学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

天地之初

——自然的演进和生命的诞生

BOOK

内部资料 非卖品

走向天人合一——《人与自然丛书》总序

季羡林

人类自从成为人类以来，最重要的是要处理好三个关系：一，人与自然的关系；二，人与人的关系，也就是社会关系；三，个人内心思想、感情的平衡与不平衡的关系。其中尤以第一个关系为最重要，而且就目前现状看来，是迫在眉睫的问题。

人之所赖以生存的衣食住行等无不是取自大自然，关键问题是取之之方。在这里东西双方，至少在思想上是不相同的。西方采取的是强硬的手段，要“征服自然”，而东方则主张采用和平的友好的手段，也就是“天人合一”。要先与自然做朋友，然后再伸手向自然索取人类生存所需要的一切。宋代大哲学家张载说：“民，吾同胞，物，吾与也”，最鲜明地表达了这种思想。

东西方手段之所以不同，我个人认为，其基础是思维模式的差异。西方主分析，以中国文化为代表的东方主综合。西方自古希腊以来，以分析的方法对待自然。到了近代产业革命，达到了登峰造极的地步，其结果是人所共睹的。他们取得了辉煌的成就，上天人地，腾空泛海，生光电化，无所不及。一直发展到核能开发、宇宙卫星等等，全世界人民无不蒙受其利。这一点是无法否认的。这是他们“征服自然”的结果。然而自然虽无人格或神格，如孔子说：“天何言哉！四时行焉，百物生焉，天何言哉！”然而它却是能报复的，能惩罚的。西方滥用科技产生的弊端至今已日益显著，比如大气污染、环境污染、生态平衡破坏、臭氧层破坏、新疾病丛生、自然资源匮乏、人口爆炸，如此等等，不一而足。这些弊端，如果其中的任何一个得不到控制，则人类前途实处危境。

这些弊端已经引起了全世界有识之士的深切关注。怎么办呢？我的看法是：人类必须悬崖勒马，正视弊端，痛改“征服自然”的思想，采用东方的“天人合一”的思想。这样一来，庶几乎可以改变这种危险局面。我把我这种想法称为“东西文化互补论”

现在我们不但正处在一个世纪末，而且是一个千纪末。世纪末与千纪末和年不同。年是自然现象，而世纪千纪则是人为现象。如果没有耶稣，哪来什么世纪千纪？但是人一旦承认了这种人为的东西，它似乎就能起作用。十九世纪的世纪末以及眼前的世纪末，整个世界在政治和意识形态领域内，都出现了一些不寻常的现象，理不应如此，事却竟然如此，个中原因值得参悟。

我们人类是有理智有感情的，借这个世纪末的契机，回顾一下，前瞻一下，让脑筋清醒一下，是有好处的，何况我们回顾与前瞻的问题是关系到人类前途的问题，切不可掉以轻心，等闲视之。这样做不但是一般人的任务、有远见卓识的政治家们更应如此。为此，东北林业大学出版社和中央电视台“人与自然”节目合作出版了这一套《人与自然》丛书，提出的都是新问题，供广大读者阅读、反思，这会有利于读者在即将来临的 21 世纪把工作做得更好，使人类前途更现光明。

是为序。

创造文化生态——《人与自然》丛书总序

周光吕

打开人类的文明史册，人与自然是其中的基本主题，而文化是人类的特有创造，在自然与文化的互动之中，人类从亿万物种中突现出来，成为万物的灵长。

文化发展的历史也是人类进步的历史。在人与自然、人与人、人与自身这三大文化主线中，人与自然的关系更多影响和规定着人类的生存和发展。回溯远古荒蛮的天地之初，文明崛起时人类创造了听命自然的图腾文化。在漫长的农耕社会，人类创造了具有田园意趣，以自然启示人格和艺术的人文文化。那时的自然，既是外在于人类的物化世界，也是自然而然，率性而行的一种精神秉赋。那时的人类，对自然的世界充满敬畏和热爱之情，对自然的精神满怀眷恋和幢憬。在文化宝库中，中国古代的思想、文化、艺术无不浸润着浓郁的自然主义精神。

近代以来，发端于文明西域的文艺复兴以实验科学为肇始，开辟了科学革命的道路，从此，人类认识、理解和对待自然的方式发生了重大改变。在自然科学面前，自然的世界揭去了神秘的外纱，自然的生命精神悄然退隐。科学勾画了统一的世界图景，这个世界是物化的世界。自然变为纯粹物化的自然。自然成为人类意欲认识并按自己的愿望加以改造的物化对象。科学的理性精神强大地渗透到文化当中，人类以前所未有的尊严和智慧创造和进入了科学文化时代。

以认识自然为目的的科学和以改造自然为目的的技术是近代以来人类文明最为辉煌的成就。以自然科学为理性基础，以技术为表现形式的科学文化使得人类的思想方式、生活方式、行为方式出现了重大变化。科学技术赋予人类的精神文化、制度文化和物质文化以一种新的气质和构造。科学思想、科学方法和科学精神创造了全新的工具理性。科学文化以其逻辑化、数学化、实验化的特点成为突破地域特征的国际性文化。在现代社会，科学技术不仅是人类从野蛮蒙昧走向自由文明的桥梁，而且是发展经济，增强综合国力的主导力量。

但是，中性的科学技术在人类的手中，可以成为打开自然宝库的钥匙，也可以成为对自然肆意为虐的工具。当人类的改造速度小于自然界的恢复速度时，科学技术便体现为正向的生产力；当人类的改造速度大于自然界的恢复速度时，科学技术便体现为负向的破坏力。科学技术的生产力创造了高度发达的物质文明，科学技术的破坏力引发了世界范围内的环境问题。这就迫使我们要跳出传统的视野，重新研究人与自然的关系问题，重新选择和评估科学技术特别是高新技术，引入自然、人和价值的向度，创造文化生态，选择新的文化模式。

