年（也有人主张上溯至 300 万年）为第四纪，以人类的出现并占统治地位为特征。现代猿和现代人的祖先，于 200 万年前出现在非洲，与此同时全球气候开始变劣，气温下降：中纬地区年平均气温下降约 10℃，低纬地区下降幅度小些，但温度的下降已足以使森林减少，草地增加。腊玛古猿就生活在森林、灌丛、草地与沼泽相交织的环境中，环境的复杂性促使生物获得复杂的适应性。

直至 150 万年以前，这种古猿的后代仍然生存着，即南猿非洲种（*Australopithecusafricanus*）。与此同时，生存着另外两个种，即强壮的南猿粗壮种（*A.robustus*）和较细小的南猿纤细种（*A.gracilis*）。二者差别很小，虽然属于不同的种，但彼此的差别并不比同一种中雌雄之间的差别更大，它们的大小与外形均与现在栖居地面的猿相差无几。

几乎与此同时，人属的祖先，会制造工具的能人（*Homo habilis*）已经出现。应该指出，利用工具并非只有人类才具有的特征，海獭就能用海底的石块作工具，用以击碎介类的硬壳取食，有些猿也会扔石头；制造工具也不是人类独特的才能，黑猩猩已能把树枝上的小枝与树叶捋光，制成比较光滑的木杆，伸到蚁穴中去，诱吃爬到杆上的白蚁，补充其动物蛋白性营养；只有人类才能制造定型的工具。能人已经学会打制简单的石器，他们生存的年代大约为距今 250—150 万年，随后进化为直立人（*H. erectus*），于 50 万年前遍布非洲、欧洲和亚洲，他们制造了更有效的工具，如砍砸器、刮削器、切割器、钻孔器和杵等。直立人已学会了用火，这是人类文明史上的一大进步。第一，火延长了工作日，使有些工作可以留待日落以后去做；第二，火能比叫喊和威吓更有效地驱除猛兽；第三，使人类可以抵御寒冷的气候，甚至可以进入北方的苔原地带；第四，更为重要的是改善了人类的消化，提高了食物的利用效率和抵抗疾病的能力。

至此，人类由于制造了定型的工具、利用了火、进行集体狩猎，可能还产生了简单的语言。这一切使人类逐渐进入了原先是严酷的乃至不可进入的生态系统，散布到了世界上大部分地区。此后又经过几十万年，到了公元前 6000 年，人类进入新石器时代，公元前约 3000 年进入铜器时代，公元前约 2000 年进入铁器时代。人类终于从蒙昧时代经过渔猎采集的原始社会进入到养殖耕种的农业社会，最近二三百年来又进入工业社会，人类的文明得到了空前的发展。

上述对地球生命史和人类史的简单回顾，从环境学的角度至少给我们以下的启示：

第一，地球上生命与人类的出现，在其必然性后面，潜在着巨大的偶然性。如果地球的轨道不是在今天的位置上，而是处在离太阳更近或更远一些，譬如说，增加或减少半个天文单位，即大约处在金星或火星的轨道上，则地球至今很可能依然同这两个星球那样一片荒凉。如果把眼光再放远一些，环顾我们周围的天体，则在现代科学手段所能感知的范围之内，尚未发现有生命的存在，更勿论智能生物了（即使在理论上，我们承认地球上智能生物的存在不是宇宙中唯一的现象）。

第二，地理环境历来处于不断的变化之中，从早期的熔融状态到第四纪的冰期往复，从以氢、氨等气体为主的大气层到以氮、氧为主的大气圈的形成

成，地球的地质构造、海陆位置、山脉河流、地势高低、大气组成、气候冷暖干湿、土壤类型、生物种类以至人类本身，无不处于水恒的变化发展之中。尤其是到了近代，由于人口规模与科学技术的发展，人类对环境的变化更起着举足轻重的地步，环境的变化比以往更为迅速。这种变化有些可以预料，有些则尚难以预料；有些向着有利于人类生存的方向发展，有些则相反，向着不利的方向发展。我们必须密切注意环境的变化。

第三，环境与生命的演化有一种逐渐加速的趋势。如果把宇宙的历史暂定为 150 亿年，地球的天文演化阶段大约占了 100 亿年有奇，到了距今 46 亿年以前才开始地球的形成。而在地球历史的早期又经历了大约 15 亿年的无生命阶段，加上生命进化的初期，包括太古代的后期和元古代在内的 20 多亿年内，生命十分原始，进化十分缓慢。只是进入古生代以后，即最近的 5.7 亿年内，生命进化才逐渐加速，而且速度越来越快。有人把地球的生命运动用一条对数螺线来拟合，颇能反映这种进化加速的情形（图 2.4）。人类的进化也有这种日益加速的趋势，有人研究了南猿、能人、直立人和智人颅脑的大小，并用直线拟合如图 2.5，该直线的相关系数达到 0.98。从小南猿到大南猿、能人、直立人、北京人和现代人，每一个阶段比其前一阶段的颅脑容量增加 1.275 倍，即从小南猿的 400 毫升增加到现代人的约 1350 毫升。照此推算，几十万年以后我们的后代颅脑容量将增加到 1720 毫升，届时他们的技能和我们相比，就会象我们和直立人相比一样。直立人在 150 万年的时间内没有取得多少技术进步，而智人在最近 10 万年内即已造就了辉煌的文化与技术，近 100 年来的科技进步则更是日新月异，这种进步的加速使我们难以想象未来人类所能取得的发展。

然而，迄今人类所取得的发展大多是以资源和环境为代价的。为了人类的未来，我们应该

图 2.4 地球运动模式——对数螺线图（据蒋匡仁，1976 年）

更好地了解人类赖以生存的环境，了解人类与环境的相互作用，进而预测人类本身和环境将要发生的变化，使人类与环境这个复杂的大系统得以持续地运行下去。否则，我们就是一群盲目的实践家：盲目地发展人口、盲目地消耗地球的资源、急剧地恶化我们的环境，从而有可能加速人类的消亡。环境学的主要目的之一，就是要唤起人们对人地关系的正确认识。

图 2.5 人科动物颅脑的大小

资料来源：G.H.Dury，1981 年

复习思考题

1. 根据你所学的知识，你认为宇宙是无始无终的，还是有一个起点？
2. 根据大爆炸理论，星系与恒星的发展经历过哪三个主要阶段？各具什么特点？
3. 地球形成初期的出气作用有什么重要意义？
4. 地球史上何时发生过 3 次大规模的海侵和 2 次物种灭绝？灭绝了哪些物种？
5. 人类的进化大体经历过哪几个阶段？
6. 怎样正确看待人类进化与环境演化逐渐加速的趋势？

第三章 人口与环境

在人类影响环境的诸因素中，人口是最主要、最根本的因素。人类是大自然的产物，他与自然环境息息相关，人类的生存依赖于良好的自然环境。在地球上人口较少和科学技术较不发达的时期，社会的结构和文化要求较低，自然资源不仅能满足人类的需要，而且地球的生态系统能够净化人类生活和生产中所排放出的废弃物。因此，环境问题是微乎其微的，也可以说不存在环境的污染问题，更不存在资源耗竭问题。但是，随着人口的增加，生产力的发展，再加上长期的不合理地开发利用自然资源，以及生产和生活排放的污染物超过了自然环境的容许量。这种变化不仅影响了局部地区的环境质量状况，而且也导致了全球性的环境破坏，威胁着全人类的生存。

目前，人口的增长成了举世瞩目的重大问题。不少人忧心忡忡，认为我们的这个星球由于人口增长而面临着人口危机，甚至将目前世界人口的激增称为“无声的爆炸”。

人口问题自古有之。二千多年前韩非子在理论上给出了人口无限增殖的一般图式：“今人有五子不为多，子又有五子，大父未死而有二十五孙。是以人民众而货财寡，事力劳而供养薄”。二千多年后美国人米勒（John Eli Miller）家庭人口的增长给韩非子的图式提供了一个生动的例证。米勒夫妇二人一共生了7个儿女，在他们有生之年，一共有过63个孙儿女，341个曾孙和6个重孙，这个大家族一共有过419人（他们的配偶除外）。他们的一生中先后有2个儿女、2个孙儿女及5个曾孙死亡。当这个大家族的元勋米勒先生于1961年在俄亥俄州米德费尔德（Middlefield）的农庄中去世时，他给这个世界留下了410个后裔。

这个令人叹为观止的事例再次雄辩地重申了：在人类与环境的矛盾中，人口的急剧增长是问题的关键所在。

人类不同于一般的生物，它具有生物学与社会学的双重特征。人口的增长也受生物学与社会学两种规律的制约。因此，在本章中除讨论世界人口发展历史、人口增长对环境的影响、人口预测模型外，还要简述种群生态学的基本概念。

第一节 人口增长与环境

一、世界人口发展历史

(一) 过去的人口

研究过去的人口首先涉及到的问题是人类的起源，即人类何时从古猿中分化出来的问题。人类学的研究在这个问题上已经取得了很大的进展。近年来在肯尼亚、南亚和我国云南省发现的拉玛古猿，是人科的祖先，距今 1400 万年。人属的起源要晚得多，能够制造工具的“真人”的出现时间约为 300 万年前，有坦桑尼亚和肯尼亚先后发现的 200—300 万年前的古猿化石为证。此后，从猿人至新人的发展大致经历了几个阶段。

(1) 猿人 是最早的人类，经历的时间长达 200 多万年。又分为早期猿人（能人）与晚期猿人（直立人）。著名的爪哇直立猿人、德国海德堡猿人、中国的北京猿人、蓝田猿人、元谋猿人以及最近北京大学考古系发现的辽宁金牛山猿人均属晚期猿人。他们已能制造简单的工具，缝制兽皮衣以及共同狩猎。

(2) 古人 又称早期智人或尼安德特人（最先在德国尼安德特河谷发现）。我国广东马坝人、湖北长阳人与山西丁村人亦均属早期智人。

(3) 新人 又称晚期智人，如法国的克罗马农人，中国的河套人、柳江人和资阳人。从晚期智人已能看出人口的种族差异。

虽然现在业已查明人类起源的时间，但是对如此遥远的史前人口进行估测却非易事。各国学者根据不同的理论、资料与方法进行估算，结果差异很大，这是可以理解的。但这些估算有两个共同点：第一，早期人类的数量非常少，全世界人口在几千至几万之间；第二，几百万年来人口增长缓慢。前苏联学者根据下述两点推算出 10 万年前全球人口为 20—30 万人：10 万年前全世界能供渔猎与采集的陆地面积为 400 万平方公里；靠采集与渔猎为生，平均每平方公里只能养活 0.08 人。各国学者对 100 万年以前至公元 1987 年世界人口的估算数字列于表

表 3.1 世界人口发展

单位：百万人

年 份	人口数	年份	人口数	年份	人口数	年份	人口数
7000(公元前)	10	1400	373	1900	1608	1970	3696
5000(公元前)	30	1500	446	1920	1790	1975	4066
2500(公元前)	40	1600	486	1930	1996	1980	4453
0(公元,下同)	230	1650	545	1940	2252	1981	4530
1000	275	1700	623	1950	2525	1982	4607
1100	306	1750	728	1955	2757	1983	4685
1200	3481800	906	1960	3037	1984	4762	
1300	384	1850	1171	1965	3354	1987	5000

资料来源：联合国《人口年鉴》1973 年、1982 年；联合国《统计月报》1985 年 1 月；苏联《国民经济统计年鉴》1963 年；苏联《世界各国人口》1978 年；美国人口咨询局《世界人口数据表》1984 年 4 月；日本综合研究开发机

构《关于世界人口变迁的调查研究》1982年3月。

摘自鲁志强：人口问题与发展战略决策

(二) 世界人口增长的三个时期

冰期开始时，也就是在300万年前，人类首次出现在地球上。从那时起，人类实际上就在不断向地球的全部陆地表面扩散（图3.1）。

根据世界各国人类学者和人口学者所提供的资料。已有可能清楚地追溯世界人口发展的历史（图3.2，图3.3）。从图3.2中可以看出世界人口发展历史至少有如下三个特点：

图3.2 过去50万年人类人口增长

(1) 长期以来人口增长率非常低。虽然目前世界人口增长率达1.7%—2.0%，但从全部人类史来看，平均增长率仅为0.00011%（R.Thomlinson, 1965）。

(2) 整个人口增长史是一个非常缓慢的过程。从原始人发展到1亿人口，经历了200—300万年，即到了公元前10004年前后，世界人口方达到1亿人。

(3) 世界人口增长曲线呈现指数增长形式。这就意味着人口增长的速度越来越快。第二次世界大战后，世界人口增长明显地加快，出现了人类有史以来不曾有过的高速度。根据历史人口学家的估计，1650年，全世界的人口只有5亿人，这就是说，在经历了几百万年的人类活动之后，世界人口才发展到5亿。以后，过了200年，大约在1830年左右，世界人口达到10亿。又过了100年，大约在1927年，世界人口达20亿。再往后人口增长速度就更快了：

1960年，即用33年时间，人口达到30亿。

图3.3 按对数绘制的人口总数增长曲线（资料来源：同图3.1）

1974年，即用14年时间，人口达到40亿。

1987年，即用13年时间，人口突破50亿大关。

按此人口增长速度发展，2000年全世界人口将超过62亿。从任何意义上来说，世界人口的增长早已进入“起飞”阶段。

根据图3.2，可以把世界人口的发展分成三个时期：

第一时期，从50—60万年前开始，人类进入旧石器时代，隧石刀片和矛头改良了狩猎工具，火的使用提高了食物质量，第一次较大地提高了人口增长率。但是，随后在生产技术上没有新的突破，人口增长率没有继续提高，人口增长仍较缓慢。到公元前1万年时，世界人口达到500万左右（D.E.Dumond, 1975）。

第二时期，从大约公元前8000年，即新石器时代开始。由于工具的改进与农牧业的早期发展，人类食物有了较稳定的来源。人口增长率有了进一步的提高，达到0.03%左右（W.D.Borrie, 1970），使世界人口在公元元年达到1亿（W.D.Borrie, 1970）至2.5亿（Ehrlichetal., 1977）。从公元初至中世纪，人口死亡率很高，达30‰—40‰，出生率为35‰—50‰，增长率为5‰—10‰。但由于经常出现的饥荒、瘟疫和战争，使人口增长率实际上不超过1‰。公元1300年，世界人口达到3.84亿，但这时从中亚传到欧洲的黑死病——鼠疫，使人口于1400年又剧减至3.73亿（表3.1）。

第三时期，大约在 200 年前，人类实现了第三次技术革命——工业、医学革命，采用了新的能源，实现了机械化，发展了新医药。人口死亡率从农业社会的 30‰—40‰。降到工业社会的 10‰—15‰。14 世纪那种大规模的瘟疫再也没有出现过。人口增长率从 17 世纪以前的 1‰逐渐增加至 10‰—20‰。这个增长阶段一直延续到现在。虽然少数工业化国家已经达到了人口的零增长，但占全世界人口大多数的发展中国家人口增长尚未达到新的稳定阶段。尽管几个人口大国（如中国和印度）近年来已出现增长率稳定或略有下降的趋势，但是，即使按照 17‰的平均增长率计算，到本世纪末世界人口仍将达到 62 亿的水平。

（三）世界人口增长的原因

世界人口急剧增长的主要原因，有人认为是由于人类寿命延长所致。的确，随着整个人类的进步，生产力的发展，生活条件的改善，医疗卫生水平的提高，人类的死亡率大大下降，人类的寿命大大延长了。根据联合国有关部门的调查，全世界有 42 个国家和地区的女性的平均寿命在 75 岁以上，其中日本为 81.3 岁，居首位，澳门和法国为 80.3 岁。男性平均寿命，日本为 75.5 岁，澳门为 75.1 岁。中国男女的平均寿命，解放前是 35 岁，1957 年提高到 57 岁，1982 年提高到 68 岁。

但也有人认为，长寿，不管人们是活到 60 岁、80 岁或 100 岁，基本上与人口问题无关，这可以用图解说明（图 3.4）。

图 3.4 长寿对人口增长的影响

（资料来源：范淑琴等译，环境科学—世界存在与发展的途径）

在图 3.4 中，假定每个家庭有 4 个孩子，每一代的间隔是 20 年。以 60 岁、80 岁和 40 岁的估计寿命（根据概率统计求得）作比较。在每种估计寿命中，开始时人口都为 14 人：祖父母 2 人，父母 4 人，小孩 8 人。在估计寿命为 60 岁一栏中，由于每新一代的增加，最老的一代人便被从图中除掉，因此在图中可保持 3 代人（图 3.4a）。请注意，每一代的人口增加 1 倍，即从 14 人增加到 28 人，然后增至 56 人……。

在图 3.4b 中，估计寿命增至 80 岁，这样在图中保持 4 代人。对于下一代来说，人口中留下来的老年人开始使总人口增加大约 7%。但在这之后，每一代的人口仍然只增加 1 倍，即从 30 到 60 到 120 人……。

在图 3.4c 中，估计寿命减少到 40 岁，因此，人口中少了较老的一代，最初的结果是比估计寿命为 60 岁的人口减少了 15% 左右。但这次减少之后，仍然开始每一代增加 1 倍人口。

可见，老年人寿命的长短对人口数量的长期影响很小。真正影响人口增长的因素是生多少小孩和这些小孩有多少长大成人并生育下一代人。而这是由经济和社会因素决定的。人口增长较快的往往是经济较落后的发展中国家。因为：

（1）工业化程度低，农业生产落后，需要劳动力在较原始的农业社会里，家族生活在他们自己耕种的小块土地上，而他们大部分必需品就出于此。因此，在这样一种社会里，孩子是一种经济财富。他们不仅是家务劳动的重要帮手，而且又是老年人的保障。当父母年迈，不能劳动时，儿女们就照顾他们，这是农业社会的传统。而在工业化国家，特别是在城市的生活中，孩子们几乎不负担任何家务劳动，一切都依靠别人去做，而他们的食物、衣服、

教育等都由父母负担。此外，在高度发达的国家，老年人有养老金和其它形式的生活保障，因此，老年人不需要依靠他们的子女。

(2) 婴幼儿死亡率高，迫使家庭用高出生率来抵偿尽管发展中国家的医疗卫生事业有了很大发展，但水平仍不高，广大农村地区的医疗卫生事业至今仍很落后。所以，婴儿死亡率虽有下降，但水平仍然很高。平均每 10 个出生婴儿就有一个活不到周岁，有的国家甚至每 5 个婴儿中就有一个活不到周岁；1—4 岁的幼儿死亡率同样很高。高的婴幼儿死亡率必然迫使家庭用高出生率来抵偿。如印度，平均要有 6.3 个孩子，才有 95% 的可能性保证父母活到 65 岁时，有一个孩子活着奉养他们。

(3) 文盲率高，不易接受现代科学知识发展中国家文盲很多，人口教育水平仍然很低。尤其是农村地区文盲率更高，而妇女文盲率更是高得惊人。例如，尼泊尔 1971 年 15 岁以上的人口的文盲率高达 87.5%，女性文盲率更高达到 97.4%。人口文盲率高，容易接受重男轻女，多子多福的旧观念；另一方面，不容易接受避孕节育的现代科学知识。这些国家人口出生率高是可以理解的。

(4) 妇女地位低，在生育问题上没有决定权原始社会末期，从母系社会变为父系社会，妇女的社会地位下降，开始出现“男尊女卑”的现象。目前，发展中国家尤其是亚洲和非洲的发展中国家，农村人口始终占全国人口的大多数，妇女担负着繁重的劳动，她们实际上没有摆脱低下的地位，在生育问题上没有决定权。这也促使亚非地区发展中国家广大妇女的高生育率保持下去。

(5) 盛行早婚，是发展中国家保持高出生率的原因之一亚洲、非洲、拉丁美洲发展中国家盛行早婚，农村尤甚。这是发展中国家出生率高的一个原因。与发达国家相比，发展中国家的法定婚龄低，实际婚龄也低。早婚的结果必然导致早育、密育、多育，使发展中国家保持高出生率。例如，中国的第三次人口普查资料表明：各省市自治区都存在不同程度的早婚现象，早婚人口主要分布在边疆省区，但内地及沿海省区也占一定比例。另外，我国第三次人口普查资料中所反映的育龄妇女生育状况也令人吃惊：生育第二胎的、第三胎的、第四胎的、第五胎的共计一千万人。

(6) 旧的传统风俗、宗教教义、人口政策的影响发展中国家人们的生育观基本上是封建主义的。虽然社会前进了，时代不同了，但多少世纪以来遗留下来的旧风俗、旧习惯仍顽固地扎根于这些国家人们的头脑中。重男轻女、多子多孙、四世同堂、养儿防老等仍然是一种传统势力，很难克服。

有的宗教教义影响也使生育率保持高水平。例如，西亚、北非、东南亚盛行伊斯兰教，南亚盛行印度教，拉丁美洲盛行天主教。这些宗教的教义都鼓励多生多育，不允许人工流产或做绝育手术。

除上述因素外，人口增长还与世界各国的人口政策有关。对于什么是人口政策，世界各国有不同的观点和解释。不少国家甚至至今还否认他们有人口政策。这是因为他们害怕被批评为干预基本人权——生育子女的权利。对此，有些学者认为，这是一种消极的人口政策；而由政府制定并正式颁布的人口政策，被称之为积极的人口政策。所以，不管是否公开宣布有人口政策，各国政府实际上都在自觉或不自觉地执行着一项人口政策。

到 1978 年为止，世界上仍有 36 个国家的政府公开实行或倾向于实行鼓励生育的人口政策。世界各国实现人口政策的措施主要有三类：第一，思想

影响措施；第二，经济措施；第三，行政立法措施。例如法国，1939年成立“人口最高委员会”，颁布“家庭法”。规定给有3个以上孩子的家庭给予更多的补助；在拥有200名以上职工的工厂工作的妇女，可连续休产假两年，并允许丈夫分享假期等。

前苏联，规定多子女的家庭可以得到一次性或固定性的补助；多子女的女职工可以提前5年退休；获“母亲英雄”、“母亲光荣”、“母亲奖章”的多子女母亲有享受住房的优先权利；对30岁以下新婚夫妇提供住房一间，有一个孩子后改为提供单间一套的住房，有两个孩子后提供两间一套的住房；并且规定，对头胎给予50卢布的一次性补助，第二和第三胎均给予100卢布补助，产假延长到18个月。

新加坡最近采取了世界上前所未有的新的人口政策，鼓励有知识、有文化的妇女多生孩子。这项政策的具体内容是：持有高等教育文凭的妇女生一个孩子，工资可增长5%；生两个孩子，工资可增长10%；生三个孩子，工资可增长15%。为了保证人口质量，还规定，没有受过高等教育的妇女，生第二个孩子时须交纳罚款。

由于上述种种原因，世界人口在急剧地增长着，有人把人口的急剧增长称之为毫不引人注目却又担负着人类生死存亡的聚变。1987年7月11日，联合国宣布为世界50亿人口日。如果把这些人排列成队伍，每50厘米一个人一直排到月球，可以排成6.5列纵队，而其中整整一队半是中国人。假如也按此排列，中国人口可以绕地球赤道13圈多。

世界人口突破50亿大关，这个数字意味着一种迫切性。这种迫切性是指全世界都应当认识到控制人口对于人类已经是迫在眉睫了。这种迫切性除了上述讲的世界人口的惊人增长外，还来自人口运动的惯性、周期性和历史性。概括地讲，惯性是指人口的增加或减少的趋势都要经过一代人至几代人的时间才能改变，也就是有很强的滞后性；周期性是指有出生高峰，就必然伴随有上学高峰、就业高峰、婚育高峰、老年人高峰；历史性就是承认现实、接受现实。根据人口问题所出现的周期性和惯性，我们今天的50亿世界人口，将不可避免地要继续增长下去，达到80亿乃至100亿，至于世界人口究竟最终将稳定在多大的规模上，还要看人类近期内有效地控制生育的能力。

（四）未来世界人口的预测

关于未来世界人口的预测，各国及国际组织的有关学者、专家纷纷提出各种不同的看法和预测方案。早在60年代，当世界人口增长率上升之际，西方学者中有人曾认为人口增长就象脱缰的野马，根本无法控制。因此，有人估计到2000年世界人口可能达到100亿，甚至达到120亿。

在60—70年代，“人口危机”论和“人口爆炸”论盛行一时，好象世界人口发展已经进入危机阶段，大有地球上人满之患的灾难即将来临之势。其中有的人（H.福伊斯特，1960）甚至确定了“世界末日”为公元2026年11月13日星期五。他说：“如果人口象近二千年那样增长的话，届期世界人口总数将达到无穷大”。有的人（H.Fremlin）认为，如果以目前的增长率继续增长，则我们不能维持800—1000年。别的不说，那时由于人口（大约 10^{16} — 10^{18} ，整个地球表面空间每平方米约有120人）所产生的热量和维持这些人口生活所产生的能量将不能消散。这样一种增长，人们必须要有能够忍受5000（与太阳表面温度相等）的皮肤，这是不可能的事。也就是说，即使我们能够克服所有的人口限制因素（食物、空间、原料等），在不到1000

年的时间里我们也将达到“绝对极限”，而且将由我们自身的热量使我们白热化而毁灭。

但与此相反，有人从市场上开始出售比较有效的科学的避孕药具出发，同时又看到个别国家取得控制人口的成效，断言世界人口“增长速度将锐减，大约到 2000 年时就会接近零。结果，除个别小的、落后的地区外，人口增长再也不会被视为主要的社会问题”（D.J.Berger，1967）。

70 年代后期，各国以及国际组织的学者、专家纷纷改变以前的看法，重新修订过去对 2000 年世界人口数量预测，多数人降低了原来的预测方案。例如，联合国 1973 年所作的 2000 年世界人口数量预测，其中等方案为 64 亿；1978 年中等方案为 61.99 亿；1980 年估计数为 61.19 亿。

1988 年联合国公布的世界人口统计图表显示，2000 年世界人口将增至 62 亿。

近年来，联合国、世界银行和美国人口咨询社及一些人口学专家，根据现在世界人口增长率发展趋势，对世界人口有关问题作了预测，认为世界人口发展有以下十大趋势：

（1）到本世纪末，世界人口将达到 62 亿，年平均人口增长率为 15.6‰。发达地区人口增长较慢，占世界人口比例逐渐缩小；而发展中地区人口迅速膨胀，占世界人口比例大幅度上升。

（2）印度将成为世界上人口最多的国家，中国退居第二，非洲的尼日利亚跃居第三。

（3）由于种种原因，白种人在世界总人口中所占比例将日趋减少。

（4）欧洲是世界上人口发展最缓慢的地区，一些国家人口将出现“零增长”或“负增长”。

（5）到 2000 年，全世界人口平均寿命为 63.9 岁，2025 年为 70.4 岁。从 1950 年算起，75 年中增加 27.9 岁，平均每 3 年增加 1 岁多。

（6）世界人口死亡率将稳步下降，人口老化趋势将日趋严重。到本世纪末，老年人口将占总人口的 13.2%，一些国家将出现“超高龄化”。

（7）人口城市化发展迅速，城市人口将占世界总人口一半，超过 30 亿。

（8）人们为了避开城市污染和噪音，发达国家将出现城市空洞化现象，而农村将出现“城镇化”。

（9）墨西哥城人口到本世纪末将超过东京，成为世界第一大城市。

（10）由于男女死亡率不同及其他原因，世界上的女人数量将超过男人（世界人口发展和预测见表 3.2）。

二、中国人口问题

（一）中国人口发展历史

中国是世界上最古老的国家之一，有着五千年的古老文明发展史。同世界大多数国家一样，经历了社会发展的各个阶段。中国一直是世界上人口最多的国家。历代由于赋税、征兵的需要，都设有专管人口数字统计的官吏，如司民、户部等，定期稽查户口。各朝代都有关于人口数字的记载。中国人口发展经历了几次较大的起伏，大致可分为四个时期。

第一个时期，从夏禹到秦统一中国。中国现存最早的人口数字是夏禹时期的。据史书《帝王世纪·郡国志》记载：“禹平水土，定天下九州，抚有民 1355 万”。说明中国在公元前 2200 年进入阶级社会时，已有 1000 多万人口。

表 3.2 人口发展和预测

年 份	世界总计	发达地区	发展中地区	亚 洲	欧 洲	非 洲	大洋州	北美洲	拉丁美洲
人口(千人)									
1950	2524622	831855	1692768	1389545	572030	220274	12649	166073	164053
1955	2756729	886847	1869882	1523988	603915	244909	14154	181741	188022
1960	3037215	944909	2092307	1692330	639464	275246	15784	198662	215731
1965	3354273	1002832	2351440	1887111	675896	311547	17518	214040	248160
1970	3695584	1047217	2648367	2110581	701125	354663	19330	226390	283496
1975	4066320	1092181	2974140	2352742	727564	406581	21200	236379	321854
1980	4432147	1131339	3300809	2578610	749197	469982	22820	247835	363704
1985	4826328	1170153	3656175	2814756	770117	546166	24521	261026	409743
1990	5241911	1206190	4035721	3057833	789405	635350	26246	273779	459298
1995	5673871	1238560	4435311	3305174	806429	737716	27989	295130	511433
2000	6115514	1268824	4846690	3549458	822253	852885	29701	295469	565747
2005	6555146	1294628	5260518	3781370	835511	979510	31102	304983	622669
2010	6984816	1317469	5667347	3993439	848913	1115635	32456	314877	681494
2015	7404005	1338468	6065538	4188260	857751	1257672	33772	324615	741935
2020	7809952	1357121	6452832	4368782	867610	1401645	34983	333380	803552
2025	8192137	1373856	6818280	4531402	877157	1541702	36064	340614	865198
年平均增长率(%)									
1951-1955	1.76	1.28	1.99	1.86	1.09	2.12	2.25	1.80	2.73
1956-1960	1.95	1.27	2.27	2.12	1.15	2.36	2.20	1.79	2.79
1961-1965	1.99	1.19	2.33	2.20	1.12	2.48	2.08	1.49	2.80
1966-1970	1.94	0.87	2.38	2.26	0.73	2.59	1.97	1.12	2.66
1971-1975	1.91	0.84	2.32	2.19	0.74	2.73	1.85	0.86	2.54
1976-1980	1.72	0.71	2.08	1.85	0.59	2.90	1.47	0.95	2.45
1981-1985	1.70	0.68	2.04	1.77	0.55	3.00	1.44	1.04	2.38
1986-1990	1.65	0.61	1.98	1.67	0.50	3.02	1.36	0.95	2.28
1991-1995	1.58	0.53	1.89	1.57	0.43	2.99	1.29	0.81	2.15
1996-2000	1.50	0.48	1.77	1.44	0.39	2.90	1.19	0.71	2.02
2001-2005	1.39	0.40	1.64	1.27	0.32	2.77	0.92	0.63	1.92
2006-2010	1.28	0.30	1.50	1.10	0.27	2.64	0.85	0.64	1.82
2011-2015	1.17	0.32	1.36	0.96	0.25	2.40	0.79	0.61	1.70
2016-2020	1.07	0.28	1.24	0.85	0.23	2.19	0.71	0.54	1.61
2021-2025	0.96	0.24	1.10	0.73	0.22	1.91	0.61	0.43	1.48

注：根据联合国最新资料：世界人口 1984 年估计中位数为 47.63 亿人，人口年平均增长率为 1.67%；到 2000 年时，世界人口高位数为 63.67 亿人，中位数为 61.27 亿人，低位数为 58.98 亿人，年平均增长率分别为 1.74%、1.52%和 1.29%；2025 年时，世界人口高位数为 91.85 亿人，中位数为 81.76 亿人，低位数为 72.77 亿人，年平均增长率分别为 1.33%、0.93%和 0.59

%。系指整个欧洲，北美洲的美国、加拿大、亚洲的日本，大洋洲的澳大利亚和新西兰。包括前苏联。数字与前表不一致。是由于资料来源不同。资料来源：日本《人口统计资料集（1983）》1984年3月1日。

摘自鲁志强：《人口问题与发展战略决策》，1988。

周朝周成王初时人口约1371万。周庄王时约为1184万。到了春秋战国时期，由于连年战乱，人口有所减少。秦统一六国后，到始皇时（公元前205年），全国人口只有1200万，仍停留在夏禹时的水平。

这段时期是中国处于奴隶社会和由奴隶社会向封建社会过度的时期，随着社会经济发展，人口数量有一定增长，但增长速度是极其缓慢的。

第二个时期，从西汉开始到明末清初，这个时期共1600年左右，中国处于封建社会。这中间经过十几个朝代，农民起义和外族入侵等战争较多，所以人口有几次较大的波动。

第三个时期，从康熙赋税改革到新中国成立。由清康熙五十一年（公元1712年）实行赋税改革，人口急剧增长。乾隆六年（公元1741年），人口增至14341.2万；乾隆二十九年（公元1764年），人口突破2亿；乾隆五十九年（公元1794年），人口突破3亿（31328.2万）。道光十四年（公元1834年），人口已达到4亿（40100.9万）。随后经过咸丰、同治、宣统时期，人口有所变动，但总趋势是下降的，到了宣统年间（公元1909—1911年），人口为36814.6万。民国二十三年（公元1934年），人口为46340万。新中国成立时，1949年全国人口为54167万。

纵观中国人口历史的变化，可以看出，中国人口从奴隶社会初期的1300多万发展到新中国成立时的5亿4千万，前后共经历了4200多年，人口增加近5亿3千万，总平均每年增长人数只有12万多，平均年增长率为0.88%，而且大部分是近100—200年来增加的。

旧中国人口长期以来增加的如此缓慢，主要有3个原因，即战争、灾荒和瘟疫。

第四个时期，解放后至今。这期间除了1960年、1961年由于自然灾害，人口停止增长外，一直直线上升。1951年中国第一次人口普查，总人口数为5.74亿人；1964年中国第二次人口普查，总人口数为694581759人；1982年中国第三次人口普查，总人口数为1031882511人；1990年中国第四次人口普查，总人口数为1160017381人。

这段时期是中国人口迅速发展的时期。建国40年来，人口净增6亿多，平均每年净增人口1500—1600万，平均年增长率为14.4‰。

中国人口变动情况见表3.3—表3.5。

表3.3 中国古代人口略表

年 代	公元(年)	人口数(万人)	备 注
夏	2100(元前)	1355.4	《帝王世纪》
周	1100(元前)	1371.5	《帝王世纪》
秦	221(元前)	2000.0	《汉书·地理志》
西汉 平帝元始二年	2(公元)	5959.5	《后汉书》志二十三部国五
东汉 顺帝永和五年	140(公元)	4915.0	《隋书》卷二十九,《通考》户口一
隋 炀帝大业五年	609	4602.0	《通典》食货七
唐 天宝十四年	755	5291.9	《宋会要辑稿》食货十二
宋 真宗景德三年	1006	1628.0	《元史》卷十六世祖本纪十三
元 世祖至元二十八年	1291	5984.9	《明太祖实录》卷一四
明 洪武十四年	1381	5987.3	《明成祖实录》卷二十六
永乐元年	1403	6659.8	《明孝宗实录》卷一九四
弘治十五年	1502	5090.8	《明神宗实录》卷三九七
万历三十年	1602	5630.5	《东华录》顺治卷二十五
清 顺治十八年	1661	(1913.7)丁数	《东华录》雍正卷二十五
雍正十二年	1734	(2735.5)丁数	《清实录》高宗卷一五七
乾隆六年	1741	14341.2	《清实录》高宗卷一四六七
乾隆五十九年	1794	31328.2	《清实录》宣宗卷二六一

(摘自胡崇庆：胡焕庸人口地理选集，1990。)

表 3.4 1841—1949 年中国人口变动

年 代	公 元	总数(人)	资 料
道光二十一年	1841 年	413457311	《清实录》宣宗卷三六四
咸丰元年	1851 年	432164047	《东华续录》
咸丰十一年	1861 年	266889845	《东华续录》
同治十年	1871 年	272354831	《东华续录》
宣统年间	1909—1911 年	368146520	《中国经济年鉴》(1934)
民国二十三年	1934 年	463400000	胡焕庸：《中国人口之分布》
民国三十八年	1949 年	541670000	《中国经济年鉴》(1981)

(摘自胡崇庆：胡焕庸人口地理选集，1990)

表 3.5 中国人口数及构成

(年底数)

年份	总人口 (万人)	按性别分				按城乡分			
		男		女		市镇总人口		乡村总人口	
		人口数 (万人)	比重 (%)	人口数 (万人)	比重 (%)	人口数 (万人)	比重 (%)	人口数 (万人)	比重 (%)
1949	54167	28145	51.96	26022	48.04	5765	10.6	48402	89.4
1950	55196	28669	51.94	26527	48.06	6169	11.2	49027	88.8
1951	56300	29231	51.92	27069	48.08	6632	11.8	49668	88.2
1952	57482	29883	51.90	27649	48.10	7163	12.5	50319	87.5
1953	58796	30468	51.82	28328	48.18	7826	13.3	50970	86.7
1954	60266	31242	51.84	29024	48.16	8249	13.7	52017	86.3
1955	61465	31809	51.75	29656	48.25	8285	13.5	53180	86.5
1956	62828	32536	51.79	30292	48.21	9185	14.6	53643	85.4
1957	64663	33469	51.77	31184	48.23	9949	15.4	54704	84.6
1958	65994	34195	51.82	31799	48.18	10721	16.2	55273	83.8
1959	67207	34890	51.91	32317	48.09	12371	18.4	54836	81.6
1960	66207	34283	51.78	31924	48.22	13073	19.7	53134	80.3
1961	65859	33880	51.44	31979	48.56	12707	19.3	53152	80.7
1962	67295	34517	51.29	32778	48.71	11659	17.3	55636	82.7
1963	69172	35533	51.37	33639	48.63	11646	16.8	57526	83.2
1964	70499	36142	51.27	34357	48.73	12950	18.4	57549	81.6
1965	72538	37128	51.18	35410	48.82	13045	18.0	59493	82.0
1966	74542	38189	51.23	36353	48.77	13313	17.9	61229	82.1
1967	76368	39115	51.22	37253	48.78	13548	17.7	62820	82.3
1968	78534	40226	51.22	38308	48.78	13838	17.6	64696	82.4
1969	80671	41289	51.18	39382	48.82	14117	17.5	66554	82.5
1970	82992	42686	51.43	40306	48.57	14424	17.4	68568	82.6
1971	85229	43819	51.41	41410	48.59	14711	17.3	70518	82.7
1972	87177	44813	51.40	42364	48.60	14935	17.1	72242	82.9
1973	89211	45876	51.42	43335	48.58	15345	17.2	73866	82.8
1974	90859	46727	51.43	44132	48.57	15595	17.2	75264	82.8
1975	92420	47564	51.47	44856	48.53	16030	17.3	76390	82.7
1976	93717	48257	51.49	45460	48.51	16341	17.4	77376	82.6
1977	94974	48908	51.50	46066	48.50	16669	17.6	78305	82.4
1978	96259	49567	51.49	46962	48.51	17245	17.9	79014	82.1
1979	97542	50192	51.46	47350	48.54	18495	19.0	79047	81.0
1980	98705	50785	51.45	47920	48.55	19140	19.4	79565	80.6
1981	100072	51519	51.48	48553	48.52	20171	20.2	79901	79.8
1982	101541	52310	51.52	49231	48.48	21154	20.8	80387	79.2
1983	102495	52865	51.58	49630	48.42	24126	23.5	78369	76.5
1984	103475	53423	51.63	50052	48.37	33006	31.9	70469	68.1
1985	104532	54011	51.67	50521	48.33	38244	36.6	66288	63.4
1986	105732	54605	51.65	51116	48.35	43753	41.4	61968	58.6

注：

1. 本表各年人口包括大陆 29 个省、自治区、直辖市和现役军人数字。

2. 市镇总人口是指辖区内全部人口；乡村总人口是指县人口，但不包括镇人口。1984 年，建镇标准有调整，新建镇较多，因此 1984 年以来市镇总人口增加较多。

（摘自鲁志强：人口问题与发展战略决策，1988。）

（二）中国人口的现状和特点

截至 1990 年 7 月 1 日零时，中国大陆人口为 1133682501 人，加上台湾、香港、澳门的人口，中国总人口数为 1160017381 人。大陆各省、市、自治区 1989 年 7 月 1 日至 1990 年 6 月 30 日的一年内，出生人口为 23543188 人，死亡人口为 7045470 人，年增长人口为 16497718 人。

通过中国第四次人口普查的数据还表明，大陆 29 个省、自治区、直辖市和现役军人人口中，文盲、半文盲人口（15 岁及 15 岁以上不识字或识字很少的人）为 180030060 人，同 1982 年第三次人口普查数目相比，文盲、半文盲人口占总人口的比例由 22.81% 下降到 15.88%。

第四次人口普查的数据还表明，中国计划生育工作取得明显成效，人口猛增的势头得到初步控制。自全面推行计划生育工作以来，中国大约少生了两亿多人。但中国面临的人口形势依然严峻，实现控制人口的任务仍然十分艰巨。

中国人口的现状和特点可概括为以下几点：

（1）基数大 1990 年中国人口已达 11.6 亿，居世界第一位。由于人口基数大，因此每年出生和净增的绝对数量很大，每年净增加 1600 万人，相当于澳大利亚全国人口。我国一年净增人口数相当于美国 7 年中净增的人口数量。

（2）增长速度快从中国人口发展的几个具有代表性的历史时期来看，中国人口增长速度较快，尤其是新中国成立后，人口增长更是突飞猛进。从公元前 2245 年到公元前 207 年，人口增长率基本处于停滞状态；公元 2 年至 1685 年，年平均增长率为 0.3‰；1685 年至 1849 年，年平均增长率为 8.6‰；1849 年至 1949 年，年平均增长率为 2.7‰；1949 年至 1982 年，年平均增长率为 19.7‰。之后，随着中国计划生育工作的深入开展，人口增长率有所下降，1990 年人口增长率为 11.7‰。

（3）年龄构成轻解放前，由于中国人口发展具有高出生率、高死亡率和低增长率的特点，因此，人口年龄结构表现为接近成年人口型。

解放后，由于长期保持高出生率、低死亡率和高增长率，加上两次生育高峰，这就使中国人口年龄构成发生了很大变化。目前，14 岁以下人口占全国总人口的 35%，65 岁以上的老年人口只占全国总人口的 5%。而经济发达国家，14 岁以下人口一般只占总人口的 24%，65 岁以上的老年人口却占总人口的 11%。这表明中国属于人口年龄构成轻的国家。它意味着在今后若干年内，劳动就业人数、进入婚育年龄的人数增多，其结果必然造成人口增加。

（4）素质低解放后，中国人口在身体素质和文化素质方面都有了较大的提高。在身体素质方面，人口平均寿命由解放前的 35 岁，提高到 1982 年的 68 岁；人口死亡率由解放前的 28‰ 下降到 70 年代以来的 7.6‰ 以下。在文化素质方面，根据 1987 年全国 1% 人口抽样调查核算，有文化的人口达 65.3

%，文盲、半文盲人口比率下降到 20.6%，1990 年再次下降到 15.88%。

但是，从整体上来说，中国的人口素质还是比较低的。婴儿死亡率比发达国家高，人口预期寿命比发达国家短。据联合国教科文组织统计，目前每万人中的大学生人数为：美国 509 人，日本 212 人，印度 52 人，而中国只有 13 人。

(5) 分布不均衡中国人口分布不均衡主要表现在以下三个方面：

第一，地理分布不均。由于自然环境条件限制，中国目前仍有十分之一的地区无人居住。中国人口高度集中在东南部地区，而西北部人口很稀少。著名人口地理学家胡焕庸先生于 1935 年首先提出了体现我国人口地区分布差异的一条基本分界线，即“瑗瑋—腾冲线”。按此线划分，东南一侧占全国总面积的 36%，人口则占全国总人口的 96%；西北一侧占全国总面积的 64%，人口则只占全国总人口的 4%。

1982 年，中国科学院地理研究所将“瑗瑋—腾冲线”进行了修改，将此线向南延伸，经过瑞丽止于中缅边界，约延伸 100 公里。按此新线划分，东南一侧占全国总面积的 42.9%，人口则占全国总人口的 94.4%；西北一侧占全国总面积的 57.1%，而人口只占全国总人口的 5.6%。可见东密西疏的人口分布格局在中国具有稳定性。

从海陆关系来看我国人口分布状况，具有从沿海向内地人口逐渐由稠密变为稀疏的特点（表 3.6）。

从表 3.6 中可以看出，随着距离海岸的距离增加，人口密度逐渐减少。距海岸带 200 公里以内的人口密度为 407 人每平方公里，而距离海岸带 1000 公里以上的人口密度只有 21 人每平方公里，体现了东南沿海密集而西北内地稀疏的特点。

表 3.6 距离海岸不同距离带人口分布

距离 (km)	0—200	200—500	500—1000	1000—
人口 (10 ⁴)	39054	26740	33452	10344
占总人数 (%)	35.9	24.3	30.4	9.4
面积 (10 ⁴ km ²)	97	133	235	495
占总面积 (%)	10.1	13.9	24.5	51.5
人/km ²	407	201	142	21

(摘自周光复等：中国人口国情，1990。)

中国人口除了沿海集中，在水平方向上分布很不平衡外，在垂直分布上也很不平衡。人口分布集中在地势平坦的东部平原地区。因中国地势西高东低，故垂直方向也反映出人口东密西

表 3.7 中国人口垂直分布

海拔高度 (m)	154-200	200-500	500-1000	1000-2000	2000-4880
人口 (10 ⁴)	66904	20798	10014	10013	2311
占总人口 (%)	60.8	18.9	9.1	9.1	2.1
面积 (10 ⁴ km ²)	44.5	97.2	162.5	239.9	315.9
占总面积 (%)	15.0	10.2	16.9	25.0	32.9
人/km ²	463	214	62	42	7

(摘自周光复等：中国人口国情，1990。)

从表 3.7 中可以看出，中国 80% 左右的人口集中在面积只占全国总面积四分之一的海拔 500 米以下的地区。其中 200 米以下的平原地区的人口占全国总人口的 60.8%。而海拔 2000 米以上地区，其面积占全国总面积的 33%，人口却只占全国总人口的 2%。

总之，中国人口地理分布的上述特征与世界人口地理分布情况基本一致，即由沿海到内地，由平原向山地、高原人口逐渐稀疏，这是由人类生存对环境的要求所决定的。同时，这种分布趋势也是与经济布局相适应的。

第二，农村人口比重大。中国是一个农业大国，农村人口占绝大多数。尽管随着工业化的迅速发展，大批农村人口转为城镇人口，农村人口占全国总人口的比例已由 1949 年的 89.4% 下降到 1980 年的 80.6%、1990 年的 73.8%，但目前农村人口仍有 8.5 亿。大量的农村人口给土地等自然资源造成了巨大压力；同时，农村人口的素质，尤其是文化素质远不如城市。

第三，城市人口增长过快。据统计，1950 年中国共有城市 132 座，1986 年增加到 353 座，1990 年达到 461 座。城市人口占全国总人口的比例由 1949 年的 10.6% 上升到 1980 年的 19.4%，1986 年的 22.13%，1990 年达到了 26.23%，城市人口约为 3 亿左右。

(6) 人口发展与国民经济的发展不相适应解放后，中国经济有了很大发展，人口素质有了很大提高。但总的来看人口数量增长过快，生产的增长速度却较慢，生产的产品只够生活消费，难以进行资金积累和提高人口素质，人口增长阻碍了经济增长。要打破这种恶性循环，就必须控制人口数量，提高人口质量。

(三) 中国今后人口的发展

实行计划生育是中国的一项基本国策。中国人口政策的基本要求是：晚婚、晚育、少生、优生。

晚婚、晚育对控制人口增长，降低出生率，延长平均世代间隔以及调节生育高峰等具有重要作用；少生是控制人口出生率的关键；优生即是保证人口质量，提高人口素质。

中国的人口政策是根据中国的人口现状和经济发展水平而制定的，考虑到了国家和人民的长远利益，这是当务之急，而且也是关系到子孙后代和民族兴衰的百年大计。

三、人口增长对环境的影响

(一) 人口增长对土地资源的影响

土地资源是人类赖以生存的基础。在人类生存所需的食物能量的来源中，耕地上生长的农作物占 88%；草原和牧区占 10%；海洋占 2%。有人预

测，随着对海洋的开发利用，海洋为人类提供的食物能量将会增加。从目前来看，全球适于人类耕种的面积约为 30 亿公顷，人均只有 0.5 公顷。但是，这有限的耕地资源仍在不断地减少。其主要原因是：第一，由于人口的增长，城乡的不断扩展、工矿企业的建设、交通路线的开辟等，每年约有 1000 万公顷耕地被占用；第二，为了解决因人口增加而增加的粮食需求，一方面对土地过度利用，其结果是耕地表土侵蚀严重，肥力急剧下降；另一方面为了增加耕地面积，不得不砍伐森林、开垦草原、围湖造田，其结果破坏了生态平衡。上述两个方面的最终危害是导致土地沙化。全世界每年因沙化丧失的土地达 600 万—700 万公顷。第三，为了提高单位面积粮食产量，除了推广优良品种，改良土壤和精耕细作外，就是大量施用化肥和农药。而后者已成为污染土壤的重要因素。上述原因促使世界人口增长与土地资源减少之间的矛盾越来越尖锐，人口增长对土地资源的压力越来越大。

中国的情况更为突出，随着人口的增加，尽管每年都开垦一定数量的荒地，但人均耕地面积还是逐年减少：1950 年为 0.18 公顷；1980 年下降到 0.1 公顷；1990 年又下降到 0.085 公顷，按此速度发展下去，估计到 2000 年，人均耕地面积只有 0.069 公顷了。也就是说，由于人口的增加，每公顷耕地需要养活的人口数在不断增加：1950 年为 5.5 人，1980 年增加到 9.8 人，1990 年增加到 11.8 人；到 2000 年每公顷耕地就要养活 15 人。

（二）人口增长对水资源的影响

淡水是陆地上一切生命的源泉。地球上的淡水资源并不丰富。淡水资源主要来自大气降水。大陆每年总降水量为 11 万立方公里，但被人类利用的只有 7000 立方公里。即使加上人类通过筑坝拦洪每年所控制的 2000 立方公里左右，人类有可能利用的淡水也只有 9000 立方公里。

由于人口分布极不均匀，降水的分配量无论从空间上还是时间上都极不均匀。因此，世界上许多地区淡水不足。加上人口激增，用水量不断增加，使本来就不丰富的淡水资源显得更加紧张，目前全世界已有十几个国家发生水荒。

中国的淡水资源比较丰富，但按人均占有量来看，水资源并不多。目前，中国可利用水量年均只有 1.1 万亿立方米。由于人口分布不均匀，水资源分布不均匀，造成不少地区缺水。根据中国经济发展规划，2000 年工农业总产值预计比 1980 年翻两番，即增加至 4 倍，年均增长率为 7.18%，这就意味着用水量也要逐年增加。另外，在保持人均耗水量不变的情况下，每年至少应该增加 1.2% 的用水量，这就给本来已经十分紧张的水资源带来更大的压力。再有，因“三废”排放而造成的水质污染，减少了有限的淡水资源，突出了水资源的危机。

（三）人口增长对能源的影响

能源是人类生活和生产所必需。随着人口增加和工业现代化进展，人类对能源的需求量越来越大。据统计，1850—1950 年的 100 年间，世界能源消耗年均增长率为 2%。而 60 年代以后，工业发达国家年均增长率达到 4%—10%，出现能源紧缺。能源属不可再生资源，储量是有限的，而世界能源消耗增长是必然趋势，因此，能源危机是世界性的，它的出现只是一个时间早晚的问题。

人口增长不仅使能源供应紧张，缩短了煤、石油、天然气等化石燃料的耗竭时间，而且还会加速森林资源的破坏。因为发展中国家的燃料主要来源

于树木。

中国能源的储量和产量绝对数量很大，但人均占有量很少。在现代社会中，要满足衣食住行和其它需要，人均能源年消耗量不得少于 1.6 吨标准煤。发达国家远远超过此数量，以美国为例，1979 年美国人均消耗能源折合标准煤达 12.4 吨，相当于世界人均水平的 6 倍。如果按人均能源年消耗量最低值为标准，到 2000 年中国人口控制在 12.6 亿计算，那时中国能源需求最少不能低于 20 亿吨标准煤。这与实际情况相差很远。1980 年中国能源消耗量仅为 6.36 亿吨。可见，人口增长对能源的压力。

（四）人口增长对大气质量的影响

人口增长必然要消耗大量的能源、矿物资源和其他物料。上述物质在燃烧、冶炼和生产过程中把大量的二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物、碳氢化合物等排入大气，这些污染物质经过物理、化学、光化学反应，引起酸雨、光化学烟雾、臭氧层空洞及温室效应，破坏了大气质量，使全球气温上升，影响气候，从而引起生态系统平衡的失调。

此外，人口增长也对城市环境和工业发展产生影响。城市人口激增，不仅会造成就业困难和社会问题，而且带来城市环境的严重污染，包括大气和水的污染以及噪声、垃圾、恶臭等危害。

为了最大限度地解决就业问题，在企业中很难采用自动化技术与设备来提高劳动生产率。同时又不得不允许他们开办街道小厂和社队企业，这些小厂设备差、技术弱、排放“三废”浓度高，对环境污染很严重，使社会经济与生活环境的矛盾更为突出，以致阻碍了工业的持续发展。

关于人口增长对环境的影响，D.L.Meadows 提出了一个“人口膨胀—自然资源耗竭—环境污染”的世界模型并作了形象的概括。该模型认为，人口激增必然导致下列三种危机同时发生：

（1）土地利用过度，因而不能继续加以使用，结果引起粮食产量的下降。

（2）自然资源因世界人口过多而发生严重枯竭，工业产品也随之下降。

（3）环境污染严重，破坏惊人，从而使粮食急剧减产，人类大量死亡，人口增长停止（图 3.5）。

应该承认，该模型只是一种纯数字计算的结果，它忽视了人类控制自身发展的主观能动性。该模型在某种程度上过分地宣扬了人多为患的论点，但也确实反映了生态平衡与人口增长的密切关系。

总之，人口增长对环境的冲击是巨大的、多方面的、有时甚至是灾难性的，切不可等闲视之（人口与能源、环境等相互牵连的领域见图 3.6）。

图 3.5 人口增长-自然资源耗竭-环境污染的世界模型

a. 在人均粮食和人均工业产量达到高数值后，人口和污染仍在继续增加，其结果是死亡率的剧增。

b. 资源翻一番，此时工业化达到更高的峰值，但到 2100 年时仍和 a 一样，所不同的是环境污染已经严重到无法控制的地步。

（摘自李宝恒译：增长的极限，1984。）

图 3.6 互相牵连的领域

（资料来源：王肖萍等译：世界的未来——关于未来问题一百页，1985。）

第二节 人口动态学

人口学内容可以分为人口静态学和人口动态学两部分。人口静态学是研究分析特定地区或国家在特定时间内,不同性别、不同年龄、不同婚姻状况、不同文化程度、不同职业或就业情况、不同收入、不同民族、语言或宗教信仰等的人口数;而人口动态学的任务则是研究上述各种人口资料的时间变动率,分析其原因,并对将来人口的趋势作出预测。

一、种群生态学的基本概念

(一) 种群的定义

种群就是指占据一定面积并经常有品种或变种之间杂交的同一物种的一个群体。种群虽由个体组成,但具有其个体成员所没有的某些特征。如个体有出生、成长和死亡,但只有种群才有出生率、死亡率和增长率以及在时间上和空间上扩展的方式;个体不能演化,但种群能演化,即种群能随时间的进程而改变其特征,这是自然选择的结果。

(二) 描述种群的主要参数

(1) 种群的大小:指构成该种群的个体总数。

(2) 种群的生物量:指一种群个体的总重量。

(3) 种群的三种速率:出生率、死亡率和增长率。

出生率:指种群中出生个体的比率,可用两种方式表示。第一,单位时间内(如一年)所出生个体的数目;第二,单位时间内所出生个体占种群的百分数。

死亡率:指种群中死亡个体的比率。与出生率一样,也可以用绝对数目或相对百分比表示。

增长率:指种群净增长的速率。可用三种方式表示。第一,单位时间内净增长的个体数目;第二,单位时间内净增长的生物量;第三,单位时间内净增长的百分数。对于人口问题重要的是净增长的百分数。

(三) 种群的结构

种群的结构通常是指种群的年龄结构,此外,也可考虑其性别结构或世代结构等。年龄结构是指种群中的个体按其生命史不同阶段的分组。种群的年龄结构是种群的重要特征之一,它影响着种群的出生率、死亡率和增长率,同时还对其它物种与环境发生影响。

人口正是由不同的世代相互重叠而构成的。通常用不同年龄组的人口百分数表示这种结构,这就是所谓的年龄金字塔或人口百岁图。它为比较不同人口的年龄结构提供了一个简便的手段,而且也是预测人口未来趋势的重要依据(图3.7和图3.8)。

从上述各图中可以清楚地看出美国、瑞典、墨西哥和中国人口结构的特点。以中国人口金字塔为例(图3.8),1982年人口金字塔上出现了两个外凸和两个内凹:25—34岁年龄组和10—19岁年龄段出现扩张,而20—24岁和0—9岁两个年龄段出现收缩。两次外凸对应着建国初期和1963—1968年两个人口出生高峰时期。两次内凹对应着两次人口下降时期,一次是对应着1960—1962年三年困难时期生育率下降、死亡率上升,导致人口增长率突然下降;另一次是进入70年代以后,计划生育工作开展并取得成效,使人口增长得到控制的结果。

瑞典人口学家桑德巴将人口结构划分为三种类型:增长型、静止型和缩

减型，分别代表着人口的不同发展趋势（表 3.8）。按照桑德巴的分类标准，中国从 30 年代开始到 1964 年，人口结构均属于典型的增长型人口。70 年代人口增长速度趋缓，从增长型人口向静止型人口过度。这种过度状态的人口年龄结构仍有潜在的增长动能。

(a) 美国的；(b) 瑞典的；(c) 墨西哥的
(资料来源：同图 3.4。)

图 3.8 中国人口年龄金字塔

(资料来源：鲁志强：人口问题与发展战略决策，1998。)

表 3.8 桑德巴人口类型划分标准 (%)

年龄 \ 类型	增长型	静止型	缩减型
< 15	40	26.5	20
15—49	50	50.5	50
> 50	10	23	30

(摘自鲁志强：人口问题与发展战略决策，1988。)

二、生物种群的增长曲线

自然界中存在几种不同的种群增长曲线，这些曲线大都有一个共同的特点，即一般都会逐渐增长到某一固定值，这个固定值被称为“环境容量”。

(一) 指数曲线 (S 型曲线)

当一个量在一定时期内按其总量的一定百分比增加时，这个量就表现为指数增长。但到达环境容量时，则停止增长，而保持稳定的种群数。指数增长是一种常见的过程，它具有两个特点：每一项都大于其前面所有各项的总和；开始时增长较慢，当基数积累到一定程度后，总量就飞速地增长，这就是通常所说的“起飞”（图 3.9）。

(二) 振荡返回曲线 (阻尼曲线)

这种增长呈波浪式在环境容量值附近变动，高于或低于环境容量值的幅度很小，最终又逐渐趋于稳定的种群数。这属于正常的增长曲线，其增长对环境容量没有影响（图 3.10）。

(三) 突跃下降曲线

这是一种不正常的增长曲线。种群增长超过环境容量很多，使环境中某些要素受到破坏，导致环境容量下降，种群数量减少，最后形成新的环境容量，以适应种群的发展（图 3.11）。

(四) 爆发-灭绝曲线 (J 型曲线)

这也属不正常的增长曲线。开始时环境对种群生长繁殖有利，使种群数量猛增；但当灾难突然来临时，整个种群陷入几乎灭绝的境界（图 3.12）。导致这种惨局的原因是多方面的，包括天气突变、严寒袭击、食物耗竭、病毒传染、废弃物毒害或其它因素等。

图 3.11 突跃下降曲线图 3.12 爆发-灭绝曲线

（五）逻辑增长曲线

种群的增长呈 S 型，其增长最终必然受到环境容量的限制。逻辑增长曲线的设想是任何个体都对其他个体具有负效应，其结果或者造成种群出生率下降，或者造成死亡率上升。按照逻辑增长，当种群较小时其增长曲线与指数增长很接近。但逻辑增长方程假定种群在任何水平上对某种资源的竞争都要减少种群的增长。增长的限度与种群的大小成正比。因此，随着种群大小的增加，其增长率下降，即经过一段大体上是指数增长以后，种群进入另一阶段——线性增长阶段。这时由于资源的限制，增长率下降。种群以大致恒定的数量增殖，增长曲线呈线性状态。最后资源进一步减少，增长率越来越低，种群的大小达到某个固定值，这时出生率等于死亡率，也可以说种群大小处于与其环境容量相适应的水平（图 3.13）。

逻辑增长曲线有两个特点：环境容量是一个随时间变化的量；逻辑增长曲线有一个理论上的平衡点，一旦达到这一点，只要系统不受干扰，出生率总是等于死亡率，种群就永远保持其大小。一旦超过这个数量，死亡率就增加，使种群回复到其平衡点，反之也一样。一个逻辑种群保持恒定就意味着种群与其环境的和谐一致。

应当指出的是，这种逻辑增长曲线只适合于实验室条件下一些小型生物种群的增长过程，而自然条件下较大型生物的增长却不符合这个规律。

第三节 人口预测模型

一、人口预测的必要性和可能性

人口预测就是根据一个国家、一个地区人口的现状，考虑到社会政治经济条件对人口再生产和转化的影响，分析其发展规律，运用科学的方法测算未来某个时期人口的发展状况。人口预测首先是针对人口数目，其次还可预测人口的出生率、死亡率、增长率，以及人口性别和年龄构成。在此基础上，还可以对未来人口的地区分布、婚姻状况、家庭构成、城乡人口比例等进行预测。

人口预测是随着社会经济发展而提出来的。在过去的几千年里，由于人类社会生产力水平低，生产发展缓慢，人口变动和增长也不明显，生产自给自足或进行简单的以货易货，因而对未来人口发展变化的研究并不重要，根本不用进行人口预测。而当今社会，经济发展迅速，生产力达到空前水平，这时的生产不仅为了满足个人需求，还要面向社会的需求，所以必须了解供求关系的未来趋势。而人口预测是对未来进行预测的各环节中的一个重要方面。准确地预测未来人口的发展趋势，制定合理的人口规划和人口布局方案具有重大的理论意义和实用意义。

任何事物发展变化都是有一定规律的，因此人口预测不仅是必要的，也是可能的。人口发展中的出生率、死亡率、自然增长率和人口总量四者之间是紧密相关的。出生率、死亡率直接影响着自然增长率和人口总量。尽管出生率和死亡率在不断变化，但这种变化是逐渐的，有一定的规律性，只是不十分明显罢了。因此人口预测是可行的。

人口预测有短期、中期、长期预测之分，一般应按人口发展的固有周期而定。人口发展周期与人口平均期望寿命有关。世界不同国家和地区的人口平均期望寿命相差较大，因此，各个国家和地区要根据实际情况进行短期、中期、长期的人口预测。例如，中国人口预期寿命约为 70 岁左右，因此，长期人口预测最好预测到 70 年以后，中期 40—50 年，短期可以是 5 年、10 年或 20 年。表 3.9—表 3.11 列举了不同作者对中国 2000 年（短期）、2030 年（中期）和 2050 年（长期）的人口预测。

从表 3.9—表 3.11 中可以看出：4 位预测者的短期预测结果基本相近。其中高等方案人口预测总数为：127300 万—130363 万，最多相差 3063 万；中等方案人口预测总数为：119630 万—125566 万，最多相差 5936 万；低等方案人口预测总数为：113000 万—121167 万，最多相差 8167 万。从短期预测的三种方案（高、中、低）中可以看出，高等方案更接近中国的人口发展情况。4 位预测者的中期预测结果与短期预测结果相比相差较大，高等方案最多相差 18800 万；中等方案最多相差 24400 万；低等方案最多相差 19471 万。4 位预测者的长期预测结果与短期预测结果相比相差更大，高等方案最多相差 41200 万；中等方案最多相差 47600 万；低等方案最多相差 8800 万。

表 3.9 2000 年的中国人口数量

预测者	预测时间	预测情况	人口总数 (万)	0—14岁		15—64岁		65岁以上	
				人数 (万)	%	人数 (万)	%	人数 (万)	%
联合国 人口司	1982	高	130363	34209	26.2	87561	67.2	8593	6.6
		中	125566	30088	24.0	86885	69.2	8593	6.8
		低	121167	26955	22.2	856189	70.7	8593	7.1
世界 银行	1984	A	127300	32820	25.8	85030	66.8	9450	7.4
		B	119630	25150	21.0	85030	71.1	9450	7.9
		C	117970	23480	19.9	85030	72.1	9460	8.0
宋健 等人	1979	TFR=2.3	128600	35400	27.5	83800	65.2	9400	7.3
		TFR=2.0	122200	30600	25.0	82200	67.3	9400	7.7
		TFR=1.5	113000	22900	20.3	80700	71.4	9400	8.3
田 雪 原	1984	高位	128200	35400	27.6	83700	65.3	9100	7.1
		中位	121100	28800	23.8	83200	68.7	9100	7.5
		低位	116200	25200	21.7	81900	70.5	9100	7.8

(摘自鲁志强：人口问题与发展战略决策，1988)

从上述人口预测结果可以看出，短期预测比长期预测的结果更接近实际发展情况。因此，人口预测只能根据当时所掌握的情况和当时能预见到的变化进行，不能把这种预测看成是固定不变的。随着事物发展，认识的提高，应该不断地修改原来的预测方案，使之更准确地反映若干年以后的发展状况。

二、人口预测模型

预测未来人口发展状况的方法较多，其依据有三：第一，根据现有人口的数量、性别、年龄构成、出生率、死亡率、迁移率等预测未来人口数量的变动；第二，根据过去某一时期内人口增长的速度或绝对数，预测未来人口发展状况；第三，根据影响人口总数变动的因素进行人口预测。具体方法主要有两大类，即数学方法和人口学方法。

表 3.10 21 世纪中国人口预测数据

预测者	预测时间	预测情况	2030年						
			人口总数 (万)	0—14岁		15—64岁		65岁以上	
				人数 (万)	%	人数 (万)	%	人数 (万)	%
联合国 人口司	1982	高	160715	33685	21.0	108439	67.5	18592	11.6
		中	146009	267207	18.3	100697	69.0	18592	12.7
		低	133871	21506	16.1	93774	70.0	18592	13.9
世界 银行	1984	A	158340	32100	20.3	102760	64.9	23480	14.8
		B	143680	26680	18.6	93520	65.1	23480	16.3
		C	122480	16030	13.1	82970	67.7	23480	19.2
宋健 等人	1979	TFR=2.3	168700	37000	21.9	103600	61.4	28100	16.7
		TFR=2.0	146900	27500	18.7	91300	62.2	28100	19.1
		TFR=1.5	117700	15500	13.1	74100	63.0	28100	23.9
田 雪 原	1984	高位	149900	36600	24.4	93800	62.6	19500	13.0
		中位	122500	23000	18.8	80100	65.4	19400	15.8
		低位	114400	21900	19.1	73200	64.0	19300	16.9

(摘自鲁志强：人口问题与发展战略决策，1988。)

在《人口与发展》(中国人民大学人口理论研究所)和《中国人口问题研究》(刘铮)中，对人口预测的数学方法和人口学等方法作了详细的介绍，这里作一简单的综述。

(一) 数学预测方法

根据已知人口数，按数学公式推算出所求人口数。在进行推算时需要根据情况确定恰当的假设，选择相应的解析函数和数学表达式。常用的数学函数和表达式有以下几种：

表 3.11 21 世纪中国人口预测数据

预测者	预测时间	预测情况	2050年						
			人口总数 (万)	0—14岁		15—64岁		65岁以上	
				人数 (万)	%	人数 (万)	%	人数 (万)	%
联合国 人口司	1982	高							
		中							
		低							
世界 银行	1984	A	164680	31010	18.8	102900	62.5	30770	18.7
		B	144970	26440	18.3	87760	60.5	30770	21.2
		C	108560	15710	14.5	62080	57.2	30770	28.3
宋健 等人	1979	TFR=2.3	191300	37200	19.5	110800	57.9	43300	22.6
		TFR=2.0	154200	24700	16.0	87600	56.8	41900	27.2
		TFR=1.5	108700	11300	10.4	56900	52.3	40500	37.3
田 雪 原	1984	高位	150100	31500	21.0	97000	64.6	21600	14.4
		中位	106600	17500	16.4	68000	63.8	21100	19.8
		低位	99900	18000	18.0	61600	61.7	20300	20.3

(摘自鲁志强：人口问题与发展战略决策，1988)

1. 线性函数表达式 假定历年人口增减的绝对值相同，其表达式为：

$$P_t = P_0 (1 + Yt)$$

式中： P_t ——未来人口数

P_0 ——基期人口数

Y ——人口年平均增长数

t ——预测年限

2. 指数函数表达式 假定人口的相对增减比例始终保持不变，按一个不变的自然增长率增加，即假定人口按几何级数发展，其公式为：

$$P_t = P_0 e^{rt} \text{ 或 } N_t = e^{rt}$$

式中： e 为自然对数的底，其近似值为2.7183。

3. 二次函数表达式 假定人口数的动态数列的绝对增长量并非固定不变，而是有一种逐渐变成常数的趋势。即假定人口绝对量的增减为某一数量，人口数按抛物线发展。最常用的二次抛物线公式为：

$$P_t = a + bt + ct^2$$

式中： a 、 b 、 c 是这条抛物线的参数，可用最小二乘法求得。

4. 罗杰斯蒂曲线表达式 假定人口增长速度在前期越来越快，而后期发展速度逐渐放慢，一直到几乎完全停止下来。在实际工作中通常使用简化了的罗杰斯蒂曲线公式：

$$Y = \frac{1}{a + bc^x} \text{ 或 } \frac{1}{Y} = a + bc_x$$

5. 回归模式 假定人口的变动与社会经济因素之间存在着某种依存关系，根据影响人口总数或某些人口组的种种因素建立多元模式，其中一切因素都作为自变量，而所需计算的人口数作为因变量。这种预测方法也被称为

“经济形式的人口预测”。回归方程式如下：

$$P_t = a_1 P_{t-1} + a_2 P_{t-2} + \dots + a_n P_{t-n}$$

(二) 人口学方法 人口学方法也有人称之为“分要素推算法”，即先分别预测影响人口总数的各项因素，如出生数、死亡数、迁移数，然后再合起来推算未来人口总数量。最简单的计算公式是平衡方程：

$$P_t = P_0 + B - D + I - E$$

式中： P_t ——预测期人口数
 P_0 ——基期人口数
 B ——0-t 时期内人口出生数
 D ——该时期死亡人数
 I ——该时期迁入人数
 E ——该时期迁出人数

此预测方法比较复杂，但预测的精度比较高。目前联合国的许多预测报告都是采用这种方法计算而得的。如果不考虑人口迁移的影响，则决定未来人口发展趋势的只是人口自然增长率，其计算就较简单。其公式为：

$$P_t = P_0 (1+r)^t$$

式中： P_t ——预测期人口数
 P_0 ——基期人口数
 r ——自然增长率
 t ——预测年限

除上述人口预测方法外，常用的还有一种预测人口加倍所需时间的公式，即倍增期 T_d 的计算公式。倍增期是表示在固定增长率的条件下，人口增长一倍所需要的时间。其数学公式由指数函数（自然递增）公式 $N_t = N_0 e^{rt}$ 推出：

令 $N_t = 2N_0$ ， $t = T_d$ 代入公式

$$N_t = N_0 e^{rt}$$

得出 $2N_0 = N_0 e^{rT_d}$

$$\ln 2 = rT_d$$

$$T_d = \frac{\ln 2}{r} \approx \frac{0.7}{r}$$

倍增期与人口变化的关系见图 3.14。

复习思考题

1. 简述世界人口发展历史的三个特点与人口增长的三个时期。
2. 简述世界人口尤其是发展中国家人口增长的原因。
3. 怎样看待世界 50 亿人口日？
4. 简述世界人口发展十大趋势。
5. 简述中国人口发展历史中的主要四个时期。
6. 简述中国人口的现状与特点。
7. 简述人口增长对环境的影响。
8. 怎样理解 D.L.Meadows 提出的“人口膨胀—自然资源耗竭—环境污

染”的世界模型？

9. 名词解释：种群、种群的三种速率。

10. 人口金字塔（人口百岁图）的重要意义是什么？

11. 简述生物种群的增长曲线种类与特征，并举例说明。

12. 人口预测的重要意义是什么？

13. 简述人口预测方法及特点。

第四章 人类与生物圈

第一节 生物圈的概念及其发展

生物圈的概念是奥地利地质学家休斯 (Eduard Sness) 于 1875 年首次引进自然科学的。然而, 这个概念当时在科学思想中起的作用并不大。直到本世纪 20 年代, 苏联地球化学家维尔纳茨基 (. . .)

