

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

自然地理新论



绪言

自然地理学是一门古老的学科，由于它研究的对象以及研究的任务，同人类活动密切关联，因此远在数学、物理学、化学等近代科学发达之前，人类对于居住地周围的地形、气候、水文、土壤、动植物等基本知识，业已知晓不少，这些知识既可看做是自然地理学的萌芽，又是自然地理学发展的基本资料准备。

一般可以把自然地理学的发展分为如下三个阶段：十八世纪末到十九世纪前期，以著名的德国科学家亚历山大·洪堡德的科学活动与学术著作为界，以前为第一阶段。在此阶段中，自然地理学还处于经验积累的时期，主要以了解地理事实、记录山川形势、游历四方奇胜、进行探险发现等活动为主。从洪堡德开始直至本世纪六十年代，为自然地理学的第二阶段。在此阶段中，已不把某一项自然现象只看成孤立的、彼此无关的静态组合，而是力求从众多的地理现象中，采用比较的方法，追索它们之间的因果关系。逐步地认识到自然环境是一个统一的整体，其间的自然要素互相联系、互相制约、互相作用，并且从综合的而不是单一的、集中的而不是分散的、深入的而不是表象的、动态的而不是静止的等观点，总结出了一些很有价值的自然地理规律，例如著名的自然地理地带性规律，就发端于洪堡德，并经过俄国的道库恰也夫乃至随后许多人的深入探讨，才逐步臻于完善。同时自然地理学中的各个部门，例如地貌学、气候学、水文学、生物地理学、土壤地理学、地图学等，在此一阶段都获得了突飞猛进的发展。从 1960 年以后到现在，可视为自然地理学发展的第三阶段。在这个阶段里，企图进一步以定量的精确判断来取代定性的文字描述；以预测和模拟代替对现状的分析和说明；以抽象的反映本质的数学模型去反映具体的庞杂的自然地理现象；以合理的趋势推导与类推法，去代替简单的因果关系分析；以先进的技术手段去革新传统的研究方法。世界地理学领域在这一阶段所出现的“地理革命”、“计量地理”、“解释学派”（亦称“剑桥学派”）等，都不同程度地反映了这种趋势。

现代自然地理学，在经历了这几个发展阶段之后，现正处于一个即将突破的边缘。近十余年来的酝酿，1976 年在莫斯科召开的第 23 届国际地理学大会上所反映出来的动向，都说明了这一点。自然地理学向何处去？已经引起世界各国地理学家们的深切关注。

近代地理学兴起的“故乡”之一——德国，从洪堡德、李戴尔、李希霍芬、彭克等时代起，在长达一个世纪的进程中，仍然保持着传统的统一思想。他们逐渐感到对于“基础理论的研究是不够的”。许多应用地理学家一再提出需要发展地理学基础理论，并希望把这种理论应用到预测性的工作中，以代替大量的、描述性的传统地理学。德国的这一思想，应当认为是有普遍意义的。

现代自然地理学具有以下三个基本的特征：

一、对具体的地理过程或各个不同的自然区域，逐步地从原先表象的描述及定性的分析，转入朝着抽象概括与数量表达这样的方向发展。力图将其研究对象的形态与本质、结构与功能、方向与速度、稳定与变化、激励与响应等，有机地综合在一起，形成具有动态变化的统一体系，发展新概念、新理论和新方法。

二、增加或重视了实验技术的比重，引入了先进的技术手段。目前已初见成效的如电子计算机的应用、遥测遥感技术的应用等，由于它们适宜于在自然地理研究中变量多、演化快、范围广、关系复杂、综合性强等特点，因此对这些技术手段的引进与研究蓬勃开展，方兴未艾。美国地理学家在其论文中称：“对新科学技术的应用是不能妥协的”；法国地理学家也认为：“科技革命给我们带来了许多好处，但新方法不是目的，而是重新认识地表的新手段”。苏联和波兰等国也都十分重视。

应用这些新的技术手段，不仅能迅速地得到大量的自然地理信息，而且能更准确更及时地分析出所得的结果。这就使得自然地理学在理论与实验两个方面，都展示了广阔的前景。据李旭旦所举例子：美国科学家，曾经采用概率论类推法，以解放初期前七年的中国人口统计为依据，寻找出城市面积扩大（在卫星所摄之图象上量算）与人口增长的比例关系，以此建立模型，对中国城市人口的增长数字，进行评估和预测，其准确程度达到90%以上。

三、数学和物理学开始成功地运用于自然地理分析当中。在表达自然地理规律方面，逐渐呈现“模式化”的趋向。对于自然地理质量优劣的评价、对于自然地理过程的模拟、对于自然地理过程演化趋势的预测、对于自然地理基础理论的完善……，已经成为人们不断探索的目标。在这种探索的路途上，诸如传导理论、热力学理论、耗散结构、多元分析、系统分析、数量分类、集合论、概率统计分析以及模糊数学等，均渗透到自然地理研究之中，正在或者已经取得了可喜的成绩，并不断浮现出新的生长点。

现在，对于自然地理学提出了这样一些基本要求：一时尚不能驾驭的自然地理过程和尚未知晓的自然地理现象，能否深入地认识它并合理地解释它；对于已经熟悉的自然地理过程和现象，能否精确地表达它、模拟它、预测它；能否判断出其发生的时间、演化的序列、过程的强度和结果；对于客观的自然地理系统，能否通过有效的改造和调控，使其达到最优状态并能稳定地保持它；对于自然地理的基本理论，能否比较精密地、比较完整地纳入一个统一的基础。只有达到上述的目标，自然地理学才可以说完全进入了新阶段。

本书作为自然地理学的基础知识，决定抛开以往的传统写法，以能量和物质在自然地理系统中的传输、贮存、交换、平衡为脉络，向读者介绍一些基本原理和分析方法，尽可能地包括最近出现的新论点、新理论、新体系和新方法，作为对于上述所提目标的尝试。与此同时，亦将自然地理学中原有的基本事例和传统观点贯穿其中，使人们尽量减少过多的陌生之感。限于本书的篇幅和内容，有些问题的详尽说明，不便加以更为严格的推导和阐释，并对其中一些部分进行了简化和删削。好在我们的目的是抛砖引玉，作者的初衷在于提请地理研究工作者更加关心这方面的发展。至于遗漏之处或不得不忍痛割爱之处，相信在今后一定会得到丰实的弥补。

鉴于地理界的现状和历史的因袭，我们特别要指出的是，必须善于学习和吸收其它学科的基本知识，并设法在地理学中加以创造性的运用。生物学的发展是这样，环境科学的发展是这样，地理学的发展也应该是这样。“它山之石，可以攻玉”，在其它领域中看起来已习以为常的理论和方法，一经用于解决自然地理的问题，往往能作出很大的贡献，常有豁然开朗，又见洞天之感。

在本书写作过程中，作者收到了许多信函，承蒙相识的与不相识的师友

和同志，对本书提出许多宝贵的建议，并且对于作者的想法给予热情的关怀和诚挚的帮助，在此深表谢忱。只是由于作者才疏学浅，挂一漏万，错讹背谬之处在所不免，吁请批评指正。并期待在帮助和争鸣的气氛中，得到收益和安慰。

自然地理新论

第一章 宇宙中的地球

自然地理学的研究对象是地球上某个特定的“范围”。在此范围中研究自然地理要素的组成、结构、状态、功能及其空间分布；它与范围之外的“环境”所进行的能量、物质和信息的交换与传输；探讨自然地理过程（要素随时间的变化）的方向、强度、变率和动力，各要素之间的制约关系及其整体效应；还要注重自然历史及人类活动的巨大影响。通过探索规律、建立模式、进行模拟，达到认识和预测的目的。

地球是人类的摇篮，又是地学的研究对象，因此大致了解它在宇宙中的地位及其一些基本特性，对于认识自然地理规律是至为必要的。

地球在整个宇宙中，是一个微不足道的星体。就在小得多的太阳系空间中，它也不过是一个十分平凡的成员。在太阳系的九个行星中，它既不太大，也不太小；既不太靠近太阳，也不太远离太阳。而是与恒星太阳、其它八个行星、三十多个卫星、几千个小行星、彗星、流星等共同组成了太阳系这个统一的“家庭”。

太阳系的九大行星具有某些统一的特征，这些特征早已为人们所阐述，大致归纳为下列数条：

1. 共面性：所有主要的行星围绕太阳运转的轨道面，都近似地处于一个平面上。各大行星的轨道面与黄道面之间的夹角（称之为轨道倾角）很小，除了水星和冥王星外，其余的相差无几。九大行星的轨道倾角为：

水星：7° 00

金星：3° 24

地球：0° 00

火星：1° 51

木星：1° 18

土星：2° 29

天王星：0° 46

海王星：1° 46

冥王星：17° 12

2. 近圆性：各个行星运行的轨道，都近似于圆形和椭圆形。

3. 同向性：所有主要行星围绕太阳运行的方向都相同，均是沿着逆时针方向，而太阳本身也在作逆时针自转。

4. 遵距性：各个行星依次离开太阳的距离，呈规律性的分布，遵照提丢斯-波得定则。如水星暂定为 0，金星定为 0.3，则后边的行星距太阳的距离是前者的二倍。如把这样的数值分别加上 0.4，与各行星到太阳的真实距离相比，可以发现十分相符。（见表 1.1）

由表中看出，除火星与木星之间(2.8)缺失外，其它的数值都对应相似。行星距太阳呈这种奇妙的分布，使得人们有意识地在距太阳 2.8 天文单位处寻找所失去的“行星”。这个

表 1.1 到太阳的真实距离与提丢斯-波得分布律比较

星名	真实距离（天文单位）	提丢斯-波得分布数字
水星	0.39	0.4
金星	0.72	0.7
地球	1.0 (1.5 亿) 公里	1.0 (14960 万)

火星	1.52	1.6
?	-	2.8
木星	5.2	5.2
土星	9.52	10.0

谜直到 1801 年 1 月 2 日才被揭晓。当时在距太阳 2.7 天文单位处，发现了一颗星体，因其体积过小，直径不到月球的四分之一，所以称做“小行星”，这就是有名的“谷神星”。后来在这一带又相继发现了许多颗形状不规则的小行星，到目前已达 2000 多颗。看来，提丢斯-波得定则中，该位置的“行星”为一大群小行星所代替。小行星 1125 号是我国天文学家在 1928 年发现的，取名“中华”，后因无法追寻而“失踪”。解放以后，不仅找回了这颗失踪二十余年的“中华”小行星，还发现了 300 多颗其它的小行星，大部分都已算出其运行轨道。

在太阳系中的九大行星，根据其特点可分做两类：一类叫类地行星，另一类叫类木行星。所谓类地行星，即是与地球相类似的行星，包括水星、金星、地球与火星。其特点是：体积较小，密度较大，自转周期较长，表面温度较高，没有卫星或卫星数目很少。类木行星是指类似于木星的那些行星，包括木星、土星、天王星、海王星，其特点正好与类

表 1.2 两类行星的比较

分类	星名	到太阳距离 (天文单位)	体积 (地球为 1)	质量 (地球为 1)	密度 (克/厘米 ³)	自转周期	表面温度 (°F)	卫星数目
类	水星	0.387	0.056	0.05	5.45	58.6 天	220	无
地	金星	0.72	0.86	0.82	5.25	243.2 天	700	无
行	地球	1.0	1.0	1.0	5.525	23 时 56 分	20	1
星	火星	1.52	0.15	0.11	3.94	24 时 37 分	-130	2
类	木星	5.2	1310	317.8	1.34	9 时 50 分	-200	13
木	土星	9.5	750	95.2	0.7	10 时 14 分	-290	10
行	王星	19.2	57	14.6	1.41	10 时 42 分	-300	5
星	海王星	30.1	60	17.2	1.58	15 时 48 分	-330	2
未定	冥王星	39.4	0.13	0.18	7.18	6.39 日	-348	1

地行星相反，体积较大、密度较小、自转周期较短、表面温度较低、卫星数目较多。冥王星比较特殊，既有类地行星的特点，也有类木行星的特点，因此暂不归类。需要指出的是，以前人们从未观测到冥王星具有卫星，可是在1978年6月22日首先由美国观测到它的卫星，后又经许多天文台所证实。在表1.2中，列出了这两类行星的比较。

以上我们主要说明地球在宇宙中的一般性，即使在太阳系中，也不是什么显要的角色。但是，地球与其它星体之间的差异也是巨大的。在无边无际、无始无止的宇宙中，地球这个不显眼的星体又是十分特殊的。象我们的地球这样具有生命，具有复杂的物质能量交换，至少在目前所探测的范围

表 1.3 地球及其周围空间

环境		介质	温度()	压力(大气压)	引力场
地	地	固、液、气三相界面	15		1
球	表				
	海	盐溶液	0—25	1—1000	1
	洋				
	大	O ₂ , N ₂ , CO ₂ 等	-67—57	0—1	1
	气				
	地	Fe	4000	3,700,000	0
	核				
宇宙空		接近真空	—	0	可变动
间					
月亮		接近真空	-153—134	0	0.165
太阳		H ₂ , He	6000(表面温度)	1	—
水星		接近真空	-253—340	0.003	0.37
金星		CO ₂ , H ₂ O, N ₂ O ₄	427	0.1	0.89
火星		CO ₂ , H ₂ O, N ₂	-100—10	0.1	0.38
木星		H ₂ , He, NH ₃ , CH ₄	-138		27
土星		CH ₄ , NH ₃	-153		11
天王星		CH ₄	-170	0.960.96	
海王星		CH ₄	-170		15

内，尚不知道（或不敢肯定）有第二个。人们不排斥会有其它存在高级生命形式的星体将被发现，但即使有，在宇宙中它的数目与无生命的星体相比也决不会太多。由此又可看出地球既是一个普通的又是一个十分独特的星体。表1.3进一步提供了地球及其周围空间的一些基本状况。

地球的平均密度为5.525克/立方厘米。由于地壳物质的密度远低于此数值，可以合理地推想出在地幔及地核处的物质密度，必将大大超过平均密度的数值，事实正是如此，沿着地表向下深入至地核，地球的密度一直是递增的。地球的总质

量是巨大的，大致为 5.98×10^{27} 克，看起来这是个庞大的数字，但在宇宙间，它只能算做一个弹丸之球，许多星体不仅在体积上远远超过地球，就是在组成物质的密度上，也是在我们所居住的地球上难以想象的。例如，在六十年代内天文学中四大发现之一的射电脉冲星，每立方厘米的物质竟重达一亿吨左右。使用载重一万吨的巨轮去运输这一立方厘米的物质，需要一万次才能运完，这确是够惊人的了。

地球的物质组成有一个明显的特征，就是从地心向外，大致呈同心圆的圈层构造（见图 1.1），我们把这种圈层构造的一般状况，列在一个表上（见表 1.4）。

地球并不是孤立存在的，它在宇宙中与其它星体和空间

表 1.4 地球的组成、质量和容积

范围	组成	质量 (10^{21} 吨)	质量 (%)	厚度 (公里)	容积 ($\times 10^{22}$ 立方公里)
大气圈	氮、氧、水汽、二氧化碳、惰性气体等	5	0.00009	15	—
生物圈	生命区域,包括植物、动物和微生物等	0.0016	0.00000003	2	—
水圈	盐水和淡水:雪、冰、冰川、海洋、湖泊、河流、池塘、地下水等	1410	0.024	3.8	137
地壳	沉积岩、变质岩等,	43000	0.7	平均30	1500
地幔	硅质材料,铁和锰的硅化物(均质的)	4056000	67.8	2870	89200
地核	铁镍合金	1876000	31.5	3471	17500
全球	—	5976000	100	6371	108300

不间断地进行着能量物质交换。因此，这是一种开放系统。首先，地球表面上自然地理过程的基本能源来自于太阳，这种能量加上其它星体发射来的宇宙能一道，使得地表的自然现象千姿百态、变化纷呈。一些电磁波和宇宙线引起了地球表面物质的化学变化；星体间的引力产生潮汐现象；陨石与宇宙尘不断为地球所俘获；地球上的能量与物质也不断散发到太空中去。这些现象均说明了地球与宇宙空间的密切关系。

从自然地理研究的角度出发，我们特别关注的是地球在天体中的位置、地球的形状以及地球的运动。我们可以十分清楚地感觉到：所有自然地理要素、自然地理现象、自然地理过程，都离不开这几个基本因子的作用和影响。

关于地球的位置，主要指它在太阳系中的位置，因为它距离太阳的远近，直接关系到它获得辐射能量的多少。与目前地球获得真实能量的状况相比，

它得到的能量过多或过少，都将使得其上的景象与现在完全两样，甚至亦不可能期望会出现如此繁盛的生命体。正如美国科学家韦斯科夫所叙述的那样：若地表获得能量过多，致使比现在热的多，则由于热扰动太强，原子根本不能结合在一起，因而就决不会形成分子，更不用说复杂的物质了；相反，如地表太冷，分子将牢牢地聚集在一起，只能以固态和晶体存在，不会产生除此而外的相的变化。但是地球的实际位置却正处于得天独厚的地方，这种位置决定了：它能够得到足够的能量，使得一些分子可以不断地分解；但同时它所获得的能量又不太大，使得很大一部分化合物得以保存下来。这样，分子不断分解又不断地化合，只有在地球这样的环境下才得以很好地实现。也就是说，地球在太阳系中所处的位置，造成其所得到的能量正好符合于一个恰如其分的“能量范围”。从而使得在其上出现生命这种独特形式的物质，有了基本保证。

关于地球的形状，现在已经有了比较精确的描述。根据阿波罗飞船在月球轨道上所拍摄的地球照片，最直观地告诉我们地球的形状。（见图 1.2）

人们早已知道地球为一球形，但几百年来，关于它的确切形状，一直是学者们研究兴趣很浓的课题。牛顿就曾仔细地推论过地球旋转时所应具有的真实形状。由于线速度从赤道到两极是很不相同的，当旋转的速度越大时，相应地把物质推离旋转中心的趋势也就越强，因此他从旋转运动的离心力考虑，必然应有从两极向赤道增大的结果。据此，牛顿得出了一个合乎逻辑的推理：赤道将向外鼓胀，而两极将呈现扁平。他甚至对此作了计算，求出两极的扁平度应为地球直径的二百三十分之一。这种纯理论的计算结果，与现代观测的实际状况应该说是相当接近的。再如法国科学家皮里·布吉尔（Pierre Bouguer）进行了一次大规模的测量，当得出靠近赤道纬度一度的长度比在巴黎所测纬度一度的长度要短，他立即明白了地球并不是一个理想完美的球。1924年，国际大地测量和地球物理协会建议采用海福得椭球体。从1930年以来，由于在重力测量中获得了大量的资料，特别是近二十年来，通过人造卫星的准确测量，使得对于地球形状的精确表达有了更为坚实的基础，现将椭球体的有关数据列出，从中可以看出对于地球形状的认识过程。

	半长轴（米）	半短轴（米）	扁率
海福得（1924）	6378388	6356912	1/297.0
克拉索夫斯基（1940）	6378245	6356863	1/298.3
第十五届国际大地测量和地球物理协会（1971）	6378160	6356755	1/298.25

最近，两名英国大地测量学家，在分析了27颗人造地球卫星的轨道参数后，计算出了比以前更接近于实际的地球形状。其北极半径（假设以海平面代替南北极）比南极半径约长40米左右，若以赤道海平面至地心的距离为半径作圆，则北极高出此圆18.9米，而南极低于此圆达25.8米。尽管如此，若从宏观上进行讨论，将地球看做一个十分接近于椭球体的行星，是完全适当的。对于这个球体，人们常常用它的半径去衡量其大小。根据全球12个地面观测站，对13颗人造地球卫星所进行的测定，截止到1966年，总共分析了46万5千个数据，计算出来赤道半径的准确数字为6375.169公里±0.008公里。

地球的形状，对于帮助我们理解太阳辐射能在地表面上的空间分布、对于自然地理地带性的分析、对于自然地理系统中物质与能量传输的空间特点

等，都是十分重要的。

关于地球的运动，这是一个十分复杂的问题，除了最重要的自转与公转外，还有它的岁差、章动、摄动等运动形式。但是最普遍的运动形式仍推它的自转和公转。自转的结果产生了昼夜交替，使得一地的能量输入经历着不连续的、有周期的变化；地球绕行太阳的轨道面与地轴相交成 $66^{\circ}33'$ 的夹角，即地球轨道面与它的赤道面成 $23^{\circ}30'$ 的夹角。在其绕太阳运动时，地轴的倾斜方向保持固定，因此公转产生了季节交替，使地球表面在更大的范围内产生节律性变化。此外，由于地球的运动，产生了相应的效应，如摩擦力、离心力、地转偏向力等，这些力的综合作用，在自然地理的研究中，都是很有意义的。

面对着一部邮票自动发售机，我们用八分硬币逐次投入。在开始的七枚进入投币口后，邮票并不送出，只有待到最后一枚进入机器后，邮票立即自动送出。这表示所获得的邮票，是先前输入积累的结果，亦即表达该系统由量变到质变的过程。这时可以看做这架机器具有“记忆”能力，它能将先前逐枚投入的状态记录下来，一直到满八分时给予一个输出。由此得到一个启发：地表面上自然地理现象的发生，有其历史因素在内。今日对于自然地理系统的输入，不一定立即就能看出它的效果（当然也有迅即反应的例子），它可能待到将来某一时刻才被反映出来。同理，今日发生的自然地理现象，亦可以看做是历史上某种或某些输入积累的结果。举一个浅显的例子，目前我们所开采的煤和石油，正是地质历史上某时期生物物质转化的结果，进一步分析是当时同化的太阳辐射能在今日的释放。至于地貌形态、河流演变、气候特点、生物组成等，都不能不追溯到历史上的联系。

由此看来，研究现代自然地理过程，一个重要课题就是必须明白该地的自然历史演变状况。从全球规模来说，就须知道地球的起源以及地球的年龄，同时要知道地球发展中的重大事件以及这些事件对现代过程的影响。

关于地球的起源，是科学家们努力探讨的重大课题之一。近百年来，不少假说纷纷提出，都具有某些合理的成分，但都不能最终地解释这个问题。随着科学技术的不断前进，获得资料的不断丰富，解决地球起源的问题，是有可能的。

与此问题密切联系在一起的，是地球的年龄。因为对此估算的真确与否，直接影响到地球的演变史，当然也包括自然地理的演变史。这对于现代自然地理过程的评价及发展趋势的估计，都是一个不能忽略的因素。一般认为，地球自形成到今天，经历约 45 亿年的进程。如何去判断这个数字的真确性呢？科学家们艰难行进了许多路程。一直到二十世纪初以前，人们还不知道有实际上不受地理环境影响的过程，只是在发现了天然放射性元素蜕变和人工放射性之后，才允许作到用统一的等级去确定时间。目前，应用同位素测定绝对年龄的方法，已经形成一个分支，在理论与实践上已建立了一个体系，为地学研究提供了又一个强大的手段。

科学家们应用一些长半衰期的放射性元素如铀 (U^{238} 、 U^{235})、钍 (Th^{232})、钾 (K^{40}) 和铷 (Rb^{87}) 的同位素测定作为依据。这些元素的蜕变作用，可以用来当做放射钟。岩石的年龄即可根据存在于岩石中的放射性物质，如母元素与子元素之比值来加以计算。

至于较短时段的测定，可以通过化石的分析比较，亦可采用 C^{14} 同位素绝对年龄测定来进行。总之，在地质历史时期中，准确年代的判定，对于我们

估算自然过程的速率和强度，是必不可少的一项基础工作。

地球至少经历了 45 亿年的时间，达到目前我们所处的状况，它的进化过程和重大事件可以由表 1.5 表达。总之，地球在无限的宇宙中，只是度过了一个短暂的时间。然而就在这样短暂的时刻里，这个星球表现出与众不同的特性，出现了大气，出现了水，出现了生命，并在最后阶段出现了人，使这个既平凡又独特的天体，增添了绚丽的色彩。

表 1.5 地球的进化

距现在的年数	岩石圈	生物圈	水圈	大气圈
2 千万	冰川活动	哺乳动物的多样化		氧接近于现在大气的水平
5 千万	煤的形成 火山活动	草类出现		
1 亿		群居昆虫 有花植物 哺乳动物		大气中氧气以波动的速率增加
2 亿	巨大火山活动 煤的形成	昆虫出现 陆地植物出现	海洋体积继续增加	
5 亿	冰川活动 沉积物 硫酸钙	浮游生物剧增	表层水中浮游生物	氧约为现在大气水平的 3-10%
10 亿	火山活动			氧约为现在大气水平的 1%，臭氧层出现，二氧化碳减少大气中出现氧
20 亿	红色岩层		氧气扩散	
	冰川活动 带状铁矿形成 最老的沉积物 最老的岩石		进入大气 氧从氧化铁中释放	无自由氧
45 亿	地球形成			

第二章 自然地理面

第一章的开头,已经指出自然地理学的研究对象是地球上某个特定的“范围”。这个范围曾为不少学者所讨论,但所取名称不同,范围大小也各不相同。本书从自然地理系统的观点出发,将这个范围取名“自然地理面”。图2.1表述了这个范围的基本状况,并且由此推及所研究的内容及关系。这样看来,明确自然地理面对于研究自然地理系统是必要的出发点。

第一节 自然地理面的确定

习惯上，人们把周围的自然界称为环境。通常所谓的自然环境，总是包括着人类认识自然的能力在内。我们不能想象，一个原始人会了解到距其半径为一百公里以外的地方。在他看来，那儿至少是一个遥远的神秘莫测的处所。对于使用人体器官进行直接观测来说，我们的眼睛能够分辨清楚的最小长度，不过相当于一根头发的直径，这大约是一毫米的十分之一。至于能够观测的最大长度，即使选择十分晴好、能见度极高的天气，在一个甚为平坦的地貌单元中，极目望去，也只能达到几公里的距离。再远一些，就是摒弃掉地球本身的曲率效应，我们的眼睛也会失去摄取景物的能力，当然这也与观测对象的大小与要求的精细程度有关。以上就是天赋的人所能认识到的空间尺度。这样就帮助我们合理地推测出，原始人类所能认识的自然环境，范围必然是相当小的。

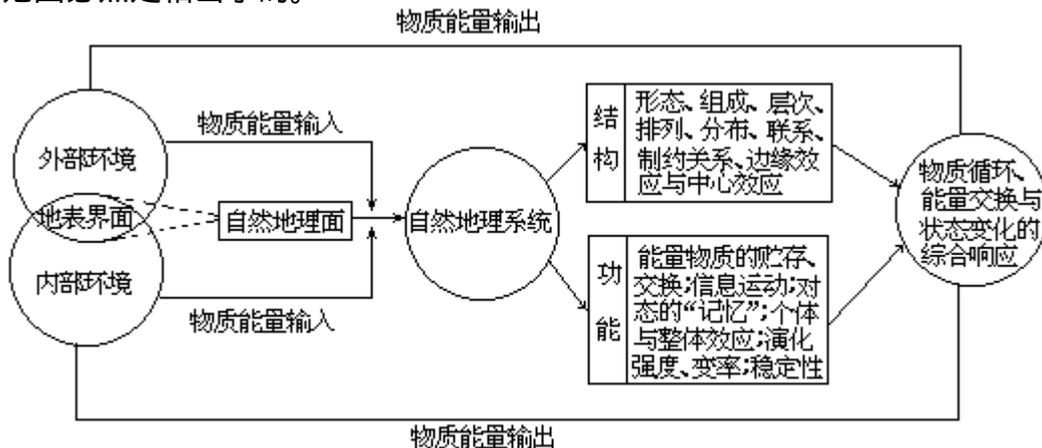


图2.1 自然地理面的范围及内容

人是富于进取的，他不会屈服于这种束缚自己的桎梏。人在进化过程中，总是不断顽强地沿着两个方向——微观世界与宏观世界，去探索那经常烦扰自己而不得其解的自然奥秘。在扩大认识范围的征途中，人们同时采用或交替采用两大类行之有效的方式，一是延长自己的眼睛，例如显微与缩宏；另一是加快自己的速度，以便达到扩大观测的范围与提高观测的频率。举例来说，现时已从古代人平均速度仅仅每小时几公里左右，提高到每小时达三万公里的数值，在几千年的时间中，速度这个数值提高了将近六千倍。这样，由于活动半径的迅速扩大，所能认识自然的范围，与原始人相比当然不可同日而语。可以想见，未来对于人类环境范围的认识必然越来越扩大，越来越深入。

鉴于上述，对于自然环境的范围作一个精确的规定，看来是毫无意义的。但是，为了深入地研究某个特定领域中的客观规律，很有必要从总的自然环境中，人为地分割出某个部分来，作为自己讨论的对象，并且假定它应该与周围其它的自然环境之间具有明确的边界，由此建立所划定部分与周围其余环境部分之间的联系；在这样的基础上，探讨划定范围内的规律表现。

这里似乎被一些含混的叙述与假定，将我们陷入一个困惑的境地。进一步澄清要说明的主题，对于以后章节的理解，将是十分有益的。从自然地理学研究的基本内容出发，需要从地球中心乃至整个宇宙空间这样庞大的自然环境里，划出一个特定的部分，以便我们探索其中的基本规律。此特定部分

便是我们所说的自然地理面。从几何学的定则来看，所谓“面”，它是不具厚度的，而这里所说的自然地理面，却有某个特定的厚度，与几何上所称的面不相符合。但是若以自然地理面的厚度与内部环境或外部环境的厚度相比，则它小得无法比拟，近似于没有厚度，只是从这个意义上讲，我们称其为自然地理面。

作这样的划分完全是由所研究问题的特点，以及讨论时的方便来决定的。进一步将自然地理面这部分空间及其所包含的内容，称作“系统”。而与系统发生直接联系的相邻部分，称之为“环境”。需要特别指出的是，这里所谓的“环境”，与本节开头泛指的自然环境在含义上是不同的，它们的基本差异就在于：环境和系统二者，实质上都是整个自然环境的一个部分，人为地将其分开，只是有利于问题的解决，其优越性在今后的讨论中，很快就能显现出来。

现在已经十分清楚的是，推动自然地理过程发生发展的根本动力，在于自然地理面与内外环境之间的能量与物质交换。从内部环境和外部环境所输入的能量和物质，经过自然地理面这个系统的变换（或映象）后，即呈现出当时或随后所看到的相应的自然地理现象，其中当然也有反馈和贮存，那不过是使这种从输入到输出的通道更加复杂而已。这种能量与物质交换的特性，决定着自然地理过程的强度及方向，规定了各种自然地理要素的存在条件与存在方式，制约着自然地理各要素间的动态联系与空间分布，反映了自然地理基本规律的内在实质。从这个意义上来看，我们所研究的“自然地理面”是个开放系统。只是有时为了理论上的分析，需要抽象出一种假想条件时，才将其作为孤立系统或作为闭合系统看待。

关于“自然地理面”的空间厚度问题，一直是地理学家们讨论的基本问题之一。一些地理学家，希望把这个空间范围定得大一些，尽管他们之间的看法也不尽一致，但都将自然地理面（在他们的著述中，称这个空间范围为“地理壳”或称之为“地理环境”）的厚度定为30—40公里的距离之中，即从地表向上达到对流层顶、从地表向下至地壳的沉积岩石圈底部。这种把实质上已经属于地质学、地球物理学以及大气物理学的研究范围，统统纳入自然地理学研究领域中的看法，使得多数人陷于迷惘，并经常产生一种自然地理学被其它学科占领的危机感。而且事实是，世界上从事自然地理学研究的人们，至今尚未见到一人能精辟地将上至对流层顶、下至沉积岩层底部的各个要素、它们的动态分析等，全部纳入一个统一的体系，因此，使得定出这样大的范围流于空泛。当然，将这样厚度内的各种要素进行综合分析，并不是他们不想去做，而是没有可能去做。持上述观点的，多为苏联地理学家们的看法。

至于另外一些地理学家，例如美国的斯川勒(A.N.Strahler)则把“人类的环境”规定做自然地理研究的范围。这代表了一种更加实际一些的倾向，把自然地理学研究的领域限制到与人类活动密切有关的空间，就避免了那种过于空泛而事实上做不到的定义。但是，斯川勒的界限并未具体划出，同样也存在着弱点。特别在极地、高山、沙漠或人类很少存在的地方，这种概念不易得出明晰的范围。

当然，我们已经说过，纯粹的界限，犹如一个盛着水的玻璃杯那样，杯内与杯外判若分明的状况，在自然界中是不多见的。由此，使我们联想起自1965年以来，蓬勃发展的一个数学新分支——“模糊数学”（或叫不分明数

学)。模糊数学是美国人载德(L. A. Zadeh)首先提出的,用于处理现实世界中大量遇到的不分明现象。在自然地理中,无论从赤道到两极的水平分布,还是从地心到宇宙空间的垂直分布,都不具备经典数学上的确定界限。例如热带与温带之间的分界线就很难划定,不论把此线划定在何处,由此线向南或向北分别跨出一步,其差异肯定是存在的,但是这种差异能够代表典型的热带与典型的温带所具有的那种明显特征吗?必然不是的。于是人们就创造出亚热带这个名词来,目的是为了弥补或是为了缓和划线上的某些缺陷,但原先提出的问题照样存在,使用经典集合论的办法,不可能进行符合实际的刻划。因此从客观实际出发,要求我们去掌握模糊集合这样一种对自然地理研究十分有用的工具。

现在再回到本题。我们可以十分方便地利用模糊数学所阐明的基本原理,去处理自然地理面的范围界限。我们力求把自然地理学集中研究的领域,同大气物理学、地质学、地球物理学集中研究的领域区分开。这样就牵涉到从地表之上某一定高度,它更倾向于何种学科的程度或称“隶属度”(相似于某种性质或学科的程度)的数值。根据所阐述的自然地理学所研究的基本内容,借用这种数量上的判别,能够帮助更客观的做到这一点。从自然地理系统研究去要求,我们不主张将自然地理研究的范围划的那样广泛。鉴于自然地理学与其它学科研究对象的根本差异,本书认为,自然地理面的上限应放在地球—大气的“近地面边界层”,下限应放在太阳能量(代表外部环境的能量)影响地表的终止线(一般按多年平均的地下温度或水下温度的变幅稳定线)。

这样产生了一个问题,如大气环流、水分循环、地质循环等,均不可能如过去的定义那样统统包括在“地理壳”之中,自然地理面中只能容纳这种全球规模运动的某一个“链条”。对这类问题,按我们的解释,可分别把它们作为外部环境(自然地理面上限之上)与内部环境(下限之下)对系统(自然地理面)的物质能量输入和系统对它们的输出。这既符合于系统分析的原则,也符合自然地理学的实际研究范围。如照原先苏联地理学界对地理壳厚度的看法,上下超过四十公里,似乎已经包罗万象了,其实认真追究一下,它依然要与对流层以上部分、沉积岩层以下部分发生联系。甚至要与太阳直接发生联系,难道因为有直接联系,就要把研究范围划到太阳去吗?显然是不符实际的。但是,如把自然地理过程集中发生的范围划定,其上和其下对自然地理过程产生影响的因素作为输入(或称“激励函数”),再加上自然地理过程对外部和内部环境所产生的输出(或称“响应函数”),这样对于自然地理研究,就会明确得多。于是,也就成为划分自然地理面的根本出发点。这里仍需指出,地球上自然地理面的厚度,各处都不相同,随着地表组成物质的不同、随着所处海拔高度不同、随着纬度的不同,这个厚度是变化的。尽管自然地理面的范围在不同的地区可以不相同,但都遵守划分自然地理面的确定原则。因此也就显得比斯川勒的定义要确定的多。

以下即为我们划分界限的理由:观察由烟囱排出来的烟,可以看到烟的流动一般都不是有规则的扩散。又如测定风速时所用的风速计或风向计,总是不停地处于脉动状态。由此,可以想象出我们周围的空气,尤其是近地面层的空气,它的运动决不可简单地看作是规则的流动,即所谓的“片流”,事实上它们是不规则的流动,叫做“乱流”(也有称“湍流”或“涡流”的)。哈根(Hagen)早在1839年就知道,水在一个细圆管中流动时,在不同的条

件下是有变化的。当流速逐渐增大，超过某一界限时，水即由片流转为乱流。此后又过了 45 年，雷诺 (Reynold) 于 1883 年对此进行了实验证明，他首先采用了“雷诺数” ($R_e = U_m \cdot a / \nu$ ，其中 U_m 代表平均流速， a ——圆管之半径， ν ——分子动力粘性系数) 作为指标。试验认为，在管子中当雷诺数大于 1,000 时，水即由片流变为乱流。这个十分著名的雷诺数指标，一直应用到现在。对于空气来说，应用该指标也是完全成功的。有人举出这样一个例子，在空气分子运动的情况下，如采用近地表面 10 米的厚度作为分析时的考虑对象，则风速只要达到 1.5×10^{-1} 厘米 / 秒，亦即风速仅仅为每秒 1.5 毫米时，就超过了临界雷诺数。因此，必须如实地肯定，地球近地表面上的空气运动，是以乱流处主导地位的。乱流如此盛行，也是自然地理面的特点之一。

所谓乱流，是在流体的流动中，含有很多大大小小不同的、不规则的、十分复杂的旋涡，这就是有人称其为“涡度”的原因。这样，由于地球近地面层中乱流所占据的突出地位，它对于近地面层与其上大气层的物质能量交换，起着十分巨大的作用。因此，近年来关于地球“界面层”（也称“边界层”）的研究成为一个十分活跃的领域，一个最近创刊的国际性杂志，刊名就以“边界层”命名，足见对于近地面层研究的重视。从动力学的观点去划分大气的层次，可参见图 2.2。

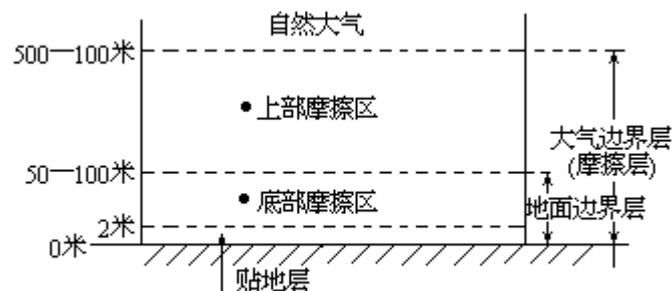


图2.2 近地面的大气层次划分

由图可知，从地表面至 500—1,000 米以上，地面摩擦力的影响已告消失。超过此界的空气运动，一般均看作为理想流动，因此也称之为自由大气。从自由大气的下界向下，一直达到地球的表面，这个厚度的空气层叫做“行星边界层”，或叫做“摩擦层”。一如上述，这个摩擦层的厚度在整个地球上并不是固定不变的，它需视下垫面（即固体的地表面与液体的海洋面）的粗糙度和地理纬度这些因素，并随着这些因素的变化而变化。这个行星边界层亦可进一步区分：由地表面向上至 2 米高的这一层，叫做“贴地层”；由 2 米起到 50—100 米的高度，叫做“底部摩擦区”。贴地层和底部摩擦区二者合称为“地面边界层”。从地面边界层向上直达自由大气下界，这一层称做“上部摩擦区”。在上部摩擦区内，虽然仍受地面摩擦力和地转偏向力的作用，但切变应力在各个高度是不同的。与此相反的是，在地面边界层内，气温等要素的铅垂分布受到地表面的强烈影响，但切变应力在该层内，一般说来并不随高度而变化。加上我们已经讲过的：这一层中乱流作用特别发育，居主导地位，物质和能量的输送也很强烈，因此就把从地表起到其上 50—100 米高度的“地面边界层”顶部，定做自然地理面的上限。

至于自然地理面的下限，它不应当超过外力对地球的作用深度。已经测知，在陆地上以太阳能作用为外力代表的影响限度，其日变化作用的深度不过 1.5—2 米，多年变化平均影响的深度约为 25—30 米。在海洋中，这个深

度要大一些，向下传递太阳辐射能的深度可达 100 米。这样，我们即以陆地上深约 25—30 米、海洋中深约 100 米的深度，作为自然地理面的下限。如此，我们对于自然地理的研究，主要规定在这个比较狭窄的空间范围内，这就是我们所称的“自然地理系统”。在其上，称之为“外部环境”；在其下，称之为“内部环境”。环境和系统之间，物质和能量的输入和输出、交换与贮存、变化与平衡，随着时间和空间，永不休止地积极进行着。

第二节 自然地理面的属性

划分自然地理面的范围，并不是凭空想出上限和下限两个边界就结束了。形式总是从属于内容的，按照上一节所规定的空间范围，它应服从自然地理学总的研究方向和研究内容。如果脱离这个前提，那么界限划分的再详近、形式再完美，也是没有意义的。通过关于自然地理面属性的探讨，将会证明我们所划出的范围是比较适宜的，对于自然地理过程的刻划也更加符合实际一些。本节集中讨论自然地理面的四大属性，现分述如次。

（一）自然地理面是独特的三相交界面

在广阔的大自然中，物质的界面是一种特殊的存在条件。凡是处于界面上的物质，其所表现的物理特性和化学特性，与物质的内部（即非界面）相比，肯定具有十分独特的表现。而我们所谓的自然地理面，就恰好位于地球固-气、液-气和固-液这三种物质的交界面上或是它的附近。至于地球的其他部分，具体说就是自然地理面的内部环境和外部环境，都没有这种独特的存在条件。由此也就决定了处于自然地理面中物质与能量的交换，具有自身显著差异于地球其它部位的特性。界面现象在微观研究中，是必然要考虑的基本因素之一。作为地球的自然地理面来说，它的这种界面现象可以理解为无数微观现象的总和，从其整体效应中，再以宏观上的界面现象表现出来。

首先，把一定体积的固体物质粉碎之后，其微粒的总表面积肯定大于原来整块物质的表面积，而且粉碎得愈细，这块物质的总表面积就愈大。举例来说，假定我们取一个边长为 1 厘米的立方体，它的总表面积不过 6 平方厘米，如若将它切成边长为 0.5 厘米的 8 个小立方体，总表面积立即增大至 12 平方厘米，照这样分割下去，待到所取的微粒边长为 10^{-7} 厘米时，其总表面积即可达到 6,000 平方米，参看图 2.3。

从物理意义上看，能量和物质在开放系统的交换与传输，主要是通过界面来进行的；从化学意义上看，吸附作用和吸收作用，在很大程度上取决于所接触到的表面积，在前一种吸附作用下，物质被附着于表面，在后一种吸收作用下，物质要通过表面才能进入内部。因此，在其它条件相同时，较大的表面积，将会有更多更快的物质能量交换，也会有更多更快的吸附和吸收。已经发现在组成成分相类似的土壤中，体积相同的旋绕型土壤颗粒将比球型土壤颗粒吸收更多的水分子，由于前者的表面积要大一些。随着颗粒的变小，表面积（S）与体积（V）之比迅速增加。S/V 比值的变化，只有在界面中才能很好地表现出来。

以陆地表面与大气相接触的固-气界面而言，的确具有总表面积不断增大的趋势。由于陆地表层在外部环境不断输入能量进来的情况下，遭到强烈的风化作用，将使整块的岩石不断碎裂成小块，这种由大变小、由粗变细的过程，也就是总表面积逐渐加大的过程。倘若进一步形成土壤，那么所组成的颗粒将要变得更细，S/V 的比值就有更加迅速的增大。这里我们有一个浅显的例子，已知目前地球上陆地的表面积约为 150×10^6 平方公里（一亿五千万平方公里），假定在地面以下深 1 米的距离内，整个陆地的体积统统碎裂为平均边长等于 1 厘米的立方体颗粒，其表面积将比一亿五千万平方公里增大一千倍，在自然地理面中，表面积随着颗粒变小而惊人增长的事实，不能不引起我们的极大重视。另一方面，一块平整的陆地表面，由于内部环境中地球构造力的作用，出现褶皱、凹陷、断裂等，也是使得地表比原来面积增大

的过程，这是不断扩大表面积的又一种方式。

在夏天，荷叶上的水珠，或者是在秋天清晨凝结在草叶上的露珠，都以圆球的形状存在着，这是我们日常能够碰到的事实。如果用分子间的相互引力来解释，那是很容易就可理解的。如下图（图 2.4）：横线 AB 表示水体的上表面，在 AB 之上为空气，空气和水在 AB 形成一个明显的界面。水分子在大块液体中的存在位置，我们分别以三种状况去加以讨论，并用 m, m_1, m_2 代表。每个分子的小圆，表示着水分子引力的范围。在水体中间，分子 m 对各个方向上所受到的引力可以互相平衡，它们的合力等于零。而分子 m_1 离开表面 AB 的距离小于分子引力范围的半径，它从上面所受到的引力，要比从下面受到的引力为小，因为在界面 AB 之上的气相中，空气分子的浓度比水分子的浓度小得多，所以近似地认为 AB 线以上分子的引力等于零，这样处理的结果，形成了对分子 m_1 的作用合力 f_1 ，它力图将分子 m_1 拉入水体中间；同理，作用在分子 m_2 上的合力 f_2 更大，由于分子 m_2 更加接近界面 AB。由此，看出液体表面的分子总是处于方向指向水体内部的引力之下，此力企图尽量缩小界面的表面积。这种趋势就说明了，为什么液体在一定体积下具有最小表面的原因，也就是我们所举的荷叶上水滴及青草上露珠呈现球形的原因，这是因为在相同体积的情况下，球形具有最小的表面积。

在液体的界面上有这种奇异的现象，那么在固体-气体的界面上，例如地球陆地表面与大气相接触的界面上，能否反映这种类似的奇异现象呢？答复是肯定的。而且事实证明，地-气界面上，将固体物质拉向地心的力，与刚才所举水的例子进行比较，应当更大一些，这是由于固体分子的浓度及引力，较之液体水更大的缘故。所有的实验资料都无一例外地指出，固体的“表面能”要比液体为大，只不过至今尚无直接的测定方法而已。基于这种观念，对于我们去理解地球的形状（乃至整个空间的天体）大都呈球形或近似球形，很有帮助。当然，星体呈球形与本身的运动状况及形成原因，亦有很大关系，它决不至于象解释水滴和露珠那样简单，但我们除开起源上的原因与运动特性外，还是可以如实地把各种天体在形状上相类似的原因，看做是作用于界面物质上力的宏观表现。

处于界面上的物质既然受到拉向其内部的力的作用，毋庸置疑，则表面必有自动缩小的趋势，从热力学上来看，这种缩小的过程亦是它的总自由能减小的过程。相反，如果要把界面扩大，就必然要求外加一定量的功。作功的大小和所欲增加的表面积成比例：

$$A = \sigma S$$

S 为产生的新表面面积； A 为产生 S 所要做的功。如果 $S=1$ 平方厘米，则 $A = \sigma$ ，故 σ 可以看作是单位表面的表面能。也就是说在等温条件下，新形成一平方厘米的界面所需要做的可逆功（当界面缩小时，还要释放出这个等量的功来）。对于水来说，在界面上的 σ ，就称之为表面张力。

以一定量的物质来说（如地表几米以内的固体厚度），它的比表面越大，则其所具有的表面能也越大，正如上边我们曾举过的例子，当地表分散为平均一立方厘米的碎粒时，其比表面比原假定未破碎时要增大一千倍，这种系统当然可以看做是具有较大表面能的系统，这样它与自然地理面以外的环境相比较，简单说与地球内部的物质相比较，就处于一个很不稳定的状态之中，因为表面能总有自动趋于减少的方向。岩石风化时意味着界面的扩大，同时必须有外加的力去做功，这个主要做功者就是太阳辐射能来提供的，当然内

力作用在表面积扩大上也起一定的影响。这种过程是可逆的，当地表界面缩小时，还要放出这种多余的表面能，从而对外做功，作为输出从系统转移到环境中。例如当碎屑物质沉积、密实并进行岩化作用时，就要释放表面能。我们的重点在于说明，只是在自然地理面内，才存在着这种普遍的、独特的界面现象，这种可逆的、不稳定的状态，是区别于自然地理面的外部环境和内部环境的突出特点。

这个突出特点的宏观反映，还可以举出很多来。例如在此界面上，是表现地球重力作用最为明显的地方。可以想象，在自然地理面以下的岩石圈中，由于固体物质本身的互相密集、作用强烈及粘聚力效应，它们不能自由移动，至多只可以随着相当规模的整体运动而运动，在这种环境里，重力作用的表现一般是整体的、缓慢的和不大明显的；但是在自然地理面中，由于界面上下的物质密度突然发生了急剧的改变，分散程度高、粘聚力变小、状态不稳定等则重力作用能十分清晰地显现出来。诸如所见的崩塌、滑坡、泥石流、冰川运动、雪崩等固体运动；河流、瀑布、水分下渗、洪积、冲积等液体运动；风积、大气密度分布等气体的重力表现等，在地球内部是无从看见的。

此外，在固体与气体的交界面上（当然亦包括固体与液体水的交界面），地球的内力——构造力，也获得了充分的表现。一般说来，自然地理面的上限可以看作是地球构造力影响的终极。在地球内部，由于岩石的密度和压力都很大，限制着构造力的表现形式，只有在界面上，由于突然失去了束缚其表现的条件，于是这种界面被塑造成为一种结构复杂、起伏参差的自然地理面“基架”。如以海平面为准，在陆上最大的高下相差可达八千多米。如果相对于地球的半径而言，这不算个大数字，但是，对于地表来说，已经显示出地球构造力的威力了。这种在界面上明白显示地球构造力的事实，还可以通过日常生活中的经验加以阐述。比如在一个拥挤的公共汽车上，车厢内站满了人，当汽车转弯或刹车时，车中不同位置的人，其受力状况是不同的。对于处在中间、四周都有别人存在的那些人来说，他们的感觉是随着力的方向有比较平稳的运动，而对于处在边缘的人来说，就会感到这个力的作用十分显著；对应的运动幅度也就很大。难怪有人说，边缘（或者说界面）能够对于力的作用起某种放大的效果。当然，再生动的例子也不能代替事实本身，它只可近似地帮助我们理解所要说明的道理。

正因自然地理面处于这样的交界面中，因此它肯定应当比其下的岩石圈和其上的大气圈都要复杂，它也成为地球上表现这种复杂性的唯一场所。如果进一步去讨论自然地理面中所存在的界面现象，即可看出，不仅在具有很大的总表面积 of 固体中，形成了不少的裂隙和孔穴，供自由度较大的液态水和气体充填，就是在自然地理面的近地面大气中，也含有数量众多的固体微粒（如尘粒、烟粒、海面以上大气中的盐粒等）及液体微滴；而在自然地理面内所包括的水体部分中，既溶有气态的空气，也存在着各种类型的固体微粒，这些次一级的三相界面充斥于自然地理面中，使得它的表面积进一步大大的增加。这里我们具体地揭示界面的表现及其作用，据徐英宝所举植物为例：地球上的树木，采用化整为零的方法，尽量扩大自己与外界的接触面，以求最大限度地吸收自身生长所必需的物质并最大限度得到所必需的能量。可以这样认为，树木的生命活动，正是通过与外界接触的最大可能表面积去进行物质与能量的交换，才得以维持的。这当然是从一个角度看问题时所得出的结论，但从中亦可推论出在整个自然地理面中，表面积扩大的实质意义。