从人类文明、文化的历史和人类发展的未来出发，将自然文化、人文文化和科学文化整合为一，使得人与自然生态共荣，和谐发展，应当成为人类的价值理性、决策理性。

东北林业大学出版社和中央电视台“人与自然”栏目紧紧把握时代的脉搏，在国内率先组织一批富有学养的不同学科领域的代表性专家，以人与自

然关系为基本视角，以人类文化演进为思想主线，深入而通俗的撰写“人与自然”丛书，全景展现人与自然关系的壮丽画卷，探索性地提出了人类未来发展的几条可能之路，其眼光和意义十分深远。将学术创造和学术成果大众化贯通起来，也是一种值得倡导的文化生态。

引言——创序的自然与文明的危机

打开科学谜宫和生命心扉的钥匙是“？”，而关于“天地之初”的追问，是所有问号中最大的问号。

在人类漫长的历史进程中，对“天地之初”的思考是永恒的主题。仰望天穹，斗转星移，风行雨施，刹那不停，瞬息万变；俯视大地，五洲四海，山川平原，动植走飞，不尽沧桑。自古至今，世世代代，从呀呀学语的幼重到风烛残年的老耄，无论是黎民百姓还是智者精英，无不引起烦恼和迷惑。

在文化的黎明期醒来的人们，其心灵深处充满对大自然的恐惧和惊奇。于是，把它的一切力量和元素归于诸神。中国人想象出开天辟地的盘古，印度人塑造出原人布尔夏，希腊人崇拜无上威力的宙斯。更敏锐的精神渴望转向对生存意义的寻求，因为这里也有同样的惊奇。

杞人的“忧天”、屈原的“问天”彰显了古人的忧患与激情。哲学家谈天论地用心良苦，想象的诸多答案虽能启迪智慧，但终不若来自科学家的知识可靠。

据有关科学家的研究推算，宇宙已有 100—200 亿年的历史，太阳系诞生也已有 60 亿年，作为固体的地球已存在了 46 亿年，地球上的生命出现可追溯到 38 亿年前，直立行走的人类在数百万年前方出现，有文字记载的文明则不过数千年。这是迄今为止的宇宙演化过程。这个过程是自然创序的过程，从化学序—物理序—生物序—社会序，是宇宙生命力的表现。

但是，对古生物学研究表明，地球历史上的生命经历了五次大绝灭及其后的复兴。第一次绝灭发生在 5 亿年前，第二次绝灭发生在 3.5 亿年前，第三次绝灭发生在 2.3 亿年前，第四次绝灭发生在 1.8 亿年前，第五次绝灭发生在 6500 万年前。

许多历史记载的传说和考古发掘物结合，似乎表明还有过人类史前文明的消亡。那万余处令人困惑不解的废墟之谜暂且不论，而今正处在行将毁灭的可怕境地的人类，之所以陷入如此危险的困境，是因为我们从未置身宇宙的现实和价值观念之中。人类从哪里来，到哪里去，其最终底蕴是同“天地之初”联系在一起的。

近三个世纪以来，随着科学发展而产生的宇宙故事，是科学献给人类的厚礼。一个不断膨胀和发展着的宇宙，怎样演化成为人类家园的地球，这创造故事能使我们彻底而及时地认识到我们存在之根据，把我们的生命和文明置于宇宙故事之中。我们正处在宇宙奥秘被大量揭示的时代，若艺术家与科学家一起讲述这个故事，把人类故事纳入宇宙故事之中，让宇宙的伟大历程进入人类的自我意识，使人们的精神健全起来，不再自命不凡，停止彼此争斗，天空会变得清洁，土地会恢复肥沃，生活也会洋溢情趣。

是什么主宰着人类的命运？是“天地之初”和“人的灵性”！

人类在宇宙中的地位

我们人类居住的地球是太阳系的一员，而且还是一颗较小的伴星。太阳也只是亿万恒星中的一颗。大量恒星聚集在一起而形成一个个星系，太阳所在的星系叫银河系。许多星系还要聚集成星系团，星系团之上还有超星系团。只有认识宇宙的这样一个等级结构，才能深刻理解人类在宇宙中的地位。

就像航海者必须确切知道自己的方位才能决定航向一样，人类的行动也应以确定自己的位置为基础。做任何一项工作，首先要对自己的环境有个确切的认识，然后才能决定做什么和怎样做。对于生命个体来讲，在确立生命的意义和价值之前必须有一个生命存在的意识。对于整个人类的生存来说，人类在宇宙中的位置是我们生存的基础，思考和行动的根据。

面对浩瀚的宇宙，作为宇宙演化偶然产物的、或许还不是独一无二的人类不能不感到自己的渺小。但是，人类毕竟创造了自己的文化。作为人类生存方式的文化，确可以说是“融天地之沧桑，含日月之玄机”的。宇宙洒落的智慧之光，使人类“思维跨越时空，行为倒转乾坤”，人类怎能不感到自己伟大呢！这种渺小和伟大的张力应该成为人类理性的心理动力。

人类的家园——地球

人类世世代代生活的家园——地球，自古以来就是有心人思考的对象。几千年来，人们对地球的认识不断地深入。从天圆地方到地球是圆球再到地球是一个旋转的椭球，经过了漫长的历程。1967 年人造卫星上天，通过它拍摄了许多地球形状的照片。从这些照片可以完整地看到地球的外貌。通过人造卫星观测得到的地球轨道参数，推算出大地水准面的形状是三轴不对称的。其实，只从北极为洋南极为陆和东半球多陆西半球多洋，亦可直观地想到地球的不对称。虽然地球不是一个标准的旋转椭球体，但很接近于旋转椭球体。因此我们在处理某些问题时仍然说地球是一个旋转椭球体。1975 年第 16 届国际大地测量和地球物理协会修订的有关地球的参数如下：