) 在苏联 (1926 年) 和法国 (1929 年) 所作的题为“生物圈”的两次讲演之后, 才引起人们的注意。

生物圈是指地球上所有的生命部分, 即地球上所有的生物, 包括人类及其生存环境的总体。但是, 这个非常简明的概念却并不十分精确。因为在大气圈相当高的地方 (大约在海拔 9000 米以上) 仍然存在着细菌和真菌的孢子。甚至在地球上的干旱、高寒 (—190) 和酷热 (140) 地区, 尽管难以维持代谢过程的进行, 但在这类地区亦能找到孢子。因此, 在生机勃勃的生物圈以外, 还围绕着一个界限不甚明确的, 有一些休眠形式生命的“副生物圈” (Parabiospheric) 区域 (图

生物圈的发育大约经历了 30 亿年的漫长历程。从 30 亿年前出现原始细菌开始, 20 亿年前出现了能进行光合作用的固氮生物, 释放出氧气, 并在约 16 亿年前形成了含氧的大气圈。 12 亿年前出现最早的真核细胞。7 亿年前出现了多细胞生物。5 亿年前出现了海洋无脊椎动物。4.5 亿年前生物才登上陆地。哺乳类动物的出现则是近 2 亿年的事 (表 4.1)。在这漫长的历史长河中, 由于地壳的分化, 气候的变异和其它种种原因, 有些物种消亡了, 新的物种产生了, 形成了今天这样的由数量达一千万种生物组成的五彩缤纷的生物界。

生物圈是地球上最大的生态系统, 它包括海平面以上 9 公里到海平面以下 10 公里的范围。在这个范围内有正常的生命存在, 有构成生态系统的生产者、消费者、分解者和无生命物质的四个组成部分, 有能量的流动和有物质的循环。

表 4.1 生物圈大事年表

距今年数	大事记	地质建造 (地层)	化石
0	— 人类	锡伐利克地层 (印)	拉玛古猿
	— 最早的陆地植物	上志留纪拉德洛统 (英)	顶囊蕨
	— 最早的多细胞动物	艾迪亚卡拉山地层 (澳)	Spriggina
10 亿	— 最早的真核细胞	上贝克泉白云岩地层 (加洲)	未定名
	— 氧化大气圈形成		
20 亿	— 最早的光合和固氮生物	燧石藻地层 (安大略省)	
	—		燧石藻
30 亿	— 最早的已知生物	无花果树地层 (非洲)	原始细菌
	— 地壳中最初的岩石		
	— 海洋形成		
40 亿	— 地壳、地幔与地核分化 ; 地壳受放射性加热熔融		
45 亿	— 地球形成		

(资料来源 : 据 G.E.Hutchinson《生物圈》1970。中译本。科学出版社,1974)

第二节 生态系统的结构与功能

生态系统是生态学的核心问题之一。自从 1859 年达尔文的进化论问世之后，造成了生物学的第一次大革命。德国生物学家海克尔(Ernst Haeckel)在深刻理解进化论的基础上，于 1869 年提出了生态学(Ecology)的科学概念，这是专门研究生物有机体及其环境相互关系的科学。

生物与环境的关系主要通过能量与物质的交换来实现。这里所指的环境不仅包括地形和气候等无机环境，还包括其它生物个体组成的生物环境。

地球上的多种生物通过各种方式，彼此联系而共同生活在一起，组成生物群落。生物群落与环境间的联系是密不可分的，它们相互依存、彼此制约、共同发展，形成一个自然整体。1935 年英国生态学家坦斯利(A.G.Tansley)首先提出了生态系统(Ecosystem)这一科学概念，用来概括生物群落和环境共同组成的自然整体。标志着生态学的发展进入了一个新的阶段。

自坦斯利提出生态系统学说后，美国耶鲁大学青年生态学家林德曼(R.L.Lindeman)吸取了埃尔顿(A.G.Elton)、克莱门茨(F.E.Clements)、谢尔福德(V.E.Shelford)等早期生态学家关于生态系统营养-动态方面的成就，同时受到中国“大鱼吃小鱼、小鱼吃虾米、虾米吃稀泥”和“一山不能容二虎”等谚语的启示(曲仲湘论文集,1990)，于 1942 年发表了“食物链”、“金字塔营养基”和“十分之一”定律的报告，初步奠定了生态系统的理论基础。

与此同时，前苏联生态学家苏卡乔夫(С.С.Сукачов, 1944)提出了“生物地理群落”(Biogeo-cenosis)的科学概念，它是指在一定地表范围内相似的自然现象即大气、岩石、植物、动物、微生物、土壤、水文等条件的总和。1965 年在哥本哈根国际生态会议上决定，“生态系统”和“生物地理群落”是同义语。但目前各国使用最广泛的还是“生态系统”这一术语。

进入 50 年代，特别是 60 年代以后，著名生态学家奥德姆(E.P.Odum)、惠特克(R.H.Whittaker)和前苏联的生态学家苏卡乔夫和德利斯(Д.С.Делис)等人的研究工作，使生态系统学说的理论体系进一步完善，进入了一个新的时期。70 年代以来，生态系统学说得到了空前发展，数学模型、控制论及电子计算机等理论和方法广泛进入生态系统研究中，由一般的定性描述逐渐走向定量的预测预报阶段。生态学期刊(Journal of Ecology)曾在一期评论中指出“生态系统已经成为 70 年代的一袋未雕琢的金钢石”，高度评价生态系统未来的无限发展前途。

从 50 年代算起，生态学研究大致可分为三个阶段：60 年代的“国际生物学计划”(IBP)；70 年代的“人与生物圈计划”(MAB)；80 年代开始的“国际地圈与生物圈计划”(IGBP)。

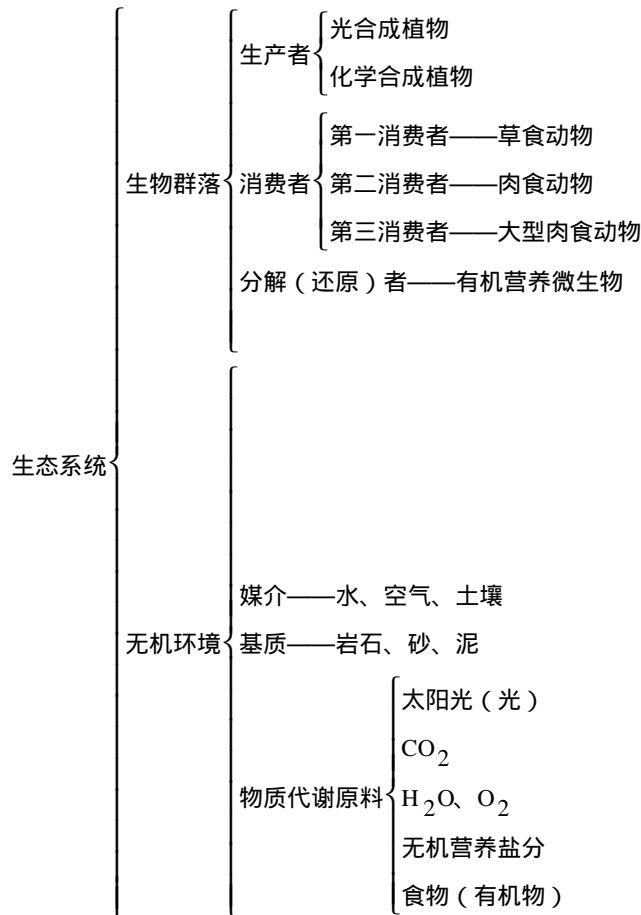
IBP 以自然生态系统的能量流动和物质循环为主要对象，MAB 强调了人类活动对自然生态系统及生物圈的影响；IGBP 主要研究生物圈和地球系统的相互作用。

近年来，以探索宏观世界综合规律为方向生态系统的研究，正与研究微观世界的分子生物学齐头并进，飞跃发展，由此则可获得更深刻的生命观、生物观、自然观，决定着整个生物学的前程。

一、生态系统的结构和类型

生态系统是一个具有特定功能的有机整体，它由生产者（自养有机体）、消费者（异养有机物）、分解者（还原者）、无机环境等四个部分组成。在生态系统的各个部分之间，不断地进行着物质与能量的交换，在一定的条件下，保持着暂时相对的平衡（表 4.2）。

表 4.2 生态系统的结构



（摘自郝志功：当代环境问题导论，1988。）

生态系统根据大环境条件的不同，通常可分为两大类，即水生生态系统和陆地生态系统。这两大生态系统还可以进一步分为更多的生态系统。

水生生态系统包括海洋、河流、湖泊和沼泽等水域。根据水体的物理、化学性质不同，又可分为海洋生态系统和淡水生态系统。在淡水生态系统中还可分为流水生态系统和静水生态系统。

陆地生态系统包括陆地上的各类生物群落。根据地理位置、水、热等条件及植被状况，又可分为森林、草原、荒漠、高山、冻原等生态系统。在森林生态系统中还可分为热带、亚热带、温带和寒带等森林系统。

陆地生态系统具有鲜明的空间结构。生物群落在空间上有明显的垂直和水平分布，即具有三维空间结构和二维水平结构。

生态系统具有开放性（物质循环和能量流动）、运动性（相对稳定状态）、自我调节性（适应外界变化条件、维持系统动态平衡）、相关性（彼此相互联系）、演化性（产生、发展、消亡的周期性）等特征。

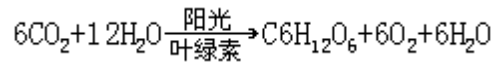
二、生态系统的功能

任何生态系统都存在着不断地进行着能量流动和物质循环，二者紧密联系在一起形成了一个整体，成为生态系统的动力。此外，还存在着信息传递。能量流动、物质循环和信息传递是生态系统的三大基本功能。

(一) 能量流动

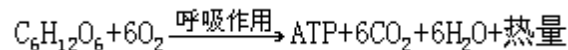
从能量观点看，地球是一个开放系统，即存在着能量输入与输出的系统。为了生物的生存，地球必须不断地接受太阳能输入并把热量输出到外层空间。因为一切生物（包括人类在内）所消耗的能量，除了极少部分的原子能外，最终还是来源于太阳能，食物是通过光合作用新近储存的太阳能，而化石燃料则是过去地质年代中光合作用储存的太阳能。

光合作用是生物吸收太阳能的唯一有效途径，它能把太阳光获得的能量储存在食物分子中。光合作用的全过程虽然很复杂，需要一百多步反应才能完成，但是其总反应式却非常简明：



植物通过光合作用能够制造第一性食物分子，因此植物被称为“自养生物”。其它生物则依靠自养生物取得其生存所必需的食物分子，这些生物称为“异养生物”。它们是绿色植物的消费者，没有任何办法固定太阳能，因此只能直接（如食草兽）或间接（如食肉兽）从植物中获取富能的化学物质，然后通过“呼吸作用”把能量从这些化学物质中释放出来。

呼吸作用也包括一系列的化学反应，共计 70 多步，但其总方程和光合作用一样非常简明：



式中生成的 ATP 即三磷酸腺苷，是生物化学反应中通用的能量，可以保存起来供未来之需，或用以构成和补充细胞的结构以及执行各种各样的细胞功能。

生态系统中一切能量的流动都是按热力学第一定律和第二定律进行的。热力学第一定律表明，能量可以从一种形式转化为另一种形式，在转化过程中能量不会消失，也不会增加，即能量守恒。热力学第二定律表明，能量总是沿着从集中到分散，从能量高到能量低的方向传递的。在传递过程中又总会有一部分成为无用的能放出。生物圈中能量在食物网中转移的情况就是这条定律的极好说明。太阳能向地面流动时，也是遵循这些规律进行的。据测定，进入大气层的太阳能是每分钟每平方米 8.368 焦耳（2 卡）。其中约 30% 被反射回去，20% 被大气吸收，只有 46% 左右到达地面。实际只有 10% 左右辐射到绿色植物上，而其中又有大部分被植物叶面反射回去，真正被绿色植物利用的只有其中的 1% 左右。绿色植物利用这一部分阳光进行光合作用制造的干有机物质，每年可达 1500—2000 亿吨，这是绿色植物提供给消费者的有机物产量。绿色植物通过光合作用把太阳能（光能）转化成化学能贮存在这些有机物质中，提供给消费者需要。能量再通过食物链首先转移给草食性动物，再转移给肉食性动物。动物死后的尸体被分解者分解，把复杂的有机物转变为简单的无机物，在分解过程中把有机物贮存的能量释放到环境中去。同时，生产者、消费者和分解者的呼吸作用，又都要消耗一部分能量，被消耗的能量也释放到环境中去。这就是能量在生态系统中的流动（图 4.2）。

图 4.2 地球生态系统的能量流

(资料来源：D.B.Sutton 等，1973。)

当能量在食物网中流动时，某一级中所储存的能量大约只有 10% 能够被其上一级营养级的生物所利用，由此可见其转移效率是很低的。其余大部分能量消耗在该营养级生物的呼吸作用上，以热量的形式释放到大气中去。这就是生态学上所谓的 10% 定律（或称十分之一定律）。图 4.3 的生物量金字塔与能量金字塔就是这条定律的说明。

在上述热力学定律的约束下，自然界中大大小小的生态系统处于完美的和谐之中。例如美国亚利桑那州的天然植被同凯白勃鹿与其天敌狼、美洲豹和山狗长期以来处于动态平衡状态之中，构成一个完善的生态金字塔；北欧的森林、麋与野狼也是这样的金字塔。如果不是后来人类的干预，这些生态金字塔本来还会继续存在。

自然界的生存竞争（包括种间和种内的竞争）使生态系统更趋完美：种间竞争使一物种中的弱病者先被消灭（如病弱的羊最先被狼捕杀），而健壮者才得以生存；种内竞争（如雄兽之间的争斗）使一物种中的佼佼者得以遗传后代，保证了该物种品质的改良。

大自然赋予大地景色的多样性同样使生态系统更趋和谐：在这种多样性中，每种生物都会找到适宜的栖息地；当某种疾病或虫害袭来时，并非所有的物种都遭到毁灭，使生态系统在病虫害之后得以复苏。

不幸的是，自然界中的平衡虽然很精巧，但很脆弱，容易遭到外力的破坏。人类虽然无力改变生态系统中的热力学定律，但是往往轻易地破坏了生态系统中的生态金字塔与自然界的多样性，使地球上不少区域陷入所谓“生态危机”之中。

（二）物质循环

维持生命除了需要能量外，还需要物质。能量和物质紧密相连，不能分开。目前地壳中的 90 多种元素几乎都是机体组织、器官和细胞的成分。这些元素的含量和作用都不相同；有的是营养元素，有的在机体的生理、生化过程中起特定的作用，还有一些元素是在外界环境特定条件下，偶然进入机体的。随着科学技术的发展、发现对有机体生命必需的元素逐渐增多。现在，认为对有机体生命必需的元素有 24 个，包括碳、氧、氮、氢、钙、硫、磷、钠、钾、氯、镁、铁、碘、铜、锰、锌、钴、铬、锡、钼、氟、硅、硒、钒，可能还有镍、溴、铝和硼。

但是，生态学家一直认为生物圈仅是氢、碳、氧和氮四种元素相互作用的场所。这四种元素构成动物、植物的 99% 以上，在生命中起着最关键的化学作用，被称为“关键元素”或“能量元素”。除此之外，其它的元素分为两类：一类是大量元素，另一类是微量元素。目前，人类对微量元素越来越重视，认为微量元素虽然很少，但其作用与任何大量元素一样，一旦缺乏，动植物就不能正常生长。当然微量元素过多对动植物也会产生危害。

在这节里简要介绍生物圈中最重要的碳、氮循环。

1. 碳循环 碳是构成生物体的基本元素，约占生活物质总量的 25%。在无机环境中，碳是以二氧化碳和碳酸盐的形式存在的。生态系统中碳循环的基本形式是大气中的 CO_2 首先通过生产者的光合作用进入生物圈，然后通过消费者、分解者再回到大气中去，一小部分形成化石燃料贮存在地层中。具

体地讲，就是植物通过光合作用把大气中的 CO_2 生成碳水化合物，其中一部分作为能量供应为植物所消耗，而植物呼吸或发酵过程中产生的 CO_2 通过植物叶片和根部释放回大气中，然后再被植物利用，这是碳循环的最简单形式。

碳水化合物一部分被植物消耗，另一部分则被动物消耗，由食物氧化而产生 CO_2 又通过动物呼吸释放回到大气中。动植物死亡后，经过微生物分解作用产生的 CO_2 再释放回到大气中，然后再被植物利用，这是碳循环的第二种形式。

生物残体埋藏在地层中，经过漫长的地质作用形成煤、石油、天然气等化石燃料。它们通过燃烧和火山活动释放出大量 CO_2 ，再被植物利用，然后重新进入生态系统的碳循环中，这是碳循环的第三种形式（图 4.4）。

图 4.4 碳循环

（资料来源：同图 4.1）

上述碳循环的三种形式是同时进行的。在生态系统中，碳循环的速度很快，最快的只有几分钟，或者几小时。一般在几星期或几个月内则可完成一个循环周期。

2. 氮循环 氮是形成蛋白质、氨基酸和核酸的主要成分，是生命的重要元素之一。在大气中，氮占 79%，但绝大部分不能直接被大多数生物利用。大气中的氮进入生物有机体主要有四种途径：生物固氮（豆科植物、细菌、藻类等）；工业固氮（合成氨）；岩浆固氮（火山爆发）；大气固氮（闪电、宇宙线电离）。第一种途径能使大气中的氮直接进入生物有机体，而其他途径要通过氮肥形式或随雨水形式间接地进入生物有机体。

进入植物体内的氮化合物与复杂的碳化合物结合形成氨基酸，随后形成蛋白质和核酸。这些物质和其它化合物共同组成植物有机体。植物死亡后，一部分氮直接回到土壤中，通过微生物分解重新为植物所利用。另一部分植物有机体中的氮，则随着食物进入动物体内。动物死亡后，其尸体中所含的氮又通过微生物分解而回到土壤或大气中，从而完成氮循环（图 4.5）。

在整个氮循环过程中，通过生物、工业、岩浆和大气的固氮作用，每年进入生物圈的氮为 92×10^6 吨，而经过反硝化作用回到大气中的氮每年为 83×10^6 吨。两者之差的 9×10^6 吨代表着生物圈中固氮的速度，它们分布在土壤、海洋、河流、湖泊和地下水中（图 4.6）。

目前，水体中出现的富营养化现象是否与此有关？固氮作用长期超过反硝化作用其后果如何？这些都是值得重视和研究的问题。

（三）信息传递

信息传递是生态系统的重要功能之一。生态系统中的各种信息形式主要有四种：

（1）物理信息 由声、光和颜色等构成。动物的叫声可以传达惊慌、警告、安全和求偶等各种信息。光和颜色可以向昆虫和鱼类提供食物信息。

（2）化学信息 由生物代谢产物，尤其是分泌的各种激素组成的化学物质。同种动物间以释放化学物质传递求偶、行踪和活动范围等信息是相当普遍的现象。

(3) 营养信息 食物和养分也是一种信息。通过营养交换的形式，把信息从一个种群传递给另一个种群。食物链（网）就是一个营养信息系统。

(4) 行为信息 无论是同一种群还是不同种群，个体之间都存在行为信息的表现。不同的行为动作传递着不同的信息，如同一物种间的以飞行姿态、跳舞动作传递求偶信息等。

第三节 人类对生物圈的影响

在 47 亿年的地球史中，人类的出现只是近 200—300 万年的事。地球的生命史大约 30 亿年，如果把地球生命史比作一个百岁老人，则这位老者只是在最近的 24 天里才看到人类的存在。而且，人类作为生物圈的最新成员，在其全部历史的 99% 以上的时间里，同大自然的威严相比，他曾经是一个弱者，是生物圈里一位恭顺的成员。只是在一万年以前人类进入农业社会以来，他才具有可以同大自然抗衡的力量。几百年前人类进入了工业社会，尤其是近几十年科学技术的迅猛发展，终于使人类从大自然的奴隶变成了大自然的主人，处处以胜利者与占领者的姿态出现，破坏了人类同大自然的和谐与平衡。

一、生态平衡及其破坏

任何一个正常、成熟的生态系统，它的结构和功能，包括生物种类的组成、各种群的数量比例，以及物质与能量的输入和输出等方面，都处于相对稳定的状态。也就是说，在一定的时期内，生产者、消费者和分解者之间保持着一种动态平衡状态，系统内的能量流动和物质循环在较长时期内保持稳定。这种状态就是生态平衡，又称自然平衡。

如果生态系统中物质和能量的输入量大于输出量，生态系统的总生物量增加，反之则总生物量减少。在自然状态下，生态系统的演替总是自动地向着生物种类多样化、结构复杂化、功能完善化的方向发展。如果没有外来因素的干预，生态系统必将最终达到成熟的稳定阶段。那时其生物种类最多，种群比例最适宜，总生物量最大，生态系统的内稳性最强。

生态系统的这种平衡是靠一系列的反馈机制维持的。在物质与能量流动与循环的过程中，如果发生了任何变化，其结果最终又反过来影响这一变化本身，使原有的生态平衡得以保持。例如，某一森林生态系统中食叶昆虫（如松毛虫）数量增多，林木因此受害；但食叶昆虫的增加为食虫鸟类（如灰喜鹊）提供了丰富的食物，因而促使其大量繁殖，捕食食叶昆虫，使之受到抑制，森林生态系统的生态平衡得以逐渐恢复。而且，一个生态系统结构愈复杂，物种愈多，由各种生物构成的食物链和食物网也愈复杂多样，能量与物质的流动与循环就可以通过多渠道进行，某些渠道之间可以起代偿作用。一旦有某个渠道受阻时，其他渠道便能替代其功能，起到自动调节的作用。但是，生态系统的自动调节能力和代偿功能是有其一定限度的，超过这个限度，就会引起生态失调，乃至生态系统的崩溃。

影响生态平衡的因素既有自然的，也有人为的。自然因素包括突发的和慢性的自然灾害，如火山、地震、海啸、林火、台风、泥石流以及水旱灾害等。这些灾害常在短期内使生态系统遭到破坏和毁灭。所幸这些自然现象在时间上和空间上均有其局限性，受其破坏的生态系统在一定时期之内一般能够自然恢复或更新。人为因素包括人类有意识的“改造自然”的行动与无意识的对生态系统的破坏，例如砍伐森林、疏干沼泽、围垦湖滨与海滨、某些大型工程设施以及环境污染等。这些行动有些造成环境因素的变化，如改变了当地的地形、植被和水文等环境要素；有些造成物种成分的改变，如引进或消灭某些生物种群；有些则造成信息系统的紊乱或破坏，如某些污染物与一些生物发出的求偶、觅食或归巢等信息相似；有些污染物则会对许多生物有毒，使之中毒或致死。这些人为因素都能破坏生态系统的结构和功能，引

起生态失调，甚至造成生态危机，进而直接或间接地危害人类本身。

生态平衡的破坏往往出于人类的无知，不了解生态系统的复杂机理而贸然采取行动。近年来不少有识之士提出了许多正确的见解，并把它提高到定律和规律的高度。例如我国生态学家马世骏曾提出生态学五规律，即相互制约和相互依赖的互生规律，相互补偿和相互协调的共生规律，物质循环转化的再生规律，相互适应与选择的协同进化规律，以及物质输入与输出的平衡规律。

美国科学家小米勒 (G.Tyler Miller Jr.) 则总结出生态学三定律：

生态学第一定律：我们的任何行动都不是孤立的，对自然界的任何侵犯都具有无数的效应，其中许多是不可预料的。这一定律是 G.哈定 (Hardin) 提出来的，可称为多效应原理。

生态学第二定律：每一事物无不与其他事物相互联系和相互交融。此定律又称相互联系原理。

生态学第三定律：我们所生产的任何物质均不应对地球上自然的生物地球化学循环有任何干扰。此定律或可称为勿干扰原理。

如果我们更自觉地尊重这些原理和规律，则生态平衡就能更好地得以保持。不幸的是，人类迄今所采取的许多行动都只顾及到眼前的和局部的利益，忽略了长远的和全球性的利益，从而对生物圈造成了某些伤害，其中有些是严重的，影响深远的，兹择其要者分述如下。

二、人类对生物圈的影响

(一) 森林在缩小

目前世界有林地约占陆地面积的 1/3，共 40 亿公顷，其中 2/3 为密林，1/3 为由阔叶树与草地组成的疏林。表 4.3 列出了 1985 年世界各地和一些国家的森林概况，包括我国的情况。然而，世界有林地的面积曾经是很广大的，达 60 亿公顷，覆盖了陆地面积的 45%，比今天森林王国加拿大和前苏联的森林覆盖率（分别为 43.7% 和 41.5%）还要高。森林覆盖率最高的国家为苏里南，达 95.6%。

森林缩小的原因首先是耕种活动，包括原始农业的刀耕火种和现代有计划的垦殖。刀耕火种的农业形式已经流传了几千年，在森林广布、人口稀少的地区，被烧毁的森林尚有自然更新的能力。但随着人口的剧增，这种自然恢复已日益不可能了。据联合国粮农组织估计，1976 年全世界仍有 2 亿人从事刀耕火种，其毁坏能力之大可以想见。有计划的移民垦殖更使森林永久性变成农田和牧场。

另一方面是人类对薪柴的需求。据联合国世界环境与发展委员会估计，发展中国家有 70% 的人使用薪柴，每人每年要烧掉木柴 350 至 2900 公斤，视木柴获取的难易程度而定，平均每人每年大约 700 公斤。据有关统计，1940 年代中期世界薪柴和木炭的总产量为 6 亿立方米，至 1973 年增至约 13 亿立方米，1983 年更增至 16 亿立方米，占当年原木总产量的 54%。

同等重要的是工农业生产与生活对木材的需求，工业用原木的生产在过去 35 年中几乎增长了 3 倍，1983 年总量达 14 亿立方米，占原木总产量的 46%，其中的一半以上产自美国、加拿大和前苏联。

表 4.3 1985 年世界森林概况（资料来源：《世界资源报告》1987）

面积单位：百万公里

地区和国家	土地 面积	密林		疏林	森林 总面积	森林占 土地总 面积%	其它林地		有林地 总面积 ³	有林地 土地总 面积%
		阔叶 林 ¹	针叶 林				灌木 林 ²	退耕还 林地		
美国和加拿大	1835	168	301	215	684	37	无数据	不适用	684	37
欧 洲	472	65	88	21	174	37	无数据	不适用	174	37
前苏联	2227	147	645	128	920	41	无数据	不适用	920	41
澳、新、日、 以、南非	950	50	22	70	142	15	无数据	不适用	142	15
发达国家小计	5484	430	1056	434	1920	35	无数据	不适用	1920	35
非 洲	2966	216	2	500	718	24	450	160	1328	45
拉丁美洲	2054	666	26	250	942	46	150	170	1262	61
亚洲(不包括 中国和大洋洲)	1640	317	30	83	430	26	45	76	551	34
中 国	960 ⁴	97	25	15	137	15	30	无数据	167	18
发展中国家小计	7593	1296	83	848	2227	29	675	406	3308	44
1985 年世界总数	13077 ⁵	1726	1139	1282	4147	32	675	406	5228	40
1980 年世界总数	13077	1827	1121	1372	4320	33	624	407	5381	41

注：1. 包括竹林和红树林；2. 高度为 0.5—7m 的木本植被；3. 为森林总面积与其他林地面积之和；4. 原文为 933；5. 世界土地面积不包括南极洲。

从全球范围来看，木材的砍伐速度大大超过其再生的速度。据联合国粮农组织估计，目前全世界约有 13 亿人口居住在木材缺乏的地区。如果这种过度砍伐的趋势继续发展，到 2000 年将有 24 亿人口居住在木材极度稀缺的地区。世界上著名的古代文明摇篮现在大都已成为林木稀少之地，甚至沦为半荒漠地区。欧洲的大部分、亚洲北部、美洲西北部和美国东部地区天然森林已基本消失，现在所见到的多属树种较单纯的次生林或人工林。俄罗斯在这方面得天独厚，是温带和亚极地森林蕴藏最多的国家，保存了世界针叶林的一半，其中 2/3 为原始森林。地广人稀和难以到达是其森林保存良好的主要原因。但其欧洲部分发达地区的森林却同样地早已采伐殆尽。

热带森林往往由于难以通行而免遭商业性的砍伐。南美洲亚马逊河流域、东南亚和非洲中部地区都保存了较大面积的热带森林，仅巴西、印度尼西亚和扎伊尔就拥有世界热带密林的 52%，拉丁美洲的木材蓄积量占世界的 1/3。然而，由于世界市场上木材紧张，热带森林开发的速度迅速增加。据联合国粮农组织与环境规划委员会的联合研究，1981—1985 年热带森林的砍伐速度每年达 1130 万公顷，合热带森林总面积的 0.6%，每年至少还有面积同样大的森林遭到严重破坏。例如，海地森林的年采伐率达 3.3%，其森林将于本世纪内全部采完。科特迪瓦、尼日利亚和尼泊尔亦将面临同样的局面。

本世纪以来热带森林面积已由 16 亿公顷减少到约 9 亿公顷。所幸针叶林面积已趋稳定并略有增加，这主要是北方发达国家对其本土的森林保护较好（与此同时大量消费从南方发展中国家进口木材！），其森林面积由 1970 年的 1.75 亿公顷到 2000 年可望增至 1.83 亿公顷。

中国农耕历史悠久，在长达几千年封建主义落后的社会制度下，由于对

土地不适当的开发利用、历代统治者的掠夺以及战乱的破坏，森林面积逐渐减少。先秦时期，黄土高原的森林覆盖率在 50% 以上，东北和西南更是茂密的林区，覆盖率达 80% 以上。一直到清朝初年，全国森林覆盖率仍达 21%。近 200 年来森林又大幅度地减少，到 1949 年只剩下 7%—8%。解放以后，一方面由于生产水平的提高，另一方面由于大力提倡造林，森林面积又有所增加。第四个五年计划期间进行的森林资源清查结果表明，当时全国的森林面积为 12 186 万公顷，覆盖率为 12.7%。但由于林业政策不稳定和管理上的失误，第五个五年计划期间再次调查的结果，这两个数据却相应地分别减少为 11 526 万公顷和 12%。5 年之间森林面积净减 660 万公顷。近年完成的第三次全国森林资源清查结果表明情况有所好转，上述数字分别为 12465 万公顷和 12.98%，达到了近代最高的水平。更为可喜的是到了 1991 年底，从全国范围内看，森林的生产量已经开始超过采伐量，林业生产开始走出低谷。如果今后能稳定这个势头，采取更积极、更合理的政策和措施，我国的森林资源将会稳定地增长，到 2000 年全国森林总面积有可能达到 1.64 亿公顷，森林覆盖率提高到 17% 左右，接近《中国自然保护纲要》所规定的 2000 年达到 18% 的目标。

（二）牧场在退化

牧场是放养家畜和为野生食草动物提供草料的地方。这种地方由于自然条件的限制——气候干燥、寒冷、坡度太陡或岩石裸露等，使之不适宜于雨养农业和集约林业的发展，但宜于放牛、羊等家畜。这些反刍动物能把人类所不能消化的一些植物纤维物质转化为宝贵的蛋白质——奶和肉类。这些食品加上羊毛和牲畜的出口额占 1983 年世界农产品总出口额的 12%，是许多国家出口商品的重要组成部分。因此，牧场和森林一样，都是人类重要的自然资源。

草原是最理想的天然牧场。此外，林中空地、林缘草地、疏林、灌木丛和荒漠地区植被稀疏的地段均可作为牧场。因此，世界牧场的分布既广泛又难以统计。根据联合国粮农组织新近的统计，牧场包括下述三类地区：第一类为永久性草场，相当于生态上草原的概念，总面积为 31.6 亿公顷，占陆地总面积的 24%；第二类为疏林，面积为 13.7 亿公顷，占陆地总面积的 10.4%；第三类为其它土地，包括灌木林、冻土地区和荒漠地区的部分土地。可进行季节性放牧或在多雨年用于放牧。这类土地总面积约为 43.8 亿公顷，可用于作牧场的占一半，合 21.9 亿公顷，占陆地总面积的 16.6%。这三类牧场合计总面积为 67 亿公顷，占陆地总面积的 51%。

这三类地区中，第一、二类自然条件较好，尤其是草原，土地平坦，气候干爽，土壤肥沃，牧草鲜美，最宜放牧，亦可农耕。人类远祖离开森林以后第一个目标就是草原，从这里开始了人类的农牧社会。因此，草原早就置于人类的控制与影响之下。随着人口的增加，条件较差的“其他土地”也逐渐被用作牧场。

然而，草场一般雨量较小，自然环境比较脆弱，其环境容量有限，畜牧业中早就产生了“载畜量”的概念，这就是一定面积牧场所能容纳（承载）牲畜的头数。超过了这个限度，就会导致草场的退化以至破坏。不幸的是由于人口的压力，许多牧场已经超载，引起草场严重退化，表现为草群变得稀疏低矮，产草量减少，草质变劣，即优良牧草减少，杂草、毒草增多。退化严重的地方整个自然环境变坏，引起沙化和盐渍化，其结果是该地区动植物

资源遭到破坏，有些亿万年来适应了草原和荒漠环境的物种濒于灭绝。

世界各地的牧场都有不同程度的退化，其中欧洲的状况较好。由于欧洲雨水调匀，加上细致的管理，其载畜量比其他地区高几倍，使得这些工业化国家不仅不必从发展中国家进口奶肉制品，反而有多余的部分可供出口。北美诸国牧场经历过开发、滥用至逐步改善三个阶段，目前退化已经停止，状况逐渐好转。澳大利亚牧场也曾经过度放牧，但其独特的问题是从欧洲引进的兔子过分繁殖侵夺了许多牧场。总的情况是几十年来有所改进。

发展中国家牧场一般仍在经历着退化的过程。非洲多数国家的牧场不仅在退化，而且许多地方发生荒漠化，这不仅是大量野生动物和家畜过牧所致，而且也是当地居民大量采集薪柴所造成的。在一些地区，牧场也是燃料的主要来源，几乎所有可燃物均被收集作为燃料，包括原来作为饲料的灌木和树木，为了满足当前的急需而造成了长期的生态问题。南美的牧场也有过度放牧和退化的情况，尤其是在阿根廷、巴拉圭、乌拉圭和巴西。亚洲牧场最大的国家是中国、俄罗斯和蒙古。中国牧场退化和沙化的情况很严重，内蒙古和青海许多牧场的产草量和 50 年代相比下降了 1/3 至 1/2，而且草群的适口性和营养价值变劣。中国草场退化的另一原因是鼠害和虫害（主要是蝗虫），内蒙古自治区仅鼠害就使牧草每年减产 30—50 亿公斤。中东地区气候干旱、土壤贫瘠，几个世纪以来多数土地一直用作牧场，这里是牧场退化和荒漠化最严重的地区。

牧场退化与荒漠化可以说是同一个问题的两个方面，或者说是同一个过程的两个阶段，这是世界干旱区、半干旱区土地利用中所遇到的共同问题。从本质上说，这是一个社会经济问题，只有大力控制人口的增长和加速经济的发展才能最终有效地解决。

（三）猎捕与毒杀

大型食肉兽危害人畜，自古就是捕杀和毒杀的对象。从人类的全部历史来看，世界上生存过的全部 500—1000 亿人口中，90% 为猎人，靠狩猎与采集为生，6% 为农民，另有 4% 的人生活在工业社会中，但直至今今天全世界尚有约 300 万人以打猎为生。长期的狩猎活动早已使一些野兽绝迹于许多地区，例如中国的东北虎与华南虎、北欧的野狼早已濒临绝境。海洋上与人无争的鲸与海豹亦在劫难逃，非洲原野上的象只因其贵重的象牙而成群地被杀死，就连作为人类之友的多多种鸟类也难逃厄运。

北美大陆上野牛（学名**騾犁**）的命运是近代大规模猎杀的典型例子。1500 年在欧洲殖民者进入北美之前这种野牛的总数为 6000—12500 万头，分布在北至大奴湖，南达墨西哥北部，东到布法罗，西抵大盐湖的广阔地域。尽管土著部族的不断猎杀，但对这个极其庞大的种群毫无影响。到了 1860 年代，铁路网向西延伸，为解决筑路工人食用之需，铁路公司雇佣职业猎手大量猎取野牛。其中最著名的猎手科迪，外号“水牛比尔”，在 18 个月之内总共杀死 4280 头，创下一项世界纪录。同时农牧业向西拓展，农民为了保护作物、围栏、电话线和草场，射杀了大量野牛。为了获取牛皮和牛舌（一种美味）又进行商业性的猎取，残余部分大多就地腐烂，草原上留下一堆堆被雨水漂洗过的白骨，被收集运送到东部作肥料。然而，真正毁灭性打击来自南北战争以后，白人为了征服土人，派军队大量射杀野牛以断绝土人的食物来源。1870—1875 年间每年至少射杀 250 万头，到 1890 年，这个巨大的种群仍然有 100 万头，成为成千上万猎手追逐的对象。两年以后，这个种群实际上几

乎完全被消灭了，只剩下 85 头，被散放在黄石公园里受到保护。以后慢慢得到恢复，1900 年繁殖到 969 头，至今增加到 75000 头，其中的 1/5 在国有的野牛保护区内，其余散布在西部私有土地上，受法律的保护。

另一项有案可查的大规模灭绝行动是美国的“联邦投毒计划”，在一些地区大量投放毒饵，仅 1963 年就毒死 9 万只郊狼、300 只美洲狮、2.1 万只猞猁与美洲野猫以及 7.3 万只其它动物。此前 5 年内共投毒饵（肉类和谷物）230 万磅，许多非目标动物也一并毒死，并且至少使 14 人中毒。1971 年一位参议员指责本应是野生生物保护机构的美国内务部野生生物局，变成了某些濒危物种最大的屠夫。1972 年 2 月尼克松总统签署法令终止了该项投毒计划。但是 1975 年福特总统又授权使用一种新型的 M - 44 氰化物陷阱以捕杀某些猛兽，结果非目标动物继续遭殃，人畜中毒事件亦时有发生。一位农场主的儿子落入陷阱中毒，他愤怒地写信给总统表示抗议：“多修些更先进的陷阱吧，你的选票会源源不断”。

人类就是这样有意无意地消灭一些大型动物，取得了惊人的“成功”，但是在对付弱小的昆虫方面往往成效甚微。

（四）人与昆虫的战争

地球上昆虫种类的数目尚未查明，记录在案的已超过 120 万种，未为人知的估计至少十倍于此数。在人类大规模改变生物圈的秩序以前，这些昆虫大多数处在自然力的约束之下，在食物网中受其天敌的制约，并未泛滥成灾。

人类进入农业社会以后，120 万种昆虫中的一小部分，即被称为“害虫”的那部分，在两方面与人类的利益发生冲突：与人类争夺食物和传播疾病。

人类早就使用一些无机化学药品控制昆虫的蔓延，然而 DDT 的使用才真正开始了人类与昆虫的战争。

1874 年，一位德国化学家首次合成了一种名叫双氯苯基三氯乙烷的有机化合物，这就是后来半个多世纪之内妇孺皆知的 DDT。1939 年发现了这种化合物卓越的杀虫特性。于是被广泛地应用以消灭农田害虫与传染疾病的有害昆虫，事实上成为现代化大农业的重要手段之一。其发现者，瑞士人保罗·穆勒为此获得诺贝尔奖金。

以后，DDT 和其它农药的生产发展迅猛，迄今全世界已生产了 DDT200 万吨，1966 年有八千多家企业以六万种不同处方生产 900 种基本杀虫剂。此外，又加上杀菌剂、杀线虫剂、除草剂、落叶剂、生长调节剂与灭鼠剂等。仅 70 年代中各类杀虫剂的使用量即增加了 12 倍。全世界各种有机化学农药的总产量每年达到 250 万吨，平均每人 0.45 千克。全球农药的销售额从 1970 年的 30 亿美元上升到 1990 年的 200 亿美元。农药的使用成为现代农业所不可缺少的手段。

然而，大量使用农药的生态学后果却实在令人沮丧。农药在制造、运输与施用过程中造成人畜中毒事件的报道已屡见不鲜。1984 年 12 月美国联合碳化物公司在印度博帕尔市农药厂的毒气泄漏事件是这方面引起全世界舆论注意的著名事件。这是世界历史上最大的一次工业事故，已造成二千多人死亡，二十多万人受到不同程度的毒害。即使不发生这样的事件，施用农药时也会把害虫及其天敌一并杀死。当农药的威力逐渐消失，部分害虫重新繁殖起来时，其危害程度往往会加倍甚至数倍于施药之前。

而且，施用农药的最大问题是害虫迅速产生抗药性。1945 年以前，大约只有十几种昆虫对 DDT 出现以前的某些杀虫剂逐渐产生了抗药性。随着新的

有机杀虫剂的使用，抗药性急剧发展，到 1960 年已发现 137 种昆虫具有抗药性。有时一种新的农药一经使用，仅仅两个月之内有些昆虫就获得了对这种农药的顽强抗性。其发展之迅速，使得有时一份庆贺某化学药物对某种昆虫控制取得成功的报告墨迹未干之时，又不得不发出另一份修正报告了。

此外，如此众多的未曾在自然界中存在过的有机化合物的泛滥对于生物（包括人类）基因的影响也是值得关注的。现在业已查明多种有机农药属于致癌物，尽管各国的食品卫生部门对各种农药的残留量规定了不同的“容许值”，但是中毒事件、癌症发病率与畸型婴儿等都在不断增加。

正如《寂静的春天》的作者 R. 卡逊所指出的那样：“大自然赋予大地景色以多种多样性，然而人们却热心于简化它。”我们不仅砍伐了大片的森林，开垦了广袤的草原，而且把多种的植物动物杂居的原野变成种植单一经济作物的农田。原有的食物网被彻底破坏了，某些害虫、害兽的肆虐使人类不得不求助于化学药品，不少化学家与工业家相信喷雾器能最终解决害虫问题。也许历史将会证明这是一种饮鸩止渴的方法。

诚然，我们目前还不能立即终止农药的使用，但是越来越多的有识之士已认识到生物治虫的重要性并已取得了初步成效。生物治虫的方法实质上是承认和力图恢复大自然的多样性，并利用食物网来控制某些昆虫的过量繁殖。中国生物工作者在这方面的研究也是成果卓著的。

假如说人类在竭尽全力去消灭某些害虫方面成效甚微，那么我们有时无意地造成某些动物的繁衍以致泛滥成灾则是功劳昭著的。

（五）意外的繁衍

豺狼虎豹自古即被视为人类的大敌，猛兽是与洪水相提并论的。为了人类自身以及其豢养的家畜的安全，人们不断捕杀这些猛兽。

美国亚利桑那州体态优雅的凯白勃鹿长期以来与当地的草原及其天敌美洲狮、狼与郊狼处于一种平衡状态，鹿群数量维持在 4000 头左右。1906 年该地由森林保护区变成狩猎保护区。为了“保护”鹿群，开始执行一项捕杀其天敌的计划，到 1915 年已捕杀了 600 头美洲狮，1925 年完全消灭了狼，并猎杀了 3000 只郊狼。鹿群以每年 20% 的速度增殖，1918 年达到 10 万头。结果，草原被啃吃殆尽，土壤日趋贫瘠，树叶被啃吃的高度越来越高，使当地的环境遭到严重破坏，最后鹿群被成批的饿死，到 1932 年减少至 2 万头左右，到 40 年代又下降至几千头的水平。

瑞典北方麋的繁衍也是一个相似的例子，它以草木为食而被狼捕食，林—麋—狼三者处于平衡状态。但狼群又是北方驯鹿的捕食者，因此长期以来遭到驯鹿牧民的捕杀，狼的数目在不断减少，尽管政府与学术界大力宣传狼的生存权利，但到 80 年代初期，瑞典的最后几只野狼还是被消灭了。结果，在没有任何天敌的环境中，麋以惊人的速度繁殖起来，成为瑞典公路交通事故的 48% 的肇事者，它们大量啃吃幼龄树苗使占瑞典外贸收入 1/5 的林业遭受损失。近年来瑞典政府不得不推行一项猎捕计划，每年捕杀以 10 万计的麋以保护该国的森林与交通安全。

另一著名的例子是澳大利亚的野兔成灾。这种野兔是欧洲移民带来的家兔逃逸后繁殖起来的。干爽的气候、肥美的草原为它们提供了理想的环境。它们大量繁殖成为当地养牛业的大害。为了防止它们破坏草场，设置了长达一千英里的铁丝防兔网也无济于事，最后不得不采取化学战与细菌战的手段来对付它们。

世界上许多地区鼠多成患，原因是鼠类的天敌数量锐减：蛇以其药用价值和美味而被大量捕杀；猫头鹰、黄鼬等因种种原因而减少；家猫大多作为宠物而不再捕鼠了。于是鼠类大量繁殖，其总数比全球人口数还多。据统计仅印度就有 35 亿只老鼠；意大利新近出现一种“超级老鼠”，它们不仅吃鸡，甚至吃猫，有时连儿童也惨遭毒手；某国一地区老鼠成群出动，扫荡农田、村庄，伤及人畜，最后政府不得不出动几万名军人、配备火焰喷射器进行围剿，使老鼠尸横遍野，数量以百吨计。难怪有的科学幻想小说把老鼠设想为继人类以后统治地球的动物。

中国于 1958 年曾经发动过一场闻名于世的歼灭麻雀之战，原因是麻雀啄吃宝贵的粮食，它与老鼠、苍蝇、蚊子一起被称为“四害”。那是一场动员了几亿人的战役，取得了极其“辉煌”的战绩，一时麻雀濒于绝迹。意想不到的结果出现了：从那以后的几年内果树害虫数量猛增、水果减产。原来麻雀不仅吃粮食，也吃害虫，花费一些粮食以饲养害虫的天敌麻雀原是值得的。人们从此取得了教训，把麻雀从“四害”中除名，而代之以臭名昭著的臭虫。

上述种种例子都说明同一个问题：自然界亿万年来所形成的食物链和更为复杂的食物网维系着生态系统的平衡，这些链、网中的任何环节遭到破坏常常带来意想不到的结果甚至造成大的灾难，这是应该引以为戒的。

（六）日益加速的物种灭绝

古生物学的研究已经表明，在地球的生命史中存在过大量的物种，其总数可能达 5 亿种之多。现存的物种总数尚无准确数据，一般估计在 500 万至 5000 万种的范围内。这就是说，地球上的物种有 90% 至 99% 已经灭绝了。物种和它的个体一样，也有发生、发育和死亡的过程。古生物学的研究还发现，物种的平均寿命为 500 万年，例如鸟类种的平均寿命为 200 万年，哺乳类种的平均寿命为 600 万年。在最近的 2 亿年中，每百万年平均有 90 万种物种消亡，即平均 1.1 年灭绝一个物种，可见物种灭绝本来是一种正常的自然现象。

自从大约 200 万年前人类出现以来，物种灭绝的速度逐渐加快。工业革命以后，随着人口的快速增长与技术力量的增强，物种灭绝速度进一步加快。据统计，1600 年全世界有哺乳动物 4226 种，鸟类 8684 种，到 1970 年哺乳动物灭绝了 36 种，另有 120 种濒临灭绝；鸟类至少灭绝了 94 种，另有 187 种濒临灭绝。近 300 年来物种灭绝的趋势如图 4.7 所示。

另据统计，近 2000 年来所灭绝的 110 种兽类和 139 种鸟类中，约有 1/3 是 19 世纪前 1800 年中灭绝的，1/3 是上世纪中灭绝的，其余 1/3 则是近 50 年内灭绝的。从中可以看出物种灭绝加速的明显趋势。

尤其可虑的是本世纪最后四分之一时期内物种灭绝飞速发展的趋势。现有资料表明，1975 年前后每年灭绝的物种达几百种，到 1985 年增加到每年几千种，1990 年增至 1 万种，按照这种趋势，到 2000 年以前每年将灭绝 2—5 万种。这样，从 1975 至 2000 年短短 25 年内，全世界物种的损失将达 50—100 万种，其中大部分为植物和昆虫，而且大部分未经分类，它们对人类的价值以及其在生态系统中的作用亦无从估计。

物种的保护，或者说保护物种的多样性不仅具有重大经济意义，而且在科学上、美学上、伦理学上和 cultural 上都具有不可估量的重要性。

人类的一切农作物、家畜和家禽均源自野生动植物的祖型，而且迄今仅驯化了有限的几十种。现存的野生物种中不仅潜藏着许多可供驯化的动植

物，而且也是培育新品种所不可缺少的原材料。例如非洲草原上一些野生羚羊和水牛只需消费较少的水和饲料就能生产更多更好的瘦肉，很值得驯化；上文提及几乎被灭绝了的美洲野牛现在与家牛杂交产生的新品种肉牛不仅肉质更鲜美，而且快长，易于饲养，费用也很低廉。最近在墨西哥中南部山林中发现

一个原始玉米种，是已知现代玉米种属中最原始的，而且是一个多年生物种。如果能与现在商品化玉米品种杂交从而选育成多年生玉米新品种，其前景是很诱人的。非常遗憾又值得庆幸的是这个原始种现在仅残存在三小块土地上，总面积为 4 公顷，只剩下几千株，仍在受当地农民和采伐者破坏的威胁。据专家估计，这个野生玉米种的遗传优点可望创造每年几十亿美元的价值。

现存物种中数量最大的是昆虫，由于其栖居地森林、草原和湿地的破坏而大量灭绝，它们在显花植物的授粉中所起的作用早已被人们认识，许多昆虫作为高蛋白食物的用途也日益为人们接受，利用一些害虫的天敌实行生物治虫的方法更是解决化学农药污染的有效途径，而且还往往带来巨大的经济效益。例如美国佛罗里达的柑桔园每年花费 3500 万美元购买农药，后来他们仅用 3.5 万美元引进了三种热带寄生蜂，从此解决了柑桔的虫害问题。无独有偶，中国科学家蒲蛰龙教授早在 50 年代就首创用赤眼蜂（也是一种寄生蜂）防治荔枝等果树虫害，取得极大的成功，为各国同行所侧目。

野生动植物在医药上的应用历史几乎和人类史一样长。中国使用的药用植物有 1700 种，印度更达 2500 种之多，发展中国家 80% 的人民靠草药治疗疾病，全世界的药物有一半是由植物提炼制造的，其中的一半来自热带森林。全世界这类药品的年销售额达 400 亿美元。为了筛选抗癌药物，粗略地筛选了已知热带植物的 1/10，精选过 1/100，就发现了 1400 种具有抗癌作用。但是热带森林正以每年 760 万至 1000 万公顷的速度在消失，并且至少有同样大的面积遭到严重破坏。如果这种趋势继续下去，科学家们担心几十年以后热带森林将荡然无存，连同其中的 500 万至 3000 万个物种永远从地球上消失。

各类医用试验动物在医学上的作用是无法替代的，全世界每年使用的这类动物数以亿计，仅美国每年就消耗 7100 万头。最近，科学家发现狨猴是人类以外唯一能患麻风病的动物，但这个物种已经濒临绝灭；树鼩也是直至最近才被发现是研究肿瘤的良好医学模型。如果这些物种灭绝了，人类在对麻风、肿瘤等疾病的研究中会增加更多的困难，甚至是不可弥补的损失。

在科学技术上，生物的各种器官和生理机能给人类以深刻的启示，近年来形成了仿生学这个重要的学科。雷达、声纳、红外追踪等先进技术的发明，均得益于生物机制。迄今许多生物的结构和功能尚未为人类所了解，随着物种的灭绝，这些有价值的信息也将永远消失，仿生学也就无生可仿了。

野生生物给人类文化娱乐上带来的喜悦绝不亚于垂钓和打猎，它已成为一种日益增长的实业。以肯尼亚为例，其野生动物在 1985 年为其招徕了 50 万游客，净赚 3 亿美元。一位野生动物经济学家作过一个有趣的计算：肯尼亚一头雄狮生活 7 年就可以为该国赚取 51.5 万美元的外汇，但如果把它杀了，它的皮只值 1000 美元。又如在美国，几乎有一半的人每年都参加与动物有关的户外娱乐活动，每年花费的金钱达 370 亿美元，每年大约有 9500 万美国人对野生动植物进行观察、喂食或照相，有 5400 万人进行垂钓，1600 万人打猎。如果一旦灭绝了那些具有吸引力的物种，则这种很普及的文化娱乐

活动和由此兴起的实业均将完全消失。

更具有讽刺意味的是，正当遗传工程取得突破性进展、并可望在几十年内取得实质性的成就之时，无数的遗传基因却正在随着数以百万计的物种在几十年内走向灭绝。

保存自然界形形色色的物种，保持生物的多样性，已经成为全人类所面临的一项紧急任务，个人、团体、国家和国际组织均应立即采取行动。有些国际性行动已初见成效，建立起了一些情报与监测机构，实施了若干个初步的行动计划，在各地建立了总面积达 400 万平方公里的世界保护区网络，占全球无冰陆地面积的 3%，制订了资源开发与保护的一些国际性规范，例如《世界自然资源保护大纲》（以及各国制订的相应的规范，如《中国自然保护纲要》）、《国际重要湿地公约》、拟议中的《科学目的岛屿公约》和《濒危物种国际贸易公约》等。这些规范都有利于保护重要的生境及其物种。1992 年 6 月在巴西里约热内卢召开的世界环境与发展大会上又签署了《生物多样性公约》更是朝着保护生物多样性迈出的坚实的一步。这一切都表明了文明社会对物种保护的关切，但是，要减缓目前物种灭绝的势头，使生物多样性得到真正的保护，仍需全人类作出更大的努力。

第四节 国际人与生物圈计划概况

自联合国教科文组织制定并实施人与生物圈国际计划以来，得到了全世界许多国家的支持，中国也和其他国家一样成立了人与生物圈国家委员会。国内的专家、学者和有关人员编译了许多关于人与生物圈计划的文献和专著。现根据世界自然保护（刘双进等，1990）、改善生态环境（傅立勋等，1989）和现代生态学透视（马世骏等，1990）等主要资料简述人与生物圈计划的目的、研究内容，生物圈保护区的特征、功能。

一、人与生物圈计划的目的

人与生物圈计划（MAB）是联合国教科文组织决定于1971年在国际生物学计划（IBP）的基础上制定并开始实施的一项对生态环境进行综合性研究、监测及培训科研和管理人员的国际计划。其目的是为生物圈资源的合理利用和保护提供科学依据，预测由于人类活动而引起的生物圈状况的改变以及这种变化对人类的影响。此外，为了解决这些问题而应进行何等教育等问题，从而提高人类有效管理生物圈资源的能力。

到1989年为止，已有113个国家成立了人与生物圈国家委员会。同时，在66个国家中建立了261个生物圈保护区。

1972年，在联合国教科文组织第17届大会上，中国参加了人与生物圈计划的国际协调理事会，并当选为理事国。

二、人与生物圈计划的研究内容

人与生物圈计划的中心内容涉及到研究计划的决策者和当地人民，现场培训和示范，学科的汇集，包括社会学、生态学、物理学以及与复杂的环境研究相关的科学。

人与生物圈计划的研究内容主要包括14个课题，其题目是：

- 1) 不断增加的人类活动对热带、亚热带森林生态系统的影响。
- 2) 不同的土地利用和管理方法对温带和地中海森林景观的影响。
- 3) 人类活动和土地利用对放牧地、热带稀树草原和草场（从温带到干旱区）的影响。
- 4) 人类活动对干旱和半干旱地区生态系统的发展与演化带来的影响，特别是灌溉的作用。
- 5) 人类活动对湖泊、沼泽、河流、三角洲、河口及海岸地带的作用和对这些地方的资源所产生的生态学影响。
- 6) 人类活动对山地和冻原生态系统的的影响。
- 7) 岛屿生态系统的生态与管理利用。
- 8) 自然保护区及其特有资源的保护。
- 9) 从生态学角度评价使用化肥对陆地和水生生态系统的影响。
- 10) 大型工程建设对人类及其环境的影响。
- 11) 城市系统生态学。
- 12) 人口和遗传特性的演变同环境变化的相互关系。
- 13) 对环境质量的评价。
- 14) 环境污染及其对生物圈影响的研究。

三、生物圈保护区的特征

生物圈保护区的主要特征是：1) 生物圈保护区是指典型的大陆和沿海环境保护区，能支持持续发展，已被国际上承认具有自然保护价值，能提供科学知识和技能、并具有人类学保护价值。2) 生物圈保护区联合构成世界保护网，有利于自然和人工生态系统的保护和管理信息的交流。3) 每个生物圈保护区都包括一个世界生物地理省份内典型天然生态系统或受破坏程度最低的生态系统（中心区域）。4) 每个生物圈保护区应当大到足以作为有效的自然

保护单位，并应具有长期变化测量标准的价值。

5) 生物圈保护区应当提供生态研究、教育、示范和培训的机会。

6) 生物圈保护区由“中心区”和“缓冲区”组成。缓冲区的复合利用可包括各种农业活动、住宅区和其它用途。

7) 生物圈保护区必须具有适当的长期性的法律、法规和制度上的保护，它可以与现有的或拟设置的保护区一致起来，或合并到这些保护区中。

8) 人是生物圈保护区的组成部分，人及其活动不应排斥在生物圈保护区之外，而应该鼓励人们参与保护区的长期保护和管理。

9) 在生物圈保护区规划之后，一般不需要改变土地所有权或管理法令，但对中心区和特别研究地的绝对保护需要改变的地区例外。

四、生物圈保护区的功能

(一) 自然保护与传统土地利用结合功能

生物圈保护区是重要的基因物质库。保护区内的基因资源除被开发利用外，还可为物种灭绝的地区重新移植这种物种提供基因物质。生物圈保护区还有一个独特的功能就是保护传统的土地利用体系。

(二) 研究和监测功能

由于生物圈保护区内没有人类活动的严重破坏，所以可为研究、监测生物圈的各种变化提供理想的场所，并且成为汇集科学信息最有吸引力的地方。在生物圈保护区内可进行多学科、交叉学科的研究，以此提出大范围内自然区域生态系统持续保护的模

(三) 教育和培训功能

生物圈保护区可作为教育和培训科学家、资源管理人员、保护区管理人员、访问人员和当地居民的重要中心场所。保护区内的发展教育和培训规划性质取决于生物圈保护及其周围地区具体的条件、能力和要求。

(四) 合作功能

生物圈保护区的地位可为改善局部的、区域的和国际间的合作提供基础。所有的生物圈保护区都是国际网的一部分，这为各生物地理区内部和彼此之间的联系奠定了基础。合作的内容包括：监测、评价、预测、技术信息共享、学者交流和培训及提供咨询等。

复习思考题

1. 简述生物圈的概念及主要发育过程。
2. 简述生态系统的形成与发展。
3. 简述生态系统的结构。
4. 简述生态系统的功能。
5. 举例说明生态学上所谓的 10% 定律。
6. 生态系统为何处于完美、和谐之中？
7. 水体富营养化现象是否与固氮作用超过反硝化作用有关？
8. 简述生态平衡的定义。
9. 简述破坏生态平衡的因素。
10. 简述森林减少的原因。
11. 简述草场退化的原因及后果。
12. 简述大量施用农药的生态学后果。
13. 简述物种灭绝的原因及对人类的不利影响。

14. 简述国际人与生物圈计划的目的是、研究内容。
15. 简述生物圈保护区的主要特征、功能。

第五章 大气圈与大气污染

大气圈是由气体和悬浮物组成的复杂流体系统。地球在行星系统中开始出现时，还没有大气圈。大气是由地球本身产生的化学和生物化学过程经过长期演化而成。地球上的大气是维持一切生命所必需的。低层大气的主要成分是氮气和氧气，此外，还有惰性气体及二氧化碳、甲烷等微量气体。

大气圈的这种组成并非古而有之，也并非一成不变，而是大气圈长期发育演变的结果，其发育与演变又受到地球其它圈层发育演变的影响。

第一节 大气圈的结构和组成

一、大气圈发展史

45 亿年前，在地球发育的早期阶段，在太阳发射的热量、可见光、紫外线和 X 射线等作用下，C、H、O 与 N 等原子结合成 H_3 、 NH_4 、 CH_2 与 H_2O 等分子，构成了原始大气的主要成分。

经过漫长的地质时期，到了大约 30 亿年前，原始海洋中的 C 元素在射线作用下与其它元素结合产生了少量的有机分子，例如原始病毒（protovirus），能从原始海洋“汤液”的有机化合物发酵中获取必要的能量，作为副产品放出 CO_2 。这是大气圈发育历史中的一个重要事件，为叶绿素的光合作用合成糖创造了条件。

20 亿年以前含叶绿素的生物出现是大气圈发育历史上的另一个划时代的事件，光合作用产生了 O_2 ，这种极其活泼的元素对大气圈进行了一次“氧革命”：它与 CH_4 作用生成 CO_2 和 H_2O ，与 NH_3 作用生成 N_2 和 H_2O ，在高空中 O_2 分子相互作用生成 O_3 。 O_3 的出现逐渐减弱了紫外线辐射的强度，为更高等的海洋植物出现提供了条件。

大气圈中 O_2 含量的这种变化可以从岩石学中找到证据：世界上许多地方都发现叠层石（stromatolites），这种 20—30 亿年前形成的岩石外表上象一本本揉皱了的书，是古海洋中的河流冲积物在细菌作用下形成的。这个过程现代还在进行，不同之处是现代叠层石是在蓝绿藻作用下形成的，已经氧化；而 30 亿年前的叠层石却未受氧化，这说明当时大气中 O_2 很少。

另一个岩石学证据是 现已发现许多有经济价值的富铁岩石是 20 亿年前形成的。据认为 20 亿年前以还原状态溶解于古海洋中的铁与光合作用产生的 O_2 结合（氧化）而沉积下来形成岩石。海洋中大部分铁质被氧化、沉积后，生物所产生的 O_2 开始在大气中积累。因此，大气中游离 O_2 的浓度在大约 20 亿年前开始明显增加。根据这种理论，地壳中重要的铁矿与大气中的游离 O_2 均系生物作用的结果。

值得指出的是，这场“氧革命”的主角竟然是毫不引人注目的低等植物——蓝绿藻。

古海洋中蓝绿藻长期以来是释放 O_2 的主要生物。它与其它生物一样，在光合作用时摄入 CO_2 ，放出 O_2 ，但藻类本身的呼吸作用又吸入 O_2 ，把 CO_2 放回大气中。藻类死亡后沉入海底被覆盖后进行不完全的分解，造成 O_2 的摄入与释出之间微小的不平衡，使 O_2 有所积累。 O_2 长期积累的结果最终改变了大气圈以及地球的面貌。如果没有生命的活动，则今天大气圈的组成将完全是另一种情况（图 5.1）。

图 5.1 地球大气圈发育史

(a) 目前所知的情况

(b) 假定无生命存在的情况

(资料来源：Botkin and Keller, Environmental Study, 1982)

由此可见，生物圈是在大气圈与水圈、岩石圈的共同作用下产生的，但

生物的出现以及生物圈的形成又深刻地改变了大气圈的组成和其它圈层的面貌，这也是自然界中互为因果的极好例证。

二、大气圈的结构

大气圈就是指包围着整个地球的空气层。大气圈的边界很难确定，但从流星和北极光的最高发光点推算，在离地球表面 800km 的高空还有少量空气存在。所以，一般来说，大气圈的厚度为 1000 公里。

大气圈的总质量估计为 5.2×10^{15} 吨，相当于地球质量 (5.974×10^{21} 吨) 的百万分之一。大气质量在垂直方向的分布是极不均匀的。由于受地心引力的作用，大气的质量主要集中在下部，其中的 50% 集中在离地面 5km 以下；75% 集中在 10km 以下，90% 集中在 30km 以下。

按照分子组成，大气可分为两个大的层次：均质层和非均质层（或同质层和异质层）。

均质层为从地表至 90km 左右高度的大气层，其密度随着高度的增加而减小。除水汽有较大变动外，它们的组成是稳定均一的。这是由于大气低层的风和湍流连续运动的结果。

均质层上面是非均质层，根据其成分又可分为四个层次：氮层（距地面 90—200km）、原子氧层（200—1100km）、氦层（1100—3200km）、氢层（3200—9600km）。在这四个层次之间，都存在过渡带，没有明显的分界面。

按大气的化学和物理性质，大气圈也可分为光化层和离子层，两层大致以平流层顶为分界线。

大气圈垂直方向有各种各样的分层方法。目前世界各国普遍采用的分层方法是 1962 年世界气象组织（WMO）执行委员会正式通过国际大地测量和地球物理联合会（IUGG）所建议的分层系统，即根据大气温度随高度垂直变化的特征，将大气分为对流层、平流层、中间层、热成层和逸散层（图 5.2）。

1. 对流层大气圈的最低一层，其平均厚度约为 12km。对流层是大气中最活跃的一层，存在着强烈的垂直对流作用，同时也存在着较大的水平运动。对流层里水汽、尘埃较多，雨、雪、云、雾、雹、霜、雷、电等主要的天气现象与过程都发生在这一层里。此层大气对人类的影响最大，通常所指的大气污染就是对此层而言。尤其是在靠地面 1—2km 的范围内，受到地形、生物等影响，局部空气更是复杂多变。对流层内大气温度随高度的增加而下降，其平均温度递减率约为 -6.5 /km。

对流层顶的实际高度随纬度位置和季节而变化。平均而言，对流层的高度从赤道向两极减小，在低纬度地区对流层高约 18km，中纬度地区为 11km，高纬度地区为 8km。

对流层相对于整个大气圈的总厚度来说是相当薄的，而它的质量却占整个大气总质量的 3/4 以上。

2. 平流层 从对流层顶以上到大约 50km 左右的高度叫平流层，也叫同温层。平流层的下部有一很明显的稳定层，温度不随高度变化或变化很小，近似等温。然后随高度增加而温度上升。这主要是由于地表辐射影响的减少和氧及臭氧对太阳辐射吸收加热，使大气温度随高度增加而上升。这种温度结构抑制了大气垂直运动的发展，大气只有水平方向的运动。

在平流层中水汽和尘埃含量很少，没有对流层中那种云、雨等天气现象。

在平流层之上，距地面大约 50km 的地方温度达到了最高值，这就是平流

层顶。

3. 中间层 平流层顶以上到大约 80km 的一层大气叫作中间层。在这一层中温度随高度增加而下降。在中间层顶，气温达到极低值，是大气中最冷的一层。

在中间层内，大气又可发生垂直对流运动。该层水汽浓度很低，但由于对流运动的发展，在某些特定条件下仍能出现夜光云。在大约 60km 的高度上，大气分子在白天开始电离。因此，在 60—80km 之间是均质层转向非均质层的过渡层。

4. 热成层 在中间层顶之上的大气层称为热成层，也称作增温层或电离层。在热成层中大气温度随高度增加而急剧上升。到大约 1000km，白天气温可达 1250—1750K。在热成层中由于太阳和其它星球辐射各种射线的作用，该层中大部分空气分子大都发生电离，成为原子、离子和自由电子，所以这一层也叫电离层。

在热成层中由于太阳辐射强度的变化，而使各种成分分解过程表现出不同的特征。因此大气的化学组成也随高度增加而有很大的变化。这就是非均质层的由来。

5. 逸散层 在热成层之上的大气层称为逸散层。也称外大气层。是大气圈的最外层，大约在 800km 以上。在外层，大气极为稀薄，地心引力微弱，大气质点之间很难相互碰撞。有些运动速度较快的大气质点有可能完全摆脱地球引力而进入宇宙空间去。

三、大气的组成

地球大气的主要成分是氮和氧，这种大气的化学组成在太阳系的九大行星中非常特殊。离地球最近的两颗行星——金星和火星的大气化学组成就与地球大气完全不同，其主要成分是二氧化碳，氧含量极少，几乎不存在（图 5.3）。

地球大气的成分除主要气体氮和氧外，还有氩和二氧化碳，上述四种气体占大气圈总体积的 99.99%。此外还有氦、氩、氖、氙、氫、甲烷、一氧化二氮、一氧化碳、臭氧、水汽、二氧化硫、硫化氢、氨、气溶胶等微量气体（表 5.1）。

在组成地球大气的多种气体中，包括稳定组分和可变的不稳定组分。氮、氧、氩、氖、氫、氙、甲烷、氫、氙等是大气中的稳定组分，这一组分的比例，从地球表面至 90 公里的高度范围内都是稳定的。

二氧化碳、二氧化硫、硫化氢、臭氧、水汽等是地球大气中的不稳定组分。

另外，地球大气中还含有一些固体和液体的杂质。主要来源于自然界的火山爆发、地震、岩石风化、森林火灾等和人类活动产生的煤烟、尘、硫氧化物和氮氧化物等，这也是地球大气中的不稳定组分。