据计算，植物每制造一克糖，不仅需要约四千卡的太阳辐射能，还要吸收进来相当于 2,500 升大气中所含的二氧化碳，加上所必需的 1,000 克左右的水分，以及各种养分（其中大部分水分需经过气孔散逸到大气中去），它必然要求植物的叶子与日光、大气、水分和养分有充分的接触面。

一株中等大小的桦树，约有 20 万片叶子，每片叶子暂平均以六平方厘米计算，其总面积就是一个很大的数字。有人曾对一棵生长 165 年的发育良好的老松树，作了一次统计分析，其上针叶的总长度将近二百公里。当然，我们现在所说的树叶之表面积，尚不包括肉眼看不到的树叶之内表面积。一棵桦树，其全部叶子的外部表面积虽高达 390 平方米，而其叶子的内部表面积（如细胞外的空隙面积和细胞内部的结构面积等）则达 5,100 平方米，比外部表面积大十余倍。再则，植物叶子内部的叶肉细胞中，常含有几十个到几百个叶绿体，一片平凡的山毛榉树的叶子，所含叶绿体的总面积，比叶面积要大二百多倍，这样一株大树所含叶绿体的总面积，约达二万多平方米，即合三十余亩，这不能不使我们感到惊异，由此将能深刻地体会出，表面积的扩大对于物质能量交换的规模和速度的巨大影响。无数事实证明，在生物圈中的初始生产力，总是与当时当地单位体积的总表面积大小有密切关系，热带雨林比其它生态环境具有较大的生产力，正好与它们具有最大的界面面积相符。而且物质能量交换、传输的复杂性与这种界面的大小呈正相关。

总之，在自然地理面中，这种互相渗透并高度集中的分散性体系，使其具有巨大的表面积，确是有别于其它范围的一个显著特征。在自然地理面以外，也能发现某些分散相的存在，但远远不如这里集中、典型和完备。这种在宏观上分散相存在的事实，使自然地理面具有很多独特的物理、化学和生物方面的性质，这也是自然地理学应着力进行研究的内容之一，从而也是区别于任何其它学科的所在。海绵能贮水，依赖于它的表面积大的缘故，自然地理面中具有如此庞大的表面积，有利于它贮存能量和物质，并使得系统的状态变化更为复杂。因此在这个空间范围内的物质能量传输和交换必然具有十分独特的规律。阐明这种独特的规律，正是自然地理工作者义不容辞的职责。

（二）自然地理面是内外力作用的迭加区

凡能改变物体的存在状态者，即称为力。在自然地理面中，一切自然地理过程的发生和发展、所有物质的迁移、堆积和循环、各个自然要素的动态变化、自然历史的演进等，都能看作为地球的内力和外力综合作用的结果。

笼统地讲内力和外力是很不严格的。仅仅是为了叙述上的方便，此处暂且不去详细分析它们，以求尽量简化分析时的复杂因素，只在于着重说明内外力在自然地理面迭加作用的事实和意义，以此作为自然地理面的又一重要属性，并判定它与内部环境和外部环境之间的区别。

所谓地球的内力，一般指的是地球构造力。它是地球本身产生的、并在自然地理面得到清晰反映的那一类力。众所周知，构造力作用和影响的最终界限，即是地球的表面以及其上一个很短的距离，即达到自然地理面的上限，由此再向上，它的影响近乎为零。由于构造力的作用，在地表上产生了陵谷转换、沧海桑田的大规模变迁，同时对于气候形成、大气环流、河流发育、生物表现等有直接的影响。在构造力的作用下，地球表面的形状总是趋向于由简单变为复杂、由光滑变为凹凸，使得地球的基本表面积发生压缩、褶曲、拉伸、剪切等效应，从而给自然地理过程发生的空间奠定了基本格局。从自

然地理学的观点来看，一种倾向性的意见可以归纳成：构造力的最基本的作用，在于它改变了或改变着自然地理面中某处对于能量物质输入接收能力和接收状况、在于它改变了或改变着自然地理系统对于输入的映象能力和映象状况、在于它改变了或改变着对于向环境输出的响应能力。从直观的角度来看，它是一种“基础性”的作用，它是一种“间接性”的作用（相对于外力而言），首先可以归结为它对于自然地理面中所处地理位置的相对改变。

地球上所体现出的自然地理特点，在很大程度上常常可由地理位置的状况及其变异反映出来，这并不是说，地理位置是产生自然地理特点的直接原因和动力，而是一种间接的相关表征和对所产生结果的说明，关键就在于它控制了和分配着物质能量的输入条件。不同的地理位置，即有不不同的物质和能量输入，即使是相同的物质和能量输入，对于不同的地理位置来说，由于整体效应的影响，亦可产生不同的自然地理表现。因此，将构造力首先归结到它对自然地理面中地理位置的改变，最终是为了说明它对于自然地理过程以及自然地理特点的基础骨架作用。

必须强调指出，由于在自然地理面中所处的位置不同，那么赖以维持自然地理过程的能量以及其分配就产生了很大的差异；本地区与相邻地区（按照系统论的观点，可以划分为若干“子系统”或称“亚系统”）的物质交换、交换的方向与交换的强度就有很大的差异。近来提出的“空间地理方程”，就是基于此提出的。

所谓的地理位置，是指在地表上的纬度位置、经度位置和高度位置这三者的综合，它标示着在三维空间中所限定的对象，此对象又加上随时间的变化，因此实质是把地球构造力的作用纳入多维空间所反映的地理位置上。在某一特定时刻，某地域或某个地点处于地球表面上特定的纬度、经度和高度，从属于地球本身在空间的位置、它的大小、形状和运动等基本特点，从而决定着该地域或该地点所对应的物质能量基础，并反映了在这种物质能量水平下的自然地理特点。

纬度位置亦称行星位置。只要在自然地理面首先确定了它，则许许多多自然地理现象的分布与变化就有了基本的轮廓，自然地理的一些基础分析都与它存在着密切的关系，至少也都刻下了纬度位置影响的痕迹。

经度位置的主要作用，就在于它限定了这样的分布，即地表组成物质不同，最主要的是海洋陆地两大组成物质体系的不同，对于能量和物质在接收、贮存、传输等性质上所表现的差异。任何自然地理要素，除了纬度位置的基础作用外，还必然受到海陆分布的影响。由此看来，它的作用也是很大的。

至于高度位置，毋须我们过多地加以解释，只要明白这样一点就够了，即在一个范围不大的区域内，由于高度上的差异，常常使得自然地理表现发生急剧的变化。在赤道上若有一座海拔六千米的高山，从基部直到山顶的自然地理因素变化，相当于从赤道到两极水平距离上的所有变化。作为世界上少见的一个例子，这里可以举出世界屋脊青藏高原东南部的墨脱地区。在那里水平距离不超过 40 公里的范围内，高度变化竟相差七千米以上，形成了十分奇特的自然景色。在此处海拔高度最低处，即雅鲁藏布江河谷，为炎热多雨的热带气候，生长着茂密的热带森林，和云南省的西双版纳及广东省的海南岛相似；可是在距此不远的高山顶部，却是终年积雪的冰雪世界，喜马拉雅山最东部的一座海拔高度为 7,756 米的高峰——南迦巴瓦峰，就在近旁。这种自然景色的陡变与悬殊之大，如若在平原地区，要一直深入到极圈之内

才能包括殆尽，然而在墨脱地区却将这样遥远的水平距离压缩到了一个不足 40 公里的狭小范围，这不充分说明高度位置作用的显著吗？

既然自然地理面中地理位置如此重要，它又是如何由地球内部的构造力来控制呢？这里我们先来作出这样的假设：即地球自形成以来直到现在，一直保持自己的原始状况，地理位置（暂不涉及高度位置）始终不发生任何的位移和变动，这样我们去研究自然地理过程时，仅仅考虑外力——以太阳辐射作用为主就够了。事实上这显然不能成立。与此假设相反，地球从它诞生的那一天起，其内部运动就是异常活跃的。由构造力而致的地壳运动，始终在自然地理面中得到鲜明的体现，即经常不断地改变一地的纬度位置及经度位置（通过地壳的水平运动），也经常不断地改变着一地的高度位置（通过地壳的垂直运动）。

近年来发展很快的板块构造理论，使得 1912 年奥地利科学家阿尔弗雷德·魏格纳（Alfred Wegener）所提出的假说——大陆漂移说，被重新赋予了强大的生命力。年青的魏格纳在当时是一个精力充沛的教师，由于他善于思索、坦率而且谦逊，讲课时的简练生动，因而吸引着不少的学生和听众，他曾经说道：“大陆移动的想法最初是这样得来的，……当我研究世界地图时，大西洋两岸的相似，使我得到很深的印象。但那时我并没有怎么去管它，因为我认为这是不大可能的。直到 1911 年秋，由于偶然蒐集到一些参考资料……，并由此得出了重要的肯定结论，使得我深信我的想法是基本正确的……”。大陆漂移说诞生之后，立即经历了一番长时间的论战，并且遭到了否定和冷落。但到了六十年代，一些新的论据支持了他的学说，这就使得原先的想法充满了新的活力。尽管在目前板块构造理论还未达到完善的境地，一些关键问题如动力问题尚未获得突破，但是已经得到了各国科学家的公认。

我们对此感兴趣的焦点集中在：大陆漂移的结果，势必改变一地的水平位置，致使到达该地的能量和物质，在其移动过程之中和移动之后，相应地发生了改变，与此相联系的必然要产生不同的效果和表现；在板块相接处，又必然引起地壳沿垂直方向上的变动，地体的升降作用致使该地的高度位置发生变化，其后果肯定造成物质与能量在此处的再分配，相应的外力作用，无论在强度上还是在规模上都产生了错综的变化。

关于板块运动的最新证据，可以参照法国地质矿产调查局在 1978 年 11 月 16 日的报道：在 1978 年 11 月 7 日至 11 月 15 日的九天中，阿拉伯半岛与非洲大陆二者离开了大约 1 米，这个新的第一次看到的奇异现象，发生在阿萨尔湖与古贝特—阿拉克哈腊伯之间吉布提后面的阿法尔地带。这是在他们于 11 月 7 日到 8 日的重要火山喷发及其后果作了详细研究后公布的。这一现象的科学意义是相当重要的。地球外壳是由“运动着的”板块构成的，但是如非洲板块和阿拉伯板块之间如此快速而又这样宽的分离运动，还从未观察到。它表明了地球的板块构造活动不仅是一种缓慢的连续的现象，而且也可能是突发的跳跃式的现象。同时还增添了这样的证据：所观察到的分裂分离现象，伴有熔岩流的贯入，逐渐构成新的大洋型玄武岩质地壳。

由上述可以看出，如果地球内部没有足以移动地表板块的力，那么外力的侵蚀作用，早就应当把出现在海平面以上高低起伏的陆地，夷为平面。如果没有地球内部不断的运动，在一个受外力侵蚀作用而夷平的地球上，根本无法向海洋不断提供为生命所必需的营养元素，在这样的行星上，风化作用

实际上将毁掉生命。那样的星球肯定是死气沉沉，动力学性质表现得十分微弱。但是地球并不是这样的行星，它的内力表现十分活跃，使得高山、深洋，彼此对照、相映成趣，把一个自然地理面变得参差不齐，形成了自然地理面的基本骨架。

外力作用的直接场地，就在这种自然地理面的骨架上。外力包括的内容也很复杂，这里亦无必要去作详细的分类，现在仅仅举一个例子加以说明：位于意大利和瑞士之间的阿尔卑斯山脉中，有一座高山名字叫做马特洪，此山比周围地体约高出 2,000 米，山麓的宽度也大致为 2,000 米，因此粗算起来，它含有的岩石量当为 2×10^9 立方米，山坡的面积约为 10^7 平方米。在外力作用的不断进行中，岩石产生了风化和剥蚀，平均每平方米的面积上，每年要有几厘米直径大小的一块岩石被碎裂和剥落，这大致相当于一个拳头大小的石块。按这样的速度计算，整个马特洪山每年大致应当有 1,000 立方米的岩石被风化。如此在经过两百万年之后，马特洪山的全部即化为乌有。当然它的风化速度亦不是固定不变的，即使是同样的外力作用，随着地表面形态及高度的不断改变，风化速度也应发生变化。但是有一点必须明确，即外力作用是相当剧烈的，它的直接作用场所就在自然地理面中由内力作用所构成的基本骨架上。这种使得地表面夷为平地的破坏性力量，如无地球构造力在经常相应地起作用，自然地理面早就应为一片平坦了。

由此可见，自然地理面是内力和外力交互作用的迭加部分。内力作用表现和影响的上限，就是自然地理面的上限，外力作用表现和影响的下限也大致在地表以下几米到几十米的深度，恰好就是自然地理面的下限。二者的重迭部分，正是自然地理面所研究的内容。

这里需要进一步说明，太阳的辐射能可以使地表产生周期性的温度变化，因而暂且用温度这个状态函数去标志和反映能量的状况。周期性温度的变化，在地表面最大，随着深度的增加，这种周期性变化（如日变幅和年变幅）越来越小，最后达到稳定。观测证实，其影响的深度是很浅的。由于地球不透明，太阳辐射能不可能象穿透大气那样穿过地球，只能在相当浅的层次中，被地表吸收并转化为热能，通过长波辐射再返回大气及空间。根据热传导方程的计算表明，这种推断是确切无误的。

若只考虑热量随深度这种一维空间的变化，热传导方程可以写成：

$$C\rho = \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

C 为物质的热容量； ρ 为物质的密度； k 为物质的热传导系数； $\partial u / \partial t$ 代表某深度处温度随时间的变化； $\partial u / \partial z$ 为某时间温度随深度的变化。对照实测资料，侯德封等得出如下结论：

1. 地球表面的温度作长期的周期性变化，其振荡的幅度，随着地表向下深度的增加，呈指数规律减小。即是说，其温度变幅的数值（它代表着外力作用影响的程度），随着深度增加并不是成正比的线性减小，而是以比线性速度大得多的速率减小。

2. 倘若振荡周期 $T = 2\pi / W$ 愈大（ W 是以秒弧度表示的角频率），则温度变化影响的深度也愈深，其影响的深度与振荡周期的平方根成正比，若周日温度变化可影响到地下 1.5 米处，则周年温度的变化也只能影响到陆地地表以下 25—30 米的深度。

3. 地表温度在极长时间内的剧烈变化，也不可能影响到地球内部的热状

况，以地质时代计的冰期与间冰期这样漫长的年代内，即使地表温度变化平均达到 40℃，在地下深达 3 公里处，也仅仅只能引起 2℃ 的变化。

由上述结论，能够说明外力作用的下限是不深的。同时内力作用影响地表之上的高度也是不高的，它们的重迭部分，就是我们定出自然地理面的又一依据。与自然地理面上限与下限以外的环境作一对比，它们均不具内外力重迭作用的特性，唯有自然地理面中才有这种特殊的表现，因而构成了它的又一重要属性。

内外力互相迭加的结果，使得地球表面呈现一种千差万别的景象，高低起伏、河流纵横、奇特的山峰、雄伟的高原、被切割的丘陵、被淤积的平原、海岸线不断地前进和后退、沙漠面积不断地扩大或缩小，交织成一幅随时间而变化的活动画面。图 2.5 就是这种自然面貌的一种，它是由美国宇航局（NASA）的卫星拍摄的。

地表面的结构是内外力重迭作用的结果，但它同时又不断变更着输入的物质和能量的状态，特别对于一些切割破碎的地面来说，这种作用更加显著。对此，大家是并不陌生

（三）自然地理面是有机界与无机界互相转化的中心场所

地球上存在着很薄一层的生活物质，它高度集中在三相变界的自然地理面内。这个庞大的生活物质层之所以能够产生、进化并延续下去，是通过大规模的物质和能量循环来维系的，此种循环的方式及强度，是地球所特有的，也是形成有机界所必需的。这个薄层被称之为“生物圈”。

生物圈的概念是奥地利的地质学家休斯（Eduard Suess）在一个世纪以前，引入自然科学的。他在 1875 年，出版了一本关于阿尔卑斯山起源的小册子，在该书最后总结性的一章中，第一次应用了生物圈这个名词。直到苏联科学家维尔纳斯基（В. И. Вернадский）于 1926 年首先在苏联、其后于 1929 年在法国发表了题为《生物圈》的两篇讲演后，才引起了人们的注意。这样在休斯之后的五十多年，生物圈的概念才得到了真正的发展，一直延续至今，关于生物圈的基本概念仍然属于维尔纳斯基的范畴。1970 年美国出版的《科学美国人》月刊中，比较系统地总结了有关生物圈的文章，特别是哈奇逊（Hutchinson）的一篇论文，对于生物圈的基本特点作了系统的综合评述。

生物体集中存在的地方，一定是某种十分独特的地方，否则正如其它大多数星球目前尚未发现生命现象一样，地球也只能是一个死寂一片的世界。那么它所要求的独特存在条件是什么呢？大致应归纳为以下几条：

1. 它必须伴随着大量液态水的存在，而且在液态水存在的环境中，还必须能同时存在着固、液、气三种状态，并在其间进行着物质和能量的积极交换；

2. 它必须具有一个外来能源——例如太阳，以满足在其发展过程中所必需的能量供应；

3. 在生物圈中，一定要有充分大的界面存在，以利于生物体所进行的复杂过程（包括物理过程、化学过程和生物过程）有实现的可能；

4. 必须有大量的、组成成分比较固定的大气，这个大气一方面是合成有机物质的原料来源，另一方面又是分解生物体转化为无机物的有效手段；

5. 在生物圈中，还必须具备着全球规模的物质与能量循环，以及贮存物质和能量的特殊结构。这种结构使得绝大部分的生物，尤其是高等生物的存在，

只能限制在地球某个十分狭小的层次中。

由以上五个基本条件出发，我们发现生物圈与自然地理面相当一致地吻合在一起。生物利用无机界所提供的二氧化碳和水，在太阳辐射能的作用下，由于叶绿素的参与，生成了碳水化合物和分子氧。在此反应中，需要一种供氢体 H_2A ，在光合硫细菌中的 H_2A 为硫化氢 (H_2S)，而在兰绿藻和高等植物中是水 (H_2O)。生物从形成一直进化到目前的高级阶段，陆地上的“初始生产力”（也有人称为“第一性生产力”主要由高等植物组成，形成了生物界的基础。可以对此进行一下粗略的剖析，看一看它是如何在自然地理面中充分利用三相界面的。高等植物的根一般均处于固体状态为主的土壤中，而茎、枝和叶则处于大气当中，在植物体内有液态水以及溶解于水中的营养元素，通过根部、茎部到达叶部，从而将固相与气相连结到一起，将无机界与植物体连结到一起，形成一个统一的体系。这种把无机环境的物质能量与生命体精巧地偶联起来的统一体系，构成了自然地理面的又一重要属性。光合生产力的研究指出，在自然光照条件下，能产生最大生产量的植物，必然是那些最善于利用固液气这三种状态的植物或植物组合。这种植物或植物组合在其建造过程里，除了充分使用太阳的光能外，还要求一些必不可少的并且应用起来不受限制的物质，这些物质只有在固态、液态和气态三者同时共存时，才能最大限度地得到满足。前面曾经举过植物的表面积相当庞大的例子，也就是为了达到最大限度利用和摄取能量与物质的目的。

在自然地理面以外的内部环境与外部环境中，由于缺失生物存在的理想条件，因此除了具有特殊功能的生物外（它们的生物量不大，而且基本上都属于低等生物），生物圈的主题部分是不可能存在的。由于实际状况如此，自然地理面以外所存在的特殊功能生物的生物量，因为所占生物物质总量中的份额极其有限，常常可以忽略不计，只是在讨论生物起源与进化时，才对它们加以重视。只有自然地理面才是绝大多数生物存在的理想场所，在这里无机界与有机界之间的互相渗透和互相转化，是自然地理面中又一个十分显著的特点。

（四）自然地理面是人类集中活动的空间

人类，在其出现的第一天起，就栖息在自然地理面中。因为地球的形状近似于一个球体，使得它具备有一个对人类的活动极为有利的前提。这就是在全球各个地方，地表面上所受到的地球引力作用，基本上可以看做是相等的，自然地理面中的绝大部分的大气密度也是近乎一致的。这样人类无论处于地表的什么区域，（除了个别的高山以外），都不会存在因引力的突然改变，从而影响自己的活动。自然地理面具备了不会损坏机体正常代谢的基本条件，人类的进化过程也是不断适应自然地理面中状况的过程。引力在自然地理面中的大致均一，导致了人类的散布和迁徙时的方便，扩大了人类活动的范围。现在的地球表面上，可以这样说，已经没有任何一寸土地对于人类来说可以算得上是“禁地”的称号了。

人类活动不是孤立的，必然引起了对自然地理面的大规模干与。有时通过自己直接的干与，而更多的时候是间接的作用。这种影响的规模和强度与日俱增，以致不少人发出惊呼：现在已经出现了危及人类自身的征兆，这就要求人类努力去保护养育自己的“摇篮”。

人类活动的最基本影响，就表现在对于一个地区能量与水分条件的改变上，这种改变可能表现在对输入的数量、也可能是对传输的路径、传输的速

度和交换的强度，还可表现在自然地理面对于物质能量的贮存能力上。例如，农业土地的开垦，对于人类取得食物是必需的，但同时也破坏了自然植被及其演替，改变了地表的太阳辐射能收支状况。一些试验指出，砍伐掉针叶林代之以农田后，即将地表面的反射率提高 5—10%，而地表反射率的提高，在太阳总辐射值相同的条件下，意味着地表能量收入的减少。加之植被类型本身可能由原来的木本变成了草本、由原来的多年生植物变成了一年生的作物，这就必然使得植物的光合作用利用率相应地发生变化。同时亦应看到，作为自然地理面中的一个要素，地面粗糙度也相应地变小了。如从空气动力学的角度来看，粗糙度的改变，使得近地面大气层中风的垂直剖面、风的运行速度、乱流交换强度、地面摩擦系数等……，亦随之发生相应变化，物质与能量的交换重新进行了调整，逐步过渡到另一个新的平衡状态。

再如农田灌溉，这也是具世界规模的人类影响自然地理面的活动之一。一般说来，灌溉土地可比自然状态下的土地吸收和贮存更多的能量，降低反射率。经测定，由于灌溉所吸收的附加热量，可以使近地面层的气温平均升高达 0.04℃，它的反射率比邻近非灌溉地约低三分之一，其上空的乱流热通量比针叶林约低二分之一到三分之一。因此合理地灌溉土地，不仅可以满足植物对于水分的需求，而且也能为它的生长创造一个比较良好的热量与水分组合的条件，目前人们常常用它作为一个调节控制因素，实现改造自然的目的。

的确，灌溉不仅仅弥补了降水的暂时亏缺，而且可以大大地改变地表面的热量平衡，它能减小日温度变幅，提高近地面层的相对湿度，创造出人为的“绿洲效应”，大气中水汽含量的增高，又增强了它阻挡长波辐射逃逸的“温室效应”。因此在广阔地区实施灌溉后，还能产生影响当地气候的后果。自从 1930 年以来，在美国的堪萨斯州、俄克拉荷马州等地，曾在六万二千平方公里的灌溉面积上作过分析，初步结论认为：在初夏大约有高于平时 10% 的降水发生了，其原因归结为从灌溉地上水分再蒸发而造成的。而且利用氢的同位素，对密西西比盆地进行测定后也指出，该地区降水的三分之二，系由局部的表面水蒸发后再次凝结形成的。上边仅仅从人类进行灌溉的事例，即可看出对于自然地理面的巨大影响。

至公元 1650 年，全球人口已达五亿。人们开垦土地、种植作物、驯化动物、发展工业、消耗能源、排放废物等，随着人口的增长，规模越来越大。据统计，今日与五百年前相比，由于人的参与，消耗掉的森林面积已达三分之二。在近 35 年来，工业品增加到原来的两倍。现今美国每年排放到陆地表面、水体和大气中的物质达到 180×10^6 吨。在许多生产中，每产生一吨产品需水达 500—600 吨，预计到 1990 年，苏联每年需水量将达到 500 立方公里以上。

大量的化肥及其它农业化学物质被施入土壤中，其中约三分之一的数量由土壤淋溶而进入到河流、池塘、内陆湖泊和大陆沿海。滴滴涕在 25 年的使用中约达 150 万吨，由于它的降解很慢，目前全球表面估计还保存有总量的三分之二，南极企鹅的肝脏中发现了它；土壤中、植物体中、水中、蔬菜水果中发现了它；甚至就连母亲的奶汁中也能发现它。

工业发展对应着大气中二氧化碳含量的增高，引起了地球表面温度的变化。飞机横贯大西洋的飞行，一次需要消耗 50—100 吨氧。在美国大约有一亿部汽车，所需要的氧比本地所能供应的氧多两倍。近年来在海洋中由于各

种原因抛掉的石油达 4×10^6 吨，相当于在大陆架开采石油总量的千分之一。所有这些，除了污染环境外，在很大程度上改变了自然地理面对于太阳能量的收支状况。

1934年5月12日，对于美国来说，是一个不幸的日子。就在这一天，出现了一次空前未有的“黑风暴”，引起了全世界的关注，直到四十多年后的今天，人们还常常谈起，并把它作为一种严重的教训而引以为戒。就在那一天，从加拿大的西段边界与美国西部大草原邻近的几个州，刮起一股尘雾，并以每小时60到100公里的速度，向东推进。据估计，这股黑风暴携带了这个干旱地区的三亿吨尘土，跨越美国三分之二的领土，一直到达东部海岸，最后倾泻在离岸几百公里的大西洋之中。

在纽约，从那天上午的11点45分起，天空就出现了弥漫的尘雾，遮天蔽日，延续达四个小时，直到下午方告消失。当时虽系正午，但天空一片昏暗，高大建筑物隐隐约约，不可分辨，远洋航船由于视野不清而延迟进港，飞机驾驶员被迫升高到万米以上的高空飞行，市内到处积满了尘土。这一天美国影响最大的报纸之一“纽约时报”在第一版头条位置，刊登了关于黑风暴的专题新闻报道。

这次黑风暴从美国西部的沃尔思堡起，吹到东部的沃尔巴尼，北至圣保罗，南到纳希维尔，形成了一个巨大的尘土带。据当时的纽约气象台测定，那一天白天的透光率只有平日的50%，大气中的含尘量比平时多2.7倍，每平方公里中至少含有40吨尘土，由此计算出从西部的干旱地区大约刮走了3亿吨表土，仅芝加哥一地，估计落下的尘土即达五千吨。这次历时并不太长的黑风暴，使得美国的冬小麦严重减产，比过去十年的平均产量下降了102亿斤。

著名的黑风暴究竟是怎样引起的呢？主要是由于不合理的滥垦土地，从而破坏了草原而造成的。美国西部的土地开垦，在1870年时，尚不到180万亩，而经过六十年到1930年时，已经扩大到1亿1千3百万亩，大致增长了60多倍，平均以每年增长一倍多的速度发展。这样一来，毁坏了原来的草原，破坏了自然地理系统的稳定，导致土壤裸露、风蚀加速，再加之气候干旱、水分不足，使土壤更加细碎，终于酿成了巨大的尘害。事后调查，这次黑风暴平均刮走了5—30厘米厚的表土层，毁坏了上千万亩的农田。

根据这里的定位试验结果指出，在坡度为3%—4%的土地上，如果实行牧草连作，每英亩（约合6市亩）每年平均风蚀掉的土壤为0.3吨；如在其上实行玉米连作，则每年平均风蚀掉的土壤为19.7吨；同样的地方如果是寸草不生的裸地，则每年风蚀掉的土壤高达41吨。依此速度计算，在一块天然草原上刮走18厘米厚的表土约需2,000年的时间，如其上为玉米连作时刮走同样数量的土壤只要49年，而裸露地则只要18年。由此，人类活动对于自然地理面的影响，绝对不能低估。

苏联重蹈了美国的覆辙，同样受到了自然惩罚。从1954年开始，苏联先后在哈萨克、西伯利亚、乌拉尔、伏尔加沿岸和北高加索的部分地区，大量开垦荒地，十年中新垦六千万公顷，约达9亿亩。但由于风蚀加强，黑风暴迭起，使许多农田只好弃耕。

当然，只要符合自然规律，人类活动并不是一件坏事，许多成功的改造自然的事例，就是光辉的证明。无论是有益的还是有害的人类活动，大部分总是在自然地理面中进行的，有个别的是在自然地理面以外的环境中进行

的，它们最终都要在自然地理面中得到反映，因此在对自然地理面进行研究的同时，应对这一特点加以必要的考虑。

第三章 自然地理系统

人类在长期的实践中，深化了自己的认识，渐渐地从许多纷杂的事物中，抽象出某种规律性的东西。自然地理系统的建立，就经历了这样的过程。

系统论的思想，早在维纳于 1948 年创立“控制论”之前就已产生，而维纳的贡献就在于把各个学科中的这种思想，采用类比的方法，抽象出来建立系统，忽略其具体的组成成分和枝节问题，仅关心它们之中所存在的共同的运动形式。

系统论在自然地理学中的出现，时间不算太长，基本理论也还没有健全，许多关键性的部分，仍需作深入的探讨。但是，从它引入地理学的那一天开始，许多地理学者都认为，这是表述自然地理过程的重大手段之一。有可能期望，这个先进的方法论，会引出许多有益的结果，对自然地理学的进一步发展，将会有较大的贡献。本章将结合一些自然地理内容，简要介绍这方面的基础知识。

第一节 集

组成自然界的成分（或称之为元素）不是单一的，而是千差万别的。但在这种千差万别中，根据人们的需要以及着眼点的不同，总能找出它们所具有的某种共性。具有某种给定共性的元素的全体，称之为“集”（亦称集合）。例如自然地理中，土壤可以看作作为一个集，其共性是在陆地表面上具有一定粒级、一定结构、一定养分和水分、植物可以生长其上的那一类集合；同理，植物亦可以看作作为一个集；有关水的各种表现可以看作作为另外的一个集；当然从更大范围来说，整个自然地理面也可以看作是一个集，用以和地质学研究的范围、地球物理学研究的范围等相区别。细细想来，任何研究的目的之一，就是划分集，找出其共性，摸索其规律。大至银河系、太阳系，小至分子、原子、基本粒子，无一例外地都能用集的概念去表述。

如用 A 来代表集，则可以写成：

$$A = \{a_1, a_2, \dots\}$$

其中的 a_1, a_2, \dots 叫做 A 集中的元素。如陆地植物集中，即可包括下列元素，森林（ a_1 ）、草原（ a_2 ）、农作物（ a_3 ）等元素。它们之所以形成一个集，说明它们具有某种共性，这个共性就是它们均能直接利用太阳光能，进行光合作用，组成陆地上的初始生产力。

元素之间有共性，也有个性。但在集的观念里，并不要求去考虑各个元素的个性以及各个元素间的相互作用，因此集没有内部结构。而且规定各个元素在集内的排列顺序是无关宏旨的，集内所包含的元素数目可以多，也可以少，这需视我们对于一个特定的集进行研究时的着眼点。

根据上述定义，自然地理面中由于地域上的差异，可以分为海洋集、陆地集。在陆地上又可以分为山地集、平原集、丘陵集、盆地集等。或者按热量分布分成热带集、温带集、寒带集。如果从能量和物质在自然地理面中的传输、交换、贮存和平衡等特性来分，同样可以分成为通常应用的几种集：

1. 输入集 F, $F = \{f_1, f_2, \dots\}$
2. 态集 X, $X = \{x_1, x_2, \dots\}$
3. 输出集 Y, $Y = \{y_1, y_2, \dots\}$
4. 行为集 B, $B = \{b_1, b_2, \dots\}$
 $= \{f_1, f_2, \dots; y_1, y_2, \dots\}$

集的研究，在划分系统与亚系统时、在确定“分室模型”时、在研究自然地理要素的空间分布时，在拟定自然区划时，都是非常重要的。可以这样说，它是应用系统论的准备步骤。已经说过，各种集内的元素数目，是根据研究对象的不同以及观测者的目的来选择的。例如输入集 F，对于一个特定的系统而言，可以仅仅考虑太阳的短波辐射这一个元素，当然亦可以考虑短波、长波辐射两个元素，甚至对于一个特定的区域来说，需要考虑更多的输入元素，如太阳的短波辐射、地面长波辐射到达云层时又返回来的数量、平流热、地热等。其它的集都以此类推，从而用集来概括所考虑元素的共同本质。

在综合自然区划或部门的自然区划中，每划定一个区域，实质就表示划出了一个集，这个区域所具有的共性，就是形成集合的基础。这个集与另一

个集的差异，就反映了此区域与彼区域之差异。由于集合论对于诸如自然地理学这种综合性很强的学科来说，特别显示了它的优越之处，因此要求我们能够掌握它。

根据要求，一个集可以有几个子集，子集的全部元素都是这个集的元素。如 U 是 B 的子集， Y 也是 B 的子集，可以记作：

$$U \supset B, Y \supset B$$

即 U 子集中的所有元素和 Y 子集中的全部元素，都是 B 集合中的元素。生物可以看做是一个集合，它大致上包括了三个子集，即植物子集、动物子集和微生物子集，这三个子集中的全部元素，都属于生物集。再如中国综合自然区划中的暖温带（ U ），即可以当作为一个集合，它包括有四个子集：暖温带湿润地区（ A ）、暖温带半湿润地区（ B ）、暖温带半干旱地区（ C ）和暖温带干旱地区（ D ），其中每个子集（即每个地区）又包括几个自然省，四个地区共有十六个。如果以自然省作为元素看待的话，那么四个子集中的共十六个元素都属于暖温带这个集合之内。

集还有几个明显的特性，参照楼格所编讲义：

1. 如果 $C \supset B$ ，而 $B \supset A$

则 $C \supset A$

这个推断可以参看图 3.1

我们亦可举出一个显见的事例：几条支流的集合（ C ）属于一个流域的集合（ B ），而该流域（ B ）又属于诸如季风区这个更大的集合（ A ），不言而喻，这几条支流的集合（ C ），必定应该属于季风区集合（ A ）之中。

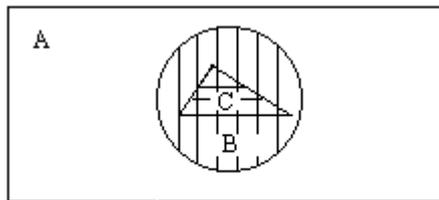


图3.1 集的类推

2. 如果 $A \supset B$ ，而 $B \supset A$

则 $A = B$

该结论是明显的，勿须再加例证。

3. 两个集的“联”：它的定义是，集 A 和集 B 之“联”也是一个集，“联”中所包含的元素或是集 A 的元素，或是集 B 的元素，或是集 A 与集 B 的公共元素，记作：

$$A \cup B = B \cup A$$

如图 3.2 所示。

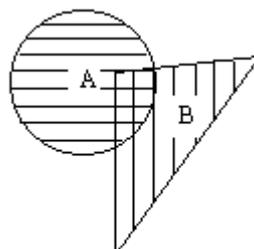


图3.2 “联”

显然，其中的特例是：

当 $B \supset A$ 时

则 $A \cap B = A$

对于“联”这种集合，可以在自然地理面中找到它的影子。我们把内力作用在自然地理面中的显示看作集 A，把外力作用在自然地理面中的显示看作集 B，则自然地理面这个集合本身即可看作是集 A 与集 B 的“联”，在这个联中既包括了外力作用的元素，也包括了内力作用的元素，同时还包括了内外力综合作用的元素。

4. 两个集的“交”：它的定义是，集合 A 与集合 B 的“交”也是一个集，在“交”这个集合中，它所包含的元素是集 A 与集 B 的公共元素。正如图 3.3 所示。

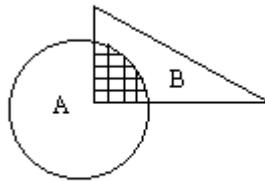


图3.3 “交”

记作：

$A \cap B = B \cap A$

显然当 $B \supset A$ 时

$A \cap B = A$

例如自然地理中通常所谓的亚热带这种集合，就可以看作是热带集合 (A) 与温带集合 (B) 这二者的“交”。在亚热带中，既具有热带的特征，也具有温带的特征，但均不是典型的热带与典型的温带，只是二者的公共元素，这就可以看作是两个集的“交”。

以上是有关集合论的一般概念，而且还限于经典的集合论。至于近年来所发展的“模糊集”理论，对于实际应用具有更大的意义。它们不仅对于系统分析的应用是必不可少的，就是在研究区域划分、要素分类等方面，也是很有用的。

第二节 系统与亚系统

系统论的基本观点，对于自然地理工作者来说，还算是比较陌生的。该理论首先创设于电气工程领域中，至今不过三十余年的历史。由于具有解决实际问题的巨大潜力，它企图解决的对象又与复杂的自然界有很多的接近点，因此它的生命力越来越强。近年来，逐渐在环境科学、生物科学、地球科学，甚至于在社会经济、行政管理等部门，都开拓了新的应用领域。系统分析由于扬弃了繁琐的枝节，抓住了事物的实质、抽象出事物在结构与功能上的主线，并能揭示事物动态演变的方向及强度，预测事物状态的变化及稳定性程度等，因此在自然地理学研究中，逐步有了自己的地位。

一个系统是某些客体或者某些属性的结构集合。也有人说，系统是相互作用的部件（元素）所联成的网络结构。存在于系统中的诸元素，具有某种基本的共同点，并在它们之间彼此存在着可以辨识的关系。它与集不同之处就在于：集中的元素并无内部关系，也不要求去找寻这些关系，但系统则要求在其内的元素关系，应能够很好地被认识，并且在遵循基本规律的同时，可以很好地确定其整体效应和个体效应。如此看来，系统在环境中的行为表现，就是具有内部结构的“集”所具有的同—效果。系统与环境之间不间断地进行着物质和能量的交换（对于开放系统来说）。它对于外部所输入的物质与能量，可以实行映象（或叫变换）的功能，最后再输出到外部环境中去。我们可以把这段话用下面的示意图表达出来：

u_1, u_2, \dots —— 输入
 x_1, x_2, x_3, \dots —— 态
 y_1, y_2, y_3, \dots —— 输出

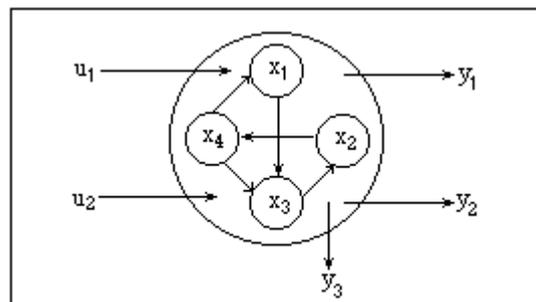


图3.4 系统和环境关系示意图

这些输入变量、输出变量和态变量，将随时间 t 取不同的值，因此这些变量都是时间 t 的函数。在一个系统中，函数的值 $X_j(t)$ （态变量）、 $U_j(t)$ （输入变量）、 $Y_j(t)$ （输出变量），这三者是互相关联的，其中的 $j = 1, 2, 3, \dots$ 。它们之间的相互作用和制约关系通过箭号来指示。这种联系反映了系统内部的结构；反映了系统内部各元素之间以及它与输入输出之间的相互作用和相互依存的因果关系。针对任何一个具体的系统，在分析了这种比较完整的联系后，还要进一步用数学方法去表达这种联系，使它具有某种精确性、定量性、可控性、预测性和最优化。因而就要求建立系统的数学模型，这是对系统的抽象与简化。它不是系统本身，但它是系统本质的反映。图 3.5 就反映了系统处理的基本轮廓。

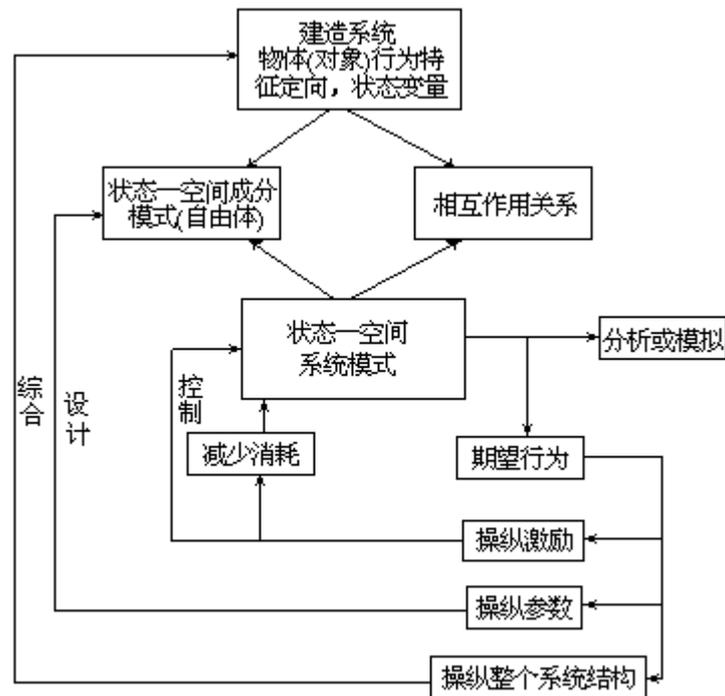


图3.5 系统处理的基本轮廓

这样看来，建立自然地理系统的模型，是一个最基本的步骤。只有在熟悉模型所表述的基本关系后，才能推求它们随时间的变化规律（也就是通常所谓的动态演化规律），从而得出自然地理过程发展的趋势和强度，随之才有可能进行模拟和预测。根据模型所得到的结论正确与否，还要在现实观测中加以检验和校正，倘与客观所发生的状况相背离，那就要重新考虑建立模型的真确性，将其缺漏进行增补，将其关系进行审核，将其谬误加以剔除，以求尽可能逼近实际的状况。由此，要求我们从两个主要的方面入手，一是完善自然地理系统的基本理论，二是更新观测与验证的手段，达到既可迅速取得大量的信息，又可随时检验所得的结果。上述这样两个方面的基本要求，对于自然地理系统的发展，是缺一不可的整体。

为了便于对系统的理解，我们觉得举出日常生活中所接触到的知识是有帮助的。例如，美国纽约州立大学地理系教授冯·里潘（VanRipen）在谈到系统论应用于地理学时，就以家庭用的取暖设备作为一个简单的开放式系统的例子。在供暖季节里，能量的输入是通过炉子中石油或煤的燃烧来提供的。在这个系统中的组成部分包括炉子、循环使用的水、烟囱、管道、散热器和恒温器。监测该系统状态的装置集中在恒温器上，并以某种方式将系统状况的信息连结于进油阀门和点火装置。象所有的开放系统一样，能量的总输入必然等于它的总输出。倘若能量在一个不确定的时间里，于系统中的某一个部件上大量累积的话，就会毁坏这个系统，要么炉子被熔化、要么房子被燃烧、要么根本无法对需要热量的房间供暖，在这种情形下，整个系统即行崩溃。因此，人们总是希望系统保持在一个相当稳定的状态下运行，能量在系统中的流动尽量趋于平稳。这种稳定状态是由恒温器中监测装置的限制范围来调控的。一旦室内温度降到所要求的限度之下，恒温器的传感器立即注意到它并且输送一个脉冲信号到炉子，发出指令开阀与点火。随着能量的不断输入，当室温超过所规定的标准后，又会通过这种同样的步骤，暂时关闭阀门，阻断能量的进一步输入，直到从室内的热量损失到最低限制指标时为止。

谁也不会认为，我们全球的自然地理系统会如这种供暖装置一样简单。但是谁也都会相信，更为复杂的系统所遵从的原理与一个简单的系统并无两样。

系统只是一种概念性的表达，它本身并无规定具体的范围和大小。它也可以很大，如整个银河系、整个太阳系、整个地球均可作为一个系统看待；它也可以很小，小到一个细胞、一个分子和一个原子。各种各样的系统，在我们日常生活中见到的相当多。例如汽车中的点火装置，就可以认为是一个系统，其中包括导线、绝缘子、连通器、火花塞等……，同时这个点火装置又是汽车这个大系统中的一个组成部分，而汽车毋庸置疑，它又是城市系统的一个组成部分。如此看来，我们的着眼点不同，所视的具体系统的大小就有改变，因此，有必要去规定我们所研究对象的空间概念和时间概念。再如人体也是一个系统，与外界环境发生着物质与能量的交换，同时它本身又可以由神经系统、循环系统、消化系统、呼吸系统等次一级的系统组成。如果从比人这样的系统更高级的系统去看，则人是社会中的一员，它必然又是更大范围的系统如家庭、社会的一个组成部分。因此我们说，系统如可比作躯壳，则亚系统比作这个躯壳中的内容。系统可以分出亚系统，而作为“躯壳”的系统，又成为高级系统的“内容”。

系统和亚系统，对于自然地理学是特别适用的。如果把整个自然地理面作为一个系统，则海洋和陆地可以看作是其中的两个亚系统。就陆地系统来说，它也可分出若干个次一级的亚系统。根据所研究的对象、范围和目的，建立严整的系统序列及系统组成是很必要的。图 3.6 就标示了这种关系。

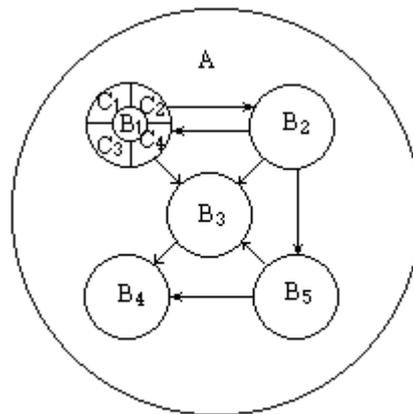


图3.6 系统和亚系统

由图 3.6 中看出，系统 A 中包括有五个亚系统，分别为 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 ；而亚系统 B_1 中，又包括了四个更次一级的亚系统： C_1, C_2, C_3, C_4 。当我们着眼于亚系统 B_1 时， B_1 范围之外的所有部分均视做它的环境。自然地理中，一定的空间必定包含有诸多的自然地理要素；而每一种要素又必定占据一定的空间，这种连环式的关系，构成了自然地理学的基本特征之一，因此正确地划分出系统、亚系统的界限、组成和序列，应受到必要的重视，特别对于能量流、物质流来说，它的传输路径，它的源和库，它在系统中的“态变化”等，更离不开对于系统、亚系统的依赖。至于系统和亚系统的具体划分，并无严格的规定，只能根据具体的对象，审慎地权衡组成系统成分的重要性以及它们对系统的贡献程度来划分，它依赖于我们对专业知识掌握的深度以及对事物本质关系的认识水平。在错综复杂的自然地理面中，一旦研究

的中心明确了，就需要尽可能准确地分析出该系统所含亚系统的数目，亚系统之间的结构与关系，从而奠定系统分析的雏形，由此分析其功能和动态。

第三节 自然地理系统

自然地理系统处于一种中等尺度的范围。它介于原子尺度与宇宙尺度之间的某个位置。对于系统进行分类，一般遵循着下述途径去进行，它们分别是：

1. 如果按照物质能量的交换状况与系统-环境间的关系去区分，一般可以分成孤立的系统、封闭的系统和开放的系统三类。所谓孤立的系统，就是指系统与环境之间既没有能量，也没有物质的交换；所谓封闭的系统，通常是指系统与环境之间有能量的交换而无物质的交换。而开放系统则是指系统与环境之间既有能量也有物质之间的交换。在自然地理系统中，均属开放系统，而且其过程是不可逆的。

2. 如果按照所研究的对象去分类，可以分为工程系统、生态系统、自然地理系统、社会经济系统等。

3. 建立在系统内部复杂性基础上的分类。如从粗略的轮廓来看，依照复杂程度可以设想分为以下六类：

A. 形态系统：纯粹由系统的各个组成成分之间的结构网络来确定；

B. 级联系统：这样的系统是由能量或物质所通过的路径来规定的，即通常所谓系统的能量流和物质流的表达；

C. 过程-响应系统：这类系统表示了至少一个形态系统和一个级联系统的偶合，过程-响应系统表示下述状况，即在此系统中，“形态”关联到“过程”，“结构”关联到“功能”，它显然要比单一的形态系统或单一的级联系统都复杂一些；

D. 控制系统：它本身也是过程-响应系统，不过在其中的关键部分，被某种有意识的手段加以控制，这种控制引导该系统去执行那个有意识控制手段所确定的方式，并达到原来预计达到的目的；

E. 生态系统：它是由植物、动物、微生物以及与其有关的非生命环境之间所组成的系统，由于它已具有生命的形式在内，而且它的控制过程可以由自身的反馈来实现，因此就更为复杂，它已将有机界与无机界综合起来了。

F. 社会系统：由于人类的进入，社会生产的组织带有阶级的意识形态，因此它已经超出自然科学的研究范围，是自然科学与社会科学两大体系的综合，显示了更大的规模和更复杂的关系。

从自然地理系统研究的对象和任务来看，我们一直要涉及到生态系统这一级。生态系统在自然地理学中亦称生物地理群落。苏联学者E.M.拉甫连科在谈到生态系统与生物地理群落时指出：“生态系统概念实质是与生物地理群落概念相一致的”。比利时的德·斯迈(DeSmei)等在1975年发表的论文中认为：生态系统相当于生物地理群落，也相当于生物地球化学景观中“系列”这一级。因此生态系统就成为自然地理学中必须关心的一个部分。尤其是陆地上的生物，它们生活的环境，基本上就处于自然地理面中；而生物本身又是组成自然地理系统的一个基本元素。因此在研究非生命系统的同时，必须对于生态系统予以足够的重视。

下面我们着重讨论自然地理系统中几种常见的类型，每一种类型都展示了它们的独特之处，而且各个类型之间具有互相补充和随着复杂程度的递进性。由这些类型构成了自然地理系统的基础。(见图3.7)