赤道半径：6378.140 公里；

两极半径：6356.755 公里；

长、短半径差：21.385 公里；

平均半径：6371.004 公里；

扁率：0.0033528 公里；

赤道周长：40075.036 公里；

子午线周长：39940.670 公里；

表面积：510064471.9 平方公卫；

体积：1083206900000 立方公里。

有关地球的构造，许多研究者已经得到比较一致的看法：地球是一个由同心层物质组成的圈层结构。地球圈层可区分为内圈和外圈，也就是我们平常说的地下与地上。

地球内圈层结构主要来自对地震波的分析。分析地震波在地球内部的传播及反射，可以了解地震波到达处的地球物质的成分和状态。产生地震的方式有两种，一种是天然的地震，另一种是人工产生的地震，也就是进行地下爆炸试验。地下核爆炸试验是人工产生地震波的最有力的方法。

地球内圈层结构

1955 年，根据地震波速度变化的分析所得到的有关地球内部的物质密度分布信息，地球内圈层被划分为 7 个圈层，分别用 A、B、C、D、E、F、和 G 表示，其中 D 层又划分为 D′和 D″。1967 年又给出了各圈层厚度的具体数据。7 个圈层至地表的深度和名称如表 1 所示。粗略地说，地球内圈层包括地壳、地幔和地核三大圈层。

表 1 地球内圈层结构

圈层符号		深度范围	圈层名称
A		0 ～ 33	地壳
B		33 ～ 410	上地幔
C		410 ～ 1000	过渡区
D	D′	1000 ～ 2700	下地幔
	D″	2700 ～ 2900	
E		2900 ～ 4980	外地核
F		4980 ～ 5120	过渡区
G		5120 ～ 6370	内地核

通过对地震波速度的研究发现，在深度为 60～250 公里的上地幔圈层内地震波的传播速度较小。这一地震波低速传播的圈层称为软流圈。地核的外层是液态而内层则是固态。因此，地球内圈也可以看成由五部分组成：地壳圈层、软流圈层、地幔圈层、外核液体圈层和内核固体圈层

（见图 1）

厚度不均匀的地壳圈层，其主要成分是岩石，所以地壳圈又称岩石圈。岩石圈包括地球的大陆部分及海底岩石部分，亦称陆壳和洋壳。陆地，主要是五大洲，即欧洲、亚洲、非洲、美洲和南极洲，占地球表面积的 1/3。海洋占 2/3，主要是四大洋，即太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋。藉助于高空摄影技术，我们能鸟瞰地球的外貌，直接观察到大陆的形状，山脉、江河、湖泊、平原及海岸线的形态。海洋学的迅速发展，使我们能通过精密仪器测量海底的地形，收集海底的资料。

岩石圈的表面不是平坦光滑的，而是具有各种复杂的地形。环形的火山口、终年积雪的山峰、沿海的大平原、江河入海口的三角洲、曲折的海岸线，以及那海底的海沟和洋脊，蔚为壮观。岩石圈中埋藏着 3000 余种矿物，含几十种元素。

地球外圈层结构

地球外圈由三个圈层组成：大气圈、水圈和生物圈。

大气圈是地球所有圈层的最外层。大气圈的主要成分是气体，就是我们平常所说的空气。在地表附近，按体积计，空气中氮占 78%，氧占 21%，其余是氩和二氧化碳、水蒸气和微量的氦、氖、氪、氙、臭氧、氨和氢等。大气圈的气体密度随着距海平面高度的增加而减少，最后过渡到宇宙空间。根据人造卫星提供的资料，在 2000～3000 公里的高空还有稀薄气体，即使在 16000 公里的高空也仍有更为稀薄的气体存在，同时还发现有基本粒子。这表明大气圈没有严格的上界。同样，大气圈也没有严格的下界，在土壤里有少量的空气，在某些岩石中也含有少量的气体。

尽管大气圈没有严格的上下边界，但是由于地球的引力作用，使得气体的大部分都集中在距地面 100 公里的范围内,其中 3/4 集中在离地面 10 公里的范围内。

根据世界气象组织的规定，按气温的垂直分布，将整个大气圈划分为五个层次，即对流层、平流层、中间层、暖层和散逸层。大气质量的 75%～90%集中在对流层。对流层的平均厚度随纬度和季节不同有所变化。在低纬度区为 17～18 公里，在中纬度区为 10～12 公里，在高纬度区为 8～9 公里。

水圈是由水组成的。水圈是一个不连续、不规则的圈层，这包括海洋、江河、湖泊、沼泽、冰川和地下水。水体主要集中在海洋里。海洋水的体积是陆地水体积的 34 倍。陆地上的江河、湖泊、沼泽地也集中了许多水。全球江河中有 1300 立方公里的水在流动，湖泊总面积 270 万平方公里，沼泽地 350 万干方公里，它们储存的水也不少。地下一定深处存有地下水，土壤及某些岩石也含有水。高山上的终年积雪，存放的是固体水。冰川是固化了的水，全球冰川面积达 1500 万平方公里。全球总的积水量，也就是水圈的总质量约为 166.4 亿吨，总体积为 1.395×10 立方公里。此外，大气云层也是个储水库。

生物圈是指地球上各种有生命的物体组成的圈层。生物包括动物、植物和微生物。据不完全统计，全球现在生存的动物有 110 多万种，植物约 40 万种，微生物至少有 10 多万种。森林覆盖了地球表面的 1/10，固定了生物圈总能量的一半。在海拔 6200 米的高山上有绿色植物，在几千米深的海底有不需要阳光的生物。在地球的演化过程中，有的生物绝灭了，如恐龙等。据统计，在地球上生存过的生物至少有 5～10 亿种。虽然生物圈中具有生命的有机体总量约为（0.3～1）$\times 10^{13}$ 吨，尚不及地壳重量的 0.1%，却使地球上的自然环境发生了深刻的变化。地下的煤碳和石油也都是生命的遗迹。地球上的各种珊瑚礁总面积达 13 万平方公里，都是生物骨骼的堆积。

岩石圈、大气圈、水圈和生物圈是相互渗透、相互交织在一起的。生物生存于岩石圈之上，与岩石圈不断地作用。大气渗透在岩石圈和生物圈之中，岩石圈又将水圈隔成不规则的形状。这些圈层的交织构成了人类生存的环境。