地球大气圈的形成与演化，经历了漫长的地质时期。现在大气圈的面貌是地球各圈层（主

表 5.1 大气的组成

成 分	体积混合比	寿 命
氮 (N ₂)	0.78083	~ 10 ⁶ 年
氧 (O ₂)	0.20947	~ 5 × 10 ³ 年
氩 (Ar)	0.00934	~ 10 ⁷ 年
二氧化碳 (CO ₂)	0.00035	5—6 年
氖 (Ne)	1.82 × 10 ⁻⁶	~ 10 ⁷ 年
氦 (He)	5.2 × 10 ⁻⁶	~ 10 ⁷ 年
氪 (Kr)	1.1 × 10 ⁻⁶	~ 10 ⁷ 年
氙 (Xe)	0.1 × 10 ⁻⁶	~ 10 ⁷ 年
氢 (H ₂)	0.5 × 10 ⁻⁶	6—8 年
甲烷 (CH ₄)	1.7 × 10 ⁻⁶	~ 10 年
一 氧 化 二 氮 (N ₂ O)	0.3 × 10 ⁻⁶	~ 25 年
一氧化碳 (CO)	0.1 × 10 ⁻⁶	0.2—0.5 年
臭氧 (O ₃)	10 — 50 × 10 ⁻⁹	~ 2 年
水汽 (H ₂ O)	2—1000 × 10 ⁻⁶	~ 10 天
二氧化硫 (SO ₂)	0.03 — 30 × 10 ⁻⁹	~ 2 天
硫化氢 (H ₂ S)	0.006 — 0.6 × 10 ⁻⁹	~ 0.5 天
氨 (NH ₃)	0.1—10 × 10 ⁻⁹	~ 5 天
气溶胶	1 — 1000 × 10 ⁻⁹	~ 10 天

(资料来源：王明星，大气化学，1991。)

要是生物圈)塑造的。生物圈各组分与大气之间保持着十分密切的物质与能量的交换，它们从大气中摄取某些必需的成分，经过光合作用、呼吸作用和其残体的好气或厌气分解作用，又把一些气体释放到大气中去，使大气的组分保持着精巧的平衡。

如果大气组分的这种平衡一旦遭到破坏，就会对许多生物甚至会对整个生物圈造成灾难性的生态后果。

就以大气组分中的二氧化碳而论，尽管它在大气圈中只占 0.03%，但对地球上的生物却很重要。据估算，生物圈每年由大气吸收的二氧化碳约为 480×10^9 吨，而向大气排放的二氧化碳也差不多是这一数值。19 世纪工业革命以前，大气中二氧化碳的浓度一直保持在 0.028%。工业革命后，随着人口增加和工业发展，人类活动已经开始打破了二氧化碳的自然平衡。植被（尤其是森林）的破坏和大量化石燃料及生物体的燃烧使生物圈向大气排放的二氧化碳量超过了它从大气中吸收的二氧化碳量，使大气二氧化碳浓度逐年上升，目前已经达到 0.035% 左右。由于二氧化碳具有吸收长波辐射的特性，而使地球表面温度升高，并因此导致一系列连锁反应，其中对人类影响较大

的是温度上升会使极地冰帽融化，海平面上升，世界上许多地区将被淹没在海水之下。

相反，如果二氧化碳含量减少，则会引起气温下降，这种温度下降的幅度即使很小，也会带来很大的影响。因为温度下降会使作物生长期缩短，而导致产量减少。

对于含量极少的甲烷也是如此，其浓度目前为 1.4ppm，只要略有增高，在现有氧的浓度下就会因闪电而燃烧。而更重要的是，甲烷的“温室效应”比二氧化碳效果强 300 多倍。对全球变暖起着重要作用。

对于生命活动至关重要的氧更是如此。大气中氧浓度的降低或增高都会影响许多重要的生命过程和产生一些意想不到的恶果。氧浓度的大小决定了生物的演化过程。30 亿年前，地球大气中氧的浓度只有现在浓度的千分之一，生命只可能出现在水下 10 米深处。大约距今 6 亿年时，地球大气中氧的浓度达到了现在浓度的百分之一，生物开始出现在水面上，这是生物发展史上的第一个关键浓度。到了大约 4 亿年以前，大气中氧的浓度达到了现在浓度的十分之一，生物从海洋登上了陆地，这是生物发展史上的第二个关键浓度。此后，地球大气中氧的浓度尽管也出现过小幅度的波动（比现在浓度高），但一直保持在一定的水平上，即复氧与耗氧之间达到了某种平衡（图 5.4）。

另外，大气中氧含量如果由现在的 21% 增高至 25%，则雷电就能把嫩枝与草地点燃，造成连绵不断的火灾，使全球植被化为乌有。当然，这只是一种假想的情况，因为发生森林火灾的同时也消耗了大气中的氧，这里还存在一些负反馈机制问题。

诚然，大气圈以其巨大的体积与质量，更由于存在着反馈机制，要想改变其组成的百分之一，千分之一乃至万分之一并非易事。然而，人类以其巨大的数量和今日高度发展的科学技术，却确实在对大气圈发生着一定的影响。

第二节 大气污染与类型

一、大气污染的含义

在英语中大气污染有两个名词：Air Pollution（空气污染）和 Atmosphere Pollution（大气污染）。后者用法比较固定，专指有毒有害化学物质排放到室外空气中所产生的污染问题。而对前者的使用比较混乱，有人将此词仅仅理解为室内空气污染；也有人将其理解为室内和室外空气污染的总称。

对于什么是大气污染，许多国家的科学工作者提出了内容类似的定义，可综合概括如下：由于自然的或人为的过程，改变了大气圈中某些原有成分和增加了某些有毒有害物质，致使大气质量恶化，影响原来有利的生态平衡体系，严重威胁着人体健康和正常工农业生产，以及对建筑物和设备财产等的损坏，这种现象称为大气污染。

二、大气污染与大气污染的分类

（一）大气污染的分类

（1）大气污染按其影响所及范围可分为四类：局部性污染、地区性污染、广域性污染、全球性污染。上述分类方法中所涉及到的范围只能是相对的，没有具体的标准。例如广域污染是大工业城市及其附近地区的污染，但对某些国家来说（面积有限）可能产生国与国之间的广域污染。

（2）根据能源性质和大气污染物组成和反应，一般将大气污染划分为四种类型：煤炭型、石油型、混合型、特殊型。

煤炭型污染的一次污染物是烟气、粉尘和二氧化硫。二次污染物是硫酸及其盐类所构成的气溶胶。此污染类型多发生在以燃煤为主要能源的国家与地区，历史上早期的大气污染多属于此种类型。

石油型污染又称排气型或联合企业型污染，其一次污染物是烯烃、二氧化氮以及烷、醇、羰基化合物等。二次污染物主要是臭氧、氢氧基、过氧氢基等自由基以及醛、酮和 PAN（过氧乙酰硝酸酯）。此类污染多发生在油田及石油化工企业和汽车较多的大城市。近代的大气污染，尤其在发达国家和地区一般属于此种类型。

混合型污染是指以煤炭为主，还包括以石油为燃料的污染源而排放出的污染物体系。此种污染类型是由煤炭型向石油型过渡的阶段，它取决于一个国家的能源发展结构和经济发展速度。

特殊型污染是指某些工矿企业排放的特殊气体所造成的污染，如氯气、金属蒸汽或硫化氢、氟化氢等气体。

前三种污染类型造成的污染范围较大，而第四种污染所涉及的范围较小，主要发生在污染源附近的局部地区。

（3）根据污染物的化学性质及其存在的大气环境状况，可将大气污染划分为两种类型：还原型和氧化型。

还原型是指以煤、石油等为燃料所产生的大气污染，实质上就是第二种分类方法中的煤炭型和混合型污染。

氧化型是指以石油为燃料所产生的大气污染，实质上就是第二种分类方法中的石油型污染。

有关还原型和氧化型大气污染的特征见表 5.2。

（二）污染源的类型划分方法

大气污染可分为自然的和人为的两大类。前者是自然界所发生火山爆发、地震、台风、森林火灾等自然灾害所造成的。后者是人类活动所排放的有毒有害气体所造成的。目前，一般所说的大气污染多指后者。人为造成大气污染的污染源较多，根据不同的研究目的以及污染源的特点，污染源的类型有四种划分方法：

(1) 按污染源存在的形式可划分为固定污染源和移动污染源，此划分法适用于进行大气质量评价时绘制污染源分析图。

(2) 按污染物排放的方式可划分为高架源、面源、线源，此划分法适用于大气扩散计算。

(3) 按污染物排放的时间可划分为连续源、间断源、瞬时源，此划分方法适用于分析大气污染物排放的时间规律。

表 5.2 烟雾的两种代表类型 (L.H. 洛嘉斯)

	洛杉矶烟雾	伦敦烟雾
发生时的温度	75 — 90F	30 — 40F
发生时的湿度	70 % 以下	85 % 以上
逆温种类	下沉逆温	辐射逆温
风速	8km/h 以下	无风
烟雾最浓时的视距	1.6 — 0.8 公里以下	100 米以下
最容易发生的时期	8 月, 9 月	12 月, 1 月
使用的主要燃料	石油燃料	煤及石油类燃料
主要污染物质	HC, 臭氧, 有机物, 二氧化氮, 一氧化氮	硫化物, 颗粒物, 一氧化碳
反应类型	光化学的及热的	热的
化学作用	氧化	还原
发生时间	中午	早晨
对人体的影响	短时间刺激眼粘膜等	刺激呼吸系统器官引起咳嗽, 同时呼吸系统患者死亡率增高

(4) 按污染物产生的类型可划分为生活污染源、工业污染源、交通污染源，此划分法适用于区域大气环境质量评价。

第三节 大气污染物的种类及其转化规律

一、大气污染物的种类

大气污染物的种类很多，并且因污染源不同而有差异。目前大气污染物的物理、化学性质非常复杂。根据污染物的性质，可将其分为一次污染物（原发性污染物）与二次污染物（继发性污染物）。一次污染物是从污染源直接排出的污染物，它可分为反应性物质和非反应性物质。前者不稳定，还可与大气中的其它物质发生化学反应；后者比较稳定，在大气中不与其它物质发生反应或反应速度缓慢。二次污染物是指不稳定的一次污染物与大气中原有物质发生反应，或者污染物之间相互反应而生成的新的污染物质，这种新的污染物质与原来的物质在物理、化学性质上完全不同。但无论是一次污染物还是二次污染物都能引起大气污染，对环境及人类产生不同程度的影响。

按污染物质的物理状态，可分为固体、液体和气体等形式。其中 90% 以气体形式存在，10% 以气溶胶形式存在。根据化学性质不同，一般把大气污染物分为以下八类：

- 1) 碳氧化物，主要指 CO 和 CO₂。
- 2) 氮氧化物，主要指 NO 和 NO₂，用 NO_x 表示。
- 3) 硫氧化物，主要指 SO₂ 等，用 SO_x 表示。
- 4) 碳氢化合物，通常包括醛、酮和 H—C—O 化合物。
- 5) 卤素化合物，主要指氟利昂。
- 6) 氧化剂，主要指 O₃、PAN 和过氧化物等。
- 7) 颗粒物及气溶胶。
- 8) 放射性物质。

此外，有的地区还有汞蒸汽、铅蒸汽和石棉等污染（表 5.3）。

上述污染物对环境和人类健康的影响是显而易见的。要想减少或消除环境中的污染物，就必须了解污染物的来源和迁移转化规律，以便制订相应的处理措施。下面主要讨论几种具有代表性的污染物的来源、迁移转化和归宿。

二、大气环境中主要污染物的迁移转化规律

（一）一氧化碳的来源、迁移转化和归宿

CO 是低层大气中最丰富的气态污染物，也是人类向自然界排放量最大的污染物。

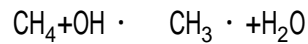
人为源 CO 主要来自汽车尾气和化石燃料的燃烧。根据对全球化石燃料消耗量、燃烧条件以及对汽车排放状况的实际测量估算，1984 年全球人为排放的一氧化碳约为 640×10^6 吨。其中 50% 以上是来自汽车的汽油燃烧。

自然源 CO 主要来自海洋、森林火灾和森林中释放出的萜烯化合物及其它生物体的燃烧，此外还有甲烷和其它碳氢化合物的氧化对大气一氧化碳的贡献。

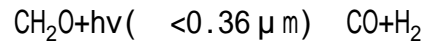
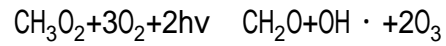
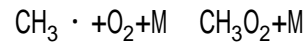
以前，人们认为海洋是吸收 CO 的重要途径，但通过实测研究发现，表层海水中的 CO 是饱和的，根据海水和大气中 CO 浓度之差估算出海洋每年向大气中排放 CO 量约为 100×10^6 吨。森林火灾和其它生物体燃烧排放的 CO 量约为 60×10^6 吨。甲烷和其它碳氢化合物的氧化向大气排放 CO 量很难估算，因为甲烷转化成一氧化碳的中间产物很多，因此该源的估算值相差很大。

大气中甲烷被氧化成一氧化碳的反应过程主要是首先与 OH· 作用生成

$\text{CH}_3 \cdot$ 和 H_2O ，即

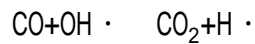


生成的 $\text{CH}_3 \cdot$ 很快与大气氧反应生成 CH_3O_2 ，此生成物继续反应，生成 CH_2O ，进而转化为 CO ，即



大气中 CO 的最终归宿有两个方面：第一，在大气中氧化转化成 CO_2 ；第二，被土壤吸收。

大气中 CO 很容易与 $\text{OH} \cdot$ 反应，主要过程是：



这一过程对大气 CO 的清除率约为 90%。

表 5.3 地球大气圈重要污染物和一些痕量气体的特征
(转引自 Ebbe Almquist, 1974)

成分	污染源		估计排放量 (10 ⁶ ta)		大气中停留时间		主要的沉降 和去除反应	应解决的问题	
	人为释放	天然释放	人为的	天然的	对流层	同温层		地球	区域的
二氧化碳	燃烧	生物腐烂, 从海洋放出	4-5 × 10 ³ (以C计)	2-3 × 10 ⁴ (以C计)	4年	2年	生物吸收, 光合作用, 海洋吸收	累积在对应层, 气候变化与此有关	沉降反应
一氧化碳	汽车排出的燃烧	甲烷反应 森林着火, 从海洋中放出, 砷烷反应	250	> 10 ³	0.1-3年	未知, 大量沉降	可能氧化为CO ₂	累积与否? 消失在同温层中	
二氧化硫	化石燃料的燃烧	从海洋中放出(硫酸盐), 火山爆发	80 (以S计)	50 (以S计)	-4天		氧化成硫酸盐、硫酸	在对流层和同温层上空形成微粒	伤害植物, 危害人类健康, 微粒形成过程
硫化氢	化学过程, 污水处理	有机物的腐烂, 火山爆发	3 (以S计)	100 (以S计)	-2天		氧化成SO ₂ , 通过下雨清洗掉		氧化成SO ₂ 过程
臭氧	工厂排放物的光化学反应	由于火山爆发, 雷击, 森林着火, 氧的光离解	少	2000	1-3个月	0.1-2年	还原成O ₂	保护由于超音速飞机而破坏的O ₃ 层	光化学过程
水蒸汽	燃烧	蒸发	10 ⁴	5 × 10 ³	10天	2年	交界层, 具有冷阱作用	影响O ₃ 和同温层辐射平衡	
一氧化氮 二氧化氮 一氧化二氮	燃烧	土壤生物作用	30 (以N计)	150 (以N计) - 400 (以N计)	5天 1-4天		氧化成硝酸盐同温层的光离解, 土壤的生物作用	对O ₃ 浓度的影响, 对PAN和微粒形成影响, 同温层的光离解率	损害植物(达ppm浓度)光化学过程
硝酸							化学反应, 扩散到同温层	对O ₃ 浓度的影响, 对产生气溶胶的影响	
氨	废料处理	生物腐烂	4	6 × 10 ³	2-5天		与SO ₂ 反应	形成	(NH ₄) ₂ S

土壤吸收 CO 能力的大小取决于土壤的类型,不同类型的土壤吸收率差别很大。根据实验资料推测,全球地表土壤的 CO 吸收量为 450×10^6 吨/年,约占全球 CO 总量的 10%。

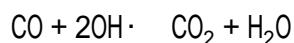
应该指出的是,对流层中 CO 的浓度变化深受海陆分布与人类活动的影响,北半球中纬度地区 CO 浓度最高,并且浓度随高度增加而减少,随纬度增加而减少;南半球大气 CO 的浓度较低,并且随高度和纬度的变化都很小。这种空间分布特征,可能是由于 CO 的人为源主要集中于北半球中纬度大陆上,加上该地带高浓度甲烷转化产生较多的 CO,因此北半球中纬度地区 CO 浓度最高。而南半球 CO 主要来自自然源,所以浓度较低,分布比较均匀。

就全球大气 CO 而言,尽管人为活动排放的 CO 量逐年增加,但全球平均浓度却没有什麼变化,这可能由于 CO 寿命较短最终转化为 CO₂,不可能在大气中累积之故。

不过城市大气中 CO 含量相当高,一般为 0.0005%—0.005%,主要是由于城市汽车的尾气中含有大量 CO 所造成的(表 5.4)。大气中 CO 浓度与交通量有直接关系(图 5.5)。

另外,关于大气中 CO 的归宿问题还存在着争论。有人认为大气中的 O₂、O₃、NO₂、OH·、HO₂·、RO·等可将 CO 氧化成 CO₂,但由于这些物质浓度低,反应速率慢,不可能对 CO 的清除产生重大影响;而 CO 又不易溶于水,在大气中被雨水清除的可能性也很小;再加之人为源对全球大气 CO 本底值影响不大的事实,这就充分说明大气中的 CO 存在巨大的消耗途径。因此有人认为土壤吸收是大气中 CO 消除的主要原因,而且土壤吸收 CO 主要是靠土壤中的微生物来实现的,它们将 CO 转化为 CO₂。

也有人认为对流层大气中 CO 也会有一小部分被输送到平流层中,并发生反应,即



上述争论问题还有待进一步深入研究。

表 5.4 汽车排气的化学组成

项 目	空 档	加 速	定 速	减 速
碳氢化物(乙烷等)(ppm)	300-1000	300-800	250-550	3000-12000
乙炔(ppm)	710	170	178	1096
醛(ppm)	15	27	34	199
氮氧化物(ppm)	10-50	1000-4000	1000-3000	5-50 —
氧化碳(%)	4.9	1.8	1.7	3.4
二氧化碳(%)	10.2	12.1	12.4	6.0
氧(%)	1.8	1.5	1.7	8.1
排气量(m ³ /分)	0.14—0.7	1.13—5.66	0.7—1.7	0.14—0.7
排气温度()	149-582	482-704	427-594	204-427
未燃燃料(%)	2.88	2.12	1.95	18.0

(二) 硫化氢和二氧化硫的来源、迁移转化和归宿

硫是组成地球的重要元素之一,在生态循环中起着重要作用。大气中硫

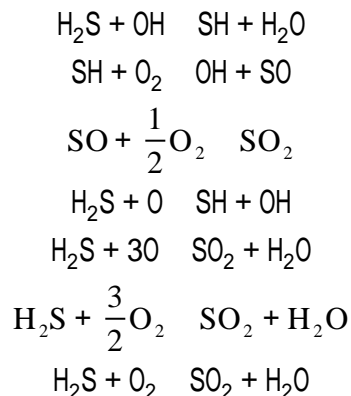
的化合物主要包括：硫化氢（H₂S）、二氧化硫（SO₂）、三氧化硫（SO₃）、硫酸（H₂SO₄）和硫酸盐及其气溶胶、有机硫及其气溶胶等。硫酸和硫酸盐的干、湿沉降是大气酸沉降的最主要成分。这里主要介绍硫化氢和二氧化硫的来源、迁移转化和归宿。

1. 硫化氢（H₂S） H₂S 主要来自陆地生物源和海洋生物源（表 5.5），人为来源很少。陆地生态系统产生 H₂S 的过程与 CH₄ 的产生过程类似。如果缺氧土壤中富含硫酸盐，厌氧微生物（还原菌）则将其分解还原成 H₂S。土壤中产生的 H₂S 一部分重新被氧化成硫酸盐，另一部分被释放到大气中。土壤中 H₂S 释放率取决于多种因素，包括土壤中 H₂S 产率，氧化率和输送效率。另外，光辐射强度、土壤温度、土壤化学成分和酸度等也都影响着土壤中 H₂S 的释放率。

图 5.5 美国曼哈顿交通量与一氧化碳含量的相关关系

由于 H₂S 主要来自自然源，它的浓度空间分布变化较大。大气中 H₂S 的浓度为 0.05—0.1 μg/m³。随高度增加浓度迅速下降。在海洋上空的大气中 H₂S 的浓度为 0.0076—0.076 μg/m³。也就是说，大气中 H₂S 的浓度陆地高于海洋，乡村高于城市。H₂S 在大气中残留的时间可达 40 天。

H₂S 在大气中最终会氧化为 SO₂，但其中间转化过程目前还不了解。可能的反应过程是：



上述反应在气相中进行很慢，但在大气中的颗粒物表面上反应速度则很快。由于 H₂S、O₂、O₃ 均溶于水，所以在云雾中反应速度也很快，特别是有过渡金属元素存在时，这种氧化过程进行得更快。

表 5.5 1966 年南、北半球硫的总排出量（10⁶t/a）

来 源	总 量	北半球	南半球
SO ₂	116	136	10
煤	102	98	4
石油燃烧和制炼	28.5	27.1	1.4
铜的冶炼	12.9	8.6	4
铅的冶炼	1.5	1.2	0
锌的冶炼	1.3	1.2	0.1
H ₂ S	107	69	38
生物的(陆地)	72	52	20
生物的(海洋)	32	14	18
SO ₂ 污染物来源	3	3	0
牛皮纸造纸厂	0.06	0.06	0
海浪飞沫(硫酸盐、亚硫酸盐)	44	19	25

[注] 引自 Robinson 和 Robbins (1969)。

表 5.6 1976 年全球人为排出 SO₂ 量 (10¹²g/a) (以 S 计)

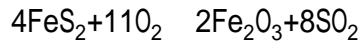
来 源	全球排放量	占总量百分比(%)
煤		
无烟煤	44.1	42.5
褐煤	16.6	16.0
焦煤	1.3	1.2
石油		
提炼	3.7	3.5
汽油	0.3	0.3
煤油	0.05	0.05
飞机油	0.05	0.05
蒸馏燃料油	1.9	1.8
残燃料油	22.9	22.1
石油炼焦	0.3	0.3
非铁矿冶炼		
铜	9.4	9.1
铅	0.8	0.7
锌	0.5	0.5
其他		
H ₂ SO ₄ 生产	1.3	1.3
制浆造纸	0.3	0.3
废物焚烧	0.3	
0.3		
生产硫	0.03	0.03
总 计	103.8	100%

[注]引自 Cullis 和 Hirscher, 1980

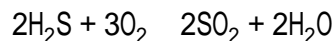
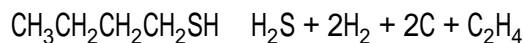
2. 二氧化硫 (SO₂) SO₂ 是大气中分布广、影响大的物质, 常用它作为大气污染的主要指标。SO₂ 来自自然源和人为源。自然源是火山爆发和还原态硫化物 (H₂S) 的氧化; 人为源是化石燃料 (主要是煤) 的燃烧, 其次是有色金属冶炼、石油加工和硫酸制备等 (表 5.6)。

煤和石油中的硫以无机硫和有机硫两种形式存在, 燃烧过程中发生如下反应。

无机硫绝大部分以硫化金属矿形式存在, 燃烧时产生 SO₂ :



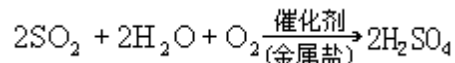
有机硫有硫醇、硫醚等, 燃烧时先生成 H₂S, 然后继续氧化为 SO₂ :



燃烧过程中生成的 SO₂ 气体从烟气中排出, 少部分生成硫酸盐存在于灰渣中。

SO₂ 进入大气圈后会发生一系列氧化反应, 形成 H₂SO₄、硫酸盐和有机硫化物。目前, 一般认为 SO₂ 的氧化过程有两种途径, 即催化氧化和光化学氧化。这两种途径虽不能截然分开但还是有主次之分的。国内外大量研究表明, 太阳辐射强度、温度、湿度、气溶胶、云、雾及氧化剂均是影响 SO₂ 转化的途径和速率的重要因素。

(1) 二氧化硫的催化氧化 在清洁干燥的大气中, SO₂ 被缓慢地氧化成 SO₃。但在电厂烟气中 SO₂ 被氧化的速度非常快, 其氧化速率是清洁干燥大气的 10—100 倍, 这与 SO₂ 在溶液中有催化剂存在条件下的氧化反应相似, 其总反应方程式可表示为:



在上述反应中, 催化剂是指 MnSO₄、FeSO₄、MnCl₄、FeCl₂ 等金属盐类。

催化氧化的基本机理是: 由于 Mn、Fe 的硫酸盐和氧化物常常以微粒的形式悬浮在空气中, 当湿度高时, 这些颗粒物就成为凝结核与水合成液滴。这些液滴吸收 SO₂ 和 O₂, 并使其在液相中进行一系列化学反应, 其具体步骤为:

气态 SO₂ 向液滴表面扩散;

SO₂ 从液滴表面扩散到内部;

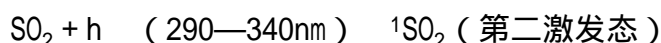
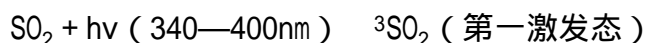
SO₂ 在液滴内部发生催化反应。

通常可以认为 SO₂ 的催化反应为一级反应, 其氧化速度与 SO₂ 的浓度有关, 并随催化剂类型与相对湿度而变。

(2) 二氧化硫的光化学氧化 在低层大气中, SO₂ 受太阳辐射时被缓慢地氧化成 SO₃。但是, 一旦生成 SO₃, 它便迅速地与大气中的水蒸气反应转变为 H₂SO₄。如果含有 SO₂ 的大气中同时存在氮氧化物和碳氢化合物, 则 SO₂ 转化为 SO₃ 的速度将大大提高, 并经常伴随着大量气溶胶的形成。

在大气中只存在 SO₂ 时, 其光化学氧化反应过程如下: 大气中 SO₂ 的吸收光谱表明, 在 384nm 处为弱吸收, SO₂ 吸收此波长的光后转变为三重态 ³SO₂;

在 294nm 处为强吸收，SO₂ 吸收此波长的光后转变为单重态 ¹SO₂。也就是当 SO₂ 在大气中吸收不同能量的光波时，形成不同激发态的 SO₂：



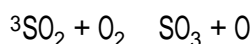
³SO₂ 能量较低，比较稳定。¹SO₂ 能量较高，它在进一步反应中，或者变为基态 SO₂，或者变为能量较低的 ³SO₂。¹SO₂ 遇到第三体 M (O₂, N₂) 时，很快地转变为基态 SO₂ 或 ³SO₂，其反应如下：



大气中 SO₂ 的光化学产物主要是 ³SO₂，而 ¹SO₂ 的作用主要在于生成 ³SO₂。大气中 SO₂ 转化为 SO₃ 主要是 ³SO₂ 与其它分子反应的结果。其中一部分 ³SO₂ 与其它吸收能量的分子反应转化为基态 SO₂，其反应如下：



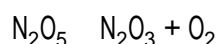
而当 M 为 O₂ 时，则：



这是大气中 SO₂ 转化为 SO₃ 的重要光化学反应过程。在阴天，相对湿度高和颗粒物浓度大的条件下，SO₂ 的转化途径以催化氧化为主；在晴天，相对湿度低，大气中同时含有氮氧化物和碳氢化合物时，尤其是颗粒物含量很少时，SO₂ 的转化途径则以光化学氧化为主。SO₂ 氧化后立即与 H₂O 反应，生成 H₂SO₄。如果大气中还有 NH₃ 存在时，就会生成 (NH₄)₂SO₄。所以，大气中的 SO₂ 经过一系列的化学转化之后，最终形成硫酸或硫酸盐，然后以湿沉降或干沉降的方式降落到地球表面。

(三) 氮氧化物的来源，化学转化及归宿

大气中的氮氧化物主要包括 N₂O, NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₅。N₂O₅ 和 N₂O₅ 在大气条件下易分解成 NO 和 NO₂，即



通常把这两种氮氧化物统称为奇氮。NO, NO₂ 是主要的大气污染物，常用 NO_x 表示。

NO_x 既有自然来源又有人为来源。自然源主要来自生物圈中氨的氧化、生物物质的燃烧、土壤的排出物、闪电的形成物和平流层进入物。据估计，大气中 NO_x 自然源排出量占总量的 47%—54%，人为源排出量占总量的 53%—46% (表 5.7)。

NO_x 人为来源主要指燃料燃烧、工业生产和交通运输等过程排放的 NO_x。据统计，1960 年代全世界的 NO_x 的年排出量已达 5 千多万吨。

燃料燃烧是指化石燃料燃烧时，排放的废气中含有 NO，其浓度可达千分之几。NO 排入大气后迅速转化为 NO₂。

工业生产是指有关企业如硝酸、氮肥和有机合成工业及电镀等工业在生产过程中排出大量 NO_x。

交通运输是指机动车辆和飞机等排出废气中含有大量 NO_x 。汽车排气已成为城市大气中 NO_x 的主要来源。

大气中 NO_x 的化学转化和归宿是大气环境化学中的一个重要问题。

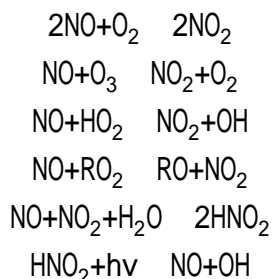
在最初排放的 NO_x 中， NO 占绝对优势，而 NO_2 通常只占不到 0.5%。 NO_x 在光化学烟雾形成过程中，以及 SO_2 被氧化过程中都起着重要作用。

表 5.7 大气中 NO_x 主要自然源和人为源及其估计排放量 (1983 年)
(单位: 10^6t/a , 以 NO_2 计)

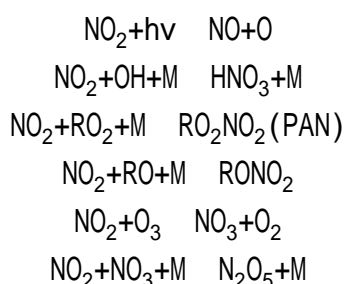
源	估计排放量(斯特德曼和谢特资料)	估计排放量(洛根资料)	占自然源、人为源排出量/(%)(洛根资料)	占总量/(%)
一、自然源			占自然源排出量	
1. 闪电	10	26	27.08-20.63	
2. 平流层注入	3	2	2.08-1.58	
3. 氢氧化	3	3-33	3.13-26.19	
4. 生物质燃烧[包括控制燃烧和未控制燃烧(如森林火灾)]	16	39	40.63	30.95
5. 土壤排出	33	26	27.08-20.63	
合计	65	96-126	100-99.98	47.06-53.85
二、人为源			占人为源排出量	
1. 矿物燃料燃烧		69	63.89	
2. 生物质燃烧		39	36.11	
合计		108	100	52.94-46.15
总计		204-234		

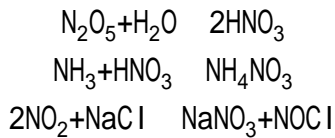
(资料来源:唐永銮,大气环境化学,1992)

(1) NO 的主要转化途径 NO 在大气中主要发生以下反应:



(2) NO_2 的主要转化途径 NO_2 在大气中主要发生以下反应:





NO_x 的上述转化过程可由图 5.6 形象地表示出来。

由上述反应可以看出, NO_x 的最终归宿是形成硝酸和硝酸盐。大颗粒的硝酸盐可直接沉降到地表和海洋中, 小颗粒的硝酸盐被雨水冲刷也沉降到地表和海洋中。

(四) 碳氢化合物的来源, 转化及归宿由碳元素和氢元素形成的化合物总称为碳氢化合物, 一般用 HC 来表示。

图 5.6 奇氮化合物的光化学转化

(据王明星, 大气化学, 1991)

碳氢化合物主要包括烷烃、烯烃、炔烃、脂环烃和芳香烃。

全世界每年向大气中排放的碳氢化合物约为 $1858.3 \times 10^6 \text{t}$, 其中自然排放量占 95%, 主要为甲烷和少量萜烯类化合物。人为排放量占世界总排放量的 5%, 主要来自汽车尾气、燃料燃烧、有机溶剂的挥发、石油炼制和运输等。全世界碳氢化合物的年排放量见表 5.8。

城市大气中碳氢化合物的人为污染主要来自汽车尾气, 即没有完全燃烧的汽油本身和由于燃烧时汽油裂解或氧化而形成的产物。表 5.9 所列为汽车尾气中主要成分。

表 5-8 全世界碳氢化合物排出量的估计 (60 年代末期)

来 源	原料消耗量	占碳氢化合物 排出百分数/(%)	碳氢化合物排 出量/(× 10 ⁶ t)
煤		2.9	
动力	1219	0.016	0.2
工业的	1369	0.051	0.7
家庭和商业的	404	0.50	2.0 石油
石油			
提 炼	11317bbl*	56t/10 ⁴ bbl	6.3/
汽 油	379	9.0	34
煤 油	100	< .0.1	< 0.1
燃料油	287	0.035	0.1
残余油	507	0.039	0.2
挥发和运输损耗	379	2.06	7.8
天然来源的 CH ₄			1600
稻 田			210
沼泽地			630
潮湿地带			672
其 他			88
来自植物的萜烯			170
针叶林			50
阔叶林, 耕地和草			50
原胡萝卜素的分解			70
其 他			36.9
溶剂使用			10
焚烧炉	500	5.0	25
木材燃料	466	0.15	0.7
森林火灾	324	0.37	1.2
总 计			1858.3

[注] 引自 Robinson 和 Robbins (1968)。
 bbl (石油桶) 为非法定计量单位, 1bbl=158.99dm³
 (资料来源: 唐永奎, 大气环境化学, 1992)。

表 5-9 典型汽车排气成分

总碳氢化合物和体积		总醛化合物和体积	
化合物	体积/(%)	化合物	体积/(%)
甲烷	14—18	甲醛	60—73
乙烯	15—19	乙醛	7—14
乙炔	8—14	C ₂ H ₅ CHO + CH ₃ COCH ₃	0.4—1.6
丙烯	6—9	丙烯醛	2.6—9.8
n-丁烷	2—5	丁醛	1—4
异戊烷	2—4	巴豆醛	0.4—1.4
甲苯	3—8	戊醛	0.4
苯	2.4	苯(甲)醛	3.2—8.5
正戊烷	2.5	甲苯(甲)醛	2—7
间二甲苯和对二甲苯	1.9—2.5	其他	0—10
丁烯	2—6	乙烷	1.8—2.3
2-甲基戊烷	1.5		
正己烷	1.2		
异辛烷	1.0		
其他	22—30		

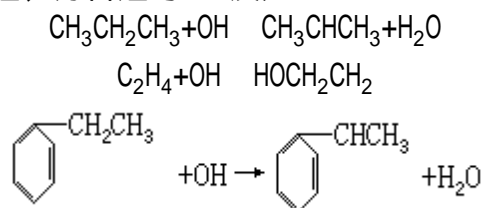
[注] 本表引自 Tuesday (1972)。表中甲烷、乙烯、乙炔、丙烯、苯、丁烯、乙烷为燃烧产物。

(资料来源：唐永奎，大气环境化学，1992)。

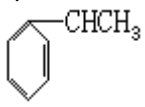
从环境污染的角度来看，HC 的含量并不直接反映其污染环境的水平，更为重要的是它们在空气中的反应产物的含量。因为大多数 HC 的毒性较小，但由于它们是形成光化学烟雾的主要成分，由此而产生的二次污染物如 PAN 等却对人类健康有很大危害。

HC 进入大气后发生一系列的化学变化，主要是氧化过程。大气中 HC 及其衍生物很多，常见的有烷烃、烯烃、芳香烃、醛、酮等。这些 HC 可与各种自由基——OH，HO₂，RO₂ 和 O 及 O₃ 反应。其主要反应如下：

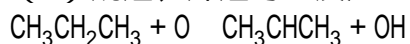
(1) 烷烃、烯烃、芳香烃与 OH 反应

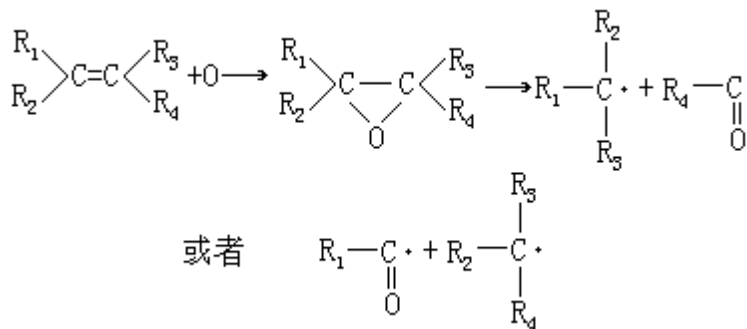


从上述反应中可以看出：丙烷与 OH 反应会引起脱氢，形成烷基和水；乙烯与 OH 反应会形成加合物，即 OH 在烯烃双链上加成；乙苯与 OH 反应引起芳

香烃侧链上的脱氢，形成  和水。

(2) 烷烃、烯烃与 O 反应





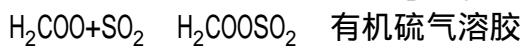
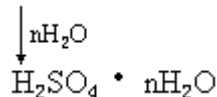
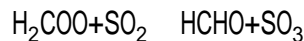
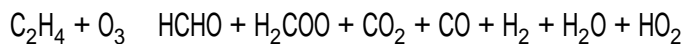
从上述反应中可以看出：丙烷与 O 反应能引起脱氢反应，形成烷基和氢氧基；烯烃与 O 反应首先形成激发态的环氧化合物，然后分解为烷基和酰基。

(3) 烯烃与 O₃ 反应 气态烯烃和液态烯烃与 O₃ 的反应机制相似，在反应中 O₃ 加合到烯烃的双链上，形成第一臭氧化物 (primary ozonide) 或单臭氧化物 (mon ozonide)，即



然后第一臭氧化物迅速分解为中间产物，最后转化为醛、酮、酸和无机化合物，如 CO、CO₂ 和 H₂O。

例如 C₂H₄ 和 O₃ 的反应为：



另外，中间产物也可能与 NO、NO₂ 反应。

(五) 光化学烟雾

由 HC、NO_x 及其光化学反应的中间产物和最终产物所组成的特殊混合物，叫作光化学烟雾。

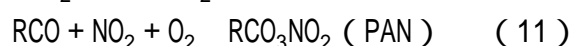
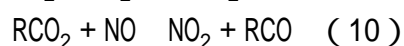
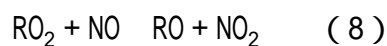
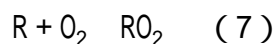
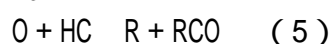
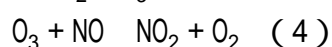
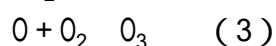
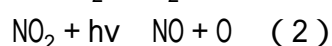
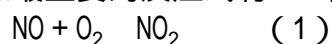
光化学烟雾是一种大气污染现象，最初发生在美国洛杉矶，因此也称作洛杉矶烟雾。洛杉矶烟雾与早期的伦敦烟雾有所不同 (表 5.2)。伦敦烟雾主要是 SO_x 和悬浮颗粒物的混合物，通过化学作用生成 H₂SO₄ 危害人的呼吸系统；而光化学烟雾则是 HC 和 NO_x 在强太阳光作用下发生光化学反应而生成刺激性的产物，如醛，还有 O₃ 和 PAN。

光化学烟雾形成的机理很复杂，许多学者都提出了自己的理论。1951 年，美国加利福尼亚大学的哈根·史密斯 (Haggen smith) 首先提出了关于光化学烟雾的形成机理。1956 年，史蒂芬斯 (Stephens) 又进一步研究了光化学烟雾形成机制，并以模式图定量表示其中生成物的主要光化学反应物质。1975 年，日本东京大学近藤次郎提出了用化学计量法建立光化学空气污染的数学模式。同期，美国环境科学研究者提出了包括起始反应，分支反应、

链增长反应和终止反应等四个阶段的反应阶段计算模式。1984年和1985年，莱昂（Leone）和塞恩费尔德（Seinfeld）提出了用6个模块反应机制（包括无机反应、醛反应和PAN形成、 α -双碳酰基（双羰基）化学反应、甲苯提取途径、甲苯加入途径和共轭双碳酰基化学反应）来描述光化学烟雾化学过程的模块反应模式。

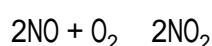
上述有关光化学烟雾形成机理的模式只是一些学者研究的成果，现在还不能说已经完全搞清楚了，还有待进一步深入研究。

光化学烟雾形成过程很复杂，其中包括240多个基元反应。而具有代表性和最主要的反应式有11个：



从上述反应中可以看出：

(1) NO 向 NO₂ 转化是产生“烟雾”的关键。在低层大气中一次污染物 NO、N₂、O₂、CO、C₃H₆ 等都不吸收紫外辐射，在污染空气中只有 NO₂ 吸收紫外辐射。而空气中的 NO₂ 来源于燃料燃烧：



(2) NO₂ 的光解是“烟雾”形成的开始。NO₂ 光解的结果产生 NO 和 O，随即形成 O₃。因此大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 之间的反应不断循环。如果大气中只发生 NO₂ 的光解循环，就无法产生光化学烟雾。当污染的大气中同时存在 HC 时，NO₂ 的光解循环才能被打破。

(3) HC 是产生“光化学烟雾”的主要成分

NO₂ 光解产生的 O，O₃ 与 HC 反应形成一系列带有氧化性、刺激性的中间产物和最终产物，从而导致光化学烟雾的形成。

HC 参加大气光化学反应主要有两条途径：第一，HC 在阳光作用下，通过光解形成自由基（R、RCO、RCO₂、RO），然后与 O₂ 立即化合而生成过氧基（RO₂、HO₂）和过氧酰基（RCO₃）。第二，HC 在 O、O₃ 和 OH 等自由基的作用下发生链反应，生成醛、酮、醇、烷、烯和水等，还有重要的中间产物——自由基。由这些自由基的进一步作用促使了 NO 向 NO₂ 的转化，形成了光化学烟雾中重要的二次污染物 PAN、RCHO、O₃ 的生成。

总之，光化学烟雾的形成过程是由一系列复杂的链式反应组成的。一般认为 NO₂ 的光解是大气光化学烟雾形成的起始反应，并促使了大气中 O₃ 的积

累；HC 的存在打破了 NO_2 的光解循环，生成了重要的自由基（R 和 RCO），促使 NO 向 NO_2 的快速转化。 NO_2 继续光解产生 O_3 ，同时在转化过程中产生的自由基又继续参与反应生成更多的自由基。上述反应不断循环进行，直到 RCO 自由基最后与 NO_2 结合产生 RCO_3NO_2 （PAN），光化学烟雾终结反应。

第四节 人类活动对大气圈的影响

一、世界气候的异常现象与变化趋势

自从人类栖居地球以来的 300 万年中，世界气候一直在经常和广泛地发生着波动 (Goudie, 1977a)。这些变化大部分与人类的活动影响无关。在不同时期内，有许多不同的自然因素使气候发生了变化，而且现在仍然变化着。

但是本世纪以来，随着人口增长和科学技术水平的提高，人类在改变世界气候过程中所起的作用越来越明显 (图 5.7)。

60 年代以来，世界各地不断发生气候异常现象，尤其是近几年，这种异常现象更为明显。例如 1986 年，印度东部和北部遭受了强大寒流侵袭；意大利的威尼斯城遭到一个世纪以来最大的洪水袭击；美国大西洋沿岸暴风雪成灾，西部地区因暴雨造成严重的山崩，南部地区遭受龙卷风和特大干旱；瑞士遭受猛烈的冰雹袭击；伊朗南部发生百年未遇大暴雨；中国四川出现大风冰雹天气，东北发生大水灾。

再如 1987 年，希腊、意大利、南斯拉夫、印度等国家出现未曾有过的高温，最高温度达 47℃；巴尔干地区春季出现百年不遇的大雪；西德发生三次龙卷风和 30 多次暴雨；意大利的贝加莫-科莫-阿尔卑斯三角地带每平方米的降雨量达 220 升。

图 5.7 一些可能引起气候变化的因素

(资料来源：A. 古迪，1989)

气候的形成和演变是一个非常复杂的问题，要确定它究竟是自然原因还是人类的影响及准确地预测气候的变化趋势是相当困难的。经过多年观测和研究，科学家们提出了各种研究理论，归纳起来主要有两种学说，即“变冷说”和“变暖说”。

变冷说最有力的根据是“米兰戈维支理论”。这种理论认为冰河期的形成起源于地球自转长时期的偏差，从而引起气流与洋流的变异。另外，地球自转的加速已导致大陆积雪的不规则变动，这些都可能引起气候变冷。

变冷说的第二个根据是“太阳黑子理论”。太阳黑子数量的增加将使太阳辐射减弱，引起地球变冷。通过观测发现，中欧的严冬都集中在太阳黑子数极大值附近。

变冷说的第三个根据是“阳伞效应”。主要是火山爆发喷出的尘埃和工业、交通、炉灶等排放的烟尘不断增加。这些悬浮在大气中的气溶胶颗粒就象地球的遮阳伞一样，反射和吸收太阳辐射，引起地面降温。也有人称此现象为“冷化效应”。

变暖说的根据较多，主要的根据是“温室效应”。由于化石燃料的燃烧，大气中 CO_2 含量增加。 CO_2 能够吸收红外辐射，并将它反射回到地面，从而干扰地球的热平衡，使低层大气温度上升。此现象与玻璃温室的作用相似，因此称为“温室效应”。

变暖说的第二个根据是“放大器效应”。大气中含有极少的氟氯烃 (CFC_s)、甲烷 (CH_4)、和二氧化氮 (N_2O)。尽管它们含量很少，但其吸热能力是巨大的， CH_4 的温室效应比 CO_2 的效果强 300 多倍，而 CFC_s 比 CO_2 强 2 万倍。 N_2O 也有将 CO_2 的温室效应加以放大的作用。

变暖说的第三个根据是“热岛效应”。随着人口增长，城市不断发展。城市的空气污染、人为热的释放和下垫面的改变引起了气温的上升，使市区温度一般比郊外高 0.5—1.0℃，此现象称为“热岛效应”。

变暖说的第四个根据是“厄尔尼诺效应”。在秘鲁、厄瓜多尔沿岸的海水温度骤然升高，一股暖洋流向南流动，使原属冷水域的太平洋东部水域变成暖水域，导致海洋浮游生物、鱼群及鸟类大量死亡，并引起全球范围气候异常，引发自然灾害。

此外，臭氧问题也引起了科学家的关注。低层大气（对流层）中的臭氧浓度不断增加，这主要是由于低层大气中 CO 浓度等其它分子浓度上升引起的，还有一部分来自平流层。这一发现很重要，因为低层大气中的臭氧具有温室效应。

上述的 CO₂、N₂O、CFC_s、CH₄、O₃ 等气体能够产生温室效应，使气温升高，因此也被称为温室气体。

但是，大气层中有的痕量“活性”气体严格来讲并不是温室气体，因为它们不吸收红外辐射。但它们在相互作用时能促成它种气体的生成或破坏，由此间接影响温室效应。如 CO、NO_x、NH₃、H₂S、二甲基硫化物、甲硫醇、二硫化碳和羰基硫化物，这类气体以很复杂的方式与臭氧相互作用。在 CO、CH₄、异戊二烯和萜烯类被破坏时，OH 基与 O₃ 是主要氧化剂。

图 5.8 是各种温室效应气体浓度上升对气温上升的影响。

全球气候异常现象，尤其是全球变暖问题的影响很大，可以说影响到全世界，所以在全球环境问题中也是最重要的问题，同时也是一个长期未解决的课题。

1978 年美国制定了“国家气候规划法”，将有关政府部门联合起来进行有组织的研究。其研究成果以联邦海洋大气局（NOAA）、能源部（DOE）、美国科学院（NAS），以及联邦宇航局（NASA）的报告形式发表。1987 年制定了“全球气候保护法”，从此促进了全球气候变化对策

图 5.8 各种温室效应气体对气温上升的影响的制定，并确定环境保护局应承担全球变暖问题的科学评价及协调各方面提出国家政策的责任。

1985 年和 1987 年，联合国环境规划署（UNEP）、世界气象组织（WMO）及国际科学协会理事会（ICSU）在澳大利亚的菲拉赫联合召开的国际会议上对有关的科学知识进行了整理、评价，并且肯定了世界气温已经变暖。会议指出，由于大气中“温室效应气体”浓度增加的结果，从现在起到下个世纪前半期，全球气温将高于历史上任何时期。另外，在上述国际组织的支持下，1987 年在意大利的贝拉基奥，1988 年由加拿大政府主办、联合国环境署协助下在多伦多分别召开了国际会议。1988 年 11 月，在联合国环境署和世界气象组织主持下，在瑞士的日内瓦召开了首次政府间的例会，并确定这种例会至少每两年召开一次，以便评价新的科学认识，探讨今后应采取的对策。1988 年 11 月 2 日，日本环境厅召开了“全球变暖问题研讨会”，会上提出的中间报告最为引人注目，该报告提出了明确的设想，其主要内容为：“如果大气中二氧化碳等温室效应气体的浓度象现在这样的速度继续增长下去，则在不久的将来全球将变暖，全球环境将受到相当的影响，对此国际上已取得一致的认识”，“全球变暖将使全世界受到极大的影响，变暖是一个长期渐进的

复杂过程，全球变暖及随之而来的环境变化一旦发生，若想使之恢复则异常困难。因而当确认已经受到危害之后再采取对策则为时已晚”，故今后“在加强研究的同时，还必须在过去已有认识和技术的基础上，尽早实施可行的对策”，“全球变暖与沙漠化、热带雨林减少、海洋污染等全球性环境问题有密切的关系，因而应将它们作一个相互关联的大系统进行综合研究”，为此应在国内外促进制定“中长期行动方针”。特别要提到的是各种环境问题均有内在的联系，具有“问题群”的性质，故应综合考虑全球变暖对策问题。

二、温室效应

(一) 二氧化碳概述

自从工业革命以来，人类活动强烈地改变着地球大气的组成，排放出的多种气体中，有许多能够吸收红外辐射，随着吸收热能气体浓度的增加，地球平均温度会逐步上升。在可能引起全球变暖的各种大气污染物中，最引人注意的是二氧化碳的作用。

二氧化碳是大气中原来就有的物质，是植物光合作用所不可缺少的，一般不将其看作大气污染物。

释放到大气中的二氧化碳主要来源于人类活动和自然界。人类活动释放的二氧化碳主要来自矿物燃料的燃烧和土地利用，尤其是森林砍伐和垦荒种田，减少了植物生物量的总量，引起大量二氧化碳释放到大气中去。据计算，现在全世界燃烧矿物燃料每年释放出的二氧化碳共含有约 $5 \times 10^{15} \text{g}$ 的碳，每年砍伐森林放出的碳相当于 $6 \times 10^{15} \text{g}$ ，每年从土壤腐殖质放出的碳约为 $2 \times 10^{15} \text{g}$ (Woodwell, 1978)。全球人为来源排放二氧化碳与主要消费国燃烧矿物燃料释放二氧化碳量分别见表 5.10 和表 5.11。

表 5.10 全球人为来源排放 CO_2 (10^6t/a , 以 C 计) 情况

年 度	固体燃料	液体燃料	天然气	瓦斯着火	水泥生产	合 计
1950	1078	423	97	23	18	1639
1952	1127	504	124	26	22	1803
1954	1123	557	138	27	27	1872
1956	1281	679	161	32	32	2185
1958	1344	732	192	35	36	2339
1960	1419	850	235	39	43	2586
1962	1358	981	277	44	49	2709
1964	1442	1138	328	51	57	3016
1966	1485	1325	380	60	63	3313
1968	1456	1552	445	73	70	3596
1970	1571	1838	515	88	78	4090
1972	1587	2056	582	95	89	4409
1974	1591	2244	616	107	96	4654
1976	1723	2313	644	110	103	4893
1978	1802	2384	672	106	116	5080
1980	1921	2409	721	78	120	5249
1982	1986	2188	724	56	121	5075
1984	2080	2200	783	47	128	5238
1986	2250	2297	827	45	136	5555

(资料来源：UNEP Environ, DataReport, 1989)

从过去历史看，最近冰河期地球平均温度降低了约 2^o。根据对南极帕斯托克等基地深层冰穴气体的分析，此时大气中二氧化碳的浓度为 0.018%。冰河期结束后，大气中二氧化碳浓度增到 0.028%，直到 19 世纪初均无很大变化(图 5.9)。当时地球大气中二氧化碳浓度与海洋和绿色植物两大二氧化碳储库形成了平衡。

近百年来，大气中二氧化碳的含量大大增加，从世界不同地区的记录来看，逐年上升的趋势是显而易见的(图 5.10)。根据预测，在本世纪末将达 0.038%—0.039%，2050 年将上升到 0.049%—0.063%。

图 5.9 过去南极萨依布尔基地穴中 CO₂ 的浓度

(资料来源：南觉夫，日本公害与对策，No.5, 1989)

表 5.11 21 个矿物燃料主要消费国燃烧矿物燃料释放 CO₂ (1982)

国 家	固体矿物燃料	液体燃料	天然气	总计(10 ⁶ tC)
美 国	388.0	501.9	245.4	1135.3
苏 联	359.7	335.6	205.6	900.9
中 国	340.6	66.3	6.2	413.1
日 本	64.3	148.5	13.6	226.4
西 德	86.0	71.5	23.0	180.5
英 国	67.6	47.9	25.5	141.0
波 兰	96.3	10.8	4.8	111.9
法 国	33.7	63.9	13.2	110.8
加拿大	25.2	56.8	26.2	108.2
印 度	78.4	25.2	1.2	105.1
意大利	13.3	60.2	14.3	87.8
东 德	64.2	14.4	4.4	83.0
墨西哥	4.5	56.3	12.9	73.7
南 非	59.3	7.3	—	66.6
捷 克	47.1	12.9	3.8	63.8
澳大利亚	29.6	22.1	6.1	57.8
西班牙	18.5	34.1	1.3	53.9
罗马尼亚	16.8	12.5	21.6	50.9
巴 西	6.6	34.3	0.6	41.5
荷 兰	3.4	15.0	17.1	35.5
比利时	11.1	14.0	4.22	9.3
21 国总计	1814.2	1611.8	651.0	4077.0
21 国占世界总量%	92.2	78.4	89.7	85.8

(资料来源：同表 5.10)

图 5.10 大气中 CO₂ 浓度变化

(资料来源：Rotty and Weinberg, 1979.)

过去对温室效应曾作过种种预测，根据最近的研究，若大气中 CO₂ 浓度增加 1 倍，全球温度平均值将比现在上升 1.5—4.5 。但当前还不能准确地区分哪些气候变化是 CO₂ 造成的、哪些是自然变化及 CO₂ 以外的因素造成的。另外，一旦 CO₂ 浓度增加后，其高浓度状态将持续 100 年以上，由此造成的气候变化将几乎是不可逆转的，因而现在就应该加强科学研究，总结经验，及早采取切实有效的预防措施。其中很重要的一项工作就是预测大气二氧化碳浓度变化趋势。对于人为活动排放的二氧化碳总量的预测不仅涉及到自然科学发展前景的预测，还涉及到复杂的社会发展前景预测以及一些难以预料的政治问题。

Nordhaus 和 Yohe 根据几种不同的排放率条件，对未来大气中二氧化碳的浓度增加进行了预测 (图 5.11)。

图 5.11 未来大气 CO₂ 浓度增加趋势

(NY 是指 Nordhaus 和 Yohe 的模式，
其后面的数字代表不同的排放率指数)

(资料来源：王明星，大气化学，1991。)

从图 5.11 中可以看出，一直到 2000 年，各种模式预测的结果基本相同，大气中二氧化碳浓度将达到 0.038% 左右；2025 年将达到 0.04%—0.047%；2025—2100 年将达到 0.056%，即大气中二氧化碳浓度达到工业化前的二倍。同时也可以看出，预测未来大气中二氧化碳浓度的关键是预测未来人为二氧化碳排放率。

(二) CO₂ 浓度变化引起气候变化的数学模式

大气的化学组成是控制地表温度和大气温度结构的重要因子。大气化学组成和大气成分浓度的变化将直接引起地表温度和大气温度结构的变化，并将通过动力过程进一步引起其它气候因子的变化。其中大气中二氧化碳浓度的变化已经引起的全球变暖就是一个有力的证明。要研究大气化学组成变化对气候的影响，不仅要有简单的辐射计算，而且还要有各种因素的综合数值实验，即气候数学模式。

目前，研究大气成分浓度变化引起气候变化的气候模式较多，归纳起来主要有热力学模式和流体动力学模式两大类。其中包括简单的辐射传输模式和复杂的海-气耦合模式。前者属于热力学模式，后者属于流体动力学模式。

下面介绍简单模式预测的大气二氧化碳浓度加倍引起的气候变化。

简单气候模式就是对气候系统进行空间平均，即假定整个大气圈是一个均匀的体系，这实际上就是最简单的能量收支模式，可通过单纯的辐射传输计算来完成，其公式为

$$C \frac{dT}{dt} + I\Delta T = \Delta Q \quad (1)$$

式中， T 为全球地表平均温度偏离某个气候平衡态的偏差； $I\Delta T$ 为长波辐射通量的变化； C 为气候系统的热容量； ΔQ 为气候系统的因子变化量所造成的地气系统净辐射通量的变化。表 5.12 列出了根据 (1) 式计算的几种大气成分浓度变化所产生的对流层大气净加热量 (ΔQ) 和由此引起的全球地表平均温度的变化。

表 5.13 列出了 Wang 等 (1976) 用一维模式估算过的大气中各种气体浓度增加后的温室效应。

表 5.14 列出了一些有代表性的简单模式计算的二氧化碳浓度加倍引起的全球平均地表温度的变化。

从表 5.12 和表 5.13 中可以看出，CH₄ 和 N₂O 等气体含量虽然比 CO₂ 小 2—3 个数量级，但它们浓度增加 1 倍后温室效应几乎可达 1；CFC_s 浓度比 CO₂ 小 5—6 个数量级，但浓度增至 20 倍后，其总温室效应亦可达 1。

表 5.12 大气成分浓度变化所产生的对流层净加热和全球地表平均温度变化
气体成分/浓度变化范围/净加热 Q (W · m⁻²) / 地表温度变化 ()

气体成分	浓度变化范围	净加热 $Q(W \cdot m^{-2})$	地表温度 变化()
CO ₂	300-600 × 10 ⁻⁶	4.2	2-4.2
CH ₄	1.65-3.3 × 10 ⁻⁶	0.6	0.2 - 0.4
N ₂ O	0.3-0.6 × 10 ⁻⁶	0.5	0.3-0.4
CFCI ₃	0-2 × 10 ⁻⁹	0.6	0.2 - 0.4
CF ₂ CI ₂	0-4 × 10 ⁻⁹	1.0	0.5 - 1.0

(资料来源：王明星，大气化学，1991)。

表 5.13 大气中各气体浓度增加后的温室效应

气体名称	现在浓度	浓度增至倍数	温室效应() 固定云顶温度
1.H ₂ O	75 % (相对湿度)	2	1.03
2.CO ₂	330 × 10 ⁻⁶	1.25	0.79
3.O ₃	3.43 × 10 ⁻⁶⁶	0.75	-0.47
4.CFCI ₃	1 × 10 ⁻¹⁰	20	0.54
5.CF ₂ CI ₂	1 × 10 ⁻¹⁰	20	0.54
6.N ₂ O	0.28 × 10 ⁻⁶	2	0.68
7.CH ₄	1.6 × 10 ⁻⁶	2	0.28
8.NH ₃	6 × 10 ⁻⁹	2	0.12
9.HNO ₃	4.85 × 10 ⁻⁹	2	0.08
10.C ₂ H ₄	2 × 10 ⁻¹⁰	2	0.01
11.SO ₂	2 × 10 ⁻⁹	2	0.03
12.CH ₃ CI	5 × 10 ⁻¹⁰	2	0.02
13.CCI ₄	1 × 10 ⁻¹⁰	2	0.02

(资料来源：汤懋苍，理论气候学概论，1989)。

表 5.14 简单模式计算的二氧化碳加倍引起的全球平均地表温度的变化

研究者	全球平均地表温度变化 ()
WangandStone (1980)	2.00 — 4.20
Charlock (1981)	1.58 — 2.25
Hansen 等 (1981)	1.22 — 3.50
HammelandReck (1981)	1.71 — 2.05
Hunt (1981)	0.69 — 1.82
Wang 等 (1981)	1.47 — 2.80
Hammel (1982)	1.29 — 1.83
Lindren 等 (1982)	1.46 — 1.93
LaiandRamanathan (1984)	1.80 — 2.40
SomervilleandRemer (1984)	0.48 — 1.74

(资料来源：王明星，大气化学，1991)。

(三) 全球变暖的影响

温室效应对气候所产生的破坏作用，只有在形成了重大灾害以后才能完全确切知道。但是可以肯定，全球气温的迅速上升必将引起海面上升和造成不少地区的气候紊乱。

温室效应引起的全球变暖，必然导致海洋的热膨胀和冰川、极地冰雪融化，从而引起海面上升。在过去的一个世纪中，地球平均海面升高不到 15 厘米，根据目前地球变暖的程度，可以预测到 2075 年海面将上升 30—213 厘米。

海面升高对居住在沿海地区约占全球人口 50% 的人们带来严重的影响。海面只要上升 1 米，就可以把尼罗河三角洲全部淹没。这个地区的人口、可耕地和产值均占埃及全国的 12%—15%。在孟加拉国，海面上升 1 米，就会淹没占国土总面积 11.5% 的土地，占总人口 9% 的居民将迁往他地，使 8% 的国民生产总值受到威胁。

温室效应引起的全球变暖肯定给不少地区的气候带来变化。在中纬度地区，夏季温度可能上升到超出地球平均气温的 30%—50%。这就意味着中纬度地区将变得更加干燥，到处都可能出现干燥的土壤，灼热的阳光。美国五大湖的水平面可能下降 30 厘米。

半干旱地区的降雨量可能进一步减少；热带潮湿地区的气候可能变得酷热而且干燥，热带风暴将变得更加频繁和更加严重。同时，气候变暖将使洪水灾害进一步加重。

由于海面上升和气候变化，必然引起谷物减产而导致饥饿和大规模移民问题。迁移的人们为了获得土地和自然资源而展开竞争，就可能形成和加剧地区冲突，将打乱业已形成的全球势力平衡。

中国地域作为全球环境的一个区域，近百年来的气候变化，就地表大气温度的变化趋势而言，与北半球一样，同样存在着变暖的趋势，但远不如北半球变温的幅度显著，同时还具有明显的区域气候变化的特征。造成这种区域气候变化的原因，尚需进一步进行论证。

从国家气候变化协调组第二工作组专为 1990 年 5 月末的 IPCC (政府间气候变化专业委员会) 第二工作组第三次全体会议所准备的报告来看，人类活动引起的气候变暖对中国的环境影响有以下 5 个方面：

(1) 对农业影响, 既有正效应(增产), 也有负效应(减产)。气候变化对农业影响的综合效应, 将使中国农业生产能力下降至少 5%。

(2) 对中国水资源的影响非常严重。根据多种模型(气候和水文)计算的结果: 由降水量、经流量、蒸发量形成的水资源增加或减少的地区差别很大。尤其是北方干旱及半干旱地区, 水资源对气候变化最敏感。因此变干的可能性最大。

(3) 海平面上升将对中国造成很大的损失。根据 GCM(大气环流模式)并按照 $2 \times \text{CO}_2$ 的条件, 预测 2030 年海面上升 20 厘米左右, 中国东南沿海现有的盐场和海水养殖场将基本被淹没或破坏。

(4) 对有些树种生长带来不利影响, 生长分布区域发生变化, 产量将严重下降。

(5) 将使永冻土融化消失, 并发生大面积的热融下沉与斜坡热融坍塌, 造成已经开发建成的广大区域的冻土公路, 铁路及民用建筑的破坏。

气候变化对社会的影响还难以估量, 有许多问题还难以研究, 但总的结果是令人忧虑的。

(四) 防治温室效应的对策

对于二氧化碳造成的全球变化, 并由此产生的危害, 人们都已经有了深刻的认识, 为了子孙后代的生存和繁荣、我们现在就应对此问题采取积极的对策(图 5.12)。基本对策有:

- (1) 控制二氧化碳气体向大气中排放;
- (2) 自大气中消除超量的二氧化碳气体;
- (3) 减弱到达地球的太阳光强度;
- (4) 研究、制定适应气候变化的措施与规划;
- (5) 加强国际合作, 缔结国际公约。

图 5.12 全球变暖现象和对策

(资料来源: PPM, No.9, 1989)

上述对策中人类能够很快办到的, 效果较好的是方案(1)。控制化石燃料的燃烧将是极为有效的(表 5.15)。采用核能、水能、太阳能、风能、地热能、沼气能、等发电技术就可解决这一问题, 同时也节省了化石燃料, 有利于环境保护。

表 5.15 防治温室效应的对策

对 策	二氧化碳	氟利昂	甲烷、NO ₂ 等
抑制温室效应气体向大气中排放	控制化石燃料的消费(控制人均能量消费) 采用二氧化碳排放量少的能源 提高能量利用率 (i)能源生产方面的对策(提高发电效率等) (ii)能源使用方面的对策开发、推广节能机械等 化石燃料产生的CO ₂ 的固化 (i)制成干冰投弃到海中 (ii)转化为甲醇等有用物质 (iii)用生物技术将CO ₂ 固化 保护热带雨林(消除生物界的CO ₂ 的发生源)	按蒙特利尔议定书的规定日程削减氟利昂的生产量 对氟利昂进行回收,重复利用 开发氟利昂的替代品(但不能用CO ₂ 替代) 破坏使用过的氟利昂	由于对这些物质的体向大气中排放发生源还不很清楚,所以当务之急是搞清楚其浓度增加的原因
去除大气中温室效应气体	保护热带雨林(维护其作为吸收源的功能) 植树造林或绿化沙漠 通过海洋生物吸收固化 增加同温层中SO ₂ 等物质的量 增加同温层中SO ₂ 等物质的量 增加同温层中SO ₂ 等物质的量 增加同温层中SO ₂ 等物质的量 增加同温层中SO ₂ 等物质的量		
减弱到达地球的			
研究、制定适应气候变化的措施与规划	沿海城市规划 港口与海岸筑堤,开发适应气候变化的水资源、航运与水电规划 作物品种、耕种体制,适耕地区的规划		
加强国际合作、缔结国际公约			

(资料来源: PPM.NO.9, 1989)。

三、阳伞效应

颗粒物一方面反射部分太阳光,减少阳光的入射,从而降低地表温度;另一方面也能吸收地面辐射到大气中的热量,起着保温作用。两者相比,一般认为前者大于后者,因此总的效应是使气温降低,这就是所谓的“阳伞效应”。

(一) 颗粒物概述

大气中颗粒物有固体和液体两种形态。其直径为0.002—100 μm之间。目前对颗粒物的分类尚无统一的方法。一般按颗粒物的重力沉降速度和粒子的大小将其分为两类:粒径大于10 μm的颗粒物,由于体积大、质量重,在重力作用下能很快地降落到地球表面,称为降尘或落尘;粒径小于10 μm

的颗粒物，由于体积小，质量轻，能在大气中飘浮很长时间，所以称为飘尘。0.002—10 μm 的颗粒物是大气化学和物理中最重要的颗粒。在环境科学中常将大于 2.5 μm 颗粒称为粗颗粒；小于和等于 2.5 μm 的颗粒称为细颗粒。细颗粒中直径为 0.08—2.5 μm 的称为累积区间；小于或等于 0.08 μm 的称为瞬变区间或艾特肯核区间（图 5.13）。另外，也有人把粒径在 0.25—10 μm 之间的颗粒物称为云尘；小于 0.1 μm 的称为浮尘。这些液态或固态的微粒悬浮在空气中，可成为水滴或冰晶的凝结核，

形成雾、烟、霾、霭（轻雾）、微尘和烟雾等，在大气科学中称之为气溶胶。

（二）颗粒物来源

大气颗粒物来自自然源和人为源。自然源主要包括土壤、岩石碎屑、火山喷发物、林火灰烬、海盐微粒等。人为源主要包括：化石燃料燃烧、露天采矿、建筑工地、耕种作业等。

大气颗粒物也可以来源于二次污染物，例如大气中的 SO₂、NO_x 及 HC 等在大气中进行一系列的化学反应后形成的硫酸盐和硝酸盐以及光化学烟雾等。

根据 Mathews 等人研究，1968 年全球大气颗粒物的排放量为 1530 × 10¹²g（直径小于 5 μm），其中，人类活动释放出来的颗粒物为 280 × 10¹²g，而由自然原因排放量为 1250 × 10¹²g，两者之比约为 1 : 4.5。

另外，1979 年联合国发表了自然源排入大气和在大气中形成的直径小于 20 μm 的微粒全球估计量，为 721 × 10¹² - 1850 × 10¹²g，其平均值为 1285 × 10¹²g。

（三）颗粒物的物理、化学性质

物理性质主要指颗粒大小、形状和相对密度及沉降速度。

颗粒物的大小对其物理和化学性质十分重要，并对大气中所发生的化学和物理过程有明显的影响，因而不同粒径的颗粒物对环境、生态和人体健康有不同的影响。大气中颗粒大小及其分布状况是大气环境的重要特征之一。大气中颗粒物的大小与其组成物质密切相关。

大气中颗粒物的形状多种多样，大体与其来源和组成有关（表 5.16），因此从其形状可大致判断颗粒属哪类物质。大气中的颗粒物由于组成物质不同，其相对密度也有差异，一般为：1.3—2.0，平均为 1.5。

大气中颗粒物的大小和相对密度不同，它们在大气中停留的时间和空间分布也就不同。

表 5.6 大气中微粒的形状

形 状	例	形 状	例
球状	烟、花粉、飞灰	松绒团状	氧化镁
不规则形状	矿物	片状	云母
立方体	煤渣	短圆柱状	石棉
板状	矿物	针状	滑石
羽毛状	植物纤维	链条状	碳黑、烟
紧绒团状	碳粒、烟、雾		

(资料来源：唐永奎，大气环境化学，1992)。

不同粒径的颗粒物沉降到地面的时间相差很大。粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物一般需要 4—9 小时；粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 的需要 19—98 天；而粒径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的需要 5—10 年。

大气颗粒物的组成成分很复杂。颗粒中含有各种重金属元素、水溶性物质和有机化合物，可以说，几乎包含了自然界存在的所有元素。

大气颗粒物的化学组成随自然条件的变化而有很大差异。一般地讲，海洋上空和清洁大陆颗粒物的化学元素组成与海水和地壳元素相似，而城市大气颗粒物的组成不但包括了地壳元素，而且也包括了许多工业污染物。