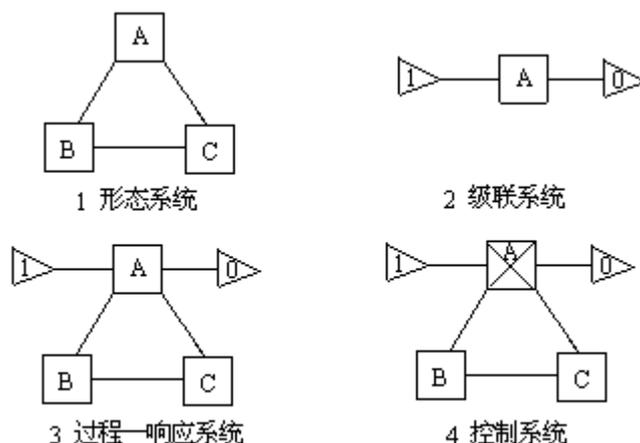


图 3.7 自然地理系统中常见的几种类型

对于形态系统来说，首先要在所研究的对象中，找出系统所包含的成分（元素），建立各个成分之间互相联系的渠道，这种联系的强度和方向，可通过试验或专业知识的推断来得出，一般可以通过相关分析去揭示。

在级联系统中，我们则要首先寻求能量或者物质传输的机制和途径。我们在此举出一个磷在三个亚系统中流通的例子。众所周知，磷是植物生长中不可缺少的养分之一，它的循环路径，足以代表级联系统中分析能量流或物质流的基本方法。这三个亚系统分别为土壤水、植物和食草性动物。将磷施于土壤中之后（即输入），它首先溶解于土壤水分中，随后被植物的根系所摄取而进入植物，参加了植物体的建造。植物体中的磷，一部分由于植物死亡，变成枯枝落叶重新归还于土壤水分之中，另外一部分被食草性动物取食而贮于这些动物体内。贮于动物体中的磷，一部分由于动物死亡也归还于土壤水中，也有一部分又被其它食肉性动物取食而转移到这些动物的体内，输出到我们所限定的系统之外。在土壤水分中的磷，也有一部分随着水分的淋溶而入渗到植物根系带之下，从而不能为植物所利用，也输出到系统之外。对于各个亚系统来说，这里既有磷的输入，也有磷的输出，当然也有磷在各个亚系统内的状态变化。分析类似上述的物质、能量流通过程，就是级联系统所要解决的课题。

过程-响应系统，是两类系统的综合，这就更加接近于现实状况。一个简单的过程-响应系统如图 3.8 所示。在这个简单的过程-响应系统中，一旦分析清楚了它的内部结构，也就是知道了它们之中所包含的成分以及各成分之间的制约关系，并且已知四个内部常数参量（这种内部常数参量可以通过实验观测得出，亦可通过理论推导得出，它反映了各个成分的状态变化，反映了各成分间互相作用的方向、强度、流通速率等），它们分别为：

$$a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$$

按图 3.8，该系统中的输入向量 U 和输出向量 Y 分别是：

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

当系统处于稳定运行的条件下，即假定它为离散时间、定常的线性系统

时（如实际的系统不具这些条件时，要设法变换成近似于这些条件），即可顺利地建立输入与输出之关系：

$$\begin{aligned} a_{11}u_1(t) + a_{12}u_2(t) &= y_1(t) \\ a_{21}u_1(t) + a_{22}u_2(t) &= y_2(t) \quad (3.1) \end{aligned}$$

只要内部常数参量固定，那么只需知道 $y(t)$ 的值，便可确定 $u(t)$ 的值。用行列式去表达：

$$u_1(t) = \frac{\begin{vmatrix} y_1(t) & a_{12} \\ y_2(t) & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}} \quad (3.2)$$

$$u_2(t) = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & y_1(t) \\ a_{21} & y_2(t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}} \quad (3.3)$$

这里的关键在于，要建立输入变量与输出变量之间的正确关系，首先必须把系统内部各个元素之间的结构搞清楚，这其中包含着既要明了形态系统，又要明了级联系统，还要明了二者的偶合，系统的反馈等，再经过相应的数学处理（如线性变换等），引入矩阵的运算法则，从而将输入变量通过系统内部结构的作用，映象到输出变量。

至于控制系统，那是必须在完成过程-响应系统之后，方能有效地去实行。

关于非生命部分的自然地理系统，包括这四类中的任何一种，针对所研究对象的复杂程度，以及研究所要达到的目的，确定我们需要应用那一类系统。

为了深入理解自然地理系统的原理和方法，我们举出一个能量在自然地理系统分室模型中的传输过程，它具有普遍的意义，无论针对自然地理面中的什么区域、什么规模，它都是适用的。这个例子实际上是将系统论应用于自然地理中的基本模式。为了分析上的方便，我们先规定：系统是线性的、时不变的、离散的；能量在分室间的流通为“给者控制”，系统是确定性的而不是随机性的。

在此条件下，我们绘出了能量在自然地理系统中的一般流通过程（参看图 3.9）：

上述能量流通过程的各分室（ x_i ）的状态变化，可以用一类微分方程表达出来，即

$$\frac{dx}{dt} = F + AX$$

其中： dx/dt 代表状态随时间的变化， F 为相应的对系统的输入变量， A 表示描述能量流通速率的矩阵， X 代表各个状态变量。

以图 3.9 为例，简单地推导状态方程以及矩阵 A 的过程，可以参看书末附录 1。

状态方程亦可以表达系统对于以往输入的数量，在经历一段时间后，对于当前系统的影响效果，这样就把自然地理系统中的“能量流”或“物质流”随时间的演变，输入输出之间的联系，系统的响应状况等，动态地表示出来。

在此要注意两个问题：其一，建立模型要有明确的物理含意，必须能正确反映它们之间的本质联系；其二，具有可测性，就是说，一个系统的状态变数很多，能否找出代表本质的几个，以此来反映状态的基本内容。这就是可测性的含意。同时，要通过观测和理论推导，求出流通率的具体数值。如果一个系统中，这些数值具备时，立即可以进行运算。只是由于运算量很大，因而必须通过电子计算机来进行。将图 3.9 编出程序，进入机器，是一件不太复杂的事。有关上述分室模型的电算语言，就不再列出了。

自然地理系统的研究还刚刚在开始，数据的积累也需要假以时日，方法也要进一步完善，它的作用和意义也还没有为大多数人所理解，但是相信它一定会在自然地理学的发展中，作出相应的贡献。

以上我们只是举了一个在自然地理系统中能量传输的例子，没有涉及到物质的交换和传输，但它们的原理和处理原则是一致的。更重要的是，我们应当更进一步地去分析生态系统，它比非生命的系统表现得更复杂、更精巧，而且在研究水平方面，也更趋于成熟一些。生态系统研究的意义可以表现在：

生态系统的演化，可以改变或影响具有地理规模的地表形态特征；

在自然地理系统中，它是一个基本的环节；它也是水分循环的必经路径之一；

应用它可以调控天然的过程-响应系统。例如利用植被对于水土流失过程的控制、对于沙漠的改造、对于气候的影响等。为此，我们将专辟一节对此加以阐述。这两类系统的主要差异在于：生态系统的系统与环境分别指生物体与无机环境；自然地理系统的系统与环境则是自然地理面与其上其下的内外环境。至于研究方法和遵从的原理则是一致的。

第四节 生态系统

自从海凯尔 (Haeckel) 于 1869 年首先创设《生态学》一词后, 生物与环境之间相互关系的研究, 愈来愈引起人们的重视。在本世纪三十年代, 生物学家泰斯莱正式建立生态系统的概念, 随后苏联学者苏卡乔夫提出生物地理群落的概念, 澳大利亚科学家提出植物环境力学的概念等, 其基本实质是一致的, 都是关于生物与环境之间能量和物质交换过程的研究。

早在十九世纪, 一些学者就表示了这样的意见: 原始人类可以灭绝诸如猛犸和其它动物。这种观点受到了在生物进化中反对“灾变论”的人的支持。例如皮多帕里钦科 (Pidopli-chko) 1963 年就提倡这种看法, 他在公开辩论中积极反对只是由于冰期才致某些动物的灭绝。最近 (1974 年) 布德科也倾向于同意他的观点。如果从生态系统的理论出发, 这正是食物链演化中可能发生的过程。

在更新世结束时中纬度动物区系的改变, 相当于人类史上旧石器文化时代末期, 因而不应当忽视人类在捕杀动物中的作用。某种动物的数目随时间的变化可以表达为:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha n - \beta n \quad (3.4)$$

n 为单位面积上某种动物的数目; dn/dt 为该动物数目随时间改变的速率; α 为繁殖结果而致的相对增长率; β 为由于自然死亡而致的相对衰减率; 及 g 皆取决于 n 的大小。假如此时人类对于这种动物施加影响时, 则

$$\frac{dn}{dt} = \alpha n - \beta_1 n - g \quad (3.5)$$

式中的 g 为给定时间内被人类所猎捕而消灭的动物数; 作为自然原因而致的死亡率, β_1 在其它条件相同时将比 (3.4) 式中的 β 小, 因为猎手更容易猎获有病的或体弱的个体。此处当然还应考虑所捕杀动物的性别, 在 (3.5) 式中只从平均概率出发去描述。

由于所猎获的动物成为当时人类食物的主要来源, 则进一步假定 $g = m$, m 为单位面积上的人口数, a 为某给定时间内, 每个人所消耗动物物质的数量。现在来考察一下人口的变化, 它可以表达成:

$$\frac{dm}{dt} = am - bm \quad (3.6)$$

a 与 b 分别表示为人口的出生率及死亡率, 我们引入 $c = a - b$, 则可以得出:

$$m_t = m_0 e^{ct} \quad (3.7)$$

m_t 为 t 时刻的人口数, m_0 为给定时间开始时的人口数。在旧石器时代初期, 根据不同作者的推算, 在欧洲的人口密度为 5—50 人/100 平方公里, 在约 2 万 5 千年当中, 应用 (3.7) 式获得 c 值的范围为 0.64×10^{-4} /年到 1.56×10^{-4} /年。人类这样一个自然增长率, 如与现代人相比, 那是十分微小的, 但它却表征了早期人类历史的真实状况, 同时也符合由所发现的骨骼去推断当时人类平均寿命的事实。

于是我们进一步估算在欧洲冻原上所存在大量食草动物中的一个品种, 假定它相对于其它动物来说占据统治地位, 因而它将消耗这里的初始生产力 (牧草) 的绝大部分。但是根据冻原中初始生产力的供应情况去推算, 若充

$r_1 \dots r_{n-1}$ 均小于 1, 故而 $r_0 > r_0 r_1 > r_0 r_1 r_2 > \dots > r_0 r_1 \dots r_{n-1}$, 这样营养级越高, 其贮存的能量总是越来越小的。同时, 各级所贮能量之和:

$$P_0 (1 - r_0) + P_1 + P_2 + \dots + P_n = \text{常数} = P_0$$

生态系统研究中的一个主要目的, 不仅在于确定食物链的组成, 而且还需进一步确定 $r_0, r_1 \dots$ 的大小, 并在系统处于平衡时建立这种 r_i 之间的确定比例关系 ($i = 1, 2, \dots, n$)。这种比例的异常, 预示着生态系统的变化, 这对于捕猎、畜牧、林业、水产等都具有实际的意义。同时, 由于 P_0 本身决定着整个系统的组成规模, 它的大小不仅关乎其上营养级的层次, 也关乎这些层次的稳定程度, 因此它处于支配作用的地位。我们一再谈到要用它去判定自然地理的质量, 用它去衡量自然生产潜力的发挥程度, 其原因概出于此。

2. 物质和能量流动的连续性:

能量与物质一旦输入系统, 即连续在各个亚系统之间流动, 有时还要进行复杂的反馈, 直至最后从系统输出。这种物质和能量的流通过程, 既不能中断, 也不允许在某个环节阻塞, 否则整个系统即行崩溃。例如近来两位地理学家盖斯曼尔 (Gelsmehl, 1976 年) 和敏苔迈耶尔 (Meentemeyer, 1977 年) 在研究了整个生物圈的养分循环后, 抽象出了生态系统中极为简化了的养分元素循环图式 (图 3.11)。该图明确地表示了物质在系统中的连续流动特性。此外, 英国的尤斯海尔 (Usher, 1972 年), 应用莱斯利 (Leslie) 在 1945 年提出的著名

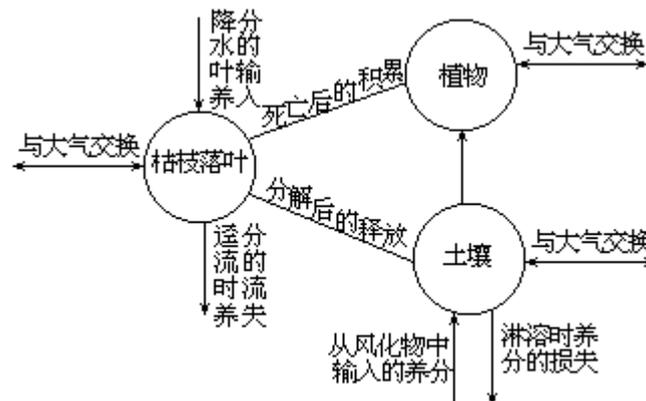


图3.11 生态系统中养分物质循环示意图

矩阵模式, 预报了生态系统中能量的交换与磷的循环过程, 取得了较好的结果。我们在他的工作基础上, 提出了水在生态系统中的连续流动模式, 并且讨论了处理这种连续性的方法, 现概略介绍如下:

x_i ——在任意指定时间内, 第 i 个亚系统中水的数量;

a_i ——水输入第 i 个亚系统的流动速率;

z_i ——水从 i 输出时的流动速率;

f_{ij} ——水从第 i 个亚系统流向第 j 个亚系统的速率;

f_{ii} ——在一个时间周期内, 在第 i 个亚系统中所贮存的水的数量。图

3.12 是水在生态系统中连续流动的模式图。

图中 a_1 可理解为对土壤的灌溉; z_1 为土壤水分的下渗 (此处假定不产生地面径流), f_{12} 表示水分从土壤向植物的输送速

率； f_{23} 表示植物向大气的蒸腾速率； f_{13} 表示土壤水分向大气的蒸发速率； f_{32} 表示大气降水被植物截留的速率； f_{31} 表示大气向土壤降水的速率。

为了加深认识生态系统中物质或能量流动的连续性，就必须揭示出 f_{ij} 的物理本质及其数量表达。目前建立各亚系统之间数量关系的可能性已经存在，通过测试和推理即可顺利地求取。现在我们认为系统处于稳定状态，即这种流通速率随时间的变化趋近于 0，此时只要知道 t 时刻各亚系统的值，通过矩阵处理，可以预测出 $(t+1)$ 时刻的数值。这无论对于从理论上解释物质或能量在系统中的连续性，还是对于实际上的应用，均是很有意义的。自从莱斯利为处理雌性动物群体的年龄结构提出这一方法后，三十多年来，得到了在十多个方面的应用和发展。用该法处理上述我们所设计的系统模型，也是完全适用的，在矩阵中出现的 A、B、C 分别是对于 x_1, x_2, x_3 在 t 时刻的净输入速率：

$$\begin{bmatrix} f_{11} + A & 0 & f_{31} \\ f_{12} & f_{22} + B & f_{32} \\ f_{13} & f_{23} & f_{33} + C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1, t \\ x_2, t \\ x_3, t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,t+1} \\ x_{2,t+1} \\ x_{3,t+1} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

由于生态系统的各个亚系统间，物

质能量具有连续传输的特性，这对于我们建立模式、处理模式，提供了十分方便的参考。

3. 生态系统发展中的趋稳性：

生态系统的动态演化过程，由于生物与环境间的互相作用与生物对环境的适应性，最后总是趋向于稳定。当其到达稳定之后，只要输入条件不超过稳定态系统的允许范围，则此稳定态得以保持。所谓稳定态，就是说各个亚系统间的物质和能量的流通速率，随时间的变化是 0 或接近于 0。或者说，亚系统的结构（包括亚系统的组成、层次、分布等……）已经定形，没有缺失或增补，物质能量在有限制的输入后（不得过多或过少），在各亚系统间的运转平滑，处于相对平衡状态。

当一种状态达到平衡态时，这时如果一个扰动发生，系统本身有坚持平衡态和抵抗扰动的能力。系统分析中，已经能够将稳定性问题进行数学处理，并作出判别。

一旦输入条件变化到超越该稳定态的许可边界，则生态系统就由稳定态变成不稳定状态，以后通过生态系统的自我调节及自我适应，必然会在新的条件下达到新的平衡，重新进入一个稳定状态，这就是系统的趋稳性。

植物群落的自然演替过程，充分说明了生态系统趋稳性的特点，它从发生直到演替到它的“顶极”，就是由不稳定到稳定的过程。达到稳定态后，如果发生了一个强扰动，破坏了这种稳定态，则它又可在新的条件逐步地再达到稳定（见图 3.13）。

第五节 能量与物质在自然地理系统中的传输

在自然地理系统中，能量的传输与物质的传输经常是很难分开的。能量的传输往往伴随着物质的传输，而物质的传输如无能量作为动力，本来是不可能进行的。最常见的例子就是水变为水汽传输到数千公里以外的地方，粗看起来，似乎只是水这种物质的传输过程，但同时蒸发水分时的潜热也要在水汽重新凝为液态水时被释放出来，因而它又是能量的传输。这样的例子我们在自然界是不难见到的。

综观自然地理系统的全貌，能量与物质输入、变换、流通、贮存、输出的方式，可以归纳为四种类型，这可以用习见的地质循环、水分循环、大气循环和生物循环，作为近似的表达。在这四种循环中，自然地理面均是循环过程的必经链条，联系着物质能量由内、外环境的输入再经映象后，输出到内、外环境当中去。在自然地理系统中，一切涉及物质能量交换、传输和贮存等，从大规模和大范围着眼，均可由这四大循环加以阐释。它们代表了固态、液态、气态三种状态；代表有机与无机两大类型；以及势能与动能、显热与潜热等不同的形式，在全球范围内的流通过程。并且这四大循环过程巧妙地偶合在自然地理系统之中。1. 整个地质时代中，地球表面是被四个基本地质过程的不间断循环所控制的。

A. 风化作用：包括了所有剥蚀陆地物质的作用手段，它动用全部损毁地球陆地表面的力，如机械的、化学的和生物的各种方式，既破坏表面的岩石，也侵蚀着表面的土壤；

B. 输运过程：把上述的风化产物通过各种渠道，输运到远离产生它的地方，这些风化物最终的输运目标是海洋的底部（当然也包括在湖底及低地等）；

C. 沉积过程：在改变温度、压力和深度的状况下，使得输运来的风化物逐渐密实，改变成分，并在岩化作用条件下，逐渐变成为岩石；

D. 构造过程：最后的一个基本过程称之为构造过程。由于地球内力的作用，产生地壳的抬升、下陷、断裂、褶曲、火山、地震等现象，同时也发生着地壳大规模的水平运动。这个构造过程有时是剧烈的，有时是缓慢的；在此处可能是剧烈的，在彼处可能是平静的，主要视地球内能的输入状况来决定。

地质循环的这四个基本过程是互相联结的，其动态演化可以参看图 3.14。

由图 3.14 可看出，陆地表面的土壤是在地质循环的一刹那形成的，土壤体本身经历着一种更为迅速的动态演化，随着循环过程的演进，土壤不断地消失也不断地产生，进行着积极的更替。由于它的物质组成以及所处的位置，因而它十分容易遭到侵蚀；但又由于在其中发生着极有意义的物质转换过程（是无机物转换为有机物的基本场所之一），因而它又成为地表面有机界与无机界互相关联的一个枢纽部分。这就是人们对于土壤这个极薄层次的认识。土壤之所以表现为自然资源，就在于它的基本作用是作为初始生产力的代表者——植物的生长基地，也是微生物和土壤动物的主要栖息地。这样，土壤的形成、演化、侵蚀或保持等，肯定与其它因素（例如地质循环、地形状况、热量与水分条件、土壤本身的物理化学性质以及其上的植物、其中的微生物和土壤动物等）有密切的关系。土壤具有肥力，并有特定的结构和功

能。

土壤作为土地来看待，它具有特殊的生产潜力，与人类的关系至为重大。美国农业部的专家们对这方面的研究指出，把土壤当作土地看待时，可根据它所表现的生产潜力进行分类，用以辨认和衡量人们需要了解的潜力级别。（见图 3.15）

联系到物质能量在自然地理系统中的传输过程，人们的目的之一在于尽量维持土壤这一类极有价值的物质，不使其尽速地输出于系统之外，当然土壤的侵蚀有地质速率和加速速率两种。前者要求人们认识它、遵从它；后者要求人们防止它、改造它。现引述福奈尔（Fournier, 1972 年）的一项资料，说明不同处理的土壤侵蚀程度（见表 3.1）。

对于自然地理系统的认识和进行结构上的改造，以及实行控制，是能够达到改变状态变量及输出速率的。2. 水分循环：水循环在全球规模的能量物质运输过程中，采取两种主要的方式。其一，水本身通过相变，即由液

表 3.1 在三种耕作实验区中的土壤侵蚀量

年份	降雨 (毫米)	作物	径流 (占降水%)			土壤侵蚀 (公斤 × 10 ² /公顷)		
			1	2	3	1	2	3
1934	540	燕麦	19.8	27.9	25.3	907.41	545.22	
1935	916	玉米	32.0	28.6	22.1	1074.55	384.64	
1936	629	草地	8.2	7.8	5.6	19.96	2.49	
1937	549	玉米	16.1	18.8	13.8	447.01	41.28	
1938	664	燕麦	4.7	2.7	2.7	59.42	3.63	1.13
1939	678	玉米	20.0	13.7	13.2	586.04	17.46	14.29
1940	702	草地	7.7	7.0	6.0	74.16	1.59	0.91
1941	890	玉米	16.3	16.3	13.4	1449.90	8.39	25.40
1942	835	燕麦	17.7	17.7	10.0	871.80	17.69	13.15

其中：1. 无土壤保持措施

2. 具有等高线耕作和排水控制

3. 具有等高线耕作和梯田

态或固态转换成气态，随着大气环流或地区性的空气运动，传播到远方，而后在适当的条件下，再由气态转换成液态或固态，返回自然地理系统。这种通过相变方式的水循环过程，其运输能量的本领通常比运输物质的本领更

为引人注目；其二，通过热力学梯度或势能梯度的作用，以洋流或陆地上的河川径流为代表，进行对物质能量的大规模传输，这是水循环中又一种重要方式。在此方式中，水并不需要发生相变，例如在赤道附近的海面，由于所接受到的太阳辐射能数量多，因此温度相应也比较高，而在高纬地区的海洋，由于单位面积接受的太阳辐射能少，因此它的温度相应比较低。于是在低纬与高纬之间必然形成由于能量分布不均匀所引起的热力学梯度。依照热力学第二定律，热量必定要由温度高的地方自动地向温度低的地方传递，这种传递加上风力作用的帮助（风可以看作是热力学梯度在气态中的表现形式），便形成了洋流。此外，由于海洋表面的温度高于其下层的温度，因而在垂直方向上也有热量的交换，但它的规模比起水平运动的洋流来要小的多。当然在洋流的形成中，海水密度的差异也是重要因素之一，但这里则主要说的是由温度梯度而引起的水流运动。

至于在陆地上的径流，其所以运动的原因关系到势能梯度的存在，势能梯度形成的原因很复杂，既牵涉到地球的构造运动，也牵涉到外力的作用。由于这个势能梯度，因此“百川归海”成为了一个名符其实的原则。

这第二种传输方式所表现的侧重点，与第一种依赖水的相变而循环是不同的，因为它的主要作用不仅仅是传输能量，而且传输物质的比重相应地更大。例如径流本身，它既是相变水循环的一个组成部分，又是地质循环中输运风化物质的主要传送带，同时还是侵蚀地面特别是侵蚀土壤的一个重要外力因子。这样，我们可以说第二种方式输运物质的本领更引人注目。3. 大气循环：在自然地理系统中，有相当一部分的物质和能量，是通过大气循环的方式进行输入和输出的。由于气体的自由度最大，运动速度比较快，交换能力也比较强，因此它的作用也是很大的。

大气环流的动力，主要是由太阳辐射能加热地面，再由地面进行热辐射到大气底部（对流层内）以及热对流来提供的，此外还由于水汽在大气中的凝结放出汽化潜热来提供。作为一种对比，我们可以分析一下海洋和大气在增温上的明显差异。海洋中的加热是在其表层进行的，因而导致了比较稳定的状态；而大气却是在底部进行加热，这样就导致了它的强烈的不稳定。这种强烈的运动有助于我们更好地去理解大气活动的规律。

至于全球性的大气环流，其形成也是由于太阳辐射能在全球的分布特点所造成的。让我们先来考虑一个典型的大气状况。在赤道由于温度高，空气必然产生膨胀，于是在高空的气压就会高于极地上空的气压。在气压梯度力的作用下，赤道上空的空气便能自动地向极地流去。而地面的状况是，在赤道地区为低压，极地地面为高压，于是在低层就要产生从极地流向赤道的气流。这样从高空的由赤道到两极，和从地面的从极地到赤道，气流就构成了南北向的闭合环流。这可以算作大气环流的雏形吧！

但随之复杂的现象就产生了，由于地球自转而造成的地转偏向力效应，在北半球它使运动的气流向右偏转，在南半球运动的气流向左偏转，而且这种偏向的作用随着纬度的增加而增加。当气流从赤道上空向极地流动时，因受这种偏向力作用，就使得原来的南北向逐渐发生变化，到纬度 20—30 度处，空气运行方向就成为东西向了，于是空气在这里发生了堆积沉降，使得此处地面气压升高而形成了一个高压带，一般称之为副热带高压。在副热带高压和极地高压之间，有一个相对来说的低压带，称为副极地低压带。这样在副热带地区的近地层，空气就分成两支分别向赤道和两极流去。向赤道流

去的一支在北半球为东北风，称东北信风带，对应在南半球为东南风，称东南信风带。这就是通称的信风环流圈。至于从副热带流向极地的那一支气流，称为极地环流圈。而在中纬度处，在南北方向上也构成一个环流圈，称中纬度环流圈，其运行方向与上述的信风环流圈和极地环流圈相反。我们可以参考英国气象学家哈得利 (Hadley) 在 1735 年提出，后来又经美国气象学家凡利尔 (Fer-rel) 修改的大气环流模型。(图 3.16)

复杂的状况远不止此，例如海陆的分布差异、地形的差异、下垫面状况以及大气与地表的摩擦等，都会对大气环流产生各种各样的影响。真实的大气环流，就是在上述各种因素综合作用下的表现。

即以地面状况来说，它对于大范围中的大气环流有显著的作用，巨大高亢的青藏高原就是一例。此外雪和冰的范围，必然对应着高空西风带里的低压槽，这一观测到的现象，很好地说明了热力的惯性作用，即由于水的比热大和冰雪融化的潜热所造成的特定现象。

纳米亚斯曾研究了经常为雪所覆盖的地面，应用它所引起热力偏差去说明地表状况对大气环流的影响。他以 1960 年洛基山以东的美国地区为例。在这一年的二月中旬到三月中旬，这个地区一直维持着积雪，引起了好几次高压的爆发，使地面刮着持续的偏北风，并使积雪位置达到北纬 36° (比常年偏南)。这种现象是怎样引起的呢？因为在积雪区以南的地面吸收太阳辐射能量平均为 $300 \text{ 卡} / \text{平方厘米} \cdot \text{日}$ ，而为雪所覆盖的区域对太阳辐射要丧失 80%，遂使这一部分大陆比正常季度吸收的热量要小的多。

大气环流在输运物质与能量上，作用是很大的。如在赤道发生的环流圈，平均每秒可以流动 2×10^8 吨空气，因此它也不断地改变着自然地理面中的能量、动量、水分和其它物质的分配，成为传输物质能量的有效手段之一。4. 生物循环：它包括两个方面的含义，一是生物作为土壤-植物-大气之间的一个联系环节，从而成为水分循环的重要通道之一；其次也是更重要的，它实现了有机界与无机界之间的互相转化。生物循环对于能量的贮存和消耗，对于化学元素 (特别是一些微量元素) 的迁移和积累，对于碳循环，氮循环，氧循环和其它有关成分的循环等，都具有明显的作用。从而使其在自然地理系统的物质能量交换中，成为又一个相当重要的方面。

第六节 自然地理熵

一个宏观状态，总是由许许多多的微观状态组成的。一个系统的宏观性质，实际上应当理解为大量微观状态综合表现的平均性质。比如说温度是无数分子平均功能的综合表现，气压是无数气体分子撞击所发生的动量变化的结果。人们通常采用统计分析的方法，去研究具有庞大微观数目的宏观系统。其中最基本的概念就是“几率”。我们从一个最易理解的事例进行剖析：

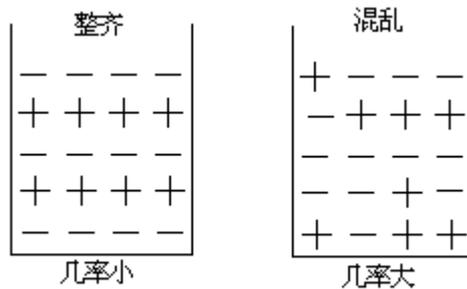


图3.17 几率概念的图示

如图3.17的排列情形，呈现左边那种十分整齐划一的方式，在自然条件下，是很难见到的，除非人们外加做功以克服其中的混乱状态才能达到。但是按照事物自发进行的趋向，它总是向混乱的方式前进，正如图中右边的排列那样。一旦混乱之后，继续发展只能是越来越混乱，这种可能性远远大于又自动排列整齐的可能性。混乱状态的可能性有千万次，但是整齐排列的可能性只有一次，所以说微观状态自动排列整齐的几率极小，而混乱排列的几率大。

为什么要举出这样的例子呢？这涉及一个基本的原则，对此原则的讲法很多，如果扼要的不加以精确表达来描述的话，它的实质就是有序（整齐的排列）不能自发地产生于无序（混乱）；也就是说，在自然状态下，过程进行的自动方向，总是从几率发生较小的状态，趋向于几率发生较大的状态，最后趋于平衡。为了从无序产生有序，必须耗费一定的能量。这就是热力学第二定律阐述的基本内容。

这在自然地理中是常见的。举例来说，人类改造自然的目的，就是企图从自然界的无序性中产生有序的举动，它要花费外加的功，我们不能期望自然界本身会自动演化成适于我们所要求的状态。在这里，人们努力提高植物生产力的行动，就是很好的说明。植物发挥其最大潜力即达到初始生产力的上限，必须要求环境条件有适宜于这个上限的最优组合，这种组合在实现当中的几率只有一个，而不符最优组合的其它任意组合可以有许许多多个。人们为了创造这样一个最优的组合，也必然花费一定的功，用以提高有序性。有序性的保持总是不稳的，它总是趋向于无序性的状态，整个自然地理面在人与生物的参与下，就是处于这种有序和无序的互相转化之中。当然还应规定过程进行的边界条件。

在热力学第二定律中，表示这种无序状态的定量指标是“熵”，熵就是混乱程度的标志。一个系统的熵值越高，它就愈混乱，这样从其中将热能转变为可利用能量的可能性就减小。

熵的概念引入自然地理学，还刚刚在开始，熵的增加意味着过程自动进行的方向（当然这里要提请注意的是：熵增加定律只能适用于完全孤立的系

统，这在处理具体的自然地理问题时要特别谨慎），因此若能掌握系统中熵值的变化状况，即可以判明自然地理过程自动演进的方向，在这个方向上，如果过程所遭遇的阻力也能判定的话，那么过程的速率和强度就能定量地表达出来。在一块沙漠中，如果有意识的引入水，并逐步地种植防风固沙林，这种外加的功必然提高了有序性，也就是减少了熵的数值。这样的结果，某一处沙漠可能慢慢地变成了绿洲，绿洲要求的自然条件组合肯定比沙漠本身要严格、要有秩序。但是这块绿洲必须随时加以照料，不断地保持这种自然条件的有序性，否则这种有序性总是趋向于无序性，熵值总是有增大的可能，也就是绿洲总是有再变成沙漠的可能。当然这种外加的功可以由人来做，也可以由系统外的其它输入来做。因此改造自然的过程，就是熵值减少的过程。简单地说，在通常的条件下，绿洲可能自动地变为沙漠，但沙漠绝不可能自动地变化为绿洲。

渡边慧在讨论维纳的控制论时，曾对于非物理熵的减小作了阐释。应用他的观点，对照自然地理学中的现实状况，是非常适合的。就以自然生产潜力为例：当生物的初始生产力极低，甚至趋于零的时候（如荒漠、极地等），它对于各个自然条件组合的要求不严格，对于 n 个组合所选择的概率分布比较均匀。业已证实，分布均匀时所对应的熵最大。随着初始生产力的提高，这种概率分布将逐渐地集中到越来越少的几个选择上去。这时我们说，生物产量越高越稳，对环境条件组合的要求越严格，有序性越大，熵值就越低。假定选择第 i 个组合的概率为 P_i ，使用这样的概率去定义熵（ S ）的概念：

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \log P_i \quad (3.12)$$

在这里，熵 S 就作为评定状态不肯定性的度量。在（3.12）式中，当 $P_i=1$ （所有其它的概率都等于零），这时状态没有什么不肯定性，熵值最小。当所选择的 n 种组合的对应概率都相等，即 $P_1=P_2=\dots=P_n=1/n$ 时，熵 S 最大，系统的不肯定性最大。有时引入负熵的概念，即有序性的提高意味着负熵的增加。

此外，从抽象的数学意义来看，熵和信息是等同的，这对研究系统中的信息传递来说，给我们提供了一个得力的工具。

第四章 自然地理能量基础

大气不停地运动，河川不息的奔流，生物的生长和繁衍，地球表部物质的风化、迁移和堆积、大规模的地壳运动、地震与火山等……，这些随处可见的自然现象说明：自然地理面中各个要素，处于不停顿的运动之中。

在夏天，要形成一堆中等强度的积云，如果用人工的能量去创造，就需要 1,160 万度电；冬天，从北方南下的冷空气，在二百公里的一段距离内，为了使前锋的风速维持在每秒 20 米达两三个小时，就需要消耗一亿万度电。这些能量从目前工业发展水平来看，也不是一件轻而易举的事情。可是在自然界，象这类寻常的例子却是成千上万，屡见不鲜。

我们可以再举出这样一个事实：全球陆地的平均高度为 875 米，而每年在陆地上的河川径流总量约为 37,000 立方公里。假定全部径流量下降这 800 多米的海拔高度而入海，那么水力所做的机械功，可以粗略的计算出来，这个数字将超过 120 亿马力。这个数字有多大呢？假若用它去侵蚀陆地，那么其侵蚀强度就相当于一匹马拉刮土机，在不到 20 亩的土地上日夜不停地工作所引起土壤侵蚀的程度。这种强度的侵蚀力作用于全球陆地表面，而且始终持续地进行，那将是相当惊人的。但如从整个自然界来看，也只不过代表了其中总能量的一个不大的部分。那么，作用于地表的能量究竟来自何处？它们在自然地理面中又是如何分配并且保持平衡的呢？

对于自然地理面这个特定的对象来说，它的能量来源可以归纳为两大类：一是以太阳辐射能为代表的“外来能”，一是地球内部所产生的“内生能”。这两大类能源比较起来，内生能对于自然地理面的作用和影响，更多的是通过间接的途径和方式来表现的；而外来能则是自然地理过程发生发展的直接动力和最基本的条件。这两大类能源的存在，并在自然地理面中发生交锋和重叠，为自然地理各要素的互相作用、互相制约和互相渗透提供了动力基础，从而推动着整个自然地理过程的发展，决定了演化的强度和方向，使得自然地理面貌千姿百态。从这种杂乱多变的表象中，可以发现它们遵循着能量在地球表面的时空分布规律，表征着能量在形式上互相转换的特性。因此，能量和能量平衡就成为研究自然地理过程的基础之一。

第一节 内生能

地球的内生能，通常包括两个方面。一是来自地球本身的引力能；另外是地球组成物质中的放射性元素，当其蜕变时所产生的热能。地球的引力也有人称之为重力，严格说来，二者并不等同。地球上每一质点的重力是引力与随地球旋转而产生的离心惯性力的合力，它是地球在形成过程中由于物质的逐渐密实而产生的。据计算，从地球形成时的原始状态到现在，其间产生了大约 2.5×10^{39} — 4×10^{39} 尔格的重力能，这种能量均以潜在的位能存在。它总是力图使地球上的物质处于相对稳定的平衡状态，在地球内部它使得物质按照密度的大小从地心向外呈有序的同圆心状排列。由于它需要在其它力的触发下才能释放潜在的能量，因此对于自然地理来说，引力能虽是一个基础的能量并具有重要作用，但并不具备决定性的作用。

至于内生能中的另外一个方面，包括了地球组成物质中各种放射性核类的衰变、自发裂变、诱发裂变、光致裂变以及各种类型的核反应所析出的能量，统称“核反应能”。这种核反应能，主要由长寿期放射性同位素铀 238 、铀 235 、钍 232 及钾 40 等来提供的，下边是它们的一些数据：

同位素	半衰期 (10^9 年)	同位素的比率 (%)	所产生的热量 (卡/克·年)
U^{238} (铀)	4.50	99.27	0.70
U^{235} (铀)	0.71	0.72	0.03
Th^{232} (钍)	13.90	100	0.20
K^{40} (钾)	1.31	0.012	27×10^{-6}

这些数字与目前实测的地球热流值（其数量级为微卡）相对比，说明了同位素放出的热量基本上是在地表以下 14 公里厚度的花岗岩中产生的。这就意味着，地壳以下部分与地壳相比，它的岩石中只有少得多的放射性物质。如果不是这样的话，所测的热流值将会比现在实际的热流值大得多。这个假定是很合理的，地球的其它基本岩石，的确比花岗岩中具有少得多的放射性物质：

表 4.1 不同岩石类型中放射性物质含量

岩石类型	放射性物质富集程度			所产生的热量 (微卡/克·年)			
	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	U	Th	K	总计
花岗岩	4.7	20	3.4	3.4	4.0	0.9	8.3
玄武岩	0.6	2.7	0.8	0.4	0.5	0.23	1.21
橄榄岩	0.016	(0.004)	0.00	0.0	0.0	0.00	0.01
			12	12	01	03	3

由表中清楚看出，花岗岩内放射性物质的富集程度远远高于其下伏岩石如玄武岩和橄榄岩。

这些放射性元素所产生的能量，随着时间的延续不断积累，这种能量一

股都以热的形式贮存于地球之内。

自从十七世纪以来，人们就知道深矿井中的温度超过地面的温度。这样势必有一个从地球深处到地球表面的温度梯度存在，也就必然有从地球内部向表面传布的热流。一般测定指出，从表层向下每深入 33 米，温度就上升一度。而每增高一度所对应的深度称为“地热增温级”，可用 Z 来表示。这样在深度 Z 处的温度 T_z 可以表示成：

$$T_z = T_0 + \frac{Z}{Z} \quad (4.1)$$

T_0 为所对应的地表面温度。在地球上的构造活动区，地热增温级小，而在构造相对稳定的地区，它就比较大。按照平均状况，在火山活动区的 Z 为 0—20 米 / 度；构造活动区的 Z 为 20—30 米 / 度；构造相对稳定区的 Z 为 33—100 米 / 度。从自然地理面的观点来看，什么地区的地热增温级小，则内部环境（即自然地理面以下）所输入的能量就多，反之就小。

目前在世界上有五千多个关于地热测定的数值，大陆上有数百个，大洋中有数千个，对于所测地点的温度梯度和岩石的导热率，进行了比较严格的测定。经过李 (Lee) 和耶达 (Uyeda) 在 1965 年的整理，计算出在全球的热流值大致在 0—2.5 微卡 / 厘米² · 秒的范围内，个别高热通量的地方，该数值可以超过 8 微卡 / 厘米² · 秒，全球的热流平均值约为 1.4 微卡 / 厘米² · 秒。

在不同的地质区域，这种热流值呈规律性的分布，如大陆架地区，该值平均为 0.9 微卡 / 厘米² · 秒；在近代山地地区，趋向于较高的数值，约为 2 微卡 / 厘米² · 秒；在大洋海岭的顶部，数值最高，介于 3 微卡 / 厘米² · 秒与 8 微卡 / 厘米² · 秒之间。较高的热流值也可以在岛弧后面的内海中发现，如日本海就是如此。但是在大洋海岭两侧相距顶部只不过几百公里远的地方，普遍发现大约只有 0.6 微卡 / 厘米² · 秒左右这样很低的数值，这是科学家们以此作为解释海底扩张学说的一个重要根据。

这种热传导的结果，使得一小部分热量通过地球表面向外发散，这相当于地球表面上每年每平方米得到 40—50 卡来自地球内部的热量。这样小的数量，仅仅相当于在地表相同的面积上，所接受太阳辐射能的四千分之一，而在沙漠或某些山地中，所接受的太阳辐射能比它所得到的地球内热可大一万七千倍。因此，就放射性元素转变的内生能对自然地理面的直接输入来说，其作用一般是不予考虑的。它对自然地理面的作用在一个短时间内（例如一天、一年或一个世纪），是一种缓慢的、不易觉察的因素，但在地质时代中，通过间接的作用，即通过地球内部的构造运动，可以显著地改变地表形态与海陆分布，从而对自然地理面的结构、功能施加影响。

前已述及，目前公认的地球形成历史为 45 亿年，其中后 35 亿年为接近于现在地壳的岩石所代表。可以计算出来，在 10 亿年当中，平均为 1.2 微卡 / 厘米² · 秒的地球热流，意味着有 4×10^{10} 卡 / 厘米² 的总热量输入到自然地理面中，将此热量换算成煤的燃烧时，相当于地球表面上每平方米应有 4 吨煤燃烧所放出的热量，或者说等于地表向下深达 20 公里厚的煤层完全烧尽，这个数量就不容轻视了。当然，地热的更为重大的作用，首先在于由它提供动力引起地球内部物质的运动、演化和调整，这是改变地壳状态的一个至为重要的因素，例如火山活动本身还建造了世界上引人注目的地形。从这个角度去观察问题，内生能也是不可轻视的，在漫长的地质年代里，它的确

具有沧桑巨变的宏伟气魄。可以想象，地球如无内生能为地质构造运动提供动力的话，那么，整个地表面早就成为平坦光滑毫无生气的状况了。

当然，即使在每平方厘米上每年得到 40—50 卡的热量，也能看到它的一定作用。它可以使海底以上一米厚的海水，提高温度达 0.5 。另外，温带冰川（在这里冰与水共存）是良好的绝热体，对于它们来说，整个冰川厚度中存在着近乎相同的温度，在这种没有或极小的温度梯度存在的情况下，热量的传导可以看作是接近于零的。这种条件使得地热流一年中所放出的热量，足以使得冰川底部约 0.5 厘米厚度的冰层被融化，这个融化量对于几公里厚的冰川来说，实质上并无意义。但是由于底部这一薄层水的存在，起到一种润滑剂的功能，则冰川移动的速度以及它对于基底物质的作用，却有着相当大的意义。一个“冷”的冰川，必然与其基底的岩石层紧紧地冻结在一起，只能由于重力作用产生塑性形变而移动，它不会在整个冰床上产生“滑动”，由此它的侵蚀作用相对要小，速度也较低。但若一个冰川如上所述有一“润滑层”时，则能比较容易地在冰—岩界面上滑动，因而也就具有更大的能力和速度，进行着冰蚀作用和堆积的工作。

尽管如此，我们必须如实地认为，地球表面所发生的各种自然地理过程，其最基本和最直接的动力，还是应当归结到以太阳辐射能为代表的外来能。

第二节 外来能

外来能中占绝对地位的当推太阳辐射能。它是热核反应能。如果用 4 克氢去参加热核反应，放出的能量与一架 20 匹马力的机器，连续工作七年所需要的能量相等。如果有一堆如太阳体积那样大的煤炭，按照现在太阳所辐射出的能量数值去消耗它（太阳每秒钟辐射到太空中的能量相当于一秒燃烧 115 亿吨的煤炭），只须燃烧三千年，即可全部将它们变为灰烬。但太阳持续地发射巨额数值的能量，至少已经保持一百亿年以上的时间了。这正是太阳进行热核反应的结果。

人们注意到两种最轻的化学元素氢和氦的原子量关系。氢的原子量是 1.008，氦的原子量是 4.003，当四个氢原子合成一个氦原子时，就可以多余出 0.029 单位的质量。按照爱因斯坦的质量和能量关系公式，即能量（E）等于质量（m）与光速（c）的平方的乘积：

$$E=mc^2 \quad (4.2)$$

据此，多余出来的质量可以转换成巨额的能量，这个著名的质能转换公式，不仅揭示了质量与能量间的联系，而且告诉我们太阳为何能提供巨额能量的原因。因为氢和氦这两种元素，在太阳的物质组成中占绝对优势。

太阳的总质量约为 2×10^{33} 克，假若全部由氢组成，根据热核反应来计算，可以放出的总能量达到 1.28×10^{52} 尔格，现在测定太阳向外部空间发射的总能量为每秒钟 3.7×10^{33} 尔格，据此推断，太阳中由质子合成氦的过程，至少可以延续 10^{11} 年，即一千亿年以上。这样，从地球形成直至目前的几十亿年内，可以认为太阳向外发射的能量稳定地保持着比较固定的数值。地球每时每刻接受着太阳投在其上的辐射能，它从太阳接受的能量只占太阳同时向太空辐射总量的二十亿分之一。由于日地距离较远的缘故，太阳光线要经过 498 秒的时间，方能抵达我们所在的地面。因此，地球上接受的太阳光线，被当作平行光线看待。这对我们处理地表面辐射平衡的问题时，是很有帮助的。

能量一般都具有一定的质量作为载体，而任何质量本身又包含着一定量的能量，正如爱因斯坦所阐明的质能转换定律那样，于是在进行能量交换时，必须也伴随着质量的变化。太阳不断发光，发射的虽然是能量，但它的质量也是在不断地减少的。太阳每秒钟由于电磁辐射而损失的质量约为 400 万吨。地面接受了太阳辐射，吸收了能量，但其质量也相应地增加，只是由于太微小的缘故，一般是无法觉察出来的。

地球在一日之内，从太阳辐射总量中接受到 20 亿分之一的能量，等于爆炸 10 万颗氢弹所释放的能量，或者相当于上万个飓风中所包含的能量。一日中地球所接受的太阳能，等于现在全世界在一年内消耗总能量的二百倍。可见外来能数量之巨大。

太阳的温度很高，因此它所发出射线的波长相应也较短，这样一般人也将太阳辐射称之为短波辐射。为了说明短波辐射到达地表的过程，首先需要阐明“太阳常数”的含义，这是计算地表能量平衡的基本依据。

所谓太阳常数，是指位于地球的大气之外，在日地平均距离上，垂直于太阳光线的一平方厘米面积上，每分钟所接受的太阳辐射能数量。长期以来，太阳常数的数值被近似地认为等于 $1.9 \text{ 卡} / \text{厘米}^2 \cdot \text{分}$ ，也有人取 $2.0 \text{ 卡} / \text{厘米}^2 \cdot \text{分}$ ，在全世界范围组织的“国际地球物理年”中，确定太阳常数等

于 $1.98 \text{ 卡} / \text{厘米}^2 \cdot \text{分}$,但最近的观测表明稍微小于此数值 ,介于 $1.94—1.95 \text{ 卡} / \text{厘米}^2 \cdot \text{分}$ 。应当指出 ,对于许多研究者来说 ,更为重要的不是太阳常数的“理论真值” ,而是它的“条件值” ,即相应于抵达大气对流层上界的太阳能辐射值。现今这个“条件值”通常采用 $1.90—1.92 \text{ 卡} / \text{厘米}^2 \cdot \text{分}$ 。

太阳常数随时间的稳定性问题 ,一直是人们十分关注的。一些人倾向认为 ,即使太阳常数发生了变化 ,这个变化的幅度也不可能超过测量该数值时的误差范围。应当记住的是 ,太阳常数如果真的发生了较大的变化 ,即可对地球产生显著的效应 ,这对研究气候变迁有很大关系。理论计算表明 ,太阳常数如果有 1% 的改变 ,则地球温度相应的变化可达 1.5 左右 ,由此可以看出它的重要作用来。但在讨论地表能量平衡时 ,一般都把太阳常数作为一个恒定值来处理。这对于确定自然地理面的外部环境输入时 ,给定了一个计算的标准。

确定了太阳常数的数值 ,整个地球所截获的太阳辐射能总量就不难推算出来。这个数值等于太阳常数与正对太阳时地球最大截面积的乘积。地球的最大截面积约为一亿三千万平方公里 ,所截获的总能量数值就是 $2.5 \times 10^{18} \text{ 卡} / \text{分}$ 。事实上 ,地球并不是垂直于太阳射线的一个平面圆盘 ,而是一个旋转椭球体 ,其表面积应是上述截面积的四倍 ,这样大气上界每平方厘米平均收入的太阳辐射能 (对全球来说)只能是太阳常数的四分之一。

太阳辐射能抵达地球的轨道时 ,其数值为 S_0 / l^2 , S_0 为太阳常数 , l 为日-地 (在给定的时间)之间的距离与日地平均距离之比率。这样 ,在地球水平面上 ,如暂不考虑大气及其它因素的干扰 ,所接受的太阳辐射能数值即为 :

$$Q_s = \frac{S_0}{l^2} \cos Z_0 \quad (4.3)$$

Z_0 为太阳的方向和天顶之间的角度。天顶角的数值取决于地球本身的形状及运动状况 ,即取决于纬度、一日中的时间和季节。如以 ϕ 代表地理纬度 , δ_0 代表太阳的偏角 , α_0 代表太阳的时角 ,那么

$$\cos Z_0 = \sin \phi \sin \delta_0 + \cos \phi \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \quad (4.4)$$

太阳辐射能是地表面所吸收的最主要的外来能 ,但并非是唯一的外来能。在外来能中 ,尚有星际之间的引力能 ,如月亮和太阳对于地球的潮汐作用。此外 ,这些外来能中还有 :由于陨石物质在地球引力场中的堕落而带来的机械能 ;有各种宇宙射线与地表物质的作用及辐射化学效应而致的化学能等..... ,这些外来能的量级与太阳辐射能相比 ,一般均可将它们忽略 ,但在某种专门的讨论中 ,它们的作用还是必须被提及的。

第三节 太阳辐射能的平衡

以上我们概略地介绍了地球大气上界太阳能收入的理论数值，这个数值成为太阳能在地表面分配与转换的参考标准。当这个理论数值穿过一层厚厚的大气之后，无论从数量上还是从质量上（即太阳辐射的光谱组成）都发生了很大的变化。