地球的结构和自旋运动还形成地磁场，其强度为 10^{-5} 高斯的量级。

地球的家族——太阳系

作为人类家园的地球只是太阳家族的一个成员，地球上的一切生机无不来自太阳的恩惠，俗话说，万物生长靠太阳。为了生存，古人虔诚祈求太阳降福于人类，崇拜太阳的神灵，感谢太阳的恩赐。现在许多学者正在不遗余

力地研究太阳和它的大家族——太阳系。

太阳系是由太阳、行星、行星的卫星、小行星、彗星和流星等组成，犹如一位老祖母率领着她的儿孙在太空中遨游（见图 2）。太阳是太阳系的中心天体，行星、小行星几乎在一个平面上形成盘状结构，在各自的轨道上按照同一方向围绕太阳旋转，而彗星和流星则是在包含行星盘的球状空间中游弋。太阳的赤道半径约为 695990 公里，是地球赤道半径的 109.12 倍。太阳的体积约是地球体积的 130 万倍。太阳的平均质量约为 1.989×10^{27} 吨，约是地球平均质量的 33 万倍。太阳的表面温度为 5780±50 开尔文。太阳的中心温度超过 15000000 开尔文，因而它能辐射各种波长的电磁波，给地球上的人类以温暖和光明。

太阳的结构

太阳的内部构造从中心到边缘大体分为核反应区、辐射区、对流区和太阳大气区四个区域。在太阳大气区内又可分为光球、色球和日冕三个层次。最内层的是光球，日冕为最外层。在太阳大气区充满含有 73 种元素的稀薄气体。凡是地球上有的元素，太阳大气中都有。这些气体中氢的含量最高，氦次之。太阳内部的氢和氦，在高温下产生热核反应，释放大量的能量，成为太阳系内各星球光和热的源泉。

由于太阳表面温度较中心低，在太阳光球层上出现暗黑区或暗斑区。这些暗黑区或暗斑区被称为太阳黑子。其实太阳黑子并不完全是黑色的，它的亮度与满月的亮度差不多。太阳黑子的直径约为 2000～100000 公里不等。黑子中心处的温度约为 4000 开尔文。黑子的出现具有周期性，平均周期约为 11 年。黑子有强磁场，其极性可以反转，反转的周期约为 22 年。太阳黑子的活动成为太阳活动的重要标志。太阳活动的另一个标志是耀斑的出现，是太阳爆发、释放大量能量的现象。一次耀斑持续时间约几分钟到几十分钟。耀斑主要发生在太阳大气区的色球层。太阳的这种强烈活动对地球有重要的影响。由太阳外层大气向外发射的粒子流组成的太阳风，由于星际空间的不均匀，随着时间而波动，其所形成的星际空间磁场成双臂阿基米德螺旋状，随太阳一起旋转，约 27 天一周。

太阳和其他恒星一样，有幼年、中年、老年的演变过程。根据太阳氢氦核反应的速率估算，太阳已生存了 47 亿年，它的寿命可达 100 亿年，因此我们说太阳现在已步入中年了。

九大行星系统

太阳系有九大行星，它们是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。17 世纪以前，人们就已经发现了水星、金星、火星、木星和土星。1608 年发明了望远镜，使天文观测大开眼界。1781 年 3 月 13 日，发现了天王星。1846 年 9 月 23 日发现了海王星。1930 年 2 月 18 日发现了冥王星。从这个时候起，太阳系的九大行星就成了人类熟知的天体。

太阳系的九大行星，按照它们的质量、体积、平均密度、化学成分、表面温度等物理性质及特征，大体上可以分为两类。一类称为类地行星，包括水星、金星、地球和火星。另一类称为类木行星，包括木星、土星、天王星

和海王星。冥王星则是介于这两种类型之间的过渡类型。类木行星又分为两种：一种是巨行星，包括木星和土星；另一种是远日行星，包括天王星和海王星。通过天文学家观测得到的具体数据可以清楚地看出这两类行星的差别。

水星离太阳最近，约 57.9×10^6 公里，平均半径为 2437 公里，质量为 3.2×10^{20} 吨，体积是地球体积的 0.06 倍。水星绕太阳运行轨道的偏心率为 0.206。水星自转周期为 58 天 16 小时，公转周期为 88 天。水星的表面温度最高为 450 摄氏度，最低为－160 摄氏度。水星周围的大气极为稀薄，这极稀薄的气体中氦气约占 90%。

金星距太阳 108.2×10^6 公里，平均半径为 6050 公里，体积是地球体积的 0.88 倍，质量为 48.75×10^{20} 吨。金星绕太阳运行轨道的偏心率为 0.007。金星自转周期为 242 天 14 小时（也有资料认为自转周期为 244 天 8 小时），公转周期为 224.7 天。金星表面温度为 480 摄氏度。金星周围的大气以二氧化碳为主。

地球距太阳 149.6×10^6 公里，平均半径为 6378.1 公里。地球质量为 59.75×10^{20} 吨。地球运行轨道的偏心率为 0.017。地球自转周期为 23 小时 56 分，公转周期为 365.26 天。地球表面平均温度为－30～45 摄氏度。地球周围大气层中氧占 21%，氮占 78%。

火星距太阳 227.9×10^6 公里，平均半径为 3394 公里，体积是地球体积的 0.15 倍。火星运行轨道的偏心率为 0.093。火星自转周期为 24 小时 37 分 23 秒，公转周期为 686.98 天（合 1.88 年）。火星周围大气稀薄，其中二氧化碳占 90%以上，其次是氢、氮等。火星表面温度为－130～30 摄氏度。

木星距太阳 778.3×10^6 公里，平均半径为 69500 公里。木星体积是地球体积的 1316 倍。木星运行轨道的偏心率为 0.048。木星自转周期为 9 小时 55 分 29 秒，公转周期为 4330 天（合 11.86 年）。木星周围大气层厚，其中氢占 80%，氦占 15%。木星表面温度为－145 摄氏度。1979 年 3 月 4 日“旅行者 1 号”发现木星有一个由黑色碎石组成的宽约几千万公里的光环。