国内外的研究表明，颗粒物中元素的浓度城区高于郊区，而且城区颗粒物的元素浓度高于本区域本底值，这些差别反映了大气颗粒物的空间分布特征。

(四) 颗粒物对大气环境的影响

大气中颗粒物数量的不断增加，其影响不亚于二氧化碳的排放。据分析，公元 1800—1920 年间冰层的含尘量为 10mg/L ，到 20 世纪 50 年代，含尘量已增大到 200mg/L (Davitaya, 1969)。大气中颗粒物增加的总效应是使气温降低，这就是阳伞效应。例如 1963 年印尼巴厘岛的阿贡火山爆发后，大气平均浑浊度在 10 年增加了 30%，火山灰围绕地球几周，使气温下降、气候异常。

人类活动在这方面所造成的影响也较显著。30 年代美国开垦大草原造成 1933—1937 年的尘暴似乎开始了气温下降的时期。同样，中国和印度的草原开垦以及前苏联 60 年代开垦荒地均造成了尘暴。60 年代末和 70 年代初干旱季节时期在西非萨赫勒地区对大西洋上尘埃浓度的观察，发现大气中颗粒物增加了三倍 (Prosptro 和 Nees, 1977)。

人为活动产生的颗粒物增加了大气中的凝结核，导致云量增加，从而增加地球的平均反照率，使气温降低。但对大气中颗粒物增加的影响进行精确定量的评价是困难的。现有的观测资料表明，目前全球低空云量为 31% 左右。据估算，若低空云量增至 36%，因反照率的增加足以使世界年平均气温下降近 4°C 。另有一项估算认为，如果进入大气的颗粒增加 6—8 倍，大气温度会下降 3.5°C 。这两项估计的数值均足以使地球开始一个新的冰期。

大气中颗粒物增多会减弱光照，影响光合作用，造成作物减产。

另外，大气中颗粒物增多，还会导致局部地区降水量增加。

四、南极臭氧洞

(一) 臭氧层和臭氧洞

臭氧层存在于距地表 16—40 公里的平流层中，浓度最大值通常出现在 25—30 公里的高度，臭氧层是法国科学家法布里 20 世纪初发现的。臭氧层气体非常稀薄，即使最大浓度处，臭氧与空气的体积比也只有百万分之几，若将它折算成标准状态，臭氧的总累积厚度只不过 0.3cm 左右。然而，臭氧层对地球上生命的重要性就像氧气和水一样，如果没有臭氧层这把“保护伞”的保护，到达地面的紫外线辐射就会达到使人致死的强度，地球上的生命就会像完全失去空气一样遭到毁灭。

臭氧在大气中的含量虽然很少，但臭氧浓度的垂直分布很复杂，而且随时间和地点的不同有很大的变化。

图 5.14 是不同季节、不同纬度上臭氧浓度分布的实测结果。很明显，纬

度越高，臭氧浓度峰值所在的高度越低，而峰值浓度越高。在同一纬度上，不同季节峰值浓度所在的高度变化不大，但峰值浓度以春

5.14 不同季节、不同纬度

上臭氧深度的垂分布[(a) 1月，
(b) 4月，(c) 7月，(d) 10月]

(资料来源：王明星，大气化学，1991)

季明显偏高，秋季明显偏低。

大气层中的臭氧可以同许多化学物质发生反应而受到破坏。在所有同臭氧起化学反应的物质中，最主要的是碳、氢、氯和氮几种元素组成的气体。这些痕量气体包括：一氧化二氮、水蒸汽、四氯化碳、甲烷和氟氯烃(CFCs)，它们是在空中经紫外线作用后产生的，在低层大气中一般是稳定的。然而，一旦进入平流层以后，却能活泼地与臭氧发生反应，使臭氧层遭到破坏。

由于人类活动，大气中的这些痕量气体的浓度正在不断上升，从而使臭氧层受到潜在威胁。特别是由于大气中CFCs浓度的上升所造成的后果更为明显。

南极臭氧洞是英国的南极考察队在南极的哈利湾(Helley Bay)用光谱分析法测定臭氧浓度时发现的。自1957年以来，几乎每年10月在南极大陆上空气柱臭氧总量急剧下降，形成一个面积与极地涡旋相当的气柱臭氧浓度很低的地区，整个南极上空的臭氧量将近减少了40%，在70年代中期下降最明显(图5.15)。上述监测结果已被人造卫星观察的结果所证实(图5.16)。更令人担忧的是，南极上空臭氧层的破坏已向赤道方向扩展，达到南纬45°，只是其影响程度不如南极明显。如果大气层中的臭氧进一步耗竭，将会造成严重的生态灾难。

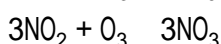
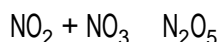
(二) 南极臭氧洞形成的原因

南极臭氧洞的出现，引起了众多科学家的注意，对其形成原因提出了不同的假说。

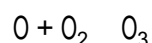
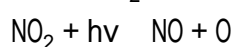
1. 奇氮理论 这是美国国家航空和航天局(NASA)的大气科学家Linwood B. Callis等人1986年提出的，或称太阳活

动说。该假说认为平流层臭氧的消耗主要是由于奇氮对臭氧的催化作用造成的，同时指出了南极臭氧洞以及全球臭氧总量减少同太阳活动周期之间的相关性。

奇氮是指NO_x等电子结构外层电子为奇数的氮的化合物。在极地地区，太阳活动高峰年在大气热层将形成比平常多得多的奇氮分子，其中



然后通过光解作用产生大量的NO和NO₂，由此对O₃起了催化破坏作用

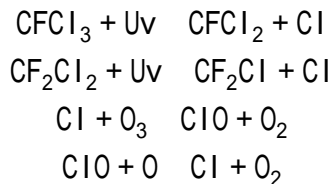


总效果： $O + O_3 \rightarrow 2O_2$

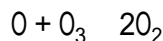
奇氮理论主要强调了臭氧洞对太阳活动的依赖性，突出了氮在其中的作用，忽视了其它物质的作用，认为它们所起的作用很小。

2. 涌井流假说 这是美国麻省理工学院和克拉克松大学的流体力学教授 Ka-Kit-Tung 等人从大气动力学角度提出的。该假说认为，从大气动力学观点来看，一般规律是在平流层下部存在两种形式的绝热循环，即大气在赤道上升和两极下降。但是由于南极的特殊条件，却形成了一个相反的过程，在南极形成相对稳定的极气旋。在极气旋内产生了一个与通常过程相反的逆循环过程（空气上升），而在极气旋的边缘仍保持原循环（空气下降）。空气上升减小了臭氧浓度，而且温度越低，臭氧浓度越小，因而形成臭氧洞。

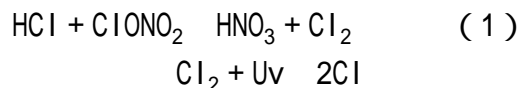
3. 单相说 这是美国加利福尼亚大学化学系 F.S.Rowland 和 Mario J.Molina 提出的臭氧可被 CFCs 消耗的理论。他们认为 $CFCl_3$ 和 CF_2Cl_2 吸收紫外线而被光解释放出氯原子，氯原子很容易与臭氧反应而破坏臭氧层：



后两个反应中 Cl 和 ClO 都未被消耗，其净效果是

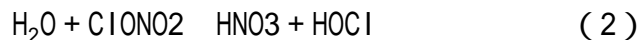


4. 多相说 这是美国国家航空与航天局 (NASA) 的化学家 Susan Solomon 等人，在进一步发展了单相说的基础上而提出的理论。多相说认为，消耗 O_3 和 O 的 Cl 原子的直接来源是 HCl 和 $ClONO_2$ ，而不是 $CFCl_3$ 和 CF_2Cl_2 。HCl 和 $ClONO_2$ 发生反应生成 HNO_3 和 Cl_2 ，后者光解形成 Cl 原子而破坏臭氧层：



上述 (1) 式反应在单相条件下进行得非常缓慢，而在多相条件下则大大加快。这种多相条件就是南极冬春季常见的云，它可使 Cl、ClO 和 HCl、 $ClONO_2$ 之间的平衡在几天内完成。

类似的过程还有



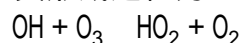
HOCl 还可以产生 HO 自由基和 Cl 原子而破坏臭氧层。而且 (2) 反应比 (1) 反应消耗的 O_3 更多。

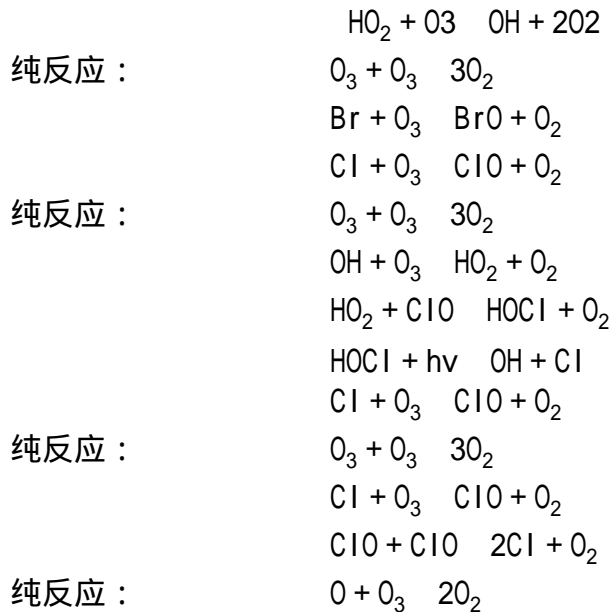
这就是臭氧洞为什么会出现在南极，而且冬春季臭氧被消耗得那么快的原因。

5. 氯溴协同作用假说 这是哈佛大学 Michael B.McElroy 等人提出的理论。作者认为在平流层消耗 O_3 的纯过程主要是：



因为南极地区 26km 以下，O 浓度较低， O_3 浓度较高，所以 (3) 反应是南极臭氧洞形成的主要原因，其形成过程为





上述有关南极臭氧洞形成的理论假说，有的与观察到事实不符，例如，根据奇氮理论，在 1979—1980 年的太阳活动高峰年过后，臭氧洞应逐渐减小直至消失，而实际上 80 年代以来臭氧洞内臭氧含量越来越少，1985 年达到最低值，近年来虽略有回升，但仍远未能恢复至原有水平。因此有人认为奇氮理论应该被淘汰。同样，涌井流假说也受到事实的挑战。

事实证明，南极臭氧洞形成的原因要比人们想象的复杂得多。大量的观察分析表明，臭氧洞的形成涉及到许多化学机制和各种气象过程。

(三) 臭氧层破坏对人类环境的影响

众所周知，臭氧能够吸收太阳辐射的波长 320 毫微米的紫外线。波长为 200—280 毫微米的紫外线称作 UV-C，可以杀死人与生物，但几乎全部被臭氧吸收。波长为 280-320 毫微米的紫外线称作 UV-B，大部分可被臭氧吸收，但不能全部吸收，这部分紫外线可以杀死生物，还可导致人类的眼病和皮肤癌发病率上升。此外，这部分紫外线还可使植物生长受到影响，包括许多食用植物与海洋中的藻类，从而影响农业，渔业产量。波长在 320 毫微米以上的紫外线称为 UV-A，其危害较小，臭氧只能吸收其中的少部分（图 5.17）。

臭氧层的破坏首先会导致紫外线长驱直入地球表面。科学家认为，紫外线辐射量的增加首先会降低人体的免疫系统功能，危害呼吸器官和眼睛、诱发慢性病、增高皮肤癌发病率。臭氧浓度及其效应的数量关系还不十分清楚。据估计大气中臭氧如果减少 1%，到达地面的紫外线则增加 2%，皮肤癌增加 4%；如果大气中臭氧下降 10%，则紫外线辐射强度有可能增加 20%，皮肤癌患者就会增加 20%—30%。其次，过量紫外线辐射可能限制植物的正常生长，使叶绿素的光合作用能力下降 20%—30%，造成主要农作物的减产，威胁人类的生存。另外，过量紫外线辐射，还会引起海洋生物的大量死亡，进而影响食物链，造成某些生物的灭绝。

综上所述，臭氧层的破坏对环境有着深刻的影响，甚至有人认为，臭氧层减少到 1/5 时，将是地球上生命存亡的临界点。

(四) 保护臭氧层的措施

臭氧层遭到破坏的主要因素之一是人类大量使用 CFC_s。这种氯氟烃化合

物制成于 30 年代初，其商品名称为氟利昂，广泛地应用于制冷、工业溶剂和火箭用的气溶胶等，全世界年产量高达 200 万吨，其中 CFC_{11} 和 CFC_{12} 占有很大比例，由此引起科学家的注意。

1974 年，美国科学家首先从理论上提出含氯氟烃化合物通过复杂的物理和化学过程，可能达到平流层，与臭氧发生化学反应。这一理论于 1976 年被美国国家科学院所确认，1978 年美国环境保护署禁止使用氟利昂作为喷雾剂。有些国家也相继禁止使用和生产氯氟烃作为气溶胶喷雾剂。

1977 年，联合国环境规划署会议在美国召开，会议同意了一项保护臭氧层的研究和分析行动计划，并促成于 1981 年成立一个技术和法律专家组，以制定一个保护臭氧层的全球公约纲要。

1985 年 3 月，22 个国家签署了关于臭氧层保护的《维也纳公约》。这是原则上限制使用含氯氟烃化合物的初步协议。但就何时实现减少 CFC_s 的使用和生产的意见并不统一。

1986 年 5 月在罗马，1986 年 9 月在弗吉尼亚的利斯堡，联合国环境规划署又召开了两次会议，讨论 CFC_s 的控制策略。会议期间，日本、加拿大和苏联提出新的建议，并采取了灵活态度。

1987 年 4 月，30 多个国家的代表出席了日内瓦关于《臭氧层公约》的临时磋商会议，并通过一项条约，将 CFC_s 的生产与使用冻结在 1986 年的水平上。只要有 2/3 主要签约国家的努力，6—8 年内 CFC_s 就会降低 30%。

1987 年 9 月 46 个国家的代表在蒙特利尔通过了关于臭氧层耗损物质的《蒙特利尔议定书》，并于 1989 年 1 月 1 日生效。此协议要求 1993 年各国削减 CFC_{11} 、 CFC_{12} 实际消耗量的 20%，1998 年消减 50%。

1988 年 10 月，在海牙召开了关于保护臭氧层的国际会议。与会代表认为，即使实施了《蒙特利尔议定书》，也不能消除南极臭氧洞的存在，因此，需要更严厉的措施。

1989 年 3 月，在伦敦，110 多个国家参加了“拯救臭氧层”的国际会议，号召全世界各国一致行动起来保护臭氧层。

1989 年，《蒙特利尔议定书》缔约国第一次会议通过关于臭氧层保护的《赫尔辛基宣言》。

1990 年，《蒙特利尔议定书》缔约国第二次会议在伦敦举行，通过《蒙特利尔议定书》修正案。2000 年 1 月 1 日全部淘汰 CFC_s 。

1991 年，《蒙特利尔议定书》缔约国第三次会议，呼吁对臭氧耗损进行新的紧急科学评价。

1992 年 11 月，《蒙特利尔议定书》缔约国第四次会议在哥本哈根举行。

从上述可以看出，全世界第一次如此紧急的动员起来，协调一致地采取行动，拯救业已受到耗损的臭氧层，保护人类赖以生存的环境，这是世界环境保护运动所取得的一项引人注目的成就。

《蒙特利尔议定书》的中心思想就是限制 CFC_s 的生产，用其它代用品来限制 CFC_s 的使用量与释放量。在通过议定书的同时，许多国家就已采取行动，使用法律来管理 CFC_s 的生产与使用量。因为 CFC_s 能在大气层中滞留 100 年或更长时间，其影响将在若干年后才会出现，因此，利用法规来保护臭氧层是非常迫切的。

图 5.18 是表示采取国际行动后大气臭氧总量变化的情况。图中有三个代

表性的假设，一个是 CFC_s 的产量保持在 1980 年的水平，另外两个是每年增加 1.5% 或 3.0%（分别为 47 年或 24 年增加 1 倍）。也就是说，第一个假说 A 是指采取国际行动禁止今后增加 CFC_s 的产量；第二，三个 B 和 C 分别是今后限制与不限制 CFC_s 的产量。

从图 5.18 中可以看出，如果 CFC_s 的产量稳定在 1980 年产量的水平，多数模型都表明，今后臭氧浓度只有少量降低。这主要是因为甲烷浓度上升后，会部分地抵消 CFC_s 的影响。如果 CFC_s 产量每年增加 1.5%，今后 60 年内臭氧总量会平均降低 3%。但如果 CFC_s 年产量每年增加 3.0%，今后 60 年内臭氧总量就会降低 10%。假如甲烷生产量按现在的速度不再加快，则在这段时间里 CFC_s 对臭氧层的破坏还会更加显著。

图 5.18 只表示了臭氧总量受到的影响，但实际上接近地面的臭氧浓度会增加，在高空的臭氧会减少；在海拔 40 公里空间的臭氧减少得最多（图 5.19）。

CFC_s 对臭氧的影响随地点与季节而不同，两极附近大于赤道附近，春天的影响大于其它季节的影响，尤以纬度的影响最明显。例如，当 CFC_s 产量为 1980 年水平时，N₂O 和 CH₄ 增加速度按现在速度不变，到 2030 年春天北纬 80° 的臭氧将减少 11%；在赤道附近则只减少 1% 强，而全球臭氧总量将平均减少 2%。

同时，利用相同的模型计算出了大气层中 CFC_s 的长期影响。例如，当 2000 年 1 月 1 日完全停止生产 CFC_s 后，在 5—10 年后臭氧浓度仍会继续减少，然后又慢慢恢复。即便如此，也需几十年后才能恢复到现在水平。

今后大气中臭氧浓度主要取决于大气中其它化学物质的浓度，而大气中其它化学物质又是

图 5.18 CFCs 的释放水平对臭氧总量的影响

资料来源：The Ozone Layer. 互相制约的，因为高空大气层中的化学变化很复杂。

五、酸雨

酸雨是当代世界面临的重大环境问题之一。80 年代以前，“ACID RAIN”和“ACID PRECIPITATION”这两个名词几乎只是生态学和大气化学的某些领域的科学家所使用的术语，最近几年来，在世界许多国家和地区已经变成了使人忧虑的家喻户晓的名词。

酸雨之所以受到全世界的关注，主要是因为它的形成机制复杂，影响面广。酸雨不仅使排放污染物的国家深受其害，而且也可以随风飘移到几百公里甚至几千公里之外，成为“超越国界的污染”，使其邻国遭殃。美国和加拿大的《越境大气污染意向备忘录》中指出：酸雨是一个真正的问题，而且是严重的。如果任其发展，不加制止，酸雨就可能成为需要付出巨大的经济和社会代价的问题。加拿大环境问题专家在《顺风》刊物上强调指出：“酸雨是我们这么多环境问题中的一个突出例子。它的影响是

国际性的。它的起因涉及许多国家。它的后果远远超出国界。它的圆满解决需要国际间的合作行动”。

人们把酸雨描写成“无声无息的危机”，“一次正在发生的环境大灾祸”和“空中死神”，这些言词反映了人们面对广泛、复杂和多方面的环境影响时所表现出来的深深焦虑。

（一）国外酸雨研究的历史

长期以来，尽管酸雨这个名词的本身引起了人们的关注，但酸雨一词的含义是不很严密的。因为这个名词排除了酸以其它方式降于地面的事实，如酸雪，酸雾等。此外，还有另一种现象，即污染物以干物质的形式降落到地面，然后与后来的降雨或其它形式的水分作用，而生成与酸雨一样的酸。上述两种现象，即湿沉降和干沉降都应该正确地命名为酸性沉降。因而，酸雨是其同类问题的一个名称，但因其简洁与通俗性而仍被沿用。

1. 酸雨的早期发现 酸雨现象的许多特点最早是由英国化学家 Robert Angus Smith 在 19 世纪中叶发现的。1852 年，Smith 分析了英格兰曼彻斯特及其周围地区雨的水化学成分，发现远郊区的雨水中含有碳酸铵，近郊区雨水中含有硫酸铵，市区雨水中含有硫酸和亚硫酸，并提出硫酸是引起纺织品褪色和金属腐蚀的原因。

1872 年，Smith 编著了《空气和降雨：化学气候的开端》一书，首先使用了酸雨一词，并提出了许多观点。讨论了我们目前正在谈论的与酸化有关的一些现象：煤的燃烧，有机物的分解，风的轨迹，距海洋的远近，雨雪的强度和频率，并提出了比较完善的收集和分析沉降物的方法。同时，Smith 也注意到了酸雨对植物和各种物质的损害。

遗憾的是，Smith 的开拓性和预言性的论著在当时没有引起科学界的重视。后来，Eville Gorham (1880) 在国家科学院的帮助下，首先把 Smith 的早期工作进行了整理并出了报告。

2. 酸雨的现代发现 现代酸雨的研究和它对环境的影响，起源于三个学科的边缘领域：淡水学，农学和大气化学。每个学科都做出了贡献。

雨、雪、湖水之间的联系是显而易见的。但雨、雪、湖水化学变化之间的关系直到 20 世纪中叶还不是很清楚的。在 20 世纪上半叶，一些欧洲和北美的科学家研究了地球表面水化学和大气化学的某些孤立的方面，随后内部机制逐渐被证实。Gorham (1955, 1957, 1958, 1961, 1965) 以一系列的论文，为我们现在对酸雨和水生生态系统中酸度产生原因的认识奠定了基础。Gorham 和他的同事们提出了酸雨的产生过程、传输与沉降机制和生理意义。但这些研究并没有触动各科学团体和广大公众。

1948 年，瑞典土壤学家 Hans Egnér 创建了第一个收集和分析地面沉降物和近地面空气的监测网。酸度是需要测定的几个参数之一。这个监测网以后陆续被推广到整个中欧和西欧，它提供了大量的原始数据和长期数据，证明了酸雨的化学性质变化和对农、林业的重要性，第一次弄清了酸雨化学性质变化的时间和空间分布模式。1956 年，斯德哥尔摩的国际气象研究所 (The International Meteorological Institute) 接管了 Egnér 的监测网，并定名为欧洲大气化学监测网 (European Air Chemistry Network)。1957 年，监测网向东推广到波兰和苏联的广大地区。

20 世纪 50 年代以前，人们所注意的污染物在大气中的传输，主要是局部地区的传输与扩散。Carl Gustav Rossby 和 Erik Eriksson 领导下的大气化学科学诞生在瑞典，而后推广到整个欧洲，直到北美。他们确信大气过程是短距离内很有效的机械作用过程，如同短距离内的各种物质扩散一

样。同时他们也组织了一系列关于大气化学的讨论会，引起了科学家们的广泛兴趣。

酸雨在淡水学、农学和大气化学等三个领域的综合研究首先是由瑞典的土壤学家 Svante Odén 完成的。1961 年他建立的斯堪的纳维亚地表水化学监测网的数据与欧洲大气化学监测网的数据有明显的相关性。他的关于欧洲各国之间“化学之战”的观点，在科学界和公众中引起了轰动与争论，推动了欧洲的酸雨研究工作。

近年来，北美科学界和公众也同样存在着对远距离气团活动的认识。1975 年，加拿大环境保护局制定了第一个化学沉降物国家监测计划。1976 年春天，美国建立了国家大气沉降计划。1977 年末，起草了“全国酸雨问题评价规划”。

由于酸雨在欧洲和北美已造成了越境污染，因此，在研究酸雨形成机理以及防治措施时，有关国家进行了国际间的合作。其中值得一提的是 1983 年 6 月 7—10 日召开的有 23 个国家代表出席的联合国欧洲经济委员会会上制定了《长距离超越国界空气污染条约》。

（二）全球环境酸化状况

70 年代初，酸雨只是局部地区的问题，但目前酸雨已经广泛地出现在北半球，成为当今世界面临的主要环境问题之一。在北欧、西欧、美国东北部以及加拿大等广大地区，酸雨已成为大气污染的主要特征。在亚洲、日本和中国也出现不同程度的酸雨危害，有些地区 pH 值降低的趋势，已接近欧美的污染值。

人为活动向大气层排放大量的硫、氮氧化物是环境酸化的主要原因。因此，通过对降水中硫酸盐含量的分析，就可以估算出人为因素排入大气层中硫的影响程度。图 5.20 为世界不同地区降雨中的年均硫沉降量的估算值。

硫的年均流量大于 $0.5\text{g}/\text{m}^2$ 的地区，如欧洲及北美大部分地区，明显地表现出人为因素的影响。在没有人为因素影响的地区，据估算，硫的自然流量低于或大约相当于 $0.2\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 。

图 5.21 为各大洲硫和氮的人为排放量。从图中可以看出，南美、非洲及澳大利亚的硫，氮排放量大大低于北美、欧洲及亚洲。虽然欧洲和北美的硫排放量可能有所下降，氮的排放量也可以保持目前数量，但是，世界其它地区硫、氮排放量却呈明显的上升趋势（图 5.22 和图 5.23）。

中国自 70 年代开始对酸雨进行监测。据 1985—1986 年中国监测总站提供的 189 个测站 533 个采集点的 24 737 个降水样品测定的结果，如果以 pH 值小于 5.6 作为判断酸雨的标准，那么属于酸雨的样品占 35.2%；如果以监测站计，53.8% 的测站出现酸雨。

中国酸雨的空间分布和时间变化各具特点。降水 pH 值的空间分布的总趋势与中国自然环境分异状况很吻合：半干旱和干旱地区降水的 pH 值都在 7.0 以上；秦岭淮河以北，绝大部分属半湿润地区，其降水 pH 值一般为 7.0 左右；秦岭淮河以南的降水 pH 值普遍小于 5.0，是酸雨区。其中西自四川峨眉山、重庆、金佛山、贵州遵义、广西柳州、湖南洪江和长沙，向东直至安徽徽州，形成一条突出的酸雨带，酸雨频率均在 80% 以上（表 5.17）。从表 5.17 中可以看到，该酸雨带的 pH 值已和北美、西欧、北欧、日本重酸雨区的 pH 值相近，说明我国这些地区的酸雨污染已达到相当严重的程度。

图 5.20 世界各地降雨中的年均硫沉积量 (单位:克硫/平方米,年)
(资料来源:AMBIO, NO.31989)。

图 5.21 各大洲进入大气层的硫、氮人为排放量
(资料来源:AMBIO, No.31989)。

图 5.22 城市中 SO₂ 年平均浓度
(资料来源: The State of the World Environment, 1989。)

图 5.23 城市中 NO_x 年平均浓度
(资料来源:同上)

表 5.17 中国突出酸雨带地区与世界酸雨严重的国家和地区降水年平均 pH 值比较

城市或地区名称	样品数	pH 值范围	Ph ₁ *	pH ₂ **	pH ₃ ***
峨眉山	54	3.24—7.21	4.73	4.62	4.28
重庆	105	3.62—9.60	4.76	4.75	4.44
金佛山	5	4.20—6.65	4.85	4.84	4.36
遵义	213	3.20—7.10	4.74	4.79	4.29
柳州	402	3.06—7.68	4.74	4.75	4.45
洪江	309	3.41—7.75	4.53	4.79	4.32
长沙	223	3.50—7.50	4.67	4.78	4.30
韶关	31	3.36—7.05	4.33	4.994.11	
贵阳	38	3.40—7.35	5.04	4.69	4.20
宜宾	108	3.18—7.75	5.14	5.30	4.26
日本神户				4.40	
美国帕萨迪纳				4.04	
纽约				3.92	
哈巴德				4.14	
切斯特				4.10	
佛罗里达				4.53	
加拿大安大略				4.96	
挪威南部				4.57	

*pH₁ 为算术平均值;

**pH₂ 为雨量加权平均值;

***pH₃ 为氢离子浓度雨量加权平均值;

(资料来源:唐永銮, 大气环境化学, 1992)

(三) 酸雨形成的机制

酸雨的形成是一个复杂的问题,包括物理,化学和物理化学过程,而这个过程又受人和自然等诸多因素的影响。对酸雨形成机制目前还没有完全弄清楚。一般认为,酸雨是由 SO₂、NO_x 和氯化物等大气污染物,在一定条件

下通过化学反应而生成 H_2SO_4 、 HNO_3 和 HCl 并随雨、雪等降落到地面。酸雨的主要成分是 H_2SO_4 和 HNO_3 ，它们占酸雨总酸量的 90% 以上。酸雨中 H_2SO_4 与 HNO_3 之比，与燃料的结构和燃烧温度有很大关系。在发达国家与地区，酸雨中 H_2SO_4 与 HNO_3 之比一般为 3 : 2 或 2 : 1，我国为 10 : 1。

大气中的 SO_2 和 NO_x 既来自人为污染，也来自天然释放。天然源的 SO_2 主要来自陆地和海洋生物残体的腐解，据 1972 年联合国人类环境会议所提供的数字，天然源排放的硫大约为每年 1.5—2.0 亿吨。此外，火山爆发也释放出大量的 SO_2 ，例如 1982 年墨西哥 E1 Chicon 火山爆发，把多达 2000 万吨的 SO_2 气溶胶烟云喷发到平流层中去。人为源的 SO_2 主要是化石燃料的燃烧，其总量与自然释放量相当，并主要来自占地球总面积不到 5% 的工业化地区：欧洲、北美东部和中国、日本。个别大型冶炼厂的排硫量之大是惊人的，如加拿大安大略省的 Sudbury 一家铜镍冶炼厂通过其 400 米的超高烟囱的排硫量占全世界天然与人为排硫总量的 1%，相当于全世界火山一年的排硫量。

在人为因素中有的来自本国或本地区，也有的来自邻国或地区。也就是说，城市排放的各种污染物不仅造成局部地区的污染，而且可随气流输送到很远距离，污染广大地区。例如，美国采用高烟囱排放，将 SO_2 输送到加拿大；英国、德国和前苏联排放的 SO_2 有一部分降落到瑞典和芬兰。酸雨的“越境”转移已引起新的国际争议。

为了解大气污染物的扩散、传输及沉降过程，科学工作者采用了多种模式进行运算。但现有的各种模式都有其局限性，因为大气污染物的传输、沉降过程非常复杂，受很多因素的影响，包括其物理、化学性质，风速、大气紊流等气象条件。因此，要确切地描述污染物在不同时间、空间的浓度分布与沉降是很困难的，各种模式的计算结果只能视作一种科学预测。

用于大气污染物扩散、传输和沉降的模式较多，按尺度可分为短距离模式、中距离模式和远距离模式三种（表 5.18）。

表 5.18 距离与模式

空间距离	模式类型
短距离 (< 100km)	高斯烟流模式
	轨迹模式
	粒子—单元模式
	烟团—单元模式
中距离 (100 — 500km)	高斯烟流模式
	轨迹模式
	网格模式
	粒子—单元模式
远距离 (> 500km)	烟团—单元模式
	轨迹模式
	欧拉网格模式
	箱模式

（资料来源：陈德钧，大气污染化学，1988）

（四）酸雨的危害

酸雨对环境和人类的影响是多方面的(图 5.24)。天然降雨具弱酸性,可溶解适量的地壳矿物质供植物吸收,这对生态环境是有利的。但如果酸性过强,就会给生态环境带来种种危害,其危害程度,除与降水酸度有关外,还与土壤和水体的敏感度有很大关系。敏感度高的地区,酸雨容易造成伤害。在敏感度低的地区,酸雨可能在很长时期内都不显现有害后果。

(1)对水生生态系统的危害:在酸化的水体中,鱼卵不能孵化或成长,致使鱼类减少或绝迹。另外,土壤酸化后失去了中和能力,有毒的铝离子和其它重金属离子从土壤和底质中溶出,造成鱼类中毒死亡。

(2)对陆生生态系统的危害:主要表现在酸雨使土壤酸化,危害作物和森林生态系统。在其酸化过程中,Ca、Mg、K 等营养元素被淋失,微生物固氮和分解有机质的活动受抑制,从而使土壤贫瘠化。有毒重金属(Al、Cd 等)的溶解流动,则伤害植物根系,或者进入江河湖泊与地下水中,引起水质污染。图 5.25 是全球存在酸化与潜在酸化问题的地区。

酸雨对森林的危害比较明显,一是直接伤害树的叶子,二是使森林土壤酸化。

根据 Ulrich 的研究,酸雨对森林的危害可分为四个阶段:

第一阶段,由于酸雨增加了硫和氮,同时使土壤中营养元素加速释放,树木生长变化较为迅速,呈现受益的倾向。这个阶段常常可在短期的研究中观察到。

第二阶段,随着硫和氮的长期降落,土壤不断进行着离子交换,养分被淋失,致使土壤的中和能力以及养分的供应能力大大减弱。

第三阶段,这是一个不稳定时期。连续的酸雨活化了土壤中的铝离子和其它重金属离子并把它们释放出来,由非溶态变为可溶态对树木根毛产生危害。这个阶段土壤溶液和根部的 Ca/Al 比率小于 1。当其比率小于 0.15 时,所溶出的 Al 具有毒性,它使树木生长受到抑制。

第四阶段,生态系统失去了恢复力,树木濒临死亡。

Bormann 也作过类似的研究,他将森林生态系统的衰退描述成“俯冲式森林结构”:首先死亡的是乔木,紧接着是灌木。

图 5.25 土壤对因酸性降水引起的地表水酸化的敏感性粗略估计及酸化物质目前排放的粗略估计

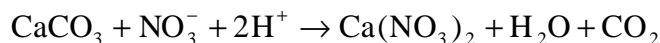
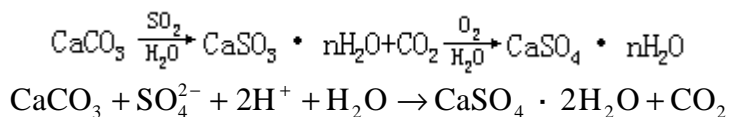
(资料来源:AMBIO, NO. 3 1989)对于森林的衰退和死亡,有的科学工作者认为酸雨不是主要原因,如将森林死亡完全归咎于酸雨,无助于问题的最终解决。他们对森林的死亡原因提出以下几点意见:第一,各种污染物和酸雨共同作用的结果。第二,干旱所造成的影响。

第三,其它原因的影响。

酸雨对农作物的直接影响尚无定论,但可能减弱作物的光合作用和抗病虫害的能力。作物在某些生长阶段较为敏感,容易受害,使产品的产量和质量下降。

(3)对建筑材料和古迹的危害:酸雨腐蚀建筑材料(石料、金属),使其风化过程加速。近十几年来,一些古迹特别是石刻、石雕或铜塑像的损坏超过以往百年以上甚至千年以上。尽管这种破坏还有来自大气污染物和自然风化的作用,但可以认为,酸雨是其中一个重要因素。

大理石最易受酸雨的损害，这与其组成成分有关。大理石的主要成分是 CaCO_3 ，它与酸性污染物之间的反应式为



通过上述反应，溶解下来的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 或被雨水冲走，或以结壳形式沉积于大理石表面并逐渐脱落，从而使古迹文物遭受破坏。

酸雨中的 H_2SO_4 和 HNO_3 可以与许多金属发生化学反应，使其受到腐蚀而损坏。酸雨腐蚀金属有三种途径：一是溶解金属生成盐类；二是氧化成氧化物；三是与金属表面沉积物作用而使腐蚀加速。

(五) 酸雨对人体健康的影响

到目前为止还未发现酸雨对健康的直接影响。但是，酸化湖泊的鱼体中，作为饮用水源的酸化地下水、酸化土壤上生长的农作物中，有毒金属含量较高，这是一种对人体健康的潜在威胁。酸化地下水对土壤与岩石中金属元素的溶解能力增强，其中 Al、Cu、Zn 和 Cd 的浓度有时比正常地下水高 10—100 倍。这种酸水进入自来水系统后，还能腐蚀给水设施与管网，使其中的金属溶出，进入饮水之中，直接威胁人体健康。

另外，据报道，酸雨中可能存在一些对人体有害的有机化合物。例如日本发现酸雨中存在甲醛、丙烯醛等有机物，这些物质会刺激人的眼睛和皮肤。

六、热污染

目前，大量的火力发电站和日益增多的核电站直接向大气和水域中放热，已经造成局部地区的热污染。这对小范围的局部地区可能是很重要的，就全球范围而言，人类活动所放出的热量目前还不足以同到达地表的太阳辐射相匹敌，其总量大约是地球表面吸收太阳能总量的 0.01%，这样一小部分能量对地球热量总平衡的影响可以忽略不计。但其长期增长速度与效应必须给予足够的重视。

太阳辐射达到大气圈顶部时其能量为 $350\text{W}/\text{m}^2$ ，其中大约 30% 被反射，被地表吸收的不足 50%，达到下层大气与地表的热能约为 $100\text{W}/\text{m}^2$ 。

现在世界工业化地区的面积为 $0.5 \times 10^6 \text{km}^2$ ，这些地区的能量生产占全世界的 75%，所释放出的热量平均为 $12\text{W}/\text{m}^2$ 。城市地区较高，如纽约市为 $630\text{W}/\text{m}^2$ ，相当于太阳辐射的 6 倍多。莫斯科人工能源所释放的热量已超过太阳辐射。洛杉矶县人工释放的热量为 $7.5\text{W}/\text{m}^2$ ，即相当于太阳辐射的 7.5%。可见人类活动已能对 10^4km^2 这样大的地区产生可观的影响（图 5.26）。

图 5.26 世界能源生产所达到的规模。在 1 万平方公里面积上人为影响已达到净辐射平衡的 10%。在 100 万平方公里密集上达到 1%。

（资料来源：Ehrlich, P.R. 等, *Ecoscience: population, Resource, Environment*. 1977.）

如果世界的能源生产按每年 5.6% 的速率增长，从 70 年代算起至 2000 年，世界能源生产将增加五倍。发达国家一些地区内因能源生产而放出的热量将相当于太阳辐射的 20%—50%。全球平均可能使热量增加 1%。

如果说这个数字目前还能让人放心的话，那么如果不加控制，到公元2100年时，世界人口200亿要达到今天美国能源消费的水平，则在全球范围内人为的热辐射将相当于太阳辐射的2%，大陆上则4、5倍于此数。这是应该给予足够重视的。

目前，限于燃料和技术等原因，各类火力发电站中热能利用的平均效率约为35%左右。也就是说燃料潜能的2/3没有被利用，而成为“余热”散失掉。如果作为热水供工厂或居民使用，或供暖房生产，就可以降低这部分能源的消耗。可是，许多火电站都通过冷却水把“余热”排入河流。“余热”提高了河水的温度，结果产生多方面的环境效应。

电站废热水进入水域时，其温度比水域的温度平均要高6—9℃。但这种水影响河水温度的程度主要取决于河流的流动状态。例如，在英格兰艾恩布里奇电站下游，在洪水期间，塞文河河水的温度只增加0.5℃，而在低速流动情况下，河水温度会增加8℃（Rodda等人，1976）。

一般来讲，水温增加6—9℃，对温度敏感鱼类是有害的。水中鱼类会因为升温而死亡。另外，水温的提高造成溶解氧的减少，而溶解氧是生物降解废物的氧化作用所需要的。同时，氧化的速率加快了，消耗的氧气会更多，因而使水中氧的含量进一步降低。

温度也影响低等生物，例如浮游生物和甲壳动物。在冷水中，硅藻是水中占优势的浮游植物，不会引起严重的富营养化；在同样的营养水平上，如果提高水温，则绿藻开始占优势，硅藻减少。在高温下，蓝-绿藻大量繁殖起来，形成富营养化。热污染进一步的生态后果是，很多鱼类的产卵和回游特性会由于热状态的改变而破坏。

此外，由于热污染，水源周围环境的温度升高，栖息在该地区的昆虫将提前苏醒，而远离该地区的本应先苏醒的昆虫，却仍处于冬眠状态。昆虫苏醒次序的更迭，会造成有关生态系统中食物链的中断，破坏生态平衡，使提前苏醒的昆虫大批死亡，甚至灭绝。

河流热污染除上述火电站排放“余热”的直接原因外，还有其它原因。包括由水库的大小、深度和季节不同，造成河流温度状况的变化；由城市热岛效应产生的变化；城市渠道构造上的变化；渠道遮蔽程度的变化；暴雨径流量的变化以及地下水成分的变化等。另外，农业区人类的活动也能引起河水温度的显著变化。

七、大气圈氧平衡失调——潜在的危险

大气中 O_2 的主要来源是叶绿素——包括陆生植物与海洋藻类体内的叶绿素——的光合作用，而 O_2 主要消耗于生物的呼吸作用及其残体分解时好气细菌的需要，以及一切化学和生物化学的氧化作用。自从大约16亿年以前含氧大气圈最终形成以后，尽管大气中含氧量出现过一些波动，但迄今基本上保持收支相抵的动态平衡。

然而，目前人类活动至少在三方面影响着 O_2 的生产：一是大规模的植被破坏，包括森林、草原和沼泽等生态系统的破坏。其中尤以热带雨林的破坏最为严重，象号称“地球之肺”的亚马逊雨林正在遭受严重的摧残；二是因海洋石油污染严重影响海洋藻类的光合作用。有资料表明海洋藻类产生的 O_2 占全球产氧量的1/4；三是北方苔原地带因石油开采引起苔原植被的破坏。苔原植被产氧多而耗氧少，对大气 O_2 的供应起着十分积极的作用，有的俄国

学者已对本国苔原植被的破坏表示深切的忧虑。

O_2 占大气组成的 21%，属于常量组分，目前尚难以察觉其减少的迹象。但是，如果上述几方面的影响继续发展，不少生态学家担心今后几个世代之内会面临 O_2 短缺的问题。当然，这还只是一种潜在的危险。而且，即使植物的光合活动完全停止，大气中现存的大量 O_2 还可以维持 2000 年才能消耗完毕。何况，石灰岩与其他沉积岩中也含有氧，又可以缓冲 1000 年，目前似乎无须杞人忧天。但是，有一点必须强调指出，即在 O_2 完全消耗之前，由于不完全的燃烧作用与其他氧化作用，所产生的 CO 就会达到危险的程度，直接威胁着人类和动物的生存。

第五节 大气污染的危害

空气是宝贵的资源之一。如果空气受到污染，即空气的物理状态，尤其是化学组成发生变化时，就会对人类健康、动植物生长发育、工农业生产、社会财物及全球环境等造成很大危害。对人体健康来说，轻则诱发病变，重则死亡；对动植物来说，轻则引起种群数量减少，重则发生敏感种群的灭绝；对全球环境来说，将引起地球变暖、酸雨和臭氧层的破坏。大气污染是当前世界最主要的环境问题之一。

一、大气污染对人体的危害

大气被污染后，由于污染物质的来源、性质、浓度和持续的时间不同，污染地区的气象条件、地理环境等因素的差别，甚至人的年龄、健康状况的不同，对人体均会产生不同的危害。

大气污染物侵入人体的途径有三：第一，通过人的呼吸直接进入人体；第二，通过食物与饮水进入人体；第三，通过皮肤接触经毛孔进入人体。其中，第一种途径最为重要，危害也最大（图 5.27）。这是因为人们每时每刻都要呼吸空气，一般成人一天需要 13—15kg（10—12m³）空气，相当于每天所需食物重量的 10 倍，饮水重量的 5—6 倍。人可以十几天不吃食物，几天不饮水，但如果 5 分钟没有空气，就会死亡；另外，肺泡表面积很大，决定了它与气体交换的功能，其浓缩作用很强；再有，整个呼吸道富有水分，对有害物质粘附、溶解、吸收能力大，感受性强。

图 5.27 大气污染物进入人体的途径

（资料来源：陈德钧，大气污染化学，1988）

因此，有人认为大气污染对人体的危害，就是大气污染对呼吸器官的危害问题，看来这是不过分的。

大气污染对人体健康的影响，一般可分为以下几类：

1. 急性中毒 多发生在某些特殊条件下，如发生特殊事故、使大量有毒有害气体逸出和外界气象条件突变等，便会引起人群的急性中毒。历史上发生过多起大气污染急性中毒事件，最典型的是 1952 年 12 月伦敦烟雾事件。当时大气中 SO₂ 的浓度高达 3.5mg/m³，颗粒物浓度高达 4.5mg/m³，加之低空出现逆温层，污染物无法扩散。仅在烟雾严重的一周之内，伦敦地区死亡人数即达 4703 人。比历年同期多死亡 4000 多人。死亡的原因，以慢性气管炎、支气管肺炎及心脏病为最多。

震惊全球的博帕尔惨案也是典型的大气污染急性中毒事件。

在印度中央邦首府博帕尔 1984 年 12 月 3 日深夜，正当人们熟睡之际，美国一家多国公司在该市于 1969 年建立的联合碳化物工厂因设备年久失修，加之技术操作失当，使 45 吨剧毒性甲基异氰酸盐气体泄漏，弥漫天空，致使 1750 人当即丧生，2 万人终生残废，受毒气影响的人数达 50 万。还有无数牛、羊、家禽死去。情景之惨，举世震惊，成为世界上有史以来最大的一次化工厂漏毒事件。

事情虽然已经过去数年，但博帕尔市民至今仍然没有摆脱毒气的危害和影响。它象一个可怕的幽灵还在吞噬着人们的生命。自事件发生后，到 1990 年又有 2100 人死去，几乎平均一天死亡一人。加上当时死亡的 1750 人，死亡总数已达 3850 人。据印度医疗卫生部门的调查，当时受毒气影响的 50 万

人中现在有 30% 的人患有眼病、呼吸系统疾病和神经错乱。孕妇流产病例是其它地方的两倍。出生的婴儿许多是畸型的。一些医学专家认为，这些毒气所造成的后遗症也许几十年都难以消除。

2. 慢性危害 如果人们长期生活在低浓度污染的空气中，就会导致慢性疾病患病率升高。目前，虽然还很难直接说明大气污染与疾病之间的因果关系，但根据大量的流行病学资料表明，慢性呼吸道疾病与大气污染有密切关系。就是说，大气污染是慢性气管炎、肺气肿、支气管哮喘、肺癌等病症的主要原因，或为其诱导原因，或使这些病情恶化。

流行病学调查资料表明，由于城市的大气污染比较严重，所以城市里呼吸器官的发病率和死亡率比农村明显增多。美国、英国、日本等国都有这方面的报导，在我国也有类似情况。

在主要的呼吸系统疾病中，癌症是当前严重危害人类健康的大敌。从全世界范围来看，当前肺癌的发病率和死亡率都在不断上升，而且在同一个国家或地区，肺癌的发病率和死亡率都具有城市大于农村，工业区大于一般地区，高浓度污染地区大于低浓度污染地区的特点。

3. 重要生理机理的变化 人们受到大气污染侵袭时，首先是感觉上受到影响，随后在生理上显示出可逆性的反应，如进一步恶化，就会出现急性的病态。其中肺的换气机能、血色素输送氧气的机能等都容易受到影响。

4. 疑难症状 人们受到大气污染危害可产生多种疾病，包括一些病因不明，却又需要医疗的病状。

5. 精神上的影响 严重的噪声污染能使人精神紧张、烦躁不安，甚至产生自杀、他杀的严重后果。大气污染是否可能象噪声那样给人群带来精神健康影响，现阶段几乎没有研究，这是今后的重大课题之一。

在考虑大气污染对人体健康影响时应该注意以下几点：第一，污染物的浓度和性质；第二，污染物之间的协同作用和拮抗作用；第三，污染物对人体的作用和暴露时间的关系。

对人体健康影响较大的大气污染物有颗粒物、二氧化硫、一氧化碳和臭氧。现将它们对人体所起的生理和病理作用分述如下：

1. 颗粒物：颗粒物对人体健康的危害，有两个最重要的因素：一是化学成分，二是粒度。当然，二者之间亦有联系，粒度不同，化学组成也不同。

粒度决定着粉尘向肺泡的侵入以及沉降的速度。0.5—5 μm 的粒子可直接进入肺泡并在肺内沉积，还可能进入血液送往全身，因此，其危害最大。

在被污染的大气中已经发现了许多有毒颗粒物和致癌物，如金属尘、石棉和芳香烃等。

2. 二氧化硫：二氧化硫对人体的主要影响是造成呼吸道内径狭窄。结果使空气进入肺部受到阻碍。浓度高时出现呼吸困难，造成支气管炎和哮喘病，严重者引起肺气肿，甚至致人于死。

二氧化硫还能与血液中的维生素 B₁ 结合，使体内维生素 C 的平衡失调，从而影响新陈代谢活动。

二氧化硫还能抑制或破坏某些酶的活性，从而影响生长发育。

另外，二氧化硫与大气中颗粒物结合产生“协同作用”，此作用对人体健康危害更为严重。1952 年 12 月伦敦的烟雾事件就是最好的说明。

3. 一氧化碳：一氧化碳对人体的毒性作用，在于其同血液中血红蛋白 (Hb) 的化合反应 (血红朊)，产生碳氧血红蛋白 (CoHb)。血红蛋白同一

氧化碳的结合能力比它同氧气的结合能力大得多，大约为 210 倍。因此，人一旦吸入一氧化碳，它就和血红蛋白结合起来，减少了血液的载氧能力，使身体细胞得到的氧减少。最初危害中枢神经系统，发生头晕、头痛、恶心等症状，严重时窒息、死亡。

人们对高浓度一氧化碳造成的中毒死亡已有认识，但低浓度一氧化碳是否会引起慢性中毒尚未有明确的结论。

4. 臭氧：臭氧对人体健康的影响主要是危害肺部和气管。对于大多数健康人，其浓度达到千万分之三时就开始有严重的刺激。随着浓度的增加，症状逐渐严重。但是，一旦脱离接触，就会很快完全恢复常态。

二、大气污染对植物的危害

大气污染对植物的危害可以分为急性危害、慢性危害和不可见危害三种情况。

急性危害是指在高浓度污染物影响下，短时间内产生的危害，使植物叶子表面产生伤斑，或者直接使叶片枯萎脱落。

慢性危害是指在低浓度污染物长期影响下产生的危害，使植物叶片褪绿，影响植物生长发育，有时还会出现与急性危害类似的症状。

不可见危害是指在低浓度污染物影响下，植物外表不出现受害症状，但植物生理已受影响，使植物品质变坏，产量下降。

大气污染除对植物的外观和生长发育产生上述直接影响外，还产生间接影响，主要表现为由于植物生长发育减弱，降低了对病虫害的抵抗能力。

对植物生长危害较大的大气污染物主要是二氧化硫和氟化物。

二氧化硫和氟化物（主要是氟化氢）对植物的危害程度与其浓度和接触时间的乘积有关；并因光、温度、湿度不同而有所差异；还因植物的种类不同而不同。

二氧化硫和氟化氢对植物的危害虽然都是通过叶片气孔进入叶片，但受害部位不同。二氧化硫所引起的受害部位多在叶脉间，而氟化氢所引起的受害部位多在叶缘和叶端。

另外，氟与硫不同，它不是植物体内的必需元素。但大多数植物都含有微量氟，只不过随植物种类不同而有差异罢了。

应该指出的是，二氧化硫危害植物的机制有两种不同的说法：一是二氧化硫被吸收后在植物体内氧化为硫酸，给植物的细胞和组织以伤害；另一种说法是二氧化硫与植物代谢过程中产生的 -醛化合，生成 -羟基磺酸盐，这种物质有破坏细胞结构的作用。

三、大气污染的其它危害

大气污染除对人体健康，动植物产生危害，对局部和全球气候有影响外，还可对金属制品、纺织品、皮革制品、油漆涂料、橡胶制品、纸制品、建筑材料等产生腐蚀破坏作用，从而缩短使用年限，不仅在经济上造成损失，而且也给一些历史文物、艺术珍品带来不可挽回的损失。

对上述物品影响较大的污染物主要有二氧化硫、三氧化硫、硫酸雾、硫化氢、臭氧和粉尘等。

二氧化硫、三氧化硫、硫酸雾可使铁、铜、镍表面腐蚀；对皮革制品有强亲合性，使皮革强度下降，产生脆化；使纸制品变脆；使纺织品（尤其是棉织品）强度下降；对建筑材料（主要是碳酸钙类）和历史古迹（碑文、石刻等）产生损坏。

硫化氢可使银、铜腐蚀，并在表面形成金属硫化物；还可使含铅涂料变色。

臭氧可使橡胶脆裂，使纺织品褪色，强度下降。

粉尘与酸污染同时存在时，对金属制品和建筑材料有严重的腐蚀作用。

四、大气污染经济损失的估算

大气污染经济损失决定于许多方面的影响，而且这种影响一般需要较长时间才能察觉，因此要确切估量这些影响并由这些定性的影响转化为定量的经济损失是十分困难的。目前，有关大气污染经济损失的定量化方法还没有成熟的计算模型。这里介绍陈德钧等人归纳的几种大气污染经济损失估算方法。

1. 大气污染对人体健康经济损失的估算 前面已经谈到，大气污染对人体健康的影响主要是引起呼吸系统和视觉系统的疾病，其经济损失主要包括医疗费、支付病假工资、病假产值损失、提早死亡产值损失等。其经济损失估算公式为：

$$V = N_{P_1} (E_{P_1} - E_c) + N_{P_2} (E_{P_2} - E_c) + N_{P_3} (E_{P_3} - E_c)$$

式中， V 为大气污染造成的经济损失（元/年）； E_c 为对照区单元费用（元/人·年）； N_{P_1} ， N_{P_2} ， N_{P_3} 为污染区单元数量（万人）； E_{P_1} ， E_{P_2} ， E_{P_3} 为污染区单元费用（元/人·年）。

2. 大气污染对金属材料的腐蚀所造成经济损失的估算 金属腐蚀损失值可用下式估算：

$$V = a \cdot b \cdot c$$

式中，

$$a = d \cdot e \cdot f \cdot g ;$$

$$b = h / (i \cdot j) ;$$

$$c = \frac{K_p - K_e}{K_p} .$$

a 为暴露在大气中的金属价值（亿元）； b 为每年金属腐蚀值占总值的比率（%）， c 为因空气污染引起的金属损失值占金属腐蚀损失值的比率（%）； d 为金属的年产值（亿元）； e 为金属的寿命（年）； f 为金属暴露于大气中比率（%）； g 为组合产品价值的劳动含量因子； h 为金属腐蚀率（ $g/m^2 \cdot a$ ）； i 为金属比重（ g/m^3 ）； j 为金属平均厚度（ m ）； K_p 为金属在污染大气中腐蚀率（ $g/m^2 \cdot a$ ）； K_e 为金属在清洁大气中腐蚀率（ $g/m^2 \cdot a$ ）。

3. 大气污染对农业经济损失的估算 大气污染对农业的经济损失主要是指由于大气污染导致产量降低所带来的损失。其损失值由下式估算

$$V = E - \frac{F - 1}{F + R}$$

式中， E 为评价区域农业总产值（亿元）； F 为对照区亩产值与污染区亩产值之比； R 为对照区农业总产值与污染区农业总产值之比。

应指出的是，作物受损害的因素较多，除受污染影响外，还有气候条件影响。因此要把污染损失值估算很准是不容易的。

复习思考题

1. 大气圈发育史。
2. 大气圈垂直方向分层方法及各层的主要特征。

3. 大气污染的定义。
4. 大气污染的分类方法。
5. 大气污染物的种类。
6. 大气中一氧化碳的来源、迁移转化和归宿。
7. 大气中二氧化硫的来源、迁移转化和归宿。
8. 大气中氮氧化物的来源、迁移转化和归宿。
9. 大气中碳氢化物的来源、迁移转化和归宿。
10. 光化学烟雾形成的主要机理。
11. 世界气候变化的“变冷说”与“变暖说”假说。
12. 温室效应对全球环境的影响。
13. 阳伞效应对全球环境的影响。
14. 南极臭氧洞形成原因的假说。
15. 臭氧层破坏对人类环境的影响。
16. 国外酸雨的研究历史。
17. 酸雨形成的机制。
18. 酸雨的危害。
19. 热污染的产生与危害。
20. 大气圈氧平衡失调的主要原因。
21. 大气污染物侵入人体的主要途径及对人体健康的影响。
22. 大气污染对植物的危害及特征。
23. 大气污染经济损失的估算方法。

第六章 水资源与水环境

海洋和陆地上的液态水和固态水构成一个大体连续的圈层覆盖着地球表面，通常称为水圈(hydrosphere)，它包括江河湖海中一切淡水和咸水、土壤水、浅层与深层地下水以及两极冰帽和高山冰川中的冰，还包括大气中的水滴和水蒸汽，这是全球水分循环中的一个重要环节。

人类的生存离不开水，生命就是从水中发源的，而且有赖于水分才能维持。人体之中 65% 的重量是水，成年人身体中平均含水 40—50 千克，而且每天要消耗和补充 2.5 千克水，失水 12% 以上就会导致死亡。全球生物体内所含的水分约占淡水总量的 0.0003%。人类的生活与生产无不消耗水，表 6.1 列举了生活用水和某些生产项目用水的数量。

表 6.1 生活用水和某些生产用水的数量

用途	用水量(m ³)
饮水(成人每天)	0.001 — 0.002
冲厕所(每次)	0.005 — 0.015
生产：一吨糖	110
一吨小麦	300 - 500
一吨大米	1500 — 2000
一吨牛奶	20000 — 50000
提炼一吨石油	20 — 50
制造一辆汽车	250
发射一枚洲际导弹	2000

(资料来源：1.G.Borgstrom, 1969 ; J.Hirschleiferetal, 1969, 引自 P.R.Ehrlichetal. 1977
2.O.S.Owen, 1980)

第一节 世界水资源

一、世界水资源与水循环

长期以来，人们把空气作为不花成本的资源，水也是作为成本低廉的资源对待的，因为它数量巨大且易于获取。当人们面对泛滥的江河时，常为其巨大的水量而叹为观止，然而，江河中的全部淡水若是同浩瀚的海洋相比，仅及其百万分之一。地球是一个水量极其丰富的天体，海洋面积占地球总面积的 71%，地球实际上应称为“水球”，而被称为水星的行星上却并没有水，迄今天文学的观察也尚未发现哪一个星球上有水，这又是地球的独特之处。地球上各处的水量与其平均停留时间列于表 6.2。

表 6.2 水的分布与停留时间

分 布	面积 (10^6km^2)	水量 (10^3km^3)	占总量的%	平均停留时间
江 河	—	1—2	0.0001	12—20 天
大气圈(云和水汽)	516	13	0.001	9—12 天
土壤水(潜水面以上)	130	67	0.005	15—30 天
盐湖与内陆海	0.5	104	0.007	$10^1—10^2$ 年
淡水湖	0.85	125	0.009	$10^1—10^2$ 年
地下水(800m 深度以上)	130	8300	0.59	$10^2—10^3$ 年
冰川与冰帽	28.2	29200	2.07	10^4 年
海 洋	361	1370000	97.31	$10^3—10^4$ 年
总 计	516	1407810	100	—

(资料来源：1.B.J.Skinner，引自 P.R.Ehrlich 等，1977.

2.D.B.Botkin，1982.

3.G.T.Miller，1979.

4.《世界资源》1900—1991)

由表 6.2 可见，地球上水的总量是巨大的，达 $1.4 \times 10^9\text{km}^3$ 。占地球质量的万分之二，如果地球是一个平滑的球而没有地形起伏，则地球表面就形成一个水深 2744 米的世界洋。即使世界人口达到 100 亿，每人平均占有的水量仍达 0.14km^3 ，即 1.4 亿立方米。但是，能供人类利用的水却不多，因为水圈中海水占 97.3%，难以直接利用，淡水只占 2.7%，约合 $38 \times 10^6\text{km}^3$ ，仍然是一个极大的数字，相当于地中海容量的 10 倍。可惜，这些淡水的 99% 却难以直接被人类利用，因为：

第一，两极冰帽和大陆冰川中储存了淡水的 86%，位处偏远，难以获取；

第二，浅层地下水储量约占淡水总量的 12%，必须凿井方能提取。

最易利用的是江河湖沼中的水，占淡水总量的 1% 弱。然而，人类正是充分利用了这极小部分的水得以繁衍不绝，创造了灿烂的文化。古代人类的文明大多与大河有关，例如黄河、尼罗河、恒河、底格里斯河和幼发拉底江等，都是人类文明的摇篮。

水属于可更新的自然资源，处在不断的循环之中：从海洋与陆地表面蒸

发、蒸腾变成水蒸汽，又冷凝为液态或固态水降落到海面 and 地面，落在陆地的部分汇流到河流和湖泊中，最后重新回归海洋，如此循环不已。图 6.1 表示全球的水分循环，图中还标明各部分水的贮藏量和迁移量。从该图可以看出：

第一，全球每年水分的总蒸发量与总降水量相等，均为 $500 \times 10^3 \text{km}^3$ 。

第二，全球海洋的总蒸量为 $430 \times 10^3 \text{km}^3$ ，海洋总降水量为 $390 \times 10^3 \text{km}^3$ ，二者的差值为 $40 \times 10^3 \text{km}^3$ ，它以水蒸汽的形式移向陆地。

第三，陆地上的降水量 ($110 \times 10^3 \text{km}^3$) 比蒸发量 ($70 \times 10^3 \text{km}^3$) 多 $40 \times 10^3 \text{km}^3$ ，它有一部分渗入地下补给地下水，一部分暂存于湖泊中，一部分被植物所吸收，多余部分最后以河川径流的形式回归海洋，从而完成了海陆之间的水量平衡。

这 4 万立方公里的水还不能被人类全部利用，其中大部分 (约 $28 \times 10^3 \text{km}^3$) 为洪水径流，迅速宣泄入海 (图 6.2)。其余 $12 \times 10^3 \text{km}^3$ 中，又有 $5 \times 10^3 \text{km}^3$ 流经无人居住或人烟稀少的地区，例如寒带苔原地区、沼泽地区和象亚马孙那样的热带雨林地区等。余下可供人类利用的仅为每年 7000km^3 。本世纪以来各国修筑了许多水库，控制了部分洪水径流。全世界水库的总库容约为 2000km^3 ，使可供人类使用的水量达到每年 9000km^3 ，这就是人类能有效地利用的水资源。

二、世界对水的需求

人类对水的需求无非是从生产和生活两方面考虑。根据各国的经验，对于用水量可以作如下的推算：

(1) 生活用水：为了维持起码的生活质量，生活用水标准为每人每年 30m^3 。北京城区的生活用水量略高于此数，为 50m^3 ，发达国家的生活用水量更高，如美国达 180m^3 ，而一些经济欠发达的缺水国生活用水量远低于起码的水平，例如非洲马尔加什共和国西南部居民每人每年仅靠 2m^3 水维持生活，仅仅超过生物学需水量的最低值。而且他们还必须为这 2m^3 质量低劣的水支付 40 美元的水费。

(2) 工业用水：非高度工业化国家的标准为每人每年 20m^3 。

(3) 农业用水：为维持每日 10462 焦耳 (2500 卡) 热量的食物每人每年需水 300m^3 ，每日 12555 焦耳 (3000 卡) 热量食物则需水 400m^3 。

以上三项合计，每人每年的需水量约为 $350—450 \text{m}^3$ ，以维持中等发达以下的生活水平。由此推算，每年 9000km^3 的总水量可以供养 200—250 亿人口，如果水分能够及时地和持续地供应到需水的地方的话。但是，地球上水分的分配无论在时间上和空间上都极不均衡，而且人口的分布也很不均匀。因此，实际上能够供养的人口将远低于此理论值。另有专家提出一个经验参数：如果依赖一个流量单位 (即每年 1 百万立方米) 的人数超过 2000 人时，这个国家或地区就会出现缺水问题。按这个参数计算，则现有淡水量可供 180 亿人之需。

表 6.3 列举了世界和各洲淡水资源及其利用的概况。以资源总量计，亚洲最多，大洋洲最少，但以人均占有量计，则恰恰相反，大洋洲最丰而亚洲最少。每年的提水量也是亚洲最高，不

表 6.3 世界淡水资源与利用概况

	资源总量 (km ³ /yr)	1990 年 人均占有量 (10 ³ m ³)	年提取量			各部门用水比例(%)		
			总量 (km ³)	占水资源 百分比 (%)	人均 (m ³)	生活	工业	农业
世界	40673	7.69	3296	8	660	8	23	69
非洲	4148	6.46	144	3	244	7	5	88
北美洲和 中美洲	6945	16.26	697	10	1692	9	42	49
南美洲	10377	34.96	133	1	476	18	23	59
亚洲	10485	3.37	1531	15	526	6	8	86
欧洲	2321	4.66	359	15	726	13	54	33
大洋洲	2011	75.96	23	1	907	18	16	76

(资料来源：世界资源研究所等；世界资源报告，1990—1991)

言而喻，这是用于灌溉。各部门用水的比例可以从一个侧面反映出该地区的经济结构与发展水平，例如非洲和亚洲的农业用水所占比例最高，而生活和工业用水所占比例很低；相反，工业发达的欧洲和北美洲工业用水比例很高。北京城市生活用水、工业用水与农业用水的比例分别为 7%、28% 和 65%，与表中所列的世界平均水平相当接近。

从世界范围来看，需水量最大、对供水量至为敏感的部门乃是农业，占用水总量的 2/3 以上，因此，发展节水农业是节约水资源的有效途径。各国农业用水所占比例差异很大，与各国工农业发展情况和农业在国民经济中所占比重有关。图 6.3 表明象印度和墨西哥等农业国农业用水所占比重很大，达 90% 以上。与此相对照的是英国和原联邦德国，农业用水很少，这不仅是由于其工业发达，相对耗水较多，更重要的是这些国家雨水充沛调匀，农业可以旱作而很少灌溉，灌溉技术也较先进，因此农业耗水较少。工业国中日本的情况比较特殊，其农业用水量约占 70%，原因是大规模种植耗水量巨大的水稻。美国工农业用水所占比例相当，因为它也是农业大国，但 60 年代以来，工业用水量开始超过农业，其主要原因是随着用电量的剧增，电厂冷却用水量亦迅速增加。

图 6.3 一些国家的用水分配 (据 R.P.Ambroggi, 1980 年)

尽管农业用水所占比重很大，但迄今全世界水浇地面积只占全部耕地的 18%，其余 82% 仍为旱作农业，而且在可以预见的未来，这种情况不会有重大的改变。这意味着全人类仍在很大程度上处于“靠天吃饭”的状况，全球性天气波动将继续对人类的粮食供应起着重大影响。因此，灌溉对于农业是至关重要的。一方面，灌溉增加了垦殖面积，在干旱地区尤其如此，那里无灌溉即无农业。我国新疆一些灌区在这方面取得了较大的成功。另一方面，它增加单位面积产量，在灌溉条件下，加上其他农业措施如应用良种、合理施用肥料和农药等，可使产量增加 3—4 倍。同时，灌溉还增加了复种指数，其效益相当于增加了耕地面积。这种效益在农业上常用种植强度 (cropping intensity) 来表示，这就是收获面积与总耕种面积之比值。在目

前的农业水平下，全世界旱作农业的种植强度约为 0.70，灌溉农业为 1.11，预期到 2000 年可分别提高至 0.76 和 1.29。目前水浇地生产的粮食占世界粮食总产量的 1/3，可见灌溉农业取得的成就。

世界上最成功的灌溉农业在亚洲，全世界灌溉能力的 63%在东南亚，该地区大部分一年两熟，种植强度平均达 1.3，几乎为旱作农业平均水平的 2 倍。我国、孟加拉国和非洲的埃及都有集约农业的悠久传统，种植强度达 1.5 以上。日本的水稻产量，平均 0.45 公顷土地即可供应 10462 焦耳 (2500 卡) /人/日，美国需要 2 倍的土地面积方能达到此数，而印度则需要 7 倍于此的土地。

灌溉对于农业增产与稳产的作用固然毋庸置疑，但是由于其耗水量巨大又限制了其发展。目前大多数灌溉方法比较落后，效率低，浪费大。在全世界范围内，灌溉水的平均有效率仅及 37%，其余的 63%都浪费了。这不仅浪费了水源，增加了成本，而且还造成养分的流失，更严重的是引起土壤盐渍化和水涝，造成地下水污染，以及引起某些疾病（如疟疾和血吸虫病）的传播等问题，这些均需予以足够的重视。

三、世界供水前景

上文已经指出，虽然全球的有效淡水量不及总水量的 1%，然而，仍可以满足约 200 亿人口低水平的需要。不过由于人口的分布和降水的时空分布都极不均匀，使不少国家和地区不时遇到缺水的困难。表 6.4 按人均顺序列出世界 13 个富水国和 13 个贫水国的水资源概况，我国恰好名列世界贫水国的第 13 位，人均水资源占有量只有 2520m³，仅及世界平均值的 1/3。

表 6.4 世界若干富水国和贫水国的水资源 (1985 年)

富水国家				贫水国家			
排名	国家	总水量 (km ³ /a)	人均量 (10 ³ m ³ /a)	排名	国家	总水量 (km ³ /a)	人均量 (10 ³ m ³ /a)
1	加拿大	3122	121.93	1	马尔他	0.025	0.07
2	巴拿马	144	66.06	2	利比亚	0.700	0.19
3	尼加拉瓜	175	53.48	3	巴巴多斯	0.053	0.20
4	巴西	5190	38.28	4	阿曼	0.660	0.54
5	厄瓜多尔	314	33.48	5	肯尼亚	14.800	0.72
6	马来西亚	456	29.32	6	埃及	56.000	1.20
7	瑞典	183	22.11	7	比利时	12.500	1.27
8	喀麦隆	208	21.41	8	南非	50.000	1.54
9	芬兰	104	21.33	9	波兰	58.800	1.57
10	前苏联	4714	16.93	10	海地	11.000	1.67
11	印度尼西亚	2530	15.34	11	秘鲁	40.000	2.03
12	奥地利	90	12.02	12	印度	1850	2.43
13	美国	2478	10.43	13	中国	2680	2.52

(资料来源：Forkasiewicz 和 Margat，1980 年，引自世界资源研究所等编，世界资源报告，1986 年，中国环境科学出版社)

世界人口仍处在持续增长的态势中，如果按照联合国的人口预测资料，

2000 年世界人口为 62.5 亿，则人均占有水资源量将下降至 6500m³，2025 年世界人口增长至约 85 亿，人均水资源占有量将进一步下降至 4800m³，供水形势更加紧张。估计本世纪末将有 30 多个国家严重缺水。另有人估计名列丰水国第 13 位的美国于 2020 年每天将需水 37 亿吨（1400 × 10⁹加仑），成为缺水国（据 E.E.Morris，1974 年）。表 6.5 列举了一些国家和地区缺水的情况。

表 6.5 一些国家和地区缺水情况

国 家	地区缺水状况
非洲北部和东部	2000 年将有 10 个国家可能严重缺水，埃及现已接近其供水的极限，未来因尼罗河上游诸国开发水源而更加缺水。
中 国	50 个城市严重缺水，北京地下水位每年下降 1—2 米，该地区农民可能要减少用水 30—40 % 以供应城市生活和工业用水。
印 度	全国已有上万个村庄缺水，布拉马普特拉河截流取水的计划加重了孟加拉国的不安，新德里每天只能供水几小时。
墨西哥	墨西哥城所在的谷地部分地区地下水抽取量超过补给量的 40 %，引起地面沉降，要获取更多淡水尚无良策。
中 东	形势逼人，以色列、约旦和约旦河西岸将于 1995 年全部利用可再生的水源，1992 年土耳其的阿塔特克(Ataturk)大坝投入使用后叙利亚可能失去必要的供应。
前苏联	流入咸海的河流自 1960 年以来水量减少使其水量减少 2/3，灌溉计划缩减，高失业率与景况恶化使数以万计的人离开该地区。
美 国	全国 1/5 的灌区靠超量抽取地下水灌溉，西部地区约有一半的河流用水过量，为了增加用水，有些城市正在购买农民的用水权。