太阳辐射能在输入自然地理面之前，首先要经过大气这个被覆层。因此有必要首先了解大气的一般概况，以及它对于太阳辐射能的变换情况。自从地球这个行星形成之后，地球上的大气经历了缓慢的但却是连续的进化。由于它的各个组成成分在吸收太阳辐射的特性上有差异，因此在进化的历程中，随着时间的不同而有着不同的表现。与此同时，通过大气进入地表的能量平衡也经历着平行的改变。在大气的进化中，一个突出的事件就是氧的实质性数量的出现。从各种地球化学的证据来判断，地球的大气直到二十亿年之前，还基本是无氧的，当时的二氧化碳占据优势地位。在其后，光合作用的放氧步骤才出现。目前在学术界比较一致的意见是：大气中的氧主要是由于植物的光合作用来提供的，当然也有与此分歧的观点存在。

现在大气中的氧的比例，基本上保持为一个常数。在一年当中，一公顷年青的、生长茁壮的森林将产生 10 吨的氧并消耗 30 吨的二氧化碳。每二百万年左右，地球上就有 15 亿立方公里的水，被光合作用裂解并为呼吸作用再组成。由此所产生的氧气暂时回到大气中，在这里一般平均停留二千年，它本身再循环一次。

大气中的氧的重要意义何在呢？它对于太阳辐射能的收支影响如何呢？我们知道，短波紫外线对于生命是致死的。当大气中氧的浓度低于 1% 时，臭氧 (O_3) 在大气中对于紫外线的阻挡作用基本上等于零，生命只能在水下生存，借助水层对紫外线进行防护，因为水可以吸收紫外线。一旦当大气中氧的浓度增至 10% 时，就有足够的臭氧存在，从而把紫外线的穿透率减低到某种适宜的程度，这时生命体才能够离开水而到陆地的环境中生存和繁衍。这说明了氧气对于太阳辐射的数量和质量的变化。

人们认识到氧气为光合作用所产生，也曾经历了一个很长的时期。它首次为普雷斯特列和英根胡斯所证明。普雷斯特列在 1771 年曾做过一个很有名的试验，确认了“在空气被老鼠呼吸成为有毒的气体，从而即将窒息而死时，一枝薄荷草可以使得这种空气重新恢复到足以维持这只老鼠的生命”。由此看出，氧气不仅维持着生命，它也由生命所产生。氧气的含量发展到目前的含量，它对于太阳辐射能在地表面的收支、转化等的作用不可低估。

一般说来，地球干洁大气中的组成如下：

成分	符号	容积 (%)
氮	N_2	78.08
氧	O_2	20.94
氩	Ar	0.93
二氧化碳	CO_2	0.03
氖	Ne	0.0018
氦	He	0.0005
臭氧	O_3	0.00006

氢	H ₂	0.00005
其它	—	痕量

在大气组成成分中，对于太阳辐射影响较大的还有二氧化碳。现在的大气中，它的含量虽然不多，按容积计算平均为 300ppm，（0.03%），但它的作用却相当大。从二十世纪以来，即知道二氧化碳的浓度在大气中逐渐增加，而且随着工业发展，矿物燃料消耗的日益增长，这样增加的速率仍在继续。例如在夏威夷的观测资料，即可说明这一点。我们暂且不去讨论它对于生物的意义，而把着眼点放在它对于太阳辐射的改变上。

二氧化碳可以让太阳的短波辐射顺利通过，却能大量的吸收由地表面所发射出的长波辐射，它的分子有强烈的吸收谱带，特别是对于波长在 12—18 微米之间的红外区域。而这个光谱区恰好集中了大部分从地表辐射到空间的热能。二氧化碳的这种强烈吸收特性，使其具有良好的“温室效应”。据估计，自从十九世纪中叶至今，大气中二氧化碳的含量已经增加了 10% 左右，足以使地球的平均温度增高 0.3 。预计到公元 2000 年，二氧化碳要比现在高出 20%，如无其它因素的影响，它将使得地面平均温度提高 0.5 左右，随之带来的影响可能是极地的冰雪消融，蒸发加快、雨量增多、海平面上升等一系列连锁反应。事实上能否如此，在这里还不能作出肯定的回答。我们已经说过，系统本身有自我调节作用，它通过一系列反馈，尽量使自己保持在一个稳定的状态，因此随着空气中二氧化碳含量的增高，海洋中溶解它的能力也相应增强，以此来达到保持平衡的目的。即使地球的平均温度真的提高了，这时水分蒸发加快了，云量增多了，反射作用和散射作用也加强了，对太阳辐射能的入射造成了屏障，反过来又会减少地表的能量收入，从而降低地球表面温度，使其仍然尽量保持在一个相对稳定的状态之下。

无论从理论上还是在观测中都证实，大气中还含有大量的尘粒和其它固体物质。尤其是粒径为 0.1 到大约 5 微米的微粒，对于地表之能量平衡影响甚大。主要原因有二：其一，这些微粒在大气中相当丰富；其二，在反射、吸收和降低太阳辐射能方面，它们具有很高的效率。根据测定，此类粒子在大气中的下沉速度约为每秒 1 厘米到每小时 1 厘米。这样如在 20 公里高空处，存在着这类粒子时，约需几十年的时间才能沉降到地面，在此尚没有考虑大气垂直运动对其下沉的影响。近年来，国外文献对于 1963 年 3 月，印度尼西亚巴厘岛上阿贡火山爆发后，所喷出的火山尘对太阳辐射的影响进行了广泛的观测和分析。其结果一致认为，由这次火山喷发的火山灰所形成的环球带，高度约在地面以上 20 公里，它显著地对于太阳辐射量造成了世界规模的减弱。据在澳大利亚所测，1963 年 7—8 月，虽然距离火山爆发已有约五个月的时间，但太阳的直接辐射仍然减弱了 24%，直至 1964 年 7—8 月，也还比平均值低 16%。彼沃瓦罗娃在分析了苏联和美国共 12 个辐射观测站的资料后，指出自那次火山爆发以来，太阳辐射确有急剧下降的趋势。到 1966 年太阳的直接辐射量还仅仅只是原先平均值的 93%。

这些微粒在大气中的分布是不均匀的，特别是近几十年来，随着现代化工业的进展，人类活动对于自然界的巨大干扰，使得这种分布更加不平衡。例如兰斯伯格(Lengsberg)在 1941 年就报道，小于 0.2 微米直径的微粒(即所谓的埃特肯核)，在城市上空平均比农村上空多 16 倍，而比海洋上空要多 160 倍。又如在 1952 年 12 月，英国伦敦的一次大烟雾，造成了 4,000 人丧

生的惨剧，也是由于烟尘引起的。这种不平衡的分布，对于一个系统的能量输入来说，有着直接的影响。美国的伯莱格曼（Bridgman），在 1976 年于莫斯科举行的第 23 届国际地理大会上曾指出，根据他在威斯康辛州的试验，由于城市的这种微粒及其它污染，致使直接可见光辐射的光谱改变十分明显。其结果是：在乡村比较清洁的大气要比城市的直接可见光辐射量平均大 29.4%。

由于大气的组成不同，以及各个成分所在的位置不同，当太阳辐射穿过它们时，其反射、散射和吸收的状况随之发生了变化，这种变化可以通过大气平均温度的垂直剖面表现出来（见图 4.2）。

从图 4.2 中可以看出，温度随高度的分布曲线有三个高温区，其一是大气底层，温度高的原因主要是因水汽、二氧化碳所吸收的太阳辐射以及长波辐射而造成的；其二是地面以上 50 公里处的臭氧层集中带，由于所吸收的强紫外线而使得温度提高；其三是从地面以上 90 公里高度起，由于原子氧所吸收的紫外线辐射，造成了向上的温度增高。这样，当太阳辐射能穿透大气层到达地表时，不仅数量上从原来的太阳常数减少到某一数值，原来的太阳辐射光谱分配，也发生相应的改变。当然随着太阳高度和纬度的不同，它所穿过的大气质量（理解为大气的厚度）也就不同，到达地面后的辐射量亦随之变化。

于是，在讨论地表面的太阳辐射能收支平衡时，必须对于上述一些影响因子考虑在内。以下简要地说明在地面的平衡状况。首先从数量上看，如将大气上界的短波太阳辐射能收入规定为 100 份，它在到达地表时，直接反射回空间的能量占 37 份，（其中 27 份是从云层表面反射掉的，7 份是大气中的微粒反射掉的，3 份是从地球表面反射掉的）。地表面的构成是很不相同的，它们对于太阳辐射的反射能力也各不相同。下表是具代表性的自然表面反射率数值（见表 4.2）。表中所列数字在使用时要加以注意，因为地表面上覆

表 4.2 自然表面的反射率

表面类型		反射率
	一 雪和冰新的干雪	0.80—0.95
清洁的湿雪	0.60—0.70	
污浊的雪	0.40—0.50	
海冰	0.30—0.40	
	二 开阔水面水	0.05
	三 裸土黑土	0.05—0.15
潮湿灰土	0.10—0.20	
干粘土或干灰色土	0.20—0.35	
干浅色砂土	0.35—0.45	
	四 田野、草地、树木	
燕麦和小麦地	0.10—0.25	

马铃薯地	0.15—0.25	
棉田	0.20—0.25	
草地	0.15—0.25	
干草原	0.20—0.30	
苔原	0.15—0.20	
针叶林	0.10—0.15	
阔叶林	0.15—0.20	113

盖物的数量多少，它的颜色以及太阳高度角的变化等，均可影响反射率的数值。高层的植物冠丛与水面的反射率，与太阳高度角尤其具有密切的关系。例如，比耳在 1944 年就指出，对于水面的反射率，它的大小取决于入射光线的角度，在 60—90° 时，水面的反射率为 0.04，但当入射角变为 5° 时，这个数值就急剧增大到 0.39，因此上表所列数值，当太阳高度角低于 30° 的条件下，使用时要特别小心，因为它们只是在太阳高度角较大时的数值。

到达的太阳辐射，除去反射掉的 37 份外，所余的 63 份被各种成分所吸收，其中大气吸收了 20 份，（云吸收了 12 份，其它的吸收了 8 份），最终有 43 份到达地面。到达地面的这 43 份太阳辐射，包括了两部分，一部分是太阳光线直接到达地面的称为直接辐射，它约占 27 份；另一部分通过大气分子和微粒等的散射到达地面，称为散射辐射，它占 16 份。

地面吸收的 43 份与大气吸收的 20 份辐射能，在其发生转换的同时（例如加热了地表面、增加了空气温度，蒸发了水分，转换为植物光合作用而贮存的化学能等……），均伴随着相应的再辐射作用（将地球作为黑体看待）。这样，所收入的能量在地球与大气之间以长波辐射的形式几经曲折之后，最后返回空间。因地球的温度比太阳低的多，按照维恩定律，它所产生辐射的波长也就相应地比太阳辐射的波长长的多，因而把地球的辐射称做长波辐射。由太阳辐射能的进入，到最后长波辐射的返回空间，从而地球完成了太阳辐射能在数量上的平衡，遵循着能量守恒的普遍原则。

我们知道，在漫长的地质历史时期中，也有很少一部分太阳辐射能以固定的形式保存于地壳之内。如现今开发的煤炭、石油等燃料，它是当时植物和其它生物所固定的太阳能贮存起来的结果，它最终仍要被利用，释放出原来所固定的这部分能量，重新转换成长波辐射返回空间，依然符合能量平衡的总原则。至于有关辐射能各个份量的精确估算，不少科学工作者作出了许多不同的方案，虽然它们各自在数值上有某些差异，但基本的原理都是一致的。

能量平衡的最一般形式可以写成：

$$R=Q(1-\rho)-I \quad (4.5)$$

R 代表净辐射，单位是卡 / 厘米²；Q 为太阳总辐射值； ρ 为地面反射率，主要取决于下垫面状况；I 为地面长波辐射。

目前（4.5）式中的各项均可用仪器直接测定，在没有辐射仪的地方，根据气象台站的记录，采用气候学计算方法亦能将它们分别计算出来。同时，我们知道：

$$Q=S+D \quad (4.6)$$

式中 S 为直接辐射，D 为散射辐射。这三个项目中，只要知道其中任何

两项，即可求出第三项。一般说来，Q 是比较容易求出的，很多的情况下，常需将 D 与 S 分开，这时只需求取其中任何一个，便能达到目的。今以散射辐射 D 的气候计算为例，我们选择了武汉、广州、北京三点作代表，根据 1964 年的实际观测资料，作出了 D/Q 与日照时数 T_m 的经验关系图。为节省篇幅，仅将武汉地区为例（图 4.3）。

它们的关系式表达成：

$$D=Q(1.0-0.067T_m) \quad (4.7)$$

其它二站的关系均类此。

为了计算和使用上的方便，可以将（4.7）式作出诺模图，分 T_m 分别代表 0, 1, 2, …, 12, 13, 14, 则 D/Q 分别为：

T_m	0	1	2	3	4	5	6	7
D/Q	1.00	0.93	0.86	0.80	0.73	0.66	0.60	0.53
	0	3	7	9	2	5	4	1
T_m	8	9	10	11	12	13	14	
D/Q	0.46	0.39	0.33	0.26	0.19	0.12	0.06	
	4	7	0	3	6	9	2	

其诺模图如下（见图 4.4）。

以上不过是一个简单的例子。关于辐射平衡各分量的测定和计算，现在已经有了比较成熟的理论和方法。世界上已有不少人，作出了全球的辐射平衡各分量的分布图。

截止此，我们阐述了太阳辐射能在数量上的变化状况。其次，要对太阳辐射的光谱组成变化加以讨论。地球周围的大气，可以看做是一个对太阳辐射具有选择性的过滤器，当太阳辐射通过时，其光谱组成将加以改变。尤其是大气中的臭氧、水汽和二氧化碳三种成分的“过滤”作用最为明显。臭氧强烈地吸收辐射光谱中紫外辐射的绝大部分，在地面以上大约 50 公里的高度，是臭氧的集中层，由于它吸收了大量的紫外线，使得该层的温度上升到接近 0，显著地高于臭氧层以上与臭氧层以下空气层的温度（高于臭氧层和低于臭氧层空气的温度均低到 -60 左右），这可以参看图 4.2 的温度垂直分布图。在离地面较近的空气层，水汽和二氧化碳强烈地选择吸收红外波长的辐射。经过筛选，最后穿透大气达到地面的太阳辐射能，主要是可见光波长（约占总辐射量的一半）及接近可见光的红外波长部分。地球可以看作是一个接近于理想的黑体，它被太阳辐射能加温后，必然进行长波再辐射，这种长波再辐射的波长与地球所达到的温度直接有关。而地球达到的温度，恰好体现着自然界最奇异的平衡之一，即在它吸收太阳辐射能后，因提高温度所伴随的长波辐射，其向空间发射时的波长，恰好能通过大气中二氧化碳和水汽选择吸收后留下的“窗口”。

第四节 太阳辐射能的空间分布

被地面和大气吸收的那 63 份辐射能,在地球的表面是如何分配的呢?这与地球的赤道面与黄道面之间的角度有很大关系。63 份中的相当大一部分为位于热带的地球表面所接收,这是由于:(一)在热带的太阳高度(用角度来表示)在所有季节中都高,在高角度的太阳照射下,不仅接受的辐射能多,而且相应的地表反射率也小,这样总能量的收入就多;(二)热带地域中有巨大的海洋面积,由于水具有巨大的热容量,因此对于太阳辐射能的吸收和贮存较陆地要高;(三)相等纬度值的表面积,在赤道附近要比接近两极时大得多。全球面积的三分之一强,位于赤道南北 20 度之间的地域(一共 40 个纬度值),而其余的南北共 140 个纬度值所占据的地表面积只不过三分之二弱一点。这样,在低纬不仅接收了更多的太阳能,而且加上这里的反射率不很大,因而出现了太阳辐射能在这个区域的盈余。有盈余必然有其它地域所表现的不足,在高纬地区就是这样,太阳辐射能的支出大于收入,能量出现了亏缺。但也有一个令人意外的事实,以北半球而论,在仲夏的一个月当中,当太阳连续照射在极地时,该区域每日反而比热带每日所接受的能量还多。可是时间甚短,在一年中的其余时间里,两极地区的辐射远远低于热带地区。我们仍以北半球为例,大约在 38 度处,一年中的辐射能达到收支平衡,以南的地区能量盈余,以北的地区能量亏缺,这就势必引起南北之间全球规模的水平能量交换(图 4.5)。

大规模的大气活动、由温度原因引起的洋流等,就是进行这种交换的重要手段。通过这些手段,促进了自然地理过程的活跃,复杂了自然地理过程的表现,成为地表物质与能量交换的又一基本形式。

地球表面所接受的外来能,所能影响的地下深度却有限。太阳辐射能对任一地区的作用都具有周期性的变化,作为一种反映,地表温度表现出昼夜与季节的规律变化。这种变化对其下的渗透很浅。渗透的深度及相应的温度表现,除了别的原因外,与地表组成物质的热特性关系甚大,请参看下表的数值:

表 4.3 一些自然物质的热特性

种类	导热率 (卡/度·厘米·秒)	密度 (克/厘米 ³)	比热 (卡/克·度)	热容 (卡/度·厘米 ³)
花岗岩	0.011	2.6	0.2	0.52
冰	0.0055	0.9	0.51	0.45
湿沙	0.004	1.6	0.3	0.48
湿沼泽土	0.002	0.9	0.8	0.70
静止的水	0.0015	1.0	1.0	1.0
陈雪	0.0007	0.5	0.51	0.22
干沙	0.0004	1.4	0.2	0.3
木材(典型的)	0.00035	0.6	0.3	0.18
新雪	0.0002	0.1	0.5	0.05
泥炭土	0.00015	0.3	0.44	0.1

静止的空气	0.00005	0.001	0.24	0.00024
-------	---------	-------	------	---------

[本表根据 W. P. 朗利 (1967 年) 所引证的吉格 (Geiger, 1959 年) 的数据]

由于陆地地表不透明, 导热率也都很小, 所以不可能将热量传递很深。即使海洋表面比较透明, 热量向下传递时的衰减也很迅速。这样又一次证实, 外来能与内生能是两个近乎独立的体系, 它们在自然地理面中相遇, 又各自在这里终结, 二者之间虽然有能量的交换, 但交换的数量甚微, 实际上几乎没有任何具实质意义的影响。

辐射能在垂直方向上的分布, 还包括随着地表面的海拔高度不同, 它的分配也不相同。一般均有随着海拔高度增高而增高的趋势, 这当然与大气透明度、大气质量等有关关系。下边引述青藏高原上的测定资料, 见表 4.4:

表 4.4 青藏高原上太阳直接辐射随高度的变化 (据童庆禧等)

地名	海拔高度 (米)	太阳直接辐射 (卡/厘米 ² ·分)	太阳高度 (度)	纬度 (度)	经度 (度)
樟木	2200	1.318	53.8	28.0	86.0
拉萨	3700	1.455	54.8	29.1	91.1
绒布寺	5000	1.632	52.3	28.2	86.8
东绒布冰川	6325	1.729	51.5	28.0	87.0
大气上界		1.950 (太阳常数)			

(注: 大气上界的太阳常数值、系根据 1968 年美国航空和宇宙航行局 (NASA) 应用 X-15 火箭所测。)

此外, 选取北纬 23 度左右范围内, 不同海拔高度的年总辐射值, 也能很好说明这个问题。将表 4.5 的资料绘于图上时, 就会看的更加清楚 (图 4.6)。

地表面吸收了太阳辐射能之后, 是否立即就返回空间呢? 事实上太阳能是在作了一系列的功、并经过地面与大气之间的多次互相辐射后, 才回到空间去的。从始态 (太阳辐射能输入自然地理面), 到终态 (永远输出自然地理面, 即返回

表 4.5 年总辐射值随高度的变化

地名	纬度 (度)	海拔高度 (米)	总辐射 (千卡/厘米 ² ·年)
广州	23.08	6.3	121
高要	23.03	6.7	115
桂平	23.24	42.2	117
田东	23.37	111.2	118
梧州	23.29	119.2	122
南宁	22.50	123.2	117
百色	23.55	138.0	123
元江	23.38	396.6	128
耿马孟定	23.26	490.3	122
开远	23.43	1038.0	128
澜沧	22.48	1054.8	129

景东	24.28	1162.3	136
蒙自	23.20	1300.7	134

空间)，有着一条曲折的道路。在此过程中，太阳辐射能可以用于水分的蒸发，用于增大空气的乱流扩散强度，用于增加地面和大气的温度，用于绿色植物的光合作用等……。因为地表各处的性质千差万别，用于各个方面的能量数值的分配就有很大的不同，研究这些方面的数量差异及变化规律，对于探讨自然地理的一些基本问题，同样具有重要意义。

第五节 辐射能与温度

太阳辐射以光速 ($c=3 \times 10^8$ 米 / 秒) 射向地球, 同时它具有微粒和波动这二者的特性。我们特别要提到这些, 是因为在自然地理系统中, 对于辐射能的接受和贮存, 都离不开辐射能的这些特性。如绿色植物进行光合作用, 所吸收的能量就是以光量子的形式进行的。正是由于辐射能的这种量子特性, 因此量子能量的大小取决于波长和频率:

$$e = h\gamma = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.8)$$

e 为量子的能量; h 为普朗克常数, 它等于 6.63×10^{-34} 焦耳 / 秒; γ 为频率; λ 为波长; c 是光速。量子能一般使用电子伏特的单位来表示, 也可以换算成其它相应的能量单位。由上式说明, 频率越高, 或者说波长越小, 则量子能越大。在此只需强调的是, 这类基本知识在分析自然地理系统时是必不可少的, 特别对于有机界来说, 更是如此。后面在有关生物部分的那一章里将要加以进一步地说明。

为了便于掌握有关太阳辐射能的要点, 可以规定如下几个术语: 1. 吸收率: 被物体所吸收的入射辐射比率; 2. 发射率: 被物体所发射的相应波长的辐射比率; 3. 反射率: 被表面反射的入射辐射比率; 4. 透射率: 被物体所透过的入射辐射比率; 5. 辐射通量: 单位时间所发射的、透射的或吸收的辐射数量; 6. 辐射通量密度: 单位面积上的辐射通量。通常所指的辐射, 就是指在一个表面上入射的辐射通量密度。

一个表面所接受的辐射, 取决于该表面对着辐射束的方向如何。倘若这一束辐射通量不变, 可是它所占据的表面积越来越大时, 则随着表面积的增大, 此表面上的辐射通量密度就越来越小了。(见图 4.7) 这可以由兰勃脱 (Lambert) 余弦定理作定量的表达:

$$Q = Q_d \cos \theta \quad (4.9)$$

此处的 Q_d 标志着当表面垂直于辐射束时的辐射通量密度; 而 Q 代表实际表面上的辐射通量密度; θ 则是光线与表面的法线之间的角度。该定律可以用来计算粗略自然地理面中各种坡度时所入射的太阳直接辐射。由于 θ 的变化十分复杂, 因此实际运用时, 还必须作更为复杂的推导。

进入自然地理面的太阳辐射能, 由两部分组成, 一个是上述的直接辐射, 另一部分则是散射辐射。它们各自的测定方法与计算方法已如上述, 都是比较成熟的, 但仍要针对各种不同的地形、高度、下垫面状况、不同天气条件等加以具体化。

平行的单色的辐射在通过一个均匀介质时将要发生衰减, 这可由下边的公式来描述:

$$Q = Q_0 e^{-KX} \quad (4.10)$$

Q_0 在此代表未衰减时的辐射通量密度; X 为辐射束在介质中走过的路径; K 为介质的消弱系数。这个定律, 经过不同形式的变换, 用来表达辐射能通过大气时的衰减, 也用来表达在通过植物冠丛和水体时的辐射衰减状况。

地表面十分近似于一个“黑体”, 因此它也具有类似于黑体发射时那样的规律。知道这种特性, 对于了解自然地理系统中的能量转换, 对于遥感技

术的应用，是至为必要的。一个黑体的单位面积上所发射的辐射能，是由斯特藩-波尔兹曼定律来描述的，即

$$Q_B = T^4 \quad (4.11)$$

此处的 Q_B 为理想黑体所发射的能量， T 是用开氏温标表达时的绝对温度数值； σ 为斯特藩-波尔兹曼常数，可以用已经制定好的表，查出在不同温度 T 时 Q_B 的数值。地球表面的平均温度大致为 15（按绝对温度计是 288 °K），它发射的平均能量为 390 瓦 / 平方米；而太阳表面的发射相当于黑体在 6000 °K 时的状况，因而它所发射的能量为每平方米 7.3×10^7 瓦。至于非黑体所发射的能量可按下式去计算：

$$Q = \epsilon T^4 \quad (4.12)$$

Q 代表该物体所发射的能量； ϵ 为该物体的表面发射率（对于黑体来说， $\epsilon = 1$ ，而一切非黑体的发射率均小于 1）。绝大多数自然表面的长波发射率都介于 0.90—0.98 之间。

随着研究的深入以及实际的需要，人们逐渐不满足于只知道整个辐射能的总量，进而关注到辐射能的光谱分配。黑体上的辐射能光谱状况是由普朗克定律阐明的，这里不再加以引录，只是由此出发，必须明白另一个有关的定律，那就是维恩（Wien）定律，它是为了说明峰值发射的波长和温度关系的一个定律。

至于反射率的基本状况，已在前边作了介绍，就不予赘述了。

一旦掌握了上述各项指标后，即能比较容易地建立能量平衡方程。

在分析自然地理的过程和状态时，经常引用一个最为人们所熟知的参数——温度。由于使用方便、易于取得的原故，它已成为相当广泛使用的指标之一。在一个封闭系统中，温度是一个状态函数，它是分子运动平均动能水平的表征。我们假设近地面空气层（高度为 0—2 米），在定压条件下，而且暂时排除了对流热交换、不考虑风的扰动、没有平流热交换，而且空气本身是干洁的等，这时系统中内能的变化（因吸收了太阳辐射能，致使内能增加），主要用来增温（ ΔT ）和由于气体分子的膨胀所做的功（ ΔA ），这是热力学中的一条基本定律：

$$E = T + A \quad (4.13)$$

E 就是系统的内能增加。在真实的地表面能量分配中，净辐射值（ R ），主要地消耗在水分蒸发（潜热）、乱流扩散（显热）、地中热交换和植物光合作用等项。不太严格的说，如有近似于上述的假设条件，而且水分蒸发和除乱流扩散值外的其它各项均处理为常量时，则使得实际上的乱流扩散值相当于式（4.13）中的 E ，（特别注意，我们所选择的条件是尽量逼近着假设条件的）。一般认为在一个比较均一的大面积中，在空气相当稳定时，气体分子膨胀所做的功 ΔA ，亦被视作常数。这样，气温的变化与乱流扩散值的变化，二者之间应当呈现简单的线性关系。这个线性关系（或近似于线性关系的其它类型函数关系）就把温度与能量二者清楚地显现出来，它说明了温度的变化反映着能量的变化。为了证实在自然地理面中这个结论的真确性，我们再举出一个具体的例子：

1963 年在我国石家庄地区的田间测试中，曾经选取了一组典型的资料如下，（选取资料的标准，依据上述的假设条件或尽可能接近于这些假设条件），它是由中国科学院地理研究所热量水分平衡组观测的。试验地是棉田，测定

数据是在刚刚灌溉后的充分湿润地面上进行的，现于表 4.6 中，列出 7 月 29 日至 7 月 30 日的连续资料：

表 4.6 气温变化与乱流扩散值变化

日期	时间间隔 (t)	净辐射值 (卡 / 厘米 ² · t)	气温差 (T _末 — T _前)	乱流扩散差 (P _末 — P _前)
7 月 29 日	07—09	51.6	+3.5	+5.4
	09—11	85.2	+3.4	+9.0
	11—13	100.2	+0.5	+2.0
	13—15	87.0	-1.3	0
	15—17	51.6	-0.5	-0.6
	17—19	13.0	-3.2	-7.4
	19—22	-7.2	-2.8	-6.3
7 月 30 日	22—01	-9.0	-1.6	-7.0
	01—04	-4.5	0	-1.8
	04—07	5.2	+1.2	+2.7
	07—09	42.0	+4.4	+8.1

[注：表中气温差与乱流扩散差栏目中，数值前面的正负号，表示着后一时段与前一时段相比是增加 (+) 还是减少 (-)。]

在应用该表资料的同时，还采纳了其它类似的测定资料。它们之间的图象形式如图 4.8。

由上述的资料和图可知，正是因为温度正确地反映了能量的状况，所以在实际上才得到了广泛的应用。能量与温度的关系是肯定的，但由于自然地理面的复杂性，加上热只是能量传递和转换的一种形式，因此要正确地辨识能量、热量、温度之间的联系与区别，是很有必要的。在使用时，除了审慎地查明所处的具体条件外，还必须对于实际状况所引起

的差异加以合理的订正，才能帮助我们得出好的分析结果。过去一段时间使用了“积温”的概念，近年来西方多用“度天”的概念，无非就是利用温度与能量之间的确定关系，借温度的指标去表达能量水平的一些方法而已。

第五章 自然地理面中的力

自然地理面中任何一种成分，都处在不停的运动之中。一个客体运动状态的改变，其基本原因在于作用于其上的力的改变。同时，力和能又是联系在一起。因此，正确地运用物理学中关于力的一般知识和基本概念，去解释和分析不停运动着的自然地理现象，是我们的又一项重要任务。

根据现代物理学中关于力的划分，在自然界中共有四类，它们分别是引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力，这是从 1948—1949 年开始，就已经了解了的。这四种力的比较为：强相互作用就是原子核吸引在一起的力，它的强

四种相互作用	强度
强	1
电磁	10^{-2}
弱	10^{-13}
引力	10^{-38}

度最大；电磁相互作用就是电力和磁力；弱相互作用有很多种，1946 年以前，只知道一种弱相互作用，即 衰变，自那以后，发现了很多新基本粒子的种种不同衰变，因而也就发现了多种弱相互作用；至于引力相互作用，这是人类最先发现也是研究得比较成熟的一种力。

这四种力的相对强度以引力相互作用为最小，只是强相互作用的 10^{-38} ，假如两个质点相距为 r ，那么二者之间的引力相互作用只是二者电磁相互作用的 10^{-38} 。但在日常生活中，引力作用却是非常重要的，而且我们感觉到它的强度似乎不至于如此小，这是由于引力相互作用永远是相加的，而其它三种相互作用都是既有相吸的力，也有相斥的的力，所以把许多物质放在一起，它们之间的相吸与相斥彼此发生抵消，唯有引力是连续不断地相加，因此人们感觉到引力很大。事实上，在自然地理面中，各个成分的运动，处处离不开引力的作用，这对于我们来说是极为熟悉的。此外，在这四种相互作用里，电磁力和引力是所谓的长程力，而其余两种则是短程的相互作用力。

在自然地理面中，根据所研究的特定对象，对于其中物体运动所经受的力，一般可以归纳为以下几类。其一为构造力，它是由于地球内部物质的运动和分异在地表的响应。这种构造力，在自然地理面中的显示，就构成了它的骨架和基础。关于构造力的基本规律，目前还不十分清楚。而我们的注意力并不在研讨构造力的机制，而是了解它对于地表面的作用结果；其二，就是引力，包括地球的重力和星际间的引力，这是影响地表物质迁移和能量转换的重要作用因素，可以说，自然地理面中的全部过程，都有引力的作用显示。特别对于地表面的外力作用来说，如无引力的参与，那是不可想象的。其三，就是外部作用力，它是以太阳辐射能为主的几种形式的总称，其中包括着风化作用力即地表侵蚀力，尤其是表现在水力和风力的作用上；其四，是由于地球本身的运动所形成的力，如摩擦力、离极力及地转偏向力等。其五，可以称之为微观方面的力，如分子力、胶体吸附力等……。以上的划分是不严格的，主要为的是使用上的方便。它们共同制约着物体的运动状态以及物质和能量传输的强度和方向。地球表面上任何一种物体的运动方向和强度，都是上述全部力或一部分力的合力作用结果。因此，首先要对力的合成

与分解有一基本了解，这就要从向量谈起。

第一节 向量

向量就是矢量，它是具有大小和方向的量，与此相应的量叫标量，并无方向而只有大小。整个说来，自然地理过程属于不可逆过程，具有方向性，并在某种意义上说，它们属于向量的范畴。我们首先从最简单的平面上的向量概念开始，加以讨论。

向量计算遵守着特定的法则，因此可以进行运算。两个向量之间的加法按平行四边形的对角线法求出，如图 5.1， V_1 和 V_2 分别代表着两个向量，它们之和 V_1+V_2 即为图中所示的对角线：如果一个向量与一个标量相乘，仍然得到一个向量，这个新向量的方向与原来的相同，其大小是原向量与标量之乘积。

在以单位向量 e_1 和 e_2 构成的坐标系中，平面上任意一个向量 V 可以分解为一对有序的数 V_1 和 V_2 来表示：

$$\vec{V} = V_1 \vec{e}_1 + V_2 \vec{e}_2 = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

这样两个向量 V_1 和 V_2 相加又可以表示成：

$$\begin{aligned} \vec{V}_1 + \vec{V}_2 &= (V_1 \vec{e}_1 + V_2 \vec{e}_2) + (V'_1 \vec{e}_1 + V'_2 \vec{e}_2) \\ &= (V_1 + V'_1) \vec{e}_1 + (V_2 + V'_2) \vec{e}_2 \\ &= \begin{bmatrix} V_1 + V'_1 \\ V_2 + V'_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.2)$$

同样，标量 K 和向量的乘积为：

$$\begin{aligned} K \vec{V} &= K(V_1 \vec{e}_1 + V_2 \vec{e}_2) = KV_1 \vec{e}_1 + KV_2 \vec{e}_2 \\ &= K \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} KV_1 \\ KV_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.3)$$

由此，平面中的向量，可以看作是两次测量所确定的量，这就叫做二维向量。它说明，在平面中任何一个向量，均可以分解为两个特定的向量，并被看作是这两个特定向量相加的结果。另一方面，平面中任何两个向量又都可以通过平行四边形法则结合成为一个向量。但在自然地理面中，极少有二维向量这样简单的情况，我们所碰到的运动，至少也是用三次测量的结果来确定的，也就是说为三维向量，它是用三个一组有序的数来表示的，而且它的运算法则也是从二维向量推广而来的。

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix}$$

三维向量的加法及其与标量的乘法，也与二维向量一样：

$$\vec{W}_1 + \vec{W}_2 = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1' \\ W_2' \\ W_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 + W_1' \\ W_2 + W_2' \\ W_3 + W_3' \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$K\vec{W} = K \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} KW_1 \\ KW_2 \\ KW_3 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

这里我们举两个简单的在自然地理研究中使用向量分析的例子。其一，假如我们考察一个停留在坡度为 α 坡面上的某个颗粒，并且施加一个力 F ，这时在一定的条件下，该颗粒就要发生相应的运动。坡面可以看作是一个山坡，也可以看作是一个河床，而外力 F 则是由外部所影响的力例如流水的运动。这时，颗粒本身的重量为 W ，颗粒和坡面的接触面积为 A ，表面和颗粒之间的粘聚力为 C ，该坡度进行平面滑动摩擦的静止角度为 ϕ_s （它的正切值等于静摩擦系数 μ_s ），如图 5.2 所示。

能够引起向下运动的“应力”是 F/A ， $W \cdot \sin \alpha / A$ ；而阻抗运动的力是 $(W \cdot \cos \alpha / A) \cdot \mu_s$ 和 C/A ，在颗粒移动开始的一刹那，引起运动的力正好与阻止它运动的力相平衡，即

$$F/A + W \cdot \sin \alpha / A = (W \cdot \cos \alpha / A) \cdot \mu_s + C/A \quad (5.6)$$

消去 A 后，可以简化成

$$F + W \cdot \sin \alpha = W \cdot \cos \alpha \cdot \mu_s + C$$

根据向量的分解与合成的原理， F 与 $W \cdot \sin \alpha$ 是两个向量，它的合力就是颗粒向下移动的力，当然阻止向下运动的力也是两个向量的合力。

假定暂不考虑外力 F 与粘聚力 C ，而且假定坡度所处的角度正好为 ϕ_s ，那么当颗粒开始移动时，

$$W \cdot \sin \phi_s = \mu_s \cdot W \cdot \cos \phi_s$$

$$\mu_s = \tan \phi_s$$

$$(5.7)$$

对于无粘聚力作用的表面来说，引起颗粒本身沿坡面运动所需要的外力，当坡度恰好为 ϕ_s 时，这个外力是 0。换言之，当坡度达到某一临界值后，不依赖任何外力，只是颗粒本身的重力的分力，就足以发生运动了。由此也说明了静摩擦系数的物理意义。

这对于野外习见的崩塌、滑坡现象，以及工程建设上的边坡稳定问题等，在进行力的分析时都是十分需要的基本知识。当然实际的状况要复杂的多，但无论如何复杂，总可以运用简单的向量分析去解决它。

另外的一个例子是达尔黎培 (Dalrymple) 在 1968 年，应用向量分析，结合地貌状况，对一个河谷谷边的九种部位作了描述，下图就是他所作的结果：

除此而外，在自然地理面中当然还有更复杂的多维向量。任何在地球表面上运动的物体，如大气的流动、洋流的运动、固体在表面的快速移动（如滑坡、泥石流、崩塌、雪

崩等）和慢速移动（如地体岩石和土壤的蠕动，包括连续蠕动、季节蠕动和随机蠕动等），均可认为是一个多维向量所合成的向量，因为它们都不

是单一力作用的结果，而是通过好几个力共同作用的综合结果。这些运动至少要受到重力、外力梯度、摩擦力、地转偏向力、引潮力等的共同作用，这些力分别有着各自的作用方向，因此在一定条件下，每一类物体的运动可以用这种几个一组的有序数来标识，当然如要象二维向量那样直接在平面上画出来，是不可能的，那就必须依靠抽象的思维，设想出对于二维向量空间的推广，在这个意义上来说，地球表面上每种物体的运动，是一个多维向量的合向量。如此看来，二维向量（ $n=2$ ）和三维向量（ $n=3$ ）就是 n 维向量的特殊情况。而最后物体运动的实际方向，就是各个分力的合力方向。

第二节 构造力

地球表面基本形态的骨架，是由地球的内部构造力来决定的，在此骨架的基础上，加上各种外力的作用，才形成我们所看到的现实自然地理内容。在魏格纳的“大陆漂移说”提出之前，关于山脉形成的主要假说为“地球收缩说”。它假定地球原是一个炽热的火球，以后逐渐冷却，在此冷却过程中，地球表面发生收缩，因而形成了褶皱的山脉。

但是用这个学说去解释阿尔卑斯山和喜马拉雅山的强烈褶皱时，立即发现了问题。在这里，地层的水平长度与皱缩前的长度相比，只有原先的四分之一到八分之一。按此计算，现在宽度为 150 公里的阿尔卑斯山，必定应由原来长度达 600—1200 公里的地面皱缩而来。那么仅此一地的这种收缩，即意味着地球的周边应缩短 3%。此外，物理学上关于物质膨胀系数的测算表明，地表要达到这种程度的收缩，它的温度必须要比原来冷却 2400 以上，这与事实显然不符。加上现在普遍所持的观点是，由于地球内部放射性元素的蜕变，可以产生大量的热，那么地球似乎并不是如收缩说所认为的那样，它是从炽热逐渐变为冷却的。

其后，根据重力测定的许多数据，一些人创设了“地壳均衡”的理论。这个理论通过所积累的各种地球物理证据以及可感地震的资料，得到了承认并不断完善。它认为：地壳是铺在地幔上的一个薄层，二者之间的界面称做“莫霍不连续界面”。1909 年南斯拉夫科学家莫霍洛维奇在研究巴尔干地震时发现，P 波的速度在地表下面几十公里处突然增加。这种速度的明显变化，标志着在此处的物质组成必然有相应的变化，以后就称此界限为“莫霍界面”。在界面之上者称为地壳，其下为地幔。由于地幔在高温高压条件下，形成类“液态”的软流层，而且其比重也明显大于地壳中的物质，所以可以看作由花岗岩和玄武岩为主要成分的地壳就浮在这个软流层上。这和铜块漂浮于水银槽中的现象十分相似，正如图 5.4 所示的那样。三个铜块的比重相同，底面积相同，但由于它们各自的重量不同，因此在水银槽中的表现也就不同，最重的铜块凸出水银面最高，同时它相应地在水银槽中沉降得也最深。

这种现象可以用阿基米德的浮力原理加以解释。浮力等于物体所排开的那一部分液体体积的重量。放在水银中的每一个铜块，一直下沉到浮力和铜块本身重量相等时为止，以此维持平衡。大陆块体就是根据同一原理漂浮在地幔软流层上，这就是地壳均衡的原理。

根据这个原理，地球表面上的山愈高，山根沉入的深度也就愈深，正如图 5.4B 所示的那样。能够说明地壳均衡的例子极多，最鲜明的莫过斯堪的纳维亚半岛的上升。至今，它们仍以每一百年几乎 1 米的速度上浮。这是用精密的大地测量得出的数值。约在一万年之前，大冰期结束时，这种上升就已开始。因为在冰期当中，本地区被厚达 2—3 公里的大陆冰块所覆盖，重量的加大，使这个半岛下沉了几百米。随着冰川的消融和退缩，依据浮力原理这块地体应该是逐渐上升的。事实确乎如此，由此例显示了地壳均衡学说的真实性。既然这种浮力可以使得陆块进行明显的垂直升降运动，那么根据同样的道理，如果有其它一种力加诸其上时，它不也可以进行水平运动吗？

就在地壳均衡理论的基础上，奥地利年青的科学家魏格纳创立了著名的大陆漂移说。经过几十年的争论后，逐渐演进到“海底扩张”和“板块构造”学说。六十年代初，里斯和迪茨提出海底扩张的论点，他们认为软流层的物

质，从大洋的海岭处上涌，推着两侧原来表面的较老岩石向外扩张，从而形成新的海底，被推动的较老的岩石层在大洋的海沟处沉入地下，返回软流层，形成了一个传送带似的对流循环。这个传送带的运动速度每年约为几个厘米，如此海底经过三、四亿年即可更新一次。这样的假说提出后不久，于1967年产生了目前已很著名的板块理论，并且相应地讨论了地壳运动的作用力问题。直到现在，这个学说距离完善还有一段艰难的路程，特别是对于引起运动的动力，争议最大，其它方面也存在不少问题，但是用它去解释地表面的变动状况，却具有相当令人信服的合理性。

我国卓越的科学家李四光，应用地球自转速率的变化，来解释形成地表面地势起伏骨架的原因。由放射性物质引起的地球内部热过程，可以使得地球内部的物质发生对流、分异和调整，与此相应的地球本身必然产生膨胀或收缩，其直接结果是：地球自转的速度相应地发生变化。他对此予以了特别的重视。我们知道，地球自转的角速度确实在发生变化，包含有长期变化、季节性变化和 irregular 变化，引起变化的最主要原因就在于地球内部。理论力学中一条基本的定理是角动量守恒定律，地球在绕轴旋转时，就遵守这个定律。

固体绕定轴旋转的角速度 ω 和固体对于定轴的转动惯量 I 之积保持常数，即

$$I\omega = \text{常数}$$

$I\omega$ 的乘积就称为固体对于定轴的角动量。这样当地球的转动惯量加大时，相应的地球自转的角速度就变小，反之角速度就变大。这样，在全球性大规模地壳运动发生以前，地球自转角速度应该在一个时期中逐渐加大，而在其后， ω 又显著的变小。这种作用产生了使地壳发生拗褶和褶皱的水平推力。这种力并不足以形成地表面所看到的起伏现状，它只不过显现出一种作用力的作用趋势，只有将它与前述的地壳均衡作用结合在一起，才能较好地去阐释地表的巨大起伏现象。

有关构造力的学说还有很多，但都没有把这个复杂而艰难的问题加以透辟的解决。只是构造力在自然地理面中所引起的地貌形态的基本轮廓，始终都在改变着所输入的能量和物质的再分配，这种再分配的状况，随着这种构造力的不断作用，经历着相应的变化，不断改换着物质能量交换的方式、方向和强度的“基础”，许多原来是低凹的接受沉积的地方，由于构造力作用变成高山时，不仅地体形态本身发生了变化，原来接受物质沉积的方式也变成了以风化剥蚀为主的方式，许多相伴随的过程也都作了相应的调整，以适合这种变化。整个地质历史中，反映这种变化的例子是不胜枚举的。

第三节 重力和引力

引力是质量的固有本质之一。每一个物体必然与另一个物体互相吸引。尽管引力的本质还有待于确定，但人们早已觉察到了它的存在和作用。接近地球的物体，无一例外地被吸引朝向地球质量的中心。因为在地球表面上的任何物体，与地球本身的质量相比，实在是微不足道的。

但是地球并非一个静止的球体，它所具有的复杂运动形式，使得原来所具有的引力产生了某些变化。因为在这个转动球体上的各种物体，都有一个保持它们自己作直线运动的倾向。于是地球自转时的离心效应就产生了，其结果是一个与引力方向相反的力也同时发挥着作用，特别在靠近赤道的地方更是如此。因此，作为共同使用的名词——重力，这实际上是被这个离心力和其它较小的有关效应所减小了的净引力。我们已经知道这样一种事实，一个物体在极地重 189 磅时，拿到赤道仅仅重 188 磅。

假如地球表面完全为自由流动的液态水所覆盖，那么这种液体水的表面呈现一个扁球体，在两极稍平，而在赤道膨胀，这在前边已经作了简要的叙述。这个理想的形状，称为地球体，它将完美地同全部的重力、转动力相平衡。

牛顿定律对于引力的表达是重力遵循的基础。众所周知，该定律的基本表述为： m_1 与 m_2 这两个质点之间的引力，正比于二者质量的乘积，反比于这两个质点中心之间距离的平方，即

$$F = -A \frac{m_1 m_2}{r^2} R_1 \quad (5.8)$$

如果说此处的 F 为作用在 m_2 上的力，那么 R_1 为从 m_1 指向 m_2 的单位向量， r 是 m_1 与 m_2 之间的距离，而 A 是万有引力常数。加上负号表示着力是互相吸引的。

很明显，引力是存在于自然界中强度最小的相互作用力。最近还发现， A 的数值也不是常数，而是随着时间有缓慢的减少。它的这种变化，是由许多原因造成的，其中之一被认为是由于地球半径随着时间而增加，这样反过来，又必将对地球的发展历史带来深刻的影响。可是，所得出的 A 值变化速率是如此之小，以至于它在整个地球演化过程中，即在几十亿年的时间内，其变化速率只大约为 1%，所以在实际应用上并无什么真正的价值。

由于地球（假定为 m_1 ）这个巨大质量的存在，使得 m_2 所产生的加速度，称做重力加速度。它最早是被伽利略在意大利的比萨斜塔上测定的。在地球表面上这个数值一般定为 980 厘米 / 秒²，通常又将 1 厘米 / 秒² 称为“伽”（gal），用以纪念这位伟大的科学家。

重力场是守恒的，也就是说在重力场中，移动一个物体所做的功，独立于它所经过的路径，而仅仅取决于它的终点。事实上，假如该质量最终转到它原来出发时所处的位置时，其净能量的消耗等于 0，而不管它在其间所走过的道路是什么。这在自然地理面中，是可以很轻易得到证明的。寻常所见的水分循环，就是一个很好的说明重力守恒的例子。一滴水从海洋面上被蒸发，克服重力，进入大气，这是外界做功的结果。待它由空中重新回归到海洋时（而不管它是直接落入海洋，还是被运送到几千公里之外，又随着河川径流回到海洋来的），放出了原先克服重力时的那部分功，遵循着重力守恒，

使得净能量的消耗等于 0。类似的例子，在地表面是很多的。

另外一种对重力守恒的表达方式就是：动能和势能之和在一个封闭体系中为一常数，这涉及到动能与势能的互相转化，也是我们要经常使用的一个规律。同时要记住引力是一个向量，它的方向是沿着地球的质量中心与另外一个物体质量中心的连线，这在进行向量分析时，是极为有用的。

地球表面的重力大小，一般来说与五个因素有关，它们是地理纬度、海拔高度、周围地体的地形、地球潮汐与地表以下物质的密度。这最后一个因子，仅仅在进行重力测量中才有价值，一般情况下它对重力变化的影响，要比前四个因子的联合效应小的多。例如，从赤道到两极，重力随着纬度变化的数量大约为 5 伽，而油田勘探中的较大重力异常是 10 毫伽，只相当于上述数字的 1 / 500。在 1930 年，国际大地测量和地球物理协会采用了一个公式，给出了在地球这个椭球体上任意一点的重力加速度为：

$$g=g_0(1+\sin^2\varphi+\sin^2\lambda) \quad (5.9)$$

g ——重力加速度； g_0 ——在赤道上的重力加速度，它等于 978.0490 厘米 / 秒²； φ ——纬度，常数 $\sin^2\varphi$ 及 $\sin^2\lambda$ 分别是 0.0052884 和 -0.0000059。

自从 1930 年以来，由于在重力测量中获取了大量的资料，特别是通过人造地球卫星的准确测定，上式中的常数已经有了进一步的改动。

从自然地理学的角度来看，我们的着眼点不在于寻求计算重力或进行订正的准确公式，而在于利用这种重力分析的基本原理，阐述物质在进入自然地理面和输出到环境时的受力状况，在这些受力当中，重力是特别应当考虑的一项。举凡地形的改变、物质的搬运和堆积、气团的运动、水分的循环、生物的生长，甚至于地球物质的调整等，离开了重力的分析，就不可能得出正确的结果。

前面已经讲过，重力最为明显的表达，一般都在地球固体表面之上。在其下并非重力消失了，只是不容易有如固体表面之上那样明显地看出来罢了，此外作为研究的对象来说，我们亦不去特别关注地层深处的重力状况，而只接受它所带来的对地表造成的后果。进而看到，在海平面之上陆地面积约占全球总表面积的 29%，以雨和雪降下来的水，必然经受重力的作用回归到海洋中去。这样，每一次落到地表上的降水，都具有比例于本身质量和海平面以上高度的乘积，这样数值的能量，这就是它所具有的势能。

在陆地地表，亦有个别的点低于海平面，例如我国的吐鲁番盆地，美国加利福尼亚的死谷等，它们之所以能在陆面上保持这种例外的情况，一是由于其面积小，二是由于这些盆地均处于干旱区，很少有降水发生。假如把它们移到湿润地区，这种低于海平面的状况决不会保持很久，在重力的参与下，很快就要被水充满或被水所带来的风化物质填注，以补足海平面在全球延伸中的“漏洞”。

重力在自然地理面中的表现，既平常又深刻，对此应有充分的认识，现粗略地讨论一下重力在改造地表形态上的作用。陆地表面由于风化作用而造成的松散物质，在一定的条件下，由于力的作用是要移动的。无论是从高处到低处的滚动、滑落、崩塌，还是通过河流的输运，风的挟带等，其中一个极重要的因素就是重力的参与。