土星距太阳 1427×10^6 公里，平均半径为 58100 公里。土星体积是地球体积的 755 倍。土星运行轨道的偏心率为 0.056。土星自转周期为 10 小时 39 分 26 秒，公转周期为 10800 天（合 29.57 年）。土星周围大气层厚，主要有氢、氦和甲烷。土星表面温度为－150 摄氏度。土星有一个美丽的光环，这个光环的结构非常复杂，它是由几个较小的光环组成的，组成光环的物质是细小的晶冰和带冰壳的微粒。

天王星距太阳 2869.6×10^6 公里，平均半径为 24500 公里，天王星的体积是地球体积的 67 倍。天王星运行轨道的偏心率为 0.046。天王星自转周期为 13 小时 30 分～15 小时 30 分（有资料称，天王星自转周期为 24 小时±3 小时），公转周期为 30700 天（合 84.05 年）。天王星表面温度为－185 摄氏度。天王星周围大气以甲烷、氨和水蒸气为主。1977 年发现天王星有一个多层结构的光环。

海王星距太阳 4496.1×10^6 公里，平均半径为 24600 公里。海王星的体积是地球体积的 57 倍。海王星运行轨道的偏心率为 0.009。海王星自转周期为 18 小时 10 分，公转周期为 60200 天（合 164.81 年）。海王星表面温度为－200 摄氏度。海王星周围大气以甲烷、氨和氢为主。1982 年 6 月发现海王星有一个光环。

冥王星距太阳 5913.5×10^6公里，赤道半径为 1350 公里。冥王星的体积是地球体积的 0.0095 倍。冥王星运行轨道的偏心率为 0.246。冥王星自转周期为 6 天 9 小时 17 分，公转周期为 90700 天（合 248.32 年）。冥王星表面温度为－220 摄氏度。冥王星周围大气层较厚，主要成分是冰冻的甲烷。

太阳家庭的其他成员

太阳家族除九大行星外，还有众多小行星、卫星、彗星和流星在太阳外围周行运动（见图 3）

1801 年 1 月 1 日，天文学家使阿齐（1746—1826）发现了一颗小行星，命名为谷神星。谷神星与太阳的平均距离为 414.39×10^6公里，处于火星与木星之间。谷神星的直径不足 800 公里，所以是一颗小行星。之后在火星与木星之间又发现了许多小行星，至今，这些小行星的编号已达 2000 多。这些小行星与太阳的平均距离在（308.17～641.79）×10^6公里的范围内，大部分小行星集中在平均距离为（329.12～478.72）×10^6公里的范围内，小行星中直径最小的不足半公里，较大的 4 颗小行星是谷神星、智神星、婚神星和灶神星，有的小行星还带有卫星，它们形成一个小行星带。这些小行星都有自转，现在测定了 70 多颗小行星的自转周期，大约在 2.5—20 小时的范围内。这些小行星均绕太阳公转，公转的周期为 3.5～6.0 年。小行星的运转轨道与九大行星不同，它们的轨道偏心率与倾角都比九大行星大。穿越地球与火星轨道的小行星称为阿波罗小行星和阿摩尔小行星或称阿彼罗—阿摩尔体。阿波罗小行星的轨道近日点距离为 149.6×$l0^6$公里。

阿摩尔小行星轨道近日点距离为 194.48×$l0^6$公里。现在已经知道的阿波罗小行星有 28 个，阿摩尔小行星有 18 个。据估汁，直径大于 1 公里的阿波罗—阿摩尔体的总数约 1000 个。

图 3 木星、火星、小行星、彗星等的轨道示意图
（据徐道一等，1983）

围绕行星旋转的星球称为卫星。地球有一颗卫星，就是月球。自古以来，人们对月球有着许多美丽幻想。已经探明月球距地球 0.3g4×10^6公里，月球的平均半径为 1738 公里，它的体积是地球体积的 0.02 倍，它的质量也比地球小，是地球质量的 0.0123 倍。地球与月球构成一个地月系统。月球围绕地月系统的质心，沿一个椭圆轨道绕地球旋转，并参与地月系统绕太阳旋转。这是一个十分复杂的轨道运动。1969 年阿波罗飞船首次登月成功，揭开了人类研究月球的新纪元。

太阳系中除了水星和金星之外，各行星都有卫星。现在已发现太阳系里有 50 颗左右的卫星（包括月球在内）。

火星有两颗卫星，称为火卫 1 和火卫 2。这两颗卫星是黑尔 1877 年发现的。这两颗卫星的表面布满了许多陨石坑。

1609 年伽利略发现木星有 4 颗卫星，称为木卫 1、木卫 2、木卫 3 和木卫 4。这四颗卫星又称为“伽利略卫星”。至今总共发现木星有 16 颗卫星，木卫 1 至木卫 4 是比较大的，其中木卫 3 的直径达 5150 公里，是所有木垦卫星中最大的一颗。木卫 1 至木卫 4 的质量都比冥王星大。组成这四颗卫星的化学成分也各不相同。木卫 1 和木卫 2 以岩石为主，木卫 3 和木卫 4 可能是

由厚厚的冰壳包围着岩幔和小的铁质核。

土星有 22 颗卫星。在土卫 1、土卫 3、土卫 4 和土卫 5 上都有几十亿年前陨石撞击卫星留下的陨石坑。土卫 3 上发现一个又深又宽、长度为 800 公里的峡谷和一个大型陨石坑。据“旅行者 1 号”探测的结果，土卫 6 是太阳系中唯一有大气环抱的卫星，气体厚度约 2700 公里，大气的成分主要是氮，约占 98%。大气的温度为－201 摄氏度。土卫 7 是一个椭圆形的卫星，主要由冰组成，表面上有陨石坑。土卫 8 的表面一部分很亮，其他部分很黑，好像覆盖一层黑色的物质。