（资料来源：WorldWatchInstitute，StateoftheWorld，1990.）

供水紧缺往往造成一系列的经济、社会和生态问题。世界上的缺水区常常又是人口增长和城市化均较迅速的地区，缺水对农业的冲击最大，因为农业常是这类地区用水量最大的部门，而且又常是经济效益较低的部门，因此当某一地区的用水量接近其自然极限时，常常是农业部门首先失去充分供水的保证。例如，在我国北方缺水地区，每立方米淡水用于工业所取得的经济效益 60 倍于农业，计划部门在分配用水时必须考虑这个因素。在美国，更是奉行效益优先的信条，当农民把用水权卖给缺水的城市获利多于种植棉花、小麦和牧草时，他们将毫不犹豫地卖水而弃耕。美国有些地区用水权的价格很高，盐湖城每英亩英尺（英美常用体积单位，合 1.233m³）用水权为 200 美元，而在迅速城市化的科罗拉多州弗兰特岭（FronRange）地区则高达 3000 至 6000 美元，任何农业收入都无法与这样的高价竞争。

但是，在过分地考虑用水的经济效益时，却往往忽视了水的生态学功能。在充分保证生活与工农业生产用水的同时，没有考虑给河流留下必要的水，以保护那里的鱼类和野生动物，更没有顾及河流的娱乐与美学功能。我国华北一些河流水的利用率很高，例如海河、滦河流域在干旱的 1983 年入海水量仅为 3 亿立方米，为当年径流量的 2.6%，该年河水的利用率已达 97.4%。黄河下游有些枯水年也出现断流。这种情况对河流生态系统无疑都产生毁灭性的后果。

面对供水短缺的前景，有关各国在采取相应的措施。总的来看，无非从开源与节流两方面来解决。开源的渠道包括已实行多年行之有效的一些措施，如修筑水库、开渠引水和抽取地下水等，也包括一些新发展的方法，如海水脱盐、南极运冰和人工降雨等；节流的方法首先是减少灌溉用水，包括耕种制度和灌溉技术的改革，其次是改革工矿企业的工艺流程以减少用水量，减少生活用水的浪费，废水净化再利用，以及提高水价以强制节约用水等。任何缺水地区，只有综合考虑采用上述措施才能缓解和解决用水紧缺的问题，而且其中还应考虑一些非自然的和非技术性的因素，例如跨国界和跨地区的用水矛盾问题，同一国家或同一地区内不同部门的用水分配问题等。各国的经济发达程度不同，所能采用的适用技术也各异。对于经济落后的许多农业国，在无足够财力采取上述开发水源措施的情况下，只得被动地适应水源的空间与时间分配，甚至逐水草而居；经济发达国家在开发新水源上具有较大的选择性，可以采用较昂贵的海水脱盐和人工降雨等新技术，例如中东一些缺水的产油富国已建立了不少实用性的海水淡化厂，沙特阿拉伯于 70 年代陆续投产的一批海水淡化厂，年生产能力达到 1.5 亿立方米，规模已相当可观，但是该国的用水量在同一时期却增加了 9 亿立方米，海水淡化还不足以满足其用水增加的需求。

70 年代全世界大约有 700 家海水淡化厂在运营，主要采用蒸馏与反渗透两种技术，多数规模小、能耗大、成本高。最大的淡化厂达到日产淡水 3.5 万吨的水平，水价约为每吨 15 美分（1973 年价格），小型淡化厂成本较高，每吨为 25—50 美分不等，而抽取河水或地下水的费用仅为每吨 1—2 美分，二者相差几十倍，因此，淡化水除供饮用外，只能少量地用以浇灌温室花卉、蔬菜和果树。

人们曾经把海水淡化的前景寄希望于廉价能源的获得和淡化技术的改进。据理论计算，1 升海水脱盐所需的能量为 2.8 千焦耳，但实际上效率最高的淡化厂也需要 170 千焦耳，为理论值的 60 倍。而且，核电的使用也未能使电费大幅度下降，1975 年所谓廉价的商业燃料能源价格为 1 美元 100 万千焦耳，按此价格淡化一吨海水的电费即需 17 美分，加上水厂的建设费用和运营时的提水需用（每 1m^3 海水提升 100m 约需 1 美分），海水淡化厂的水价高于传统给水的 10 倍以上。

除了成本问题以外，还有如何处理剩余盐分或浓盐溶液的问题。以海水的平均盐度 3.5% 计，每淡化 1000m^3 海水就留下约 40 吨盐或浓盐卤。最方便和最省钱的处理方法是就近把它排放回海里去，但这会增加近岸海水的盐度，对近海生态系统产生不良影响。

最近有人报道海水淡化的新进展，把利用热带海洋的热量发电和海水淡化结合起来。这项由美国伊利诺州阿尔贡国家实验室和科罗拉多州戈尔登的太阳能研究所完成的实验，是将热带海洋表层温度高达 26°C 的海水抽入真空室中，其中 1% 的水立即变成蒸汽，驱动普通汽轮机发出电力，用过的蒸汽则冷凝成为淡水。冷凝作用是靠抽取海面下半英里深处温度为 6°C 的海水而达到的，汽轮机发出的电力足以供给上述冷凝系统和真空系统的需要。这种装置称为海洋热能变换器。研究人员估计一个满负荷运转的装置能够产生 10 兆瓦的电力和每天 2 万立方米的淡水，足以满足一个 2 万人口城镇的水电需要。这项实验展示了未来热带海洋向热带岛屿和沿海城市供应淡水和电力的前景。

人工降雨迄今仍处于实验阶段，虽然不少国家取得了很大的进展，但是仍然存在许多问题。实行人工降雨首先要寻找大片的浓云，这恰好是缺水的干旱地区不常具备的条件。然后用飞机（有时在地面筑台燃烧某些化合物）向云中喷洒凝结核（例如碘化银粉末），以催化降水的形成。这种方法不仅需要较高的成本，而且象碘化银等化学品的积累对降雨区的土壤和水文系统可能产生长远的影响，进而对农作物与人畜产生有害的效应。此外，人工降雨在某些地区有时还引起法律纠纷，对云中水分的所有权发生争议。例如，1977年美国西部地区大旱，华盛顿州实施了人工降雨，引起相邻的爱达荷州的不满，该州的司法部长威胁说要对华盛顿州的“偷云行为”向联邦法院提出控告。

本世纪内廉价电力的供应与深井泵的发明使得大规模开采地下水成为可能，不少原来缺水地区的经济取得了奇迹般的发展。然而，过量开采地下水使许多地区地下水位急剧下降，形成了新的环境病害，下文将要述及。

近年来，各国在更合理地用水、减少水分损失和废水回收利用等方面取得不少经验，这些措施比开发新水源投资少、收效快、环境效益与经济效益显著，许多人视之为第二水源。例如，许多大型水库的蒸发损失很大，美国科罗拉多河上的米德湖（水库）的年蒸发量达 1km^3 ，相当于全国每人 4500 升。阿斯旺高坝后的纳赛尔湖蒸发量更大，如能使用蒸发抑制剂则可减少相当多的损失。又如工业用水大部分是冷却水，循环使用潜力很大，美国钢铁工业用水已有一半循环使用，日本各类工厂循环用水的比例也较大，水资源贫乏的以色列更是大规模地回收利用废水，工业与家庭废水回收处理后用于灌溉，工业用水量也大幅度减少，每百美元产值耗水量由 1962 年的 20 吨减少至 1975 年的 7.8 吨（已扣除通货膨胀的影响）。

尽管采取了上述种种措施，但是由于人口与经济的急剧增长，下一世纪内许多国家和地区仍将面临缺水的困难。几千年来，人类为了开发水利、消除水患、进行了不懈的努力：修堤筑坝、开渠凿井、疏浚河道……工程规模愈来愈大，对水圈的干预愈来愈强烈。这是人类为谋求其福祉而采取的有意识的行动，这些行动在达到其预期目的的同时，有些已对环境造成了危害；另一方面，人类在其生产与生活过程中，又常常“无意地”把大量废物和毒物排入水体中，造成水体的污染，使本来业已紧缺的水资源更形短缺。下文将就这两方面讨论人类对水圈的影响。

第二节 水利工程对水圈的影响

一、大型水库的环境效应

人类早就会修筑水坝，远在公元以前古人就在幼发拉底江和尼罗河修筑过土石坝。在埃及阿斯旺附近的萨德·埃利有一个修筑于公元前 2950 至 2750 年的水坝，高 12 米，长 115 米。我国安徽省寿县城南 30 公里，有一处陂塘蓄水工程，称为安丰塘，古名芍陂，是我国最早的大型水利工程，始建于春秋时代，距今已有 2500 年，当时可灌溉农田万顷。然而，修筑容量以亿立方米计的大型水库则是本世纪的壮举，迄今全球的稳定径流量已有 13% 置于水库的控制之下，总库容达 2000km^3 ，使全球的稳定径流量从 12000km^3 增加到 14000km^3 ，有效淡水量相应地从 7000km^3 增加到 99000km^3 （参见图 6.2）。

大型水库一般是多功能的，具有防洪、灌溉、给水、发电、养殖和旅游娱乐等多方面的作用。然而，事物总有其二重性，与中小型水库相比，大型水库往往存在一些不可避免的问题。

首先，大型水库造价高昂。据一般经验，在干流上修筑一个蓄水能力 1 亿立方米的大水库所需的经费相当于在其支流上修 10 个总库容与之相等的中小型水库的 3 倍，而且库容愈大，费用增加愈多，超大型水库所需的费用为总库容相同的中小型水库总经费的 10 倍以上，大型水库的运营费用也较中小型水库为高。

其次是大型水库的淹没区很大，淹没良田乃至城镇居民点的比例常远高于中小型水库，而且移民问题也更为棘手。世界上 13000 个大坝高度 15 米以上的水库已造成几百万移民。我国长江三峡水库按正常蓄水位 175 米方案统计，总淹没面积达 632km^2 ，涉及湖北和四川二省的 19 个县市，淹没区人口达 70 多万人。因此，安置淹没区的移民是该水库建设中的重大问题。

水库有时还产生一些不良的生态学效应，例如为了防汛的目的常在汛期前大量放水，如果适逢鱼类排卵期，浅水的产卵区被排干，影响孵化；水库下游入海水量减少，河口湾地区海水入侵，并渗入地下淡水含水层，使其盐度升高，妨碍陆生植被与农作物生长；入海淡水量减少还可能增加河口湾地区海水的盐度，一些有经济价值的鱼类和介类可能不适应这种变化，北美洲西北部原先盛产的鲑鱼因许多河流筑坝后影响了其回游与产卵而减少了 90%；水库拦蓄泥沙，使入海泥沙量减少，破坏了河口地区的沉积与侵蚀平衡，往往引起海岸的侵蚀，岸线后退，使一些沿海村镇遭受损失。

除了上述种种弊端以外，有些水库还存在一些不是不可避免的弊病，水库触发地震即是其一。

水库充水触发地震的现象首次于 1931 年在希腊的马拉松水库引起世人的注意，该水库于 1929 年开始蓄水，1931 年达到最高水位并观察到地震，1938 年发生了 2 次伤害性地震，震级达里氏 5 级以上。从 1931 年至 1966 年的地震记录表明，该地区较强的地震与水库水位迅速上升有关。此后在美国、加拿大、法国、意大利、西班牙、希腊、瑞士、前苏联、南非、赞比亚、印度、巴基斯坦、日本和我国（新丰江水库）也发现了类似的现象。

水库蓄水触发地震的机制尚有争论，多数地质学家认为与岩石原已受剪切破裂有关，水库蓄水后新增加的负荷打破了地层均衡的临界点，于是发生地震。有人对世界 11000 个高度大于 10 米的水坝进行调查，其中只有 0.3% 的水库引起较大的地震。调查还表明，水库愈深，触发地震的机率愈高：深

度 90 米以上者有 10%（126 个水库中的 13 个）引起过较大的地震；其中深度达 140 米以上者有 21%（19 个水库中的 4 个）引起过大的地震。

水库蓄水触发地震多有以下共性：震源浅、强度中等、最大震动与最高水位有关。这些地震一般不造成伤害，但也有的造成生命财产的损失。例如印度的科依纳水库于 1962 年大量蓄水，随后发生过 5 次较大的地震，而且很有规律：水位一旦达到 652 米（标高），停留一段时间以后就可观测到地震活动。1967 年 12 月 10 日发生了里氏 6.3 级大地震，造成 200 人死亡，1500 人受伤，数千人无家可归，距震中 230 公里的孟买城受到强烈震动，水电供应中断，城市一时陷于瘫痪。

1963 年意大利威翁特（Vaiont）水库事件是情况较为复杂的例子：当地八九月份连降大雨使水库处于高水位，两侧山坡土壤与岩层含水量很高，10 月 9 日发生了巨型山崩，多达 3 亿立方米的岩块冲入水库，掀起 70 米高的巨浪，库水越坝而过，大坝坍塌，造成下游 2200 人丧生。这次发生山崩的原因是多方面的：第四纪冰川消融以后，地壳减轻了负载引起构造性岩石破裂，扩大了与谷底大体相平行的岩石节理，大雨又向山坡土壤与岩隙中注满了水分。然而，地震活动可能是这次山崩的直接原因：该水库于 1960 年开始蓄水，同时安装的地震仪从 1960 至 1963 年记录了 250 次地震，震中离大坝 3—4 公里，地震频度与水位有密切关系，水位愈高，地震出现愈频繁，三次高水位均曾伴随着一次强的地震。因此，地震可能是这次山崩的催化剂。

1975 年 8 月我国河南板桥水库和石漫滩水库的坍塌也造成了极大的灾难，这两个水库分别位于汝河和洪河的上游，离京广铁路约 50 公里。该地区位于豫西山地的山前地带，历来是暴雨中心区。当时的特大暴雨形成的径流远远超过溢洪道的设计能力，库水越坝而下，淘蚀坝基，使大坝迅速崩塌，洪水从山区直泻而下，扫荡京广铁路一带的平原地区，许多村庄、树木、道路荡然无存，铁路路基被淘空，铁轨扭曲，造成极大的生命财产的损失，死难人数以万计。事后对水坝残址的调查证明土坝的施工质量很高，出事原因是溢洪能力设计不足。

其实，水坝坍塌的事件在历史上屡有发生，1864—1876 年世界各地就有 100 个水坝倒塌，不过由于水坝规模较小，多发生在山区的小河流上，造成的损失较小。近年来一些较大型水坝坍塌造成生命财产的严重损失使这个问题日益引起公众的关切。近年有人对世界各地 300 个出事的水坝进行调查，结果表明出事原因中的 35%是由于洪水超过溢洪道设计能力，25%是由于坝基问题，如管道系统故障、出现裂缝、淤塞、孔隙压力改变和断层活动等，40%是由于不良的设计、施工、运营、维修与材料质量等原因。

六七十年代美国以及其他各国频频发生水坝倒塌事件，例如 1972 年西弗吉尼亚州布法罗河上一座水坝倒塌，死亡 125 人，南达科他州腊皮德城（Rapid City）附近的水坝失事，死亡 237 人并造成 10 亿美元以上的损失。这些事件使美国国会不得不于 1972 年 8 月通过一项全国性的水坝检验法案，并于 1977 年拨款 7 千万美元对 9000 个列为“高度危险”的水坝进行为期 4 年的检验。初步结果表明，在已检验过的 1030 个水坝中 88 个存在严重问题，需予维修加固，其中 10 个须立即排干，个别水坝漏水严重，如纳瓦卓（Navajo）水坝每日的渗漏量达 7000 吨。另据美国联邦紧急事故管理局 1986 年的调查，在人口较稠密地区内有 1900 个水坝属于不安全之列，而大多数的州由于立法不够强硬和财政削减，他们的水坝安全计划都不能满足要求。

可见，修筑水坝在给人类带来巨大利益的同时，也可能造成一些环境和社会问题，这主要是由于对坝址与库区的地质、水文和气候等自然条件了解不够，或是由于设计、施工或管理运营不当所造成的。西方有些专家在总结了大型水坝的功过之后，对我国几十年来修建的大量中小型水库给予高度评价。截至 1990 年，我国已建成各种水库 8.6 万座，另有塘坝 620 万座，总库容达 4500 亿立方米，占全国湖泊蓄水量的 64%，控制了多年平均径流量的 15%，占亚洲总库容的 60% 以上。中小型水库具有造价低廉、技术较不复杂因而易于利用当地人力物力资源、发现问题较易弥补、万一造成损失也影响不大等优点，专家们认为我国的水库建设是本世纪最出色的系统。在工业化国家 70 年代以来新建大型水坝数目明显地减少的同时，小型水坝再次兴起，例如美国 70 年代后期通过立法和大量税收津贴，鼓励农户改建现有水坝和为发展小型水电修建新坝，农民为了养殖牲畜、灌溉、养鱼、防火、繁衍野生动物、游憩和环境美化的需要，修建了 210 万个塘坝，几年之间使小型水电容量增加了近 300 兆瓦，另有数百兆瓦容量的设施正在建设之中（据美国农业部 1982 年公布的资料）。

工业化国家新建大型水坝数目减少的原因是多方面的，包括最合适的坝址多已建坝，开发成本增加而政府拨款减少，对环境副作用的关注日益增长，以及公众的反对等。我国超大型的长江三峡水库业已动工兴建，但其生态效应尚有待未来的检验。一些大型水库造成始料不及的生态学后果的例子中外都有，下面仅介绍 2 例以供分析。

二、案例研究——三门峡大坝和阿斯旺大坝

这两座大坝都是五六十年代苏联专家援建的，分别出现不同的问题，但有一个共同之处，就是对当地环境研究不够，兹分述如下。

1. 三门峡大坝该大坝位于河南省三门峡市以东，所形成的三门峡水库位于黄河中游下段，陕西、山西和河南三省交界处，控制的面积达 $688.4 \times 10^3 \text{km}^2$ ，占黄河流域面积的 92%，控制了下游水量的 89% 和沙量的 98%，其功能以防洪为主，兼有发电、灌溉、防凌和航运等多种效益。大坝于 1957 年 4 月动工，1958 年截流，1960 年 9 月落成。

（1）三门峡大坝和水库的基本数据如下：

主坝长：713.2m

坝高：106m

库容： $35.4 \times 10^9 \text{m}^3$ （350m 坝高）

水库全长：371km（大坝至潼关 114km，潼关至龙门 133km，潼关至临潼 124km）

发电：装机 8 台，总容量 $1100 \times 10^3 \text{kW}$ ，年发电量 $6 \times 10^9 \text{kWh}$

移民：31.9 万人

淹没耕地： 640km^2 （96 万亩）

从图 6.4 可见，该水库是一河道型水库，库区包括龙门以下的黄河干流及支流，还包括渭河和北洛河的下流。

（2）水坝的效益：主要有以下几方面。

第一是防洪。郑州花园口以下堤防的设防标准为花园口流量 $22000 \text{m}^3/\text{s}$ ，建坝前洪峰常超过该标准，建坝以后洪峰流量得到控制，即使大坝的闸门全部开启，最大泄洪量仅为 $15000 \text{m}^3/\text{s}$ 。在入库洪峰流量为 $40000 \text{m}^3/\text{s}$ 千年一遇洪水的情况下，经水坝的调节后，花园口的洪水流量也将低于设防标准。

第二是防凌。历史上黄河不时出现凌汛，严重威胁中下游堤坝的安全，建坝以后通过调节流量的方法有效地减弱了凌汛。1967、1969 和 1970 年的凌汛均比建坝前的 1951 和 1955 年为严重，但由于水库的调节作用都顺利地得到控制，而不象 50 年代那样要用炮弹和炸弹的轰击来解决。

第三是灌溉与城市给水。1973—1983 年豫鲁两省通过水库的调节，引黄灌溉抗旱的面积累计达 1420 万公顷(21300 万亩)，并经常或短期地给郑州、开封、天津、青岛和胜利油田等城市与工矿企业供水。

第四是发电。截至 1986 年 5 月累计发电 $10.57 \times 10^9 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，正常年份的发电量为 10 亿度，其中 2/5 供当地使用，其余 3/5 并入电网输向外地。

(3) 遇到的问题，也可以概括为四方面：

第一是泥沙淤积问题。该水库于 1961 年 2 月达到最高水位 332.58m(标高)，三年以后的 1964 年，汛期后发现 335m 以下的库容已损失 43%，年平均损失库容 $1 \times 10^9 \text{m}^3$ ，为原设计的 2.7 倍(原设计年损失库容 $3.7 \times 10^8 \text{m}^3$)，回水淤积的范围北达郃阳附近，距大坝 187km，西达渭河的交口以西，距大坝 238km。大量的淤积使干流和支流的河床大幅度抬高，1969 年汛期以后，潼关附近河床比建坝前抬高 5m，由此向北黄河干流的潼关—郃阳段河床随之抬高 3—4m 至 1—2m 不等，向西的渭河和北洛河下游也同样发生淤积。据 1974 年测量结果，渭华县以下滩面抬高 3.7m，渭南以下抬高 2m，临潼以下抬高 1m。渭南以下的防洪堤内外形成了 2—3m 的临背差，成为一段悬河。同时渭南至潼关之间从秦岭北坡流下的 10 条支流河床也被抬高，有些桥梁被河水淹没，如华县辛庄乡的遇仙桥不得不于 1969 和 1973 年两次加高，共加高 5.4m，形成桥上架桥的奇观。北洛河下游的滩面也淤高了 1—2m。

水库与河道的淤塞造成了严重的后果，为了挽救水库的生命，60 年代初在大坝北侧加凿了两个排沙洞以减少淤积，与此同时也降低了蓄水量与发电能力。但是排沙洞并未能解决河床抬高的问题，库区河段水灾频率增加，汛期河水倒灌，淹没几千至几万公顷的耕地，并造成村舍、道路、机井与桥涵的坍塌。此外，河水与库水的高含沙量还造成水轮机的严重磨损，不得定期停机修理，影响正常发电，增加运营成本。

第二是蓄水后引起地下水位上升。1960 年至 1961 年水库处于高水位，坝址附近地下水位上升 8—25.5m，三门峡市王官村出现最高值，达 36.2m，库周的上游与渭河两岸地下水位一般上升 2—4m，随库水位的涨落而变化，其影响范围一般达 1—2km，有的地段达 3—5km。由于水库位于黄土地区，地下水位上升的结果造成地面湿陷，并产生裂缝、滑坡、塌房、塌井，引起地下水水质恶化、土壤发生沼泽化和盐渍化等现象，同时引起地面沉降，有些地区降幅达 0.7—0.8m。

第三是塌岸。由于水库地处黄土高原峡谷区，蓄水以后经常发生崩塌，经实地测量，潼关以东发生塌岸的长度占水库岸线长度的 41%，每次塌落的宽度一般 3—5m，最大者可达 60m。蓄水初期，崩塌的累计宽度一般为 50—100m，宽者达几百米，灵宝某地累计塌宽达 1500m 以上。从 1960 年 9 月至 1961 年 12 月，塌落的土方总量达 1.77 亿立方米，合 2.5 亿吨，占同期水库淤积量(15.3 亿吨)的 16.3%，侵占有效库容的 1.8%。同时，水库塌岸还直接破坏最肥沃的农田以及村庄和道路，造成不良的社会和经济影响。

第四是移民后遗症。由于排沙的需要经常排水，水库长期处于低水位运

行状况，原来的淹没区又重新出露，对难离故土的移民有强烈的吸引力，不少人又自行迁回库区，造成严重的社会问题。

总之，三门峡水库虽然部分地达到了原来设计的目标，但总体来看是不成功的。究其原因，主要是对我国的国情与黄土地区的情况了解不够，而当时的苏联专家又不能充分听取中国专家的意见。水库淤积本属常识性问题，一般的水库只有几十年至几百年的寿命，黄土高原水土流失的严重也是众所周知的，但是他们认为黄土高原可于 10 年内绿化，控制住水土流失，按原设计总库容只损失 1/10。但是事与愿违，水库蓄水 3 年以后即损失了库容的 43%，若非及时采取开凿排沙洞的补救措施，该水库将于 7 年内淤平，从而创下大型水库寿命最短的世界记录。须知水土保持是流域综合治理的组成部分，不是单纯的科学技术问题，而是一项复杂的社会-经济系统工程，黄土高原的治理与整个区域的开发分不开，只有随着社会经济的发展，水土流失问题才能解决，这要通过几代人的艰苦努力方能做到。

2. 阿斯旺高坝阿斯旺高坝原是埃及政府委托西方国家设计，并希望获得西方国家和世界银行投资的一项水利工程。由于西方国家提出了政治条件，被纳赛尔政府所拒绝，并收回苏伊士运河，拟以运河的收入作为建坝资金。随之发生了苏伊士战争，埃及转与苏联合作，由苏联援建，1960 年动工，1968 年大坝建成，拦蓄全部尼罗河水，1970 年 12 台发电机组全部安装完毕，工程总费用 4.02 亿埃镑（合 10 亿美元）。工程由新成立的灌溉部主持，发电则归电力能源部管理。该水坝与水库的基本数据如下：

坝高：111m

坝长：3200m

坝体体积： $43 \times 10^6 \text{m}^3$

总库容： $1620 \times 10^8 \text{m}^3$ （其中死库容 $310 \times 10^8 \text{m}^3$ ，有效库容 $1310 \times 10^8 \text{m}^3$ ）

水库总长度：500km，其中埃及境内 300km，称为纳赛尔湖，苏丹境内 200km，称为努比亚湖）

平均宽度：11.8km

最高水位时水面面积： 6540km^2

电站装机容量：210 万千瓦

年发电量：100 亿度

移民：10 万人

水坝建成后，20 多年来取得了巨大的效益

（1）免除了旱涝灾害：1964 年大坝开始部分拦洪，当年的洪峰流量达历史最高纪录，1975 年又遇特大洪水，径流量高达 1000 亿立方米每秒，二次均未成灾；1972 年为特大旱年，1979 年开始非洲连续 7 年大旱，埃及的邻国埃塞俄比亚和苏丹均灾情严重，饿殍遍野，埃及因水库的作用而幸免。一位美国专家认为仅就 1972 年的大旱，高坝的经济效益即达 6 亿美元。

（2）扩大耕地、增加稳定灌溉面积和复种指数，保证了农业生产：埃及地处干旱区，全国土地的 96% 为荒漠，农田集中在尼罗河两岸和三角洲，自古以来依赖 8—10 月的洪水灌溉，一年一熟。建坝以后，埃及每年可获 550 亿立方米水量，常年灌溉，改为一年两熟或三熟，单产增加。灌溉能力的提高又使扩大耕地面积成为可能，截至 1985 年新扩大耕地 63.5 万公顷。使全国耕地面积增加 1/4（1961 年全国耕地面积为 250.7 万公顷）。以上的增产效益实际上相当于全国耕地翻了一番。但是，灌溉与开垦新耕地也产生了一

些不良影响，后文将要述及。

(3) 发电：根据设计、年发电量为 100 亿度，尽管最终未能达到设计指标，但已产生巨大效益。70 年代的年发电量从 34 万度增加到近 80 万度，占全国发电量的 50% 左右，1982 年发电量达到最高峰，为 86.3 万度，此后由于干旱，年发电量又降至 60 多万度。70 年代后期以来，由于火力发电逐渐发展，加上旱情造成水力发电下降，阿斯旺大坝发电量也由 1977 年的占全国发电量的 53% 下降至 1983 年的 31% 和 1985 年的 21%。尽管如此，阿斯旺的水电依然在埃及的能源结构中占有重要地位。

(4) 渔业：纳赛尔湖的淡水养殖业从 1966 年开始发展，鱼产量从那时的 750 吨逐年增加，到 1984 年已达 3.45 万吨，计划最终将成为年产 7 万吨的渔业基地。

(5) 旅游业：大坝建成后，阿斯旺城成为现代化的旅游中心，人口从 3 万发展到近 20 万。坝址附近和水库上游的古迹吸引来自世界各地的游客，大坝还改善了尼罗河的通航条件，下游航道船只吃水深度由 1.2—1.5m 增加到 1.8m，而且常年通航。大坝和水库每年接待外国游客数十万，产值十余亿美元，成为埃及的四大外汇收入之一。

总之，阿斯旺高坝给埃及带来了多方面的效益，但是水坝在很大程度上改变了尼罗河的自然状况，产生了许多预计到的和未预计到的副作用，主要有下述几方面：

(1) 水库的渗漏和蒸发问题：按原设计应于 1970 年充满水，但至 1975 年水库“满蓄”时也仅及设计库容的一半，多数专家认为今后水量不会有更大的增加，原因是大量的渗漏和蒸发。高坝的坝址上于 1902 年曾修筑过另一个阿斯旺小坝，蓄水后库水就曾通过多孔的砂岩地层大量渗漏，这种情况本应在意料之中。又由于水库位处干旱地区，自由水面的蒸发量很大，原估计每年的蒸发量为 100 亿立方米 (10km³)，建成后实际蒸发量大于此数。这两个因素使水库的蓄水量低于设计指标。

(2) 发电量达不到设计要求：由于水量不足，而且水库的管理权归灌溉部而不归电力能源部，水库主要按灌溉的需要放水发电，因此总装机容量为 2100 兆瓦的 12 台大水轮机只有 7—8 台经常运转，冬季不需灌溉时发电量只有 900 兆瓦，远未达到原设计的要求。

(3) 土壤养分损失：原先尼罗河泛滥时每年接纳来自埃塞俄比亚高原富含养分的沉积物总量达 1.3 亿吨，当地农民譬喻为“银行储蓄。”建坝后在控制泛滥的同时也切断了这项养分来源，为了补充土壤养分必须大量增施化肥。据埃及有关部门公布的资料，仅以氮肥为例，建坝前的 1960—1964 年每年施用量为 135 万吨，到 1982 年增加到 464 万吨，增加了近 2.5 倍，磷肥和钾肥也相应地分别增加 2.7 倍和约 10 倍。当然，化肥用量的大量增加并非完全是由于土壤肥力的下降，也是由于埃及政府改革传统农业而采用增施化肥作为增产的手段。

(4) 土壤次生盐渍化和涝渍：土壤盐渍化是干旱区较常见的问题，原先尼罗河泛滥起着自然洗盐的作用。水库灌区改为常年引水灌溉后，大部分水浇地发生盐渍化和涝渍，几年以后产量下降 3/4，造成很大经济损失。埃及政府从 70 年代起重视这个问题，采用合理灌溉、充分排水(特别是暗管排水)等措施后情况有所好转，但有关专家估计要建立完善的地下排水系统和与之

配套的电站，可能要投入 10 亿美元。和大坝的投资相等。

(5) 河床下切与海岸侵蚀：建坝后下游含沙量剧减，河水变清，对河床的下切作用加强，同时入海水量与沙量大减，破坏河口地带原来的物质平衡关系，海岸线受侵蚀退缩，咸水入侵。据 20 年来的实测资料，从坝址至三角洲出海口总长 618km 的下游河段，河床下切深度平均为 42 至 66cm 不等，算术平均值为 55cm，局部下切最深处可达 2m。在河床下切的同时，还伴有两岸的塌陷，宽度 1—30m 不等，幸多出现在荒漠无人区，未引起经济损失。为了制止河道的进一步下切，政府拟定了一个建造拦水坝的计划，从大坝以下至河口之间，拟兴建 10 座拦水坝，总耗资 2.5 亿美元。海岸侵蚀现象比较严重，由于出海泥沙量从建坝前的每年几千万吨减少至建库后的每年二三百万吨，海浪的侵蚀作用使岸线每年后退 150m 左右，十年来已后退 1km 以上，有些地点退缩更多，如腊席德 (Rashid, 旧译罗塞塔) 地区，海岸后退了 3km，海滩消失，原有渡假中心只得关闭。为了防治海岸侵蚀，埃及政府已投资 4500 万英镑 (约合 1.1 亿美元) 在侵蚀最严重的地段修筑长度 20km 的块石护堤，其他地区的保护计划也在考虑中。

(6) 沙丁渔业凋零：1965 年大坝部分拦洪时尼罗河口的沙丁鱼捕获量仍达 1.8 万吨，三年以后大坝建成，拦蓄了全部河水，渔获量剧减 97%，降至 500 吨，其他水产一并锐减，包括虾、龙虾和鲭鱼等。生物学调查表明，原先尼罗河泛滥前三角洲以外海水中作为沙丁鱼主要饵料的藻类含量为每升 3.5 万个，泛滥时期达每升 240 万个，增加 68 倍。筑坝后藻类数量急剧下降，沙丁鱼无以为食。近海渔业的衰退使埃及损失了 3 万个工作岗位，每年经济损失达 100 万美元。近年来在改进捕捞技术后，捕捞量有所恢复，但每年仍需进口 1/3 的鱼类。

(7) 文物古迹的淹没：库区有不少古埃及的建筑和文物，最著名的是 5 千年前修建的阿卜辛堡神庙 (Abu Simbel, 又译作阿布·辛拜勒) 和费拉神庙等，均为人类古文明的瑰宝。为了保存阿卜辛堡神庙，埃及政府在联合国教科文组织和其他国家的赞助下，花费 4100 万美元，将该神庙迁往淹没区以上，使之得以保存。但是公元前 1200 年拉姆赛斯王朝时期完成的无价之宝崖边石刻无法迁移，只得任其淹没于水下。

此外，灌溉渠道经常有水，使某些以水为媒介的疾病蔓延，例如血吸虫病和疟疾。近年在国际组织的支持下，加强了卫生教育和水源管理，以及渠道除草灭螺等措施，血吸虫病的全国发病率已经降低至 7% 左右。又由于尼罗河不再泛滥，失去了淤泥这种传统的制砖材料，不少农民挖掘农田的粘土制砖，使耕地损失，因为制砖的收入大于农田耕种收入。现在埃及政府正在通过立法、采用替代材料 (水泥砖、沙土砖、石块和预制件等) 和经济手段等解决这个问题。阿斯旺水坝的移民安置工作做得较好，水库区移民共约 10 万人，均为少数民族努比亚人，埃及、苏丹两国各占一半，均采用集中远迁的办法，埃及境内的 5 万余人迁往阿斯旺城以北 45 公里的柯孟巴村，在新灌区以种植甘蔗为生，保持原来村庄的建制，但也有一部分人在水库消落期迁回故里，造成一些社会问题。

为了克服该水坝引起的问题，埃及专门成立了一个副作用研究局，进行调查研究、制定措施、全力补救，解决了不少问题。但是在建坝初期对副作用研究不足，许多配套工程又未能及时动工，如灌溉与排水、发电与用电等，使工程效益未能及时充分发挥，反而产生一些本来可以避免的副作用，这些

都是应该引以为戒的。

三、地下水过度开采

在可资利用的淡水资源中，地下水以其水量丰富、水质优良和供应稳定而备受青睐，成为许多大城市和部分农业地区用水的主要水源。电动水泵的发明和廉价电力的供应使地下水成为一种廉价的资源而被大量开发。从表 6.2 可知，地下水的贮量巨大，远远超过江河湖泊里的水量。但是，地下水的大部分贮存在较深的地层里，补给缓慢，是在漫长的年代里积存下来的，在某种程度上象矿床一样难以更新。据水文地质学的研究，全球地下水总贮量中大约只有 0.1% 是可以更新、能进行持续开发的，因此，在开发利用地下水时必须考虑其更新能力有限这个特点。

地下水的过度开采可能造成种种不良的环境效应：

1. 地下水位下降以至含水层耗竭 上一世纪开始，一些城市化较早的地区即已出现地下水位的下降，例如伦敦市早在 1820 年就已发现其自流水压下降，1843 年地下水位下降了 7.5m，一个世纪以后，1936 年下降了 100m。又如北京城区，明代时仍有部分自流井，称为“满井”，至明末清初因地下水位下降不再自流。北京西郊的承压水层所形成的自流井一直延续到 1960 年以后才因水位下降而干涸。目前研究最详细的一个大型地下含水层的涸竭是美国中西部的欧加拉腊 (Ogallala) 含水层，它北起南达科他州，向南延伸，包括怀俄明州、内布拉斯加州、科罗拉多州、堪萨斯州、俄克拉何马州、新墨西哥州和得克萨斯州等七个州的部分地区。这个含水层灌溉着美国 1/5 的农田，盛产小麦、棉花、高粱和玉米，并喂养着美国 40% 的肉用牛，全部农牧业年产值达 320 亿美元，在美国农业中举足轻重。然而，这个含水层的补给速度极其缓慢，而开采速度 8 倍于补给速度，在南部的 4 个州里有时竟比补给速度高出 100 倍。专家们预测这个含水层将于 2020 年完全抽干，现在有些地方井深已达 2000m，高昂的提水费用开始使一些农民望而却步，有 5 个州的水浇地面积已在减少，农民不得不改种耗水较少的作物，哪怕是获利较少。尽管如此，这个作为公共财产的含水层仍将继续消耗下去，直至提水费用高到无利可图时为止。

我国华北平原地下水位的下降也是众所周知的，1960 年以来，北京的地下水位每年下降约 1m，天津、唐山一带也有类似情况。其他许多国家也出现含水层耗损的严重情况，如墨西哥城和印度的一些地区。

地下水开采量减少或停止开采后，水位可以部分地得到恢复，其中较显著的例子是美国加利福尼亚州中央谷地的门多塔 (Mendota) 地区，在引入地表水取代地下水以后，地下水位从 1968 年至 1983 年间上升了 259m (850 英尺)。

2. 地面沉陷 地下含水层被抽干以后，其物理性质与力学性质发生变化，在上覆地层的压力下发生沉陷，我国沿海不少城市已发现这种现象。天津市 1959 至 1982 年累计最大沉陷量达 2.3m，平均每年沉陷 10cm。上海市区的沉陷量亦达 2m 以上，以 50 年代后期沉陷最严重，市区平均年沉陷量达 11cm，沉陷中心区 (普陀区) 达 115cm，沉陷大于 50cm 的面积达 66.1km²。常州、苏州和无锡的沉陷也很明显，年平均沉陷量在 1.4—3.8cm，南通市的年沉陷量达 5cm。地面较大幅度沉陷带来一系列问题：地表渠道与地下管线损坏、路面与建筑物破坏，这些均需耗费大量人力物力进行维修、加固和重建。第二次大战以后有些城市迅速膨胀，地面沉陷幅度也很大。美国加州洛

杉矶以南的长滩市 1940 年开始发现地面沉陷，70 年代中期沉陷区中心部分下沉 9m，造成的经济损失估计达 1 亿美元。如果任其继续发展，预计会下沉至 13.7m。该市不得不于 1958 年开始大量注水，充填原来采油的岩层，几年以后制止了沉陷，1963 年地面回升 15%。墨西哥城也是一个迅速发展的城市，1895 年人口为 50 万，1975 年发展到 800 万（1988 年达 1920 万），与此同时地面沉陷了 7m，1937 年建成的美术馆下沉了 3m，一楼已完全变成地下室。著名的低地之国荷兰国土的 60% 低于海平面，有一半人口生活在海平面以下，必须不断地抽取地下水以保持地面的干燥，

图 6.6 美国圣华金谷地因过分开采地下水造成地面沉陷

抽水的结果造成地面下沉，只得用挖泥船取沙覆盖沉降地区，为此每年需运送 7500 万立方米泥沙。据报道，荷兰人每年花费在海岸工程上的经费占国家 GNP 的 6%，比美国军费所占的比例还高。

世界上面积最大的沉陷区之一是美国加利福尼亚州的圣华金谷地，沉陷区面积达 13500km²，沉陷幅度平均为 1m，最大处达 10m（图 6.6）。谷地中长达 112km 的地段沉陷 3m 以上，整个沉陷区的体积达 180km³。沉陷的原因是过量抽取地下水，从 1920 年代开始抽水，至 50 年代中期谷地两侧的沉陷幅度达 0.55m，此后抽水量逐渐减少，至 1973 年停止抽水，改为引用萨克拉门托河水，地面沉陷逐渐停止，至 80 年代初地下水位也上升了 60m。

停止抽水虽然可以制止地面沉陷，并使地下水位部分地或全部得到恢复，但是迄今尚未见地面大幅度回升的报道，何况许多地方因种种原因尚不能停止抽水，因此，地下水超采依然是许多缺水地区面临的难题。在有地表水源可资利用的地方，用地表水回灌地下是一种人工补给的好方法，国内外均有成功的经验，尤其是在冬季农闲时把暂时无用的地表水回灌地下含水层，水温又较低，夏季抽取作工业冷却水，制冷效果更为显著。

四、小河流渠道化的利弊

开挖渠道引水灌溉和防洪排涝本来是一项古老的农业实践，浚河筑堤和截弯取直也是古而有之的水利工程。而近代一些高度工业化国家以其巨大的财力与物力，正在大规模地进行小河流渠道化的工作。所谓渠道化（channelization）就是为了防洪的目的把整条小河流或某一河段挖深与取直，把天然河流变成人工的渠道。通常的做法是用推土机等机械把两岸约 30m 宽的植被清除，并用推土和挖土的大型机械把河道挖深和取直，有些河岸还铺设护坡，两岸留下的裸地则用作农田。

渠道化的最大利益就是便于排水防洪，使两岸农田的收成得到保障。但是有时投资甚大而获益较小，例如美国阿拉伯马州曾有一项渠道化工程，耗资 440 万美元，仅使 1 万多英亩（合 40km²）农田受益，即平均每英亩的防洪费用高达 405 美元。这项计划使 105 家农户受益，相当于每家农户从州政府得到 4.2 万美元的津贴。

渠道化的另一好处是河道截弯取直以后，残留的河曲形成一些小湖沼，可能有娱乐价值，或者可成为野生生物的栖居地。

然而，渠道化常常带来一系列生态学、水文学以至美学的问题。

首先，渠道化可能产生一些不良的生态后果，主要是对水生生物系统带来灾难性的影响。渠道化清除了河道中原有的饵料和河床覆盖物，原来多种多样的底栖生物遭到消灭或迁徙他处；两岸植被清除以后，不再有落叶给河

水带来养分，随之落入河中的昆虫也几乎绝迹，减少了鱼类的饵料来源；天然河流深浅相间，鱼类栖息在深水处，浅水处则为饵料昆虫的繁殖场所，渠道化后平坦的河床消灭了这种差别，加上许多渠道化的河流夏季完全干涸，水生生物无处逃避，而天然河道中的深潭本来是它们的避难所；此外，两岸农田直逼河岸，所使用的除草剂与杀虫剂迅速排入河中，经常造成下游的死鱼事件。

其次为对河道的影响：由于清除了两岸的植被，河岸抗蚀能力降低；无树木荫蔽的河道受阳光直接照射，使河水温度升高，溶解氧降低；河道平直，流速增加，侵蚀能力增强，容易引起塌岸；河道挖深后一些地区地下水水位降低，部分水井干涸，近海地带则导致海水入侵地下含水层，使其盐度增加，影响灌溉水的质量。

此外，清理河岸的作业破坏了许多有价值的木材生产，甚至消灭了一些有价值的物种。最后，原来风景如画的河曲变成了平坦单调的水渠，使许多有益的户外活动如游泳、划船、短足、观鸟、采花等活动的乐趣大为降低，这也是一种美学上的损失。

渠道化失败的例子已屡见不鲜，例如美国密苏里州黑水河（Blackwater River）的渠道化于1910年完工，曲流取直，河道挖深，河流比降（单位距离的落差）增加一倍，过水面积增加10倍以上，流水侵蚀作用加剧，有一架桥梁于1930年遭侵蚀坍塌，修复后又先后于1940年和1947年两次坍塌，桥梁的长度也由27m延长至70m。该渠道的侵蚀速率为每年加宽1m，加深0.16m。而且河道挖深后，露出了底部的页岩、砂岩和石灰岩，河床光滑无泥，底栖生物不易着生，因而鱼类也随之减少。更为戏剧性的是工程未能贯彻始终，因为下游河床下为坚硬的石灰岩，挖掘作业费用过高，只得终止。结果整治过的河段洪水宣泄迅速，反而加重了下游的水灾。实质上是把上游的洪水转嫁给下游。

渠道化虽然只限于一些较小的流域，但对某些国家而言，其总规模仍是很大的。例如美国每年大约有1%的小河流实行渠道化，据美国农业部水土保持局的长期计划，到2000年为止共整治9000个小流域，占美国小流域的半数，如有失误，将在许多地方造成不良后果。因此，一些人对过去几十年来在防治水土流失和水灾方面成绩斐然的土壤保持局持严厉的批评态度，称这项计划为官僚主义对资源的破坏行为。

五、湖泊的泯灭

从地质学的角度来看，湖泊的存在只是一种暂时的过渡性的现象，它迟早会被入湖的沉积物所充填，逐渐演变为沼泽乃至最后消亡。但是这种自然过程由于近代人类活动的影响而大大加速了。影响之一是加速土壤侵蚀使入湖泥沙量增加。其二是入湖营养物增加（富营养化）使湖内藻类与水草丛生。其三是围湖造田使湖泊面积急剧缩小乃至消亡。其四是由于大量引水灌溉和河流改向使入湖水量急剧减少。后者常使湖泊面积与水量于很短的时期内（20—50年）发生戏剧性的变化，甚至已导致一些湖泊完全干涸而泯灭。

据我国近年的调查，50年代初期全国仍有大小天然湖泊24880个，总面积达83400km²，其中面积在1km²以上的湖泊2848个，总面积为80645km²。80年代初期，全国大于1km²的天然湖泊减少至2305个，减少了543个，总面积为70988km²，减少了9657km²。其中又以位处干旱和半干旱地区的蒙新高原湖泊面积减少最多，共减少了6989km²，占全国湖泊面积减少数的56%，

其次为东部平原湖群，减少了 2058km²，占 17%。

新疆境内 50 年代 5km² 以上湖泊总面积为 9700km²，至 80 年代初 1km² 以上湖泊总面积仅为 4628km²，缩减了一半多，相应地水量减少了约 50 亿立方米。

内蒙古全区 50 年代初 1km² 以上湖泊总面积为 5261km²（中蒙界湖贝尔湖未统计在内），80 年代初缩减为 4244km²，减少了近 1/5。

大面积围湖造田造成湖泊面积的缩减数字是惊人的，1954—1980 年期间，仅湖北、安徽、江苏三省和洞庭湖、鄱阳湖的湖泊水面，被围垦的面积竟达 11991km²。

湖泊面积缩减，水量减少还往往导致湖水矿化度增加、水质变劣，例如新疆的博斯腾湖原是水质良好的内陆淡水湖，50 年代后期湖水矿化度仍在 1g/L 以下，随着水量的减少，至 80 年代后期已上升至 2.5g/L。

我国几个大湖泊近几十年来的变化令人忧虑，曾经是中国第一淡水湖的洞庭湖，由于泥沙淤积与围湖垦殖，面积已大为缩小，1896 年 5400km² 的湖面至 1980 年已缩小为 2342km²，减少了 57%，贮水量相应地从 293 亿立方米减少至 159 亿立方米，减少 46%。现已退居为第二大淡水湖，形态也变得支离破碎，部分湖区已经泯灭。同样，鄱阳湖自 50 年代以来，面积缩减近 2/5，由 5050km² 缩小为 2939km²，相应地水量从 321 亿立方米减少至 246 亿立方米。青海湖现在是全国最大的湖泊，由于 50 年代以来，地表径流明显减少，1957 年至 1981 年实测水位下降 2.65m，湖泊面积减少 228km²，湖水蒸发量超过来水量约 13.6%，平均每年减少水量 4.9 亿立方米。

尤其值得注意的是新疆一些湖泊的干涸，其中最著名者为罗布泊，直至 1950 年其面积尚有 3006km²，1964 年完全干涸，其西南方的台特马湖于 1972 年干涸。此外，玛纳斯湖和阿兰诺尔湖也已泯灭，全国海拔最低的艾丁湖面积缩小了 30%，湖水已成为饱和的盐卤。上述湖泊的干涸有其气候变干的大背景，但是，近年来灌溉农业的发展等人为因素也起着重要的作用。

另一个著名的例子是咸海的濒临死亡。它曾经是世界第四大淡水湖，仅次于里海、苏必利尔湖和东非的维多利亚湖。咸海位于哈萨克斯坦和乌孜别克斯坦两国之间，1960 年以前，其海面面积为 6700km²，贮水量 1050100km²，水位在海拔 53m 左右，因年降水量的变化上下浮动

位于中亚干旱区的咸海地区，在前苏联的农业生产上却居于重要地位，其棉花产量占前苏联的 95%，水果占 1/3，蔬菜占 1/4，稻谷占 40%。由于气候干旱，90% 的农田依靠灌溉。随着生产的发展，在入流的阿姆河和锡尔河上挖掘了一系列的运河以引水灌溉，水浇地从 50 年代的 290 万公顷发展到现在的 750 万公顷，引水量每年达几十万平方公里。入海水量的大量减少，使近 30 年来咸海面积缩减了 40%，贮水量减少了 67%，海平面下降了 14m，海水退缩后使 30000km² 的海底出露，变成沙漠，使原有几千人口的沿海城镇穆伊纳克和阿拉尔斯克处于风沙包围之中，入海两条大河三角洲的湖沼消失，当地 70%—80% 的动物灭绝。随着海水容量的减小，水中含盐量增加了 2 倍，严重破坏了海洋生态系统，本地鱼种已完全绝迹，渔业亦随之凋零。干涸海底的含盐尘土被吹扬至附近的农田里，使作物减产。农民为了维持农作物的产量而大量施用化肥与农药，污染地下水。环境质量的恶化导致了許多疾病的流行，据报道象传染性肝炎、伤寒、黄疸、肠道感染和癌症等病例均明显增多。大风还把灰尘、盐分和风干了的农药颗粒吹扬至几百公里以外，

西达黑海，北达北极圈内。盐分与农药颗粒随雨水降落，所到之处，作物、草地牧场、森林和野生生物均受其影响。

现在每年流入咸海的淡水量约为 11km^3 (1987 年) 至 20km^3 (1988 年)。专家们估计，要使海平面保持稳定，每年入流的淡水量应在 35km^3 以上，很可能在近 10 年内咸海的水面仍会继续下降 6m，然后趋于稳定。

咸海再也不是世界第四大湖了，现在就面积而论它居于第六位，落在休伦湖和密执安湖之后。该湖的缩小所带来经济的、社会的和生态的影响是巨大的，甚至前苏联有的官员也承认，这比 1986 年契尔诺贝利核电站事故还要坏 10 倍。

第三节 水体污染

对于什么是水体污染，不同学者提出了大同小异的概念，归结起来，水体污染可定义为：大量污染物质排入水体，其含量超过了水体的本底含量和自净能力，造成水质恶化，从而破坏了水体的正常功能，称为水污染。

为了研究水体被污染的情况，必须先了解未受污染水体的水质状况，以及天然水体所具有的自净能力。

一、天然水的物质组成和水体的自净作用

水体是指海洋、河流、湖泊、沼泽、水库、冰川、地下水等地表与地下贮水体的总称。水体包括水和水中各种物质、水生生物及底质。从自然地理的角度看，水体是指地表水覆盖的自然综合体。

水体可分为海洋水体和陆地水体，陆地水体又可分为地表水体和地下水体。本章研究的主要是陆地水体，而且是与人类生活密切相关的河流、湖泊、水库和地下水。

在环境污染评价研究中，区分水与水体这两个概念十分重要。例如，在河流重金属污染研究中，只根据水中重金属的含量，很难正确评价河流的污染程度。国内外大量的研究表明，通过各种途径排入水体的重金属污染物大部分均迅速地由水相转入固相，即迅速地转移至悬浮物和沉积物中。悬浮物在被水流搬运过程中，当其负荷量超过其搬运能力时，便逐渐变为沉积物。另外，在受重金属污染的水体中，水相中重金属含量很微（常为十亿分之一级），而且随机性很大，随排放状况与水力学条件不同，含量分布往往没有规律。但在沉积物中重金属很容易得到积累（百万分之一级），并表现出明显的含量分布规律。因此，沉积物能更好地反映水质的状况，而且可以作为水环境重金属污染的指示剂。在确定江河湖泊中所发生的复杂的化学过程时，应该同时研究水和沉积物。

（一）天然水的物质组成

在自然界，不存在化学概念上的纯水。天然水是在特定的自然条件下形成的、含有许多溶解性物质和非溶解性物质、组成成分极其复杂的综合体。这些物质可以是固态的、液态的或者是气态的，它们大多以分子态、离子态或胶体微粒态存在于水中（表 6.6）。

天然水中含有地壳中的大部分元素，但其含量变化范围很大，表 6.6 是天然水中含量较多，较常见的物质组成。

水中溶解性固体主要有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等八种离子，它们的总量占水中溶解固体总量的 95% 以上。

这八种离子在各类水中的含量与自然地理条件密切相关。海水中以 Na^+ 、 Cl^- 含量占绝对优势，河水中以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量占优势，地下水受局部环境地质条件限制，其优势离子变化很大。

天然水中除含有八种主要离子外，还含有一些微量元素。就天然水而言，一般系指含量小于 10mg/L 的元素。主要有 Br、I、Cu、Co、Ni、F、Fe、Ra 等。

溶解于天然水中的气体主要是 O_2 和 CO_2 ，还有少量的 N_2 、 H_2S 和 CH_4 。溶解性气体能够影响水生生物的生存和繁殖以及水中物质的溶解、化合等化学和生化行为。

表 6.6 天然水的物质组成

主要离子		微量元素	溶解气体		生物生成物	胶体		悬浮物质
阴离子	阳离子		主要气体	微量气体		无机	有机	
Cl ⁻	Na ⁺	Br、F、 I、Fe、 Cu、Ni Co、Ra	O ₂	N ₂	NH ₄ ⁺ 、NO ₂ ⁻	SiO ₂ · nH ₂ O	腐殖质	硅铝酸盐颗粒 砂粒 粘土
SO ₄ ²⁻	K ⁺		CO ₂	H ₂ S	NO ₃ ⁻ 、PO ₄ ³⁻	Fe(OH) ₃ ·nH ₂ O		
HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺		CH ₄	HPO ₄ ²⁻	Al ₂ O ₃ · nH ₂ O			
CO ₃ ²⁻	Mg ²⁺			H ₂ PO ₄ ⁻				

生物生成物这些离子在水中含量很低，然而它们对水生物的生长却至关重要，含量过高会使水生生物急剧繁殖，造成水体出现“赤潮”现象。

天然水体中的有机质一般指腐殖质，主要是生物生命活动过程中所产生的有机物质和生物遗骸的分解所产生的有机物质。它们大部分呈胶体微粒状。这些有机物在化学与生物化学作用下被分解成为无机物。

天然水的物质组成决定于它的形成环境，也就是说一方面决定于与水接触的物质的成分和溶解度；另一方面决定于这一作用进行的条件，即化学及物理化学作用，包括溶解-沉淀，氧化-还原，水相-气相间离子平衡，固-液两相之间离子交换，有机物的矿质化，生物化学作用等。通过上述各种作用，使天然水富集或析出各种离子和分子。

天然水物质组成的过程在大气圈中就开始了，但改变其组成的最主要过程是降落到地表之后开始的。

影响天然水组成的因素可以分为直接和间接两种。直接因素主要有岩石、土壤和生物有机体，这些因素可使水增加或减少某些离子和分子。例如，流经石灰岩地区的天然水中富含 Ca²⁺和 HCO₃⁻；当水透过土壤时溶解氧的含量减少，而 CO₂ 的含量增多；生物排泄物和残体增加了水中的某些组分含量，生物呼吸作用影响着水中气体的含量。

影响天然水组成的间接因素主要有气候和水文特征。气候是一切水化学作用进行的背景，同时对地表水和地下水化学组成的地理分异起着总控制作用。

河流、湖泊、海水、地下水的水文动态补给及交替条件的不同，使水的组成有很大差异。例如，河水流速快，与河床接触时间短，河水中离子含量一般较低；地下水流速缓慢，与周围岩石接触时间长，水中溶解物的含量比地表水高，但气体组成相对减少；而湖水的化学组成比河水与地下水更为复杂。

(二) 天然水体的自净作用

各类天然水都有一定的自净能力。污染物质进入天然水体后，通过一系列物理、化学和生物因素的共同作用，使水中污染物质的浓度降低，这种现象称为水体的自净。但是在一定的时间和空间范围内，如果污染物质大量排入天然水体并超过了水体的自净能力，就会造成水体污染。

水体的自净作用按其净化机制可分为三类：

(1) 物理净化：天然水体的稀释、扩散、沉淀和挥发等作用，使污染物质的浓度降低。

(2) 化学净化：天然水体的氧化还原、酸碱反应、分解、凝聚等作用，使污染物质的存在形态发生变化和浓度降低。

(3) 生物净化：天然水体中的生物活动过程，使污染物质的浓度降低。特别重要的是水中微生物对有机物的氧化分解作用。

水体的自净作用按其发生场所可分为四类：

(1) 水中的自净作用：污染物质在天然水中的稀释、扩散、氧化、还原或生物化学分解等。

(2) 水与大气间的自净作用：天然水中某些有害气体的挥发释放和氧气溶入等。

(3) 水与底质间的自净作用：天然水中悬浮物质的沉淀和污染物被底质吸附等。

(4) 底质中的自净作用：底质中微生物的作用使底质中有机污染物发生分解等。

天然水体的自净作用包含着十分广泛的内容，它们同时存在、同时发生并相互影响。

二、水体污染

(一) 污水的水质指标

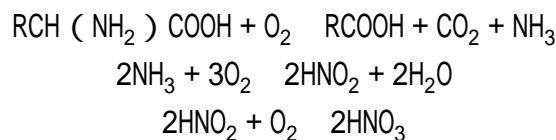
水质指标涉及到物理、化学、生物等各个领域。为了反映水体被污染的程度，通常用悬浮物(SS)、有机物(BOD、COD、TOC等)、酸碱度(pH)、细菌和有毒物质等指标来表示。

(1) 悬浮物是污水中呈固体状的不溶性物质，它是水体污染的基本指标之一。悬浮物降低水的透明度，降低生活和工业用水的质量，影响水生生物的生长。

(2) 废水中有机物浓度也是一个重要的水质指标。但由于有机物的组成比较复杂，要分别测定各种有机物的含量十分困难，通常采用生物化学需氧量、化学需氧量和总有机碳等三个指标来表示有机物的浓度。

生物化学需氧量，简称生化需氧量，用BOD表示(Biochemical Oxygen Demand)。指水中的有机污染物经微生物分解所需的氧气的量。BOD越高，表示水中需氧有机物质越多。

有机污染物的生物化学氧化作用分两个阶段进行：第一阶段，主要是有机物被转化为无机物 CO_2 和 NH_3 等；第二阶段，主要是 NH_3 被转化为 HNO_2 和 HNO_3 。生化反应如下：



废水的生化需氧量通常指第一阶段有机物生化作用所需的氧量。因为微生物活动与温度密切相关，因此测定BOD时一般以20℃作为标准温度。在此温度条件下，一般生活污水中的有机物，需要20天左右才能基本上完成第一阶段的氧化分解过程。这不利于实际测定工作。所以目前国内外都以5天作为测定BOD的标准时间，简称5日生化需氧量，用 BOD_5 表示。其理论根据是一般有机物的5日生化需氧量，约占第一阶段生化需氧量的70%，基本反映了水中有机污染物的实际情况。

化学需氧量，用COD表示(Chemical Oxygen Demand)。指化学氧化剂氧

化水中有机污染物时所需的氧量。COD 越高，表示有机物质越多。目前常用的氧化剂主要是重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$) 或高锰酸钾 ($KMnO_4$)。

BOD 在一般情况下能较确切地反映水污染情况，但它受到时间（时间长）和废水性质（毒性强）的限制；COD 的测定不受废水条件的限制，并能在 2—3 小时内完成，但它不能反映出微生物所能氧化的有机物量。因此，在研究有机物污染时，可根据实际情况而确定采用 BOD 还是 COD。

为了解决 BOD、COD 测定指标的不足，目前很多国家的科学工作者正在研究各种水质的总有机碳（Total Organic Carbon，简称 TOC）和总需氧量（Total Oxygen Demand，简称 TOD）与 BOD 和 COD 之间的关系，以实现自动快速测定目的。

（3）pH 值。污水的 pH 值对污染物的迁移转化、污水处理厂的污水处理、水中生物的生长繁殖等均有很大的影响，因此成为重要的污水指标之一。

（4）细菌。根据外部形态可将细菌分为：球菌，杆菌、螺旋菌。按摄取营养的方式可分为自养细菌，异养细菌。按温度因素可分为低温细菌、中温细菌、高温细菌。按氧因素可分为好氧细菌、厌氧细菌、兼性细菌。

污水中大部分细菌寄生在死亡机体上，这些细菌是无害的；另一部分细菌，如霍乱、伤寒、痢疾菌等则寄生在活的有机体上，对人、畜是有害的。衡量水体是否被细菌污染可用两种指标表示，一是 1 毫升水中细菌的总数；二是大肠菌的数量。大肠菌是在流行病学上评价潜在危险性的重要因素。许多国家规定，饮用水中不得检出大肠菌。

（5）有毒物质。各个国家都根据实际情况制定出地面水中有毒物质的最高容许浓度的标准。有毒物质包括无机有毒物（主要指重金属）和有机有毒物（主要指酚类化合物、农药、PCB 等）。

除以上 5 种表示水体污染的指标外，还有温度、颜色、放射性物质浓度等，也是反映水体污染的指标。

（二）水体污染源

水体污染源分为自然污染源和人为污染源两大类型。

自然污染源指自然界本身的地球化学异常释放有害物质或造成有害影响的场所。

人为污染源指由于人类活动产生的污染物对水体造成的污染。人为污染源包括工业污染源、生活污染源和农业污染源（表 6.7）。

表 6.7 水体主要污染源分类及所含主要污染物类型

特 点 污 染 物 类 型		污 染 源		人 为 污 染 源													
		自 然 污 染 源	城 市			工 业											
			能 源	污 水	径 流	能 源	食 品	纺 织 印 染	造 纸	制 革	炼 油	化 工	黑 色 冶 金	有 色 冶 金	机 械	火 电	核 电
1	致浊物																
2	致色物	.		.													
3	致嗅物	.		.							.	.
4	病原微生物	.		.													
5	需氧有机物	.															
6	植物营养素	.		.													
7	无机有害物	.		.													
8	无机有毒物	.															
9	重金属	.	.	.	.	.						
10	易分解有机有毒物			.													
11	难分解有机有毒物			.													
12	油	.		.							.				.
13	热	.								.	.						
14	放射性	.									.						
15	硫、氮氧化物										.						

· 存在危害， 严重然害

(资料来源：王华东等，水环境污染概论，1984.)