我们以一个在坡面上运动的岩块为例，简要分析一下重力的作用。由分析得知，重力的一个分力，即岩块向下滑动的力，比例于所处坡度的正弦，

当然还取决于这个坡面的摩擦系数。一克重的岩块在坡度为 45° 时，向下滑动的分力为 0.7 克；而当该坡度等于 60° 时，这个分力将增加到 0.87 克（如图 5.5）。由于摩擦系数很少有大于 1 的状况，因此单凭摩擦系数的阻抗，在坡度大于 45° 时，将支持不住重力所引起的向下滑动的分力。事实上，比 40° 更为陡峭的自然坡度在全球是很少见的，因为如果有超出 40° 的角度时，重力作用将比较迅速地对此加以改变，由此可以看出重力改变地表形态的作用来。

在讨论地球重力的同时，我们对于其它星体产生的类似于地球引力的作用力，也要加以必要的重视。最主要的就是月亮和太阳对地球的引力。

月亮和地球的距离很近，约等于三十个地球的直径，根据万有引力定律，引力与距离的平方成反比，因而尽管月球的质量不算太大，但对于地球上各个质点的引力却相对的要大一些。太阳的质量很大，约等于二千亿亿吨，是地球质量的三十三万倍，但由于地球与太阳之间的距离太远，是月球—地球之间距离的四百倍，因此，它对地球的引力，只是月球对地球引力的 46%。所以，地球上的潮汐现象是太阳和月亮二者作用力的合成，这里我们只需了解月亮的引力作用比太阳更大这一点就够了。

地球的质量是月球的 81.5 倍，因此月—地系统的公共质量中心，必然大大地偏向于地球一侧，大约在距地心 0.73 倍地球半径的地方，两个球体每月绕着这个共同的质量中心转动。

月球对于地球的引潮力固然重要，但这个引潮力的数量值却并不太大，只相当于地球重力的千万分之一。对于地球上一个 10 吨重的物体来说（即重力等于 10 吨），其引潮力仅有 1 克。这样小的力，人通常是感觉不出来的。但地球对这种不大的引潮力，反应却十分明显。很早以前，就发现海水在一日内有规律的涨落（潮汐）与月球有密切关系。此外，地球不是一个刚体，一般都认为它是一个具有弹性的球体，对于具这样一种特性的球体，在引潮力的作用下，地球的固体岩石地壳也会产生“潮汐”现象，叫做固体潮，每天都要升降达 30 厘米左右。当然地球对月球的引潮力更大，它使得月亮突起和下落的幅度达到 3 公里左右。

与此同时，地球上的大气，也因为这种引潮力，每天都产生着“大气潮汐”。至于海洋这个庞大的水体，其上的潮汐现象就更为明显了，加拿大东海岸的芬地湾蒙克顿港，最大潮差达 19.6 米，堪称世界前茅。我国钱塘江口的最大潮差记录为 8.9 米，当然各个地方由于所处位置及周围环境的不同，潮差也是不相同的。

月球和太阳的引力在塑造陆地表面的地形方面，也是一个具有一定意义的因素。康德在 1775 年，曾率先提出把涨潮作为改变地球旋转速度的一个因素。近年来，在探讨关于地震的预测预报中，也有人把潮汐力作为一个对地震起因的触发因子。此外，对于自然地理来说，更为明显的则是潮汐对于海陆交界处地形的变更作用，对于岸线的影响作用，以及对于波浪运动的作用等。

第四节 外作用力

地表面是一个很不平坦的表面。在海平面之上，全球陆地的平均海拔高度大致为 875 米。从地表高程的统计研究中，根据不同的高度所占据的面积，得出了它们的分配图。瓦格奈 (H·Wagner) 在 1912 年曾经作过计算，并得出了地球固体表面的各级高程分配。一直延续至今，研究陆地的高度和海洋的深度及其分配规律，还是许多学者感兴趣的课题之一。尽管关于高程的分配，五十多年之前业已确定，但随着测量数据的不断丰富，精度的不断提高，使这方面的统计分析有进一步的发展。米纳尔德和史密斯在 1966 年，利用现代的测深图并考虑了其它因子，重新得出了这种分配图。并相应地列出了地球表面高度和深度的数据。从这些图和表中，可以对于地球外表的轮廓有一个大致的了解。

表 5.1 地球表面的高度和深度

高度和深度 (公里)	所占面积		累积面积	
	× 10 ⁶ 平方公里	%	× 10 ⁶ 平方公里	%
海平面以上：最大高度，珠穆朗玛峰，8,848.13 米；平均高度，875 米				
大于 5	0.5	0.1	0.5	0.1
4—5	2.2	0.4	2.7	0.5
3—4	5.8	1.1	8.5	1.6
2—3	11.2	2.2	19.7	3.8
1—2	22.6	4.5	42.3	8.3
0—1	105.8	20.8	148.1	29.1

续表

高度和深度 (公里)	所占面积		累积面积	
	× 10 ⁶ 平方公里	%	× 10 ⁶ 平方公里	%
海平面以下：最大深度，马里亚纳洋沟，大于 11 公里；平均深度，3,729 米				
0—0.2	27.1	5.3	175.2	34.4
0.2—1	16.0	3.1	191.2	37.5
1—2	15.8	3.1	207.0	40.6
2—3	30.8	6.1	237.8	46.5
3—4	75.8	14.8	313.6	61.5
4—5	114.7	22.6	428.3	84.0
5—6	76.8	15.0	505.1	99.0
6—7	4.5	0.9	509.6	99.9
7—11	0.5	0.1	510.1	100

[注：大陆的数据系 E·科西纳引用沙伊德格在 1963 年的资料。]

从这里能够看出，陆地表面的主要部分均处于海拔 1,000 米以下的高程内。以本书的角度去看，海洋底部是地表物质的堆积场所，外作用力主要表现为陆地表面上。在外力作用下被风化的地表物质，通过各种途径，输出到

自然地理系统之外的海底。这种外部作用力（为多种外力形式的总称），在构造力作用所造成的骨架上，与重力和其它力伴随在一起，共同改造着地表的形态。如美国 NASA 的双子星座 V 号所拍摄的我国四川省重庆西北的山地，就可看到典型陆地地形的面貌。（图 5.7）

同时，外力作用还改变着地壳物质的均衡，它力图将地球表面夷平为一个光滑连续的球面，从而使得重力对于地表固体物质的表现、以及动能和势能二者的转换处于一种比较

稳定的、无法活跃表现的潜在状态之中。外力作用的这一趋势，早在上一个世纪，就已经阐明，经过后来越来越多的事实验证，认为这是一种有价值的论断，对于自然地理面有着直接的重大的意义。

很多人倾向认为，地形在很大程度上是由主河流的剖面来表达的。陆地整个可以看成是多级河网交错分布的各个空间的镶嵌，也就是一个流域一个流域的拼接。它通过面流、溪流、支流，最后汇成主流。它的这种结构，一方面改造着地表的形态，另一方面又反映着地表的形态，对于它的研究，有助于我们理解外力的一个主要方面是怎样改造着陆地的基础的。当然对于内流区、沙漠区、冰盖区、极地区等，不能用上述的论点去解释，在它们之上，外部作用力的主要形式也不是流水，但它们均不能代表地表形态的基本演化过程。因此在外部作用力中，水的作用总是受到特别的重视。

一个河流的均衡剖面，是由该河流中的能量分配来决定的。一般而论，沿着河道在一个河段中流动的水，它的能量 E 是由伯努利 (Bernoulli) 方程来描述的：

$$E = Vh + \frac{1}{2} V v^2 \quad (5.10)$$

式中等号右方的第一项为在该河段中的势能， V 是水的容积； h 为这一河段上下之间的高差； γ 是水的比重。第二项代表动能， v 为水的流速， ρ 为水的密度。在河段长度 l 上，能量的损失 E ，代表着通过每单位河流长度时所消耗的功 W/l ，则

$$\frac{W}{l} = \frac{E}{l} = V\gamma \frac{h}{l} + \frac{V\rho}{2} \cdot \frac{v^2}{l} \quad (5.11)$$

利奥波德 (Leopold) 在 1953 年就已指出，一个河流趋向于调整它自己的深度，以此来维持在任何时间内，在其整个长度上的速度为一个常数，即 $v^2/l=0$ ，这样，

$$\frac{W}{l} = V\gamma \frac{h}{l} \quad (5.12)$$

而 h/l 即为河流的坡降。我们省略了对于公式的推演，但其最后可以得出地形高度 h 和水平距离 x 之间的关系为：

$$-K \log x = h + C \quad (5.13)$$

C 为积分常数，而 K 也是一个常数。此式有什么地理意义呢？它对于我们去估算地表面高度的概率 $P(h)$ ，有很大帮助，而一旦知晓了地表高度的概率分配，一地的地形起伏和外力作用程度也就不难得出定性或定量的结论了。仍然不加推导，只将其结论引出：

$$P(h) = Te^{-hT} \quad (5.14)$$

$P(h)$ 为在陆地表面上高度 h 所占据的概率数，经过一定演算后，
 $T = \left[1 - e^{-\left(\frac{h}{K}\right)} \right]$ 。果能够确定 T 值的话，那么在地球表面上，某一高度

(从海平面算起) 所占有面积的概率即可确定，从而对于陆地表面地形起伏的状况，有可能获得定量表达的方法。由开始时所引证的瓦格奈和米纳尔德等人的数据，知道陆地面积的 73% 位于海平面与其上 1,000 米之间的高度范围内 (也有的数字为 72%)，假定我们取高度间隔 $h=1$ 米，则

$$0.73 = \int_0^{1000} P(h)dh = \int_0^{1000} Te^{-hT} dh = -e^{-hT} \Big|_0^{1000} = e^{-1000T} + 1$$

$$-e^{-1000T} = -0.27$$

$$T = 0.013 \quad (5.15)$$

这样在全球陆地范围内，高度 h 所发生的概率就得出为：

$$P(h) = 0.0013e^{-(0.0013)h} \quad (5.16)$$

在构造力与外部作用力互相作用所形成的陆地地表上，公式 (5.16) 可以反映地形起伏的基本形态。这样，当某个高度的 $P(h)$ 发生了显著的变化时，这也就隐伏着反映了构造力与外力有着相应的变化。如能通过十分精确而快速的手段，测定出和计算出它们变动的轨迹，将能定量地得出这两种力互相作用的强度，并能预测变化的方向。显然从自然地理学目前的水平来看，无论从其基本理论，还是从其测试技术，都没有具备这样的基础，不过也不能就说这一定是海市蜃楼般的幻想。

外力作用，主要发源于太阳辐射能。当太阳能投射于地表后，它表现为不同的形式。由于能量在时间上和空间上分布的固有差异，必然产生普遍存在于自然地理面中的外力梯度。如大气压力梯度、水力梯度、温度梯度等，从而引起了不同规模、不同表现特征的能量和物质传输与交换。根据热力学第二定律的判据，这种由高到低沿梯度进行的过程，是可以自动进行的过程，它的基本性质使它具有一种必然的趋势，那就是力图使得这种不均衡现象得到缓和，过程进行的极限就是达到平衡。本节难以全部概述外部作用力所表现的各种形式，只有通过个别事例加以必要的说明。

在自然地理面中，风是常见的一种自然现象。风的运动是由外力梯度引起的，在它的行进过程中，对于阻挡其前进的物体施以风压。风压的大小与风速的平方成正比。而风速大小本身又取决于压力梯度以及下垫面的特征。同时风压又与空气密度成正比，空气的密度又与大气压力、空气的温度和湿度等因素有关。这样，如果取气压为 1000 毫巴，气温为 15℃，空气湿度为 15 毫巴，空气的密度就是 1.203 公斤 / 立方米，此时风的最大压力在数值上可以表示为：

$$P = 0.1227v^2 \quad (5.17)$$

P 为垂直于风速的每平方米面积上所受到的最大压力 (单位公斤)， v^2 为风速 (米 / 秒)。当 $v=4$ 米 / 秒 (3 级)， P 近似等于 2 公斤；如若风速 = 12 米 / 秒 (6 级) 时， P 增加到 18 公斤；而当风速 = 33 米 / 秒 (12 级) 时， P 剧增至 134 公斤。

既然风是最常见的一种空气流动过程，那么在其流动中，必然将所获得的能量消耗于对其的阻力上，从而刻蚀着地表面的所有物体，形成了许多典型的风蚀地貌特征，特别是当风中携带着固体颗粒和其它气溶胶时，将对阻

挡它的一切，产生着更大的作用，形成了外部作用力中又一个很重要的成分。除了许多著名的风蚀地形是其直接作用的结果外，它对于植物、土壤、水乃至建筑物、人类社会等，都有很大的影响。美国有一项关于暴风灾害的统计，认为美国每年死于风暴的人数平均为 289.1 人，每年损失掉的财产价值 14, 500 万美元（据 Burton 和 Kates）。

在自然地理系统中，风对于物质的风化、对于地形形状的改变、对于物质的运输和堆积等，都起着相当活跃的作用。此外，风总是携带有微细的固体颗粒和沙尘，显著地影响着大气的透明度，从而影响着能量对系统的输入，起到某种有效的反馈作用，这是我们进行系统分析应当认真加以考虑的。下表列出了在风蚀系统中的关键变数，以此可供我们研究外部作用力中的风，对地表进行侵蚀时，要考虑的主要变数以及这些变数的基本作用。

表 5.2 风蚀系统中的关键变数

风的变数	碎屑变数	表面变数
速度 (-)	颗粒大小 (±)	植物——残体 (+)
频率 (-)	土块的粘聚力特性 (+)	高度 (+)
持续时间 (-)	磨蚀能力 (-)	方向 (+)
规模 (-)	传输能力 (-)	密度 (+)
	有机质含量 (+)	良好程度 (+)
		覆盖度 (+)
		土壤水分 (+)
		表面糙度 (+)
		表面长度 (离开防护的距离) (-)
		表面坡度 (±)

表中的 (+) 表示这些变数增加时，风的侵蚀变小；

表中的 (-) 表示这些变数增加时，风的侵蚀增加。

对于水的作用，这是外部作用力中规模最大的一种力量。改变地面形状快、运输物质能力大、影响范围广、作用形式多，这些都是它的特点。关于水的基本侵蚀原理，很早就引起了人们的注意。库克(1936年)、爱利逊(1947年)等，都作过水的侵蚀过程分析，并建立了这种侵蚀的理论和方程。

荷兰的詹森 (Jansen) 和西德的帕特 (Painter) 在 1974 年，列出了世界上 79 条大于 5,000 平方公里流域面积的河流，计算了它们的年平均悬移质沉积物的数量，并把这种数量表示成有关气候和地貌等八个参数的函数，在分析水的侵蚀力方面有其独到之处。据此，他们分别得出了全球的四个气候带中单位面积的剥蚀率，见表 5.3。

表 5.3 全球剥蚀量的估算

气候	面积 ($\times 10^6$ 平方)	单位面积剥蚀量	剥蚀率(吨/年)
----	---------------------------	---------	----------

带	公里)	(吨 / 平方公里)	
A	29.7	71.5	2.12×10^9
B	39.1	169.0	6.61×10^9
C	23.1	714.4	16.50×10^9
D	31.7	46.5	1.48×10^9

其中：A——代表热带多雨的气候带，最冷月温度大于 18°C ；
 B——代表干燥气候带；
 C——代表地中海气候带；
 D——代表湿润微热的气候带，最冷月平均温度低于 0°C ，最热月平均温度高于 10°C 。

极地气候带没有在此考虑。由此进一步计算出全球陆地的平均剥蚀量为 26.7×10^9 吨 / 年。这似乎是一个被低估了的数字，然而用他们所得出的数字和已公布的其它人的数字相比较，还是比较适中的。已公布的数字按大小排列为：

富尼尔 (Fournier, 1960 年)	58.1×10^9 吨 / 年
库埃男 (Kuenen, 1950 年)	32.5×10^9 吨 / 年
吉拉里 (Gilluly, 1955 年)	31.7×10^9 吨 / 年
潘契诺夫 (Pechinov, 1959 年)	24.2×10^9 吨 / 年
休姆 (Schumm, 1963 年)	20.5×10^9 吨 / 年
霍尔曼 (Holman, 1968 年)	18.3×10^9 吨 / 年
劳帕金 (Lopat in, 1952 年)	12.7×10^9 吨 / 年

由这些数字可以估算出地球的外力强度来。大陆高出海平面的全部固体物质约为 17×10^{16} 吨，即使按照上述公布数字中的最小值为依据，则将整个地球完全削平到海平面位置，也不会超过二千万年。而对于地球演化的历史来说，二千万年不过是一个相当短暂的时刻。从地球形成至今，如按此速度剥蚀地面的话，则应当有 250 次被夷平了。但为什么在经历了几十亿年之后，地表面仍然呈现出高低交错的复杂面目呢？其基本原因就是外力所剥蚀的基础是不稳的，地球的构造力异常活跃，在整个地质循环中，全部链条都在相应地转动，并非单只进行剥蚀和堆积。此外，外力作用的强度随着条件的变化而变化，其作用速率并不是一个常数。由此又一次看出，地表形态只不过是各种力作用的最后表现而已。

现在简略地介绍一下风化作用。风化作用随时都在进行，只要是暴露于地表的固态物质，均遭受着它的作用。对于一个物体来说，如欲使其发生运动，首要条件就必须对其施以一定的力，从而将它从原来所处的相对稳定状态变化到不稳状态，风化作用对于表面固态物质所行使的力，就能赋予它们这种不稳状态。

暴露于地表的固体物质，所发生的全部物理的和化学的改变和损坏，称之为风化。我们分机械风化（即物理风化）和化学风化两方面加以说明。

1. 机械风化：

岩石通过机械的破碎分裂，从而减小其稳定度，降低其粘聚力，使粒度由大变小，不大严格的说，这就是机械风化。一般它通过以下三种途径来实现：

(1) 在地表面的岩石，由于压力释放所具有的膨胀作用：我们知道，从地表向下每深入 3—4 米，就增加一个大气压。岩石总是在经受巨大压力的条件下形成的，这要比它暴露于地表时的压力大得多。当岩石由于构造力作用抬升至地表时，立即失去了原来在深处时的重负，岩石则从巨大压力的释放中获得膨胀。其结果，使得大多数的岩石，都产生了看得见的或看不见的裂纹或“节理”。这种膨胀力的数量是很惊人的，从花岗岩的采石场中测定得知，当其从岩石基体剥离时，沿着它的长度膨胀了千分之一。

(2) 外部结晶体如冰和盐类在岩石裂隙中的生长：水被禁锢在岩石的裂缝中并冻结时，它的膨胀将在岩石内产生很大的应力。水分在大气条件下冻结时，它的分子组成为严格的六面形晶格，而且它的比容增加 9%，这种容积增大的现象，致使岩石的裂纹进一步扩大。美国材料试验学会(1971 年)，曾经使用“风化指数”去划分全美的风化状况。该风化指数系年平均冰冻周期天数和冬季平均降水之乘积。所谓“冰冻周期天数”，是指一日当中空气温度既高于 0 也低于 0，以此作为风化岩石时的冻融频率估算。而冬季平均降水是指秋天中第一次霜冻来临至第二年春天最末一次霜冻之间所发生的月平均降水总和。年平均冰冻周期天数和冬季平均降水之乘积，表明了水的冻融作用（也包括冰冻时比容增大造成裂纹加大的效应在内）及其对于风化的效应。在美国它的模型表达为：

风化指数数值	风化程度
< 100	可被忽略的
100—500	中度风化的
> 500	严重风化的

并以此风化指数对全美作了分区。

此外，盐类对于破坏岩石的作用更为显著，美国国家标准局对于花岗岩建筑和纪念碑作了测试，发现 5,000 次的交替冻结和融化（在 -12 时延续六小时，然后在 20 的水中将花岗岩样品放置一小时，作为一个周期，以后再重复进行），很难看出花岗岩的分离；可是同样的花岗岩试块，交替浸泡在硫酸钠的饱和溶液中（室温下达 17 小时），而后干燥（在 105 下达 7 小时），这样反复进行了 42 个周期，花岗岩即告破裂。由此看来，岩石裂纹中，由于蒸发致使水溶液过饱和而产生盐的沉淀结晶，对于岩石的破坏是相当剧烈的。

(3) 快速的不均衡加热与冷却引起的胀缩：沙漠中暴露于太阳之下的圆卵石，可以发现它们碎裂为象桔子瓣那样的碎块。行进于沙漠中的旅行者经常描述到：可以听到石头的破裂声如同步枪射击声一样响。这里有一段趣闻：曾经驻扎在非洲撒哈拉大沙漠中的法国殖民军，有一次在他们的要塞里，由于远处石头的爆裂声响如此之大，以至于指挥官无法判明原因，因而发布战斗警报，最后证实，的确不是有人进攻，而是石头的爆裂声，闹了一场虚惊。

令人不解的是，至今尚无一人可以用实验去证实太阳的加热会强到足以碎裂岩石的事例。美国国家标准局使用了曾在冻融试验、盐溶液试验时所采用的那种花岗岩试块，干燥加热至 105，而后再冷却到 -10，反复连续进行了 2,000 次，并未发现岩石有任何损坏的证据。另外一个经常被引用的事例，是格里格斯 (D. Griggs) 在 1936 年所公布的试验。他使用了体积为 3 立方英寸的花岗岩岩块，进行交替的加热和冷却，先在 5 分钟之内将岩块的表面加热到接近 140，然后冷却到大约 30（用电风扇吹冷）达 10 分钟，

如此往复，总共进行了 89,400 次，相当于事实上 244 年的太阳逐日加热和冷却。可是其结果是：岩石并无任何一点变化的迹象，甚至使用显微镜去观察也侦检不出来任何破损的征兆。由上述实验告诉人们，怎样去认识沙漠中石块的爆裂，还是悬而未决的问题之一。

机械风化除了上述的三种途径外，属于此范围的还有植物生长的机械作用以及人类开采矿石等活动。

2. 化学风化：

岩石的化学成分和矿物成分，在水、空气和生物及其它因素作用下，发生变化并瓦解的过程，就是化学风化。当谈到岩石的化学风化时，首先想到的就是水。在接近地球表面的范围内，水是最丰富最活跃的物质。在地球整个外壳五公里厚度的一层中，水是其它全部物质总和的三倍，而且可能是另外一种存在最普遍的固体物质——长石的六倍。由于水具有许多非凡的特性，因此在化学风化中起着明显的巨大作用。如果你到过壮观的岩溶地区，那就不能不惊叹水的这种威力。一切矿物成分都溶于水，当水中含有二氧化碳时，它的溶解能力还可大大增加，每年通过水所溶解的化学元素，流入海洋去的数量是相当可观的。至于空气的化学风化作用，特别是当其中含有某些物质时，也是很强烈的，植物通过根系及其它部分的生化作用，其化学风化的效应也是显而易见的。

从化学风化的观点出发，二氧化硫是最重要的污染物质，它在空气中的浓度在城市要比在乡村高的多。正常状态下，大气中的二氧化硫数量并不太大，可是人类活动如矿物燃料的燃烧，在局部地区能够使其数量急剧增加。它随着空气漂移很远。近来已经证明，瑞典一些建筑物的被损毁，归因于远距离的英国、西德鲁尔工业区和捷克斯洛伐克等地二氧化硫的作用，这就是西欧惊呼的“酸性雨”。

二氧化硫，是可溶性的，而且其溶解度与大气中二氧化硫的浓度有直接关系。当其溶于水时形成了弱酸，可与许多材料发生化学反应。它以两种方式进行化学风化，一是直接地促进了化学风化，二是可导致盐的生成，而后者对于化学风化更为重要。

空气中的二氧化碳亦可与水结合形成弱酸，起到化学风化作用。

培尔特 (Peltier) 曾使用了简单的气候因子，如年平均温度和年平均降水，作为对于风化作用的控制因子，去考虑世界范围的风化过程强度。下图就指出了他的一般分类图。(图 5.8)

地球的表面，时时处处都经受着风化作用，使大块岩石变为小块，使岩石结构解体，由稳定变化到不稳定。风化所产生的细碎的疏松物质，通过另外形式的外力输送到低处（当然还要伴随着重力），最终沉积到海洋，成为整个地质循环的一个组成部分。不言而喻，它也是这个循环中变化速率最快的一个部分。从自然地理系统去认识，外力的风化作用与传

系统变量	环境变量
风化过程	气候特征
传输过程	地质条件
沉积物通量	地形与坡度
溶质的浓度	植被状况
沉积物性质	构造活动程度

溶质的性质	
沉积物的贮存	
水的流量	
逐日之天气	

输作用，可以用一些变量表示出来。这些变量分别可以归属为系统变量与环境变量两大类，针对着沉积物的运动过程，从而把外力作用与构造力作用有机地联系在一起。

如果将这些变量表示在图上，它们之间的因果关系，组成了一个复杂的结构网络（图 5.9）。

总之，目前对于外作用力的各种形式及其综合作用结果，还未总结出比较严密的规律。

第五节 地球转动所产生的力

地球转动的角速度在 24 小时内，各处都是相同的。瑞士的著名数学家 L. 尤拉 (Euler) 约在二百多年前就指出，球体表面上任何一种移动，都可以被看作是一种绕轴的旋转。地球的旋转就是这样一种运动，它有一根假想的由南极到北极的轴。在绕轴旋转中，各处的线速度均不相同，在赤道最大，而在两极处为零。

注意到这种现象并探索它对地表运动物体产生影响的，首推科里奥利 (Coriolis)，他是法国的一位工程师。在 1835 年，他感到地球的这种自转特性，必然使得在地球表面上的任何物体，当其移动时要发生方向上的偏离。移动的物体在地球表面上被一个假想的力所作用，并且与该物体的运动速度成比例。又由于地球运动时线速度各处不等的缘故，这个假想的力又与地球表面上的纬度有关系。人们把这个假想的力叫做“地转偏向力”。

地转偏向力的基本描述是：运动的物体在北半球向右偏（顺时针）、在南半球则向左偏（反时针）。而且这个偏向力在赤道为零，在两极时最大。

地转偏向力（每单位质量）可以表示为：

$2 V \sin \theta$ 此处： ω ——旋转之角速度（ $15^\circ / \text{时}$ 或 $2\pi / 24$ ，地球的角速度 $= 7.29 \times 10^{-5}$ 弧度 / 秒）； θ ——纬度； V ——物体的运动速度。其中 $2 \sin \theta$ 即称为科里奥利参数，用 f 来表示。

地转偏向力的大小正比于：（1）空气运动的水平速度（亦即空气移动为 11 米 / 秒·时，仅仅为同一地点移动为 22 米 / 秒所经受偏向力的一半）；（2）地理纬度的正弦值（即 $\sin 0^\circ = 0$ ，代表在赤道上； $\sin 90^\circ = 1$ ，代表在两极）。 f 随地理纬度变化的数值如下：

纬度	0°	10°	20°	43°	90°
f	0	0.25	0.50	1.00	1.458

由于地转偏向力对于大气的运动作用很大，研究大气环流必然涉及到它；此外，它也控制着每一个潮汐性的或非潮汐性的洋流，这样对在自然地理面中物质与能量的传输，不能不起着一定的重要作用，在弹道及人造卫星轨道计算中，也要考虑它的影响。

令人惊异的是，许多种鸟类、蜜蜂和其它动物；可以感知地转偏向力，并利用它（当然还须伴随着太阳高度，日长等其它因子）去寻找远距离的目标。回游的鱼和迁徙的鸟，在其幼小时所作的的第一次远距旅行，即使没有成年动物的带领，亦可准确无误地到达几千公里以外的地方。这里我们还可举出一个显著的例子，用以说明地转偏向力对于自然地理系统中物质能量传输中的影响来。

在北半球，有两支著名的暖流，一支是墨西哥湾流，一支是太平洋西岸的黑潮。它们在从低纬流向高纬时，由于地转偏向力的作用，均是由西南向东北方向运行。这样墨西哥湾流的矛头就指向北欧的沿岸，给这里提供了大量的能量。据估算，湾流每年供给北欧每厘米长度海岸线上的热量，大约相当于 600 吨煤燃烧时所放出的热量。使得欧洲西北部的气温，冬季明显的比同纬度其它地区高出约 16—20 $^\circ\text{C}$ 。而黑潮由于偏向力作用，则离开我国沿岸的方向向东北运行，于是我国沿岸得不到这种额外的能量补偿。这样，除了其它原因外，它也就成为我国冬季气温在同纬度最低的原因之一。由此也就带来了特定的与北欧不同的自然地理面貌。

据林之光报道，黑龙江省的呼玛县县城，与英国伦敦所处纬度相近，伦敦一月份平均气温是 3.7℃，冬草长青，与我国上海，杭州的温度相似，但呼玛俨如极地风光，一月份平均气温竟达零下 27.8℃，两地相差 30℃ 以上。再如天津市的纬度与葡萄牙首都里斯本相近，天津一月份平均气温是零下 4.1℃，极端最低温度为零下 22.9℃；而里斯本一月份平均气温 9.2℃，极端最低气温只是零下 1.7℃。当然，我国的冬季气温突出地低于同纬度其它地区，（北京一月份平均气温零下 4.7℃，而处于北京同纬圈平均气温为 6℃），并不仅仅是洋流的偏向这一项原因造成的，但从上面数字对比来看，不能不看到它在其中所表现出的巨大作用来。至于地转偏向力在河流流动时的作用，也有不少这方面的研究。总之，在分析自然地理面中力的作用时，由于地球运动而致的地转偏向力，也是不容忽略的。

地球转动除了产生地转偏向力之外，还有摩擦力、离心力以及相应的离极力，此处就不加详述了。

第六节 在微观范围中力的表现

以上我们所看到力的表现，均是在宏观的范围内。但是随着自然地理研究的深入，对于在微观范围中力的表现，也要求我们逐步地去熟悉，并具备这方面的基本知识。所谓微观只是相对而言，自然地理中并无明确地划分。我们一般把处于分子水平或者近似于这个水平，并对自然地理面中有着积极作用的那些力，看做我们要讨论的对象。

在这种水平上力的表现，主要区分为物理上、化学上及生物上的不同范畴。一般自然地理工作者，对此比较生疏，这些力在自然地理中的实际用途也不大清楚，我们也不可能系统地加以全面介绍，仅举几个例子作为说明：著名的物理学家麦克斯韦根据他的电磁波理论，指出了光压的必然性。并且计算出，在晴天时，太阳光照射在完全涂黑的物体表面上的压力大约为每平方米 0.4 毫克。对于普通的光源来说，它的光压就更加小得难以辨识。例如把 100 瓦的电灯所发出的全部光能集中在一平方厘米的小面积上，那么其上所受到的总压力也只有 3% 达因。达因是力的一个普通单位，一达因的力极小，一只蚂蚁在拖东西时用的力还比一达因大的多。利用近代更完善的高真空技术，重复进行了这种显示光压的实验，再一次光辉地证实了麦克斯韦的学说，实验结果与麦克斯韦的理论计算值只差 2%。光压力在自然地理面中的实质性作用，现在还看不出来，但它在进行高精度的测量定位时，那就应当加以考虑了。近几年，日本学者应用几种激光应变仪，测定地表两点间的相对位移。1978 年，在长野市松代地震观测所的地下坑道里，用臂长达 25 米的激光干涉仪，记录了由于地球潮汐和气压变动引起的 10^{-8} 数量级的地壳应变。在这种精密测定中，才有必要考虑到那种微小的光压。在一般的宏观分析中，人们绝对没有必要去估算它的作用。

我们再来观察一下细小的土粒。土粒表面是由具游离价的原子或离子组成的，这样它就必然具有静电引力。这个静电引力在研究自然地理面中水分的运动、化学元素特别是植物营养元素的迁移等都是很有价值的。土粒附近所形成的这个静电引力场，可对有关物质发生作用。如水分子是偶极体，它就能被土粒的静电引力所吸附。因此，土壤中有一部分水分基本上很难参加水分循环，这一部分的数量就取决于静电的吸附力。靠近土粒表面时，水分子失去了自由活动的的能力，形成有规律的排列，一般称这部分水为结合水。不可小视这种力的作用，它使得水的性质有某种巨大的改变。我们知道，在正常条件下，液态的水在 0 时冻结，变成固体的冰。但对结合水来说，在冻结时除开要具备普通水冻结时的基本条件外，尚须克服土粒表面对这部分水的静电引力，甚至在 -78 的温度时，强结合水也不冻结，从而形成过冷水。这种结合水，不仅难于参加水的循环，也无法为植物生长所利用。因此，这种微观力对于物质能量的交换来说，在某些方面同样是不可忽视的。土粒表面这种吸附别种分子的能力，人们称之为表面能，表面能越大，它的吸附作用也越强。就如水库设计中的“死库容”一样，吸附水的份量越多，显然对于水分及化学元素的循环是不利的。在其它条件相同时，表面能与土壤颗粒表面成正比，颗粒的粒径愈小，所具有的表面能越大。明白了这个原理，对于改良土壤，充分利用水分和养分、评价地区的自然条件等，都是十分有用的。

另外我们知道，地面接受了太阳辐射能之后，必然致使地中热通量增大，

也使得地温相应地升高。这种温度的升高，又引起了土壤中水分的相应变化。变化的宏观效应我们一般是了解的，但是微观效应往往不清楚。其中的一个变化是水的粘度减小。水的粘度系数（用 τ 来代表）随着温度（ T ）的增高而减小，它们之间的关系为：

$$\tau = \frac{\eta_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad (5.18)$$

式中的 η_0 为温度 0 时水的粘度值， α 及 β 分别为常数。温度升高，粘度减小，水分运动的阻力相应也就变小，则水的扩散速度必然相应加快。同时，温度既然可以看做是平均动能状况的标志，那么随着土壤温度的升高，分子热运动亦加强，克服土壤中静电引力的能力亦变大，这就促进了水及其他物质的扩散速度，有利于能量和物质交换。

在研究地表物质的移动、输送、交换与积累中，除了研究土壤水、土壤中各种养分元素及微量元素的动态变化外，还要研究生物量的积累与分解，表面分散现象等，这些现象也要涉及到微观力的作用。对此，不一定都要求自然地理工作者逐一地亲自去实验，但要求我们掌握它，并且在分析问题时尽量能够运用它。

第六章 自然地理分析

自然地理分析的目的，在于把复杂的自然地理过程和自然地理现象，通过实验、假说、推理或验证的方式等，揭示它们的本质和内在联系，合理地解释它们已发生过的历程，并能比较准确地预测其未来发展的方向。要想达到这样的目的，不少自然地理学家们作过各种途径的尝试。

现代自然地理学要求能更精确地和更定量化的去实现这种寻求机制的要求。因此，它的一个必然结果就是要建立“数学模式”，以便能更深刻、更完整地去表达那种广泛而复杂的关系。下图是建立数学模式方法的略图。

自然地理中，我们普遍遇到的是多变量分析，而且一般均属于统计数学的范畴，这就要求人们除了获得丰富的专业经验外，还须进一步掌握诸如多元回归分析、趋势面分析、主成分分析、判别分析、聚类分析、系统分析等一系列手段。这些手段在其它学科中已经有了成功的应用，推进了这些学科的发展，但在自然地理学及其有关分支中，上述方法和手段的应用还仅仅在开始，许多方面尚属空白。有鉴于此，我们在本章中，只能针对自然地理领域中的现状，举出一些比较零碎的事例，用以说明。

第一节 指标分析

自然地理面的极其复杂性，形成了对其进行定量表达时的巨大障碍。从很早开始，一些地理学家们，总是企图从各方面选用一些简单的数量指标，去划定地球表面上各类自然区域的空间或界限，进而探讨这些指标的内在本质及其在地球上分布的空间规律。对于自然地理学科的发展来说，应当肯定这种尝试的功绩，这是由现象描述到本质揭露的一大进步。而且这些数量指标有一个共同的特点，就是尽可能地去寻找那些可以反映自然地理过程的基本因素，并把它们纳入考虑之中。这些基本因素经过长期的探求，已逐步为我们所认识。正如俄国的道库恰也夫，在 1900 年的著作中曾确定的：地理带的分布，在很大程度上受气候因子决定，并且，特别决定于气候的湿润条件。

后来苏联地理学家李赫捷尔曾认为：地方的自然条件取决于地理位置、形态结构、所收入的能量以及热量与水分的对比关系。这些因素决定着该地的气候过程、地貌过程、土壤过程、生物过程。所有这些决定自然条件的要素，是在统一的时间内互相作用着的，但是，每种要素在自然环境特点的空间分布规律方面，都有一定的反映。

看来，他们都想深入地抽象出某种要素，以表达自然地理有关空间分布、区域特征及人地关系的规律性。在道库恰也夫的著述中，曾对主要的地理带确定了降水与可能蒸发间的相互关系。不管他是否意识到，这就是输入自然地理系统中能量（其中绝大部分以热的形式）及物质（可以认为是水）的分配、组合乃至互相转换等规律的体现，但我们不能不认为，在其后各种地理指标的出现，均是循着这一基本方向前进的。这种指标的基本表达形式可概括归纳为：

$$q_1 = \frac{f(R)}{\phi(W)} \quad (6.1)$$

q_1 ——表示各种类型的地理指标； $f(R)$ ——表示为能量的函数； (W) ——表示为有关的水分函数。在具体的表达中，有的简单，有的复杂；有的明显，有的隐晦，但都不外乎是上式的引伸或变型。

这些建立指标的作者们，有一个中心思想，那就是在每个不同的自然地理区域中，其能量状况与水分状况的组合，有其自身的独特反映，从而可以比较简单比较明白地去识别这些区域的基本特征与空间分布。美国的库克（R. U. Cooke, 1977 年）等也主张：“人们企图去标识某个单一过程或过程组合的空间变化。这种努力一般使用了由气候统计分析中所获得的定量参数，去表述该过程的依存关系”。他赞同使用温度条件（作为能量的标志）和水分的有效性（作为水分条件）作为两个主要的控制因子。这与式（6.1）的基本思想是一致的。

但是从另外一个方面看，运用地理指标分析也有许多致命的弱点。其一，过于简单，过于粗略，不能完整地表达实际的地理内容；其二，它们仅仅是一种静止的平均性状的描述，不具备动态的，即随时间演化的特性，因而无法刻划运动的状态和发展的趋势；其三，在区域与区域之间的交接处，运用地理指标去判定它们的分界是无能为力的，有时甚至得出违反地理事实的结论；其四，缺乏严格的数学及物理学的分析，因而这些指标仅能说是文字描述的另一表达方式而已。既不可预测，又不能模拟，因此它们还远未达到精确体现规律的门槛。

有鉴于此，当讨论所谓的指标分析时，应当具有比较清醒的认识。但是，这些内在的缺陷，不应当掩蔽它在地理学发展上的作用和地位。

奥里杰柯柏 (Orland, 1911 年)，第一次广泛地应用了空气饱和差资料，研究它作为地理指标的可能。他使用了 r 与 E_0 之比，作为一个湿润指数。其中 r 表示降水，而 E_0 表示潜在蒸发量，并且采取 $E_0=ad$ 这个经验公式，以便确定潜在蒸发， d 为空气饱和差，而 a 为一个比例系数。根据他的研究，系数 a 的大小，对于夏半球来说等于 22.7，对于冬半球来说等于 16，其年平均值等于 19.3。

而朗 (Lang) 在 1926 年，提出了另外一个方案，他采用：

$$q = \frac{\text{年降水(毫米)}}{\text{年平均温度()}} \quad (6.2)$$

并把此称之为“降雨因子”指数。他对照地理事实后，发现这个指数和土壤的灰化作用关系密切。作为例子，对下述的土壤类型作出了相应的评价：

土壤类型	q 之范围 (毫米/)
盐土	< 40
红壤、黄壤和砖红壤	40—60
棕壤	60—100
黑钙土	100—160
灰壤	> 160

但是当年平均温度等于 0 时，则此指数立即得出了不合理的结论。

以后奥尔凯斯 (Oelkers, 1930 年及 1937 年) 稍微修正了他的形式，变为：

$$q = \frac{\text{植物生长季节内的降水}}{\text{植物生长季节内的平均温度}} \quad (6.3)$$

该表达式仍然也是不尽合理的，因为作为植物而言，它肯定地要利用冬季当中土壤所蓄积的水分，所以它的不合理程度在大陆性气候当中表现的尤为显著。上述两个指标 (6.2 及 6.3) 对于低温时，都得出了极不寻常的高数值来。177

第马东 (DeMartonn)，1926 年提出，后来在 1959 年又被都拜乌迈尔 (Daubeumire) 所引用的指标，为了避免这种缺陷，采用了在年平均温度数值上加某一个常数的方法得出：

$$q = \frac{\text{年降水量}}{\text{年平均温度} + 10} \quad (6.4)$$

并且称 q 为“干燥指数”。其显著之点是，在瑞典这个指数与树木分布的边界相当吻合。

瑞茨 [(Reichel)，在 1951 年又被加敏斯基 (Guminski) 所引用] 又对上式进行了改正，修改后其形式为：

$$q = \left(\frac{\text{年降水量}}{\text{年平均温度} + 10} \right) \left(\frac{n}{180} \right) \quad (6.5)$$

此处的 n 为降水大于 1 毫米的天数，在德国 $n=180$ 。瑞茨的改正公式中，引进的 $(n/180)$ 这一项，具有某种实质上的意义，即在该公式中，降水的特性不仅仅只表现于总量上，而且也表现在它的强度上，因而对于实际状况的描述来说，无疑是重要的。

后来温克 (Weck, 1960 年) 将瑞茨的指数改写为下面的形式：

$$q = \frac{p_3 \cdot n_3 \cdot (I_0 - 60)}{(t_3 + 10) \cdot 92} \quad (6.6)$$

p_3 代表 5—7 月期间的降水量 (毫米)； n_3 为 5—7 月期间降水大于 0.1 毫米的日数； I_0 为一年内无霜期日数； t_3 为 5—7 月期间的平均温度 ()。温克发现在中欧的气候条件下，(6.6) 所规定的指数与管理森林的年平均木材蓄积量成比例。

在美国和澳大利亚，迈耶尔 (Meyer) 的公式曾经被广泛应用：

$$q = \frac{P}{\rho' - \rho} \quad (6.7)$$

P 为年降水量； ρ' 为给定温度时的饱和水汽压； ρ 为实际的水汽压。

维索茨基 (Vysockiy, 1905 年；后被卡列斯尼克于 1947 年引用) 提出了这样的指数：

$$q = \frac{P}{E_0} \quad (6.8)$$

即降水 (P) 与蒸发力 (E_0) 之比。它在欧洲和亚洲，应用了很长的时间，由于分子分母具有相同的量纲，因此 q 就成为一个无因次量。在欧亚大陆，具有如下的规律：

地理地带	q 的数值
冬季占优势地位的森林	> 1.3
草原之中部	0.67
草原与荒漠之交界	0.3

伊万诺夫 (Ivanov, 1954 年) 建议采用另外的经验公式，即使用月空气蒸发能力来表示：

$$E_0 = 0.18(t_m + 25)^2 \left(1 - \frac{I_m}{100}\right) \quad (6.9)$$

t_m 为月平均温度 ()； I_m 为月平均相对空气湿度 (%)，这样维索茨基的公式就成为：

$$q = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \frac{P_m}{0.18 + (t_m + 25)^2 \cdot \left(1 - \frac{I_m}{100}\right)} \quad (6.10)$$

P_m 是对于第 m 月的总降水量 (毫米)， I_m 为在 m 月的平均空气相对湿度，由干湿球温度计的测量数值进行计算。

由于蒸发力 (如果不严格的话，可以与潜在蒸发等同起来) 及实际蒸发在近几十年内，成为研究热量与水分平衡的核心问题之一，出现了计算蒸发方面并行的几十种方法，一般的经验公式逐渐弃之不用，代之而流行的是物理意义明确、实验基础坚实、观测仪器先进的各种理论与半理论计算方法，这些公式已使得蒸发的研究进入新阶段，并取得长足的进步，绝非如曾在地理指标中所采用的经验公式可比拟。但在这里，我们并不去注重求取这些数值的精确方法，而只在于理解它们所表达的基本物理意义。

此外，谢梁尼诺夫还提出了 ($P / 0.18$) 的指标，其中 为高于 10 的积温，而 P 为降水量。

美国著名地理学家和气候学家桑斯威特 (Thorntwaite) 提出他的分类指标是：

$$q = 100 \left(\frac{P}{E_0} - 1 \right) \quad (6.11)$$

P 为年降水量，E₀ 为潜在蒸发量。以下列出该指标的地理意义（见表 6.1）。

以后，人们渐渐地不满足于这些简单的指标，希望探讨出

表 6.1 不同类型的指标数值

类型	指标数值
过分湿润	100
润湿 (1)	80—100
湿润 (2)	60—80
湿润 (3)	40—60
湿润 (4)	20—40
偏湿	0—20
偏干	-33.3—0
半干燥	-66.7—-33.3
干燥	-100—-66.7

更具有自然地理本质的表达形式。在六十年代初，苏联地理学家格里高里耶夫和著名学者布德科合作，共同创立了所谓的“辐射干燥指数”，其表达形式为：

$$q = \frac{R}{LP} \quad (6.12)$$

其中 R 为太阳净辐射；L 为蒸发潜热；P 为降水量。其物理含意标志着一地所收入的净能量用于蒸发掉降水量的程度。它的导出，完全是利用简单的热量平衡方程与水分平衡方程得出的。

美国的莱图 (Lettau) 在 1969 年，对于辐射干燥指数给予了很大的重视，他建立了 q 与 C (C 称之为径流比，即径流量对降水量之比) 之间的关系，通过对于实际的降水、径流和净辐射资料的分析（均取自较大流域面积中），得出了最简单的数学形式：

$$C = 1 - \tanh q \quad (6.13)$$

其中的 tanh 为双曲线正切。应注意到，这不可能使用在年平均净辐射值为负值的区域中，即 q 不能为 0；同样 C 也不可能大于 1（即径流量不可能超过降水量），C 只有在极端湿润的地方才能接近 1。而当 q 成为很大时（如在极端干旱区内，P 很小而 R 很大，必然导致 q 很大），C 则接近于 0。这样，q 与 C 之间的关系，通过计算可以定量地表达出来。这些数值在表 6.2 中被标识出来：

表 6.2 辐射干燥指数 q 与 C 之关系

q	0.00	0.20	0.50	0.7	0.80	0.90	1.00
:				0			
C	1.00	0.80	0.54	0.4	0.34	0.28	0.24
:				0			
q	1.50	2.00	3.00	5.0			

:				0			
C	0.10	0.04	0.005	0			
:							

格里高里耶夫和布德科，还使用了“辐射干燥指数”与太阳净辐射这两组对应数值，表达了地理地带性规律，由于结果比较完美并能重复推移显现，他们称之为“自然地理地带周期性规律”，简略地表示在图 6.2 中。

由于辐射干燥指数的指标，无论从物理含义上，还是在实际的使用上，都具有许多优点，因此应用它，可以说明地理分布的一些特点。通过作者对于我国资料的整理和分析，首先将 R/LP 的数值，沿东部季风区的京广一线，按纬度高低列出其分布，如图 6.3 所示。

对于自然地表来说， $R/LP=1$ 时，即收入的净能量恰好将该地区的降水全部蒸发掉，此时的生物生长发育最为有利。

而从图 6.3 中看出， R/LP 为 1 的地区，相当于武汉与信阳之间的区域，说明这里的热量水分状况比较适中，热水条件的组合比别处优越，事实证明，这个判断是正确的。从京广沿线的土壤所含有有机质的分布规律（图 6.4）、土壤之 pH 值分布规律（图 6.5）以及与 1957 年京广沿线各县粮食作物年平均亩产量的分布规律，（图 6.6），均令人惊异地与 R/LP 分布相一致。当然粮食作物亩产量并不能完全反映自然条件，其中很大一部分取决于人类的活动。但在 1957 年，在人类控制自然的手段还比较差的时候，用其反映自然条件优劣的可能性就更大一些。

一般来说，在最优的热、水条件下，土壤的酸碱度（pH）能保持在中性 7 左右。这个数值恰好出现在湖北省的孝感和河南省信阳，正是 $R/LP=1$ 的地区。向南，随着自然降水的加多，土壤的淋溶作用加强，加之温度较高，势必增加了酸性；相对而言，在河南省的信阳以北地区，降水较少，出现干旱，则土壤的碱性加强。由以上四个图叠置起来逐一对比，就可知道，它们所表现出来的惊人相似性，并不是偶合的，而是由其自然地理本质所决定的。

同样，作者根据自然地理地带周期性规律，结合中国自然区划，应用净辐射值（ R ）与辐射干燥指数（ R/LP ），作了数量表达。其综合结果参看表 6.3。所得的结论，基本上证明了该规律对自然地理特征的反映是比较正确的。尽管对于复杂状况来说，不可避免地在数值上出现重叠，并且分划也不精密，但仍不失为表达地理现象空间分布的较好指标之一。

后来，苏联的德罗兹多夫（Drozdov，1971 年）又在布德科等人的基础上作了进一步的研究。并以生物的年净生产能力（吨/公顷），与净辐射值（ R ）、辐射干燥指数（ R/LP ）二者作了对比，提出了一个很有意义的相关问题。他认为，原先格里高里耶夫和布德科，选择辐射干燥指数 $R/LP=1$ 为生物生长最优的环境，这是不够确切的。他认为最高的生长量是在 R/LP 稍小于 1 时得到的。但从本质上来看，他并不否认原先的结论，只是认为不够精确罢了。德罗兹多夫选择在辐射干燥指数为 0.4—1.4 范围（即较好的水分条件，很清楚仍是围绕着 $R/LP=1$ ），得出了年净辐射值（千卡/厘米²）和

年净生产量（吨 / 公顷）之间的如下关系：

年净辐射值	年净生产量	能量转换率（%）
15	2	0.6
30	8	1.2
45	14	1.4
60	21	1.6
75	29	1.8

其中能量转换率的计算是按照：生物干物质的含能数量为 4.5 千卡 / 克。事实证明，他关于净生产量的计算以及能量转换率的计算是粗浅的，理论基础亦不够坚实。

最近胡斯（Husz，1978 年），在研究南美洲的农业系统时，提出了一个叫做“土壤质量指数”的指标，他用 Q_s 作为土壤质量指数的符号，采取了土壤中阳离子交换能力饱和度为主要的变量，分别对于砂土、粘土、砂壤土和壤土，作了如下的经验方程：

$$\left. \begin{aligned} Q_s(\text{砂}) &= 0.0051 + 0.0079x - 0.000040x^2 \\ Q_s(\text{砂壤}) &= 0.0037 + 0.0142x - 0.000058x^2 \\ Q_s(\text{壤}) &= 0.0085 + 0.0162x - 0.000063x^2 \\ Q_s(\text{粘}) &= 0.0036 + 0.0116x - 0.000047x^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