除此之外，天王星有 15 颗卫星，海王星有 8 颗卫星，冥王星有 1 颗卫星。

彗星也是太阳家族的一个重要成员。它的形状与行星和卫星不同。它的体积很大，但质量较小，主要由冰、陨石、宇宙尘埃组成。它有一个云雾状的外貌，其形状随它与太阳的距离有明显的变化。当彗星远离太阳时呈现为一个发亮的云雾状的小斑点，接近太阳时出现亮而长的彗尾。彗星明亮部分的中心称为彗核，外层的云雾状包层叫做彗发，两者合而为彗头。彗尾是彗星受到太阳风的压力而被散开的气体和尘粒。彗星的质量较小。它的运行轨道有三种，椭圆、双曲线和抛物线。根据彗星的轨道特征，将彗星分成周期彗星和非周期彗星。周期彗星按周期的长短分成短周期彗星和长周期彗星。长周期彗星的轨道偏心率和倾角都很大。彗星在轨道上运行的方向有顺行和逆行。非周期彗星是一去不复返的彗星。

在太阳系中彗星的数量很多。每年都可以发现新的彗星，平均每年约发现 6 颗，现在已经发现彗星 1600 颗，其中一个知名度很高的彗星是哈雷彗星，它的周期大约是 75 年。

彗星可以在太阳系的辽阔空间自由穿行。1908 年 6 月 30 日，西伯利亚的通古斯地区上空发生大爆炸，能量高达（5±1）×10^{15}焦耳，破坏了 1600 平方公里的森林，据研究，这是由于一颗小彗星高速冲入地球大气圈造成的。

人们在夜空常见的流星是太阳系中的小物体或尘粒。当它们运行到地球附近时，受地球的引力作用，冲入地球大气层，与大气摩擦而发光。有些流星群是彗星瓦解后形成的，如每年 11 月出现的仙女流星群就是比拉彗星瓦解后形成的。大的流星通过大气层时，未燃尽的残余部分落到地面成为陨石。

太阳家族所属的部落——银河系

在晴夜仰望穹空，会看到一条由点点星光组成的亮带，百姓称之为“天河”。中国人家喻户晓的牛郎织女的故事，说的就是在这河的两侧的牛郎星和织女星，在七月七日由喜鹊搭桥过河相会。这“天河”就是我们要讨论的银河系。它是由许许多多的恒星组成的一个扁平的漩涡状的星系，太阳是其中之一。由于太阳带着它的行星运动于其中，因此在地球上看到的“天河”随着季节的变化而变化着方位。农村的谚语说：“天河吊角穿棉裤棉袄，天河顺街管卖布的叫爹”，说的是银河的方位指示季节的变化。地球在直径约 100 亿公里的太阳系中作为一个较小的伴星已不怎么显耀，在直径大到光都要跑上 100 万亿年（即 10^{15} 光年）的银河系里，只不过是一粒微不足道的尘埃。

认识银河的历程

银河星系是个古老的星系，据今已有百亿年的历史。但是对银河星系的认识几个世纪前才真正开始。15 世纪中叶，德国大主教尼古拉（1401—1464）曾经猜测，在无限的宇宙空间，散布有许多的恒星，每一个恒星都是一个遥远的太阳。17 世纪初，伽利略（1564—1642）第一次用天文望远镜看到肉眼看不到的许多恒星，并发现了银河，观察到银河是由无数个恒星组成的。从那时候起，人们的眼界开阔了，不再认为尼古拉的猜测荒唐可笑了，但仍认为恒星是固定在遥远的天体上的光点。

1717 年，英国天文学家发现了恒星的自行。这个发现动摇了那种认为恒星是固定的传统观念。之后，布拉得雷（1693—1762）在测量天体光行差时得到一个结论：即使最近的一个恒星，它与地球的距离也大于 6～8 光年。这个结论也支持了认为恒星是一个遥远太阳的看法。

18 世纪 20～30 年代，瑞典的斯维登堡（1688—1772 年）推测：恒星都是人们所熟悉的银河星系的成员。英国天文学家赖特（1711—1786）在其著作《新颖的宇宙理论或新宇宙假说》（1750 年）中提出，天上所有的恒星和银河星系共同构成了一个巨大的天体系统。这个系统的形状像一个“磨盘”，它的直径比它的厚度大得多。

威廉·赫歇尔（1738—1822）的工作对认识银河系有决定性的影响，他出生于乐师家庭，长大后成了军乐队的队员。由于他不习惯军队生活，19 岁那年逃率军队，单身到英格兰岛，仍以乐师为业，业余时间学习天文学。1772 年，他在妹妹的协助下，自己磨制了几架反射式望远镜，开始在晴夜观测天空。1781 年，他发现了天王星，因此获得英国皇家学会的科普利奖章，英皇乔治三世接见了他，并赦免他逃离军队的罪过，还任命他为皇家天文学家。从此威廉·赫歇尔开始进行了大量的天文学的观察工作，以探索银河系的结构。他用自制的口径为 46 厘米的反射望远镜观察银河系。在缺少有关恒星资料的情况下，他根据自己的观测作出了如下修订：①宇宙空间是完全透明的，使用望远镜能够看到银河系最外沿的恒星；②恒星在空间的分布是均匀的，在某一大区恒星越密集，就表明这个方向上恒星延伸越远；③一切恒星的光度都一样，恒星亮度不同只是由于离我们远近不同而已。后来知道，这些假定与银河星系的真实情况不符，但是他在银河系结构上所建树的功勋是不可磨灭的。这假定的不正确在于，由于银河星系存在许多主要由碳、铁等元素及其他微粒组成的星际尘埃，它们大部分集中在银道面附近，其吸光作用使银河星系变得不透明，因此观察到的恒星光度也就不能完全反映恒星的光度。

为克服光学望远镜的缺点，改进天文观测工具，红外天文观测和射电天文观测技术应运而生。这两项技术的发展为天文学家在地球上观测银河星系提供了手段。天文学家对银河星系的结构较过去有了比较清晰的认识，探明了以前不清楚的许多问题，如发现银核中心还有许多电离云，在距银心 1.30×10^4 光年处有氢流膨胀臂，这个膨胀臂内包含的 6×10^7 个太阳质量的中性氢以 53 公里/秒的速度涌向太阳系。在银心另一侧的氢臂内，有大约相同质量的中性氢臂以 135 公里/秒的速度离银心而去；在距银心 2.28×10^2 光年处有激烈扰动的电离氢区以高速度向外扩张；银核中心不仅有大量的气体外流，而且还有强烈的射电源，射电源的中心部分不大于 1496×10^6 公里。