工业污染源：由于不同企业、不同产品、不同工艺、不同原料、不同管理方式，排放的废水水质、水量差异很大。工业废水是水体最重要的污染源。它具有量大、面广、成分复杂、毒性大，不易净化、难处理等特点(表 6.8)。

生活污染源：主要是生活中各种洗涤水，一般固体物质小于 1%，并多为无毒的无机盐类、需氧有机物类、病原微生物类及洗涤剂。生活污水的最大特点是含氮、磷、硫多，细菌多，用水量具有季节变化规律。

表 6.8 主要工业污染源所排放的主要污染物及废水水质特点

工业部门	主要工业污染源	主要污染物			废水水质、水量特点
		气态	液态	固态	
动力	火力发电	粉尘、SO ₂ 、CO、CO ₂	冷却热水,冲灰水中粉煤灰	灰渣	热,悬浮物高,水量很大
	核电站	放射性尘	冷却热水,放射性废水		热,放射性,水量大
冶金	黑色:选矿、烧结、炼焦、炼铁、炼钢、轧钢	粉尘、SO ₂ 、CO、CO ₂ 、H ₂ S、尘中含Fe、Mn、Ge等	酚、氰化物、硫化物、氨水、多环芳烃、吡啶、焦油、砷、铁粉、煤粉、酸性洗涤水、冷却热水	钢铁废渣	COD 较高,较毒,水量很大
	有色:选矿、烧结、冶炼、电解、精炼	粉尘、SO ₂ 、CO、NO _x 、F、尘中含CU、Pb、Zn、Hg、Cd、As等,放射性	氰化物、氟化物、B、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd、Ge等,酸性废水,冷却热水,放射性	有色金属废渣	含金属成分高,可能含放射性,废水偏酸性
化学	肥料、纤维、橡胶、塑料、制药、树脂、油漆、农药、洗涤剂、炸药、燃料、染料	F、SO ₂ 、H ₂ S、NH ₃ 、CO、NO _x 、Hg、苯等	酸、碱、盐、氰化物、酚、苯、醇、醛、酮、油、氯仿、氯苯、氯乙烯、有机氯农药、有机磷农药、洗涤剂、多氯联苯、Hg、Cd、As等,硝基化合物,胺基化合物等	无机废渣 有机废渣	BOD 高, COD 高、pH 变化大,含盐量高,毒性强、成分复杂
石油化工	炼油、蒸馏、裂解、催化、合成	石油气、H ₂ S、SO ₂ 、NO _x 、烯、炔、烷、苯、醛、酮、催化剂	油、酚、硫、氰化物	油渣	COD 高,成分复杂,毒性较强,水量大
纺织印染	棉、毛、丝纺、针织、印染	纤维、染料尘	染料、酸、碱、硫化物、纤维悬浮物、洗涤剂		五颜六色,毒性强,pH 变化大
制革	皮革、皮毛、人造革		硫酸、碱、盐、硫化物、甲酸、醛、有机物、As、Cr、S	纤维废渣	盐量高, BOD、COD 高,恶臭,水量大
造纸	纸浆,造纸		黑液、碱、木质素、悬浮物、硫化物、砷		黑液中木质素含量高,碱性强,恶臭,水
量大					
食品	肉、油、乳、水果、水产加工		病原微生物、有机物、油脂	屠宰废物	BOD 高,致病菌高,恶臭,水量大
机械制造	铸、锻、金属加工、热处理	铬酸气体、苯	酸、氰化物、镉、铬、镍、铜、锌、油类、	金属废屑	重金属含量高,酸性强,分散

(资料来源：王华东等，水环境污染概论，1984.) //形成灾害 149
 农业污染源：包括牲畜粪便、农药、化肥等。农村污水具有两个显著特点：一是有机质、植物营养素及病原微生物含量高；二是农药、化肥含量高。

(三) 水体中的污染物质

造成水体的水质、生物、底质质量恶化的各种物质称为“水体污染物”。随着工业发展和监测技术的提高，水体中的污染物质不断增加。其中化学性污染物是当代最重要的一大类，其种类多、数量大、毒性强，有一些是致癌物质，严重地影响着人体健康。

水体中的污染物，大体可以分为四大类，即无机无毒物，无机有毒物、有机无毒物、有机有毒物(表 6.9)。

无机无毒物主要指排入水体的酸、碱及一般无机盐类和氮、磷等植物营养物质。

水体中的酸主要来源于矿山排水及多种工业废水。水体中的碱主要来自碱法造纸、化学纤维、制碱、制革以及炼油等工业废水。酸、碱废水相互中和产生各种盐类，所以酸、碱污染必然伴随着无机盐的污染。

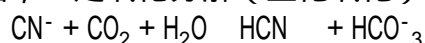
表 6.9 水体中污染物的种类

分 类	特 性	主要标志物
无 机 物	无 毒	酸、碱及一般无机盐 植物营养物(N、P等)
	有 毒	重金属(Hg、Cd、Pb、As等) 氰化物、砷化物、硫化物等
有 机 物	无 毒	需氧污染物(碳水化合物，脂肪、蛋白质等)
	有 毒	酚类化合物 有机氯农药(DDT、六六六、狄氏剂、艾氏剂等) 石油
其 它 物 质	放射 性	放射性元素或同位素(Sr、Cs、U、Pu等)
	病原 微生物	病菌、病毒、寄生虫
	致 癌 物 质	芳香烃、芳香胺 亚硝基化合物 有机氯化物

天然水体中的矿物质对酸、碱的同化作用而使酸、碱消失的过程，对保护天然水体和缓冲天然水的 pH 值变化有重要意义。

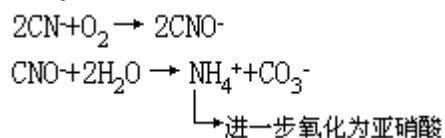
酸、碱污染破坏水体的自然缓冲作用，杀死或抑制细菌和微生物的生长，妨碍水体的自净作用，腐蚀管道和船舶。酸、碱污染不仅改变了水体的 pH 值，而且可增加水中的无机盐和硬度。

氰化物是剧毒物质。水体中的氰化物主要来自化学、电镀、煤气、炼焦、选矿等工业排放的含氰废水。天然水体对氰化物有较强的自净作用，其途径有两个：一是挥发排出，二是氧化分解(生化氧化)，其反应如下：



在一般水质和 pH 值条件下，这种净化机制所产生的净化量可占水体中氰

化物总自净量的 90%左右。



这种净化过程所造成的氰化物自净量只占水体中氰化物总自净量的 10%左右，但是在夏季（温度高，光照好），生化氧化过程的自净量可达到 30%左右。

含氰废水对鱼类和其它水生生物都有很大毒性。

水体中的酚类化合物主要来源于焦化厂、石油化工和塑料等工业排放的含酚废水。另外，粪便和含氮有机物的分解过程也产生少量酚类化合物。

天然水体中的酚化合物主要是靠生物化学氧化来分解。酚的生物化学氧化经过复杂的阶段，生成一系列中间产物。酚的分解速度决定于酚化合物的结构、起始浓度、微生物状况、水温及曝气条件等一系列因素。

酚污染可严重影响水产品的产量和质量，表现在贝类产量下降、海带腐烂、鱼肉有酚味，浓度高时引起水产品大量死亡。高浓度的含酚废水灌溉农田对农作物有毒害作用，能抑制光合作用和酶的活性，妨碍细胞功能，破坏植物生长素的形成，影响植物对水分的吸收，从而导致植物不能正常生长、产量下降。过量地摄入酚，人会慢性中毒，发生呕吐、腹泄、头痛头晕等症状。

放射性物质有天然来源和人工来源两类。自然界中的许多元素和同位素都具有天然放射性，一般来讲放射性剂量都很低，对生物没有什么危害。人工放射性物质主要来源于采矿、选矿和精炼厂的废水，以及核试验、核反应堆、核电站、核动力船舰的废水。这些放射性污染物主要是释放出 α 、 β 、 γ 等射线损害人体组织，并能在人体内蓄积造成长期危害，引起贫血、不育、死胎、恶性肿瘤等各种放射性病症，严重者造成死亡。

病原微生物主要来自生活污水和医院废水以及制革、屠宰业的废水。病原微生物又称“病原体”，“病原生物”，是能引起疾病的微生物和寄生虫的总称。病原微生物主要有三类：病菌（如痢疾杆菌）；病毒（如流行性感 冒病毒）；寄生虫（如疟原虫、蛔虫）。病原微生物是水体污染中的主要污染物之一，对人来讲，传染病的发病率和死亡率都很高。

致癌物是威胁人类健康的主要因素之一。污染物质中大多含有致癌物质。例如焦化厂炼焦废水中的焦油含有多种致癌芳香烃；印染厂印染废水中染料含有多种致癌的芳香胺；植物营养物中的亚硝基化合物；农药中的有机氯化合物；重金属中的铬、镍等都有强烈的致癌作用。

水体中的需氧污染物、植物营养物、油类污染物、重金属污染物等将在下节中详细介绍。农药污染将在第七章第四节中介绍。

第四节 主要污染物在水环境中的迁移转化

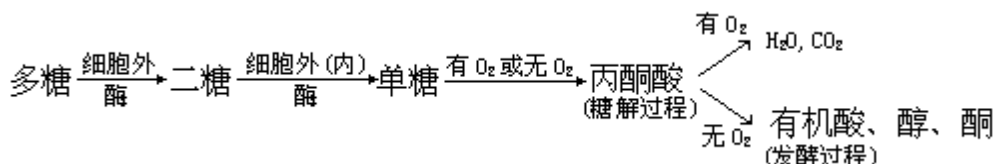
一、需氧污染物

需氧污染物主要指生活污水和某些工业废水中所含的碳水化合物、蛋白质、脂肪和木质素等有机化合物，在微生物作用下最终分解为简单的无机物质，即二氧化碳和水等。因这些有机物质在分解过程中需要消耗大量的氧气，故又被称为需氧污染物。虽然需氧有机污染物没有毒性，但若水中含量过多，势必造成水中溶解氧的减少，从而影响鱼类和其它水生生物的正常活动，需氧有机污染物是水体中普遍存在的污染物之一。

(一) 需氧有机物的生物降解作用

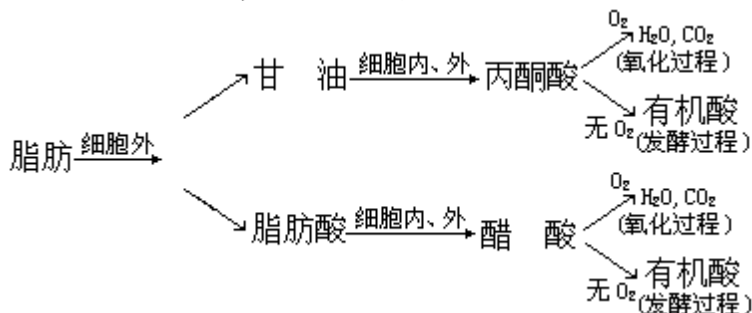
需氧有机污染物一般分为三大类，即碳水化合物、蛋白质和脂肪，其它有机化合物大多为它们的降解产物。上述三大类物质的生物降解作用有其共同特点：首先在细胞体外发生水解，复杂的化合物分解成较简单的化合物，然后再透入细胞内部进一步发生分解。分解产物有两方面的作用，一是被合成为细胞材料，二是变成能量释放，供细菌生长繁殖。

需氧有机污染物的生物降解过程比较复杂，根据各类化合物在有氧或无氧条件下进行反应的共性，可归纳出大致的降解步骤和最终产物。例如碳水化合物生物降解步骤和最终产物为：



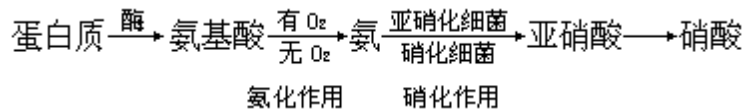
碳水化合物是 C、H、O 组成的不含氮的有机物，可分为多糖 [(C₆H₁₀O₅)_n，如淀粉]、二糖 [(C₁₂H₂₂O₁₁)，如乳糖]、单糖 [(C₆H₁₂O₆)，如葡萄糖]。在不同酶的参与下，淀粉首先在细胞外水解成为乳糖，然后在细胞内或细胞外再水解成为葡萄糖。葡萄糖经过糖解过程转变为丙酮酸。在有氧条件下，丙酮酸完全氧化为水和二氧化碳。在无氧条件下，丙酮酸不能完全氧化，最终产物是有机酸、醇、酮。对水环境影响较大的就是这部分产物。

脂肪和油类的生物降解步骤和最终产物为：



脂肪和油类的组成与碳水化合物相同，由 C、H、O 组成。脂肪的生物降解步骤和最终产物比碳水化合物更具多样性。脂肪首先在细胞外水解，生成甘油和相应的脂肪酸。然后上述物质再分别水解成为丙酮酸和醋酸。在有氧条件下，丙酮酸和醋酸完全氧化，生成水和二氧化碳，在无氧条件下，完成发酵过程，生成各种有机酸。

蛋白质的生物降解步骤和最终产物为：



蛋白质的组成与碳水化合物和脂肪油类不同，除含有 C、H、O 外，还含有 N。蛋白质是由各种氨基酸分子组成的复杂有机物，含有氨基和羧基，并由肽键连接起来。蛋白质的生物降解首先是在水解的作用下脱掉氨基和羧基，形成氨基酸。氨基酸进一步分解脱氨基，生成氨。通过硝化作用形成亚硝酸，最后进一步氧化为硝酸。如果在缺氧水体中硝化作用不能进行，就会在反硝化细菌作用下发生反硝化作用。

一般来讲，含氮有机物的降解比不含氮的有机物难，而且降解产物污染性强，同时与不含氮的有机物的降解产物发生作用，从而影响整个降解过程。

(二) 需氧有机污染物降解与溶解氧平衡

需氧有机污染物的降解过程制约着水体中溶解氧的变化过程，因此，研究此问题对进行水污染评价、水产资源危害及水体自净作用都有重要意义。50 年代，美国学者巴特希 (A.F. Bartsh) 和英格莱姆 (W.M. Ingram) 就编制出了关于被生活污水污染的河流中 BOD 和溶解氧 (DO) 相互关系的模式图 (图 6.7)，在世界范围内被广泛应用。

该图简明醒目，非常清楚地反映出在被污染河流中 BOD 与 DO 之间沿程变化的曲线和根据 BOD 与 DO 变化曲线划分出该河段的水功能区 (清洁水区、水质恶化区、恢复水区和清洁水区)。

在污染河流中耗氧作用和复氧作用影响着水中溶解氧的含量。耗氧作用指有机物分解和有机体呼吸时耗氧，使水中溶解氧降低；复氧作用 (也称再曝气作用) 指空气中的氧溶于水和水生植物的光合作用放出氧，使水中溶解氧增加。耗氧作用和复氧作用的综合决定着水中氧的实际含量。

图 6.7 某城镇生活污水流入河流后 DO 与 BOD 的变化

(流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ ，水温 25°C ，人口 4 万)

(资料来源：陈静生等，环境污染与保护简明原理，1981)

需氧有机物分解与溶解氧平衡可用以下几种数学模式来描述：

(1) 耗氧作用定律早在 1944 年，斯特里勒 (H.W. Streeter) 和费尔普斯 (E.B. Phelps) 就曾指出：“有机物质的生物化学氧化率与剩下的尚未被氧化的有机物的浓度成正比”，此即为 Phelps 定律，经微分，积分，推得：

$$\frac{L_t}{L} = 10^{-kt} \text{ 或 } L_t = L10^{-kt}$$

式中，L 为起始时的有机物浓度； L_t 为 t 时间后的有机物浓度； L_t/L 为剩余的有机物占起始时有机物的比率；K 为耗氧速度常数，以日计算，普通生活污水在 20°C 时，K 值约为 0.1；t 为天数。

当 $K = 0.1$ ， 20°C 时，水体中有机物的正常氧化速度见表 6.10。

从表 6.10 中可以看出，有机物的正常生化氧化速度是在第一天被氧化掉 20.6%。似后每延续一天就从剩余的有机物中再氧化掉 20.6%。尽管氧化速率没有变，但每一天的氧化量却逐渐减少。

从表 6.10 中还可以看出时间的重要意义。在第三天末有机物氧化分解了 50%，剩余的有机物也是 50%。因此可以认为，有机物生物分解的半衰期为三天。按此定律，又把剩余的有机物再分解 50%，即到第 6 天末，剩余的只

有 25%，依此类推，到 18 天末，有机物只剩下 1.6%。

表 6.10 有机物的在水体中的正常氧化速度 (20℃, k = 0.1 时)

日 数	占总有机物量的百分率		
	剩余量	当日氧化量	积累氧化量
0	100	20.6	0
1	79.4	16.4	20.6
2	63.0	13.0	37.0
3	50.0	10.2	50.0
4	39.8	8.2	60.2
5	31.6	6.6	68.4
6	25.0	5.0	75.0
7	20.0	4.2	80.0
8	15.8	3.3	84.2
9	12.5	2.5	87.5
10	10.0	2.1	90.0
11	7.9	1.6	92.1
12	6.3	1.3	93.7
13	5.0	1.0	95.0
14	4.0	0.8	96.0
15	3.2	0.7	96.8
16	2.5	0.5	97.5
17	2.0	0.4	98.0
18	1.6	0.3	98.4
19	1.3	0.1	98.7
20	1.0		99.0

(资料来源：陈静生等，环境污染与保护简明原理，1981。)

图 6.8 温度对 BOD₅ 分解过程的影响 [$k_t = k_{20} \times 1.047^{(t-20)}$]

(资料来源：同图 6.7。)

温度影响生物的活性，因此也就控制着有机物的分解速率。图 6.8 是不同温度对 BOD 分解过程的影响。

从图 6.8 中可以看出，曲线 A 是 20℃, k = 0.1 时，半衰期为 3 天，BOD₅ 是 68%。当温度为 29℃ 时，k = 0.15 (曲线 B)，半衰期为 2 天，BOD₅ 是 82%。当温度为 14℃ 时，k = 0.075 (曲线 C)，半衰期为 4 天，BOD₅ 是 58%，这是耗氧过程的正常情况。但事实上耗氧过程是一个非常复杂的生化现象，在自然界会受到其它因素的影响，出现偏离正常情况的现象。

(2) 复氧作用定律复氧作用受溶解定律和扩散定律的控制，即溶解速度与溶解氧低于饱和浓度的亏缺值成正比；扩散速度与河水中两点间的溶解氧浓度差成正比。根据这两条定律，PHELPS 确定了静水中的复氧作用公式：

$$D = 100 - \left[\left(1 - \frac{B}{100} \right) \times 81.06(e)^{-k} + \frac{e^{-9k}}{9} + \frac{e^{-25k}}{25} + \dots \right]$$

式中，D 为经复氧后的溶解氧含量（各深度的平均饱和百分数）；B 为复氧开始时的溶解氧含量；K 为常数，随 $\frac{2at}{4L^2}$ 而定。t 是复氧时间（小时），L 是水深（厘米），a 是扩散系数。

Phelps 确定， $at = 1.42 \times 1.1^{(t-20)}$ ，20 时，a 的平均值为 1.42。

（3）河流溶解氧下垂曲线方程当有机耗氧污染物排入河流后，根据耗氧作用和复氧作用的综合效应，沿河流纵断面形成一条溶解氧下垂曲线（图 6.9），它对评价河流污染及控制污染有十分重要的意义。

从图 6.9 中可以看出，在起始断面耗氧污染物排入河流后，耗氧速度最大，以后逐渐减少而趋向于零。复氧速度开始时为零，以后随氧亏值的增大而增大。水中溶解氧含量在某一时刻降至最低点，此点称为临界点。在临界点以后，复氧作用逐渐占优势，水中溶解氧含量开始上升。

图 6.9 溶解氧下垂曲线模式

1925 年，H.W.Streeler 和 E.B.Phelps 在研究美国 Ohio 河时，建立了 BOD-DO 模型，常被称作 S-P 模型。该溶解氧下垂曲线计算公式为：

$$D = \frac{K_1 L_a}{K_2 - K_1} (10^{-K_1 t} - 10^{-K_2 t}) + D_a \cdot 10^{-K_2 t}$$

式中，D 为任一点的氧亏值； L_a 为初始 BOD 值； D_a 为初始氧亏值； K_1 为耗氧系数（常用对数表示）； K_2 为复氧系数（常用对数表示）；t 为时间（日）。

$$K_1 = \frac{1}{\Delta t} \log \frac{L_a}{L_b}, \quad K_2 = K_1 \frac{\bar{L}}{D} - \frac{\Delta \bar{D}}{2.3 \Delta t \bar{D}}$$

式中， L_a 、 L_b 分别为 A、B 点的 BOD 值； \bar{L} 为 A、B 两点间 BOD 的平均值； \bar{D} 为 A、B 两点间的平均氧亏值；t 为流经时间；D 为 A 点至 B 点的氧亏变化。

临界时间
$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \lg \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \frac{D_a (K_2 - K_1)}{L_a K_1} \right]$$

临

临界氧亏
$$D_c = \frac{K_1}{K_2} L_a \times 10^{-K_1 t_c}$$

自净速度
$$f = \frac{K_2}{K_1}$$

表 6.11 列举了国内外某些河流的水质模型的 K_1 和 K_2 参数值，供参考。

S-P 模型建立后得到了广泛应用。60 年代后，出现了各种修正的 BOD-DO 模型。模型的内容和形式也越来越复杂并都有其不同的使用要求。一般地讲，模型越复杂越能较全面地反映河流实际情况。但这要增加许多建模参数，况且不同河流有不同的主要影响水质的因素。因此，片面强调选择参数多的复杂模型这种作法并不可取。对一条河段来说，选择模型的量和参数及模型复杂程度，应根据实际需要和目前所能获得的资料等几个方面进行综合考虑，作出简便、经济、适当的选择。

表 6.11 世界一些河流水质模型 K_1 和 K_2 参考值

K_1	K_2	国家	河流	研究人
0.3—0.4	0.05—1.02	美国	Willamette	Revette
0.5	6.5—8.5	美国	Bagmati	Cump
0.32	6.748	美国	SanAntonio	Texas
0.1—0.124	0.12—1.70	美国	Ohio	Streeter
0.42—0.98	1.25	英国	Tame	Garland
0.18	1	英国	Thames	Wood
0.19	1.5—2.5	波兰	Odra	Mamzack
0.1—2.0	0.01—10.0	西德	Necker	Hahn
0.2—2.33	0.3—0.6	日本		合田健
0.85	1.90	中国	黄河	徐云麟
0.1—0.13	0.3—0.52	中国	漓江	叶长明

(资料来源:侯宇光等,水环境保护,1989。)

二、植物营养物

在自然条件下,由于雨、雪对大气的淋洗和径流对地表物质淋溶与冲刷,总会使微量的N、P、K等植物营养物质汇入水体中。

天然水中过量的植物营养物质主要是由于人类活动造成的,它们来自农田施肥、农业生产的废弃物、城市生活污水和某些工业废水。

从农作物生长的角度看,植物营养物质是宝贵的肥料。但过多的植物营养物进入水体,将造成水质恶化,影响渔业发展,危害人体健康。

(一) 水体富营养化概述

富营养化是指湖泊等水体接纳过量的氮、磷等营养物质,使藻类及其它水生生物异常繁殖,引起水体透明度和溶解氧的变化,造成水质恶化,加速湖泊老化,导致湖泊生态系统和水功能的破坏。

实际上,富营养化是湖泊在自然演变过程中的一种自然现象。在湖沼学的意义上,湖泊有其发生、发展及消亡的过程,这就是地理学范畴内所谓的湖泊富营养化。具体地说,随着时间的推移,湖泊中的氮、磷等营养物质逐渐累积,由营养物质少的贫营养湖向营养物质多的富营养湖演变,最后发展成为沼泽和干地。不过,在自然条件下,自然物质的正常循环过程中,这种湖泊演变的进程非常缓慢,通常是以地质年代来计算。

然而,在人类活动影响下,过量营养物排入水体,必将大大地加速湖泊等水体富营养化的进程。表6.12为贫、富营养湖的特点。

所有关于富营养化的分类,都是把本来应属于连续的富营养化程度分为若干个等级。富营养化程度通常分为三类,即贫营养、中等营养和富营养。

不同作者对富营养化的研究,提出了相似但又不完全相同的划分标准(见表6.13,表6.14,表6.15和表6.16)。

水体中氮、磷含量的多少与水体富营养化程度密切相关。一般地讲,当总磷为 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 、无机氮为 $300\text{mg}/\text{m}^3$ 时就可认为水体处于富营养化状态。应该注意的是,水体富营养化程度的各种判断指标,都是用统计方法得出的一般规律,应用时必须结合实际情况加以判断。

(二) 氮、磷化合物在水体中的转化

水体中氮、磷营养物质过多，是水体发生富营养化的直接原因。因此，研究水体中氮、磷的平衡、分布和循环，生物吸收和沉淀，底质中氮、磷形态，有机物分解和释放等规律，对水体的富营养化过程和防治都有重要意义。

水体富营养化的关键不仅在于水体中营养物的浓度，更重要的是连续不断流入水体中的营养物氮、磷的负荷量。以湖泊为例，湖泊氮、磷负荷量的计算，按照物质平衡原则，在某一时刻

表 6.12 贫营养湖和富营养湖的特点（吉村，1937）

		调节型湖泊	
		贫营养湖	富营养湖
湖盆形态		深、湖陆棚狭窄，深水层容量比表层大	浅、湖陆棚狭窄，深水层容量比表层小
分 布		山间湖泊 北海道平地的深湖	除北海道泥煤地外全国平地的浅湖
水的物理性质	水 色	蓝色或绿色	绿—黄色
	透明度	5m 以上	5m 以下
	其 它		
水 质	pH	接近中性	中性—弱碱性，夏季表层有时呈强碱性
	溶解氧	全层接近饱和	表水层饱和或过饱和底水层少
	其 它	$P < 0.20\text{ppm}$ $N < 0.02\text{ppm}$	$N > 0.20\text{ppm}$ $P > 0.03\text{ppm}$
生 物	生产力	小, $200\text{mgC}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 以下	大 $200\text{mgC}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 以上
	叶绿素 a	$0.3 - 2.5\text{mg}/\text{m}^3$ $10 - 50\text{mg}/\text{m}^2$	$5 - 140\text{mg}/\text{m}^3$ $20 - 140\text{mg}/\text{m}^2$
	浮游植物	贫弱，以硅藻为主	丰富，夏季蓝藻可引起水花
	浮游动物	贫弱，以贝壳类为主	丰富，轮虫类增加
	底栖生物	种类和数量都很丰富 摇蚊幼虫等	种类减少，摇蚊幼虫、寡毛目增加
	鱼 类	鱒鱼，石斑鱼	鲤鱼、鲫鱼、鳊鱼、若鹭鱼
	沿岸植物	少，蔓延到深部	多，只在浅处生长
底 质		有机物少，硅藻骸泥	骸泥—腐泥

（资料来源：全浩等译，水环境指标，1989。）期内，输入湖泊的氮、磷总量与输出湖泊的氮、磷总量之差，就是湖泊内氮、磷的积累量。

氮、磷负荷量有两种表示方法：单位体积负荷量 ($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{a}$) 或单位面积负荷量 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。

进入湖泊的氮、磷物质加入生态系统的物质循环，构成水生生物个体和群落，并经由自养生物-异养生物和微生物所组成的营养级依次转化迁移。氮在生态系统中具有气、液、固三相循环，被称为“完全循环”，而磷只存在液、固相形式的循环，被称为“底质循环”（图 6.10）。湖泊底质和水体之间处在物质交换过程之中，而且底质中磷的释放是湖泊水体中磷的重要来源之一。图 6.11 是某些国家部分湖泊底质磷的释放速度情况。从图 6.11 可以看出：不同湖泊底质磷的释放速度差异很大；对同一个湖泊而言，其底质磷

的释放速度也随季节的不同而变化。

表 6.13 瑞典湖泊氮、磷含量与富营养化程度关系

富营养程度	总磷 (mg/m ³)	无机氮 (mg/m ³)
贫—中	8.0 (7.3 — 8.7)	312 (228 — 392)
中—富	17.6 (11.0 — 26.6)	470 (342 — 618)
富	84.4 (45.8 — 144)	1170 (420 — 2370)

表 6.14 水体富营养化程度划分 (托马斯)

富营养程度	总磷 (mg/m ³)	无机氮 (mg/m ³)
极贫	< 5	< 200
贫—中	5 — 10	200 — 400
中	10 — 30	300 — 650
中—富	30 — 100	500 — 1500
富	> 100	> 1500

表 6.15 水体富营养化程度划分 (坂本)

富营养程度	总磷 (mg/m ³)	总氮 (mgm ³)
贫营养	2 — 20	20 — 200
中营养	10 — 30	100 — 700
富营养	10 — 90	500 — 1300
流动水	2 — 230	50 — 1100

表 6.16 日本水体总氮及总磷允许负荷量
(g/m² · a)

平均水深 (米)	允许负荷		危险负荷	
	N	P	N	P
5	1.0	0.07	2.0	0.13
10	1.5	0.10	3.0	0.20
50	4.0	0.25	8.0	0.50
100	6.0	0.40	12.0	0.80
150	7.5	0.50	15.0	1.00
200	9.0	0.60	18.0	1.20

(资料来源：陈静生等，环境污染与保护简明原理，1981。) 湖泊底质中磷分为有机态和无机态两大类。无机态中按照与其结合的物质又分为钙磷、铝磷、铁磷和难溶磷四种形态。底质中磷的释放与其形态密切相关。许多学者研究试验结果表明：底质中向水体释放的磷主要来自铁磷。例如日本霞浦湖底质，在好气条件下，总磷量从 1.14mg/g 降到 0.96mg/g，减少了 0.18mg/g。而在磷的各形态中，铝磷、钙磷量几乎没有变化，但铁磷却从

0.30mg/g, 降至 0.13mg/g, 减少了 0.17mg/g。两者相比, 明显地看出, 总磷量减少的数量, 基本上是由铁磷减少的结果。

影响底质中磷释放的因素很多, 其中主要有水中溶解氧、pH、Eh、温度、混合强度、生物扰动等方面。另外, 水中硝酸盐浓度对底质磷释放有明显作用。丹麦的湖泊调查研究表明, 当湖中硝酸盐的浓度低于 0.5gN/m³时, 沉积物中磷能释放到水体中; 当超过 0.5gN/m³时, 沉积物就不能释放出磷。

(三) 湖泊富营养化预测与评价有关湖泊富营养化预测与评价的模型很多, 但应用比较普遍的是 Vollen-

图 6.10 富营养化的磷、氮生物化学循环

(资料来源: 金相灿: 中国湖泊水库 weider-Dillon 模式。)

Vollenweider 模型的基本原理是物质平衡方程。其前提条件是湖泊为完全混合型, 模型假定湖泊单位时间内营养物质含量的变化, 就是每年输入湖泊中的营养物质质量与沉积量和输出量之差, 其表达式为

$$\frac{dm_w}{dt} = J - sm_w - \frac{Q}{V} m_w$$

式中, m_w 为湖中营养物含量 (mg/m³); J 为每年输入湖中的营养物质质量 (mg/m³ · a); s 为沉积速率系数 (a⁻¹); V 为湖泊容积 (m³); Q 为输出速率 (m³/h); t 为时间 (a)。

此模型由 Dillon 进一步发展、完善、推导出稳态模型, 如表示磷浓度时, 它的表达式为:

$$[P] = \frac{L}{s + 1/t_w}$$

式中, $[P]$ 为湖水中总磷浓度 (g/m³); L 为湖泊磷负荷 (g/m² · a); L 为湖泊平均深度; s 为沉积速率系数 (a⁻¹); t_w 为水力滞留时间 (a)

我国的水体富营养化研究起步较晚, 但进展较快, 涉及内容广泛, 取得了许多科研成果。(可参阅《中国湖泊富营养化调查研究》(中国环境科学出版社, 1990)。)

图 6.11 湖泊河湾底质中磷释放速度

(资料来源: 同图 6.10)

三、油类物质

(一) 油类物质的污染概况

随着石油事业的发展, 油类物质对水体的污染愈来愈严重。而在各类水体中海洋受到的油污染最突出。

目前, 在世界各地的港口、海湾和沿岸, 在油船和其它船舶的主要航线附近以及海底油田周围, 都可以经常看到油膜和油块。

根据 UNEP 报告, 每年有 200—2000 万吨的油由海源和陆源排入海洋。而 OECD 的估计是每年大约 350 万吨。科学界比较一致的看法是每年 300—600 万吨。根据 OECD 的报告, 海洋油污染中海源和陆源各占 50%左右。但许多科学家持反对意见, 认为海洋石油污染主要来自陆源

从表 6.17 中可以看出, 海源油污染主要产生于运输过程中, 由此每年排入海洋的油大约为 150 万吨。其中船舶正常带入 (洗仓水, 压仓水等各种来

源) 海洋的油约为 110 万吨; 事故性(触礁、碰撞、搁浅、失火等) 带入海洋的油约为 40 万吨。有人认为此项估计数据偏低。

陆源油污染主要来自工业废水, 每年由此项带入海洋的油约 140 万吨。其次是大 气中飘浮石油烃类的降落, 每年进入海洋的油类为 30 万吨。

表 6.18 为世界海洋水体中石油和石油产品的含量。

表 6.17 海洋的油污染源

来 源	10 ⁵ ta
海源(52%)	
海洋运输	1.49
非事故性	1.08
事故性	0.41
生产平台	0.05
自然渗漏, 侵蚀	0.30
陆源(48%)	
城市, 工业废水, 径流	1.40
大 气	0.30
总 计	3.54

(资料来源: 刘双进等, 世界自然保护, 1990。)

表 6.18 世界海洋真光层水体石油和石油产品的含量

海 域	浓度($\mu\text{g/L}$)		资料来源
	最大值	平均值	
北大西洋	50—100	—	Simonovetal.(1974)
	2—13	—	BiennReview(1970)
西北大西洋	2—6	—	Levy(1972)
	0.4—0.8	—	Gordonetal.(1974)
薄膜油	—	20.4	Gordonetal.(1974)
东北大西洋	0—5.3	—	ZsoInay(1974)
溶解油	0.2—11.8	1.7—2.8	Whittleetal.(1975)
薄膜油	4.3—145.4	31.3—17.0	Whittleetal.(1975)
中大西洋	10—95	—	Barbieretal.(1973)
挪威海	—	1400*	Petrovetal.(1975)
北海	—	1950*	Petrovetal.(1975)
太平洋	100—150	—	Simonovetal.(1975)
夏威夷群岛	700	—	Nemirovskayaetal.(1975)
印度洋(亚热带海域)	900	—	Nemirovskayaetal.(1975)
马尾藻海	13—559	73—155	Barbieretal.(1973)
波罗的海	50—230	—	Carlberg(1974)
波罗的海	100—1000	—	Simonovetal.(1972)
英吉利海峡	—	2330*	Petrovetal.(1975)
	—	137	Barbieretal.(1973)
	—	75	Barbieretal.(1973)
地中海	300—1700	—	Nemirovskayaetal.(1975)
波罗的海	210—15560	—	Dubravski(1974)
哥斯林顿凹地	—	500	ZsoInay(1971)

注：*表面膜的油产品的浓度($\mu\text{g/m}^2$)。

(资料来源：吴喻端等译，海洋污染和海洋生物资源，1991。)

(二) 石油在水体中的迁移转化

石油有“工业的血液”之称。石油中90%是各种烃的复杂混合物，它的基本组成元素为碳、氢、硫、氧和氮。大部分石油含84%—86%的碳，12%—14%的氢，1%—3%的硫、氧和氮。

根据石油中各种烃的沸点不同，按一定温度范围分成不同的馏分，各馏分的馏出温度、成分及名称见表6.19

表6.19 各馏分的馏出温度、成分及名称

馏出温度()	成分	产品
40 以下	$C_1 - C_4$	石油气
40 — 60	$C_5 - C_6$	石油醚
60 — 205	$C_7 - C_9$	汽 油
205 — 300	$C_9 - C_{16}$	煤 油
300 — 360	$C_{16} - C_{18}$	柴 油
360 以上	$C_{16} - C_{20}$	润滑油
360 以上	$C_{16} - C_{22}$	凡士林
360 以上	$C_{20} - C_{24}$	石 腊
残 渣		沥青、石油、焦炭

石油类物质进入水体后发生一系列复杂的迁移转化过程，主要包括扩展、挥发、溶解、乳化、光化学氧化、微生物降解、生物吸收和沉积等（图 6.12）。

扩展过程：油在海洋中的扩展形态由其排放途径决定。船舶正常行驶时需要排放废油，这属于流动点源的连续扩展；油从污染源（搁浅、触礁的船或陆地污染源）缓慢流出，这属于点源连续扩展；船舶或贮油容器损坏时，油立刻全部流出来，这属于点源瞬时扩展。扩展过程包括重力惯性扩展、重力粘滞扩展、表面张力扩展和停止扩展四个阶段。重力惯性扩展在 1 小时内就可完成；重力粘滞扩展大约需要 10 小时；而表面张力扩展要持续 100 小时（图 13）。

扩展作用与油类的性质有关，同时受到水文和气象等因素的影响。扩展作用的结果，一方面扩大了污染范围，另一方面使油-气、油-水接触面积增大，使更多的油通过挥发、溶解、乳化作用进入大气或水体中，从而加强了油类的降解过程。挥发过程：挥发的速度取决于石油中各种烃的组分、起始浓度、面积大小和厚度以及气象状况等。挥发模拟试验结果表明：石油中低于 C_{15} 的所有烃类（例如石油醚、汽油、煤油等），在水体表面很快全部

6.12 石油类物质在水体中迁移过程

（资料来源：同图 6.7。）

挥发掉； $C_{15} - C_{25}$ 的烃类（例如柴油、润滑油、凡士林等），在水中挥发较少；大于 C_{25} 的烃类，在水中极少挥发。挥发作用是水体中油类污染物质自然消失的途径之一，它可去除海洋表面约 50% 的烃类。

溶解过程：与挥发过程相似，溶解过程决定于烃类中碳的数目多少。石油在水中的溶解度实验表明，在蒸馏水中的一般规律是：烃类中每增加 2 个碳、溶解度下降 10 倍。在海水中也服从此规律，但其溶解度比在蒸馏水中低 12%—30%。溶解过程虽然可以减少水体表面的油膜，但却加重了水体的污染。

乳化过程：指油-水通过机械振动（海流、潮汐、风浪等），形成微粒互相分散在对方介质中，共同组成一个相对稳定的分散体系。乳化过程包括水包油和油包水两种乳化作用。顾名思义，水包油乳化是把油膜冲击成很小的涓滴分布水中。而油包水乳化是含沥青较多的原油将水吸收形成一种褐色的

粘滞的半固体物质。乳化过程可以进一步促进生物对油类的降解作用。

光化学氧化过程：主要指石油中的烃类在阳光（特别是紫外光）照射下，迅速发生光化学反应，先离解生成自由基，接着转变为过氧化物，然后再转变为醇等物质。该过程有利于消除油膜，减少海洋水面油污染。

微生物降解过程：与需氧有机物相比，石油的生物降解较困难，但比化学氧化作用快 10 倍。微生物降解石油的主要过程有：烷烃的降解，最终产物为二氧化碳和水；烯烃的降解，最终产物为脂肪酸；芳烃的降解，最终产物为琥珀酸或丙酮酸和 CH_3CHO ；环己烷的降解，最终产物为己二酸。石油物质的降解速度受油的种类、微生物群落、环境条件的控制。同时，水体中的溶解氧含量对其降解也有很大影响。

生物吸收过程：浮游生物和藻类可直接从海水中吸收溶解的石油烃类，而海洋动物则通过吞食、呼吸、饮水等途径将石油颗粒带入体内或被直接吸附于动物体表。生物吸收石油的数量与水中石油的浓度有关，而进入体内各组织的浓度还与脂肪含量密切相关。石油烃在动物体内的停留时间取决于石油烃的性质。

沉积过程：沉积过程包括两个方面，一是石油烃中较轻的组分被挥发、溶解，较重的组分便被进一步氧化成致密颗粒而沉降到水底。二是以分散状态存在于水体中的石油，也可能被无机悬浮物吸附而沉积。这种吸附作用与物质的粒径有关，同时也受盐度和温度的影响，即随盐度增加而增加，随温度升高而降低。沉积过程可以减轻水中的石油污染，沉入水底的油类物质，可能被进一步降解，但也可在水流和波浪作用下重新悬浮于水面，造成二次污染。

图 6.13 油扩展的各个阶段持续时间

（资料资源：吴锦等译，环境工学，1980。）

四、重金属

重金属是地球上最为普遍，具有潜在生态危害的一类污染物。与其它污染物相比，重金属不但不能被微生物分解，反而能够富集于生物体内，并可以将某些重金属转化为毒性更强的金属有机化合物。

（一）重金属的概念及特征

重金属的定义目前还没有严格统一的提法。但一般认为金属的比重大于 5（或大于 4）者为重金属。

重金属元素很多，在环境污染研究中所说的重金属主要是指 Hg、Cd、Pb、Cr 以及类金属 As 等生物毒性显著的元素。也包括具有一定毒性的一般重金属，如 Zn、Cu、Co、Ni、Sn 等，目前，最引人注意的是 Hg、Cd、Pb、As、Cr 等。

重金属在环境中的行为和影响主要有以下特征：

（1）重金属是构成地壳的元素，在自然界具有非常广泛的分布，它遍布于土壤、大气、水体和生物体中。

（2）重金属作为有色金属，在人类的生产和生活中有着广泛的应用，各种各样的重金属污染源由此而存在于环境中。

（3）重金属大多属于过渡性元素，在自然环境中具有不同的价态、活性和毒性效应。通过水解反应，重金属易生成沉淀物。重金属还可以与无机、有机配位体反应，生成络合物和螯合物。

(4) 重金属对生物体和人体的危害特点在于：第一，毒性效应；第二，生物不能降解，却能将某些重金属转化为毒性更强的金属有机化合物；第三，食物链的生物富集放大作用；第四，通过多种途径进入人体，并积蓄在某些器官中，造成慢性中毒。

(二) 重金属在水体中的迁移转化

重金属迁移指重金属在自然环境中空间位置的移动和存在形态的转化，以及由此引起的富集与分散问题。

重金属在水环境中的迁移，按照物质运动的形式，可分为机械迁移、物理化学迁移和生物迁移三种基本类型。

机械迁移是指重金属离子以溶解态或颗粒态的形式被水流机械搬运。迁移过程服从水力学原理。

物理化学迁移是指重金属以简单离子、络离子或可溶性分子，在环境中通过一系列物理化学作用（水解、氧化、还原、沉淀、溶解、络合、螯合、吸附作用等）所实现的迁移与转化过程。这是重金属在水环境中的最重要迁移转化形式。这种迁移转化的结果决定了重金属在水环境中的存在形式、富集状况和潜在生态危害程度。

生物迁移是指重金属通过生物体的新陈代谢、生长、死亡等过程所进行的迁移。这种迁移过程比较复杂，它既是物理化学问题，也服从生物学规律。所有重金属都能通过生物体迁移，并由此使重金属在某些有机体中富集起来，经食物链的放大作用，构成对人体危害。

重金属在水环境中的物理化学迁移包括下述几种作用：

沉淀作用：重金属在水中可经过水解反应生成氢氧化物，也可以同相应的阴离子生成硫化物或碳酸盐。这些化合物的溶度积都很小，容易生成沉淀物。沉淀作用的结果，使重金属污染物在水体中的扩散速度和范围受到限制，从水质自净方面看这是有利的，但大量重金属沉积于排污口附近的底泥中，当环境条件发生变化时有可能重新释放出来，成为二次污染源。

吸附作用：天然水体中的悬浮物和底泥中含有丰富的无机胶体和有机胶体。由于胶体有巨大的比表面、表面能和带大量的电荷，因此能够强烈地吸附各种分子和离子。无机胶体主要包括各种粘土矿物和各种水合金属氧化物，其吸附作用主要分为表面吸附、离子交换吸附和专属吸附。有机胶体主要是腐殖质。胶体的吸附作用对重金属离子在水环境中的迁移有重大影响，是使许多重金属从不饱和的溶液中转入固相的最主要途径。

络合作用：天然水体中存在着许多天然和人工合成的无机与有机配位体，它们能与重金属离子形成稳定度不同的络合物和螯合物。无机配位体主要有 Cl^- 、 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 F^- 、 S^{2-} 等。有机配位体是腐殖质。腐殖质能起络合作用的是各种含氧官能团，如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{C}=\text{O}$ 、 $-\text{NH}_2$ 等。各种无机、有机配位体与重金属生成的络合物和螯合物可使重金属在水中的溶解度增大，导致沉积物中重金属的重新释放。重金属的次生污染在很大程度上与此有关。

氧化还原作用：氧化还原作用在天然水体中有较重要的地位。由于氧化还原作用的结果，使得重金属在不同条件下的水体中以不同的价态存在，而价态不同，其活性与毒性也不同。

复习思考题

- 1.为什么说地球上的水是一种既丰富又紧缺的资源？
- 2.为了解决水资源的不足，各国正在采取和试验哪些方法？
- 3.大型水库常有哪些不良的生态学效应？
- 4.我国三门峡水库建成后产生了哪些问题？
- 5.埃及阿斯旺高坝有哪些效益和哪些问题？
- 6.地下水过度开采可能造成哪些环境问题？
- 7.小河流渠道化常会产生哪些环境问题？
- 8.我国湖沼面积急剧缩减是如何造成的？
- 9.天然水的组成及影响天然水成分的因素是哪些？
- 10.天然水体的自净作用及分类。
- 11.水体污染定义及污染水质指标。
- 12.水体污染源及特点。
- 13.水体中的污染及特点。
- 14.需氧污染物在水环境中的迁移转化。
- 15.植物营养物在水环境中的迁移转化。
- 16.石油在水环境中的迁移转化。
- 17.重金属在水环境中的迁移转化。

第七章 土地与粮食

土壤是地球陆地上能生长植物并能结果的疏松表层。它是陆地生物生长的基质，离开土壤，多数陆地生物无法生存，农业生产也无法进行。另一方面，土壤又是生命活动的产物，没有生物就没有土壤，有些土壤还是人类劳动的产物。

土壤和土地是两个既有联系又有区别的概念。土地是具有一定面积并且边界多少确定的地理单位，是一个或大或小的地域。1972年在荷兰瓦格宁根召开关于土地评价的专家会议上，对土地下了科学的定义，并被联合国粮食与农业组织所接受。该组织1976年出版的《土地评价纲要》一书引述了如下的定义：“土地是地球表面的区域，其特性包含上下与该区域垂直的生物圈的所有相当稳定或周期地循环的属性，包括大气、土壤、下面的地质、水文和动植物群的属性以及过去和现在人类活动的后果，这些属性对人类现在和将来的土地利用有明显的影响。”可见，土壤是土地的组成部分，但不是土地的全部。例如，人们可以用工具或机械把土壤全部清除，但是土地却依然存在。

自古以来，人类就认识到土地是一切自然资源中最基本的资源。农学、林学、经济学、工程科学、环境科学和地理科学等都从各自的角度对土地进行研究。农学家和林学家把土地当作农业和林业生产的基地，经济学家把土地看作最基本的生产资料 and 商品，建筑师把它看作地基，环境学家把它看作被污染的对象和废弃物的消纳场所，而地理学家则把它看作包括各种自然要素的地理综合体。

土壤分布在陆地表层，除了江河湖海等水体及两极冰盖与高山冰川覆盖的地区以外，几乎都有土壤的存在。即使在岩石出露和流沙被覆的地方，也可能有原始土壤和风沙土的发育。因此，土壤就在地球表面上形成一个断续地分布的圈层，覆盖于岩石圈之上，其厚度由几厘米至几米不等，在炎热湿润的亚热带和热带地区，有些土壤的厚度可能更大。这就是土壤圈存在的范围。

本章在讨论土地问题时包括了土地与土壤两方面的内容，既讨论土地问题，也讨论土壤问题。

第一节 世界土地资源概况

所谓资源，是针对人类对事物利用的可能性而言的，现在有用或潜在有用的事物才被看作资源。因此，土地资源是指在一定时期内、在一定技术条件下能够被人类利用的土地。它的范畴随着历史、社会、经济与技术等条件的变化而变化，例如，某处的沙漠在一定的历史与经济条件下不具有资源的价值。但是，如果该处发现了有经济价值的矿产（如石油），则必须把它列入土地资源和矿产资源的范畴之内。当然，土地作为一种资源，首先与农业有关。本章也是主要从农业生产的角度出发，同时也考虑到土地与城市化的关系，以及与土地有关的一些环境问题。

土地有两个主要属性；面积和质量。下面从全世界的角度来考察土地的这两大属性。

首先，关于土地的面积。众所周知，在地球 51000 万平方公里的总面积中，大陆和岛屿面积只有 14940 万平方公里，占地球总面积的 29.2%，其中还包括南极大陆和其他大陆上高山冰川所覆盖的土地。如果减去这部分长年被冰雪覆盖的土地，则地球上无冰雪的陆地面积仅为 13300 万平方公里。

对于全世界的居民来说，这似乎是一个颇为巨大的数字。1900 年世界人口约为 15 亿，平均每人占有的陆地面积约为 10 公顷（150 亩），1987 年世界人口达到 50 亿，人均占有陆地面积仍有 3 公顷（45 亩）。这个数字从任何意义上来说都不能算小。

但是，如果考虑到土地的质量属性，则这些数字必须打一个大大的折扣。所谓土地的质量，如果从农业利用的角度来看，它包括土地的地理分布、土层厚薄、肥力高低、水源远近、潜水埋深和地势高低、坡度大小等，这些性质对农业生产都有着不同的影响。如果土地用于工矿和城镇建设等用途，则还要考虑地基的稳定性、承压性能和受地质地貌灾害（如火山、地震、滑坡等）、气象灾害（如暴雨山洪等）威胁的程度等。在土地质量诸要素中，还有一个很重要的因素，就是土地的通达性（accessibility），它取决于土地的地理分布即离居民点的远近，以及道路、交通等情况，这些都影响劳力与机械通达该土地所消耗的时间和能量。

如果考虑到土地质量的上述因素，则陆地面积中大约有 20% 处于极地和各大陆的高寒地区，另有 20% 属于干旱区，20% 为山地的陡坡，还有 10% 岩石裸露，缺乏土壤和植被。以上四项，共占陆地面积的 70%，在土地利用上存在着不同的限制性因素，地理学家和生态学家称之为“限制性环境”。其余的 30% 限制性较小，适于人类居住，称为“适居地”，英语为 *ecumene*，源自希腊语 *oikoumene*，意为可居住的土地，包括可耕地和住宅、工矿、交通、文教与军事用地等。按上述人均 3 公顷的 30% 计算，人均占有量为 0.9 公顷（约合 14.5 亩）。在全部适居地中，可耕地约占 60%—70%，折合人均 0.54—0.63 公顷（约 8—9.5 亩）。

据世界粮食与农业组织和美国农业部 70 年代所提供的数据，全世界可耕地总面积为 29.5 亿公顷，其中的一半，即最肥沃、通达性最好、最容易开垦的一半已被耕种，面积为 15.4 亿公顷。其余一半尚有开垦的潜力，但由于土壤肥力、土地的通达性等质量因素的限制，必须采用灌溉、施肥和其他土壤改良措施，开垦的成本将大大增加。

表 7.1 世界可耕地的生产潜力

土壤类型	主要性状	生产潜力	面积 (10 ⁶ 公顷)	所占%
氧化土	热带高度风化与淋溶的土壤	低	1052	35.6
软土	中纬度草原富含养分的暗色土壤	高	486	16.4
旱成土	荒漠与干旱区富含养分的浅色土壤	有水时中至高	445	15.1
林溶土与灰土	中纬与高纬森林地区高度风化的土壤	低至中	324	10.96
始成土	主要为泛滥平原的冲积土	中至高	324	10.96
其他			324	10.96
合计			2954	100

(资料来源：联合国粮农组织与美国农业部，引自 N.J.Greenwood，1979。)

世界各地可耕地的生产潜力差异颇大，表 7.1 按美国农业部的土壤分类对世界可耕地的生产潜力作了估算。从表中可以看出，肥力较高的软土只占可耕地面积的 1/6，而肥力较低的热带氧化土则占 1/3 以上，其余的 1/3 强，包括相当多的肥力低至中的土壤。因此，就其农业生产潜力而言，世界可耕地的质量总的来看是不高的。

在人类的历史经验中，土地资源曾经似乎是无穷无尽的。从原始农业的刀耕火种（遗憾的是目前全世界范围内仍有 2 亿多人采用这种破坏性的生产方式），直至现代化农业的集约经营，人类尚未面临过全球性的土地匮乏。当然，由于人口分布不均匀，人口稠密地区确已存在着地少人多的问题。本世纪以来由于人口的急剧增长，以及非农业用地的不断增加，原有耕地反被蚕食，使得全人类面临土地不足的问题已经为期不远。图 7.1 描绘了世界人口的增长与对土地资源的供求，该图主要根据罗马俱乐部的资料略经修改补充而成。这个图式是根据下列四个前提条件制成的：

(1) 世界可耕地面积为 29.5 亿公顷，即图中部的水平线，这是联合国粮农组织与美国农业部联合提供的数字。在可以预见的未来，该数字不会有戏剧性的变化。

(2) 每人平均所需的耕地面积暂假定为 0.4 公顷，这是按现有农业生产水平推算的。美国目前的人均耕地面积为 0.9 公顷，中国为 0.1 公顷，因此，0.4 公顷是一个折衷的数字，比较可信。

(3) 部分可耕地还必须用于非农业用途，如修建房舍、道路、动力线、废置场等。据美国 1950—1960 年在其西部地区 44 个县的航测资料，人均需要这种非农业用地面积为 0.008—0.174 公顷，其中数约为 0.08 公顷。另据联合国粮农组织研究，把非农业用地的标准面积定为每人 0.05 公顷。上述二个数字相差不远，可供参考。

(4) 1970 年以后，世界人口增长率逐渐由 2.1% 降至 1.7%，人口倍增的时间约为 40 年。从目前的人口发展趋势推算，本世纪末世界人口突破 60 亿已成定局，估计在 61—63 亿之间。

图 7.1 世界人口增长与对土地资源的供求（部分资料引自 D.L.Meadows《增长的极限》，MIT 版，1972，中译本，1984）

上述前提条件基本上是符合客观实际的，据此可以作如下的分析：

(1) 图中部的水平线表示世界可耕地的总面积。该曲线表明：直至本世纪之初，世界可耕地面积基本保持不变。但由于本世纪中世界人口的急剧增加，该水平线从 1900 年以后缓缓下降，而且下降的速度愈来愈快。这表明本世纪中非农业用地急剧增加，导致可耕地面积的减少。

表 7.2 1964—1985 年世界土地利用概况

	土地面积 (千公顷)	人口密度 (人/千公顷)	耕地		永久牧场		森林和林地		千公
			千公顷	变化%	千公顷	变化%	千公顷	变化%	
			1983	1964	1983	1964	1983	1964	
			1985	1966	1985	1966	1985	1966	
亚洲	2678827	1123	455629	4.2649419	- 3.0	528416	- 4.6	1071191	- 0.
非洲	2964495	395	184037	14.0	762039	- 0.5	695388	- 8.6	13043
北美洲、中美洲	2139185	198	274011	7.7	392056	- 2.4	660074	- 5.9	84304
南美洲	1753454	166	139507	35.2	457412	9.4	922734	- 7.3	23380
欧洲	472695	1052	140133	- 5.0	85067	- 4.9	155260	7.1	9229
大洋洲	842917	31	49411	26.6	455251	- 1.2	157694	- 16.4	18056
前苏联	2227200	130	232264	1.3	373600	0.2	929000	8.4	69233
世界	13078873	395	1474992	9.1	3159846	- 0.1	4081900	- 2.8	436357

注：其他用地包括未经耕作的土地、未用作牧场的草地、建筑占地、湿地、荒地和道路。

(资料来源：世界资源研究所、国际环境与发展研究所编：《世界资源》1988—1989. 北京大学出版社，1990。)

(2) 图下部的曲线表示按现有生产水平世界耕地面积的增长。过去二、三百年来，增长速度较慢，但是随着人口的增长，这条曲线在 1950 年代以后已达到“起飞”点，对农业用地的需求急剧增加。

(3) 上述两个相反的趋向势必使两条曲线相交，届时世界可耕地将全部开垦完毕。不幸的是，这个交点将出现在 2000 年以前，人类面临着土地匮乏的前景。事实上许多国家目前即已痛感耕地的不足，以我国为例，在人口每年增加一千多万的同时，耕地却以每年几十万公顷的速度减少，我国土地资源保护的任务实乃迫在眉睫。

(4) 即使世界可耕地面积丝毫不减少，这意味着必须开垦条件较差非可耕地，以抵偿可耕地被占用作非农业用地的损失，使世界可耕地面积处于动态平衡状态，如图中右方的水平虚线所示。上升的曲线与水平虚线的交点将延伸至 2010 年前后，这意味着开垦非可耕地只能给人类赢得 10 年左右的时间。

(5) 假使由于农业技术的进步和农业投资的大量增加，使农民有可能使用更多的化肥、农业机械与灌溉设备，从而使农业产量得以翻一番乃至翻两番，则土地匮乏出现的时间又有可能后延，如图右方的两条倾斜虚线所示。这两条虚线表明，产量的每次翻番也只能赢得 30—40 年的时间，大体上与世界人口翻番同步。

(6) 然而，上述两点假定都具有很大的局限性，实际上很难实现。首先，开垦非可耕地代价很高，在经济上不甚可行。其次，农业生产上有一条“费用递增率”，即产量的每次翻番都比上一次耗费高昂。例如世界粮食产量自1951至1966年的15年内增长了34%，同期花费在添置农业机械的费用增加63%，化肥投资增加146%，农药费用增加300%，如果在此基础上再提高产量的34%，则所投入的资本要比上述百分数高很多。因此，如果人类最终被迫作出这样的抉择，不惜一切代价增产粮食以满足人口增长的需要，则一切可供使用的资金都必须投入农业生产，使其他产业无法取得进一步的发展。

(7) 上述分析毫不含糊地向我们提供了这样的信息：人类将在几十年内面临土地不足的问题。尽管对于这一天到来的时间还有争论，但是，如果人类在控制人口增长与制止耕地损失两方面不立即采取有力的措施，则这一天的到来必定为期不远。

第二节 世界土地资源的消长

上文已经述及，随着人口的持续增长，对土地资源的需求也不断增加。这种需求一方面表现为耕地面积的扩大，另一方面也表现为对非农业用地需求的增加。以下对这两方面略加分析。

1. 耕地的扩大据美国环境质量委员会的资料，本世纪下半叶世界耕地面积在不断扩大，大约每 10 年增加 1 亿公顷。即从 50 年代初的 12.7 亿公顷增加到 60 年代初的 13.8 亿公顷、70 年代初的 14.8 亿公顷和 80 年代的 15.1 亿公顷。但 80 年代以后，由于种种原因，增加的速度将会减慢，预计到 2000 年，世界耕地面积约为 15.4 亿公顷。这些数据与表 7.2 中世界资源研究所提供的数据大致相符。该表所列 80 年代中期世界耕地面积为 14.75 亿公顷，比 60 年代中期增加 9.1%。与此同时，森林和林地面积和永久牧场面积有所减少。

但是，各大洲耕地增加的情况颇不相同，其中最显著的有以下几点：第一，在世界及各大洲耕地面积增加的同时，欧洲耕地面积却在 20 年内减少了 5.0%，其原因是言自明的，这是由于人口的稳定以及单产的提高，农产品过剩。第二，耕地增加最多的是南美洲、大洋洲和非洲。其中南美和非洲属于发展中地区，人口增长率很高，耕地的大量增加（分别增加 35% 和 14%）是人口压力造成的。值得注意的是大洋洲耕地的增加，20 年间达 26.6%，而且主要出现在澳大利亚，作为一个发达国家，它的耕地面积在此期间增加了 27.3%，而森林与林地面积却减少了 23%（整个大洋洲减少 16.4%）。这可能与其出口小麦的经济政策有关。第三，亚洲人稠密，人口增长率很高，但这期间耕地增加很少，仅达 4.2%，远落后于其人口的增长，对有限的耕地造成了更沉重的负担。亚洲耕地增长缓慢的原因主要是由于荒地不多，仅占土地总面积的 14%，仅高于荒地最少的欧洲（占 4%）。世界上现存荒地较多的地区顺次为北美洲和中美洲（占土地总面积的 42%）、非洲和大洋洲（均占 31%）、前苏联（占 30%）和南美洲（占 24%）。今后耕地面积的进一步增加将可能出现在这些地区。

尽管世界耕地的总面积不断扩大，但是由于人口的急剧增长，人均占有耕地面积却逐年下降。表 7.3 表明本世纪下半叶世界各地人均耕地面积下降的趋势；全世界人均耕地面积将在 50 年内减少约 48%，其中以发展中国家减少最多，平均减少约 58%，又以北非、中东和南亚减少幅度最大，分别为 68% 与 66%。而发达工业化国家耕地相对减少较少。可见，人均耕地面积减少的趋势与各国人口增长与经济的情况密切相关。

2. 城市化与土地资源尽管城镇的出现有着悠久的历史，但是城市化则还是近一二百年才

表 7.3 世界各地人均耕地面积（公顷）

地区/国家	1951-1955	1961-1965	1971-1975	1985 ¹	2000 ¹	50年内减少%
工业化国家平均	0.61	0.56	0.55	0.50	0.46	24.6
美国	1.17	0.95	0.95	0.86	0.84	28.2
其他粮食出口国 ²	1.72	1.66	1.58	1.29	0.94	45.3
西欧	0.33	0.30	0.26	0.24	0.22	33.3
日本	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	33.3
中央计划经济国家平均	0.45	0.39	0.35	0.30	0.26	42.2
东欧	0.50	0.47	0.43	0.39	0.36	28.0
苏联	1.16	1.02	0.93	0.83	0.73	37.1
中国	0.19	0.18	0.16	0.13	0.11	42.1
欠发达国家平均	0.45	0.40	0.35	0.27	0.19	57.8
拉丁美洲	0.56	0.51	0.47	0.38	0.28	50.0
北非和中东	0.68	0.58	0.47	0.33	0.22	67.6
其他非洲欠发达国家	0.72	0.73	0.62	0.49	0.32	55.6
南亚	0.38	0.32	0.26	0.19	0.13	65.8
东南亚	0.38	0.41	0.35	0.28	0.20	47.4
东亚	0.15	0.15	0.13	0.11	0.08	46.7
全世界平均	0.48	0.44	0.39	0.32	0.25	47.9

注：1. 1982年估计数 2. 加拿大、澳大利亚和南非

(资 料 来

源: U.S. Council on Environmental Quality and Department of State: The Global 2000 Report to the President, 1982, Penguin Books)

出现的现象。它与工业化是一对孪生姐妹，对城市周围农村地区的环境、资源、产业结构、人口迁移与土地利用都带来了强烈的影响。

城市化是以人口来定义的，它是指居住在大城市中心及其紧邻地区人口比重的增加。本世纪初，世界城市人口的比重仍然很低，约占总人口的10%，1925年达到28%，1985年增至41%，其中西方发达国家城市化水平最高，达71.5%。值得注意的是，作为发展中地区的拉丁美洲城市人口竟达68.9%，而亚洲和非洲的城市化水平最低，城市人口分别占28.1%和29.7%（据《世界资源报告》，1987）。预计到2000年，世界人口将有47%住在城市里，而发达国家的城市人口将达75%，大多数发展中国家也将达50%以上，只有非洲和南亚仍在50%以下。

本世纪末至下世纪初的20年内，世界城市化有以下趋势：

(1) 城市居民的绝对数量将有很大增长，尤以发展中国家为明显，而发达国家城市人口增长速度则逐步减慢。

(2) 发展中国家中，百万人口大城市的数目和规模均将不断增加，中小城市的数目也不断增加；而发达国家大城市的增长速度将会下降。

(3) 贫困地区的农村人口正以日益增长的速度移向城市，在发展中国家的许多大城市中形成大片的贫民区和非法住宅区。例如，加尔各答、墨西哥城、里约热内卢、雅加达、马尼拉、波哥大、卡萨布兰卡和伊斯坦布尔等城市都有100万乃至200万以上的人口居住在贫民区和非法住宅区。

城市化的加速对城市及其周围地区的土地资源与环境造成了多方面的影响。

首先，是大量的良田被占用，变成建成区和水泥、沥青覆盖的地面。从历史发展上看，城市大多是在肥沃富庶的农业区中成长起来的，城市的扩展所占用的多是高产的良田。据美国的统计，1949至1969年20年间城市扩展所占的土地中，80%属于美国土地农业适宜性分类中的1—3等地（该分类法按农业适宜性从高至低分为1—8等），即最适宜于发展农业的土地。据世界资源研究所估算，本世纪最后20年间，发展中国家城市区面积将增加1倍，即从800万公顷增加到1700万公顷以上，这意味着每年要占用47.6万公顷农田用于城市建设。

尽管良田的损失对农业生产与环境质量都有着不良的影响，但是出于经济与社会的原因，却往往受到当地政府和社會集团的欢迎：政府欢迎它，因为城市化给地方财政带来更大的收入；农民欢迎它，因为出售近郊土地给他们带来较高的直接收入和增加就业机会；房地产业者欢迎它，因为土地利用的转化正是他们的利益所在。因此，城区逐渐向近郊区蔓延，几乎不受什么阻力。有些西方国家（如英国）为了控制城区的扩大，在原有城区的边缘规划一定面积的“绿带”，其中保留原有的农田、森林、草地、农舍和别墅，不允许增加任何新的建筑。这一措施颇有成效，迫使建筑商改造旧城区，或者在绿带以外建设卫星城式的新中心或住宅区。

另一方面，城市化又强化了其周围地区农田的集约经营，使之由半自给自足农业转化为商品化农业。例如墨西哥城主要批发市场上蔬菜和水果每天的销售量达8000吨。上海市每天的蔬菜上市量为9000多吨，这些都来自郊区和毗邻的地区，这些地区的农业都已转化为高度集约化与专业化。随之而来的是种植制度与机械化方面的革新，例如，由于曼谷对稻米需求的增加，促使水稻的种植方法由直播改为插秧，以提高单产，有些一年一熟的品种已改为二熟。双作又促使农民更多地使用机械来耕作、运输和脱粒，并带动了养禽养猪业的发展。

与城市用地密切相关的是交通运输用地的大量增加，包括交通网本身和停车场用地。在一些发达国家中，交通用地的数量相当可观。例如美国道路网占地129000km²（80年代数字），为国土总面积的1.4%，其中停车场占地3000km²；法国城市间道路占地约3500km²，外加停车场占地500km²，二者合计占国土总面积的0.7%（1975年数字）。如果按照一些交通专家的设计标准，道路网占地的面积还要大量增加。这些专家的研究表明，在高速行驶的情况下，每辆汽车为保证安全行驶所需的公路面积应为600m²。按照这个标准，则法国1975年的公路占地面积应为10000km²，相当于它的两个省的面积。此外，与交通用地有关的还应包括众多的加油站和废汽车堆置场地等。

第三节 人类对土壤圈的影响

尽管人类日益紧迫地面临土地匮乏的问题，但是，人类在其经济、政治和军事活动中仍然在“无意地”伤害关系到人类衣食住行的土壤圈，造成土地退化。

土地退化是指土地资源质量的降低，而土地资源的质量通常是以其生物生产力来衡量的，因此，土地退化也就是指土地生物生产力的降低。土地退化的表现是农田产量的下降或作物品质的降低、牧场产草量的下降和优质草种的减少从而导致载畜量的下降，而在一般的林地、草原或自然保护区则是生物多样性的减少。

土地退化并非现代才发生的，远古时代由于过度的农牧活动也曾造成过大面积的土地退化。然而，当前世界各地土地退化的速度在大大加快。据联合国 1980 年的估计，每年由于土地的荒漠化（土地退化最严重的情况）要损失价值 260 亿美元的农业生产力。若要改善已退化的土地，则需投入大量的资金。例如，在 1985—1987 年之间，联合国粮农组织已在非洲退化的农田上花费了 2.89 亿美元，在随后的几年之中（1987—1991 年），又在非洲、拉丁美洲和亚洲的 10 国投入 10 亿多美元，用以帮助恢复退化的土地。

当前世界上土地退化较严重的现象包括土壤侵蚀、土地沙化与荒漠化、盐渍化与水涝，以及土壤污染等，兹分述如下：

1. 土壤侵蚀土壤侵蚀不完全是人类活动所造成的，在人类出现以前，暴雨、风暴、山洪和林火等都能引起土壤侵蚀。据估算，由于天然原因引起土壤侵蚀每年进入海洋的物质约为 93 亿吨。人类活动加速了土壤侵蚀，现在每年进入海洋的物质约为 240 亿吨，为天然侵蚀总量的 2.6 倍。水土流失现象已遍及南极洲以外的各大陆，水土流失总面积约占陆地面积的 1/6。耕地水土流失现象更加严重，受到不同程度侵蚀的耕地占 1/4 以上。仅就美国而言，据美国农业部估计，全国 1.8 亿公顷耕地中的一半以上有严重水土流失。此外，森林、草地与牧场中水土流失面积也与此相当。因此，美国水土流失面积共有 1.8 亿公顷，土壤侵蚀总量每年达 10 亿吨，若用火车装载，该列车的长度足以环绕地球赤道 18 圈。我国水土流失现象更加严重，据有关统计，1950 年全国水土流失面积为 116 万平方公里，而到 80 年代已增至 150 万平方公里，年流失土壤量达 50 亿吨，约占全世界流失量的 1/5。仅黄河的年输沙量即达 16 亿吨，其中 90% 来自黄土高原。如果黄河入海的泥沙也用火车装载，则可以环绕赤道 29 圈。

轻微的土壤侵蚀常不易察觉，为了监测土壤侵蚀的发展，需要确定一个阈值，它因土壤性质、土层厚度和耕作方式而有所不同。为了应用上的方便，美国通常采用 1.8 吨/公顷/年作阈限，超过此数即被认为当地已发生了土壤侵蚀。土壤侵蚀不仅是对人类生存环境的严重破坏，引起一系列的不良后果，而且直接给农业生产带来重大损失。对此，后文将进一步作具体分析（见第四节）。各国科学家、公众与政府领导人对土壤侵蚀问题均深为关切，1989 年 7 月澳大利亚总理霍克说：“澳大利亚环境问题中没有比土壤退化更为严重的了……土壤退化波及本大陆近三分之二的可耕地。”前苏联《真理报》也报道过苏联土壤肥力的灾难性下降。印度前总理拉·甘地则把印度的生态危机和经济危机归结为连续毁林及其伴生的土地退化的结果。又据联合国粮农组织估计，如不采取适当的水土保持措施，则 1975—2000 年间非洲的农业

将会减产 1/4。

尽管土壤侵蚀现象早已引起人们的注意，许多科学家和政治家亦发表了不少言论，但迄今水土保持成效甚少，水土流失甚至比过去更严重了。事实上，水土保持并无深奥的原理，也不需要复杂的技术。问题是水土保持乃是一项综合性的系统工程，涉及到社会学、经济学、农学、工程科学和生态学等各方面，和当地的社会经济问题紧密相关联，这就需要领导人、政治家、社会学家、经济学家和农学家、工程师与当地民众共同采取行动。

2. 荒漠化在我国又称为沙漠化，是土地退化的一种表现，常出现在干旱区，但在半干旱以至半湿润地区也常有发生。在地理学上，荒漠包括岩漠（石漠）、砾漠、戈壁、沙漠、泥漠、盐漠与寒漠等类型。比较引人注目的是耕地和牧场因人为破坏而起沙并逐渐变成沙漠的现象，这就是大众传媒中所称的沙漠化。

荒漠是一种土地类型，据统计资料，世界荒漠面积约为 3100 万平方公里，其中沙漠为 560 万平方公里，约占无冰陆地面积的 4.2%。严重的问题在于沙漠边缘地区处于生态过渡带，自然环境比较脆弱，在不合理的耕垦或过度放牧的影响下，环境迅速退化、破坏，这个过渡带被沙漠蚕食，这一过程是沙漠化的典型例子。据联合国世界沙漠化会议（1977 年）提供的资料，当时全世界已受到和可能受到沙漠化影响的面积，估计为 4560 万平方公里。其中非洲 1665 万平方公里，亚洲 1523 万平方公里，美洲 784 万平方公里，欧洲 23.8 万平方公里。全世界受沙漠化影响的人口约 8.5 亿，其中 5 亿为农民。非洲是沙漠化最严重的区域，仅在撒哈拉沙漠以南地区，迄今已有上百万平方公里的森林被砍伐，沙漠化发展迅速。在苏丹的观测表明，1958—1975 年间，沙漠已向南推进 90—100 公里，有的地方甚至有一年南侵 50 公里的记录。全世界沙漠化的速度达每年 5—7 万 km²，相当于现有沙漠面积的 1%。全世界农田因沙漠化而致严重减产乃至失收的达 15%。

我国年降水量小于 400 毫米的干旱区面积为 286 万 km²，约占全国面积的 30%，分布在西北、华北和东北西部等地区，是中亚大荒漠的东延部分。其中年降水量小于 200 毫米的荒漠区约占 1/3，主要分布在新疆、青海、宁夏、甘肃和内蒙等省区。三十多年来，我国荒漠面积扩大了约 6 万 km²（9000 万亩），占全国耕地的 5%。近年来我国沙漠化面积以每年 66.7 万公顷的速度发展，如果按照这种速度，则我国耕地会在几百年之内全部荒漠化。幸而，我国东南半壁属于湿润地区，那里的土地不会受荒漠化的严重威胁。然而，地处干旱和半干旱地区的国家全部变成荒漠的却不乏先例，其中最著名的例子就是美索不达米亚的湮没。

美索不达米亚，原文 Mesopotamia 意为河流（potamic）之间（meso）的地方，即底格里斯河与幼发拉底江之间的区域，《圣经》中喻为“牛奶与蜂蜜之乡”，也有人认为是《创世纪》中伊甸园的原型。该地区农业历史长达 7 千年，建立过 11 个王朝，公元前 4500 年就修建了复杂的灌溉系统，90000km² 泛滥平原中有 54000km² 土地得到灌溉。完善的农业系统哺育了灿烂的文化：铺设了有路面的街道、制订了法典、创立了数学、天文学、楔形文字和历法等。

然而，由于长期的过度垦殖：滥伐森林、陡坡种植、过度放牧，使河流上游亚美尼亚高原发生了严重的水土流失，河流携带大量泥沙使河口向波斯湾推进了 290km，河堤与河床不断增高，有些地段高出周围地面 15 米，当年

的海港乌尔港被埋在 12 米厚的泥沙之下。为了保持河道畅通，防止决堤泛滥，常年役使上万名奴隶和战俘进行繁重的维修工程。公元前 3000 年还制订了严厉的法律，对造成河道淤塞的人课以重刑。然而，由于不时发生的战乱和野蛮部族的入侵，使严格的维修制度不断遭到破坏，造成河流的淤塞与泛滥。公元 1200—1300 年蒙古族与鞑靼人的入侵给这个灌溉系统以最后的致命打击，从此洪水横流、田园荒芜、土地沙化。据考证，美索不达米亚全盛时期曾经供养过 2500 万人口，而现在包括古代美索不达米亚国土的伊拉克全国人口只有一千多万人。当对世界上最强盛的城市、骄傲的首都巴比伦，也完全被掩埋在弥漫的风沙之下，任人凭吊。

另一个类似的例子是阿尔及利亚境内的提姆加德（Timgad）城，公元一世纪时由罗马帝国所规划和建设，是帝国居民与军队的粮食基地之一。该地原系波状起伏的稀树草原，经开发，成为农田与橄榄园，农业技术高超，文化发达，环境也得到很好的维护，成为罗马人在北非建设的样板。在建筑、工程与艺术方面堪称当时的奇迹：有对称的建筑群，长达 5 公里的引水渠，饰以浮雕的广场，17 个有瓷砖镶嵌的罗马式大型浴池，巨大的榨油坊和可容 2500 观众的剧院等。这朵以健全的土地管理技术为基础的农业之花开放了几个世纪。不幸的是，公元七世纪游牧民族的入侵给该地区带来了毁灭性的打击，他们大肆掠夺，强迫当地居民为奴，使之大量逃散。又改变原来的农作制度，过度放牧导致土壤沙化，不断发生沙暴，城市逐渐湮没，并在沙漠下埋没了 1200 年，直至 1912 年始为法国考古队所发现，经 30 年的发掘，使这个古罗马灿烂文化遗迹重见天日。

荒漠化作为一个全球性环境问题日益引起人们的关切，1968—1973 年北非的持续干旱造成 20 万人和成百万头家畜死亡的悲剧促成了 1977 年在内罗毕召开了联合国荒漠化会议，讨论造成这种灾害的原因和如何避免类似的灾难再次发生。不幸，会议文件墨迹未干，70 年代后期至 1981—1984 年更加严重的旱灾再次袭击该地区，仅埃塞俄比亚、苏丹和乍得三国的死亡人数就有上百万。1984 年联合国环境规划署再次召开荒漠化会议，研究荒漠化的机制和应采取的对策。据估计，1977 年全世界受荒漠化影响的人口为 5700 万人，到 1989 年上升为 2.3 亿人，估计到 2000 年将上升至 3.5 亿人。目前每年因农田荒漠化造成的经济损失约为 260 亿美元。据 1977 年联合国荒漠化会议的文件，要求采取行动制止或大大减缓荒漠化的蔓延和改良已荒漠化的土地，估计总共要耗资约 1410 亿美元，约合每年因荒漠化造成农业生产损失价值的 5 倍半。这就是说，防治荒漠化的全部投资可望于 5—10 年内全部收回，这是造福于全人类的大好事。可惜，迄今尚没有哪国政府拨出足够的经费来实现这项计划，直至 1990 年为止，各国投入防治荒漠化的总经费只及上述数目的十分之一。迄今世界的荒漠化仍在发展之中，与荒漠化作斗争仍将是 21 世纪全人类所面临的任务。

3. 盐渍化和水涝这是水浇地上普遍发生的土地退化现象。水浇地约占世界耕地的 18%，其单产常比当地不浇水的耕地高一二倍。因此，目前世界粮食有三分之一产于水浇地，而且预计 2020 年世界水浇地面积还将增加一倍以上，这对缓解粮食紧缺将起重要作用。

灌溉主要应用于雨水不足的地区，这些地区土壤中往往含有各种难溶和易溶的盐分。灌溉水能把渠道和土壤中的盐分溶解出来，随着水分的蒸发与蒸腾，便有数量不等的盐分积聚在土壤表面。这一过程在土壤学上称为次生

盐渍化。一般来说，当土壤含盐量达到占干土重的 0.2% 时，作物生长受阻，这种土壤称为盐化土；而当土壤含盐量达到 2% 以上时，大多数作物即无法存活，这类土壤就是盐土。在土壤学上把上述两类土壤合称盐渍土，即俗称的盐碱土。