此处的 x 代表阳离子饱和度（%），由此获得一组曲线（见图 6.7）：

图 6.7 土壤质量指标 Q_s 与土壤结构、阳离子交换能力之关系在进行了资料分析后，他作出了南美洲土壤质量指数分布图（图 6.8），成为又一种类型的地理指标。

以上我们摘要地阐述了有关地理指标分析的一般状况。自从六十年代之后，这种企图采用地理指标的研究势头，逐渐跌落下来。这一方面反映了它本身所具有的弱点，另一方面人们的研究方向逐渐转移到更加精巧的地理分析上。这些地理指标确曾在自然地理区域的划分上，起过一定的重要作用，现在也还不能预言，它会立即丧失自己的价值。但有一点必须指出，地理指标分析要想另辟蹊径，就必须注入新的血液，以求更深刻、更连续地反映自然地理本质，同时，也要有更加精严的表达形式，以便把这种比较原始的指标分析方法，纳入更加深入的理论研究领域中去。

第二节 点的空间分析

自然界中有许多现象，在规定的条件下必然发生。例如纯水在标准大气压、温度为 100 时，就要汽化；导体的两端如有电动势差存在，则必有电流通过等。这种在一定条件下必然发生的现象，称做“必然事件”。在一定条件下必然不能发生的事件（如必然事件的反面），称为“不可能事件”。但是也有许多现象，在一定条件下，可能发生，也可能不发生，这种现象称之为“随机现象”。自然地理中，随机现象的普遍存在，是它的又一类特点。水分对于自然地理系统的输入问题就是一例。我们可以说某一个流域的年降水量为 800—1000 毫米，但要准确地说出未来年份中完全符合实际的降水数值来，却并不容易，这些就应当看作是在相应条件下的随机事件。

在观察某一随机事件时，设共进行 n 次试验，其中事件 A 发生了 m 次，则 m/n 称做事件 A 发生的频率。随着试验重复次数的增加，频率稳定在一些数值附近的趋势越来越显著。这就是频率具有稳定性的重要事实。

我们在应用气象资料、水文资料时，都希望观测的年限愈久愈好，就是说年限较长的试验资料，从中所得到的概率更接近于对事件发生可能性的度量。而必然事件和不可能事件，也可以看作是随机事件中的特例，在重复试验中，必然事件的频率永远为 1，不可能事件的频率永远为 0。随机事件在自然地理中处处可见，如地表面上海拔高度的分布状况，岩石风化中的颗粒粒级组成，一个区域中某个植物种的发生地点，河流的流量变化，地球上的初始生产力数值等，均可以认为是随机发生的事件。为了帮助掌握这种分析的工具，我们将以点的空间分布为例，加以说明。因为在自然地理分析中，许多现象和地域，均可用点来做为代表，这些点的空间分布特征与规律，将最终反映它所代表的自然地理现象及地域的空间分布。由此推及到线与面的空间分布规律。

随机分布的性质尚未得到清楚的阐明。如果说，在这样的一种分布里，一定面积上的某一处，发现某一特定个体（或事件）的可能性（亦称或然率），对于该面积上所有其它各处来说，机会都是相同的，我们说这种分布就叫随机分布。其中一个点与另一个点，既不互相吸引，也不互相排斥，如下图就是一个正方形中点的随机分布图式。（图 6.9）

如上述，怎样表达随机分布中，密度与频率之间的关系呢？概率论可以回答该问题。其中的特例之一，前人已经证明，得出了著名的泊松（Poisson）方程，其基本表达形式为：一个面积为 A 的空间，其中包括着 n 个个体，我们用某个特定面积（或称样方）在 A 中取样，如果这 n 个个体是随机分布时，则一个样方 a 中包括 0 个、1 个、2 个... n 个个体的机率为：

$$e^{-ax}, axe^{-ax}, \frac{(ax)^2}{2!}e^{-ax}, \frac{(ax)^3}{3!}e^{-ax}, \dots, \frac{(ax)^n}{n!}e^{-ax} \quad (6.15)$$

其中 ax 为每个样方中个体的平均数。 $x=n/A$ ，是个体的密度（关于泊松方程的推导，请参看附录 2）。

泊松方程所表征的随机分布模型如下（图 6.10）。其中状态 0 代表样方中不包括任何个体的状况，设由 100 个样方单位组成的面积上，有 20 个点，若点的空间分布如图 6.10B 所示。那样，则其为泊松分布。其中 λ 表示转换率。

通过相应的计算，即可求出在各类状态下所发生的频率来。

点的空间分布，如果不是如上述的随机分布时，即不按照泊松分布时，则它们的分布必然呈现出两种趋势与这种随机分布相背离。一是向着均匀分布，亦可理解为沿着比随机分布更加分散的方向去分布；另外一种趋势是向着集簇分布亦可理解为比随机分布更加聚合的方向分布。这对我们处理自然地理中各类事件的空间分布，提供了极为有用的手段。例如在果园中果树的分布，它经过人为有意识的栽种，并不呈随机分布，而是按照规定好的株距和行距进行布置，这时所构成的果树个体，其空间分布必然趋向于均匀分布，亦即分散的方向；在另一类情况下，如火山、温泉、地热、矿床等的分布，以及某种类型的盐湖的分布、山脉的分布等，则因特殊条件的限制，呈现不同程度集簇分布亦即聚合方向分布。尽管它们并不遵从泊松方程规定的随机分布模型，但其空间分布的格局，均可由基础的泊松分布演化出来。

这里我们要引出“近邻分析”的基本概念。假定，已经测定出在给定的模型中，各个点与其最近点之间的距离是 d ，最后我们取所有这些距离的平均，即可得出一个数值 \bar{d}_a 。 \bar{d}_a 的数值，部分地取决于所研究面积的大小和测量时所用的单位如何。

从前面的叙述中知道，一个随机过程可以用泊松分布函数去表达。我们应用近邻分析，对一个普通的随机分布模型，首先去获取点在这种状况下的平均距离（即理想的随机分布平均距离），用符号 \bar{d}_c 表示：

$$\bar{d}_c = \frac{1}{2\sqrt{n/A}} \quad (6.16)$$

n 是个体的数目即点数； A 为 n 个点随机分布所占据的总面积。

接着就来讨论对于随机分布的两种趋势背离。这里应用一个名叫“ R 尺度”的概念，作为衡量对随机分布背离的标准。对于任何类型点的空间分布，都可获得一个实际的平均距离 \bar{d}_a ，又可以计算出在随机状况下其理想的平均距离 \bar{d}_c （即按式 6.16），这两个指标之间的差异，将会清楚地反映出点的实际空间分布模式对于随机分布之背离程度。这就是所谓的 R 尺度，将它表达成：

$$R = \frac{\bar{d}_a}{\bar{d}_c} \quad (6.17)$$

如果 $R = 1$ ，则意味着 $\bar{d}_a = \bar{d}_c$ ，即说明点的实际空间分布与随机分布相符，这种实际的空间分布就是泊松方程所规定的随机分布。如果 $R < 1$ ，则点的空间分布，相对随机分布来说更趋于聚合和集簇； $R > 1$ ，则点的空间分布，相对于随机分布来说更趋于分散和均匀。

因此，采用这个精确的指标 R ，其优点在于：可以把要讨论的点的空间分布图式，放在一个从集簇的、通过随机的一直到均匀分布这个连续的广阔的定量范围之内，此尺度从 0 到 2.149。另一方面，对于一个固定的地域来说，点的空间分布随时间的变化，亦可通过 R 尺度分析去判别，其空间分布比原先的是更趋于聚合呢？还是更趋于分散？并且定量地表达出其聚合或分散的程度。

至于 R 尺度中的数值 0，代表在其中的 $\bar{d}_a = 0$ ，它即意味着点与点之间的距离为 0，也就是说这些点的分布集中在一个点上而没有占据分布空

间，或者也可以说它们均在一个点上进行重复，成为集簇分布的一个极端，大于1的R值，根据所取数值不同，代表着各种不同的分散程度，从一个平方分布的规则模型中，产生了R=2的结果，而基于一个三角形网络的特殊规律分布模型中，产生了R=2.149的结果。

一般说来，R的数值小于1时，点的空间分布倾向于集簇；而当R大于1时，点的空间分布倾向于规律性的分散，我们可以从一个系列图上，清晰地看出R数值的连续变化及其变化时所对应的点的空间分布。这种规律性的反映对于实际应用是极有价值的。在该图中（图6.11），每个模型仅仅有10个点分布在相同的面积上，如此可以更加精确地评估不同的R数值所对应的实际分布，即分散—随机—集簇的连续过渡。在大部分点的空间分析中，R的数值一般都在0.33—1.67之间。

自然地理的空间分析，并不只是这种静态的点的空间分布，所面对的现实是复杂多变的。因此，处理它们的方法必然也不会是单一的，本节只是介绍一种点的空间分布的定量表达方法。这种方法也还有待于进一步的发展。在此，我们举出点的空间分析在自然地理研究中的具体应用：

例子中选择北纬31度左右一线，从上海、芜湖、霍山、钟祥、开县、小金、昌都、班戈湖一条从东到西的剖面，约跨过三十个经度。取以上各点的多年降水资料，作为点的空间分析对象。目的是为了得出各月降水在全年降水中的比重，把它化为面积为A的12个样方，每个样方代表一个月。而后将各点的降水资料进行标准化处理，以建立它们之间的等效性和可比性。并把相当于月平均降水量的倍数，处理为该月对全年降水所贡献的点数。以上八个地点的资料，在化为点子后，其空间分布形式，如图6.12所示：

据R尺度分析，首先算出泊松分布时的理想平均距离为：

$$\bar{d}_e = \frac{1}{2\sqrt{n/A}}$$

因为面积A取作12，点数n也取作12，则 \bar{d}_e 经计算后得出为0.5。

其次我们再算出这些点中每一个的实际平均距离 \bar{d}_a ，其简化计算方法为：首先取各点间的饱和间隔数=17，而后根据图6.13中实际点的分布，得出点间的实际间隔数，与饱和间隔数作比率，求出 \bar{d}_a 。计算结果，各个点的 \bar{d}_a 分别为：上海 \bar{d}_a （0.88）、芜湖（0.76）、霍山（0.76）、钟祥（0.65）、开县（0.53）、小金（0.47）、昌都（0.35）、班戈湖（0.35）。而后，

地点	上海	芜湖	霍山	钟祥	开县	小金	昌都	班戈湖
R值	1.76	1.52	1.5	1.30	1.06	0.94	0.70	0.70

由式（6.17） $R = \bar{d}_a / \bar{d}_e$ ，得出各点的R值：

由图6.17和R值来分析，可得出以下几个结论：

1. 年降水的月分配，由东向西呈规律性的变化。从点的空间分布特征看，

上海分布最均匀， $R=1.76$ ，班戈湖最为聚合， $R=0.70$ 。

2. 在开县附近，年降水的月分配，近似于泊松方程的随机分布。由开县向东， R 值越来越大，月分配越来越均匀；由开县向西， R 值越来越小，月分配越来越集中。

3. 点的空间分布，反映了在北纬 31 度左右，自东向西的自然地理特征，由于距海的远近不同，季风影响的强弱不同，年降水中的各月分配，越来越不均匀，最后到达青藏高原的班戈湖，则降雨的季节性更为明显。这种有规律的演变，说明了许多自然地理因素的综合影响。

4. 点的空间分布之集、散程度，均可以用数值标示出来，便于进行定量比较。而且通过这一数值，可以对比历史时期的雨量分布状况，进而预测今后的趋势演化。

5. 如能更精细的划分时，其间差异的表达将更确切。

以上我们仅仅举了一个很普通的例子，事实证明，许多自然地理问题，均可化为点的空间分布问题，然后结合自然地理特征，对其加以说明和阐释，则对于深刻理解其内在本质，有极大的帮助，为定量地研究自然地理问题，提供了又一个有效的手段。

第三节 聚类分析

在自然地理分析中，人们以极大的注意力，集中于两大类根本问题。其一，探讨在自然地理面中的差异性，它最后必然归结到研究“自然地理类型”及其空间分布的特征，以分析的眼光，在不同的等级系统上，探索其中各个要素的差异以及产生这种差异的原因和规律；其二，就是要研究自然地理面中的相似性，它最后必然归结到研究“自然地理区划”及其划分的依据和方法上。它以综合的眼光，在不同的等级上，剪除可以忽略的次要因素，寻求出对于说明本质贡献率最大的那些因素，也就是求取它们之中的共性，联成一个集合。

这两大类问题，都具备着模糊数学概念的基本品格，它们互相关联，彼此“互补”，相似性中蕴育着差异性，任何差异性又必然有某种程度的相似性。地球和月亮相比较，尽管地球本身各处的差异是如此地巨大，但却可以看作是相似的，这是相对于月球而言；地球表面上海洋和陆地相比较，二者又可以分别看作是相似的。以此类推，差异性与相似性互相交织，显示出一个逐次的无限循环系列，构成了自然地理面中又一基本性质。

关于差异性的分析，前面两节均有涉猎。本节则集中介绍对于相似性处理的一种基本方法，这就是聚类分析。聚类分析是近年出现的数量分类学中一个分支，因为它对于处理自然地理现象特别有用，逐渐受到有关学者的高度重视，并且引进到处理地理学的具体问题。

对于相似性和差异性，一如通常所谓的灵敏度、分辨力、竞争力、生存力、可靠性、可移动性、环境适应性……等，并不具有精确的边界。象这种没有确切界线的集合，统称之为“模糊集合”。它的基本概念建立，不过十余年的历史，然而由于它解决了原先不易解决或无法解决的实际问题，使得上述的模糊关系、模糊语言、模糊系统、模糊逻辑等，具有明确的数学表达的可能，因而逐渐在生物学、地学、环境科学等领域中获得了广泛重视。

对于一个普通的集合来说，可以简便地将其表达为：

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (x \in A) \\ 0 & (x \notin A) \end{cases} \quad (6.18)$$

$\mu_A(x)$ 表示 x 是否属于集合 A 的取值；(6.18) 公式的意思就是说， x 要么属于集合 A ，要么不属于它，属于它时就取值 1，不属于它时就取值 0(见图 6.14)。

这是纯粹数学范畴中的集合概念，其间有十分明确的界限。但这种截然分开的集合，在自然界中毕竟是很少的，大量存在的现象并非如此。那么对于某种既可属于 A 又不完全属于 A 的现象表达，以及这种现象在集合中的取值问题，该怎样用数学方法去处理它们呢？只能采用模糊集的原则。这里不需要去论述它的基本概念及运算规则，只是因为聚类分析中以及其它问题的处理上，要涉及到它，在这里提出来，便于对自然地理分析中大量存在的模糊现象有比较深刻的认识。

聚类分析作为多元分析的方法之一，由于引进了模糊集合的基本法则，使得它处理问题的能力和范围都有了很大的进展。分类和区划，是自然地理学中研究空间分布及区域特征时的重大任务，向来为地理学家们所重视，正

确地反映符合客观现实的界限，其理论意义和实际价值都是毋庸置疑的。长期以来，地理工作者虽对此投入了极大的精力，但都感觉到迄今尚未脱离定性的纯经验的描述阶段，还没有建立一套比较好的定量方法。当然，由于自然地理所面临的变量如此之多，关系如此复杂，纯粹数学无法胜任诸多的参数及变化过程，因此欲要建立好的定量方法也是极为困难的。当引进模糊数学概念后，使得问题的处理有了更接近于实现的可能，但距成熟解决问题的路程还是漫长的。聚类分析只能认为是在这一方面的尝试，其目的是为了把互相差异的自然地理区域或现象，进行分类和归纳。

当进行对特定对象分类时，首先必须采用“相似系数”或者与其具有同等意义的“差异系数”。这种系数是反映被分类对象之间亲疏程度的数量指标。两个客体之间的相似系数越大，其对应的差异系数就越小，这两个客体的关系就越密切，合并成一类或划定为一个区的可能性也就越大，至于亲密关系达到何种程度才可以归为一类，就要引入模糊集中的“隶属度”数值，再根据具体的要求、特定的对象、划分时的范围大小及粗略程度来确定。

如此说来，建立相似系数并对其分析与选择，正是进行聚类分析的基础。当然，相似系数建立的本身，就是一个十分困难的过程，它既取决于人们对于分类现象本质认识的深度，又取决于人们的实际工作经验。在自然地理面中，能反映一个地域特征的指标，不下数十种，每一种指标都对构成这种特定的自然环境，有着自己的“贡献率”。除此而外，这些指标之间又有极为复杂的联系，共同对环境产生所谓的“整体效应”。在实际工作中，我们既不可能也无必要将这些指标全部囊括起来，有时甚至还无法立即明白这些指标之间的复杂关系。因此首先就要求制定，这些指标按照对于自然地理区域特征的贡献率，分别是多少？哪几个指标对于造成特定自然地理区域的贡献率最大？这就需要应用通常所谓的“主成分分析”，以便从众多的指标中，择取既能反映客体本质、在数目上又尽可能少的主要指标来。

其次，还要将这几个择取出来的主要指标，在所要进行聚类的诸单元中，给予数量化并且统一评定其数量大小，即进行所谓的“标准化”（此时尚须注意标准化的方向），这样各类指标才具有等效值特性和可比性。只有在它们顺利解决之后，才能从它们中间选用合宜的方法如要素分析或聚类分析等，去实行分类。

最通常使用的相似系数是“欧几里德距离系数”，用 d_{ij} 来表示。给定两个独立的对象 i 和 j ，它们之间的距离系数 d_{ij} 可以规定为：

$$d_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{p} \quad (6.19)$$

假设 P 变量是正交的。左图就表示了 $P=2$ 时的状况。

它表述了两个标作 i 和 j 的对象，分别位于点 B 及 C 。BC 之间的距离即为从 i 到 j 的欧几里德距离（亦即直线距离），这可以由勾股定理求取。由于 x_1 轴与 x_2 轴是正交的，ABC 为直角三角形，故而：

$$BC = (AC^2 + BA^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$AC^2 = (x_{i1} - x_{j1})^2$$

$$BA^2 = (x_{i2} - x_{j2})^2$$

$$BC = \left((x_{i2} - x_{j2})^2 + (x_{i1} - x_{j1})^2 \right)^{\frac{1}{2}} d_{ij}$$

倘若 $P > 2$ ，很容易看出它的求取办法类似于 BC，只不过在等号右边加上 $(x_{i3} - x_{j3})^2, \dots, (x_{ip} - x_{jp})^2$ ，而已。 d_{ij} 的数值范围可以从 0（完全相似）到无限大（完全不相似）。除了欧几里德距离系数 d_{ij} 外，当然也还有其它表达相似性的系数。

例如我们将 N 个区域，在各种不同的水平上进行分类，每个区域已选取了能反映其本质的几个要素指标，这些要素指标又在所有分类区域中进行了“标准化”的统一评定，这样以 N 个区域以及 n 个元素为序，即可排列成分别反映其特征的行列式，即：

$$(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

参照王华东等所选择出的相似系数及应用事例：

1. 绝对值距离 d_{ij} ：

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n |a_{ki} - a_{kj}| \quad (6.20)$$

2. 内积相似系数 e：

$$e_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^n a_{ki} \cdot a_{kj} & (i \neq j) \\ M & (i = j) \end{cases} \quad (6.21)$$

式 (6.21) 中的 M 为任意选定的一个常数，使它满足于一定的条件，即在相关矩阵所排列的数字中它是最大的。此外，还有其它一些表达形式，如夹角余弦相似系数等。选择哪种相似系数为好，以及这些系数应用于具体分类时的优劣程度，在不同的对象、不同的要求时，其各自的表现是不一样的。作为例子，我们这里仅选用绝对值距离 d_{ij} ，进行一个假想条件下的聚类分析。

设进行分类的区域为 10 个 ($N=10$)，选取分类的要素指标为 5 个 ($n=5$)，这五个指标规定为区域的能量状况、水分状况、生物状况、土壤状况和地形状况（注意，这里所说的“状况”，就包含着进行评定时所渗透的“模糊概念”）。将指标数值标准化处理后，即填入以下矩阵：

假定已经化为具体的数值，将这些数值按照规定列入表 6.4：

表 6.4 不同区域的要素指标数值

N a _{ij} n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	能量	8	3	7	5	10	8	8	3	5
水分	0	6	3	7	5	7	9	8	6	4
生物	0	3	3	4	2	8	8	3	7	5
土壤	0	3	4	2	1	8	9	2	6	5
地形	4	3	4	4	2	5	4	5	4	3

从表 6.4 中，分别计算出两两区域之间的绝对距离 d_{ij} ，建立相关矩阵。

由于矩阵是对称的，所以只取对角线上一半。在此矩阵中，寻出此次排列的相关关系中之最短距离，发现为 $d_{6,7}=4$ ，这样就将 (6) 与 (7) 首先归并为一类。而后将上面矩阵进行重新改造，得出次一级水平的相关关联，其基本方法是：如

d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
i										0
j										
1	0	1	1	1	1	2	2	1	2	1
		8	1	6	2	4	6	9	2	6
2		0	9	6	1	1	2	6	1	1
					2	8	0		0	0
3			0	9	1	1	1	1	1	5
					1	5	1	2	1	
4				0	1	1	1	5	8	1
					2	4	6			0
5					0	2	2	1	1	1
						0	2	5	8	2
6						0	4	1	8	1
								7		2
7							0	1	1	1
								9	0	4
8								0	1	1
									3	5
9									0	8
1										0
0										

如上述矩阵中 (1) 与 (6, 7) 之间的距离为：

$$d[1, (6, 7)] = \min[d_{(1,6)}, d_{(1,7)}] = \min[24, 26] = 24$$

为取最小值符号。照此法，改写矩阵如下：

d	1	2	3	4	5	(8	9	1
i						6			0

)
 (0 1 1 8
 4 2 4
 ,
 8
)
 5 0 2 1
 0 8
 (0 8
 6
 ,
 7
)
 9 0

查最小距离值为 6，系 2 与 (4, 8) 之间，将 (2, 4, 8) 归并起来，再改写矩阵：

d_{ij} 1 (2, (3 5 (9
 4,8 ,1 6
) 0) ,
 7
)
 1 0 16 11 12 2 2
 4 2
 (2 0 9 12 1 8
 ,4 4
 ,8
)
 (3 0 11 1 8
 ,1 2
 0)
 5 0 2 1
 0 8
 (6 0 8
 ,7
)
 9 0

此次的矩阵中，最小值为 8，与此有关联的合并为一类，系 (2, 4, 8, 9, 3, 10, 6, 7)，再改造为 (见下页)。

取最小值 11，则所有区域全部归并为一类。

这样，根据上述相关矩阵的逐次归并结果，可以得出区

d_{ij} 1 (2,4,8,9,3,10 5
 ,6,7)
 1 0 11 12
 (2,4,8,9,3,1 0 11

0,6,7)

5

0

域的聚类图如下：

绘出了聚类图，即可根据需要，得出所要求的分类来。如选取一条截线 A_1B_1 (见图 6.16)，可以将 10 个区域分成三大类，区域 1 是一类，区域 5 是一类，其余的各个区域属一类。如选取截线 A_2B_2 ，则将 10 个区域分成了六类，即区域 1 为一类，区域 (4, 8, 2) 为一类，区域 (6, 7) 为一类，区域 (3, 10) 为一类，区域 9 为一类，区域 5 为一类。

依照聚类图，不仅可以对区域进行分类划区，而且可以对归类后区域相似的密切程度 (亦即相似程度) 进行比较，先归并的区域，其密切程度最高。如本例中区域 6 和区域 7 就比其余所有区域都最为相似，因而相对于另外八个区域来说，它们最容易归并为一类。

当然，如果采用的是内积相似系数进行聚类时，会具有另外一些优点，不仅能告诉我们区域与区域之间的相似程度，还能定量地得出它们相似的百分比。总之，能否反映真实的自然状况，关键还在于表 6.4 中要素数量指标的确定。我们所面对的自然地理面，大到全球规模，小到一个有限的流域或地区，均可按照上述原则进行数量分类，即采用聚类分析的方法进行定量的客观的归类划区。当然，区域中选取的要素越多，所要进行归并的对象划分的越细 (亦即 n 与 N 取值越多)，制定的指标越正确，则所得的结果越接近于客观实际。但与此相联系的，其计算的工作量，相应就要大得多，只有采用电子计算机，才能胜任。并要求预先设计出几个方案，以便最后对它们的结果进行比较和制定，如果单凭手工进行计算，显然是不可能的。

此处还涉及一个与此关联的问题，那就是在各区域中，所选取要素的数值容量很大，需要迅即更新自然地理学中的观测技术，以便取得尽可能多的自然信息，方能适应数量分类的基本条件。关于聚类分析，我们所举例子是最简单的，还有一些其它的方法，读者可以参阅有关的著述，自行设计对自然地理面进行分类方面定量研究的方法。

约斯敦 (R.J. Johnston, 1978 年) 曾采用了“树状联系”法去处理类似的问题。他举出了对七条冰川进行分类的例子。首先假定这些冰川在各个季节中前进的米数为：

G_1	10 米	G_2	12 米	G_3	15 米
G_4	6 米	G_5	7 米	G_6	19 米
G_7	21 米				

所采用的分类系数是：

$$\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G}_{ct})^2$$

\bar{G}_{ct} 系根据分组状况所定的 G 的平均值。其中的计算细节这里不再列出，仅将他所处理的分类结果列于下 (图 6.17)。这是应用聚类分析的又一种形式。

据周世宽译文称：日本地理学家，曾对名古屋地区的 249 个城镇，选用了 58 个特性指标，用电子计算机进行主成分分析，选出 15 个强因子作为分类指标的代表。再经过聚类分析，用电子计算机运算到第 242 阶段，得出了

理想结果。最后把名古屋地区分成七类。它们是：1．商业中心地域；2．城市化地域；3．工商业地域；4．农村城市化地域；5．标准名古屋地域；6．落后的农村地域；7．纯粹农村地域。这些均可供我们借鉴。

第四节 遥感分析

遥感技术为地理学研究提供了又一个新手段。它是利用遥感器在远距离和非接触的条件下，通过感测物体辐射和反射电磁波的信号，经过加工和处理，从中提取有用的信息，从而达到探测或识别这种物体的特性。对于这种接受、传输和整理信息的过程就叫做遥感。由于它具有许多独特的优越性，近年来已得到广泛的发展。

为了了解遥感技术在自然地理学中的应用，首先要懂得物理学上的几个基本原理。我们知道，地球表面一刻不停地吸收、反射、发射和透射电磁波。辐射和反射电磁波的强度，随物体内部分子结构和物体的特性（如形状、大小、表面粗糙程度，介电常数、温度，水分状况等）而变化。物体的这种辐射和反射随波长变化的特征，称为物体的波谱特性。这一客观存在的现象，正是遥感技术应用的物理基础。下边就是这种波谱图的表示（见图 6.18）。

从实际的分析中得知，新鲜的雪在可见光部分反射较强；而沙漠在波长为 0.6 微米处反射率较大；含水的壤土在整个波段范围内反射率都比较低；绿色植物的叶绿素对近红外波段反射很强。由于这些物体呈现不同的颜色，可用它进行可见光的遥感测量。除此而外，这些物体还在不断地向外辐射电磁波。任何温度高于绝对零度（-273.16℃）的物体都具有这种特性。辐射的强度与物体本身的温度有密切的关系。利用这种特性，发展了红外遥感技术。

可见光和红外遥感有其一定的局限性。当黑夜或地球表面被云层遮盖时，运用上述技术就观察不到地球表面，而且它们没有探测地表下目标的能力。而真实的状况是，地球表面有相当大的部分为云层所遮盖，这就为可见光遥感和红外遥感的应用带来了限制和困难。因此，在运用可见光和红外遥感的同时，还必须发展微波遥感技术及其它，它们互相补充，能够尽量多地取得地表的信息。下面是这三者的比较：

表 6.5 可见光、红外、微波三类遥感的比较

频段	穿透云层的能力	夜间工作能力	空间分辨力	数据判断难易程度
可见光	无	无	高	容易
红外	无	有	高	复杂
微波	有	有	低	复杂

但就目前地理学上的运用来看，主要还是限于可见光与红外遥感方面，特别由于地-气系统的温度大致处于 220℃—320℃K，它们热辐射的谱成分集中于红外波段，峰值约在 10 微米左右，而且大部分地表物质在红外波段的辐射特征与黑体十分接近，因此红外遥感更是目前使用最广泛的手段。

为了对它进一步的了解，我们首先要谈到“黑体”的概念。黑体是物理学上的理想物体，它具有无选择地吸收一切入射的电磁辐射，同时它又无选择地向外辐射各波段的电磁波。其辐射强度随波长的分布仅与温度有关，这个分布公式就是著名的普朗克定律。目前在地球上，尚未发现那一种自然物质是完美的黑体，但是却可以肯定的说，地球本身是十分接近于黑体的特性的。这对于应用理想黑体的有关定律十分有利。

普朗克定律如以方程式的形式来表达，则从黑体上辐射出的能量分布，

是波长和黑体温度的函数：

$$E_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left[e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1} \quad (6.22)$$

E ——是从 λ 到 $(\lambda + d\lambda)$ 波长范围内所辐射的能量； T ——是黑体的绝对温度； C_1 及 C_2 分别为常数，其中：

$$C_1 = 2 \pi^5 \frac{15}{4} \frac{hc^2}{15\pi^5} = 2 \pi^5 \frac{15}{4} \frac{hc^2}{15\pi^5}$$

$$C_2 = hc/k$$

h 为普朗克常数 $= 6.55 \times 10^{-27}$ 尔格秒

k 为波尔兹曼常数 $= 1.37 \times 10^{-16}$ 尔格 / 度

c 为光速 $= 3 \times 10^{10}$ 厘米 / 秒此外，我们可以很容易地了解维恩定律、斯特凡-波尔兹曼定律以及凯什霍夫定律 (Kirchhoff's Law)，请读者参阅有关书籍。以下简要地叙述一下遥感技术的具体应用。

首先通过遥感地球的表面温度，可以估算土壤水分，这是一项实用价值很大的工作。近来的论文中，例如爱德梭 (Idso, 1975 年)、莱基内托 (Reginato, 1976 年)、杰克逊 (Jackson, 1977 年) 以及什玛季 (Schmugge, 1978 年) 等相继作了这方面的探讨，得出了很有意义的结论。他们应用这样的原理：土壤表面温度日变化的振幅，是内部和外部因子的函数。内部因子为导热率 (K)、密度 (ρ) 和热容 (C) 所表示，组合成为 $P = (K \rho C)^{1/2}$ ，将 P 规定为“热惯性”。外部因子是基本的气象因子：如太阳辐射，空气温度，相对湿度，云，风等……。这种外部因子的综合效应，是表面温度日变化的“驱使函数”。而热惯性 P ，则对此驱使函数起着阻抗的作用。因为土壤热容和导热率，均随着土壤含水量的增加而增加，使得在同样能量输入条件下表面温度的周日变幅趋向于减小。根据测定得知， P 的典型数值为：从干燥土壤时的 0.02 到湿润土壤时的 0.1，随着土壤水分增加，它增大达五倍。因此，根据土壤表面温度的日变幅状况，即可建立与土壤含水量之间的数值关系，这就成为进行土壤水分遥感的基本依据。按照这个原理，他们得出了相当好的结果。

在 1974 年的 4 月和 1975 年的 3 月，曾经使用了 NASA (美国国家航空和宇宙航行管理局) 的 P-3A 飞机，进行了机载遥感仪器的飞行实验，采用带有 2° 视场角的辐射计，感应 8—14 μm 波段的红外辐射，从而测出特定面积上的表面温度。与此同时，在地表一个 400 米 \times 400 米的面积上，进行了不同深度的土壤水分实际测定，由此与表面温度的日变化振幅相对比，得出了应用表面温度推测土壤含水量的基本关系。所得结果的一部分，已在有关杂志上公布。

另外，可以利用遥感技术，估算植物的水分状况。植物本身含水量的多少，是它生理生化过程的一种状态标志。由于水分吸收辐射能具有自己的选择性，它选择在电磁波光谱近红外部分的某个波段之中，倘若恰好是这样的光谱波段，照射在植物体上或者土壤上，那么由于水分的数量不同，对这束辐射的反射率就要降低，降低的程度主要取决于物体含水量的状况。基于这种确定的关系，目前已经使用它去遥感所测对象的含水量。索玛斯等人 (Thomas) 曾于 1971 年，在总结前人经验的基础上，通过反射率的观测确定了植物叶子的含水量。他们使用了分光光度计 (Beckman 型 DK-2A)，并附有

反射设备，发现在 1.45 μ 和 1.93 μ 处，为叶子水分吸收峰。其试验的例子之一（见表 6.6）。试验的细节我们这里不予详述。在测定的同时尚须考虑叶子水分的相对涨度及叶子厚度等参数。试验指出，采用这种方法估算植物的水分状况是可行的，从此可以帮助我们制定合理的灌溉制度。事实上这种方法尚不完善，只不过是一个原始的试验而已，但为我们使用遥感方法，在大面积各种不同规模的自然地理系统中，监测水分的含量及其动态变化提供了一个有益的借鉴。

遥感分析在自然地理系统中的应用范围极广，例如应用

表 6.6 反射率 (y) 与叶子含水量 x 之关系

植物	波长	回归方程 ($y=a+bx$)	估算的标准 误差	相关系 数
桔 子	1.45 μ	$y=11.08-50.54\log x$	0.34	-0.87
	1.93 μ	$y=60.5-30.24\log x$	0.16	-0.91
玉 米	1.45 μ	$y=101.1-43.81\log x$	0.58	-0.86
	1.93 μ	$y=70.1-33.29\log x$	0.87	-0.87
棉 花	1.45 μ	$y=171.0-82.97\log x$	0.29	-0.92
	1.93 μ	$y=60.5-29.74\log x$	0.12	-0.91

遥感表面温度的数值，去估算自然表面的蒸发，是近来才实现的一种重要方法。许多年以前，人们就已经设想通过准确地测定蒸发面的表面温度去计算蒸发，但一直没有理想的手段去实现它，应用遥感方法，可以迅速地，准确地，大范围地感知表面温度，为计算蒸发提供了另一条途径。

遥感分析对于估算自然表面的反射率，对于估算生物生产力以及其它方面，都是在自然地理中经常遇到的。作为一个自然地理工作者，掌握和运用遥感分析这个基本手段，应当提到日程上来了。

第七章 最活跃的物质——水

第一节 概述

水在自然地理系统中，是一种最活跃的物质，不仅数量多而且作用大，不仅活动的范围广而且交换的速率高，特别由于它是能量的贮存者、变换者及输运者，因此它就成为自然地理中极为重要的成分之一。它与接受到的太阳辐射能合在一起，成为控制一个地区基本自然地理特征的主导因素。水在自然地理中的重要功能，我们可以轻易地举出一些：

水是植物光合作用的基本材料，在此过程中，水释放出氧，提供了氢，成为有机界与无机界之间联系的纽带；

水是一种最良好的溶剂，它能溶解地球表面上的全部物质。植物营养元素，如无水的携带即无法利用，由此它又是地球化学过程的主导因素；

水是生命形成的基本条件之一，生命的发生，最初就是在水中开始的，同时它也是人类生存的基本条件之一。每天从一个人体呼出的空气里，可以萃取出 1—2 公斤的水；

水是能量的主要携带者，同时它又是改造地表面形态及特性的主要外力之一；

水是自然地理面中物质运输的基本手段，物质的风化和搬运，化学元素的迁移，都有水的参与，可以这样说，地质循环、大气循环和生物循环都离不开水的循环；

水是自然地理系统中的控制器，它减缓了地表温度的剧变，它使得地表的复杂程度增高，它使得自然地理系统中可利用的能量增大，在一定条件下，它使得自然地理熵减小等，从而可以看出水的重要作用来。国外一些学者称：世界上人类改造自然的目标之一，就是致力于改变水的三个“太”，即太多、太少、太脏（污染）。这是很有道理的。

水还有一个重要特点，就是由液态变为气态时，它的体积急剧膨胀。在一个大气压下，一公斤的水变为饱和水蒸汽时，其体积增大为 1672 倍。不能轻视这种变化，十八世纪人类文明的标志——工业革命得以进行的条件之一，就是依靠水的这种性质作为动力的。

水发生相变时，进行能量的转换与传输，对整个自然地理面来说是极为重要的。例如气团的热容量取决于空气中的水汽含量，干空气的热容量为 0.238，而水汽的热容量为 0.477，几乎相差一倍。1 立方厘米的海水降温 1 所放出的热量，可以使 3000 多立方厘米的空气温度升高 1，若全球 100 米深的表层海水平均降温 1，放出的热量即可使全球大气增温 60。

水具有不可压缩的特性。它没有弹性，当受到切变时控制形态变化的刚性系数等于 0，当受到拉张和压缩时表示伸长和缩短的杨氏模量也等于 0。地震的横波，不能通过液体水。

由于水具有很多特征，因此历来自然地理学家把水的研究放在重要的位置之上。

十分庆幸的事件之一，就是在地球这样的平均温度状况下，唯一能同时存在着三种状态的大量物质——水，能够保持在自然地理面中或者接近于自然地理面的空间中。而且近乎全部水的主体，以液态存在，只有很少一部分形成固态的冰和气态的水汽。上边已经提及，水具有的独特性质，使得它成

为能量和物质转换、传输的有效执行者。由于地球表面积的 71% 为水所占据，从人造卫星上看我们所居住的这个行星，呈现着美丽的蔚蓝色，被称为“水的行星”。

第二节 水的基本特性

在自然界中，几乎水的全部物理性质，要么是独特的，要么是处于这种性质范围的极端状态。由此，导致了它在化学上的特殊性。这些在物理及化学上的特点，又使得它在生物学上具有不可代替的作用。这就可以清楚地看出，水在自然地理研究中的价值。

让我们首先来熟悉一下水分子的结构。由两个氢原子和一个氧原子所组成的水分子，呈非对称分布，其形状略作V字形，这是依据水分子的电子云分布决定的。现已清楚的是，氧原子居于中心，两个氢原子位于类似正方体一个面的两个对角。H—O—H之间的角度（也就是V字形结构之角度）为 $104^{\circ}31'$ ，而不是真正的正方体所应有的 $109^{\circ}30'$ 。氧原子的8个电子分布是：两个靠近原子核，两个包含在与氢原子结合的键中。另外两对孤对电子则形成两个臂，伸向与包含氢原子那个面相对的另一个面中，分别位于该面的两个对角（见图7.1）。这两个臂的电子云，特别引起人们的关注，因为它们显示出了一个带负电区，能吸引邻近水分子中氢原子的局部正电区，借此力量把水分子互相连接起来，这就是水分子所表现出来的“极性”。

正因极性作用的缘故，水聚结在一起而不轻易地汽化，就是说在通常气压下，水不致在较低的温度时就沸腾。由于水分子中电荷的分布，它产生了 1.84×10^{-18} 静电单位的偶极矩。如果水分子没有带负电的电子云臂及偶极矩，水分子之间的结合就不会如现在这样，海洋中所有液态水势必完全汽化，生命的形成必然是不可能的。借助于极性，水分子能连接起来一直升高到近百米高的树顶，光靠毛细力及大气压力是无法解释的。

我们已经提到，液态水几乎在其所有的物理化学性质方面都是异乎寻常的。例如仅从它发生相变时的温度来说，就十分独特。元素周期表中第A族各元素的氢化物，随着分子量由 H_2S 、 H_2Se ，到 H_2Te 的增大，其熔点也按照这样的序列增加。在这个正常的顺序中，唯有 H_2O 是一个例外。氧在此族元素的氢化物中，具有最小的分子量，但却比其它姊妹化合物高出60才能融解。在沸点方面更为突出，事实上它比应该出现的沸点高出约160。很明显，这中间一定有某种力在阻碍其向气态的发展。把水分子相互结合在一起的这个力就是氢键，这一点目前已经知道的颇为清楚了。它的量级介于微弱的“分子间力”（即范德华力，约为0.6千卡/克分子）和典型的离子键能（几十千卡/克分子）之间，水分子氢键键能为4.5千卡/克分子。它的强度是由极性分子的库伦作用力引起的。

1立方厘米中，可以容纳 $(1/r^3)$ 个半径是r的最密堆积圆球。由于分子量已知，则在最密堆积的水分子状况下，可以算出水的密度应为每立方厘米1.7克，显然比水的标准密度每立方厘米1克要大的多。这样可以推断出水分子远远不是分子的最密堆积。事实上，一个水分子周围通常约有4—5个最近的相邻水分子，而不是如理想的那样应当有12个。不厌其详地讨论水分子的这种基本结构，在作微观分析时是极为有用的，而且也是在考虑水的传输及其交换能量过程中必不可少的。

水的比热（升高1度时物质的贮热能力）比别的液体都大；水的汽化潜热在液体中也是最大的，在20℃时，每蒸发1克水需要585卡的热量。此外，

除水银之外，水的导热系数在一切液体中也是最大的。水的介电常数比任何其它物质都大，例如离子在水中要得到和空气中相同的吸引力，那么它们在水中的距离应降低为空气中距离的九分之一；水的表面能力在已知液体中是最大的。我们可以将这些异常的物理性质，总结在一个表中，帮助我们全面地去考察水的重要特征。

表 7.1 液态水一些异常的物理性质

性质	与其它性质比较	在自然地理系统中的重要意义
热容量	在所有的固体和液体中	能阻止温度变幅过大；水体大规
	是最高的（除 NH ₃ 外）	模运动时携带和输送的能量巨大
融解热	最大（除 NH ₃ 外）	由于吸收与放出融解热，使得在冰
		点时有恒温作用，以此进行热量
		的调节
汽化热	在所有的物质中最高	巨大的蒸发潜热对于能量和水分的
		输送具有特别重大意义
热膨胀	最高密度的温度随着盐	淡水的最高密度在冰点之上，对于
	度的增加而下降，纯水	湖泊河流中的温度分布与垂直交
	时的最高密度为 4	换有重大作用
	而不是冰点 0	
表面能力	在所有液体中最高	控制着土壤及植物中的水分存在状
		况，影响着自然地理面中的一切表
		面现象
溶解能力	一般说来具有比其它液体	对于化学元素分布的变化，迁移，
	溶解更多种物质的能力，	对于化学风化作用，对于生物的
	并有较大的溶解度	生长等极为重要
介电常数	在所有液体中最高	对于无机溶解物的引力有头等的
		重要性，它能造成高度的电离
电离度	很小	为一中性物质，既含有 H ⁺ ，也含
		有 OH ⁻¹
透明	相对较大	对于红外及紫外的电磁辐射能

度		的
		吸收大，对可见光部分的选择吸
		收比较小，因此水是“无色的”，
		它控制着在水体处自然地理面的
		厚度
热传导	所有液体中最高	在小尺度的能量转移中，具有极
	(除水银外)	大的重要性

第三节 水循环与水资源

地球上的水以及水中所溶解的元素，一般说来通过两种不同方式进行运动。第一种是全球规模的方式，这里包括三个类型：1. 水发生从液态或固态变为气态的相变，蒸发后的水汽升入空中，一部分参加局部循环，另外一部分成为大气环流的组成成分。举一个例子，美国每年的降水总量接近 6000 立方公里，但是由于大气环流，每年流经美国的水汽的总量（折合成液态水）等于下落水分的 10 倍，这多余的水汽量在更大的范围内运动着；2. 洋流可以将能量带到很远的地方。由于太阳辐射能在地球表面上分布的不平衡，出现了暖流向两极，寒流向赤道的大规模全球性运动，这种运动本身是由于能量分布的差异引起的，而运动的结果又起到了使能量重新分布的效果。在北纬 50—55° 之间地区，大西洋东西两岸间气候差异很大，墨西哥湾暖流及拉布拉多寒流在这当中起了决定性的影响。3. 陆地径流，世界上河流不仅是长距离的水分循环通道，也是水中溶解物质及悬移物质进行输运的通道，它本身的运动趋势是被它所在流域的基本地形所控制的，同时它本身又成为反映陆地基本形状的一面镜子。它在地球表面的侵蚀、输运和堆积中起着巨大的作用，不断更新着地表形态及土壤，而且与生物圈的形成与演变关系也很大。

第二种方式是在这种大规模运动的同时，还有通过扩散过程进行微观的，独立于全球性趋势的运动。我们知道，第一种方式的运动速度是比较大的，可以从每小时几十公里到上百公里，但在 25℃ 时纯水中的分子自扩散系数仅为 2.57×10^{-5} 厘米²/秒，尽管其速率不是很大的，但是它却经常的在地球表面各处起着相当大的输送能量和物质的作用，有时甚至是决定性的作用。旺（Wang）应用同位素示踪技术，测量出水的自扩散系数与水的温度有关，在 5、10、15 和 25℃ 时，分别是 1.43、1.68、1.91 和 2.57×10^{-5} 厘米²/秒。

水的汽化潜热很高，蒸发时需要消耗大量热量，反过来在凝结时也要放出相同的热量。水的蒸发既是能量变化的巨大转换器，也是物质变化的巨大转换器（包括把水本身视为物质以及针对蒸发时的水溶液浓度的变化等）。蒸发后的水汽，自由度变大，再加上被大气环流或其它局部的空气运动所携带，可以运行达几千公里再冷凝成雨或雪降落地面。事实上，在空气的加热中，最大的和最主要的因素既不是它直接吸收的太阳辐射能，也不是从海陆表面上所反射的能量，它恰恰是从水汽凝结时所释放的潜热（当然还有对地面长波辐射的阻拦）。从热带海洋中蒸发的大量水分，可以通过雨雪的形式降落在整个陆地表面和极地地区，从而通过水分的循环与水分的平衡，参加到整个地球的能量平衡中去。

现在首先来考查一下地球上的水量。按其重要性的排列顺序是：海洋、固体水（包括冰川、极地冰盖、冰山等），地下水、湖泊、沼泽、河流、大气中及生物物质中所含的水。水的固体、液体和气体形式所占的体积见表 7.2。

地球上水分的循环可以参考（图 7.2）。

表 7.2 地球上各种形式水的数量

水的形式	体积 ($\times 10^6$ 立方公里)	所占总水体的百分比 (%)
------	-----------------------------	---------------

海洋	1350	96.8		
固体水	29	2.08		
	土壤和耕作层	0.066	0.0047	
	小于 0.8 公里深度	4.16	0.3	
地 下 水	大于 0.8 公里深度	4.16	0.3	0. 6
	地下水总量	8.4	0.6	
湖沼及河流	0.2	0.015		
大气中所含的水	0.013	0.001		
生物物质中所含的 水	0.0006	0.0000 43		
总计	1395.9996	100		

地球上水分交换的进行是十分积极的。举例来说，全世界大洋中水的容量为 13.5 亿立方公里，而年蒸发量的数值也已经估算了出来，这样大洋中所有水分全部交换一次的时间大概是 3000 年。而河流中所拥有水量只占全球总贮量约 0.0001%，但是它进行交换的周期极短，全部交换一次的时间仅有 0.032 年，也就是说河流中的所有水量一年内可以更换 32 次，平均约为 11.4 天就循环一次。各种形式存在的水分，其进行更换的积极性如下：

表 7.3 各种形式水的交换周期

水的存在形式	水分交换的周期（年）
世界大洋	3000 年
全部地下水	5000 年
其中的水分交换带	330 年
土壤根系层中的水分	1 年
冰川	8600 年
湖泊	10 年
河流	0.032 年（11.4 天）
空气中之水汽	0.027 年（9.7 天）
全部水圈	2800 年

从上述的数字对比中，这种交换的速率相差十分悬殊，最大可达三十万倍。如由于交换积极，河流每年所容纳的水分可达 3.8×10^6 立方公里，是其净贮水能力的 32 倍。这种动态交换的速度越快，使得它在水平衡中所起的作用也就越大，由此可以想见，尽管河流中的水量比起冰川和海洋中的水量少的多，但从动态演化的观点来看，从物质和能量交换的积极性来看，从对自然地理面的作用来看，它的意义却是不能低估的。这样，对于水分控制的一个重要途径，就是设法变更这种固有的交换速率，使其向有利于人类的需要发展，有的交换速率要延缓，有的交换速率需要加强，以便找出一种更优的水分交换组合，从而实现对于系统的调控。

事实上，约 97% 的水分集中于海洋之中，而其余的大部分又被束缚于固体水中。在陆地上所存在的水量是相当少的，因此水资源的合理开发与使用，已成了世界性的大事之一。可以推测，地球内部还保存有某些数量的水，它

以化学结合的形式，固定在岩石或熔融的岩石中。但目前，还估算不出地球内部这种水分数量到底有多少，但是可以确认，在地球最后经历的十亿年中，地球表面的水量是接近于常数的。

每年通过火山气体（而水汽是其中的基本成分）的凝结，可以期望有少量的新水分的增加，但到底是不是新的水分，也还不能加以确认。因为从火山熔岩中所带出来的水蒸汽，其中差不多全部是原来上层岩石中所贮存的地下水，当熔岩通过时这部分岩石中的水变为蒸汽喷出的，或者是海相沉积物在其沉积时期所俘获海水的重新蒸发。这样看来，通过火山喷发每年在地球表面上所增加新水分的实际数量，如果有的话，也只能是极小极小的。

一个相应的极小极小数量的水分，每年也可能从地球上消失掉，这是通过在大气中太阳辐射能或宇宙线的作用，致使水汽之光化学分解而达到的。在高层大气中，某些水分子被分解成氢离子和氧离子，从理论上讲，这种被分解的氢离子的速度，可以大到足够使它们中的一部分逃逸出地球的引力场，当然此量也只能是极小极小的。实际状况是，目前地球上水的总量可以认为是一个常数，甚至在很长很长的地质年代中也是这样。对于这个庞大的近乎常量的水体，从物质转换的意义上来说，水的循环在自然地理面中也是一个开放系统，有水分的输出和输入，同时也伴随着能量的输出和输入。

陆地上蒸发水分的源地，并不单纯限于从开放的河流、湖泊及冰雪的表面上，更大量的则是通过土壤、植物中的蒸发和蒸腾。以道格拉斯枞树林为例，每年通过它向空气中输送的水分，等于它所在面积上深达 1.2 公尺的水层。水在植物体中的停留时间，夏季通常只有 2—3 天，而且每产生 5 吨干重的植物物质，通常需蒸发掉 2000 吨的水分。据计算，在许多温带的国家中，被植物吸收并蒸腾掉的水分，几乎等于从河流中流到海里的水量。