银河系的结构

银河系之所称之为“河”，是因为抬头所见只是一条巨大的星带。我们“身在其中”难窥其全貌，看到的只是它在天球上的视像。若能飞出银河系，在它的上空观看，它很像饶钹。身处银河系中地球上的人，达到这种认识是不容易的。丰富的想象和推测需要大量的观测来检验。最早系统观测银河的是赫歇尔父子。父亲威廉·赫歇尔对北半球天空的 1083 个天区进行观测，计数了 11 万多颗恒星。儿子约翰·赫歇尔对南半球天空的 2299 个天区进行观测，计数了 70 余万颗恒星。我们今天对银河系结构的了解是赫歇尔及其后继者们辛勤劳动的奉献。

银河星系是由 1400 亿颗恒星、星际尘埃及气体组成的一个巨大恒星系统，其总质量为 1.4×10^{11} 太阳质量。其所占的空间尺度为 10^{15} 光年。银河星系的形状像一个中间偏厚的扁平的圆盘，绕着自身的旋转轴不停地运动。如果我们能站在其上空俯视银河系，它的运动形式似水中漩涡，这个漩涡包含若干个旋臂，所以银河系叫漩涡星系（见图 4）。

图 4 银河系形象（据冯庆辉，1994）

组成银河星系的恒星、星际尘埃的 90%都集中在这个圆盘上，太阳系也在其中，被称为银盘。银盘的直径约为 10 万光年。银盘中间厚，边缘薄。中间凸起的部分呈扁球状，称为核球。核球的直径大约 1 万光年。核球的中央部分称为银核。银核的直径大约 3 光年，约由 100 万颗恒星组成。银河系的自转轴通过银核的中心。银盘的中心平面称为银道面。银道面的附近有许多由碳、铁元素组成的固体颗粒，即星际尘埃。银道面与自转轴的交点称为银心。

包围银盘的是球形的银晕，其外边界到银心约为 200 万光年。在这个区域里聚集了许多已有百亿年寿命的星球。球形银晕的外围是一个延伸到银河边界的球形的银冕。在银冕内弥漫着能发射 X 射线的气体，还弥漫着许多星云、暗云和分子云等气体物质，其密度很低，约 10^{-24} 克/厘米 ^{3}，总质量为银河物质的百分之几。

在银道面内有沿着旋臂方向平行分布的磁场，其强度约为（1～3）$\times10^{-6}$ 高斯。银河系中的星球一般沿磁力线方向排列的。

银河星系还能产生一种从 10^8 电子伏特到 10^{20} 电子伏特的高能粒子射线。这些粒子射线的主要成分是质子和 a 粒子。能量低于 10^{19} 电子伏特的粒子射线是各向同性的，充满空间，各处的强度相等。到达地球附近的宇宙射线的能量密度约为 10^{-19} 焦耳/立方厘米。

太阳系作为银河星系的一个成员，位于银盘上，距银心 3 万光年（见图 5）。太阳系与其他恒星一起在银河星系中不停地运动着。太阳系除自身的运动之外，还要绕银心旋转，并在银道面上周期性地往返移动。太阳系与其他恒星之间的相互作用也使太阳系产生局部的运动。通过天文观测推算，太阳系绕银心运动的轨迹是一个椭圆形。太阳系绕银心公转一周所用的时间称为银河年。银河年的长短是通过推算估计的。这种推算需要知道太阳系运行轨道的近银心点、远银心点或椭圆轨道的偏心率。由于方法和数据不同，差别颇大。有的学者估计一个银河年约为 2.5 亿（太阳）年，有的估计为 3 亿年。太阳系在银道面上下往返的周期也是一个可观的天文数字，有的学者估计为

图 5 银河旋臂结构（据中国科技大学天体物理组，1978）

2.38 亿年，也有的学者估计为 0.77 亿年，目前的认识现状不能令人满意。

在一个银河年的漫长的时间里，银河星系内的恒星可能会发生许多变化，如一些老的恒星可能会消失，新的恒星可能出现，恒星间的距离也会发生变化等。银河星系的这些变化，对地球将会有什么样的影响，这是近几十年来一些地质学家关心的问题。

宇宙结构的起源

宇宙现在的井然有序的结构是百亿年前的一个原初“火球”不断膨胀的结果。这种膨胀宇宙的观点在 50 年前提出时，连科学家们都惊异不已。其实，其原始思想在古代神话中早已有之。请看三国吴人徐整《三五历纪》有关盘古开天地的描述：天地浑沌如鸡子，盘生其中。万八千岁，天地开辟，阳清为天，阴浊为地，盘古在其中，一日九变。神于天，圣于地。天日高一丈，地日厚一丈，盘古日长一丈。如此万八千岁，天数极高，地数极深，盘古极长。故去天地九万里。这里的“天日高一丈，地日厚一丈”不也是一种宇宙膨胀模型吗？

今日之科学的宇宙膨胀论不是神话的臆测，而是有观测根据的。这就是所有的遥远的星系都在离我们而去，而且离去越远其逃离速度就越快，并应逐渐接近光速。如果从现在星系的退行速度追忆其过去，那么在大约 100 多亿年前它们都应是紧密地聚集在一起的。于是宇宙的演化犹如一个不断膨胀着的气球（见图 6）。这五彩缤纷的大千世界，不外是宇宙“膨胀”的结果。

图 6 膨胀的宇宙（据 P.Davis，1983）

诗人的宇宙之歌

各古老的民族都有自己关于宇宙起源的神话。公元前 8 世纪的古希腊人希肖特的《神谱》还保留着古希腊那种神人同性的神话特征。诗中有一段描绘天地之初的神话传说：在远古，先出现一张大嘴，意味浑沌初开，然后是一个博大的胸膛成为大地，再后来就出现了爱神爱罗丝。这张大嘴的阴间和黑夜由爱而结合，使黑夜怀胎并生下明亮的天空和白昼。而大地则生出星群灿烂的天穹以及高山和沧海。于是天穹笼罩大地，高山可供喜爱山林的女神们居住。