次生盐渍化影响的范围很广，而且仍有发展的趋势。据估计当前世界水浇地有 1/4 受其影响，有人推断到 2000 年将有 50% 至 65% 的水浇地会因盐分过多而减产。这个问题无论在发展中国家还是发达国家中都较严重。例如埃及、伊朗和伊拉克等完全依赖灌溉的国家约有一半的耕地受盐分影响，美、俄等产粮大国问题也很严重。

常与次生盐渍化伴生的另一现象是水涝，又称沼泽化。传统的灌溉技术（如沟灌与畦灌）常有过量的水分下渗至底土，如当地潜水位较高时水位就会逐渐进一步提高，使土壤表层与表下层水分过多，形成水涝，妨碍作物生长。有时还可在根际形成盐套，使作物致死。

据世界监测研究所（Worldwatch Institute）估算，如果盐渍化与水涝二者使世界水浇地减产 1%，则每年减产的粮食就达 100 多万吨。

解决次生盐渍化与水涝的技术问题并不复杂。例如，通过改进灌溉技术，采用喷灌乃至滴灌等方法以减少水分的损失，挖掘低于潜水面的排水沟以排除土壤积水，对已发生盐渍化的土壤定期施用大水洗盐，在地下铺设多孔的排水管排除含盐土壤水等，都是行之有效的办法。不过在采用这些改良措施时也常遇到一些困难，一是资金的筹措和投入产出比是否合算的问题，另一个是洗盐水的出路问题。如果洗盐水排到蒸发池中蒸发，则对周围环境影响较小，但如果洗盐水直接排入河流或湖泊中去，实质上是把盐分转移给下游的农户。因此，在对这类土地进行改良时，尚需制定统一的规划。

4. 土地和危险废弃物人类在生产与生活过程中产生许多废弃物，其最终归宿有三：一是被焚烧，使固态、液态以及一些气态的废弃物变成气体和较少的灰烬，这种方法常产生大气污染；二是倾倒入海洋中，包括直接倾倒入海和河流携入的废弃物，造成海洋污染；三是堆放在土地上，这是最方便、最便宜的方法，因而也是最大量采用的方法，包括固体废弃物的地表和地下堆埋以及废水的土地处理在内。上述种种方法均已实施了千百年，然而，直至二三十年以前人类才发现废弃物的不恰当处理已给我们的环境带来了灾难性的问题。本节所述及的是废弃物——主要是危险废弃物给土地资源所带来的问题。

废水的土地处理，最常见的是用于灌溉，过去存在着病原微生物传播的问题，现在又加上重金属、有机化学品和放射性的污染，给污水灌溉带来较大的影响。一些西方国家利用污水灌溉风景用的草地和高尔夫球场等，对人体直接影响不大，但若使用未经处理的污水灌溉大田或园田，则必须对其产物的残毒进行检测，否则会造成人、畜的急性或慢性中毒和致癌、致畸变等恶果。这里不拟对污水灌溉问题作详细的阐述。

废弃物，包括生活垃圾和工业垃圾，其堆置与处理已日益成为工业化国家所面临的难题。一个国家或城市的经济水平越高，其废弃物的数量也越大。有关资料表明，象加尔各答、卡拉奇和雅加达等低收入国家的大城市，每人每天产生的垃圾量为 0.5—0.6 千克；中等收入国家和地区的大城市，如开罗、马尼拉和香港，为 0.5—0.85 千克；而工业化国家的大城市，如纽约则达到 1.80 千克（表 7.4）。即使按中等发达的水平推算，百万人口城市每天

产生的垃圾数量也达 500—580 吨。另有资料表明，上海市每年产生的固体垃圾达 1300 万吨，该市总人口为 1200 万人，每年人均产生的垃圾在 1 吨以上，合每人每天 2.97 千克，或全市每天 3.56 万吨，大大超过发达国家的水平，这可能是把工业垃圾统计在内的缘故。城市垃圾的组成很复杂。工业化发达国家城市垃圾以低密度、低含水量为特点，有机物较少而纸张、塑料、玻璃和金属含量很高，大多有回收利用价值，或经处理后成为燃料。其中玻璃的回收利用最好，从 1979 年到 1984 年，欧洲每年回收的玻璃从 130 万吨增加到 270 万吨。荷、奥、比、法、德和瑞士等国所回收利用的玻璃占 25%—50%，不仅减少了垃圾的数量，还节约了用以制造玻璃的大量原料和能源。发展中国家城市垃圾的特点则是高密度和高含水量，包括大量蔬菜废弃物和其他易腐败的物质以及粪便。这种垃圾适合于堆肥和生产沼气。

表 7.4 一些城市垃圾的生产率

城市	垃圾生产率 (千克/人天)	城市	垃圾生产率 (千克/人天)
工业化国家		马尼拉(菲律宾)	0.50
纽约(美国)	1.80	开罗(埃及)	0.50
汉堡(德国)	0.85	低收入国家	
罗马(意大利)	0.69	雅加达(印度尼西亚)	0.60
中等收入国家或地区		苏腊巴亚(印度尼西亚)	0.52
新加坡	0.87	万隆(印度尼西亚)	0.55
香港	0.85	拉合尔(巴基斯坦)	0.60
突尼斯(突尼斯)	0.56	卡拉奇(巴基斯坦)	0.50
麦德林(哥伦比亚)	0.54	加尔各答(印度)	0.51
卡诺(尼日利亚)	0.46	坎普尔(印度)	0.50

资料来源：Sandra J. Cointreau, 1982

(引自：《世界资料》1988—1989)

城市垃圾的一个共同特点是或多或少地含有有毒或有害成分。这些成分往往来自一些化学物品，现在每年大约有 1000 种新的化学物品加入大约 7 万种日用化学品的行列。到 1986 年为止，从天然产物中分离出来和合成的化学复合物已达 500 多万种。虽然大多数仍然留在实验室内，但是已有相当多通过各种生理和病理试验后进入市场。据统计，1979 年市场上销售的化学物品中，就有农药 1500 种、医药 4000 种和食品添加剂 5500 种。此外，在工业、农业、燃料和日用消费品中也含有许多化学品。

这些化学品多数是有毒的，但一般不出现急性症状，慢性症状也不明显。正因为这样，它们才能通过有关部门的认可，得以进入市场。这些物质使用以后大多随同其他废弃物堆置在垃圾场中，其中有一些可能相互发生化学反应，生成某些毒性较强的产物，对环境造成污染。

第四节 农药与土壤污染

自第二次世界大战以来，化学农药在确保农业生产和保护人类健康方面起到了巨大的作用。目前全世界每年的农药总产量已超过 500 万吨，并且仍以每年 5% 的速度在增长。尽管如此，化学农药仍然远远不能满足客观需要。

农药发展之所以如此迅速，是与其在保证农业增产方面所起的作用分不开的。在农作物和家畜所处的环境中，大约有 5 万种真菌，能引起 1500 种病害；全世界大约有 3 万种杂草，其中 1800 种以上可造成经济上的损失；此外，还有 1 万种昆虫能产生各种危害。据估计，如果不使用农药，全世界粮食总产量的 50% 将会被各种病、虫和杂草所吞噬。使用了农药，则可挽回其损失的 15%。全世界因病、虫、草害造成的损失，估计每年达 800 亿美元。据我国有关部门统计，我国由于防治病、虫、草害，每年可挽回粮食损失 150—200 亿公斤，皮棉 500—600 万担，瓜、果、烟、茶等经济作物因使用农药而获得的经济效益更为显著。鉴于上述原因，目前人类实际上已处于不得不使用农药的地步，尤其在一些用药水平低的亚、非、拉国家，为解决粮食问题，农药用量将有较大的增加。在一些发达的国家，农药用量也有增加的趋势。

另外，农药在卫生保健方面所起的作用也很大。如在 1955 年至 1965 年的 10 年间，由于使用合成杀虫剂所挽救的病人，单就疟疾而言就达 1500 万人，远远超过了抗菌素所挽救的人。

目前，国外已作为商业注册和得到专利保护的农药品种有 1200 余种，其中约有 500 种投入市场，药剂类型达 6 万种。

随着人口增加，粮食产量也要相应增加。增产粮食的主要途径无疑是提高单位面积产量。而提高单产的重要技术措施就是使用农药。

表 7.5 是世界各地粮食单位面积产量与用药的关系。

农药的巨大效益是无可怀疑的，但是，随着农药的大量的使用，也引起了一些不良后果。在 60 年代，人们认识到了 DDT 等有机氯农药不仅对害虫有杀伤作用，同时对害虫的天敌及传粉昆虫等益鸟益虫也有杀伤作用，因而打乱了生物界的相互制约和相互依赖的相对平衡，引起新害虫的猖獗。另外，长期使用同类型农药，使害虫产生抗药性，也增加了防治药量和防治次数，大大增加了防治经费。据国外初步调查，目前已产生抗药性的害虫有 300 种左右，其中农业害虫占 100 余种。

除上述不良后果外，还存在一个更为重要的问题，即农药污染问题。对人体健康和生物界产生直接或间接的危害。

本节将介绍农药的分类、农药引起的环境问题和农药在土壤环境中的迁移、降解及残留。

一、农药的分类

农药在广义上指农业上使用的药剂。包括杀虫剂、杀菌剂、除草剂等，还包括农业上使用的化肥等其它化学品。狭义上指防治危害植物及农林产品的昆虫、病菌、杂草、螨、鼠类等药剂以及能调节植物生长的药剂和使这些药剂效力增加的辅助剂、增效剂等。

目前，在市售的约 500 种农药中，农业上常用的有 250 种左右，其中包括 100 种杀虫剂，50 种除草剂，50 种杀菌剂，20 种杀线虫剂和 30 种其它化合物。

防治病、虫、杂草等的化学物质大都由工厂制备，也有极少数天然地存

在于植物体中，或从微生物中培育而得。前者如常用的 DDT、六六六、乐果、敌百虫等，通称为化学农药；后者如除虫菊素、鱼藤酮等，通称为植物性农药；此外，如春雷霉素、井冈霉素等，通称生物性农药。

病、虫、杂草等有害生物，不论在形态、行为、生理代谢等方面均有很大差异。因此，农药的防治对象也有所不同。根据防治对象的不同，农药可分为：杀虫剂、杀螨剂、杀菌剂、杀线虫剂、除莠剂、杀鼠剂、杀软体动物剂、植物生长调节剂和其它药剂等（表 7.6）。

按农药化学组成成分可分为：有机氯农药、有机磷农药、有机汞农药、有机砷农药和氨基甲酸酯农药以及苯酰胺农药和苯氧羧酸类农药等。

表 7.5 各国平均亩用药量与粮食产量比较表

国家及地区	农药用量(有效成分) (克/亩)	农作物产量 (斤/亩)	顺序
日 本	719(460)	730	1
欧 洲	125	453	2
美 国	115(100)	346	3
中 国	100	—	4
拉 美	15	263	5
澳 洲	13	210	6
印 度	10	110	7
非 洲	8	162	8

（资料来源：胡庆永，农业环境保护概论，1986）

由于农药本身的性质不同，有的农药仅能防治一类对象，而有的可防治几类对象，在选用农药时应加注意。

二、农药与环境问题

在农业上使用农药进行化学防治病、虫、杂草等危害，具有见效快、防治面广、防治效果高等优点。但同时，农药也存在着污染环境的问题，对人类造成一定的威胁。

首先，农药使用方法存在着很大的缺陷，常用的喷洒方法只有少量农药作用于杀害目标。如用飞机喷洒时，只有 25%—50% 的农药落在防治区域的农田中，其余都散布于防治区域外，农药对环境的污染途径可用图 7.2 概括说明。

表 7.6 农药的分类

<p>农药(根据防治对象)</p> <p>一、杀虫剂：</p> <p>(一)根据药剂的作用方式：胃毒剂 触杀剂 熏蒸剂 内吸剂 诱致剂 驱避剂 阻食剂 不孕剂 昆虫激素：保幼激素 蜕皮激素 性信息素 追踪信息素</p> <p>(二)按药剂的化学组成成分：</p> <p>有机杀虫剂： 有机氯制剂 有机磷制剂 有机氮制剂和氨基甲酸酯类 有机硫制剂 拟除虫菊酯类</p> <p>无机杀虫剂： 无机砷制剂 无机氟制剂 无机硫制剂</p> <p>植物性杀虫剂 矿物油杀虫剂 微生物杀虫剂：细菌性毒素 真菌性毒素 抗菌素类</p> <p>二、杀螨剂:按药剂的化学组成成分：有机氯制剂 有机磷制剂 二硝基杀螨剂 其他含氮杀螨剂</p> <p>三、杀菌剂：</p> <p>(一)根据防治原理：化学保护剂 化学治疗剂 化学免疫剂</p> <p>(二)根据使用方法：土壤消毒剂 种子处理剂 普通喷洒剂</p> <p>(三)按化学组成成分：硫制剂</p>	<p>铜制剂 汞制剂 有机磷制剂 有机砷制剂 有机锡制剂 取代苯类杀菌剂 二氯甲硫基杀菌剂 醌类杀菌剂 杂环化合物杀菌剂 其他有机杀菌剂 抗菌素制剂 植物杀菌素</p> <p>四、杀线虫剂</p> <p>五、除莠剂：</p> <p>(一)根据对植物的作用：(杀草剂) 灭生性除莠剂 选择性除莠剂</p> <p>(二)根据在植物中的行为：触杀性除莠剂 内吸传导性除莠剂</p> <p>(三)根据化学组成成分：氯苯氧羧酸类 取代苯酚类 氯代脂肪酸类 苯醚类 取代脲类 均三氮苯类 酰胺及酰基苯胺类 氨基甲酸酯类 硫代氨基甲酸酯类 联吡啶类 苯腈类 苯乙酸类 苯甲酸类 三氮杂茂类 芳基邻氨基羧基苯甲酸类 氯苯氧醇酯类 酮、醇、醛类 有机砷、磷、锡类</p> <p>六、杀鼠剂</p> <p>七、杀软体动物剂</p> <p>八、植物生长调节剂</p> <p>九、其他</p>
---	--

(资料来源：樊德方等，农药的污染与防治，1982。)

从图 7.2 中可以看出，农药对环境的污染是多方面的，包括大气、水体、土壤和作物。进入环境的农药在环境各要素间迁移、转化并通过食物链富集，最后对生物和人体造成危害。

1. 农药对大气的污染大气中农药的污染主要来自为各种目的而喷洒农药时所产生的药剂飘浮物和来自农作物表面、土壤表面及水中残留农药的蒸发、挥发扩散。此外，农药厂排出的废气，也是农药污染大气的原因之一。

大气中的农药飘浮物在风的作用下可跨山越海，到达世界每个角落。据报道，在地球的南、北极圈内和喜马拉雅山最高峰上都发现有机氯农药的存在。

大气中农药的污染具有以下特点：

大气中农药的污染情况决定于农药的使用情况，例如普遍使用 DDT 农药时，大气污染就以 DDT 为主；

大气中的农药污染程度因地而异；

大气中农药的残留量随施药时间而有规律地增减。

2. 农药对水体的污染水体中的农药主要来自农田施药和土壤中的农药被水流冲刷及农药厂废水排放进入水体。

美国、英国、日本等国家在 60 年代就已经发现，在使用有机氯杀虫剂 10 年后，所有的主要河流都已受到污染。我国也有类似的情况。

由于各种水体的理化性质不同，因此被农药污染的程度也不同。根据日本对自然界不同水体中有机氯的农药检测结果，其污染顺序为：

雨水 > 河水 > 海水 > 自来水 > 地下水

3. 农药对土壤的污染土壤中的农药主要来自：直接的施用；通过浸种、拌种等施药方式进入土壤；漂浮在大气中的农药随降雨和降尘落到地面进入土壤。

农药对土壤的污染程度决定于农药的种类和性质。

农药在土壤中的残留与土壤的类型、有机质含量、酸碱度、金属离子的种类和数量、水分含量、通气性、植被种类和覆盖率、微生物种类和数量等因素有关。

农药在土壤中的消失机制一般与农药的气化作用（物质从液态转化为气态的过程，有蒸发和蒸腾两种形式）、地下渗透、氧化水解和土壤微生物的作用有关。

农药在土壤中的残留期和不同土壤中有机氯农药的残留情况见表 7.7 和表 7.8。

表 7.7 农药在土壤中的残留期

农药名称	残留期*	农药名称	残留期**	农药名称	残留期	农药名称	残留期***
滴滴涕	10年	扑灭津	18个月	敌敌畏	24小时	西维因	135天
狄氏剂	8年	西玛津	12个月	乐果	4天	梯灭威	36—63天
林丹	6.5年	莠去津	10个月	马拉硫磷	7天	呋喃丹	46—117天 ^a
氯丹	4年	草乃敌	8个月	对硫磷	7天		
碳氯特灵	4年	氯苯胺灵	8个月	甲拌磷	15天		
七氯	3.5年	氟乐灵	6个月	乙拌磷	30天		
艾氏剂	3年	2, 4, 5—涕	5个月	二嗪农	50—180天		
		2, 4—滴	1个月	三硫磷	100—200天		
				地虫磷	2年		

注：*消解 95%所需时间，**消解 75%—100%所需时间，***消解 95%以上所需时间，^a为半衰期。

(资料来源：胡庆永等，农业环境保护概论，1986。)

表 7.8 不同作物田土壤中有有机氯农药的残留情况

农田种类	总六六六(ppm)	总滴滴涕(ppm)	备注
棉田	0.278—1.065	1.175—6.450	河南、陕西棉区
麦田	0.159—0.295	0.168—1.054	山东泰安
	0.114—0.641	0.272—0.498	山东烟台
稻田	0.121—0.506	0.026—0.518	江苏稻区
烟田	0.031—0.092	0.006—0.709	山东烟区

(资料来源：胡庆永等，农业环境保护概论，1986。)

4. 农药对人体健康的危害据报道，全世界每年因农药中毒致死者估计 1 万人，致病者估计达 40 万。发展中国家受农药污染极为严重，每年发生 37 万起农药中毒事件。

农药进入人体的主要途径是通过食物摄入。长期食用被农药污染的食品能造成人体某些农药的积贮而对人体健康产生危害。

农药对人体健康的危害目前认为有以下几个方面：对神经的影响；致癌作用；对肝脏的影响；诱发突变；慢性中毒。

此外，农药还能对水生生物、飞禽、动物和植物等造成污染和危害。

三、农药在土壤环境中迁移、降解及残留

农药进入土壤后，与土壤中的固、气、液体物质发生一系列化学、物理化学和生物化学反应。通过上述反应，土壤中的农药发生下列三方面的作用：第一，土壤的吸附作用使农药残留于土壤中；第二，农药在土壤中进行气、水迁移，并被植物吸收；第三，农药在土壤中发生化学、光化学和生物化学降解作用，残留量逐渐减少。下面就此三方面作一简单介绍。

1. 土壤对农药的吸附作用 农药进入土壤后，通过物理吸附和化学吸附等形式吸附在土壤颗粒表面，这时农药的移动性和毒性发生变化。在某种意

义上讲，土壤的吸附作用就是土壤对有毒物质的净化和解毒作用。但这种作用是不稳定的，也是有限的。

土壤对农药吸附作用的强度取决于土壤特性和农药性质。一方面，各种土壤的性质差别很大，其有机质含量、龟荷类型、粘土矿物比表面大小、pH值等不同，对农药的吸附能力有很大的差异；另一方面，农药的性质差别很大，因而吸附作用也不同。实践证明，在各种农药的分子结构中，凡带有 R_3N 、 $-CONH_2$ 、 $-OH$ 、 $-NH_2$ 、 $-OCOR$ 等功能团的农药都能增强被吸附的强度，尤其是带 $-NH_2$ 的化合物，被吸附能力更强。

2. 农药在土壤中的气迁移与水迁移 农药的气迁移主要是指农药的挥发作用，挥发作用的大小，主要决定于农药本身的溶解度和蒸气压，以及土壤的温度、湿度和土壤的质地和结构等性质。

农药在土壤溶液中的扩散速度很慢，而蒸气扩散速度比它要大一万倍。

农药的水迁移主要包括直接溶于水和被吸附于土壤固体颗粒表面上随水分移动而进行机械迁移两种方式。农药在土壤中的气迁移能力和水迁移能力可用挥发指数和淋溶指数进行比较（表 7.9）。这两个指数均为相对值，规定最难迁移的 DDT 的挥发指数和淋溶指数为 1.0，以此为基数与其它农药相比，指数越大，迁移能力越强。

表 7.9 某些农药在土壤中挥发和淋溶能力比较

农药名称	挥发指数	淋溶指数	农药名称	挥发指数	淋溶指数
除草剂：			杀虫剂：		
氯铝剂	3.0	1.0—2.0	速灭磷	3.0—4.0	3.0—4.0
敌稗	3.0	1.0—2.0	甲基对硫磷	4.0	2.0
氟乐灵	3.0	1.0—2.0	对硫磷	3.0	2.0
茅草枯	1.0	4.0	DDT	1.0	1.0
2甲-4氯	1.0	2.0	六六六	3.0	1.0
2,4-D	1.0	2.0	氯丹	2.0	1.0
2,4,5-T	1.0	2.0	毒杀芬	3.0	1.0
杀虫剂：			艾氏剂	1.0	1.0
西维因	3.0—4.0	2.0	狄氏剂	1.0	1.0
马拉硫磷	2.0	2.0—3.0	异狄氏剂	1.0	1.0
三溴磷	4.0	3.0	杀菌剂：		
乐果	2.0	2.0—3.0	克菌丹	2.0	1.0
倍硫磷	2.0	2.0	苯菌灵	3.0	2.0—3.0
地亚磷	3.0	2.0	代森锌	1.0	2.0
乙硫磷	1.0—2.0	1.0—2.0	代森锰	1.0	2.0
甲氧基内吸磷	3.0	3.0—4.0	代森锰锌	1.0	1.0
保棉磷	—	1.0—2.0			
磷胺	2.0—3.0	3.0—4.0			

（资料来源：陈静生等著，环境污染与保护简明原理，1981。）

3. 农药在土壤中的降解和残留

有机农药在化学与生物化学作用下逐渐分解，最后转化为无机物，此过

程称为化学农药的降解过程。降解速度快，在土壤中残留时间短，称为低残留农药；降解速度慢，在土壤中残留时间长，称为高残留农药。

农药在土壤中的降解主要包括光化学降解，化学降解和生物降解等。

光化学降解是指土壤表面受太阳辐射能和紫外线能而引起的农药分解。

化学降解可分为催化反应和非催化反应。非催化反应包括水解、氧化、异构化、离子化等作用。

生物降解的形式多种多样，主要有脱氯作用，脱烷基作用，水解作用，环破裂作用，氧化作用和还原作用等。

第五节 土地与粮食问题

本世纪下半叶经历过粮食的急剧增长,1950至1984年的35年间,世界粮食总产量增长了2.6倍,比历史上任何时期增长的速度都快。然而,此后增产的速度减缓,非洲、拉丁美洲和亚洲部分地区人民营养不良和饥馑的份额在加大。1987和1988年的干旱使世界主要产粮国的收成大幅度下降,世界粮食储备降至几十年来最低水平之列,几乎不能满足糊口之需。1989年世界市场上小麦价格比二年前上涨了48%,大米价格也比1986年的最低点上涨了38%。尽管有高粮价的刺激,加上1989年雨水调匀,原以为世界粮食产量将会增加,重建粮食储备。然而,事与愿违,该年世界谷物的总收成比预计的消费总量 1685×10^6 吨少 18×10^6 吨,粮食储备进一步下降。这一严酷的现实提出了这样的问题:风调雨顺之年尚且不能补充世界粮食储备,则世界粮食供应的前景岂不令人忧虑?

众所周知,增产粮食的两条途径是扩大耕地面积和提高单位面积产量,而目前我们在这两方面都遇到了较大的困难,兹分述如下:

第一,耕地面积趋于零增长,甚至略有减少。从农业社会的开始直至本世纪中叶,耕地面积的扩展与人口增长大体同步进行,但1950年以来耕地增长减慢。与此同时,一方面由于许多地区严重的水土流失使许多耕地不再适于种植而弃耕,另一方面又有大量耕地被城市和工交建设所占用。二者使全世界每年损失耕地几百万公顷,其中人口密集、正在迅速工业化的地区尤为显著,例如日本、韩国以及我国大陆和台湾省,每年共损失耕地50万公顷。印度和墨西哥也有类似的情况。两个产粮大国美国和前苏联的耕地也在减少,前苏联1977年以来弃耕与休耕的农田占其大田面积的13%。美国为了制止水土流失与稳定粮价而采取鼓励农民弃耕的做法,从1986年开始实施一项五年计划,拟在受侵蚀的土地(主要为农田)上植树、种草1600万公顷,至1989年已完成了80%,其余部分因国会紧缩开支而未能完成。

从世界范围来看,仍有约一半的可耕地可供开发,但考虑到开发新耕地在经济上的可行性,有利可图的处女地数量很有限,只有少数国家(如巴西)在近期内仍有可能开垦新的耕地。因而从全球来看,耕地的消长将接近收支相抵的状况,本世纪剩余的年份里世界粮田面积将保持80年代的水平。由于人口的持续增长,使人均粮田面积由1980年的0.16公顷减至1990年的0.14公顷,而且这种趋势将会继续下去,预计至2000年将进一步减少至0.12公顷(表7.10)。

第二,灌溉面积增长减缓,人均水浇地面积减少。灌溉是提高单位面积产量的主要措施,许多良种的选用和化肥的施用均需以灌溉为基础。本世纪50年代以前,灌溉面积增长较慢,50年代以后增长迅速,由1950年的 94×10^6 公顷增加到1980年的 236×10^6 公顷;相应地,人均水浇地面积由0.037公顷增加到0.053公顷,提高了43%(表7.11)。水浇地的迅速增长有赖于

表 7.10 世界粮田面积,1950—1980年及2000年预测值

年 份	总面积(106 公顷)	人均(公顷)	每 10 年人均变化(%)
1950	593	0.23	
1960	651	0.21	- 8
1970	673	0.18	- 15
1980	724	0.16	- 11
1990	720	0.14	- 16
2000(预测)	720	0.12	- 15

(资料来源：Lester R. Brown 主编：《世情报告》1990.)

表 7.11 世界灌溉面积，1950—1980 年和 2000 年预测

年 份	灌溉总面积(106 公顷)	人均灌溉面积(公顷)	10 年内人均变化(%)
1950	94	0.037	
1960	136	0.045	+22
1970	188	0.051	+13
1980	236	0.053	+4
1990	259	0.049	- 8
2000	279	0.045	- 8

资料来源：同表 7.10。

许多大水库的修建、大规模的河流改向工程以及农户的自备井提取地下水，这些方面均投入了大量的资金。但是自 1980 年以来，经济上最有吸引力的大水库大多已经建成，新的灌溉工程减少，水浇地增长开始减缓，并低于人口增长的速度，人均占有水浇地面积开始稳步降低，而且幅度相当大，大约每 10 年减少 8%，这是粮食生产中引人注目的新趋势。这一趋势与上文所述世界粮田面积人均占有量下降的趋势同步，这可能是 80 年代后期世界市场粮食上市量增长缓慢的主要原因。

值得注意的是上述水浇地面积的增长和世界粮田面积的增长均符合 S 型增长曲线，而且其他增产因素的增长也先后在 90 年代达到 S 型曲线上方的转折点，包括化肥的使用量和高产良种的增产效应。

第三，化肥使用的增长率减慢。农业专家认为化肥是本世纪中叶以来农业增产的发动机，全世界化肥的消费量从 1950 年的不足 14×10^6 吨增加到 1980 年的 143×10^6 吨。有人作这样的估计，如果切断化肥的供应，则世界粮食总产量将会暴跌 40% 以上。化肥使用量的增加和优良品种的推广是相互促进的，也是粮食增产的两种重要手段。多数优良品种需要较多的肥料，对化肥的响应率（即单位重量肥料增产粮食的数量）较高，但这个响应率有一个最佳范围，超过这一范围以后，粮食的增产在经济上变得不可行，甚至会在过度施肥的情况下造成减产，而且多余的化肥还造成环境污染。因此，当所有适宜的土地都推广了对肥料响应良好的品种以后，化肥使用量的增长就开始减慢，粮食增产也开始止步不前，许多产粮大国都经历过这样的过程。如美国从 1950 年至 1980 年化肥施用量增加了 5 倍，但此后便开始下降，1989 年的化肥施用量略低于 1981 年。原苏联对化肥使用实行补贴政策，农民过量地使用廉价的化肥。农业改革以后化肥逐渐接近国际市场价格，可能使今后

几年内化肥施用量大幅度减少。许多发展中国家的化肥施用量也在减少，例如印度和中国的谷物化肥响应率和美国已十分接近（见表 7.12），这意味着化肥使用量的增长行将减缓。

第四，绿色革命未能创造更大的奇迹。引进谷物（水稻、小麦和玉米）的科学品种或选育的变种，同时施以足够的化肥和充分的灌溉，使其产量大幅度增长的技术，被大众传媒称为绿色革命。其关键技术是在合适的土地上引进良种，配合施用化肥、农药与灌溉，也就是土、种、水、肥的配合使单产大幅度提高。

表 7.12 世界四大产粮国的谷物产量和化肥用量（1986）

国 家	谷物产量(10 ⁶ t)	化肥用量(10 ⁶ t)	每吨化肥生产谷物(t)
中 国	300	16.9	18
印 度	137	8.5	16
前苏联	202	25.4	8
美 国	314	17.8	18

资料来源：同表 7.5

广义言之，历史上早已发生过几次绿色革命。第一次绿色革命可追溯到 1500 至 1800 年，其特点是几种主要粮食作物（小麦、稻米、谷子和薯类）在世界范围内传播，粮食大幅度增产，世界人口亦显著增加。第二次发生在 1850 至 1950 年间，由于较广泛地推广了化肥的使用和灌溉技术，粮食生产与养殖业又有可观的发展。第三次发生在第二次世界大战之后，大约在 1950 至 1970 年间，主要是美国和西欧、北欧等发达国家选育和杂交出优良的作物和家畜品种，较高产而且更能抵抗病虫害。第四次才是传媒广为宣传的绿色革命，始自 1967 年，这是经过 30 年遗传育种的研究和试验以后，专门为热带与亚热带地区培育了新的高产速生矮化水稻和小麦品种，由于其茎秆矮壮足以支持硕大的谷穗而不致倒伏。在充分的化肥、灌溉与农药的配合下，可比传统品种增产 2 至 5 倍，而且因生长期较短，可以一年 2—3 熟。

绿色革命取得了很大的成功，1960 年代中期至 70 年代初期，凡是引进改良品种的发展中国家，小麦和水稻均获得可观的增产。印度的小麦产量在 1967 至 1970 年之间增产了 1 倍，哥伦比亚的水稻增产 2 倍，其他国家如菲律宾、马来西亚、印度尼西亚和斯里兰卡等国的水稻也获显著增产。设在墨西哥的国际玉米与小麦改良中心领导人博洛格(N.E. Bor laug)为此荣获 1971 年诺贝尔和平奖（绿色革命的另一个重要研究机构是设在菲律宾的国际水稻研究所）。当时的印度总理英迪拉·甘地非常乐观地宣称，印度从此不再需要从美国进口粮食了。

然而，绿色革命的进展很快就达到了 S 型增长曲线的上部转折点，增产的幅度逐渐减小，世界粮食单产由 60 年代增长 26% 至 70 年代减少呈 21%，80 年代为 20%。这种趋势反映了绿色革命的局限性：首先，优良品种要有水分的保证，其需水量为传统品种的 4 至 7 倍。因此，绿色革命只能发生在雨水充沛或能引水灌溉的地区。其次，这些改良品种一般需要大量化肥，尽管 50 年代以来世界化肥产量增长迅速，但发展中国家的化肥使用量所占份额很小，只及世界化肥产量的 20—25%。有人在 70 年代初曾作估计，如果 1970—2000 年期间要在世界范围内满足良种对化肥的需求，则世界化肥产量需增

加 2 倍，所需投资约为 3250 亿美元，而且大部分应投在发展中国家。即使他们能筹集到如此庞大的资金，那里的贫苦农民也无力购买那么多的化肥。因此，绿色革命所创造的奇迹很快就被人口膨胀淹没了。

第五，土地退化等全球性环境问题造成粮食减产。这些环境问题包括土壤侵蚀、土壤盐渍化和水涝、空气污染和全球性气候变暖等方面，兹分述如下：土壤侵蚀上文已经述及目前全世界表土的侵蚀量为每年 24 亿吨，每 10 年的侵蚀量就达 2400 亿吨，相当于我国全国耕地的表土完全被侵蚀。农学家德雷涅（H.Dregne）根据作物减产的程度把土壤侵蚀分成三级：轻度侵蚀——单产减少 10% 以下；中度侵蚀——单产减少 10—50%；强度侵蚀——单产减少 50% 以上。表 7.13 所列数据表明，各大洲土壤均已受到程度不同的侵蚀，但发达地区受侵蚀程度较轻，发展中地区受侵蚀程度较重。

表 7.13 1970 年代末期各大洲土地退化估测

大 陆	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	合 计
	(占地表面百分数)			
非 洲	60	23	17	100
亚 洲	56	28	16	100
澳 洲	38	55	7	100
欧 洲	69	25	6	100
北美洲	70	23	7	100
南美洲	73	17	10	100

（资料来源：同表 7.5）

土壤侵蚀使肥沃的表土层乃至整个土壤层流失，造成减产乃至绝收。美国科学家曾对土壤侵蚀导致的减产进行研究，1 英寸（2.54 厘米）表土层的流失平均使玉米和小麦减产 6%。如用这个参数估算全世界因土壤侵蚀所造成的减产，每年流失表土 240 亿吨，相当于 6100 万公顷土地 1 英寸厚的土层。以世界谷物平均单产每公顷 2.5 吨计，则该面积上 6% 的产量损失约合 900 万吨。另一种推算方法是整个耕作层的流失造成谷物绝收，如以通常耕作层的厚度 7 英寸（约 18 厘米）计，240 亿吨土壤相当于 900 万公顷的耕作层，其产量损失约合 2300 万吨。这里，姑且采用前一个较保守的数字。

土壤盐渍化和水涝 上文已经说明，这两种现象多因不合理的灌溉所引起，由此导致减产的农田占水浇地面积的 24%，随着盐渍化与水涝的发展，作物产量逐渐降低，最后往往在几十年内因无利可图而弃耕。假定这两项使水浇地每年减产 1%，则全世界 18000 万公顷水浇地每年损失的谷物约为 110 万吨。

空气污染 主要来自汽车尾气（西方工业化社会）与燃煤（东欧及中国）所排放的 SO_2 、 NO_x 与 O_3 等。科学家对这些有毒气体的田间试验表明，其造成的谷物产量损失约为 5—10%。受空气污染最严重的地区北美、欧洲和中国 1987 年的谷物总产量为 9.13 亿吨，若按 5% 计算，损失达 4600 万吨。化石燃料的大量消费是近 40 年发生的，据此可以假定世界谷物因受空气污染造成损失的增长率为每年 100 万吨。

全球变暖 尽管温室效应对世界谷物生产的影响仍有待研究，但 1988 年夏季的酷热（近百年来最热的夏季）造成的粮食减产给我们提供了线索。

这一年美国粮食比 1977 年减产 27% (7400 万吨)，使其粮食生产在历史上第一次低于消费需求；同年前苏联减产 8% (1600 万吨)、中国减产 2% (700 万吨)。三国合计减产 9700 万吨。虽然还不能肯定这完全是温室气体增加所造成的，但是，气象学家认为，如果温室气体继续积累，则象 1988 年那样炎热夏季出现的频率肯定将会增加。上述各项因环境退化而导致的世界谷物生产损失总结于表 7.14 中。该表所列数据表明，土地退化是造成世界谷物产量损失的主要原因，每年因此减产约 1200 万吨，加上因空气污染等原因造成对作物的损害，每年减产共约 1400 万吨。而近年来由于世界耕地面积的增加已趋停止，主要的增产途径首先依靠化肥的使用，每年化肥使用量大约增加 300 万吨，以每吨化肥增产粮食 7 吨计，每年可增产粮食 2100 万吨；其次依靠扩大灌溉面积，每年

表 7.14 环境退化造成的世界谷物产量损失

单位：百万吨/年

一、土地退化		二、作物损害	
1. 土壤侵蚀	9	1. 空气污染	1
2. 次生盐渍化与水涝	1	2. 水灾	} 1*
3. 牛粪与秸秆用作燃料使土壤有机质减少	} 2*	3. 酸雨	
4. 游耕周期缩短		4. 紫外线增强	
5. 重型机械压紧土壤		总计	14

注：*因缺乏资料，仅为粗略估计数

(资料来源：同表 7.10)

约增加 230 万公顷，以每公顷水浇地平均增产粮食 1.5 吨计，共增产约 300 万吨；加上其他的增产手段估计每年增产 500 万吨。上述三项每年增产粮食约 2900 万吨，从中减去环境退化造成的损失 1400 万吨，实际上每年净增产粮食 1500 万吨，即世界粮食的平均年增长率仅为 1%。但世界人口的平均年增长率却为 1.7%，所需粮食为 2800 万吨，差额相当大。这也就是世界粮食贮备难以恢复的主要原因。

复习思考题

1. 从全球角度考虑，土地还是一种丰富的资源吗？
2. 略述各大洲耕地面积消长的趋势。
3. 城市化对土地资源有哪些影响？
4. 当前土地退化主要表现在哪些方面？
5. 简述农药的定义和分类。
6. 试述农药迅速发展的主要原因。
7. 简述农药对环境的影响。
8. 简述农药在土壤环境中的迁移、降解和残留。
9. 试述当今世界粮食增产上的主要问题。

第八章 岩石圈与非再生资源

第一节 岩石圈与自然资源

一、地球内部的圈层构造

岩石圈是人类生存环境中最下面的一个圈层，又是地球内部各圈层的最外层。

众所周知，地球的平均半径为 6371 公里。地球物理学研究揭示，从地心向外，可以分为以下几个圈层（图 8.1）：

1. 固态内核：是地球的核心部分，呈固态，或认为因受超强压力[（3.33—3.67） $\times 10^{11}$ Pa]作用使原子壳层破坏而呈超固态，比重达 10—12g/cm³，温度达 4000—4500 。内核的半径约 1225 公里。

2. 液态外核：厚约 2250 公里，温度约 3000—4000 ，压力约（1.5—3.0） $\times 10^{11}$ Pa，密度约 6—10g/cm³，据推测，由液态铁组成，其中可能含镍约 10%，并有大约 15%较轻的元素，如硫、硅、氧、钾和氢等存在。

以上两部分合称地核，其质量约占地球全部的 33%。

3. 地幔：位于地核与地壳之间的构造层，厚约 2860 公里，主要由橄榄岩类组成，即富含铁、镁的硅酸盐岩石，与其上的地壳成分不同。根据地震波速在 400 和 670 公里深度上存在两个明显的不连续面，可将地幔分为三部分：

上地幔，地壳以下至 400 公里深度。地幔的顶部和地壳刚性较好、温度较低，这部分称为岩石圈，其厚度不甚均匀，海洋下较薄，洋中脊最新部分仅 6—8 公里，最老部分约 100 公里。大陆上较厚，约 100—400 公里。岩石圈以下温度较高而刚性较弱，能缓慢变形，这部分称为软流层；过渡层，深度在 400—670 公里之间；下地幔，深度在 670—2891 公里之间，成分与构造比较均匀。地幔中存在着物质的对流：一方面，洋壳板块向下俯冲而逐渐消减，另一方面地幔下部物质又沿某些特殊的“通道”向上运动，形成地（幔）柱，或称地幔羽。地幔中温度约 1000—3000 ，压力约（2—100） $\times 10^5$ Pa，岩石密度约 3.5—4.5g/cm³。

4. 地壳：包裹着整个地球内部的薄壳。质量只占全球的 0.2%。厚度不均匀，洋壳极薄，仅 2—11 公里（包括海水），平均约 7 公里，密度 3—3.1g/cm³，主要由镁铁质火成岩，即玄武岩和辉长岩组成，上覆极薄的深海沉积物；陆壳较厚，约 15—80 公里，平均 35 公里，密度 2.7—2.8/cm³，由火成岩、变质岩和沉积岩组成，因此其成分不均匀。地壳与地幔之间地震波和传导速度有突然的变化，这个界面称为莫霍面。

地壳就其厚度而言仅及地球半径的 5‰，形象地说，就象一只苹果的外皮那样薄薄的一层。

图 8.1 地球内部各圈层

（据 Strobach 和 Loper（1985），引自 Strobach（1991）。）然而正是这个薄层内包含了大陆与海盆，也是大陆与海洋沉积物、海洋盐类、大气圈气体、海洋、陆地与大气中一切自由水的源泉。同时，它还是人类所需各种化石燃料和矿物原料的储藏所。

自从五千年前人类进入青铜时代以来，对岩石圈的需求与干预愈来愈大。钻探、采掘、抽取与灌注等作业从各方面对岩石圈施加影响。本章将从

岩石圈中矿物与燃料的供应前景以及人类活动对岩石圈的影响与其生态学后果两方面进行讨论。

二、自然资源及其分类

自然资源就是自然界中能被人类利用的物质和条件的总称。这一定义隐含着—个历史的前提，即自然资源的范畴受历史条件的制约。在不同生产力水平下，人类对物质和条件的需求以及开发利用某些物质与条件的可能性也有所不同。在古代生产力水平较低下时，许多物质和条件或未被发现和认识，或不能为当时的技术水平所利用，因而不被当作资源。随着生产力的发展，资源的范畴也在逐步扩大。

法国生态学家 F. Ramade 从生态学观点对资源定义如下：资源就是生物体、群落和生态系统所必须的能量或物质的某种形式。对人类而言，资源就是为了满足个人和社会在生理上、社会经济上和文化上的需求所必须的任何能量和物质。具体地说，资源实际上包括了他所列举的所有 5 个生态学基本变量，即：能量、物质、空间、时间和多样性。

自然资源通常分为非再生资源（或称不可更新资源）和可再生资源（或称可更新资源）两大类。前者包括各种化石燃料与矿物，后者是指生物、水和土壤等在较短时期内能够再生的资源。此外，象太阳能和风力等在被利用以后其数量和强度并不减弱，取之不竭，也可视作可再生资源。也有人把它们列作另一类：取之不尽的资源。

根据自然资源的性质，有人把它分作三大类：生态资源（或称恒定资源，如阳光、气温、水等）、生物资源（包括生物和土壤）和矿物资源。这种分类法的前二类相当于可再生资源，后者相当于非再生资源。

关于可再生资源，在前面有关章节中已作了适当的论述。本章所涉及的主要是存在于岩石圈中的非再生资源，而区主要涉及能源与矿物资源，二者在人类所开发的资源中占有特殊地位。尽管化石燃料和某些含金属的沉积物有着生物起源，但它们均属非再生资源。二者之间又存在着根本的差别：含于煤、石油和 U^{235} 中的能量一旦被燃烧或裂变释放以后，就按照热力学定律永远失去其有用的形式；矿物元素却永远不会因被使用而消失，即使被氧化也只不过是改变其化学状态而已，而且有些人工合成的有机物料具有极强的抵抗生物地球化学降解的能力，长期存留在环境之中。

从这一观点出发，在自然资源之中能源最为重要，它被使用以后既不能再生也不能再循环。另一方面，只要有足够的廉价能源，现有高品位的任何矿床即使耗竭亦不足虑，因为可以消耗更多的能量从低品位矿床乃至普通岩石中去提取金属。三、非再生资源生产周期理论从绝对的意义上说，地球的矿物资源几乎是无穷无尽的。只要有足够的手段，就可以从任何一块岩石或泥土中分析乃至提炼出周期表上大多数元素。以人类最熟知的铁元素而言，其含量占地球重量的 34.6%（表 8.1），合 2.1×10^{21} 吨，等于火星质量（ 6.4×10^{20} 吨）的 3 倍多。虽然地球中的铁元素大部分集中在地核中，非人类所能取得。但是，地壳中含铁 5.0%（表 8.2），合 6.0×10^{17} 吨，为目前已探明铁矿储量的 400 万倍。

表 8.1 地球的平均组成

序列	元素	符号	重量%
1	铁	Fe	34.69
2	氧	O	29.5
3	硅	Si	15.2
2	氧	O	29.5
3	硅	Si	15.2
4	镁	Mg	12.7
5	镍	Ni	2.4
6	硫	S	1.9
7	钙	Ca	1.1
8	铝	Al	1.1
9	钠	Na	0.57
10	铬	Cr	0.26
11	锰	Mn	0.22
12	钴	Co	0.13
13	磷	P	0.10
14	钾	K	0.07
15	钛	Ti	0.05

(引自 Strahler 等, 1974)

表 8.2 地壳中含量较多的元素

元素	符号	重量%	体积%	原子数%
氧	O	46.6	93.8	62.6
硅	Si	27.7	0.9	21.2
铝	Al	8.1	0.5	6.5
铁	Fe	5.0	0.4	1.9
钙	Ca	3.6	1.0	1.9
钠	Na	2.8	1.3	2.6
钾	K	2.6	1.8	1.4
镁	Mg	2.1	0.3	1.8

(据 Strahler 等, 1974.)

然而, 由于技术水平、能源供应和经济效益的限制, 我们还不能从一般岩石中提取人类所需的元素。如果从陆地岩石中提取 1 吨铁需要处理 20 吨岩石, 提取 1 吨铬、镍、铜或锌各需 1—2 万吨岩石, 而提取 1 吨金则需 2.85 亿吨岩石 (表 8.3), 这是无论如何也难以做到的。幸而, 由于地球内部的岩浆活动与地表风化过程等内外营力的作用, 一些元素相对地集中于某些矿物或岩石中, 形成各类矿床, 使开采与提炼这些元素在技术上与经济上成为可能。例如, 铁矿开采的工业品位 (品位是指矿石中 useful 矿物或有用组分的单位含量, 常用百分率、g/t 或 g/m³ 等单位表示) 为 30%—40%, 低于此品位则在当前的技术与经济条件下不宜开采。

表 8.3 提炼一吨金属需开采的最低品位矿石与普通岩石的比较

金属	(1)地壳中的丰度 (百万分数)	(2)陆地岩石平均 所需吨数	(3)最低品位矿石 所需吨数	(4)矿石中金属含量为背景 值的倍数(2 ÷ 3)
铝	83000	12	4	3
铁	48000	20	3	6
钛	5300	190	100	2
锰	1000	1000	3	330
钒	120	8300	100	83
锌	81	12000	40	300
铬	77	13000	3	4300
镍	61	16000	100	160
铜	50	20000	200	100
铅	13	77000	30	2570
铀	2.2	455000	670	680
锡	1.6	625000	6000	104
钨	1.2	830000	200	4150
钼	1.1	910000	400	2275
汞	0.08	12500000	200	62500
银	0.065	15000000	10000	1500
铂	0.028	36000000	330000	110
金	0.0035	285000000	125000	2280

(引自 D.R.Coates : 1981.)

任何一种矿物资源在地壳和地球中的储量都是固定的，但是对资源的调查和勘探总要有一个过程。因此，矿物资源一般均可分为已查明和未查明的两部分。已查明的资源中，其经济价值又各不相同。根据这一思想，有人提出矿物资源的一般分类法，如图 8.2 所示。它把矿物资源分为 5 类，按其探明的程度与经济可行性分别为：

图 8.2 矿物资源分类 (美国地质调查所和美国矿业局, 1976)

储量 (reserves)：某一个时期内已探明在经济上和法律上可供开采以提炼有用矿物或能源产品的资源。

边界储量 (marginal reserves)：已探明资源中经济上可采性处于边界状态的部分，包括经济、技术或法律因素发生变化后方有可能开采的资源。

亚经济储量 (subeconomic reserves)：已探明资源中不符合储量或边界储量标准的部分，但若有充分的经济上或技术上的变革有可能变成储量。

前景性资源 (hypothetical resources)：在已知地质情况的矿区有理由期望其存在而未发现的物质。

推测性资源 (speculative resources)：未发现的物质，可能是一类已知的矿床存在于一种有利的地质背景中但尚未被发现，也可能是一类有待认识的未知矿床。

对于任何一个矿床，乃至任何一种非再生资源，从其被发现、开采，直至采完，构成一个生产周期。假定某种非再生资源从开始开采到某一时刻 t

所开发的总量为 Q_p ，显然，随着时间的延长， Q_p 逐渐接近该资源的储量 Q ，这时该资源即被耗尽。资源的生产率 P 为：

$$P = \frac{Q_p}{t}$$

P 代表某一时段 t （例如 1 年）所生产的燃料或矿物的数量 Q_p 。若将生产率对时间作直角坐标图，时间从开始开采直至矿床采尽为止，作成一条平滑曲线，该曲线表示产量的变化：

$$P = \frac{dQ_p}{dt}$$

该曲线表明， P 开始时呈准指数增长（图 8.3），直至增长率：

$$V_p = \frac{dP}{dt} = \frac{d^2Q_p}{dt^2}$$

在拐点处达到最大值。随后 V_p 逐渐减小，并当 P 本身达最大值时， V_p 等于零。过了这一点以后， P 就以同曲线上上升部分对称的方式减小。当 V_p 变成负值时，起初其数值较大，然后逐渐下降至零。当 t 趋于 ∞ 时，开采总量趋于 Q 。因此，

$$Q_\infty = \int_0^\infty P dt$$

此即 P 曲线与时间轴之间的总面积。

我们把一个单独矿床或世界范围内某种物质的资源总量的有用期限（useful period）定义为该种物质总量开采 80% 的持续时间，即从产量占资源总量 10% 开始至 90% 结束，也就是 $0.1Q_\infty$ 至 $0.9Q_\infty$ 之间的时期。

同样重要的是该曲线还一方面给出了资源探明速率随时间的变化：

$$D = \frac{dQ_d}{dt}$$

式中 Q_d 为截至 t 时刻已探明的资源总量；另一方面还能表明已探明储量（即已探明但尚未开发的资源）的变化：

$$Q_r = f(t)$$

数学上与统计学上的研究均表明，已探明资源数量 Q_d 和已开发资源数量 Q_p 随时间的变化均可以用图 8.4 中的逻辑曲线即 S 形曲线表示。在任一时刻 t ：

而 Q_d 、 Q_p 与 Q_r 之间的关系为：

$$Q_d = Q_p + Q_r$$

显而易见，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $Q_p \rightarrow Q_d$ ，而 $Q_r \rightarrow 0$ 。而且曲线 Q_d 与 Q_p 之间被时间间距 t 所分开，这是一种必然的结果，也就是说，勘探必先于开采。

图 8.5 中另一特点是曲线 D 与 P 的交叉点位于最高发现率与最大开采率二者的中间。在时间上超过这点以后，开采率仍继续增加，但发现率已经下降。该交叉点也是最大探明储量 Q_r 出现时间的标志。

还应注意图 8.3 $P = d^2P/dt^2$ 曲线上生产率达到极大值时的那一点（即拐点，这时 $d^2P/dt^2 = 0$ ）。过了这点以后，市场需求（指数曲线）与实际生

产率之间的差距增大。若要维持指数增长，就要寻求补偿措施——寻找替代的原材料和求助于别的能源。当然，更好的办法是降低消费水平以减少能耗。在这种情况下，资源的转换应远在 P 曲线达到极大值之前就开始，因为现代工业文明要开发新的能源生产系统存在着巨大的时滞。

有关资源前景、勘探和开发的统计资料均能提供曲线 Q_d 、 Q_p 和 Q （以及由此派生出其他参数）起始部分的数据。如果所提供的信息达到了 dQ_d/dt 曲线的极大值，则可据此估算资源的 Q 值。如果尚未达到这一点，则需根据地质资料进行估算。这样算出的 Q 值就是岩石圈中可资利用资源的总量，所算出各种资源使用期限的长短以及最高产量出现的时间也相当准确。图 8.6 所示美国 1900 至 1980 年间原油勘探与生产的实际资料可以作为上述生产周期理论的验证。

图 8.5 资源探明率 $D = dQ_p/dt$ 和开采率 dQ_p/dt 随时间的变化（据 F.Ramade, 1984, p.29）

图 8.6 1900—1980 年美国原油探明率与生产率的变化（图中实线为每年的实测值，虚线为导数）（据 Hubbert, 1969, p.178, 引自 F.Ramade, 1984, p.31）

第二节 岩石圈中的能源和矿物资源

一、能源的分类

上文已经指出能源对人类的特殊意义。事实上，人类社会的进步也是对能源与物质消费量持续增长的过程。据研究，原始社会人类的能源消费极其有限，只限于食物的消费。随着文明的进步，在生活和生产上所消耗的能量急剧增加，表 8.4 所列数据表明，现代化工业社会人均的能源消费量为原始社会的 100 多倍。而且，当今世界各地能量消费水平差异很大，发达国家与发展中国家人均的能源消费量的差别也达几十倍至上百倍。

迄今人类所利用的能源种类不过十数种，从原始社会就开始利用的生物能（包括薪柴、畜力和燃烧畜粪）到后来利用的煤炭、石油、天然气、水电以及风能、地热能、潮汐能、核能、太阳能等。人们从不同的角度对能源进行多种多样的分类，例如：

1. 按能源的产生和再生能力分为可再生能源和不可再生能源两大类。前者包括太阳能、水力、生物能、风能、潮汐能和地热能等；后者包括一切化石燃料与核裂变燃料等。

2. 按能源的使用方式分为一次能源与二次能源。前者指直接从自然界取得而不改变其原有形态的能源、亦称作初级能源，包括一切直接使用的可再生能源和不可再生能源；后者是指一次能源经过加工，转换成另一种形态的能源，如火电与煤气等。但有时一次能源和二次能源之间并无截然的界线。

3. 按能源的来源分为：来自太阳的辐射能，通过植物光合作用的转化而得以储存，包括化石燃料在内；来自地球内部的能量，如地热能和核能；以及因地球等天体引力形成的能量，如潮汐能。

表 8.4 历史上各时期人均能量消费的增长（单位：每人每日千焦耳）

年代	文明阶段	食物*	家居	工农业	交通运输	总计
10 ⁶ 年以前	旧石器时代早期	8400**				8400
10 ⁵ 年以前	旧石器时代中期	12600	8400			21000
10 ⁴ 年以前	新石器时代早期	16700	16700	16700		50100
600 年以前	中世纪末期(西北欧)	25100	50000	29300	4100	108000
100 年以前	工业社会早期	29300	134000	100000	59000	322300
公元 1970 年	技术社会	42000	276000	380000	264000	962000

注*：包括生产肉奶制品所消耗的能量

**：原单位为千卡，换算时均已取整。

（资料来源：E.Cook，1975 年，引自 F.Ramade，1984 年）

4. 按能源使用的历史分为常规（或传统）能源和新能源，前者常指煤炭、石油、天然气、水力和生物能等；后者指核能、地热能、海洋能（潮汐能和波浪能）、太阳能和沼气等。此外，风能的利用自古有之，但近代高效风力发电机的集群利用又使风能成为新能源的一种。

二、世界能源供求的现状与前景

从人类的全部历史来看，化石燃料大规模使用的历史尚不足 200 年，人类长期以来使用的燃料是薪柴、木炭、作物秸秆和畜粪。有资料表明，直至 1895 年，工业发达的美国与欧洲大陆的能源结构中木材仍占 90%。只是进入

20 世纪以后，煤的地位才开始占据主导。在木材丰富的北美，煤在能源供应中的比重上升至 70%，木材则下降至 20%。同期世界商业能源组成中煤炭已占 90%。这个时期煤炭的地位至高无上，君临天下（“coal was the king”）。从 20 年代开始，石油的开采大幅度上升，煤的重要性开始下降，到 1950 年，石油和天然气二者占美国能源供应的 60%。即使曾经有过 1973 年的“石油危机”（该年石油在世界能源供应中所占比例下降至 43%），但至 1975 年石油和天然气二者仍占世界能耗的 67%。总之，从 20 年代至 70 年代的半个世纪之中，石油产量急剧增长，构成了能源供应的“石油时代”。从 1929 年至 1971 年，世界煤炭产量增长了 70%，而同期石油产量增长了 1000%。人类对能源消费的增长速度是惊人的，上文已经谈及从远古至现代工业社会人均能耗的增长情况。就全人类而言，有人作过估计，自从 700 年前人类开始利用煤炭以来，到 1860 年全人类共消费了煤炭约 7×10^9 吨，而从 1860—1970 年的 110 年间共消费了 133×10^9 吨，为过去 700 年的 19 倍。如果把所有能源均包括在内，则从远古至 1860 年全人类所消费的能源约为 35×10^9 吨煤当量（英文缩写为 t.c.e.），大约等于 1Q（注：1Q = 36.62×10^9 t.c.e.）。而 1860—1970 年的消费量约为 10Q，1980 年全世界的能源消费量即为 0.28Q。据此估计，本世纪的最后 20 年内的能源需求量约为 20Q。从历史上看，世界能源消费不仅呈指数增长，而且增长率愈来愈大。19 世纪中期世界能源消费的年增长率约为 2%，至 20 世纪初增长率为 3.5%，而 60 年代的平均年增长率为 5.6%，如果按后一个数字外

表 8.5 世界已探明的商业性能源储量，1987

（单位：拍焦耳 PJ，1PJ = 1015 焦耳 = 947.8×10^9 Btus）

地 区	石油		天然气		煤			世界 总储量
	储量	R/P ²	储量	R/P	硬煤储量	软煤储量	RP	
全世界	5173410	40	4246221	60	30016404	7294196	390	46730231
发展中国家	4484707	62	2014035	155	20889320	1883035	658	29271097
石油输出国	4274759	72	1780087	187	83869	40008	269	6179023
欧佩克国家	3878753	82	1639048	226	46721	30600	330	5592122
非欧佩克国家	396006	32	141339	62	37148	9408	206	583901
石油进口国	209948	16	233648	67	20805451	1843027	663	23092074
非洲	16371	26	277321	699	1745882	977	429	1790962
亚洲及大洋洲	151414	17	166183	72	18762143	1805405	700	20885145
拉丁美洲	42163	12	39733	34	297426	36645	467	415967
工业化国家	688703	11	2232186	39	9127084	5411161	238	17459134
经济合作与发展组织国家	342082	11	613374	21	5351810	2950502	222	9257768
北美	233795	10	322178	15	3259972	1471440	201	5277385
西欧	105433	13	235266	34	801754	840992	174	1983445
太平洋	12854	11	55930	63	1290084	638070	452	1996938
非经济合作与发展组织国家	346621	13	1618812	57	3775274	2460659	262	8201366
中欧	11611	14	23265	14	872643	548139	164	1455699
前苏联	334960	13	1595547	59	2902640	1912520	319	6745667

注释：

单位换算：1 百万吨石油当量 = 41.87PJ；10 亿立方米天然气 = 38.84PJ；1 百万吨煤当量（硬煤）= 27.91PJ；1 百万吨煤当量（软煤）= 13.96PJ。

R/P：已探明储量与 1989 年开采量的比率。

阿尔及利亚、厄瓜多尔、加蓬、印度尼西亚、伊朗、伊拉克、科威特、利比亚、尼日利亚、卡塔尔、沙特阿拉伯、阿联酋和委内瑞拉。

指油气出口占其总出口收入 30% 以上的国家：阿富汗、安哥拉、巴林、玻利维亚、文莱、刚果、埃及、墨西哥、荷属安的列斯、阿曼、叙利亚、特立尼达和多巴哥、也门。

也包括石油自给并有部分出口的国家，但出口量低于出口总收入的 30%。

加拿大和美国。

不包括土耳其，它属于亚洲石油进口国之列。

澳大利亚、日本和新西兰。

引自世界资源研究所主编《世界资源报告》1992—93，1992 年，牛津大学出版社。资料来源：WorldEnergyConference（WEC），1989SurveyofEnergyResources（WEC，London，1989）。UnitedNationsstatisticaloffice，EnergystatisticsYearbook（UnitedNations，NewYork，1991）。推，则公元 2025 年全世界的能源需求将达到 200—400Q。这个数字可能并没有给读者留下任何印象，但只要指出岩石圈中所有化石燃料的总储量约为 250Q 这一点即足以想象问题的严重性和紧迫性了。

表 8.5 可视作世界化石能源储量与开采前景的一览表。表中分别列出了全世界和各地区石油、天然气和煤的储量，以拍焦耳（即 10^{15} 焦耳）为计量单位。表中同时列出了这几种能源的储采比 R/P，即已探明储量与 1989 年开采量的比值，亦即在年产量不再增长情况下尚可开采的年数。可以看出，这个数字是极其概略的，因为无论何种能源的开采量均仍在逐年增加，而对储量的估计亦各不相同。现将这几种能源的情况分述如下。

1. 石油 1970 年石油曾占世界商业能源的 48%，受“石油危机”的影响，此后比重有所下降，1973 年占 43%，现仍呈下降趋势。现在普遍认为用石油作能源是人类极不明智之举：这种本来应是极其宝贵的化工原料不应用作能源，它又是各类能源中储量最少而且分布最不均匀的。若按 1973 年的消费量 2.85×10^9 吨计，其探明储量仅够开采 48 年，这还未考虑 70 年代石油消费的高增长率（每年增长 12%）。即使从石油开采的全部历史来看，1890 - 1970 年的平均年增长率亦达 6.94%，即每 10 年产量增长一倍。按照这样的增长率推算，则现有石油的探明储量可望于本世纪末以前采完。

近年来陆续发现了一些新的大油田，但是新的油田往往在更深的地层和离岸更远的近海，而且从世界范围来看，每勘探 1 平方公里所发现的石油储量也呈减少趋势，说明石油勘探的前景不甚光明。就以公众曾寄予厚望的北海油田而论，其总储量虽称巨大，达 2.5×10^9 吨，但和欧洲 1985 年的消费量 0.7×10^9 吨相比，也仅够其 4 年之需。又如阿拉斯加的大油田也仅够美国 12 年之需。因此，世界石油耗竭的前景似已属定论。

世界石油总储量通常有两种估计，一是美国标准石油公司 Ryman 的数

字： $Q = 2100 \times 10^9$ 桶，约合 330×10^9 吨，或大约为 $15Q$ 。他的估计有两个前提，一是包括了现有技术能够开采的一切近海石油，二是开采的回收率为 40%（现有回收率仅略高于 30%）。按照这个数字，石油的有效开采期限（ $0.8Q$ ）为 58 年（1962—2020），开采峰值出现在 1991 年。另一种是 Hubbert（1969）的估计， $Q = 1350 \times 10^9$ 桶，约合 215×10^9 吨，或大约等于 $10Q$ 。其有效开采期限为 64 年（1965—2029），开采峰值出现于 2000 年（图 8.7）。值得注意的是虽然这两个储量数字差距很大，但它们的有效开采期限和开采峰值出现的年份却相差不远（9 年）。

2. 天然气 主要成分为甲烷（占 75%—79%），其次为轻质烃（丙烷、丁烷和戊烷），并含有痕量 N_2 和硫化物，是一切化石燃料中污染最轻者。世界天然气总储量也相当大，但有关储量的估计数字差别很大，从 150×10^9 吨煤当量至 1500×10^9 吨煤当量不等，前一数字折合 4186500PJ，与表 8.5 所列数字接近。有人认为较现实的估计数为 600×10^9 吨煤当量，约合 $20Q$ ，与石油储量属于同一数量级。但与石油相比，其分布对欧洲较为有利：大约有 10% 的天然气储量分布在欧洲，其中荷兰的格罗宁根（Groningen）储量达 2000×10^9 立方米，是世界最大的气田之一。此外，值得注意的是前苏联天然气储量十分丰富，占世界总储量的 38%，但是，总的看来，天然气的储采比 R/P 并不大，仅为 60。也就是说，其开采寿命只比石油长 20 年。

3. 油砂与油页岩 这类资源是岩石中所含一定数量的烃类化合物，具有很高的粘稠性甚至呈准固态。岩石圈中这类物质储量也很丰富，仅加拿大艾伯塔省（Alberta）的油砂田面积就达 10 万平方公里，估算含烃类 47×10^9 吨，居世界首位，约合世界石油储量的一半。委内瑞拉的奥里诺科（Orinoco）油砂田含沥青 20×10^9 吨。另有地质学家估计，马达加斯加的油砂田含烃 150×10^9 吨，远远超过加拿大，但此项估计尚有待进一步证实。

图 8.7 世界石油生产周期的两种估计

（据 Hubbert 1969，引自 Ramade 1984）

世界储量最大的油页岩在美国西部的格林河流域（Green River basin），包括科罗拉多、犹他和怀俄明几个州，1860 年修筑大陆铁路时即已被发现。据估测，该地油页岩的远景储量达 1800×10^9 桶，其中岩层厚度 10 米以上、含油量大于每吨 100 升、具有开采价值的约 117×10^9 桶，约合 20×10^9 吨。全世界油页岩的远景储量大约含油 2×10^{15} 桶，但目前有经济价值可供开采的只有约 50×10^9 吨。

油砂与油页岩的组成与石油颇不相同，因而需要特殊的提炼技术。例如油砂的技术处理常用沸水与蒸汽的混合物把吸附于惰性砂粒上的烃类分离出来，然后作进一步的加工。油页岩中所含固态烃类成分也与原油差别很大，而且还含各种氮的化合物和其他无机杂质，其提炼过程中需将岩石加热至 480℃ 以上，而且耗水量很大：每产出 1 吨粗挥发油需水 3 立方米。因此，其成本将远远高于开采煤炭。而且，油砂与油页岩处理后所剩余的大量废砂石也造成新的环境问题。

4. 煤 煤在地壳中的分布较有规律，它常出现于某些地层中并成片分布，较易勘探和制图。因此，在各类自然资源中煤的储量估算比较准确。现在引用较广的是美国地质调查所埃夫里特（Averitt）1969 年发表的数据。

他认为深度 1200 米以内厚度大于 36 厘米的煤层有 50% 可供开采。在特殊情况下也考虑深度达 1800 米的储量，不过他指出 1200 米以下地层中煤的储量最多只占地壳中总储量的 10%。

埃夫里特提供了两个数字：一是已制图的煤炭储量，为 4300×10^9 吨；二是世界煤炭资源总量 Q 为 7600×10^9 吨，其中前苏联最多，为 4300×10^9 吨，约占 3/4，其次为美国， 1486×10^9 吨，再次为中国，约 1000×10^9 吨（我国公布的证实储量为 901.5×10^9 吨），亚洲其他国家 681×10^9 吨，西欧 377×10^9 吨。

根据非再生资源生产周期理论，哈伯特（Hubbert）利用上述两个数据计算了世界煤炭的生产周期。上述较低数字计算的煤炭有用期限为 2000 年至 2200 年，生产峰值将出现于 2110 年（图 8.8 曲线 A）；上述较高数字即 Q 的煤炭有用期限为 2040 年至 2390 年，生产峰值出现在 2160 年（图 8.8 曲线 B）。根据 Q 的计算，煤炭尚可满足人类使用 400 年的需要。

图 8.8 世界煤炭生产周期。曲线 A 和 B 代表煤炭总储量的两种估计数字。曲线 C 为年增长率 3.6% 的无限增长。

（资料来源：Hubbert，1969，引自 Ramade，1984）

图 8.8 的曲线 C 是按照世界煤炭生产年增长率 3.6% 计算的，这是 1860—1965 年的平均增长率。若保持这样的增长，则世界煤炭储藏将于 200—400 年内采完。但是，如果煤炭成为唯一的化石燃料，则其年增长率肯定大得多。最近 20 年间煤炭生产的年增长率已达 6% 强，即每 11 年翻一番。若按照这一增长率，则 110 年后产量就会增长 1000 倍以上（ $2^{10} = 1024$ ）。假如迄今人类只开采了岩石圈中全部煤炭的 0.1%，则全部煤炭（ Q ）也会在 100 年内全部采完（ $0.1\% \times 1000 = 100\%$ ）。我们还可作更为乐观的假设，即 Q 为现有估计数的 10 倍，现已开采的煤炭仅占 Q 的 0.01%。若仍保持 6% 的年增长率，则全部采完的时间只能延长 30 余年。

以上是几种化石燃料的状况，人类目前利用和将来可望利用的能源还有以下几种。

5. 水力人类早就发明了水碓、水磨等水力机械和水力提水装置。本世纪以来水力发电更把水力利用提高到一个崭新的阶段。水力发电具有很多优点：无污染、运行费用很低、水库寿命一般比火电站和核电站长，而且水库还有多方面的效益等等。

世界各国均致力于水电的开发，迄至 1988 年，水电已占世界电力供应的 21% 和商业能源供应的 6%。有些国家水力发电成为其主要能源，例如，挪威所用电力几乎全部为水电，其次是瑞士，水电占全国电力的 74%，再次为加拿大，占 70%，奥地利占 67%，但就绝对量而言，美国是水力发电最多的国家，适宜修筑水电站的多数地点已被开发，水电占这个耗能大国（1989 年消费世界能源的 1/4）电力供应的 10%—14%，全部商业能源的 5%—6%。其他发达国家水电资源的开发率也较高，其中欧洲最高，达 59%，但发展中国家水电的开发率仍较低，一般不足 10%（表 8.6）。

表 8.6 所列世界各地水电资源的开发潜力是以装机容量来表示的。该表所列世界水电装机的潜力约为 22 亿千瓦，若按设备利用率 50% 计，年发电量为 97000 亿度，可以满足目前全世界对能源的需求。但实际上现在水电的

开发率只有 17%，1989 年占世界能源消费量的 2.4%。表面上看来水电仍有很大的开发余地，但事实上水电开发仍然存在很大困难和一些难以避免的缺陷。首先是许多最有利的地点已被开发，西方发达国家尤其如此。有待开发的地点多在远离能源消费地的偏僻山区，开发难度较大。其次是水电开发所需投资较大，而开发潜力最大的发展中国家恰恰缺乏资金。据世界银行预测，如果 1995 年发展中国家的水电生产要达到电力供应的 43%，则在 1990 年以前水坝建设投资需要 100 亿美元。此外，从更长的时间尺度来看，水力发

表 8.6 世界各地水电资源及其利用

地区	开发潜力 (百万千瓦)	现有开发率 (%)
亚洲	610.1	9
南美洲	431.9	8
非洲	358.3	5
北美洲	356.4	36
前苏联	250	12
欧洲	163	59
大洋洲	45	15
全世界合计	2214.7	17

(资料来源：世界能源会议，1980，引自《世界资源报告》，1987)

电还有一个往往被忽视的弱点，就是水库的寿命，由 30 年至 300 年不等，视当地土壤侵蚀的程度而异。水库一旦被淤平，将永远失去其功能，在其上游或下游不远处修筑新的水库往往不可能。考虑到这一点，水力资源也可视作非再生资源，它将随着水库的淤塞而逐渐耗竭。事实上，北京的官厅水库已基本丧失发电能力（寿命约 40 年），三门峡水库也已损失了原来 11 亿千瓦容