在陆地表面上，开放水面所占的面积确实是并不太大的，因此降水的绝大部分落在有植被覆盖的或裸露的地面上，在既非荒漠，也非固体水的陆地上，典型植物的需水量，每年约为 60×10^3 立方公里，其中只有不超过蒸发量 1% 的水分存留于活体中，成为生命的组成成分。由于陆面的蒸发以及从植物上的蒸腾是水文学、农学、气候学、大气物理学等学科的共同关键问题之一，也是现代自然地理学的一个十分重要的问题，因此国际上对于蒸发的研究论著，截止目前，约接近一万篇左右，并且仍然是极为活跃的研究领域之一，我们将在下节水平衡中，再加以叙述。

倘若现代的冰川、冰盖等全部融化，则海平面将升高 60 米，这对地球的生命来说，是一场灾难，它将淹没地球上绝大部分人口密集的区域。在近代的地质时期中，曾发生了大陆冰帽不断地发展和融化的交替，每一次都暂时地搅乱了水的循环，从而引起生物界的大调整。据调查在最大冰川期中，冰川冰的数量三倍于现代的面积，海平面可以下降达 140 米，露出了大部分的大陆架。因此，固体水量的变化可以视为如电路中电容器那样的作用。

综上所述，水的总体积与地球的体积相比，大概是 1/777.2，但是它本身在自然地理面中所具有的价值，却不是能用这个比例数值可以表达的。现在可以十分肯定地说，它是自然地理系统中一项基础的研究任务。如果不深入研究有关水的规律，对一系列基本问题的解决是根本不可能的。无论从影响的规模、速度来看，也无论是从其存在的作用和意义来看，水分在自然地理系统中结构和功能的重要性怎样评价也不显得过份。

第四节 水分平衡

水分的存在形式及运动状态，同样遵循着宇宙间的普遍规律——物质守恒定律。对于自然地理系统来说，水分的输出必然取决于输入和其在系统中的演化。水分在系统中的贮存和变化，从长时期和大范围来考察，可以视作一个常数看待，这样水分的输入和输出之间就建立了一种线性的关系，系统本身越稳定，这种关系就越密切，处于一种“平衡”或者叫做“均衡”的状态。我们就是从这个意义上，建立水平衡的基本概念。

对于一个理想的系统来说，从环境中向系统输入的水量，基本上归于降水和从地下深处抽取的水，当然尚可包括从另一个亚系统中运输来的水分。这里，如果我们考虑到地下深处来的水仍然是由于降水的渗透作用造成的话，就可以不再考虑这个要素，只要把握了降水的基本规律以及本系统的土壤、岩层等特性，这一项我们是能够较方便地予以处理的。至于通过江河从另一亚系统流通过来的水量，如果我们以一个单独的流域作为系统考虑时，这一项亦可排除。

至于输出的水量，主要有通过陆地表面的蒸发和通过植物的蒸腾，这两者在一般情况下统称为本系统的总蒸发；此外尚有通过径流输出到系统之外，以及向地下的深层入渗。这几项当中，蒸发及蒸腾是最主要的项目，其余二项相对来说，也是比较容易处理的。由此而建立的水分平衡方程，其基本形式是：降水=蒸发蒸腾+径流+系统中水分贮存的变化。我们将这种叙述用图表示出来。

降水是水分输入的一个基本来源，而它本身又受制于输出的数量和大规模的水循环。一个水分子在大气中平均存留的时间为 10 天左右，从地表蒸发出来，升到空中至大气，然后变成降水再返回地表，大约可达几千公里的距离。如在美国旧金山进行的同位素示踪测定，说明了扩散半径达到二千公里的空间范围。降水是由水汽凝结而形成的，在北半球年平均水汽含量随纬度的变化为：

北极	60°	N45°	N30°	N赤道
5	10	20	30	45

单位是每平方米地面以上的空气柱所含水汽的公斤数。在整个地球、大气中水汽的平均含量约为 25 公斤 / 米²。至于水汽在地表之上随着高度的变化，也曾作过专门的研究。例如汉恩 (Hann) 总结了大气中水汽随着高度减小的规律为：

$$\log e_h = \log e_0 - h / 6.5 \quad (7.1)$$

e 为水汽压，0 及 h 分别表示海平面以及其上的某个高度（以公里计），这是他在 1897 年提出的。按此式计算，在海拔 6.5 公里高度处，其水汽压仅为海平面数值的 0.1。

据推算，一块半径为 5 公里，降水强度为每分钟 1 毫米的积雨云，在 1 分钟内倾泻下来的水量约达八万吨之巨，这就说明，在低层大气中常常有充沛的水汽。这些水汽的运动，既是物质的运动，也是隐伏着的能量在运动，正是由于它们的存在，对于自然地理面中能量收支的影响，对于大气的不稳定性以及加速对流的发展等，都有巨大的作用。

现在世界上测量的最大降雨强度是 1956 年 7 月 4 日，在美国马里兰

(Maryland) 的尤奈维里 (Unionville) 所记录的数值, 在持续时间为 1 分钟的间隔里, 降雨深度为 3.124 厘米。幸而只有一分钟, 时间较长即会引起巨大的灾难, 例如按此强度, 一天之内即可降水 4498.6 厘米 (合 45 米) 深, 这确实是一个惊人的数字。而在大陆与海洋上的一般年平均降水量如下:

在大陆与海洋上的年平均降水量 (毫米 / 年)

北冰洋	240
大西洋	890
印度洋	1, 170
太平洋	1, 330
南极洲 (东部)	150
大洋洲	470
欧亚大陆	610
北美洲	660
非洲	690
南美洲	1, 630

还需指出的是, 对于降水量的判定, 大都使用的是传统的雨量计, 但它与实际的降水量常常有较大的差异, 特别因为风向、风力的大小, 地形坡度等影响, 使这种差异更为显著。正如罗达 (Rodda) 在 1970 年所指出的一个例子那样: 在地面上放置的传统雨量器, 测出的降水为 30.5 毫米, 比实际降水低估了 10%。至于地形坡度及高度对降水量的影响更是显而易见的。多年来都认为, 在高山区存在一个最大的降雨带, 超过这个高度后, 降雨随着高度减小。迎风坡与背风坡上雨量的差异已有许多报道了, 这里不详述。

降水量的变率是很大的。就一个地区来说, 年际的变化及年内的分配都是不均匀的。如我国的华北地区, 最高的丰水年和最低的枯水年, 由于雨量降落的不同, 而使得河川迳流量相差达十余倍。在一年之中, 河川迳流的 60% 集中在汛期, 也反映出降水在年内分配的状况。

此外, 全球各处由于降水量空间分布的巨大差异, 引起了自然地理面中的巨大反映。特别是自然植被的分布, 除了与能量收入的基础因素有关外, 与降水量的多少、降水的变率以及年内分配状况, 有着极为密切的关系。我们举出年总降水量与不同的自然植被之间的联系, 即可看出这一点。

表 7. 4 年总降水量与自然植被的关系

年总降水量(毫米)	自然植被	植被高度(米)	覆盖状况	叶子形状
125—250	荒漠灌丛	达到 5	很稀疏	刺状、小
250—500	热带旱生木本	达到 10	稀疏	刺状、硬叶、 发状落叶
500—1, 000	干燥森林	达到 15	有不大的裸露空间	硬叶、落叶
1, 000—2, 000	半干森林	达到 30	无裸露空间	典型落叶
2, 000—4, 000	半湿森林	达到 50	无裸露空	常绿

			间	
4,000 以上	湿润森林	达到 50	无裸露空间	常绿

在土壤表面上得到的降水，通过重力和毛管力的合力（此间我们忽略了其它微观力，或者假定它们为常数）而被拉入土壤中。随着接近表面的土壤孔隙被水所充填，入渗率最后达到一个常数，这可由通过湿锋面下渗水分的传递速率来表示，而湿锋一般总是通过土壤剖面垂直地移动。它的移动速率控制着近地表土壤水分贮存的变化以及入渗率的状况。关于土壤对于水分入渗率的研究，由于它直接联系着物质输入输出与贮存的特性，我们应当对其有一定的理解。

早在 1945 年，豪顿（Horton）就试图采用一个方程式去表述入渗速率：

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (7.2)$$

f_t ——从降雨开始后的某时间 t 之瞬时入渗速率； f_0 ——在时间为零时的入渗速率； f_c ——最终的入渗速率， k 为常数。在这里，他假设了土壤的最终入渗速率对于某一特定土壤来说是一个常数，而且它也不去考虑暴雨开始时原有的土壤水分状况，据此他进一步作出了不同土壤在接受不同水分状况下的入渗曲线。以后菲利浦（Philip, 1957—1958 年）建议使用下边的入渗公式：

$$f = a + bt^{\frac{1}{2}} \quad (7.3)$$

a 是土壤常数， b 为取决于土壤水分的常数。这样就有可能针对先期的土壤水分状况去调整最后的入渗速率。在物理意义上，此式能够表达出湿锋运动取决于原先土壤存在水分梯度的状况。

最近使用了“先期降水指数”（简称 API），它可以由先期的降水来计算。API 建立在这样的基础上，即一个集水盆地中降水量之贮存随着时间而减小，这种减小的方式一般均假定为指数衰变的形式。这样在给定的天数内，API 就由日降水量，先期的天数等来计算。例如在先期十日内流域的 API 计算可以写成：

$$API_{10} = \sum_{t=0}^{t=10} P_t K^{-t}$$

P_t ——在计算日期之前第 t 天的降水量， K 为常数。使用多元回归分析，有可能使用降水和 API 这二者的综合效应去预报径流量。已经有人作了这样的尝试。

基于豪顿的模式，贝特森（Betson, 1964 年）作了一个重要的推导，他指出降水对于入渗的总损失量为：

$$\text{损失量} = \int_{f(sm)}^{d+f(sm)} (c + be^{-nt}) dt \quad (7.4)$$

c 、 b 、 n 为所规定的豪顿入渗曲线常数， $f(sm)$ 为土壤水分的函数，该土壤水分状况规定了入渗曲线的起始点， d 为暴雨延续时间。他并且制作了一个诺模图，应用了 API、不同的季节、暴雨延续时间来确定径流。

关于土壤入渗还有许多其它方面的工作，例如加拿大的威尔科克斯（Welcox）所拟定的土壤入渗率公式，这些我们都不再一一列举了。

总之，在自然地理面中，水作为一种独特的物质，它的输出主要有两个方向，其一是向上输出，主要通过水分的相变——蒸发蒸腾而逸入大气中；

另一个是向下通过入渗进入地下水。水分在土壤层中的贮存、运动和变化，对于各个地区自然地理状况的影响关系甚大，我们既应掌握其平均状况，又能把握其瞬时变化，才能将水这种物质在系统中转换的研究，更加深入一步。

水分进行着积极的运动。这种运动的动力来自太阳辐射能，而其主要形式乃是从海洋或从陆地表面上进行着水的蒸发。由于水的独特性质，在地球的平均温度状况下，它十分容易发生相变，加上这种相变携带能量的本领很强，输送和释放也很容易。正如上节已经指出的那样，蒸发及其机制一直成为研究水平衡中的焦点。蒸发本身也成为联系热量平衡与水分平衡的纽带，具有极大的价值和理论意义。

截至目前，估算蒸发的方法很多，粗略统计不下几十种，直接测定蒸发量的仪器也在不断地发展。我们这里不去谈论使用仪器进行直接测定的问题，只是集中地讨论蒸发估算中各种不同类型的理论方法。

1. 质量传输法：早在 1800 年，道尔顿 (Dalton) 建立了第一个表述蒸发的公式，它把蒸发看作是水汽压的函数，在他看来，蒸发既然是由液态到气态的相变过程，那么从贴近液面到距离液面的一定高度之间，必然存在着水汽压的梯度，于是他的公式基本形式是：

$$E=C(e_0-e_a) \quad (7.5)$$

此处的 c 为一经验确定的常数，它是通过风速的状况来加以体现的。而 e_0 为水表面的水汽压， e_a 为表面之上某一点空气的真实水汽压。他的这种观点，一直沿用至今，仍然具有着一定的基础。但这个明显的和简单的方法，对于实际使用来说，则是困难的，因为确定 e_0 是相当不容易的。现在采用了红外测温的遥感技术，虽然使其成为可能，但是该公式仍然存留着经验性的痕迹。目前，除了大面积平均状况下，有时还加以采纳外，一般精密的计算都不使用它。道尔顿方程，在过去也曾为一些人改写其形式，如：

罗沃 (Rohwer, 1931 年) 写成：

$$E=(0.44+0.118u)(e_0-e_a) \quad (7.6)$$

u 为风速。

彭曼 (Penman, 1948 年) 建议：

$$E=0.40(e_0-e_a)(1+0.17u_2) \quad (7.7)$$

u_2 为地表之上高 2 米处的风速。以及另外一些相类似的经验公式。

2. 空气动力学方法：这类方法认为，在表面的界面层中，由于乱流扩散作用产生了动量通量、显热通量和水汽通量。并且作了水汽扩散系数等于热量扩散系数的基本假定，并经过一些较为复杂的推导而得出的。该方法起源于经典的流体力学理论，但是它所处理的蒸发，目前在实用上不大为人们所接受。

3. 涡度相关法：斯威邦克 (Swinbank, 1951 年) 建议采用“涡度相关”的方法估算热量和水汽的垂直通量，这在近年来得到了比较迅速的发展。但是它要求仪器精密、处理数据迅速，因而在大量普及的方面遇到了问题。近来美国曾试图采用机载遥测的办法来发展涡度相关法，但仍处于试验飞行阶段。它的基本理论，由于推导较复杂，这里就省略了。

4. 能量平衡法：因为地球表面的能量平衡可以写成：

$$R_n=S+A+LE+P+M \quad (7.8)$$

S ——在土壤中的热通量； A ——对空气的显热通量； LE 为潜热通量，即

我们要求取的蒸发量；P——植物光合作用所消耗的能量；M——其它方面所消耗的能量。它包括代谢活动中的能量交换，在植物组织与植物冠丛中的热量贮存等。 R_n ——为地表收入的净辐射值。由于P及M通常远小于等式右边的前三项，因此，一般将其忽略不计，这样：

$$R_n = S + A + LE$$

经过处理，把LE作为式中的未知项，由 $(R_n - S - A)$ 从而得出LE来。在能量平衡法中，鲍文曾经作出了重要的贡献。例如，他提出的显热与潜热之比值，即被人们称之为“鲍文比”的指标，一直沿用至今。

5. 阻力法：很早就明白，显热通量从物体表面向空气输送的过程中，其速率正比于温度梯度，并且反比于对热传导的阻力。与此相类似，水气的传导也是正比于水汽压的梯度（从蒸发面到空气），反比于对水汽分子扩散的空气阻力。蒙泰斯（Monteith, 1963年）指出，对于植物来说，如果知道了空气的阻力和植物的阻力，即可对于植物蒸腾进行预测。他并且建立了这种计算的模式。以后又经过布鲁温（Brown）和洛森伯格（Rosenberg）在1973年，于蒙泰斯模式的基础上提出了新的模式。布拉得（Blad）等在1974年对其进行了简化等。近年来，澳大利亚的一批科学家，将土壤—植物—大气，作为一个系统来看待，建立了水分在其中运动的统一关系，借助于电学中电流流动时的阻力过程，类似地去描述水分的运动，其基本图式如（图7.5）。

6. 热成象法：使用红外侦检仪，测知各种不同含水量的各类表面温度。由于在进行蒸发时，蒸发面本身必然冷却，其表面温度也就发生相应的变化，而且由于含水量不同，其吸热速率与放热速率均不同，从而建立表面温度与蒸发量变化之间的关系，近几年来，这种方法发展很迅速，已经成为比较简便也比较先进的方法之一。

7. 综合法：使用这种方法的有世界著名的彭曼蒸发公式，以及1966年冯巴维尔（VanBavel），在彭曼公式的基础上经过发展的公式。由于综合法具有相当坚实的物理基础，因而在世界上曾获得了广泛的应用，取得了较好的效果。公式本身已为广大读者所熟悉，也就不作一般的介绍了。

8. 经验公式：许多人包括地理学家在内，使用了一些适合本地区的经验公式，虽然在物理意义上和计算程度上，存在这样和那样的问题，但是由于其简便易行，至今仍有不少人愿意使用。世界上计算蒸发的经验公式很多，如1948年美国桑斯威特提出了他的经验公式；布拉尼等（Blaney, 1942年）也根据简单的常规的气象测量数值建立了经验性公式。这种类型的公式，在各国都有不同的表达内容，在描述特定地理区来说还是十分方便的。

关于计算蒸发的方法，并不限于上面已经提到的。因为蒸发是一个十分重要的指标，从自然地理研究的角度出发，要求我们能深刻理解它的作用、它的本质以及使用它的基本知识。这样在进行自然地理分析时，才能比较准确的作出符合事实的结论。

一旦我们知道了水分的输入，水分的输出及其在自然地理系统中的交换、贮存和变化后，即可着手进行水分平衡的计算，这要求不仅掌握大量的资料，还要结合自然地理状况如地表组成、植物分布、能量基础、时间变率、空间变化等一系列要素进行分析和综合。对于每一个特定的区域来说，还要建立最优水分分配的标准。

从 1960 年以来，不少作者公布了他们对于全球水分平衡的研究结果，现在列表于下：

表 7.5 有关全球水分平衡的一些研究结果 ($\times 10^3$ 立方公里)

作者	年代	PL	E L	DL=D S	PS	ES	PG= EG
阿伯莱特 (Albrecht)	1960				37 8	41 1	(47 8)
布德科 (By blko)	1963	10 7	6 1	46— 48	40 4	45 2	512
米拉图集 (MiraAtlas)	1964	10 8	7 2	36	41 2	44 8	420
马塞 (Mather)	1970	10 6	6 9	37	38 2	41 9	488
布德科	1970				41 2	45 5	(51 9)

其中：P 代表降水；E 代表蒸发；D 代表迳流，是降水与蒸发之差；L 代表陆地；S 代表海洋；G 代表全球。

通过水分平衡的研究，不仅使我们掌握水在自然地理系统中的传输过程，而且使我们从中探求水的输入、贮存及输出对于自然地理过程及自然区域特征的作用。水分平衡是总的趋势，在全球规模及长时期内必然符合这个规律，但对各个亚系统来说或者对于一个小的区域及短时间来说水分的盈余和短缺则是经常发生的。研究水分平衡，必须首先认识它并且洞悉其演变规律。不少人认为，由于水分与能量的偶联性，以及它的活跃性和可控性，因此，改造自然的杠杆应放在水这个因素上。对此，我们是有同感的。

第八章 自然地理面的核心——生物

第一节 自然地理质量评定依据

地球形成之后相当长的一段时间里，依然是没有生命的。那么现在世界上已有的一百多万种动物、三十多万种植物和十几万种微生物，是从那里来的呢？这是个十分引人的问题。几千年来，它消磨了不少人的睡眠，直至今日，这个问题仍然没有得到完满的解决。一般的看法是：地球形成后，逐渐地产生了大气，出现了水，具备着可以产生有机物的物质，这样给有机物的出现奠定了基础。有机物并不等于生命，但有机物的产生却是生命体形成的前提。生命是蛋白质的存在形式，因此没有蛋白质和核酸，就不会有生命。原始生命的形成，有赖于简单有机物向氨基酸等一类复杂有机物的转化。有人在 1969 年曾经作过计算，认为原始生命这种事件在地球上产生的可能性，只有 10^{200} 或 10^{4000} 分之一的机会。我们且不去讨论这种估算的真确性如何，仅从这些数字去看，生命的产生的确不是十分容易的。难怪宇宙中众多的星体，经过科学家们的日夜寻觅，截止目前，在其它星球上仍然得不到有生命存在征象的确证。但是，在我们地球上却能够繁衍这样多的生命体，真可算是得天独厚了。我们从来也不排斥宇宙中有生命体存在的推想，但可以想象，即使有也决不可能是十分普遍的，因为形成生命的几率实在是太小了。

五十年代中期，米勒曾经做过一个有名的试验，他用甲烷、氨、氢、和水汽混合成一种与原始大气成分基本相同的气体，放入真空的玻璃容器中，模仿原始地球的自然环境条件，经过八天后，最终在完全非有机界的成分中获得了五种构成蛋白质的重要氨基酸。说明了有机界来源于无机界，生命来自于非生命。现今地球上已知的这 150 万种生物，是生物长期进化的结果。其最早出现大约在 32 亿年之前，那就是前不久在南非太古代地层中发现的古杆菌和巴贝通球藻化石，它们只是一种单细胞。以后经过不断的进化，现在的生命体是越来越复杂了。以一个成年人为例，其个体的组成约有 1800 万亿个细胞。

生物体有其内在的规律，每个个体从其产生、发展到消亡，必然要遵循这种规律，同时又必然和外部环境条件相适应，因此它们本身就成为自然地理中又一类特殊的成分。

生命个体从无机物中产生，最后衰亡又回归到无机界，完成自己的循环，这一点对于所有生命体来说都是共同的。寿命短的如细菌，大约每 15—60 分钟就分裂一次；蘑菇生长期不到一个月，干旱地区的某些草，能在几周内，借助于难得的一点降雨，迅速地完成自己的生命周期。但大象可以活到一百多岁，1737 年在印度洋捕获的一只海龟，当时已有一百年左右，至今还活着，大约已有三百多岁了。北美洲的巨杉有的已活了四千多年，墨西哥的柏树和澳大利亚的铁树，有的甚至已生活了一万年以上。但其基本过程决定着它们仍然要消亡。或者是延续了后代，或者是被淘汰而代之以其它更适应环境的生物，地质历史上的生物进化过程完全证明了这一点。

前面的章节中已经提到过生物体的分布，存在一个狭窄的范围。它们只能在地球表面上形成一个薄薄的圈层，其体积的绝大多数集中于自然地理面内。因此，自然地理面是生命得以繁衍的最优场所。同时，正是由于生物圈的存在，也使自然地理面中又诞生了一个独特的和重要的组成部分。在长期

的实践过程中，人们逐渐认识到，生物圈本身反映自然要素的综合效果特别灵敏。就植物而言，树木发芽的时间，草转绿的生理活动，一年生植物的生命过程等，无一不取决于自然环境的变化。尤其要取决能量和水分这两个最基础要素的变化。特定的植物类型，生长于特定的能量和水分的组合之中，它们都存在着严格的保持自身生长的界限。例如，传统的气候学家通常使用自然要素中一个或数个作为指标，来对世界气候进行分类。柯本以及后来的桑斯威特，都作出了知名的世界气候划分。令人十分惊异的是，他们所作出的这种分类，竟然同世界的植物分布十分接近，甚至完全吻合。

研究生物与环境关系的重要意义，在于它可以揭示出进行自然地理环境质量评定的途径。人类为什么要改造自然？我们改造自然的标准又是什么？这是自然地理学者必须面对的问题之一。回答这类问题，首先要知悉人类所要求的自然地理质量最优标准是什么？目前的地理区域中的现实质量又是什么？与这个最优标准的差距有多少？进行改造后这个区域的动态演化趋势如何？等等……，我们认为，改造自然的目的，就是要创造这样一个环境，在这种环境中，一个地区的“初始生产力”可以接近或达到其理论上最大值。距这个理论最大值越近，自然地理环境的质量就越高。围绕达到这个最大值去研究各种自然要素的最优组合，并对自然环境的演化作出预断和模拟，从而使得一个系统中的自然地理熵趋于最小，而系统中可利用的自由能达到最大限度。这就是我们的目的。否则，所谓的改造自然也就失去了准则。

目前世界上有识见的自然地理学家，尽管他们的表达方式及研究的兴趣很不相同，但是都十分注重生物与环境关系的探讨。近年来，迅速发展的环境科学、生态系统、生产潜力研究等，都显示了这种倾向。我们再次强调，评价自然地理环境的优劣，唯一的要看该环境距其应有的最大生产力的差值来定。这个最大生产力就是以生物量作为标志的。在这种意义上来看，研究生物与环境的关系，是自然地理学的又一基本问题，也是改造自然的理论依据。

研究生物与环境关系的第二个意义在于，目前世界上每年约增加 7,500 万人口，也就是说每天平均增长 20 万人。据统计，每秒钟就有 4 个婴儿出生（1975 年的统计）。按照这样的增长速度，到本世纪末，世界人口可望达到 70 亿。人口的增长，必然应当有相应的物质保证，如何发挥地球表面的自然生产潜力，越来越为世界各国所关注。这就从又一个很现实的角度，提出了同一个严肃的问题。

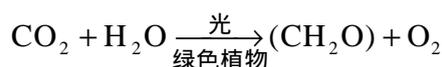
在长时间努力探索后，人们终于发现，整个生物界绝对地依赖于光合作用。在地球上，绿色植物（当然也包括其它一些类似于绿色植物功能的生物，我们用绿色植物概括之）是唯一的将无机物直接转化为有机物，从而转变太阳辐射能为化学能的过程。假如这个过程停止了，任何别的过程都不能恰当地代替它。非光合生物，如庞大的动物界，其生存则依赖于消耗植物而生存。这种互相制约的过程，其速度是如此之高，以致于就目前的世界生物量水平而论，如光合作用不再产生新的有机物来维持和不断补充的话，其食物储存很快就会消耗殆尽，至少高等形式的生命将在 25 年左右绝迹。人类的食物也是如此，要么直接取食于植物，要么取食于直接吃植物过活的动物（如猪、羊等），总之，其生活的基本来源最终归结于绿色植物。就是日常使用的能源（除原子能外），也来自于绿色植物在地质时代的贮存，陆地上如此，在海洋中也是一样。这样由绿色植物、食草性动物、食肉性动物，共同组成了

全球性的完整的食物链，在微生物的作用下，不断地进行着生物循环，成为自然地理面中的一个独立体系，同生物以外的自然环境进行着物质和能量的交换。有鉴于此，人们把绿色植物的生产力，称之为“初始生产力”，也有人称之为“第一性生产力”，它是决定其它一切生物的基础。世界的植物量特别大，约比动物量大几百倍乃至上千倍。只有它的数量极大地提高了，依靠它生存的动物和人类才有了物质基础。这样，世界各国致力于发展农业，就必然要进行改造自然和加强生物与环境关系的研究。

第二节 光合作用及初始生产力

对于绿色植物进行光合作用的认识，经过了许多人的不懈努力才得以完成。最早对植物进行实验的是欧洲一个植物学家，名叫范·海尔蒙脱。他首先把完全干燥的泥土装入一个大的容器内，而后称重，约为180斤。随之在此泥土中栽植一株4.5斤重的柳树，浇灌适当的水。并且为避免其它物质落入，密封了容器中泥土的表面，以后每天都要浇入水分，连续五年之后，柳树生长已达149斤，于是他将容器中的泥土取出晒干，并精确地称重，与五年前植入柳树之时的土壤重量相比，几乎看不出有什么损失。范·海尔蒙脱是个十分严谨的科学家，但从这些观察事实中却导致了错误的结论，他认为柳树增重既然与泥土关系不大，那么这个原因只能完全是靠着水的作用了。1782年，瑞士的一个牧师悉尼比尔，在英国科学家普雷斯特列和荷兰医生英根豪斯实验的基础上，发现了在植物不断放出氧气的同时，显然还伴随着二氧化碳的参与，他说：“植物在太阳光下放出的气体，是植物利用太阳光转化二氧化碳的产物”。后来又有人发现除二氧化碳外，水也参与了这个过程。当然这里水的参与同范·海尔蒙脱认为的植物增重来源于水并不是一个意思。

经过一系列实验后，英根豪斯把植物体的合成总结出一个公式，即我们现在十分熟悉的光合作用公式：



根据现代的观点，植物进行光合作用所使用的能量，是太阳辐射能到达地表后，进行再分配的一个组成部分，它所占的比例不大，同显热通量、潜热通量和地中热通量相比，在能量平衡计算中常常被当作一个可以忽略不计的组分。但是从上边的讨论来看，它所具有的意义却是非常重大的。植物的光合作用是由几个密不可分的连续的过程所组成。它可以简单地归纳为：

1. 光化学过程：在太阳辐射能中，约2900 Å ~ 8500 Å 之间的波长部分，可对光合作用起反应。这比通常所说的可见光光谱范围要稍宽一些，但人们一般却习惯于以可见光部分的范围作为考虑的依据。光以量子态的形式，激发叶子中的叶绿素，这相应于光化学反应。如果一个光子正好击中了叶绿素，则叶绿素中的一个电子即可得到这个光子的能量。这种过程可以表明在玻尔原子模型中：

一个光子（波形箭号）被原子A的一个电子吸收；引起了这个电子的轨道改变（B）；当该电子返回原来的轨道时，光子即被发射出来（C）。这种光子和电子的互相作用，引起了该电子改变其轨道，这就产生了一个受激原子，它具有引起光化反应的能力。各种不同频率或波长的光子或量子的能量是不同的。这个能量的大小正比于频率，服从于普朗克定律，即其能量等于普朗克常数与频率的乘积。我们简单地列出在可见光范围内不同波长的量子能：

波长(Å)	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
电子伏	3.	2.	2.5	2.2	2.	1.92	1.79

特	12	78	0	7	08		
---	----	----	---	---	----	--	--

量子能还有其它的表示单位，我们就不再列举了。这种光化反应在叶子中的作用如同一个循环着的电子泵一样，是进行光合作用的基本动力。

2. 气体扩散过程：它是指空气中的二氧化碳由外部环境经过叶子的气孔进入反应中心的过程。这里影响扩散过程的最大限制就在于叶子的气孔（当然也还包含其它因子的限制）。气孔既是二氧化碳的进入通道，又是水分蒸腾到大气去的通道。在这个通道中，气孔的开闭具有一种瓶颈的作用。叶子上的气孔很多，不同类型的植物在气孔数目上也有很大差异，一般说来，一平方厘米叶片上平均有一万个。近年来不少人专门从事着气孔的研究，对于开闭的机制也作了较深入的探讨，它对二氧化碳通过时的阻力也作了精细测定，并运用空气动力学的方法确定了这种扩散速率。这样植物体本身就产生了一种矛盾的综合，一方面希望气孔开放大一些，以利于二氧化碳的进入；同时又希望气孔闭合一些，以减少水分的过多蒸腾。它正是在这种微妙的状况下进行着精巧的工作。

另外还须补充的是，在二氧化碳从外部大气进入反应中心的同时，水分亦从根部通过茎进入了叶子。众所周知，植物是通过根来吸收水分和养分的，因此，在植物的生存过程中，由于长期进化的关系，使得它的根特别发达，下面举一些例子说明：

表 8.1 一些植物的根系状况

品 种	根		根毛		
	长度 (米)	表面积(平方 厘米)	数目 (10^6)	长度 (米)	表面积(平方 厘米)
大豆	29	410	6	600	280
燕麦	46	320	6	8,050	3,400
黑 麦	64	500	13	16,80 0	7,800

从根部吸收的水分总量中，只有很少的一部分参加光合作用，而其余的绝大部分则在叶子的气孔下边变成水汽扩散到空气中。

3. 生物化学过程：接着就是水分子分解出氧和氢，由氢对二氧化碳进行还原，在其它物质参与下，经过一系列复杂的生化过程，最后生成碳水化合物，完成了整个光合作用。

对光合作用的认识仍然在继续深化。作为一个自然地理工作者，不要求我们全部理解这些过程的细节，只是希望在掌握这些基本规律的同时，与自然地理研究工作紧密联系起来。

近十年来，科学家们发现，地球上的植物大致可以分为两大类，一类具有较小的甚至察觉不出的光呼吸作用，称之为碳四植物（ C_4 植物），另一类是具有较强的光呼吸，称为碳三植物（ C_3 植物）。它们的区别主要在于碳三植物将二氧化碳固定于 3—磷酸甘油酸中；而碳四植物却把二氧化碳固定在四碳二羧酸中，这就是它们命名的根据。

假如把一株 C_4 植物放在一个密闭的容器中，并从中抽取空气样品，将会

看到植物的光合作用不久就会把空气中的二氧化碳用尽。相比之下，放在类似容器中的 C₃ 植物，在二氧化碳浓度从 300ppm 减低到 50ppm 时，就不能再吸收二氧化碳了，如果二氧化碳浓度稍低于 50ppm，则 C₃ 植物不仅不能再吸收二氧化碳，实际上还要释放出来。试验证明，在高光强和高温度的条件下，C₄ 植物具有明显的光合优越性。

玉米、高粱、甘蔗和向日葵等属于 C₄ 植物，它们有低的光补偿点，并且即使在中午全日光下也达不到光饱和点；氧气的浓度也不影响它们对二氧化碳的固定速度；没有过氧化物酶体呼吸，在高温下由于呼吸作用弱，从而增加了光合作用的净积累。而大豆、多数谷物、棉花、菸草、马铃薯等，它们具有高的补偿点，以及一系列不利于净光合产物积累的弱点，这成为影响其光合效率的基本原因。

绿色植物在自身的建造中，其组成物质约 90—95% 来自光合作用产物。一旦人们了解到这个事实，就试图去估算在我们居住的这个行星上，一年到底可以产生多少植物的干物质。进行这种估算的第一人，是德国的化学家李比希 (Liebig)。在 1840 年，他假定地球陆地的全部表面，均由密集生长的草地所覆盖，这样每公顷每年所生产的干物质数量约为 5 吨。在此基础上，他得出了全球陆地一年同化碳的数量为 3×10^{10} 吨。他的这种起过先锋作用的尝试，一百多年来，不断地为后人所追随。例如施洛德 (Schroeder) 于 1919 年，

表 8 2 地球上主要生态系统净初始生产力及世界净初始生产力(据宾卡, 1974 年)

主要生态系统	面积(10 ⁶ 平方公里)	单位面积上净初始生产力 (干重,克/米 ² /年)		世界净初始生产力 (10 ⁹ 干重吨/年)
		一般范围	平均值	
湖泊与河流	2	100— 1,500	500	1.0
沼泽	2	800— 4,000	2,000	4.0
热带森林	20	1000— 5,000	2,200	40.0
温带森林	18	600— 2,500	1,300	23.4
北部森林	12	400— 2,000	800	9.6
木本群落与灌丛群落	7	200— 1,200	600	4.2
热带稀树草原	15	200— 2,000	700	10.5
温带草原	9	150— 1,500	500	4.5
冻原和高山	8	10—400	140	1.1
沙漠密灌丛	18	10—250	70	1.3

极端沙漠、岩漠和冰	24	0—10	3	0.07
农业用地	14	100—4,000	650	9.1
全部陆地	149		730	109.0
外洋	332	2—400	125	41.5
大陆架	27	200—600	350	9.5
江湾及附属海藻	2	500—4,000	2,000	4.0
全部海洋	361		155	55.0
全球总计	510		320	164.0

在李比希计算的基础上，进一步将陆地表面分别处理为森林的、农田的、草原的和沙漠的几种基本类型，他的计算结果是，每年地球陆地表面同化碳的数量为 1.63×10^{10} 吨，约为李比希计算值的一半。后来人们研究的规模越来越大，精细程度也越来越高，特别是近十余年来，全世界在这个领域中有十分活跃的表现，充分证明了这项工作的价值。这里我们引用 1974 年宾卡 (Pianka) 计算的结果。

良好的环境条件，促进了并维持着地球上的初始生产力水平。而较高的初始生产力，又反过来具有维护着自然环境的能力。例如植被的生长不仅需要适宜的土壤，反过来，植被本身又是土壤的保护者，是使其免遭退化的最有效的手段。

由于植被具有保护土壤表面免受雨滴的冲击，减低径流的冲刷，改善了地表的入渗状况，大大防护着风的侵蚀作用，因此被公认是进行水土保持，防止土壤侵蚀的天然屏障。此外，植物的根系帮助固定土壤，熟化土壤，增加土壤的有机质含量，也是一个重要的方面。这里提供两个例证加以说明：

其一，从 1933 年至 1942 年，美国在淤泥壤土上，曾经进行了土壤损失的试验。在 9% 共长 22 米斜坡坡度上种植不同的作物与不同的耕作方式，发现了径流反比于植被的密度以及栽培的频率。土壤损失和作物状况的关系，可以参见表 8.3。连作玉米之所以具有很高的土壤损失量，部分由于种植时频繁地破坏了土壤表土，部分由于行作时留下了相当大的裸土空间。

其二，引述一个在澳大利亚的试验。在新南威尔士和维多利亚两地，对于小麦一休闲这样轮作的情形下，首先设法

表 8.3 1933—1942 年淤泥壤土上的土壤损失

作物	土壤损失 (吨/亩)	土壤损失 (公斤 $\times 10^2$ /亩)
连作玉米	15.0	68.0
轮作：a, 玉米	3.0	27.0
b, 燕麦	1.7	15.0
c, 三叶草	0.8	7.5
连作紫花苜蓿	0.02	0.15
连作青草	0.005	0.05

(资料来源：世界粮农组织，1965 年)

保持土壤不被侵蚀，得出小麦的产量；与此相对比的是，分别模拟土壤的面蚀，使土壤移去表土 7.6 厘米和 15.42 厘米，再来看一看此时的小麦产量。在所有的试验处理中，都接受 20.41 公斤过量的磷肥，其结果如表 8.4 所列：

表 8.4 表土损失对于小麦产量和蛋白质含量的影响

表土移去的深度(厘米)	惠灵顿(新南威士)(1955—1963年,平均)		贡奈达(1955)		
	小麦产量(公斤/亩)	蛋白质含量(%)	小麦产量(公斤/亩)	蛋白质含量(%)	土壤中的氮(%)
0	88.3	11.3	96.7	10.8	0.16
7.6	64.3	10.6	66.0	8.4	0.12
15.42	60.0	10.2	41.3	9.1	0.10

资料来源：莫尔纳 (Molnar, 1964 年)

从以上的例子中，可以看出植物生产力与环境之间的相互关系。对于人工栽培植被是如此，对于自然植被也是如此。这在研究绿色植物的初始生产力时，是需要注意的又一个方面。

第三节 自然生产潜力

植物的生产量不是可以无限量提高的。它作为一个独立的系统，对其所输入的能量和物质（水及二氧化碳和其它化学元素），经过植物体本身的生理生化活动，最后变换为有机成分——碳水化合物，有它自身的特定规律。在这个过程中，它要受到许多固有的限制和许多不必要的限制，这些限制都不同程度地影响着植物生产潜力的发挥。本节所讨论的植物理论生产潜力，就是撇开那些不必要的限制，讨论在固有限制下，植物所能获取的自然生产潜力。这种生产潜力就是植物生产力的上限。在本章一开始提出的，评价自然地理环境质量优劣的标准，即是现实的自然要素组合下的生物生产力，距离这个最大理论数值的大小来定的。我们将这个上限具体规定为：在良好的土壤环境中，在适宜生长的温度范围内，没有水分及养分的限制，有充足的二氧化碳供应，无病虫害及其它自然灾害的威胁等情况下，植物能够获取的最大生产力。显而易见，这种条件下的植物最大生产力，唯一的取决于植物的光合作用效率，也就是只受到所输入能量（包括数量和质量）的限制。

植物吸收的太阳辐射能量数值，在不同的波长范围内是不同的，特别是在叶子中，由于色素的差异、叶子的厚薄、含水量多少、叶子的年龄、所吸收的微量元素的差异等，均影响着它对于能量的吸收。以下是一般条件下的平均状况：

表 8.5 绿色叶子的光谱辐射成分

波长 (μ)	反射 (%)	透射 (%)	吸收 (%)
0.34	9	0	91
0.44	11	2	87
0.51	14	10	76
0.58	14	10	76
0.64	13	9	78
1.0	45	50	5
2.4	7	28	65

对于一个平均性状而言，太阳辐射能穿过绿色植物层的变化规律，自从五十年代初日本学者以及随后许多人的研究，已经基本上得到确认，穿过植物层的辐射能变化服从比耳定律，它类似于光线通过均匀介质（例如水）的状况，只是在选择消光系数上要视不同的植物类型作不同的调整。它呈现出明显的指数规律。

植物可以吸收到的能量，与其自身所能同化的能量，二者之间相差甚远。换言之，有相当大的一部分光能由于植物本身的生理、生态特点而损失了。按照最基本的光化学反应定则——爱因斯坦定律，每激活一个分子去参加反应，必须要使用一个量子。因此，每还原一克分子的反应物，就意味着需要一个“爱因斯坦”（能量单位）的量子值。一爱因斯坦单位的能量可表示成：

$$U = N_0 h\nu = \frac{N_0 hc}{\lambda}$$

U——每激活一克分子反应物需从光能中吸收的量子能，如果恰好符合 1 个量子激活 1 个分子时，那么 U 的单位就是 1 爱因斯坦（简称 1 爱）。 N_0 —

—阿伏伽德罗常数，等于 6.02×10^{23} ，即一克分子物质的分子数；

h ——普朗克常数； ν ——某种单色光的频率； λ ——波长； c ——光速。
上式稍加整理后，可以写成：

$$U = \frac{1.197 \times 10^{16}}{\lambda} \text{ 尔格 / 克分子} \quad \text{或等于}$$

$$\frac{2.86 \times 10^8}{\lambda} \text{ 卡 / 克分子}$$

由于光的波长不同，因此在可见光范围内，一爱的能量为 40840—70000 卡 / 克分子。我们经过一些简单的推算，在每一卡可见光中，平均包含有 18.04 微爱的量子能（1 爱 = 10^6 微爱）。因此，只要我们知道了供给植物的可见光能量是多少，就可以求得它的总量子能是多少。

这个总量子能穿过植物时，经过反射及透射的损失；经过植物非光合部分无效吸收的损失；再经过光化反应时量子效率的限制以及植物呼吸作用的消耗，最后才成为植物的净生产力。关于量子效率问题，至今仍未能有肯定的答案，国际上关于这方面的争论也时起时伏。因为根据爱因斯坦光化学定则，应当是一个量子活化一个分子，但这是理想条件下的数值。在绿色植物的光化反应中，大约激活一个分子需要 8—12 个量子，一般人倾向于取 10 个量子的值作为计算时的参考。

依照上述，我们可以将这些考虑放在一个综合表中。（如每日收入的太阳辐射能为 500 卡 / 厘米²，该数值基本上可以代表一般中纬地区的辐射收入状况），由此对植物最大生产力作一概略的估算：

表 8.6 植物最大生产力的估算

1 每日太阳总辐射	500 卡 / 厘米 ²
2 有效光合辐射（即太阳辐射中的可见光部分，一般估计为太阳总辐射值的一半）	250 卡 / 厘米 ²
3 换算为总量子值（18.04 微爱 / 每卡可见光）	4510 微爱 / 厘米 ²
4 反射损失后的余值（反射按 8% 计）	4149.2 微爱 / 厘米 ²
5 无效吸收损耗（即未被叶子吸收，按 10% 计）	451 微爱 / 厘米 ²
6 光合作用有效量子值	3698 微爱 / 厘米 ²
7 能产生的碳水化合物（所需量子值 = 10）	369.8 微克分子 / 厘米 ²
8 呼吸作用损耗（按 30% 计）	110.9 微克分子 / 厘米 ²
9 净产生的碳水化合物数量	258.9 微克分子 / 厘米 ²
10 净生产力（30 克 / 每克分子 [CH ₂ O]）	78 克 / 米 ² · 天

由以上的概算，绿色植物在其它环境条件都满足的条件下（当然同化面积也要适当），可产生 78 克的干物质。这相当于光能利用率达到 6% 的水平。这是一个相当大的数字，目前全世界陆地植物实际产量的平均光能利用率，不到 0.4%，理论数值超出实际的 10 倍到 20 倍以上。更有不少的计算数据报道，最高光能利用率达到 10% 以上，这是由于所采用的参数不同的缘故，这样与现实的生物生产力，相差就更大了。总之，目前对于植物的光能利用

率，已经有了一个大体范围的估计。它的求取，无疑对于理论和实际都具有很大的价值。

依据这种估算方法，即可以根据各个地区所获得的能量数值，去推定各地的最大生产力，用现实的生产力与理论生产力之比值，可以判定出自然环境的潜力发挥程度，同时，应用自然地理熵的动态变化，可以判定植物生产力的稳定程度，亦可判定自然地理质量演化的趋势。由理论生产力与现实生产力之差异，以及自然地理熵动态指标二者的综合，即可判定并预测出自然地理环境的质量优劣。这就是我们要寻求的结论。

第九章 时间演化规律——自然节律性

地球上一切自然地理成分及自然地理过程，随着时间的变化，并不是杂乱无章的。它们遵循着严格的规则，既不能逃避，也不能背离。我们把自然地理过程随着时间的规律演替，称之为自然节律性。

对于自然节律性，人们并不陌生。许多自然现象包括人类在内，无一不与它发生着紧密的联系。我们举一些最浅显最常见的例子：昼夜的交替，季节的交替，潮汐的涨落，候鸟的迁徙，鱼类的回游，生物钟，太阳的黑子活动，地球上的地磁转换，冰期与间冰期的转换，有机物与无机物的转换……等。有人做过这样一个实验，在一个完全昏暗的房间中，把装在玻璃容器中的果蝇，放在一个放置着 24 个碟子的圆盘上，这个圆盘以每 24 小时转一圈的准确速度在做匀速运动，每小时恰好转过一个碟子，用以记录果蝇的产卵情况。虽然果蝇无法知道什么时候是白天，什么时候是黑夜，但每次的实验都精确地显示出，它产卵的时间都是相同的。与它在正常条件下产卵的时间毫厘不爽。类似这样的事例，真是不胜枚举。

在自然地理研究的范围内，同样有许多人们早已熟知的例子。比如，岩石的风化在白天为热胀，在夜里为冷缩；在热季是热胀，在冷季是冷缩。岩石风化时的作用力在不同的时刻，表现形式是不同的，但却是有规律交替的。植物在白天主要进行以累积自身物质为主的光合作用，在晚上则进行以消耗自身物质为主的呼吸作用；在陆地与海洋衔接处，涨潮时对海岸进行侵蚀作用，同时顶托河口，使得在河口的沉积作用加强，落潮时则会另外表现；季风现象的规律交替，海陆风的规律交替等，以及在地球发展的历史中，冰期与间冰期的转换，常常是造成大规模自然现象变化的直接原因。

在过去，我们对于自然节律性的认识，只是限于对单一的个别的现象罗列，对于它的发生、联系、影响以及规律，并没有加以认真的总结。事实上，这项研究对于自然地理基础理论来说，是又一个重要的方面。我们知道，自然地理过程随时间的变化，或者说在自然地理系统中，能量与物质的输入的节律性状态，势必对于自然地理本身有着深刻的作用。这里我们可以将自然节律性的特点概略地归纳为几个方面：1. 叠加性：在自然地理面中，任何一种成分都经受着各种各样自然节律的共同作用。我们还是以植物作为代表。它既要受到日变化的影响；又要受到年变化的影响；还要受到十一年左右的太阳黑子周期的影响以及更长时期的（有些还未被我们所认识）影响；此外，它本身生长中又有生长、发育、繁殖、衰亡的规律变化。所有这些节律性的表现都交织在一起。对于这些我们可以做个比喻：地球本身处于规律的运动之中。在这个运动的地球上，沿特定的线路奔跑着一列客车也在运动，旅客又在这个客车上作前后的运动、同时作为生命体来说，旅客本身的生理生化活动也在不停顿地进行。不管这个旅客意识到还是没有意识到，他的活动中，肯定不能排除火车的运动以及地球的运动，当然再扩大一些到太阳系的运动。这样我们看出这种运动形式显然是叠加在一起的。由此可以推定自然地理过程中也有类似的现象。这些叠加在一起的运动，对于某一特定对象来说并不是等同的，也不是没有规律的。在其过程中，所有的节律性表现，各自都在不同的水平上起着相应的作用。2. 分级性：自然节律性虽然有各种各样的表现，但是它们的作用和规模还是可以区分得十分清楚的。我们研究自然节律性的一个方面，也就在于识别它们作用的规模以及对于特定对象影响的

程度。高一级的制约着低一级的，低一级的必定留有高一级的印痕。在一个对象的身上，这种印痕层次越多，这个对象也就越进化，而且要求的环境条件也必然越狭窄，因此它的存在也就越脆弱（从自然地理熵的角度来看，随着节律层次从高级向低级的演进，熵值不断变小，有序性的程度增高）。次一级的节律活动，必须首先在符合于高层次节律的前提之下，才能表现出来。这样，表现层次节律越多的物质，它对自然节律的适应状况必然更为巧妙，各自在有限的活动范围内，有机地与高于它的层次之节律精巧地联系起来。如果不符合这样的规则，要么这种成分根本不可能发生，要么就是很快地被淘汰，生物发展史上许多这样的事例，我们见到的不少。

3. 变异性：自然节律本身也是在不断地变化着的，这包含两个方面的意思。其一，倘若高一级的节律发生了变化，势必影响着所有比它级别低的其它节律性，如前面所说的太阳黑子活动本身的变化，不仅影响到生物，也必然影响到地球表面上其它各个成分，这种影响主要是通过输入能量和物质的变化而实现的；其二，通过次级节律性在其演进过程中所产生的反馈作用，从而影响较高一级节律的变异。诸如由于地球上大规模的质量迁移（例如大气的环流，雪的冻结与消融，大陆的漂移，洋流的运动，甚至植物的季节性更替等），都可对于地球的转动施加某些影响，这种影响称之为“摆动”（Wobble）。其中风和气压的改变对摆动的影响较大，而水体转移的影响相对要小一些。杰弗里斯（Jeffreys）大概是第一个估算了水分数对地球摆动影响的人，许多人十分有兴趣地注意到，他曾算出被植物贮存和释放的水分，也参与了影响地球摆动的行列，只不过数量级极小罢了。

一般来说，影响的强度和范围，高一级的节律性总是比低一级的节律性大的多。让我们看一看下面这个熟知的事例吧！作为天文因素的日—地距离，如果发生了变化，那怕是微小的变化，对于地球表面的影响将是巨大的。长期以来，人们在探求地球演化的历史中，对于这种波动就作出了很多有益的研究。

有一种假定认为，在大气上层所接受的太阳辐射能，其变化相应于地球在空间中对于太阳位置的变化，对此所作的基本数学模式，已为天文学家密罗科维奇（Miloukovitch）在1941年总结出来。此模式涉及了地球轴的周期波动，它的岁差以及其运行轨道的偏心率。从这些要素中，他计算了太阳光线到达地球的时间以及相应的地球温度。他并且试图用此同更新世的冰川相关联。这种观点现在已从同位素的研究中获得了相当大的支持，特别是在应用 O^{18} 与 O^{16} 的比率（据在大陆架及冰川岩心的氧18与氧16比值测定）中得到了证据。较低的 O^{18} 数量对应着较低的温度。丹麦人在格陵兰岛上的冰川块中，用 O^{18} 的方法，研究结冰时的气温指出，气温每增高1时， O^{18} 的含量就增加千分之零点六九。据此，在北半球的中纬度，在冰期时的温度约比目前低7℃，而在赤道地区约低3—5℃。虽然许多人对于应用上述的方法解释冰期提出了怀疑，但是却赞许它能够解释某些较小的温度波动。这种节律性带来的自然地理过程的变化，具有翻天覆地的气派，使得地表面上的自然地理成分经历着大规模的改换和变迁，这是很多事实所证明了的。