6. 地热能 指地下热岩和热液中所储存的能量，现已开发利用的多为后者，通常以三种形式存在：干蒸汽（其中不含水滴）、湿蒸汽（蒸汽中含水滴）和热水，以干蒸汽质量最佳，最易开发利用。意大利早在 1904 年就在拉德雷洛（Larderello）附近开发了一口大型干蒸汽井，所生产的电力成为该国电气化铁路的主要电源。美国和日本也有规模较大的干蒸汽地热电站。但干蒸汽田较为稀少，较为常见者为湿蒸汽和热水。后二者的开发难度较大，费用也较高。众所周知，冰岛的雷克雅未克全靠地下热水给全市 8.5 万居民供热和进行温室栽培。

热岩包括三种不同类型：近地表的熔岩、干热岩和温岩。目前热岩的开发利用尚少。

目前地热能在世界能源供应中所占份额很小（与风能一起共占 0.045%），其优点是在有可能开发的地方成本比较低廉，其电力成本约为燃煤发电站的一半，或核电成本的 1/4，所排出的 CO₂ 也很少。其主要限制在于资源过于稀少，可供开发的地点不多。而且就地热蒸汽与热水而言，其更新速度缓慢，一旦开采速度过大，就会面临耗竭的前景。此外，地热资源也只是相对地“干净”，地热蒸汽与热水中通常含有硫化氢、氨气、放射性物质（例如氧）、可溶性盐类乃至有毒物质等。因此，在开发过程中同样需要注意环

境保护问题。

7. 核能 这是来自岩石圈的新能源，19 世纪末元素放射性的发现和 20 世纪初相对论的提出，为核能的利用奠定了理论基础。原子核能的释放可以通过两条途径：一是某种元素裂变为原子量较小的其他元素，一是两个轻元素的原子核聚变为一个较重元素。无论是哪一条途径，都伴随着巨额能量的释放，同时质量有所减少，所减少的质量 m 即转化为释放的能量 E ，这就是爱因斯坦著名的公式： $E = (m) C^2$ ，式中 C 为光速。

现在已投入生产的是核裂变，所用的物质为 U-235，每个 U-235 原子裂变时释放 200MeV 能量，合 3.2×10^{-11} 焦。1 克铀元素有 2.56×10^{21} 个原子，裂变时释放出的能量相当于 2.7 吨煤。不过天然铀矿中 U-235 的含量只占 0.71%（即每 140 个 U-238 原子中才有 1 个 U-235 原子），因此 1 克铀矿产生的能量约等于 19 千克煤。

地壳中铀矿的储量不多，1976 年世界能源会议和 1977 年美国的核能政策研究小组所提供的数字分别为 490 万吨和 487.6 万吨（价格为每千克 U_3O_8 不高于约 70 美元）两个数字非常接近。

迄至 1990 年，在第一个核电站投产 43 年以后，全世界 27 个国家和地区共有 428 个核电站。1989 年全世界的核电占电力供应的 19%，但其所提供的能量（6783 拍焦）只占世界能耗（310972 拍焦）的 2.18%。而这些核电站每年消耗的铀为 1 万吨（维持量）至 4 万吨（充分运行），也就是说，如果核发电量维持现有的水平，则世界铀矿储量将于 120—490 年内耗竭。因此，铀矿作为一种能源的使用周期也是不长的。

近几年来世界核电的发展已呈下降趋势，主要原因是因为基建费用超支、核废料处置问题和不断发生的安全事故，这类事故以 1986 年发生在苏联的契尔诺贝利核电站最为严重。然而远在此以前，核电站建设的速度就已放慢。美国自 1975 年以来就没有再接到核电站的订单，而且前此的 108 个订单亦被撤销。原联邦德国的能源供应中有 10% 来自核电，但是从 1975 年以来仅有一个核电站的订货，而且以前所订的八个机组亦迟迟未能动工，主要原因是来自政治上的反对。这种发展趋势使美国的核电生产在 20 世纪 90 年代有所下降。而且，由于核电站的预期寿命一般为 30~40 年，如果不兴建新的核电站，则全世界的核发电能力也将逐渐减少。

目前利用 U-235 发电的技术对铀的利用率很低，其实 U-238 如果受到核裂变时放出的高能中子攻击，就会变成同样能裂变的 U-233，理论上使铀的利用率增加 140 倍。同样原理也能使储量更为丰富的钚（Pu）变成能裂变的 Pu-239。按这种原理建造的反应堆称为快速增殖反应堆。此外，原子能利用的另一途径是核聚变，例如氢的同位素氘和氚的聚变以及氘和氚的聚变，以及另一种轻元素锂和氘的聚变，目前都在积极研究之中，这种核聚变是一种较为“干净”的能源。但有关科学家估计，核聚变从实验室走向实用还需要较长的时间才能实现。应该指出的是，无论是快速增殖反应堆还是核聚变均需消耗很高的能量，这又有赖于现有核裂变材料的储存。如果缺了这把“钥匙”，则理论上的巨大核聚变能量也将难以取得。

8. 岩石圈以外的其他能源 包括风能、海洋的潮汐能和波浪能以及太阳能等，目前在世界能源供应中所占比例虽小，但从长远看，可能是未来人类取之不竭的永久性能源。以太阳能为例，现在全球每年经生物圈转化的太阳能即为世界能耗的十几倍。而且，到达大气层顶部的太阳能更是地面的 35000

倍。如果能实现在那里对太阳能的接收、转化和传输，则人类利用的能量就几乎是无限的。

上面概述了世界能源概况，其中石油、天然气、油砂与油页岩、煤和核燃料均来自岩石圈，其他几类则来自岩石圈以外，包括水力、风能、海洋潮汐能和波浪能，以及太阳能等。从能源的过去、现在和对其未来的预测，为了现代文明的持续发展，下述两点是毋庸置疑的：

第一，人类必须把能源消费从非再生能源转化为再生能源。岩石圈内储存着巨大的能量，但是这些在亿万年地质时期内积聚起来的能源是不可再生的。另一方面，人类对能源的消费却持续地呈指数增长，这不仅是由于世界人口的增长，而且是由于人均能源消费量越来越大。因此，岩石圈中这些非再生能源终将不能满足人类不断增长的需求。更为严重的是这几种传统能源的耗竭时间将分别为今后几十年至几百年。

第二，能源浪费现象十分严重，工业化发达国家尤其如此。美国是世界上最大的能源消费者和浪费者，据统计，美国 1989 年能量消费占全世界的 24.6%，但其所消费的能量中只有 9% 属于有效利用，另有 7% 转化为石油化工产品，41% 属于因热力学第二定律（能量从一种形式转化成另一种形式时必然造成能量质量降低或数量减少）造成不可避免的损失，其余 43% 则纯属不必要的浪费。因此，人类必须学会提高能量使用的效率，以便使用较少的能量来维持较高的生活水准。

上述两点有一个共同的要求：必须尽快实现而不能延误，因为要实现从传统能源向新能源的转变本身也要消耗大量能量，许多新技术与新设备（如核聚变与太阳能发电等）都要耗费巨大能量方能实现，现存的能源储量应该用以实现这种转变。因此，未来的几十年在能源利用上可能会决定人类文明的整个进程。

三、矿物资源

人类所利用的物料大多直接或间接地来自岩石圈，人类文明史也可看作一部矿物资源利用的历史。随着文明的进步，人类所利用矿物资源的种类与数量都不断增加：远古的人类只会利用石头作为工具，经历了漫长的石器时代；大约公元前 6000 年人类首次学会从矿石中提炼金属，从铜开始，进入青铜时代；到了公元前 1600 年又学会了提炼更坚硬的铁，进入铁器时代；又过了 3000 多年，到了公元 1709 年英国人达比（Abraham Darby）发明了用焦炭作燃料熔炼铁，进入了近代的钢铁时代，钢铁成为当代一切工业的基础。

人类利用矿物资源的数量也与日俱增：原始人一生可能只需几公斤至几十公斤石头打制石器；农业社会的农民一生也只需几公斤的铁和铜制造简单的农具，现在许多发展中国家的农民仍然利用着极简单的农具；但工业化社会对矿物资源的消费却大得多，70 年代一个美国公民每年要消费钢铁 9.4 吨、有色金属约 6 吨（其中铅 7.25 公斤，主要用于汽油添加剂，现已减少）、砂和砾石 3.55 吨、水泥 227 公斤、粘土 91 公斤、盐 91 公斤，总计各种物料约 20 吨。

应强调指出，人类对矿物资源的利用也呈现着一种指数增长的趋势。据估计，1950—1975 年，四分之一世纪内人类所消费的金属量已超过历史消费量的总和。而且，根据有关的预测，2000 年全世界的金属消费量将为 1971 年的 2.5 倍（Just, 1976 年）。从更长远的角度看，第三世界国家的消费量必将有可观的增长。现在，占世界人口 1/4 的发达国家消费着世界 3/4 的资

源，广大发展中国家的矿物消费量只占世界的 10%。如果他们的消费水平增长至发达国家的一半，则对世界资源压力之巨大是可以想象的。地球上的矿物资源能够支持不断增长的人口和不断提高的生活水平的需求吗？这种巨大的压力对生物圈可能带来哪些不良的影响和伤害？

矿物资源的特性之一是其不可再生性，它是在漫长的地质年代里形成的，在人类历史的时间范围内不可能更新。而且，除了少数放射性元素能蜕变成其他元素以外，其他元素的数量是恒定的，人们在开采、提炼、加工、使用以至废弃以后，其数量丝毫没有改变，所改变者不过是其存在形式而已。

矿物资源的另一特性是其分布的不均匀性。地壳的元素组成中，氧、硅、铝、铁、钙、钠、镁和钾八种元素的重量占 98.6%，其中又以氧和硅占绝对优势，共占 74.3%；其他上百种元素只占 1% 强，其中许多属于稀有和稀散元素（参见表 8.2）。

这种不均匀性还表现为空间分布上的不连续性，有些元素常聚集在一起形成矿物，矿物又集中在一起形成可供开采的矿床。矿床的分布极不均匀，例如，北美有富集的钼矿，而亚洲几乎没有，但亚洲有世界上最丰富的锡、钨和锰，古巴和新喀里多尼亚的镍储量占世界一半，工业金刚石则集中在扎伊尔。其他许多矿物资源也有类似的情况。一些工业史较长的国家（如英国）已基本用完了本国的矿物资源而不得不完全依靠进口，消费大国美国也将面临同样的问题，钢铁主要生产国日本和意大利的铁矿石也已全靠进口，实现工业化最早的欧洲也要进口大部分有色金属。

由于矿物资源的消费量急剧增长，许多高品位的矿床已被采完，因而不得不接受较低的品位。例如，本世纪初铜矿开采的平均品位为 2%，现在已降至 0.5%。另一方面是探查和开采埋藏更深的矿床。这两方面都要求更高的技术和能耗，从而使成本增加，并且增加了弃置围岩的数量以及选矿、冶炼废渣的数量，进一步加剧环境污染问题。

表 8.7 列出了世界 17 种重要矿物资源的概况。表中较客观地给出未探明的和潜在的资源储量。但应该指出，就世界范围而言，现在资源探明的速率已明显降低，发达的工业化国家尤其如此，以致一些地质学家否定了资源储量戏剧性增长的可能性。目前矿物资源勘查的主要进展是在原先地质工作基础薄弱的发展中国家。

表 8.7 世界 17 种重要矿物资源概况

单位：吨

元素	1977年 世界产量	探明储量	未探明储量	潜在资源储量	地壳中总量
铝	17	5200	2800	3519000	199000000000
铁	495	93100	143000	2035000	1392000000000
钾	22	9960	103000	无资料	408000000000
锰	10	2200	1100	42000	31200000000
磷	14	3400	12000	51000	28800000000
氟	2	72	270	20000	10800000000
硫	52	1700	3800		9600000000
铬	3	780	6000	3260	2600000000
锌	6	159	4000	3400	2250000000
镍	0.7	54	103	2590	2130000000
铜	8	456	1770	2120	1510000000
铅	4	123	1250	550	290000000
锡	0.2	10	27	68	40800000
钨	0.04	1.8	3.4	51	26400000
汞	0.008	0.2	0.4	3.4	2100000
银	0.010	0.2	0.5	2.8	1800000
铂族	0.0002	0.02	0.05	1.2	1100000

（资料来源全球 2000 年—向美国总统提交的报告，1982）

对于一些已探明资源的供应前景，美国矿业局于 1979 年进行过预测，其结果如图 8.9 所示。该图纵坐标右侧为开采寿命，浅色较长的年限是假定世界对矿物的需求量固定在 1975 年水平的预期寿命；如果消费水平继续增长，其增长率如纵坐标左侧所示那样，则这些资源的开采寿命将大大缩短，如图中暗色部分所示。在前一种假设下，这些资源将先后于 20 至 300 年内采完；而在后一种前提下，这些资源将于 10 至 80 年内采完。

上述预测结果仅是众多类似预测中的一种，这种以资源有限论为基础的预测常被反对者指责为“悲观主义”。然而，严峻的事实是，在可以预见的未来，在技术上和经济上可供开采的矿物资源确实是有限的，而人类的需求却仍处在增长之中，这一矛盾终将导致资源的耗竭，而且耗竭的前景已迫在眉睫。即使从人类文明史的时间尺度来看，几百年也只不过是短暂的一瞬。如果不从现在开始及早采取行动，防患于未然，则我们的子孙后代必将陷入资源耗竭的困境之中。

图 8.9 全世界 14 种重要矿物的开采寿命
（据美国矿业局，引自 Ramade，1982）

第三节 人类对岩石圈的影响

现代科学技术已经毫无困难地把人送上 10 公里的高空,把少数人发射到月球上作短暂的停留,数以百计的人造卫星在轨道上作环球飞行,少数航天器甚至飞向更为遥远的星系。然而,人类向地球内部进军却相对地困难,迄今人类对岩石圈的干预还很少超过 10 公里的深度,只有为数不多的钻孔达到万米以上。尽管“上天有路,入地无门”,但是人类的种种活动仍然给岩石圈以一定影响,在某些地区这种影响还相当强烈,甚至造成严重的后果。

1. 深井灌水触发地震 1942 年开始,美国陆军落基山军火库在科罗拉多州丹佛地区用地下仓库蒸发的方式处理过时的化学武器及该类废弃物。到 1961 年发现该类物质污染了地下水并危害农作物,便改用防渗水池的方法进行处理,亦不成功。1962 年 3 月开始试验新的方法,把有毒废物加压泵至 3671 米深由风化片岩与强烈破碎的角闪花岗岩和片麻岩组成的前寒武纪基岩中。一个月后,这个原先平静的地区首次感到地震。到 1965 年 9 月,在确实证明了灌水与地震的联系(图 8.10)之后终止了深灌作业。此后地震活动仍然持续数年,直至 1969 年还发生过两次 3.5 级和 14 次 2.5 级以上的地震。1962—1967 年间总共记录了 1500 次震动,震级在 0.7—4.3 级之间,震中多在深井周围 8 公里之内,至多不超过 11 公里。

大约在同一时期,科罗拉多州的尤因塔(Uinta)盆地 Rangeley 油田于 1957 年开始施行深井灌水,1962 年 11 月在离井灌 65 公里处设立了地震观测站,当即记录到多次小地震。至 1970 年 1 月为止共记录到 1000 次震动,其中 1 级以上者 320 次。统计表明地震频率与注水量之间有明显的相关性。

此外,纽约州戴尔(Dale)镇附近的水力采盐和加拿大斯奈普(Snipe)油田注水也触发了地震。

迄今尚未见注水引起破坏性地震的报道,有些科学家甚至设想通过深井灌水触发小地震以逐步释放地壳中所积蓄的能量,以避免突发大地震。

图 8.10 落基山军火库深井注液与地震的关系

(资料来源:Evans, 1966, 引自:Botkin 等, 1982)

2. 油气田的开采与回灌引起地面沉降、断层活动和地震地下水的开采多在沉积物中进行,石油与天然气的开采则多在岩石之中,但二者所造成影响的性质与规模颇多相似之处。

早在 1925 年美国得克萨斯州鹅溪(GooseCreek)油田就已发现采油引起的地面下沉,水准测量表明沉降地区面积为 $6.5 \times 3.9 \text{ km}^2$,降幅最大处达 1m,下沉地区与开采区很相一致。此处还发现有断层与地震活动。

加利福尼亚州威明顿-长滩地区(Wilmington-LongBeacharea)早在 1928 年即已发现地下水开采引起地面沉降,但直至 1938 年大规模石油生产以前沉降尚不显著。大量抽取石油以后,1940 年的水准测量发现地面下沉了 0.4 米,至 1945 年共达 1.4 米,1951 年一年即达 0.6 米,造成大量建筑物、管线、铁路、公路的毁损,降幅最大处达 10 米,以致有些地方不得不筑坝以防水淹。后来该州通过立法实行地下水回灌才使该区趋于稳定。但灌水又使该油田地区发生断块与地震活动,使成百个石油生产井毁坏。上述各项损失总计达 1 亿美元以上。

深井灌水引起断层活动造成重大损失者亦不乏实例,如加利福尼亚州英

格伍德 (Inglewood) 油田于 1954 年进行灌水试验, 该项试验非常成功地提高了石油的回采率, 因此 1957 年开始大规模注水, 到 1963 年注水井数目已达 22 口。1957 年 5 月首次发现一个断块上升, 到 1963 年已有 8 个小断块活动, 但并未记录到伴有地震发生。1963 年 12 月 14 日, 位于该油田内的巴德温 (Baldwin) 水坝突然漏水, 大量库水从坝底与土坝上涌出, 大坝迅即坍塌, 几小时内约 95 万立方米的库水排空, 流向下流的村舍, 冲毁了 277 户住宅, 5 人死亡, 损失达 1500 万美元。事后查明深井灌水使水库底部的断层活动, 粘土质保护层破裂, 断块位移 15 厘米并在库底形成一些小陷穴, 最后导致水坝的坍塌。为此洛杉矶水电部向石油公司提出 2500 万美元的诉讼, 最后该公司赔款 387.5 万美元了事。

此外, 意大利的波河三角洲开采甲烷气也造成一系列地震, 并使 40×20 平方公里的地区下沉, 引起泛滥, 只得加高堤坝并在淹没区进行排水。日本的 Niigata 甲烷气井开采也造成地面下沉。委内瑞拉的马拉凯博湖 (Lake Maracaibo) 油田自 1933 年就已发现地面沉降, 至 1954 年有些地区的降幅达 3.3 米。

地质学家认为石油与天然气的开采引起采空地层的压紧作用, 于是在采空区的中心地带形成低角度的逆冲断层, 而在边缘地带则造成正断层, 从而使地面发生变化。

3. 矿山开发对环境的影响采矿对环境的影响取决于开采技术、当地水文与气候状况、岩石类型、矿山规模以及地形等因素, 其影响大小亦因资源开发的阶段而异, 勘探阶段影响较小, 而开采与冶炼则影响较大。

现代勘探技术包括航空与卫星遥感、地面填图、钻探和物探等方面, 只要进行得当, 即使对干旱区、沼泽以至冻土地区等敏感环境亦无显著影响。

采掘与冶炼过程则一般都会对土地、水、空气与生物资源发生或大或小的影响, 对社会也会造成一定影响, 因为矿冶活动经常伴随着移民、矿区住房与服务设施等方面的问题。

无论是地下采掘或是露天开采, 都会给当地环境带来一些不利的影响。

地下采掘造成地面沉降与坍塌的现象较为普遍, 例如美国在总共大约 28000 平方公里的范围内进行地下采掘, 其中 3000 平方公里发生地面下沉, 约占采掘面积的 11%, 其中以煤矿所造成的下沉最为严重。如果采掘区位于城镇之下, 则造成的危害与经济损失更大。宾夕法尼亚州斯克兰顿地区因地面下沉造成严重问题, 为了改善面积为 0.33 平方公里的环境, 到 1964 年为止共花费了 4 亿多美元。代价之高昂使得该州不得不于 1966 年通过一项专门的法律: 烟煤矿区下沉与土地保护法。该项法令规定了严格的矿井支护措施, 使开采成本大为增高, 迫使上亿吨煤只得弃而不采。

采矿造成地面坍塌虽然只是局部的现象, 但采空区上常有当地居民点或矿山建筑物, 因此常造成生命财产的损失。因塌陷而造成的陷穴以直径和深度为几米至几十米者较常见, 有些陷穴可大至一百米以上。如南非金矿的挖掘以及抽水曾造成直径达 125 米、深度 50 米的大陷坑。

采矿的另一种方式是露天开采, 其优点是建设速度快、劳动条件好、生产效率与矿石回收率高等。如铁矿的露天开采比地下采掘工效高 6—7 倍, 成本低 $1/3$ — $1/2$ 。因此, 西方国家近年来露天矿的开采发展很快, 已占总采矿量的 65% 以上。加拿大露天开采的铁矿占 96%, 美国的金属矿山有 84% 为露天开采, 所有露天矿与采石场的面积已占全国总面积的 0.5% 以上, 。

这是一个相当大的数字，由此所造成的影响不容忽视。犹他州宾汉(Bingham)峡谷铜矿是世界上最大的人工采掘坑之一，占地 8 平方公里，最深处达 800 米。

露天采矿对环境的影响是多方面的。首先出现的是大量堆置废石破坏原有景观：耕地被占用，原有植被彻底毁灭，野生动物栖居地完全改观。大型露天矿的剥采比（即采掘每吨矿石需剥离的废石吨数）较高，以铁矿为例，达 8—10，中型铁矿为 6—8，小型矿为 5—6。即每取得一吨有用矿石往往需要剥离 5—10 吨废石。用爆破与索斗铲等方法掘出来的废石往往难以利用，只得就近堆置，形成起伏不平、寸草难长的人工石海。采掘以后留下巨大的废矿坑也是一种令人难以忍受的景象。加拿大的一个废矿坑地势较低、水源充足，被修整成为人工湖，四周废石堆上复以细土，植树绿化，使该地成为一个风景旅游区。

矿石冶炼产生的废石堆与尾矿堆有时还会坍塌，造成重大事故。1928 年智利西威尔选矿厂拉奥诺尾矿池因地震破坏，900 万立方米尾矿流入河流中，河水暴涨，泛滥成灾，造成下游居民生命财产的损失。1972 年美国西弗吉尼亚州松德附近布法罗溪煤矿的尾矿坝失事，尾矿流入河中，冲垮了九座桥梁和一段公路，造成 106 人死亡，约 4000 人无家可归。威尔士阿伯藩(Aberfan)煤矿弃石就近堆放在陡坡上，形成一座高约 200 米的小山。该小山位于泉水线以上，由松散的碳质页岩组成，泉水的浸渍使小山开始自发移动，并迅速发展成一次粘稠的泥石流，冲毁了其下方城市的一部分，包括一所正在上课的学校，使当地包括全部学龄儿童在内的 150 人（一说 800 人）丧生。

4. 其他除了上述影响以外，不断扩展的交通网不时需要在山坡的一侧挖掘土石方，并堆置于另一侧。这种工程活动常使几十平方公里的山坡面目全非，植被在几十年内也难以恢复，我国许多山区都已出现这种现象，甚至在一些著名的自然保护区，如广东鼎湖山热带季雨林保护区，为了旅游的需要开辟了盘山公路，不仅大大破坏了自然植被，而且其沥青路面成了一些小型动物与昆虫活动的屏障，使当地自然环境为之改观。

此外，地下核爆炸不仅本身是一种人工地震，而且爆炸后改变了岩石的力学性质，导致地面突然塌陷，由此造成有关人员伤亡的惨剧也曾发生。

综上所述，岩石圈是人类所需的矿物原料与化石燃料的储藏所，而且其储量是巨大的。但是，由于人口的持续增长与技术的巨大进步，对矿产与能源的需求与日俱增，人类已经面临传统原料与燃料耗竭的前景。如何迅速实现向新材料与新能源的转变，已经成为关系到人类未来存在与发展的要务。

另一方面，岩石圈还起着支持其上面各圈层的作用，并且与各圈层相互作用，进行着物质与能量的交流。对岩石圈的任何干预，也必将对其他圈层发生影响。虽然迄今人类对岩石圈的干预，与上述其他圈层相比，其规模仍然较小，但是也已达到不容忽视的程度，象美国这样的工业大国露天矿与采石场的面积已占全国总面积的 5% 以上，这是一个相当大的数字。因采矿而引起的地震、地面沉降，以及废石和尾矿堆置引起一些环境病害也时有报道。这些经验教训都是我们在进行建设时必须认真吸取的。

复习思考题

1. 岩石圈在地球中的位置及其重要性。

2. 自然资源的定义及其分类。
3. 何谓矿物资源的有用期限？
4. 能源的不同分类法。
5. 人类使用传统能源的前景及出路。

代 跋

新自然观与人类文明

张 昀

科学技术对人类社会未来的影响已成为 20 世纪末最热门的话题。实际上当前主要议论和关心的内容是新技术（如生物技术、微电子技术、计算机、机器人、新材料、航天技术、光纤通讯、新能源等）对社会发展和人类前途的作用。通过各种传播媒介而广为流行的“后工业社会”论、“第三次浪潮”论、“大趋势”论、“信息经济”论等主要是从新技术发展的角度预测未来社会，预言未来几十年内生物技术、人工智能和信息技术将成为引起社会生产和生活深刻变革的“带头的技术”；预言新技术将带来社会文明进步和幸福生活。诚然，已被认为是第一生产力的技术和与其相关的科学对社会发展和人类文明进步一直起着极为重要的作用。然而，一般人们忽视或不了解另一个重要方面，那就是整个社会对自然界、对自然界与人类社会的相互关系的总体认识，即建立在科学理论基础之上的自然观对社会发展和人类文明进步起着更为重要的作用。

本文讨论的主题是：（1）近期自然科学的发展正在促成一个新自然观或新地球观的建立；（2）发展和滥用新技术并不一定带来社会进步和人类幸福，如果没有科学的、正确的自然观的指导，新技术的应用有可能将人类社会带至歧途，导致人类生存条件的不可逆转的恶化和文明倒退。作者认为建立和普及科学的自然观应和发展新技术相提并论。

一、自然观与人类社会

这里所谓的自然观就是指人类对自然界（即人类赖以生存的地球环境）以及人类与自然界的相互关系的基本认识，它决定了人类对自然界的态度并制约着人类在生产和生活中的行为。对自然界或地球的基本认识是建立在自然科学和社会科学的综合知识的基础之上的，所以自然观又随着社会发展和科学的发展而改变。一个民族或一个社会在某个历史时期的自然观指导和制约该民族或该社会的行为（生产和生活）；社会行为又与自然界相互作用，造成自然界趋向性变化。后者又反过来影响和制约人类社会的发展。

在自然科学产生以前的原始人类社会阶段，自然界是主人，人服从并畏惧自然。那时自然界对人类的影响和制约作用远远大于人类对自然界的作用。随着科学、技术和社会生产的发展，人类对自然规律有了更多的认识，增强了自信心，在社会意识中“人定胜天”的观点逐渐占了上风。这时人是主人，自然界是人类“改造”与“征服”的对象。但是，盲目的“改造”与“征服”却造成了影响人类生存和发展的恶果。自然科学的新发展引导人类重新认识其自身与自然界的相互依存的关系：人类是自然的儿子而不是主人，人类只能在保持与自然界（地球）的平衡、协调中才能生存和发展。从这个意义上说，人永远受自然界的制约，“人定胜天”的口号应该改为“人天共存”。

近代科学主要是沿着“分支”或“分割”的途径发展的，其结果是造成了两个最大的分割：

第一个分割是把作为科学研究对象的自然界截然地分割为无机界与有机

界(生物界)。以整个自然界为研究对象的早期的博物学(natural science)在18—19世纪后逐渐解体,地学与生物学分了家,研究无机界的物理科学与研究有机界的生物科学分道扬镳了。19—20世纪物理科学发展极快,成为整个科学领域的带头人。物理科学与生物科学又在各自发展过程中继续分割成许多相互既关联又隔离的学科。只有一个例外,那就是生态学,它企图把无机界与有机界综合起来,把生命与其环境结合起来。但早期的生态学有其局限性:它只是在小的时-空范围内综合,重视生物个体或群体与其局部生存环境的关系;它只重视环境对生命的影响而忽视生命对环境的作用。19到20世纪的自然观主要受占统治地位的物理科学的影响,是无机界与有机界分割的、环境与生命截然对立的二元论的自然观。

生态学在20世纪后期有了重大发展,认识上有一个飞跃:在认识上被分割的自然界,包括无机界与有机界被重新综合在一个统一的大系统之中。

近代科学的第二个分割是把人类社会与自然界分割开了。过分强调人类社会的特殊性的结果使社会科学与自然科学隔绝。虽然达尔文(从生物进化角度)竭力把人类回归到动物界,但一般的社会科学家认为人类已完全脱离动物界,人类社会的发展只遵循其自身的特殊规律,不受或极少受自然规律的制约。

然而,20世纪后期,自然科学与社会科学有逐渐靠拢的趋势。其中起主要作用的又是生态学:生态学家把人类社会纳入到整个地球生态系统之中,人类又“回归”于自然。

如果说19世纪以来的自然观主要受科学发展的分支(分解)趋势及占统治地位的物理科学的影响,那么20世纪后期逐渐发展形成的新自然观将愈来愈受科学发展的综合趋势及生命科学(尤其是生态学)的影响。

1. 重新认识地球:一个新地球观在形成中

许多科学家都赞同这样的说法:20世纪最伟大的发现之一是认识到地球是一个极其复杂的系统。这一认识深刻地改变了人类对自然界、对地球以及对人类文明的看法和态度。

哥白尼的“日心说”替代了“地心说”之后,人们普遍接受了“地球只不过是太阳系的一个普通行星”这个观点。但近年来对太阳系其它行星的探察结果改变了人们的看法,人们发现地球是很不同于其它任何已知星体的特殊星球!

今日地球表面多样而又相对稳定的环境条件看起来似乎是“特意”满足生命的存在和发展的。例如它的较窄的温度变化范围恰好符合大多数生命过程的要求;大气圈的密度与成分恰好能保持这个合适温度和生命所必需的液态水圈,大气自由氧的含量保证了生命呼吸和岩石风化(风化的岩石提供生命所需营养),且足以形成一个能屏蔽太阳过强的紫外线辐射的臭氧层;含氧的大气圈又能使大多数陨石落地之前燃烧掉;大气CO₂的浓度不高不低,既维持有机物生产(光合作用),又保持地表一定温度;地壳厚度适中,因而有适当强度的构造运动和火山活动,保证了地壳深部与浅部之间、地壳与上地幔之间有一定的物质交流,有利于生命的生存和发展。早先人们认为地球上具备这些条件与生命的要求是偶然的“巧合”,正因为地球具备这些能满足生命活动要求的条件,所以唯独地球才有生命。地球的特殊性就在于它具备别的星体所不具备的物理、化学状态。但是,科学界近来逐渐趋向于一个新认识,即反其因果,认为由于地球上存在生命所以地球表面才会有现在这

样的环境状态，才能保持现有的远离天体物理学平衡的状态。新认识认为，地球的特殊性在于它具有别的星体所不具备的生命和生命活动。这是两种相逆的地球观。我们称后者为新地球观，其主要论点是：（1）地球表层现有的状态是生命直接或间接参与的地质历史过程的结果；（2）地球表层是一个以生物圈为中心的、靠生命过程来调节、控制和保持的远离天体物理学平衡的、复杂的开放系统。

这个新地球观虽说是近些年来始见端倪，但其原始思想和概念的产生与发展却有一段历史。从 200 年前郝顿(J.Hutton)的“超级有机体”之说(1788 年郝顿在其《地球理论》一书中把地球比拟为 super-organism)，到本世纪的“盖雅”(Gaia)理论(BassBecking, 1931; Lovelock, 1979)，维尔纳德斯基(W.Vernadsky)的“生物圈”学说(苏联学者维尔纳德斯基在 1926 年出版了《生物圈》一书，第一次提出“地球生物圈是由生命控制的完整的动态系统”的观点，该书英文译本 1986 年在伦敦出版)，以及德国学者孔班(W.Krumbein)等提出的“生物地球化学循环”、“生物星球”(bioid)或“生物行星”(bioplanet)、“生命场”(thefieldoflife)等概念和理论(Krumbein, 1983, 1986; Krumbein & SchInuber, 1990)，在科学界逐步形成了一个共识：地球不同于其它星体的特殊性在于它是一个靠生命捕获、转移并储存太阳辐射能，靠生命活动来驱动地球表层的物质元素循环，靠生命过程来调节、控制并保持其远离天体物理学平衡的开放系统。

2. 靠生命活动保持其远离天体物理学平衡的地球

将地球与其邻近的类地行星作比较，就可以看出它的特殊性。金星与火星在轨道位置上最接近地球，其中金星与地球的体积大致相同，从天体物理学角度预期地球与金星应当具有相似的物理、化学状态，但实际上二者的表层状态十分悬殊。例如，金星的大气圈在密度上、化学组成上、酸碱度上、氧化还原势上以及温度稳定性上都显著不同于地球的大气圈。金星大气圈中二氧化碳占绝对优势(~90%)，不含自由氧，酸性，稠密(91 个地球大气压)；而地球大气圈中氮与氧气占优势，中性，1 个大气压。浓密的二氧化碳占优势的大气圈使金星表面温度较高，没有液态水圈存在的可能。金星上也没有任何板块构造运动的迹象。金星与地球表面状态的巨大差异似乎不可能从天体物理学上找到解释。马古丽斯和洛维洛克(Margulis & Lovelock, 1974)从“盖雅”理论提出一种解释，认为地球现在的大气圈是由生物圈调控和保持的。在比较了地球、火星和金星大气圈的物理、化学状态之后，他们提出了两个假设的模型：第一个模型是假设地球上现存生物全部绝灭(D 模型)；第二个模型是假设地球是位于金星与火星轨道之间的、不曾有过生命生存的行星(I 模型)。如果现有的生物从现在的地球上全部消失(D 模型)，那么按照化学原理推算，大气中的自由氮与自由氧在太阳辐射和闪电作用下变得不稳定，自由氮最终会从大气中消失，只留下少量离子态氮于海水中，这些离子态氮与海水中少量的自由氧结合而形成酸，酸性海水将加强岩石的侵蚀和风化。岩石风化逐渐耗尽大气中的自由氧。而由于生物光合作用消失，自由氧断绝了供应，CO₂ 逐渐积累，自由氧最终也会从大气中消失。其最后结果是地球大气圈变成了 CO₂ 占优势的、不含氧的酸性大气圈，与金星大气圈一样。那时地球表面温度会因“温室效应”而升高，海水蒸发，液态水圈消失，地球表面将会和金星表面相似，回到了天体物理学预期的状态。

如果地球历史上从未产生过生命(I 模型)，那么地球大气圈将会经历

一个位于金星与火星之间的无生命行星的大气圈演化过程——从初始的含氢、氦的还原性大气圈，经过氢、氦及挥发性气体的逃逸及出气作用，逐渐建立起稳定的化学平衡（称之为“无生命的稳定平衡”），最后形成一个CO₂占优势的、含少量自由氧的酸性大气圈，和金星、火星大气圈相似。

由此可见，地球大气圈乃是在生命过程参与下形成的，同时也是靠生命活动保持其非化学的平衡的。

一般的地质学家不认为地球上的板块构造运动与生命活动相关联，但这种观点可能会改变。构造运动与岩石圈的厚度相关。体积小的星体（如月球、水星）由于演化早期冷却快，形成较厚的岩石圈，因而在其演化史上很早就停止了构造运动。而且厚的岩石圈不易断裂、变形、俯冲，所以也不可能有板块构造。金星的体积与地球相近，照理金星应当和地球一样有较薄的岩石圈，因而可能存在板块构造。但事实却相反，金星有较厚的岩石圈，没有板块构造运动的任何迹象。

安得孙（Anderson，1984）认为，星体表层固体壳（岩石圈）的厚度取决于表层垂直热梯度与熔融点或玄武岩-榴辉岩过渡带的交叉处的深度。他认为，如果金星大气圈中的CO₂能够大量转移到岩石圈中，则金星表层及上幔部的温度会下降，则玄武岩-榴辉岩相变带的位置会从深部移到浅部。如此，金星的壳就不稳定了，就有可能出现类似地球的板块构造运动。而地球上靠生命活动把大气中的CO₂大量转移到岩石圈中的（例如元古宙的蓝菌把大量的大气CO₂转变成叠层石灰岩）。因此，一个有趣的大胆的假设是：板块构造之所以存在于地球上，而不见于与地球相似的金星，是由于地球上进化出能形成灰岩的生命。

结论是：地球现有的状态是生命参与的地质历史过程的结果，地球现在的状态也是靠生命活动调节、控制和维持的。因此，保护地球上的生命是保护地球环境的关键。

3. 借生命活动实现能量转换和物质元素循环的地球

与其它类地行星比较，地球表层的物理、化学的分异度（diversity），即结构、元素分布和元素的化学组合的多样性或复杂性，显然要大得多。耗散结构理论认为，结构的复杂程度与驱动能流分布的复杂程度直接关联。地球表层系统中能流的主要驱动者——生物表现出极大的多样性。因此，生物的分异度（分类学分异度和生理学分异度）可以作为地球表层系统内部分异度的指示（张昀，1989）。

地球表层的物质运移和系统内复杂结构的保持主要靠两个巨大能源：一个是太阳辐射能，另一个是地球内部热核反应产生的能。地球表面对太阳能的捕获、转移和储存主要是通过生命活动来实现的。生物捕获、转换和储存的太阳辐射能的总和与地球内部释放的能量总和大致为同一数量级（Krumbein & Lapo，in Press）。但是地球内能释放的方式（火山、地震、构造运动等）使其不能形成驱动和维持地球表层物质元素循环的恒定的能流，而生命则能通过一系列能量形式的转换和生物学过程完成地球表层的物质元素循环。如果没有生命捕获、转移和储存太阳辐射能，则投向地面的太阳能的大部分会散失，地球表层的物质运动会大大减缓，许多元素的地球化学循环不能完成。岩石圈中储存的化学能全部是过去的生命捕获的太阳辐射能，它们以有机碳和还原性金属化合物的形式保存下来。

太阳辐射能的捕获主要是通过碳循环实现的，即通过“二氧化碳-有机碳-碳酸盐”循环途径完成的。生物光合作用将大气中 CO_2 还原为有机碳，从而将太阳辐射能转换为化学能。这种转换的化学能又以多种方式在生物圈内部转移，形成系统内能流。除了维持生物圈系统的运作而消耗的能量外，剩余的能量以两种形式储存于岩石圈中，即有机碳（占 90%）和硫化物（或其它形式的还原性金属化合物，占 10%）。后者是通过硫循环而实现的，硫循环实际上与碳循环耦联，即碳循环中部分有机碳的能量转移到硫化物中（见下图）。

碳循环和与其耦联的硫循环

自太古宙初始，38 亿年前至今，各地质时期沉积岩中有机碳（还原碳）与碳酸盐碳（氧化碳）之比值及稳定碳同位素（ ^{13}C 与 ^{12}C ）的比值相对恒定（Schidlowski, 1984, 1988）。这一事实表明碳循环中有恒定的能量储存，这个储存形成了地球岩石圈中巨大的化学能库，它是保持生物圈系统稳定和能量周转的必要条件。

粗略的计算，自有生物化石记录以来，地球上曾经生存过的生物的累计总质量是整个地球总质量的 1000 倍以上（据作者及其他学者的计算），经过生物体转移的，或经过生物作用过的物质的总量还要大得多。可以想象，在地球表层通过生物圈的物质循环的速度大得惊人。例如，根据测算，生物圈全部活物质（构成生物体的物质）每 8 年更新一次，水圈的全部的水每 2800 年通过生物体一次（实际上全球的海水每半年就要全部通过浮游生物一次），大气圈中自由氧每 1000 年全部通过生物代谢过程一次。由此可见，自有生命以来地球表层的物质已通过生物体或经过生物作用无数次了。可以说，迄今为止地球表层的物质元素循环，本质上是生物地球化学循环。例如稳定同位素分析表明，沉积岩中全部的碳（还原碳与氧化碳）都是生物固定的（Schidlowski, 1985, 1988）；与碳循环耦联的硫、硅、磷、铁、钙、镁、锰等元素循环也有生物直接或间接参与。

生物地球化学循环有如下特点：（1）生物在循环的各个环节执行不同的功能，并在循环系统中起调控作用。以碳循环为例，根据计算，人类在 100 年来排出的工业废气中的 CO_2 若全部留在大气中，则现今的大气圈 CO_2 含量应增加 1000 倍，达到 30% 以上。但实际上地球大气 CO_2 含量只比 100 年前增加了 15% 左右，维持在 0.03% 上下。说明生物圈对碳循环起着调节和平衡的作用；（2）元素的生物地球化学循环不是全封闭的，通常有 2% 到 10% 的“渗漏”（Lapo, 1987, Krumbein & Schellnuber, 1990）。这种“渗漏”导致物质元素局部富集，形成矿产；（3）在循环中元素通过生物体或生物作用而浓集或重新组合；（4）在生物地球化学循环中，生物一方面建造岩石圈（通过生物沉积，生物建造和生物胶结作用），将大量的物质元素“冻结”于岩石圈中；另一方面又不停地破坏岩石圈（通过生物风化、生物侵蚀、生物扰动、生物搬运），把被“冻结”的物质元素释放出来，重新加入循环过程之中。这就是生物对元素地球化学循环的驱动作用。维尔纳德斯基称岩石圈为“过去的生物圈”，这是有道理的，因为今日的岩石圈是生物地球化学循环的产物。从某种意义上说，地球大气圈与水圈既是生命活动的场所，也是生命活动的产物。如果把生物圈的概念扩大为“过去与现在的生物活动和生物作用的场所”，则生物圈应包含岩石圈、水圈和大气圈，可称之为大生物圈。

二、理智圈与人类文明

理智圈—noosphere，来自希腊字根 noos，意为理智、思想，是法国哲学家德哈德夏丹 (Tei-harddeChardin) 造的词。这个名词最初的含义是超越生物圈以外的思想圈层。后来维尔纳德斯基 (Vernadsky, 1945) 将其重新定义为：人类按照其意志、兴趣和利益而重新塑造的生物圈，即受人类控制和影响的生物圈。

由于人类社会文明发展的程度不同，对自然界的影晌和控制的程度也不同。原始自然人时代，人与动物差不多，一个人所消耗的能量与一个同体积的动物消耗的相近，人对自然界的影晌很小，更谈不上“控制”。随着人类文明的进步和社会的发展，人类对自然界的影晌和控制程度愈来愈大。所以，理智圈应是在人类社会发展到一定阶段才出现的。虽说现今人类对自然界的影晌和控制达到了极大的程度，但还不能说如今的地球生物圈已成为理智圈。

人类只是在局部范围内建立了完全由人类控制的、或人类控制很强的生态系统，就是工业生态系统和农业生态系统（维尔纳德斯基分别称之为工艺圈 technosphere 和农艺圈 agrosphere），我们可以合称之为人工控生态系统 (artificialecosystems)。与之相对的是人类影晌较小的、控制很弱的自然生态系统 (naturalecosystems)。随着人类文明的发展，自然生态系统的范围愈来愈小，目前在陆地上绝对不受人类影晌和控制的自然生态系统几乎不存在了。

两种生态系统存在着巨大的差别。

1. 自然生态系统消耗其自身捕获或转化的能量的一部分，并有一定的剩余能量储存于岩石圈中。而人工控生态系统自身消耗的能量大大超过其自身捕获、转化的太阳辐射能，而靠消耗岩石圈中储存的太阳能（石油、煤、天然气）及其它非初级生产的能量（水力、核反应）来维持。

2. 人工控生态系统中物质转移的速率千百倍于自然生态系统。例如发达国家人均年消耗钢铁 0.5—1 吨，其它金属几百公斤。

3. 人类在把自然生态系统改造成人工控生态系统的同时，大量的物种绝灭了，生物分异度和环境分异度大大降低。人工控生态系统是靠人来维持的、极少数物种占优势的、环境单调的生态系统。

4. 人工控生态系统是地球化学失衡的、不稳定的系统。大量的工业废气和废物的排出造成大气 CO_2 、 SO_2 的积聚，某些元素及化合物在循环途径中阻滞并在河、湖、海洋或土壤中积累，某些人造化合物（例如塑料）不能进入地球化学循环。不稳定的人工控生态系统靠消耗岩石圈能库中的能量来维持（例如农业生态系统靠化肥、机械运作、农药来维持）。

人类社会发展的趋势是逐步把整个地球生态系统置于自己的控制之下，把亿万年的进化过程中形成的相对稳定的、相对平衡的、高分异度的、复杂的自然系统变为靠消耗巨大的储存的能量和物质资源来维持的、地球化学失衡的、单调的、不稳定的人工控生态系统。人类最终会把整个地球生物圈变成理智圈。

这就出现一种危险：人类是按照自身的利益来重新塑造生物圈的，所建立的理智圈是否理智取决于人类对自然规律的认识深度，取决于自然观，取决于人类对其自身的短期和长远利益的判断，取决于许多人类自身不能预料的因素。迄今为止，人类科学、技术的发展和文明的进步总是伴随着更多

的岩石圈储存的能量的消耗，更多的物质消耗（物质元素转移），更多的自然物种的绝灭，更大的环境污染。从某种意义上来说，这不是文明进步，如果照此发展下去，则有可能造成地球表层系统向金星与火星的状态演化（大陆局部沙漠化已在提醒我们），从而造成人类文明的终结。

文明与进步的概念应当修正。人类不能在忽视自然、忽视地球的情况下发展其社会文明。人类的文化系统应当是在地球生态系统之中，文化演化（文明进步）应当和地球生态系统演化协调。

当全体人类认识到这一点时，真正理智的理智圈才能建立。

（参考文献从略）

参考文献

- 马世骏等, 现代生态学透视, 科学出版社, 1990。
- 马世骏等, 社会-经济-自然复合生态系统, 生态学报, 4卷1期, 1984。
- 马宾, 论中国人口问题, 中国国际广播出版社, 1987。
- 王华东等, 环境影响评价, 高等教育出版社, 1989。
- 王华东等, 水环境污染概论, 北京师范大学出版社, 1984。
- 王明星, 大气化学, 气象出版社, 1991。
- 王新岭, 生态、人口、环境, 人民出版社, 1990。
- 王维志, 人口统计, 群众出版社, 1981。
- 王翊亭等, 环境学导论, 清华大学出版社, 1985。
- 井文涌等, 当代世界环境, 中国环境科学出版社, 1989。
- 毛文永, 环境污染与致癌, 科学出版社, 1981。
- 中国人民大学人口理论研究所, 人口与发展, 中国人民大学出版社, 1987。
- 中国科学院国情小组, 生存与发展, 科学出版社, 1989
- 中国大百科全书编辑委员会, 中国大百科全书环境科学卷, 中国大百科全书出版社, 1983。
- 中国大百科全书编辑委员会, 中国大百科全书地理学卷, 中国大百科全书出版社, 1990。
- 中国大百科全书编辑委员会, 中国大百科全书地质学卷, 中国大百科全书出版社, 1993。
- 中国环境科学学会, 酸雨文集, 中国环境科学出版社, 1989。
- 中国环境报社编译, 迈向21世纪——联合国环境与发展大会文献汇编, 中国环境科学出版社, 1992。
- 中国自然保护纲要编写委员会, 中国自然保护纲要, 中国环境科学出版社, 1987。
- 中国自然保护纲要编写委员会, 中国自然保护文集, 中国环境科学出版社, 1990。
- 中国农林科学院科技情报研究所, 国外林业概况, 科学出版社, 1974。
- 叶常明等, 水体有机污染的原理、研究方法及应用, 海洋出版社, 1990。
- 刘铮, 中国人口问题研究, 中国人民大学出版社, 1990。
- 刘天齐等, 环境保护概论, 人民教育出版社, 1982。
- 刘培桐等, 环境学概论, 高等教育出版社, 1985。
- 曲仲湘, 曲仲湘论文集, 中国环境科学出版社, 1990。
- 曲格平, 中国环境问题与对策, 中国环境科学出版社, 1984。
- 曲格平等, 世界环境问题的的发展, 中国环境科学出版社, 1988。
- 曲格平等, 中国人口与环境, 中国环境科学出版社, 1992。
- 邬沧萍等, 世界人口, 中国人民大学出版社, 1983。
- 汤懋苍等, 理论气候学概论, 气象出版社, 1989。
- 陈静生等, 环境污染与保护简明原理, 商务印书馆, 1981。
- 陈静生等, 水环境化学, 高等教育出版社, 1987。
- 陈静生等, 环境地球化学, 海洋出版社, 1990。
- 陈瑞生等, 河流重金属污染研究, 中国环境科学出版社, 1987。

- 陈德钧等, 大气污染化学, 机械工业出版社, 1988。
- 张昀, 前寒武纪生命演化与化石纪录, 北京大学出版社, 1989。
- 张家诚, 气候与人类, 河南科学技术出版社, 1988。
- 张纯元等, 人口经济学, 北京大学出版社, 1983。
- 林培等, 土地资源学, 北京农业大学出版社, 1991。
- 周光复等, 中国人口国情, 中国人口出版社, 1990。
- 金相灿等, 中国湖泊水库环境调查研究, 中国环境科学出版社, 1990。
- 金岚等, 环境生态学, 高等教育出版社, 1992。
- 郑斯中等, 气候影响评价, 气象出版社, 1989。
- 国家计划委员会国土规划和地区经济司等, 中国环境与发展, 科学出版社, 1992。
- 祝卓, 人口地理学, 中国人民大学出版社, 1991。
- 祝廷成等, 生态系统浅说, 科学出版社, 1983。
- 胡庆永等, 农业环境保护概论, 山东大学出版社, 1986。
- 胡崇庆, 胡焕庸人口地理选集, 中国财政经济出版社, 1990。
- 胡鞍钢等, 生存与发展, 科学出版社, 1989。
- 侯宇光等, 水环境保护, 成都科技大学出版社, 1990。
- 郝志功, 当代环境问题导论, 湖北科学技术出版社, 1988。
- 唐永奎, 大气环境化学, 中山大学出版社, 1992。
- 唐森本, 环境化学与人体健康, 中国环境科学出版社, 1989。
- 梁中堂, 人口学, 山西人民出版社, 1983。
- 郭秉荣, 大气科学中数学方法的应用, 气象出版社, 1986。
- 曹凤中, 臭氧层空洞的报告, 中国环境科学出版社, 1990。
- 鲁志强, 人口问题与发展战略决策, 新华出版社, 1988。
- 彭松健, 西方人口经济学概论, 北京大学出版社, 1987。
- 傅立勋等, 改善生态环境, 学术书刊出版社, 1989。
- 韩国刚等, 救救中国, 求实出版社, 1989。
- 联合国教科文组织人与生物圈计划中国国家委员会, 中国自然保护文集, 1989。
- 蔡运龙, 人地关系思想的演变, 自然辩证法研究, 5 卷 5 期, 1989。
- 潘纪一, 人口生态学, 复旦大学出版社, 1988。
- 樊德方等, 农药的污染与防治, 科学出版社, 1982。
- D.L, 米都斯等, 增长的极限, 四川人民出版社(李宝恒译), 1984。
- M.米萨诺维克等, 人类处在转折点, 中国和平出版社(刘长毅等译), 1987。
- J.L.西蒙, 没有极限的增长, 四川人民出版社(江南等编译), 1985。
- 桥本敬造等, 自然观的演变, 北京大学出版社(郑毓德等译), 1988。
- 日本环境厅, 环境白皮书, 辽宁科学技术出版社(刘玉机等译), 1992。
- 保罗·哈里森, 土地、粮食和人口, 联合国粮食及农业组织, 1984(罗马)。
- 世界环境与发展委员会, 我们的共同未来, 世界知识出版社, 1989。
- N.H.格林伍德等, 人类环境和自然系统, 化学工业出版社(刘之光等译), 1987。

B. J. 内贝尔, 环境科学——世界存在与发展的途径, 科学出版社 (范淑琴等译), 1987。

T. F. 马隆等, 全球变化, 地震出版社 (曹可珍等译), 1990。

H. 雷默特, 生态学, 科学出版社 (庄吉珊译), 1988。

P. 迪维诺, 生态学概论, 科学出版社 (李耶波译), 1987。

G. E. 赫钦逊, 生物圈, 科学出版社 (华北农业大学植物生理教研组译), 1974。

S. E. 乔根森, 生态模型法原理, 上海翻译出版公司 (陆健健等译), 1988。

A. 古迪, 人类影响——在环境变化中人的作用, 中国环境科学出版社 (郑锡荣等译), 1989。

J. M. 莫兰等, 环境科学导论, 海洋出版社 (北京市环境保护局译), 1987。

A. 佩奇, 世界的未来——关于未来问题一百页, 中国对外翻译出版公司 (王肖萍等译), 1985。

合田健, 水环境指标, 中国环境科学出版社 (全浩等译), 1989。

S. A. 巴登, 海洋污染和海洋生物资源, 海洋出版社 (吴喻瑞等译), 1991。

M. I. 布德科, 气候的过去和未来, 气象出版社 (翁笃鸣译), 1986。

B. G. 罗赞诺夫, 环境学原理, 河南大学出版社 (李克煌等译), 1988。

佐佐木忠义等, 环境工学, 河北人民出版社 (吴锦等译), 1980。

刘双进等编译, 世界自然保护, 中国科技出版社, 1990。

R. 斯托鲍等, 能源未来, 北京大学出版社 (傅骊元等译), 1983。

I. 阿西摩夫, 宇宙、地球和大气, 科学出版社 (王涛等译), 1979。

世界资源研究所等, 世界资源报告——1986, 中国环境科学出版社, 1988。

世界资源研究所等, 世界资源报告——1987, 中国环境科学出版社, 1989。

世界资源研究所等, 世界资源报告——1988—1989, 北京大学出版社, 1990。

世界资源研究所等, 世界资源报告——1990—1991, 中国环境科学出版社, 1991。

Botkin, D. B. and Keller, B. A., Environment Studies—The Earth as a Living Plant, Bell and Howell Co.,

1982.

Brown, L. R. (Ed.), State of the World, W. W. Norton and Co., 1990.

Brown, L. R. (Ed.), State of the World, W. W. Norton and Co., 1992.

Brookings, D. G., Earth Resources, Energy, and Environment, Charles E. Merrill Publ. Co.,

Coates, D. R., Environmental Ecology, John Wiley and sons, Inc. 1981.

Dury, G. H. An Introduction to Environmental Systems, Heinmann, 1981.

Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H., and Holdren, J. P., Ecoscience—Population, Resources, Environment, W-

H. Freeman and Co., 1977.

Greenwood , N.H. and Edwards , J.M.B. , Human Environment and Natural System , 2nd ed. , Duxbury Press , 1979.

Gregory , K.J. , and D.E.Walling (Ed.) , Human Activity and Environmental Processes , John Wiley and sons , 1987.

Miller , G.T.Jr. , Resource Conservation and Management , Wadsworth Publ. Co. , 1990.

Miller , G.T.Jr. , Environmental Science : Sustaining the Earth , Wadsworth Publ.Co. , 1991.

Nadakavukaren , A. Man and Environment , 2nd ed. , Waveland Press , 1986.

Owen , O.S. , Natural Resource Conservation , MacMillan Publ.Co , 1980.

Ramade , F. Ecology of Natural Resources , John Wiley and sons , 1984.

Richard N.T-W-Fiennes , Ecology and Earth History , Croom Helm , 1976.

Simmons , I.G. , Biogeography , Edward Arnold Ltd. , 1979.

Simmons , I.G. , The Ecology of Natural Resources , 2nd ed. , Edward Arnold. , 1981.

Singer , S.F. (Ed.) , The Changing Global Environment , D.Reidel Publ.Co. , 1975.

Strahler , A.N. and A.H. Strahler , Modern Physical Geography , 3rd Ed. , John Wiley and sons , 1987.

Sutton , D.B. and Harmon , N.P. , Selected Concepts of Ecology , John Wiley and sons , 1973.

The World Resources Institute et al , World Resources—1992-93 , Oxford University Press , 1992.

U.S.Council on Environment Quality and U.S.Department of State , The Global 2000 Report to the President :

Entering the 21th Century , Penguin Books , 1982.

附录一 人类环境宣言

联合国人类环境会议于 1972 年 6 月 5 日至 16 日在斯德哥尔摩举行，考虑到需要取得共同的想法和制定共同的原则以鼓舞和指导世界各国人民保持和改善人类环境，兹宣布：

1. 人类既是他的环境的创造物，又是他的环境的塑造者，环境给予人以维持生存的东西，并给他提供了在智力、道德、社会和精神等方面获得发展的机会。生存在地球上的人类，在漫长和曲折的进化过程中，已经达到这样一个阶段，即由于科学技术发展的迅速加快，人类获得了以无数方法和在空前的规模上改造其环境的能力。人类环境的两个方面，即天然和人为的两个方面，对于人类的幸福和对于享受基本人权，甚至生存权利本身，都是必不可少的。

2. 保护和改善人类环境是关系到全世界各国人民的幸福和经济发展的重大问题，也是全世界各国人民的迫切希望和各国政府的责任。

3. 人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。在现代，人类改造其环境的能力，如果明智地加以使用的话，就可以给各国人民带来开发的利益和提高生活质量的机会。如果使用不当，或轻率地使用，这种能力就会给人类和人类环境造成无法估量的损害。在地球上许多地区，我们可以看到周围有越来越多的说明人为的损害的迹象：在水、空气、土壤以及生物中污染达到危险的程度；生物界的生态平衡受到严重和不适当的扰乱；一些无法取代的资源受到破坏或陷于枯竭；在人为的环境，特别是生活和工作环境里存在着有害于人类身体、精神和社会健康的严重缺陷。

4. 在发展中的国家中，环境问题大半是由于发展不足造成的。千百万人的生活仍然远远低于象样的生活所需要的最低水平。他们无法取得充足的食物和衣服、住房和教育、保健和卫生设备。因此，发展中的国家必须致力于发展工作，牢记他们优先任务和保护及改善环境的必要。

为了同样目的，工业化国家应当努力缩小他们自己与发展中国家的差距。在工业化国家里，环境一般同工业化和技术发展有关。

5. 人口的自然增长继续不断地给保护环境带来一些问题，但是如果采取适当的政策和措施，这些问题是可以解决的。世间一切事物中，人是第一可宝贵的。人民推动着社会进步，创造着社会财富，发展着科学技术，并通过自己的辛勤劳动，不断地改造着人类环境。随着社会进步和生产、科学及技术的发展，人类改善环境的能力也与日俱增。

6. 现在已达到历史上这样一个时刻：我们在决定在世界各地的行动时，必须更加审慎地考虑它们对环境产生的后果。由于无知或不关心，我们可能给我们的生活和幸福所依靠的地球环境造成巨大的无法挽回的损害。反之，有了比较充分的知识和采取比较明智的行动，我们就可能使我们自己和我们的后代在一个比较符合人类需要和希望的环境中过着较好的生活。改善环境的质量和创造美好生活的远景是广阔的。我们需要的是热烈而镇定的情绪，紧张而有秩序的工作。为了在自然界里取得自由，人类必须利用知识在同自然合作的情况下建设一个较好的环境。为了这一代和将来的世代，保护和改善人类环境已经成为人类一个紧迫的目标，这个目标将同争取和平、全世界的经济与社会发展这两个既定的基本目标共同和协调地实现。

7. 为实现这一环境目标，将要求公民和团体以及企业和各级机关承担责

任，大家平等地从事共同的努力。各界人士和许多领域中的组织，凭他们有价值的品质和全部行动，将确定未来的世界环境的格局。各地方政府和全国政府，将对在他们管辖范围内的大规模环境政策和行动，承担最大的责任。为筹措资金以支援发展中国家完成他们在这方面的责任，还需要进行国际合作。种类越来越多的环境问题，因为它们在范围上是地区性或全球性的，或者因为它们影响着共同的国际领域，将要求国与国之间广泛合作和国际组织采取行动以谋求共同的利益。会议呼吁各国政府和人民为着全体人民和他们的子孙后代的利益而作出共同的努力。

这些原则申明了共同的信念：

1. 人类有权在一种能够过尊严和福利的生活的环境中，享有自由、平等和充足的生活条件的基本权利，并且负有保护和改善这一代和将来的世世代代的环境的庄严责任。在这方面，促进或维护种族隔离、种族分离与歧视、殖民主义和其它形式的压迫及外国统治的政策，应该受到谴责和必须消除。

2. 为了这一代和将来的世世代代的利益，地球上的自然资源，其中包括空气、水、土地、植物和动物，特别是自然生态类中具有代表性的标本，必须通过周密计划或适当管理加以保护。

3. 地球生产非常重要的再生资源的能力必须得到保持，而且在实际可能的情况下加以恢复或改善。

4. 人类负有特殊的责任保护和妥善管理由于各种不利的因素而现在受到严重危害的野生生物后嗣及其产地。因此，在计划发展经济时必须注意保护自然界，其中包括野生生物。

5. 在使用地球上不能再生的资源时，必须防范将来把它们耗尽的危险，并且必须确保整个人类能够分享从这样的使用中获得的益处。

6. 为了保证不使生态环境遭到严重的或不可挽回的损害，必须制止在排除有毒物质或其它物质以及散热时其数量或集中程度超过环境能使之无害的能力。应该支持各国人民反对污染的正义斗争。

7. 各国应该采取一切可能的步骤来防止海洋受到那些会对人类健康造成危害的、损害生物资源和破坏海洋生物舒适环境的或妨害对海洋进行其它合法利用的物质的污染。

8. 为了保证人类有一个良好的生活和工作环境，为了在地球上创造那些对改善生活质量所必要的条件，经济和社会发展是非常必要的。

9. 由于不发达和自然灾害的原因而导致环境破坏造成了严重的问题。克服这些问题的最好办法，是移用大量的财政和技术援助以支持发展中国家本国的努力，并且提供可能需要的及时援助，以加速发展工作。

10. 对于发展中的国家来说，由于必须考虑经济因素和生态进程，因此，使初级产品和原料有稳定的价格和适当的收入是必要的。

11. 所有国家的环境政策应该提高，而不应该损及发展中国家现有或将来的发展潜力，也不应该妨碍大家生活条件的改善。各国和各国际组织应该采取适当步骤，以便就应付因实施环境措施所可能引起的国内或国际的经济后果达成协议。

12. 应筹集资金来维护和改善环境，其中要照顾到发展中国家的情况和特殊性，照顾到他们由于在发展规划中列入环境保护项目而需要的任何费用，以及应他们的请求而供给额外的国际技术和财政援助的需要。

13. 为了实现更合理的资源管理从而改善环境，各国应该对他们的发

划采取统一和协议的做法，以保证为了人民的利益，使发展同保护和改善人类环境的需要相一致。

14. 合理的计划是协调发展的需要和保护与改善环境的需要相一致的。

15. 人的定居和城市化工作必须加以规划，以避免对环境的不良影响，并为大家取得社会、经济和环境三方面的最大利益。在这方面，必须停止为殖民主义和种族主义统治而制订的项目。

16. 在人口增长率或人口过分集中可能对环境或发展产生不良影响的地区，或在人口密度过低可能妨碍人类环境改善和阻碍发展的地区，都应采取不损害基本人权和有关政府认为适当的人口政策。

17. 必须委托适当的国家机关对国家的环境资源进行规划、管理或监督，以期提高环境质量。

18. 为了人类的共同利益，必须应用科学和技术以鉴定、避免和控制环境恶化并解决环境问题，从而促进经济和社会发展。

19. 为了更广泛地扩大个人、企业和基层社会在保护和改善人类各种环境方面提出开明舆论和采取负责行为的基础，必须对年轻一代和成人进行环境问题的教育，同时应该考虑到对不能享受正当权益的人进行这方面的教育。

20. 必须促进各国，特别是发展中国家的国内和国际范围内从事有关环境问题的科学研究及其发展。在这方面，必须支持和促使最新科学情报和经验的自由交流以便解决环境问题；应该使发展中的国家得到环境工艺，其条件是鼓励这种工艺的广泛传播，而不成为发展中的国家的经济负担。

21. 按照联合国宪章和国际法原则，各国有按自己的环境政策开发自己资源的主权；并且有责任保证在他们管辖或控制之内的活动，不致损害其他国家的或在国家管辖范围以外地区的环境。

22. 各国应进行合作，以进一步发展有关他们管辖或控制之内的活动对他们管辖以外的环境造成的污染和其它环境损害的受害者承担责任和赔偿问题的国际法。

23. 在不损害国际大家庭可能达成的规定和不损害必须由一个国家决定的标准的情况下，必须考虑各国的现行价值制度和考虑对最先进的国家有效，但是对发展中国家不适合和具有不值得的社会代价的标准可行程度。

24. 有关保护和改善环境的国际问题应当由所有的国家，不论其大小，在平等的基础上本着合作精神来加以处理，必须通过多边或双边的安排或其它合适途径的合作，在正当地考虑所有国家的主权和利益的情况下，防止、消灭或减少和有效地控制各方面的行动所造成的对环境的有害影响。

25. 各国应保证国际组织在保护和改善环境方面起协调的、有效的和能动的作用。

26. 人类及其环境必须免受核武器和其它一切大规模毁灭性手段的影响。各国必须努力在有关的国际机构内就消除和彻底销毁这种武器迅速达成协议。

(1972 年 6 月 5 日于斯德哥尔摩通过)

附录二 里约环境与发展宣言

序言联合国环境与发展会议，于1992年6月3日至14日在里约热内卢举行了会议，重申1972年6月16日在斯德哥尔摩通过的联合国《人类环境宣言》，并试图在其基础上再推进一步，怀着在各国、在社会各个关键性阶层和在人民之间开辟新的合作层面，从而建立一种新的、公平的全球伙伴关系的目标，致力于达成既尊重所有各方的利益，又保护全球环境与发展体系的国际协定，认识到我们的家乡——地球的整体性和相互依存性，兹宣告：

原则1 人类处于普受关注的可持续发展问题的中心。他们应享有以与自然和谐的方式过健康而富有生产成果的生活的权利。原则2 根据《联合国宪章》和国际法原则，各国拥有按照其本国的环境与发展政策开发本国自然资源的主权权利，并负有确保在其管辖范围内或在其控制下的活动不致损害其他国家或在各国管辖范围以外地区的环境的责任。原则3 为了公平地满足今世后代在发展与环境方面的需要，求取发展的权利必须实现。

原则4

为了实现可持续的发展，环境保护工作应是发展进程的一个整体组成部分，不能脱离这一进程来考虑。

原则5

为了缩短世界上大多数人生活水平上的差距，和更好地满足他们的需要，所有国家和所有人都应在根除贫穷这一基本任务上进行合作，这是实现可持续发展的一项不可少的条件。

原则6

发展中国家、特别是最不发达国家和在环境方面最易受伤害的发展中国家的特殊情况和需要应受到优先考虑。环境与发展领域的国际行动也应当着眼于所有国家的利益和需要。

原则7

各国应本着全球伙伴精神，为保存、保护和恢复地球生态系统的健康和完整进行合作。鉴于导致全球环境退化的各种不同因素，各国负有共同的但是又有差别性的责任。发达国家承认，鉴于他们的社会给全球环境带来的压力，以及他们所掌握的技术和财力资源，他们在追求可持续发展的国际努力中负有责任。

原则8

为了实现可持续的发展，使所有人都享有较高的生活素质，各国应当减少和消除不能持续的生产和消费方式，并且推行适当的人口政策。

原则9

各国应当合作加强本国能力的建设，以实现可持续的发展，做法是通过开展科学和技术知识的交流来提高科学认识，并增强各种技术——包括新技术和革新性技术的开发，适应修改、传播和转让。

原则10

环境问题最好是在全体有关市民的参与下，在有关级别上加以处理。在国家一级，每一个人都应能适当地获得公共当局所持有的关于环境的资料，包括关于在其社区内的危险物质和活动的资料，并应有机会参与各项决策进程。各国应通过广泛提供资料来便利及鼓励公众的认识和参与。应让人人都能有效地使用司法和行政程序，包括补偿和补救程序。

原则 11

各国制定有效的环境立法。环境标准、管理目标和优先次序应该反映它们适用的环境与发展范畴。一些国家所实施的标准对别的国家特别是发展中国家可能是不适当的，也许会使它们承担不必要的经济和社会代价。

原则 12

为了更好地处理环境退化问题，各国应该合作促进一个支持性和开放的国际经济制度，这个制度将会导致所有国家实现经济成长和可持续的发展。为环境目的而采取的贸易政策措施不应该成为国际贸易中的一种任意或无理歧视的手段或伪装的限制。应该避免在进口国家管辖范围以外单方面采取对付环境挑战的行动。解决跨越国界或全球性环境问题的环境措施应尽可能以国际协调一致为基础。

原则 13

各国应制定关于污染和其他环境损害的责任和赔偿受害者的国家法律。各国还应迅速并且更坚决地进行合作，进一步制定关于在其管辖或控制范围内的活动对在其管辖外的地区造成的环境损害的不利影响的责任和赔偿的国际法律。

原则 14

各国应有效合作阻碍或防止任何造成环境严重退化或证实有害人类健康的活动和物质迁移和转让到他国。

原则 15

为了保护环境，各国应按照本国的能力，广泛适用预防措施。遇有严重或不可逆转损害的威胁时，不得以缺乏科学充分确实证据为理由，延迟采取符合成本效益的措施防止环境恶化。

原则 16

考虑到污染者原则上应承担污染费用的观点，国家当局应该努力促使内部负担环境费用，并且适当地照顾到公众利益，而不歪曲国际贸易和投资。

原则 17 对于拟议中可能对环境产生重大不利影响的活动，应进行环境影响评价，作为一项国家手段，并应由国家主管当局作出决定。原则 18 各国应将可能对他国环境产生突发的有害影响的任何自然灾害或其他紧急情况立即通知这些国家。国际社会应尽力帮助受灾国家。原则 19 各国应将可能具有重大不利跨越国界的环境影响的活动向可能受到影响的国家预先和及时地提供通知和有关资料，并应在早期阶段诚意地同这些国家进行磋商。原则 20 妇女在环境管理和发展方面具有重大作用。因此，她们的充分参加对实现持久发展至关重要。原则 21 应调动世界青年的创造性、理想和勇气，培养全球伙伴精神，以期实现持久发展和保证人人有一个更好的将来。原则 22 土著居民及其社区和其他地方社区由于他们的知识和传统习惯，在环境管理和发展方面具有重大作用。各国应承认和适当支持他们的特点、文化和利益，并使他们能有效地参加实现持久的发展。原则 23 受压迫、统治和占领的人民，其环境和自然资源应予保护。原则 24 战争定然破坏持久发展。因此各国应遵守国际法关于在武装冲突期间保护环境的规定，并按必要情况合作促进其进一步发展。原则 25 和平、发展和保护环境是互相依存和不可分割的。原则 26 各国应和平地按照《联合国宪章》采取适当方法解决其一切的环境争端。原则 27 各国和人民应诚意地一本伙伴精神、合作实现本宣言所体现的各项原则，并促进持久发展方面国际法的进一步发展。

(1992年6月14日在里约通过)