现在发现地球的自转速度具有长期变化、不规则变化和周期变化等几种类型。引起这些变化的原因也是很复杂的。既有其它天体因素的影响，也有地球本身的物质运动的影响，如地幔对流、大陆漂移、地球内部物质的调整，海平面变化及上面已经提到的因素。在影响地球自转的天体因素中，太阳的

活动（如太阳黑子、耀斑等）的关系尤大。太阳爆发时，能发射一种带电的微粒流，它可以引起地球磁场在短时期内发生改变。一个在磁场中运动着的磁体，当磁场发生变化时，必然要影响它的运动。例如 1956 年 2 月 23 日及 1959 年 7 月 15 日，这两天太阳上出现了特大耀斑，造成了地球自转突然变慢，日长分别增加了千分之九点七秒和万分之八秒。这种变化，不可避免的对于地表面上的各种自然地理过程都发生影响，这是值得很好加以注意的。

在我们的研究范围内，可以初步地把节律性分为三种主要的类型。当然这不是十分精确的分类，只是作为一种提示，以便在今后的研究中，能更科学地加以总结。1. 天文因素所引起的节律性：目前对一些天文因素引起的节律性，尚认识不清，例如有人认为银河系的转动周期与地球上的冰期有对应的关系，这里我们不去否定它，也不去肯定它，待今后更多的事实来作出回答。我们在这一题目下，只叙述一下已经比较清楚的太阳黑子活动规律及由于太阳、月亮对地球的引力所造成的节律作用。

自从公元 1700 年以来，采用仪器观测到的黑子记录，说明太阳黑子变化呈现十一年左右的起伏是明显的。但是一些事实表明，近 200 多年来的观测资料毕竟是太短了，尚未完全揭示出黑子变化的规律，比如就在这段资料以前，即十七世纪的后半叶，太阳黑子曾经一度几乎消失，这与以后资料就不太一致。1922 年，蒙德对此进行了研究。后来又有一些人参考日全食时观测到的光环，高纬度地区看到的极光纪录，树木年轮中 C^{14} 含量的变化等，得出了 1645—1717 年这 70 年中，太阳黑子曾一度几乎消失，并把这 70 年命名为“蒙德时期”。

对应于这个时期，在欧洲曾出现过一些反常的气候状况，如在英国即有许多严寒的记录（据王雷的资料）：

1657—1658 年：地面积雪从 1657 年的 12 月 11 日起，直到 1658 年 3 月 21 日，长达 90 天，是英国最长的积雪日期纪录；

1674 年：在三月份下了 13 天雪；

1684 年：1 月 2 日泰晤士河一直封冻到伦敦桥，这年冬天出现了英国最冷的纪录；

1694 年：12 月 27 日起泰晤士河封冻，持续到次年 1 月份；

1709 年：1 月 7 日泰晤士河结冰，持续了 50 天。

而在我国，这一时期也是近 500 年间最寒冷的时期，特别是在 1650—1700 年这一段为最。在此 50 年当中，太湖、汉水和淮河均结冰 4 次，洞庭湖结冰 3 次，江西省的桔园和柑园，在 1654 年和 1676 年的两次寒潮中，全部冻死。

当然我们也不能完全确定，单一是由于太阳黑子活动变化造成的。但是许多事实说明了，太阳黑子活动，的确对于地球上的各种自然现象有密切的关系。在东非维多利亚湖湖面的水位，自从 1927 年以来，其峰值在每一个黑子 11 年周期中出现两次。其它可资说明的例子就太多了。从树木的年轮分析中，从长期旱涝状况的纪录中，也能发现这种随黑子活动变化的规律反映。

至于月亮和太阳对地球的引力，所造成的潮汐现象，这更是显而易见的，对于潮汐作用的节律表现，前边也有叙述，此处就不再重复了。2. 地球运动特性所引起的节律性：我们知道，地球的基本运动形式为它的公转和自转。这就决定了在地球上必然存在的季节变化和昼夜变化，凡是存在于地球上的物体，在它变化和运动的过程中，不管它本身的状况和性质如何，总是要受到这种节律的支配。例如从能量对自然地理系统的输入来说，我们最能感知

其随昼夜的和季节的变化。太阳辐射能的接收，对于地球上任何一个特定的地方，不可能始终以常量给予，它必然产生着离散的、断续的（白天有，夜晚没有）和渐进的（在白天获得太阳能时，也是从小到大再到小；随季节变化的状况也是如此）状态，人们恰当地把它们理解为谐波函数的形式（如图 9.1）。图中 t 代表时间的演进， A 及 $-A$ 为能量输入振幅的峰值（ $-A$ 意味着能量的负输入）。很显然这是一个正弦图象，它十分符合于辐射能输入的日变化及年变化。它的数学表达式为：

$$r = A \sin \omega t \quad (9.1)$$

r ——输入函数的振幅， ω ——用秒弧度表示的角频率。由此我们看出，地球表面上一切物体，无一例外地都带有这种节律的痕迹。太阳辐射能的日变化是如此，空气温度的变化，植物体温的变化，土壤温度的变化，大气中贴近植物层之二氧化碳含量的变化，水汽蒸发程度的变化，生物物质累积的变化，发生某些地球化学反应速度的变化以及岩石风化的不同表现形式等，都能明显地看出来。

我们还可以考虑以下的事实：

大气本身的增温，主要不是依靠太阳辐射能的穿过，而是依靠地面接受太阳辐射能之后，再进行长波发射所产生的热量和潜热释放，这些才是大气的主要热源。我们可以举出其中之一，即热量通过近地面层的乱流交换作用输送到大气这一途径。这样由于地表面的温度具有节律性（即日变化及年变化），因此使得大气，特别是近地面的大气也具有这种节律性的变化，只不过这种变化的振幅较地面的要小，变幅发生的时间也相应落后而已。计算它们的公式这里也不再列出了。总之这种从地面向上的温度变化振幅，随高度依指数定律而衰减。根据在法国巴黎的爱佛尔铁塔各个高度的观测纪录可以证明这一结论。

向上的传递是这样，向地面以下的传递也是如此，同样具有明显的周期性规律，直至自然地理面的底部为止。因为在自然地理面的下限，已经显示不出温度随日变化及年变化的痕迹了。这里我们引用 1963 年在石家庄的观测结果。如果以 x 代表地表以下的深度，并分别取地表（0 厘米）、5 厘米、10 厘米、15 厘米、20 厘米、40 厘米、80 厘米和 160 厘米，用 R_0 代表在地表处温度的日较差， R_x 代表在深度 x 处温度的日较差，随意取五天的数据为：

温度 () 日期	深度 (厘米)	0	5	10	15	20	40	80	160
4月 11 日		18.2	7.5	5.0	3.4	2.8	0.2	0.2	0.1
12 日		10.6	6.8	2.8	1.8	1.3	0.2	0.1	0.0
13 日		9.4	3.7	1.8	1.7	0.5	0.4	0.1	0.0
14 日		10.0	2.9	2.1	1.6	1.1	0.5	0.1	0.0
15 日		4.6	2.4	2.1	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0

据此资料，经过进一步的整理，可以得出反映节律性的明显结果来：

日期	R_0/R_0	R_5/R_0	R_{10}/R_0	R_{15}/R_0

4月11日	1.0	0.412	0.275	0.187
12日	1.0	0.642	0.264	0.170
13日	1.0	0.394	0.191	0.181
14日	1.0	0.290	0.210	0.160
15日	1.0	0.522	0.457	0.152
平均	1.0	0.452	0.279	0.170
日期	R_{20}/R_0	R_{40}/R_0	R_{80}/R_0	R_{160}/R_0
4月11日	0.154	0.011	0.011	0.005
12日	0.123	0.019	0.009	0.000
13日	0.053	0.043	0.011	0.000
14日	0.110	0.050	0.010	0.000
15日	0.085	0.043	0.022	0.000
平均	0.105	0.033	0.013	0.001

这种关系呈现一条十分规律的曲线（图9.2），可以用这样的公式加以表述：

$$R_x = R_0 e^{(-\beta x - \alpha)} \quad (9.2)$$

式中的 β 和 α 均为常数，它们分别是 0.9602 和 0.0396。

以上我们仅仅介绍了气温及土壤温度对于这种节律性的反映。类似于这种表现的自然地理要素和现象，能够举出更多的实例。这里我们不得不加以省略。

同时，我们经常可以看到，树木年轮的变化，珊瑚体的规律变化等，也能清楚地反映出这些节律性。在不少的著作中曾举出一种淡水浮游生物，随着日变化在水中具明显的垂直节律变化。

3. 生物自身特性所形成的节律性：无论是植物也无论是动物或微生物；无论是一年生的还是多年生的；无论是草本的还是木本的，它们在节律性的表现上，是另外一种层次。它们总经历着出生、成长、衰老；接着子代又重复着同样的过程。周而复始，呈螺旋式的前进。它们既要受上述二类节律所影响，又有自身活动的节律。我们知道，植物的生长，总是经历着不同的生育阶段，它随时间所表现的历程，符合于罗吉斯蒂曲线即 S 形曲线的特点，这种 S 形曲线简单地描述及它的一般数学表达式为：

$$\frac{dW}{dt} = (r + sW)W \quad (9.3)$$

式中 W 代表生物的生长量； t 为生长的时间； r 代表增长率； s 代表与生物生长量 W 有关的阻滞参数。

其中的生长过程可以用株高，植物干重增长，以及其它的生物量来表示。当然我们再细分下去，对于生物体结构的基本单元的生命过程，除开要服从以上所有节律性的作用外，又有自己独特的随时间发展的形式。例如，关于生物钟的研究就涉及到这个部分。这些，对于自然地理研究来说，就不再去考虑了。

以上是三类主要的节律性表现。它们之间不是孤立的，也不是等同的，作用的范围和表现的形式都有各自的特点。自然节律性的研究就是建立它们

之间的统一关系。很显然，它们作用的顺序是天文因素—地球因素—生物因素。根据这些，我们可以去判断一些随时间演化的成分属于何种范围。例如放射性元素随时间的蜕变规律，可以容易地判断出来，它不属于生物因素的范围，也不属于地球因素的范围，它是属于宇宙因素范围的。因为它的蜕变规律，不受日变化和年变化的影响；相反，它的变化过程所引起的地球内部热历史的演进，却能影响地球本身的运动。因此，它应当是属于比地球运动形式更高一级的节律范围内。事实上，这个判断也已经得到了证明，它牵涉到地球的起源问题。而这个问题恰好提供了证据，即地球形成本身所具有的宇宙因素性质。而且业已证实，地球的物质和陨石物质是同源的。人们正是根据这一点来推算地球的年龄。

目前，对于自然节律性的研究，还仅仅是一个开始，尚未建立成熟的方法，没有总结出基本的规律，它对自然地理的意义，认识还不透彻，它的研究价值也没有得到应有的评价。但作为自然地理研究的一个方面，在今后应当引起相当的注意。诸如指数衰变规律、谐波形式及罗吉斯蒂曲线等随时间变化的各类节律表现，大量存在于自然地理系统之中，并共同交联于自然地理动态演化的结果之内。

第十章 空间分布规律——自然地带性

第一节 自然地理地带性

为了阐明地球上产生自然地理地带性的原因及其规律，我们首先作出下面三个基本假设，以帮助我们考虑在理想状况下，自然地理面上，必然应当出现的空间分布特征。

假设一：地球的自转轴与其绕太阳公转时的轨道面完全垂直，而不是象现在那样所具有的二十三度半的倾角，这时太阳光线永远直射赤道；

假设二：地球表面上的物质组成一致，既不存在着大陆和海洋这两大体系的差异，也不存在着物质特性方面的其它微小差异，使它变成一个连续的、均匀的和具有相同的物质组成的行星；

假设三：地球以海平面为基准，完全摒弃地形的起伏，变成一个完美的、光滑的几何球体。

人们首先会认为这种假设是离奇可笑的，而且与现实状况相去甚远，似乎根本没有什么讨论的意义。然而当我们冷静下来去思考的时候，就会从中发现，现实世界中的自然地理地带性规律，正是发端于这种基本假设的理想状态之中。只不过在真实的情况下，将这种理想状态所表现的规律加以复杂、加以畸变、加以模糊、加以隐藏、或者说加以破坏而已。如果我们洞悉了在理想状态下形成空间分布规律的基本原理，再进一步去把握实际情况下的变异，就可能得出更好的更符合现实的结论来。

谁都承认，在上述假设的条件下，自然地理地带性就会具有十分明显的表现，它可以呈现出数学上的精确表达，与纬度分布有很好的相符。前面的章节中已经述及，地球上各处所收入的太阳辐射能，取决于太阳的位置（假定日地距离不变）。而太阳在空间的位置（如以地球为基点），可用两种球面坐标系来确定。这里不去详论它的一般知识，也不去引证和推求球面三角形的基本公式。总之，我们可以很准确地计算出来太阳高度的数值，它是由地面观测处的纬度、太阳时角所规定的，如果选择在春分或秋分时，而且恰恰在正午时刻一刹那，则基本符合于我们所做的第一个假设。这时的太阳高度的数值仅仅随纬度的变化而变化，而且它的变化很简单，在赤道为 90° ，而在两极分别为 0 ，如果永远保持着这种固定的位置，则昼夜长短也不随季节而变化。由此致使太阳辐射能在地表面的分布同样也变得十分简单。这种十分简单的分布规律，却是形成自然地带性分布的雏形和根本原因。

事实上，太阳不是永远处于春分和秋分时的位置，而且也不都是处于正午的时刻，因而使得辐射能的分布趋于相当的复杂，这种复杂的状况不需要多费篇幅去加以描述。尽管真实状况下，地球各处的太阳辐射能发生了变化，但如其它两项基本假设条件仍然成立时，对于自然地理地带性的影响也还不算是太复杂，它仍然可以使地球表面具有明确的空间分布规律性，或者说仍具有理想状态下的基本轮廓，只不过使得各个自然带的衔接处发生重叠或呈现复杂的周期性变化而已。也就是说，使得自然带的界限变得更加模糊了，但整个地带的雏形还是十分易于确定的。

接着我们来讨论第二项基本假设。在地球形成后的一段时间内，我们确切地知道，地球表面上并没有水。只是在其演化过程中，才逐渐地产生了水，并最后形成占地球表面积达 71% 的水体。从水的出现到近乎常数的大规模水

体的形成，对于理想的自然地理地带性的变化，有着极为重要的意义。水体的基本作用是什么呢？由于水与陆地物质在性质上的巨大差异，以及水对于运载能量方面极其活跃的特性，因此，它能使地球表面改换和修正原来无水时太阳辐射能的收支状况，而且它的巨大蓄热功能，使其在缓和能量输入输出之时的速率，迟滞太阳辐射能迅速返回空间等方面，尤有重大的作用。特别因为它是产生生命的发祥地，又是地球上生物存在所必需的基本条件，使得太阳能有了与以前完全不同的转换方式。这样一来，地球表面不光是作为能量流通过程中的中继站，而且也逐渐形成了能量的贮存所。不应忘记，植物本身也对在理想状态下地带性规律的变化起了一定的影响。经进一步分析后即可发现，即使单独在陆地上，组成它的物质也不是相同的，仍然具有各种各样的差异，无论是这些物质的物理性质或化学性质，均能明显地看出其不同来，当然它们对于能量的作用不如海陆差异那么显著，但也不是均匀一致的，因此它们各自对于太阳辐射能的收支、反应及转换也是不同的。

首先是由于海陆的差异，再次是由于有机体与无机体的差异，第三是组成地表面物质间的其它差异，由此而引出的对于太阳辐射能作用的巨大改变，因而否定了我们的假设二，其后果就是使得原来能量沿纬度分布时的理想规律，发生了畸变，大大增加了原来空间分布的复杂程度。

现在让我们来讨论第三种状况。从地球形成的一刹那开始，地球内部的物质就经历着强烈的运动，这种不间断进行着的内力作用，无论是水平运动还是垂直运动，都造成了地球表面的高下参差，纵横起伏，破坏着作为光滑完美的几何球体的基本假设。或者可以更进一步地说，这种所谓完美的几何球体一天也没有存在过。尽管以太阳能为主要动力的外力作用，对地表也同时进行着不间断的夷平和剥蚀，但地球动力学的活跃，地表面水平运动和垂直升降的规模宏大，依然使得地球表面有如我们目前所处的这种真实状况。它推翻了我的假设三，但同时它又是假设三的深化，即由于地表面的高低凹凸，因而对于太阳辐射能量和海陆间的水分交换（也包括陆地上各局部地区的小规模物质交换），起到了强烈的再分配作用，把本来已经十分复杂的地带性分布规律，变得更加错综了。

现在让我们清理一下自己的思路：建立在基本假设上的地带性规律，其产生的唯一原因就是太阳能量在一个特定的理想地球体上的分布规律所造成的，如果不是地球，而改换另一个类似的星体，照样也应当表现出这个规律，当然这还取决于距离太阳的远近和星体本身的大小、形状等特征。这种理想的地带性分布规律，首先由于太阳直射地球的位置在南北纬二十三度半之间的范围内，有规律的做周期变动，因而使得原来十分确定的地带性界线也具有南北摆动的变化，从而模糊了原来的全球连续分布的状况。如果仅仅是这样一个变动，对于地带性的划分仍然可以看出清晰的规律及明显的沿纬度带分配的特征，只不过与原来相比出现重叠和周期交替而已。因此，在以后的讨论中，事实上将允许我们不再过多地考虑这个因素。但是地球表面上物质组成的不均一，特别是海洋和大陆两大体系的存在，通过对太阳辐射能分布的改换以及对于不同区域间物质交换的程度，频率和方向的干扰，就使得地带性规律发生了很大程度的变形，过去有人称这种作用而致的地带性转换为“经向地带性”，其实质不过是由于地球表面物质不均一，因而使得能量和物质进行重新分布而致。这种形式上变换的根本原因，可以归结到以水分为代表的物质分布对能量分布的变换上。它在影响的规模上只能是理想状况下

纬度地带分布的次一级形式。在这种已经复杂了的分布形式上，如果再加上高度位置的起伏变化，对于原来的能量分布与水分的作用进行了更进一步的再分配。从而形成了现在我们所看到的自然地理空间分布。我们从基本假设逐渐推演到真实的状况，可以看出这是对于理想状态下自然地理地带性的丰富和发展。在地球表面上可以寻找出这样一些地区，它愈是接近我们的基本假设条件，在其上的地带性表现就愈明显。如西伯利亚平原就具备这种代表性。俄国的道库恰也夫能够明确提出地理地带性的规律，与能够显现地带性规律的基本条件是不能分开的。但是，我们认为，由于地表面的真实状况，距离我们的基本假设相去甚远，所以在全球找出完整的接近理想的规律性分布是相当困难的，而仅有的比较明显的表现，也不过是理想地带性规律分布的“影子”而已。从能量的输入及分布这个关键入手，可以得出富有成效的结论来。

长期以来，地理地带性问题是讨论得比较多的一个自然地理基本问题。有人从广义上去看，有人从狭义上去看，更有人将纬度地带性规律作为地带性规律，而将由于海陆原因（实际上就是物质组成的原因）及地形原因而引起的畸变所表现出的自然现象作为“非地带性”看待。总之，诸家蜂起，众说纷纭。近年来，人们逐渐认识到，形成地带性规律是由于地表热量与水分的不同组合所致，应该说，这已从现象向本质深化了一步，但仍然无法将全球的真实分布，在特定的基础上有机地统一起来。内在联系尚未得到认真的发掘。比如说，人们普遍承认的纬度地带性与垂直地带性，为什么在自然现象上有许多相似之处。地球上热带与亚热带地区的高山，常可在水平距离不到一百公里的范围内，从基带向上的几千米高度上，刻印着从低纬到极地几千公里水平距离上所看到的自然地理景色。现象的相似，不足以作为理论的凭据，这就要求自然地理工作者深入研讨二者之间统一的本质。这样就使得近来关于地带性规律的研究，逐渐进入认识本质的阶段。

将地带性形成的基本原理廓清之后，即可完满地解释自然地理成分在空间联系上的统一性、在形成原因上的一致性，并已初步地建立了这种揭示本质的理论模式。今后的一个重要任务，就是按照地表面的真实状况，在理想条件的规律下进行引伸、完善和深化。我们知道，近代物理学的规律不少是建立在理想条件下的理想模式，如理想气体、热力学中的熵和其它一系列定律等，它们成为研究特定对象的基础和依据，这些成功的范例，应值得地理学工作者很好的借鉴。

以能量分配的差异为基础的自然地理地带性规律（我们把水分的功能，主要归结为对于太阳辐射能的不同分配上，当然水分除此而外尚有其它方面的独特作用，尤其对于生物界来说更为明显，但从自然地理地带性研究的观点出发，首要的和基本的作用仍归结到它对能量的分配上），对于地表面各种自然地理成分和自然地理过程，必然起着控制的作用。其中反映这种作用最敏感的成分，就是植物。植物的正常生长发育有它自身的节律，但是，它必须与外部的环境条件密切的关连在一起，受制于对它所输入的能量和物质。因此，植物与环境之间在整个自然地理面具有极为明显的协调性。许多人都承认这一点：即植物可以作为输入能量和物质的综合指示体。

从地带性研究的历史来看，首先就是从植被沿纬度分配的规律开始的。在十九世纪，世界知名的德国科学家洪堡德，就已经确定了气候条件与植物地带性之间的依存关系。在考察中得知，植物从赤道向两极的推移中，可以

出现比较规律的地带性分布。但在实际的地球表面情况下，这种规律的确也遭到了破坏，使得它的特定分布在一个三度空间上得到了复杂的反映。如从平面上来看（为便于分析起见，首先考虑水分条件均一的情形），在自然地理面上随着从低纬到高纬能量分布的差异，植被呈有序的从热带雨林、常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林的交替改变，一直到树木消失的边界，最后出现永久冰雪带；如果再从垂直高度上的分布来看，在热带的高山，会依次向上出现类似于水平分布上的变化，只要山有足够的高度，最后它也会出现树线（即树木分布的最高界线）直到高山冰雪带。由此，我们首先建立它们之间的统一关系。

下面选用了对于环境条件反应敏锐的树线高度作为例子之一，列出这个高度（垂直性）在不同纬度（水平性）的表现（这里尽管注意到水分状况的相近，但是出现水分差异也不影响对此规律的阐释，而且在研究的下一步，必然提出水分状况对于这种分布的订正问题），我们能发现一种很有价值的规律，这不但因为它们之间所具有的可比性，而且由于从此得出了垂直高度上与水平距离上联系的纽带，对于我们深入揭示地理地带性的本质具有特别重大的意义。关于树线高度的数值，由于所采用资料并非出自一处，难免有各种各样的误差，但我们主要分析它们所代表的趋势，因此绘于图

表 10.1 我国湿润与半湿润区域的树线高度与纬度之关系

序号	地点	纬度	树线高度 (米)
1	玉山	约 23° 30'	3,600
2	珠穆朗玛峰	约 28°	3,900
3	滇西北山地	约 27° 30'	3,800
4	小凉山	约 28°	3,500
5	南迦巴瓦山	约 29° 30'	3,800
6	喜马拉雅山(东段)	约 29°	3,800
7	川北山地	约 32°—33°	3,800
8	太白山	约 34°	3,500
9	祁连山东段	约 38°	3,200
10	吕梁山	约 38°	2,700
11	贺兰山	约 38° 30'	3,100
12	小五台山	约 40°	2,500
13	长白山	约 42°	2,100
14	大兴安岭北部	约 52° 30'	1,100

上(见图 10.1)。

如果我们以 H 代表树线的海拔高度，用 ϕ 来代表地理纬度，则经过计算

后，二者呈现下述关系：

$$\log H = -a + b \quad (10.1)$$

其中的 a 及 b 分别为常数， H 与 之间的相关关系也是比较好的（资料限于北纬 20° 到 $52^\circ 30'$ ）。

1976 年，日本的一位地理学家在调查了南美安第斯山的现代雪线及更新世的雪线后，加上对于先后从 1950 年到 1971 年间各国学者，经过八、九次考察结果的总结，最后他获得了 21 项数据，总结了从北纬 11° 穿过赤道直到南纬 $63^\circ 20'$ 各纬度上的雪线高度，作了很有价值的资料积累工作。我们知道，雪线和树线一样，也是环境条件的指示计，应当把它看成是树线之上，反映能量变化的又一个明显界线。我们根据这些资料，进行了整理分析，得出了与树线高度随纬度的分布十分近似的规律，只是在靠近赤道的两侧，发生了马鞍形的变化（根据东亚地区穿过赤道的树线高度变化，同样呈现如美洲雪线的那种变化），关于这种现象的解释，要等到全部掌握了分析数据后，才能作出判断。

我们再次引证美国纽约州立大学地理系教授冯莱培尔关于雪线高度随纬度分布的资料，他应用盖泰利（Gentilli）关于全球各纬度雪线的典型海拔高度，列成下页表 10.2。

如果将雪线在各纬度上的最低高度准示在图上（见图 10.2），可以看出，与所作出的树线高度分布图有相当精确的一致表现。

表 10.2 在全球不同纬度上的雪线高度分

	纬度	最高高度 (米)	最低高度 (米)
北纬	80—90°	50	0
	70—80°	1,000	300
	60—70°	2,000	550
	50—60°	3,200	800
	40—50°	4,100	1,400
	30—40°	6,100	3,500
	20—30°	6,000	4,900
	10—20°	4,700	4,600
	0—10°	4,600	4,500
	南纬	0—10°	5,600
10—20°		6,100	5,000
20—30°		6,100	4,600
30—40°		4,500	1,600
40—50°		2,200	700
50—60°		1,200	500
60—70°		0	0

现在我们着手建立在不同纬度上，这种特定的界线（不管是雪线，还是树线，或者其它的可比界线，如针叶林与混交林界线，混交林与常绿阔叶林界线等）与能量之间的关系。为了叙述上的方便，暂时仍然以树线的分布作

为主要的例子。在先前的章节中，我们已经论证了温度的本质意义，而且知道用它作为衡量净能量收入数量的标志，在近似考虑的条件下是可行的，因此在目前普遍缺乏太阳辐射能资料的状况下，作为趋势分析，引用温度资料作为表征是无可非议的。

十分清楚，低于临界温度的时候，树木是不可能生长的，因此树线高度本身必然是可以生长树木的临界温度处（对水分的要求我们已经作过假设了）。同时又知道，温度从海平面向上，随着高度呈规律性的递减，尤其是在无水汽影响（或者考虑水汽含量为常数）时，这种规律更为确定。下面引用一个比较新的资料：

日本学者 Yoshino 在他 1975 年发表的专著中，对于标准大气状况下，大气的压力、温度、密度等随着高度的变化，列出了一个表（见表 10.3）。

从赤道水平地到达两极，气温的分布也如同高度分布那样呈现递减的特征。这里着重指出的是，尽管这种递减的趋势是相似的，从能量平衡的角度来看，其根源也都是由于能量的状况发生变化而引起的，但是必须注意到，造成二者发生温度递减的基本方式是不相同的。这里引用的是温度沿纬度的分布状况。

如果把温度视做一地能量收支因素综合作用的一个结

表 10.3 大气压力、温度和密度的垂直变化以及气温每改变 1 时气压的变化

海拔高度 (米)	标准大气			气温改变 1 时 的气压变化(毫 巴)
	压力 (毫巴)	温度 ()	密度(公斤/立方 米)	
0	1,013	15.0	1.2249	0.0
100	1,000	14.4	1.2083	0.1
500	955	11.8	1.1626	0.2
1,000	899	8.5	1.1071	0.4
1,500	846	5.3	1.0538	0.6
2,000	795	2.0	1.0024	0.7
2,500	747	1.3	0.9531	0.9
3,000	701	-4.5	0.9054	1.0
3,500	658	-7.8	0.8598	1.1
4,000	616	-11.0	0.8159	1.2
4,500	577	-14.3	0.7737	1.3
5,000	540	-17.5	0.7331	1.4
5,500	510	-20.8	0.6943	1.4
6,000	472	-24.0	0.6571	1.5

果，那么它可以成为联系垂直地带性与水平地带性的中心环节。我们从上面推算的树线高度随纬度分布以及雪线高度随纬度的分布中，已经看出了在其中既包含着垂直的因素，亦包含着水平的因素，这就是说，任何一个地方，只要达到相应的高度，就一定会按照特定规律出现各种应该出现的临界限度。倘若此地区是平原，海拔高度很小，不存在出现树线或其它界线的真实高度，我们既有必要也有可能去想象在上空某一高度处应当是某种自然类

型分布的界限，这样在全球即能建立起沿纬度分配的水平地带性及沿高度分配的垂直地带性

表 10.4 沿纬度的平均温度

	纬度	一月 ()	七月 ()	年平均 ()	年较差 ()	陆地占有的比率 (%)
北纬	90°	-41.0	-1.0	-22.7	40.0	—
	80°	-32.2	2.0	-17.1	34.2	20
	70°	-26.3	7.3	-10.7	33.6	53
	60°	-16.1	14.1	-1.1	30.2	61
	50°	-7.2	17.9	5.8	25.1	58
	40°	5.5	24.0	14.1	18.5	45
	30°	14.4	27.3	20.4	12.6	43.5
	20°	21.9	28.0	25.3	6.1	31.5
	10°	25.8	27.0	26.8	1.4	24
	0°	26.5	25.7	26.3	0.9	22
南纬	10°	26.4	23.0	25.5	3.4	20
	20°	25.3	19.8	23.0	5.5	24
	30°	21.6	14.5	18.4	7.1	20
	40°	15.4	8.8	11.9	6.6	4
	50°	8.4	3.0	5.4	5.4	2
	60°	3.2	-9.3	-3.2	12.5	0

	70 °	- 1.2	- 21. 0	-12.0	19.8	71
	80 °	(- 4.3)	(- 28. 7)	(- 20.9)	(24.4)	100
	90 °	(- 6.0)	(- 33. 0)	(- 25.0)	(27.0)	(100)

之间的空间联系模式。当然如果进而考虑到水分的作用时，事实证明，它并不会改变这种基本模式的实质意义，只不过需将原来的空间联系模式加以必要的订正而已。

由此，纬度及高度 H 实质上均以温度的隐函数出现（倘若今后能量的资料充分时，相信用它来代替温度，将能出现更加准确的结果）。根据福拜斯（Forbes）对于北半球的计算，在海平面（即海拔高度为 0 米）上温度随纬度变化的方程式，可取以下的简单形式：

$$T = m \cos^2(\phi - d) - P \quad (10.2)$$

T 为处于海平面高度时，纬度 ϕ 处的平均温度；其中 $m=44.9$, $d=6.5^\circ$, $P=17.8$ 。

结合公式 (10.1) 和 (10.2)，可以推导出

$$\phi = \arccos \sqrt{\frac{(T_\phi + P)}{m}} + d \quad (10.3)$$

将 ϕ 值代入 (10.1)，即得

$$H = \exp[b \cdot \arccos \sqrt{\frac{(T_\phi + P)}{m}} + c] \quad (10.4)$$

式中 $c=d+a$ (d 值及 a 值均见前)。我们已经提及，T 显示了在 $H=0$ 时随纬度变化的能量状况，这样植物树线的分布高度 H 就与海平面高度上纬度 ϕ (借助于能量的隐函数) 建立了确定的关系。同理，如果改用全球雪线高度也可建立一组与海平面高度上纬度 ϕ 之间的联系，以此类推，用其它界线也都相应地与 ϕ 建立类似的联系。如果有足够的资料能建成一系列的确切关系，那么就具备了建立统一的空间数量联系的基础。

从以上的分析和大量的事实中，终于发现了这样一个基本规则，即垂直地带性与水平地带性是以同一个根本要素——能量，将其联系起来的（需要时刻记住，暂且主要将水分考虑作为影响能量分配的因子）。并且它们之间也一定能建立精确的关系。这种关系可以理想成为（见图 10.3）。

类似于这种图式最近已见诸于某些著作，但关键问题是建立 H 与 ϕ 之间联系的确切函数形式。即如公式 (10.1) 所示，它至多只是反映了上图中的一条曲线，其它曲线所对应的各种函数关系，还需根据大量的实测资料，并进行分析后才能初步完成。例如我国台湾省的玉山山地植物带与我国东部水平植物带之间的大致对应关系为：

	热带	常绿阔叶	混交林	暗针叶林	树线
--	----	------	-----	------	----

	雨林 季雨 林	林			
玉山高度	< 500 米	500— 1,800 米	1,800— 3,000 米	3,000 米以 上	3,600 米
水平分布 纬度	23— 25° N 以南	25—33° N	33—50° N	50° N 以北	约 70° N

如果这可以作为例子时，它也只是给出了图 10.3 中纵坐标与横坐标上的数值，即 H_1, H_2, \dots, H_n 和 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ ，单是这两个边界数值还不能决定它们之间联系的曲线形式，仍然要靠在各个不同纬度上该界线的相应高度表现来加以填充，这必须有大量的考察资料才能作到。现在已经应用的遥感技术手段，有可能比较迅速的实现这一要求。即令求出了这种函数形式，也正如在上面再三强调的那样，它也是暂时撇开了水分因素作用时较为简单的模式。因而将它们进一步推广到真实状况下的联系，则需制定出水订正后的更为复杂的模式。

现在假定植物在水平和垂直两个方向上，分布的各种界线，符合于公式 (10.1) 所表达的函数形式，那么它们之间的空间联系即为：

$$\begin{cases} H_1 = e^{a_1\phi+b_1} \\ H_2 = e^{a_2+\phi b_2} \\ \dots\dots\dots \\ H_n = e^{a_n\phi+b_n} \end{cases} \quad (10.5)$$

$$\text{这样 } f_n(\phi) = H_n = e^{a_n\phi+b_n} \quad (10.5)$$

上式可以看作是垂直地带性与水平地带性联系的基本表达形式。这样图 10.3 中的 S_1, S_2, \dots, S_n ，分别表示着某一带的空间分布范围。换句话说，就是它们在地球上特定范围内应当占据的空间。这个空间可以用它们各自所显示的面积来表达：（在平面图上为面积，在立体图上为体积）

$$S_i = \int_{\phi_0}^{\phi_i} f_i(\phi) d\phi - S_{i-1} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (10.6)$$

上式综合表达了在各个不同的水平纬度上，相同的自然带应该占据的空间范围。如果要变成体积，还要在另外一个方向上（即沿着经度方向）再进行一次积分。至此，我们初步完成了垂直地带性与水平地带性的空间统一，也是对于本章开始时基本假设的丰富。这种理论推求导出了它们之间空间联系的一般形式。原来认为的水平地带性与垂直地带性，其实质是同源的，它们所依赖的基础，即是对于系统所输入的能量状况。

进而考虑水分的影响时，问题立即变得复杂起来。截止目前，这项工作尚未得出完美的结果。但是这个更加符合真实情况的复杂订正，迟早总是要实现的。举例来说，在我国喜马拉雅山的东段，山的南侧和北侧，二者在垂直带分布上相差就很悬殊。如森林线和雪线的高度，南侧比较低，北侧比较高，相差竟达数百米；在其它相近纬度的地区，亦发现有类似的现象，如天山（约北纬 43°）与白头山（约北纬 42° 30'）相比，天山的树线为 2,700 米，白头山仅为 2,100 米，日本的富士山（约北纬 35 度多）与我国的太白

山(约北纬 34°)相比,富士山的树线为 2,500 米,而太白山的树线高达 3,500 米,每个相同纬度上的雪线也有最高和最低的差异(见表 10.2),看来这种差异是普遍存在的。但是这种差异的表现,如果采用其所处位置的水分状况进行比较时,即可以得出近乎实际的结论。于是就显示出了水分对于地带性畸变的强大作用来。我们已经述及,详近推导水分状况对于地带性的变换,以及它对于垂直地带性与水平地带性空间联系的影响,需要专门进行研讨,本书只在此提出,尚无可能去作深入的叙述。

这里只能一般地把某些初步结果及原理介绍给读者,人们可以从中看出我们反复强调的水分因素是何等的重要。此处仍然暂不涉及水分对生命的关系(并不是不重要,相反,它在另外一些场合讨论时,常常是首先考虑的因素),而只是从其对能量的转换上去深化我们开头的基本假设。

用毫巴来表示的水汽压(e),与以每立方米的克数来表示的水汽浓度(x),二者之间有一简单的数量关系,如取水的分子量 $M=18$,则

$$x = \frac{10^2 e M}{RT} = \frac{217e}{T} \quad (10.7)$$

R 为气体常数, T 为绝对温度(K)。水汽分子量与空气分子量之比率 = 0.622,可以写成:

$$x = \frac{e}{P-e} \quad (10.8)$$

ρ_a ——空气之密度, P ——单位面积上的空气压力。控制水的蒸发使其进入一个固定容积的空气中,水汽的浓度最初随时间增加,一直达到空气的饱和,此后蒸发由于动态平衡的缘故而告停止。在饱和空气中所携带之水汽数量与其所处的温度有关。这样在饱和时相应的水汽压力为:

$$e_s(T) = x_s(T) \cdot T/217 \quad (10.9)$$

我们知道, $e_s(T)$ 及 $x_s(T)$ 分别代表在温度 T 时的饱和水汽压及饱和水汽浓度。从 0 增加到 30 时, e_s 的增加大约是:每增加温度一度,即增加 6.5%。这个数值的增加是很显著的。由于 e_s 随温度增加的速率,在自然地理研究中有着重要的价值,因此我们要特别提到它,在今后讨论对自然地理地带空间分布的订正时,我们还要用到它。

空气和水汽混合的密度,可以用单位空气容积中,空气与水汽的重量和来表示。假如 P 代表混合后的总压力,而 e 代表水汽之压力,空气的分压则为 $(P-e)$,而它的密度为 $(P-e)M_a/RT$,类似的水汽密度为 eM_v/RT (M_a 与 M_v 分别代表空气的分子量和水汽的分子量),其混合之密度为:

$$\begin{aligned} \rho_m &= \frac{(P-e)M_a}{RT} + \frac{eM_v}{RT} \\ &= \frac{PM_a}{RT} \left[1 - \frac{e(1-\epsilon)}{P} \right] \\ &= \rho_a \left[1 - \frac{e(1-\epsilon)}{P} \right] \end{aligned} \quad (10.10)$$

ρ_a 为干燥空气的密度(在相同的温度 T 时)。

注意到在相同的温度之下,湿润空气的密度比干燥空气的密度要小,表达它们的这种差异时是用“虚温”来计算的。这在自然地理垂直分带的分布规律中,对于由水分不同而引起的差异订正时,具有很大的意义。

含水汽多的空气与含水汽少的空气，在相同温度下，其压力变化有很大的不同。换言之，假设二者的压力相等时，则它们表现出的温度状况就有很大的不同。这就是说，在压力相同的条件下，含水汽多的空气温度要低，含水汽少或干燥空气的温度要高，这样才能将二者维系在一个相同的等压面上。事实上，在地表上空的同一高度上，气压的变化甚微，尤其在十分相近的地方更是如此，因而在此种压力变化很小的情况下，温度差异将主要视含水汽的多少来定。这就是“虚温”的基本表达：相同压力下，湿润空气的温度总是比干燥空气的温度为低。在虚温 T_v 时，干燥空气才能具有与实际温度 T 时湿润空气所具有的同压力，即

$$T_v = \frac{T}{\left[1 - (1 - \epsilon) \frac{e}{P}\right]} \approx T \left(1 + 0.38 \frac{e}{P}\right) \quad (10.11)$$

从一般描述上，喜马拉雅山南坡为季风作用之迎风坡，空气比较湿润；而北侧为背风坡，相对干燥，在 500 毫巴等压面上，山脊两侧的水汽含量可差几倍。在此还可以举出我国的腾冲和酒泉这两个相距较远地点的对比情况，它们几乎处于同一经度上，只是由于中间青藏高原的阻隔，在 500 毫巴等压面上，前者的水汽含量为 5.0 克 / 千克，而后的水汽含量只有 1.3 克 / 千克。至于在近距离上的迎风坡背风坡，这种干湿的差异也是很明显的。通过初步计算，喜马拉雅山东段南侧与北侧在相同的海拔高度上，由于水汽含量的不同，可使得其间的温度具有 2°C 的差异。这 2°C 以上的差异，足可使得北坡的树线或雪线比南坡升高 300—400 米。当然，我们不能把两者的树线及雪线的高度差异，统统归结到这样一个因素上，但毋庸置疑，它却是一个十分重要的因素。

我们还没有讨论在自然地理面中，由于水分状况的不同，在水平分布上所引起的地带性变化。而这种变化往往由于资料缺乏，方法不完善，因此尚未纳入统一的能量基础之中，因此对其解释也争议最多。随着在上述基础上进一步建立更精确的理论模式，相信这种争议将会以满意的结论而告结束。

第二节 自然地理区划

自然地理空间分布，主要是由于自然地理系统所表现的集体效应以及它不同区域的表现特征来体现的。正如前边所述的，数量分类学的导入，已从相似性与差异性在不同等级上的数量表达，去更加客观地划定空间分布范围。而在区域界限的划定上，目前又引进了模糊集合的原理，使得界限的确定从纯经验的判断，逐步朝向定量化的方向前进。

在认识自然与改造自然当中，为达到因地制宜，区别对待，就必须针对不同的区域及其所表现的基本特点，采取相应的措施，确定主要的控制环节与控制措施。这样在研究地理空间分布规律的基础上，进行自然地理区划，不仅在理论上是可能的，而且在实践中也是极有价值的。

自然地理区划是自然地理研究发展到一定阶段的产物。它是在正确认识地表空间分异规律、精确分析自然地理要素空间分布特点，掌握比较大量的地理事实，大致了解区域自然历史过程的基础上才能着手进行的。因此，人们总是把一个国家的自然地理区划水平，作为反映对自然地理环境的认识程度及衡量自然地理研究水平的重要标志之一。一个正确的客观的自然地理区划，不仅仅深化了自然地理研究的一系列理论和方法，而且必然会在国民经济建设中，发挥巨大的作用。

自然地理区划所面对的客体，具有如下几个特点，因此制定区划时很有必要首先掌握这些基础，这些特点是：

(1) 无限的差异性和相似性，组成互为对立的一组事件。在自然界的各项要素中，在特定的范围和某种等级上，没有完全相似的现象，也没有绝对差异的现象。相似之中总包含着差异，而差异中又总蕴含着相似。以数值表达而言，两种事物完全相似（即绝对相应）的概率如取为 1，则这两种事物完全差异的概率必然为 0，而自然地理要素在相似与差异上所表现的概率，总介于 0 与 1 之间，相似性的概率越大，差异性就越小，反之亦然，二者的概率和恒等于 1。这种互补的、对立的事件，成为一切分类学其中包括自然地理区划在内的基本依据。我们十分清楚，自然区划要求所划分的区域内部具有相似性最大而差异性最小；而要求划分的区域与区域之间，具有差异性最大而相似性最小。

(2) 所有的自然地理过程以及自然地理要素，基本上均呈连续的、过渡的特性。在自然地理面这个特定的空间内，很少或根本看不到离散的、跃迁的现象，所见的都是渐变的。这样的结果，必然使得两个相邻的区域之间的边界，显现出不分明的或二元重叠的性质。这对于第一个特点所要求的区域间差异性最大的原则，在其边界处的表现就发生了困难，但是这又给自然地理区划的研究提出了新的问题。目前对于处理这种不分明的现象，已经产生了有效的方法。并在实践中不断地得到丰富和完善。

(3) 自然地理区划具有综合性及空间上的不重复性。它不能依据某一个要素或某一种现象去拟定分区，而必须根据全部自然地理现象所表现的“集体效应”，作为划区的标准。同时，区域划分不同于类型划分，要求具有空间上的不重复性，这在具体处理上，势必在承认“集体效应”的同时，遵循着从主、从众、从源等原则。

以上三个特点，已经得到了确认，并且将它们纳入到由于能量和物质在自然地理面中的交换、贮存、流通，以及由于这种交换的方向、交换的强度、

交换的变率等不同，所致的自然地理区域分异规律之中。它包括了自然地理地带性规律的研究、地带性发生畸变和反常的表现、自然地理区划的等级单位系统、自然区划的基本方法等研究内容。

近年来，国外也有不少地理学家对于自然地理区划工作，相当地不予重视，他们认为“区域”这个概念是不明确的，区域的界限也十分模糊，划分时人为的主观干扰与经验水平占据主要地位，因此既不容易划定，也不承认有什么科学价值。英国的金姆鲍(G·Kimble)说：“试图在不存在边界的区域之间划定界限，等于是对生命的浪费”。美国也曾为探讨区域概念成立过专门委员会，经过一番工作后认为：区域是按一定指标所确立的均质的地段。上述这些看法和现象，反映了人们对于区域概念的疑虑。究其原因，这是由于不承认自然地理的客观分异规律以及虽然承认它，但欠缺精确的表达方法而致。

事实上，不承认自然地理空间分异是错误的，不承认地带性规律及其表现，不承认现实自然地理面对地带性规律的畸变与改造，是不符合客观实际的。至于方法的欠缺，目前已近于达到顺利的克服，坚实的基础已经形成，它在实际上的应用也日渐扩大。

现以中国综合自然区划工作为例。1949年以前，关于中国综合自然区划的研究工作已有开展，据冯绳武统计，从1922年开始先后见于报刊者，有罗士培(P·M·Roxby, 1922年)，葛德石(G·B·Cressey, 1934年, 1944年)、李长傅(1934年)、洪思齐与王益崖(1934年)、斯坦普(L·D·stamP, 1936年)、王成组(1936年)、李四光(1939年)、冯绳武(1945—1946年)等近十种。都因缺乏基本地理资料的限制，因此这些区划一般都比较简陋，实际意义不大。

1949年以后至今的三十年来，比较有影响的全国性综合自然区划共有五个。它们分别是：

1954年，林超等人为了综合性大学地理系教学的需要，首先根据地形构造将全国划分为四大部分，其次又根据气候分成十个“大地区”，再次主要根据地形划分31个“地区”和105个“亚地区”。

1954年，由罗开富主编、中华地理志编辑部拟定的自然区划，已经注意到了自然界地域分异的状况，并对各类自然地理现象互相关联、互相影响所表现的特点，作了一定的探讨。同时由于在开展自然区划工作的同时，有计划地集中整理了各项有关的自然地理资料，因此区划基础较为翔实。这个区划首先将中国分成东半壁与西半壁两大部分，东半壁为季风影响显著的部分，西半壁为季风影响微弱或完全没有季风影响的区域。接着在东半壁(湿润)由北而南，根据温度递增以及土壤植被等自然地理要素的反映，分为东北、华北、华中、华南四个“基本区”；而将垂直分异比较显著的康滇地区划为又一个“基本区”西半壁(干燥)根据地势及因地势而产生的温度差异，划分为蒙新、青藏两个“基本区”。在这七个基本区中，又按照地形状况分成23个“副区”。

从1956年开始，在中国科学院自然区划工作委员会的组织下，又开展了一个规模更大的自然区划工作。以黄秉维为主编的，在各个部门自然区划的基础上，在1959年拟定了中国综合自然区划。依据自然区、热量带、自然地区、自然地带、自然省、自然州、自然县(后二级在区划中未列出)的7级单位系统，将全国分成三大自然区(东部季风区、蒙新高原区、青藏高原区)、

六个热量带（赤道带、热带、亚热带、暖温带、温带、寒温带）、18个自然地区和亚地区、28个自然地带和亚地带、90个自然省。

1961年，任美镔等针对1959年的方案，提出了不同的看法，使得自然区划工作的研究更加广泛。在区划指标应否统一、对指标数量分析的评价、区划等级单位的划分、各级自然区域的命名等问题上，表示了见解。他们依据自然情况差异的主要矛盾以及利用改造自然的不同方向，将全国分成8个自然区（东北、华北、华中、华南、西南、内蒙、西北、青藏）、23个自然地区和65个自然省。

1963年，侯学煜等在气候、土壤、水利、地貌、植被、动植物生态等学科的基础上，综合研究了以发展农林牧副渔为目的的自然区划。首先按照热量指标，由北而南把我国分成六个带和一个区域（温带、暖温带、半亚热带、亚热带、半热带、热带及青藏高原区）；其次根据水热状况将全国划分为29个自然区。

在此期间，除了以上具有代表性的全国自然区划外，区域的、省级的自然区划，也都在认识自然、指导生产实践方面发挥了很大作用。

前已述及，由于自然地理现象的特点所决定，划分区域界限是一个很复杂的问题，不但应有正确的基本理论，还必须有大量的资料和完善的方法。三十年来，在我国讨论最多、成绩也最大的首推对于亚热带的确定及其界限的划分。为了弥补连续过渡所产生的划界困难，在热带和温带之间，分出一个亚热带，它本身就是这种过渡特性的反映，以亚热带去缓冲和较正确地刻划自然界的渐变。苏联的一些学者，如阿列索夫，认为亚热带应包括我国东北的辽宁省、吉林省和黑龙江省的一部分，华北的全部，内蒙和新疆的大部，以及长江流域和福建北部，从纬度上看，跨越北纬25—45°共20个纬度值，显然阿列索夫所划的亚热带偏北过多；而贝尔格所划的标准，亚热带北界大致与淮河流域、秦岭一线相当，但南界却直达海南岛以南，显然贝尔格所划的亚热带偏南过多。在此种情况下，我国学者竺可桢在他发表的“中国的亚热带”一文中，摒弃了上述两种方案，主张亚热带北界接近北纬34°，亦即淮河、秦岭、白龙江线直到东经104°，此线亦靠近作物一年两熟的北界；亚热带南界则横贯台湾省的中部和雷州半岛南部，即在北纬22°30′—21°30′左右。由于我国学者针对中国特殊的自然条件，对亚热带界限作了符合实际的划分，最后苏联地理学家表示放弃原来所持观点，承认我们的划分是正确的。

这里需要注意，亚热带只是气候上的一个概念，应当结合更多的自然地理事实去解释，才能正确地去应用。此外，关于这种边界的划分，仍然未逃脱经验的估计，倘能赋予新的定量方法，一定可以更精确地表达它。

自然地理空间分布规律的研究，是进行自然区划的理论准备。这种空间分布规律的精确表达，加上进行区划时数量分析方法的引入和健全，将会把自然区划工作提高到一个更高的水平。