但神话宇宙故事毕竟是初民的意识，在科学昌明的今世，我们关心的是它如何在理性的指引下走向理性的宇宙论。诗人的宇宙之歌或许最能生动地反映这种转变。印度的《创造之歌》明显地表现了梨吠理性的路，中国诗人屈原的《天问》则是对神话传说发出理性的追问，而罗马诗人卢克莱修的长诗《物性论》已是由原子论哲学铸造出的宇宙论诗篇。这些都是宇宙故事从神话到科学的船和桥。

《吠陀经》中的《创造之歌》

《吠陀经》、《奥义书》和《薄伽梵歌》是印度的三大圣典。公元前约三四千年时，生活在中亚帕米尔高原附近的阿姆河一带的亚利安人分两支迁徙，一支向西北，另一支向东南。这向东南的一支又分为两派，一派人伊朗，另一派人印度。进入印度的亚利安人，约在公元前 1500 年移居到印度河上游的五河流域并发展出以《吠陀经》为代表的文化。随着亚利安人向恒河流域的拓殖，约在公元前 700 年开始的二三百年间形成了以《奥义书》为代表的文化。从公元前 400 年开始则进入了《薄伽梵歌》文化的时代。

《吠陀经》是印度最早的古籍，也是世界上最早的一批古籍之一。它的

产生年代约为公元前 1500～公元前 1000 年。《吠陀经》包括四部，即《梨俱吠陀》、《沙摩吠陀》、《夜柔吠陀》和《达摩吠陀》，共 1017 篇，辑为 10 卷。四吠陀的编辑时期当在公元前 1000～公元前 800 年间。四吠陀以《梨俱吠陀》为主干，除《达摩吠陀》为印度土著文化外，其余两吠陀皆为《梨俱吠陀》分化而成。

“吠陀”（veds）意为“知识”。《吠陀经》是印度人面对大自然的奥秘所作出的深沉思考的结晶，表明了他们的理解和求知的目标。《梨俱吠陀》中的《创造之歌》[①]（又称《无名歌》），虽然思维的逻辑性并不清晰，但关于宇宙起源的思考还是保留了印度哲学最原始的形态：

当时非无也非有，没有空界，没有空界之上的天。
覆盖着什么？盖在那里？还有什么给予庇护的？有水吗？有深不可测的水吗？
当时没有死，也没有任何不死。没有昼与夜划分的样子。
只有那一个东西，它没有气息而自能呼吸。除它以外不曾有任何东西。
只有黑暗，最初“这一切”隐蔽在黑暗中，成为无差别的浑沌。
当时所有存在的只是空虚所包围的大源：伟大的热之力产生那个一。
后来那东西开展而起出欲望来，“欲望”是原始的种子，心灵的胚胎。
圣人们凭他们心的思考来探究，发现有和无的链锁。
它们分开的线横断地延展出去：那线的上面是什么？下面是什么？
那里有孕育者，那里有强大的势力，自性在下，力用在上。
谁确实知道？这里淮能说明它？它从何处出生？这宇宙的造化来自何处？
诸神乃较迟于这个世界而产生的，谁知道最初它从何处生出？
它，这宇宙创造的最初起源、果是一切由它作成？还是没有制作它？
在最高天监视这个世界者确实知道它，或者他也不知道。

屈原的《天问》

诗人屈原（约公元前 340 一约公元前 278），战国时期的楚国人，曾任左徒、三阎大夫。在那雄霸相争的年代，他的对内改革政治和对外联齐抗秦的主张，为楚国没落贵族所不容，遭陷害而被放逐，长期流亡于沅、湘流域。在流放期间他写了《离骚》、《九歌》、《天问》《九章》、《远游》、《卜居》、《招魂》、《渔父》和《大招》等 9 篇抒发情怀的浪漫主义诗篇。鉴于自己的政治理想实现无望，终投汨罗江悲愤而死。《天问》这部问话体的史诗，实际上是中国的一部兴亡史。全诗 188 句明显分为两部分，前 56 句是问天问地，亦即问有关天地之初的传说，后 132 句是问人事的，亦即问有关人间盛衰兴亡的历史传说。先问开天辟地，后问人事兴亡，构成一部真正的宇宙故事。开天辟地之问共提了 26 个问题[①]：

那天地之初的远古万象，
究竟是谁把它传述下来？
那时候天地还没有形成，
又是依据什么而去考察？
当时还浑沌而不分昼夜，

[①] 糜文开编译：《印度三大圣典》，台湾中国文化大学出版社，1980 年版。

[①] 参见林庚：《天问论笺》，人民文学出版社，1983 年版。

谁又能够据理加以穷究？
到处是仿仿佛佛的元气，
怎么能够辨识它的根由？
昼夜既分而又运转不停，
这时究竟在进行着什么？
阴阳元气三者合而为一，
它们何为本原何为化生？
穹空之中高高的九重天，
有什么人曾经测量过它？
这该是何等伟大的功绩？
究竟是谁最初创造了它？
天的运转轴又连在何处？
擎天八柱又与那儿相当？
东南之柱为何短了一段？
九重天宇相互错落层叠，
它们怎么安放如何连接？
天边拐角参差措置甚多，
谁能知道它的确切数目？
周天运转中重合出什么？
十二时辰又把什么划分？
太阳和月亮如何连着天？
群星列宿怎么排成这样？
太阳每天从汤谷走出来，
晚上停宿在蒙汜这地方，
从天亮开始到天黑为止，
这全程它共走了多少里？
月亮具有什么样的品德？
使它能不断地死而复生？
它到底想贪图什么好处，
而把个玉兔抚育在怀里？
歧母不曾有过婚嫁偶合，
那儿来的尾宿九子之星？
箕宿处在什么样的方位？
阳和之气又在什么地方？
角宿未起东方不亮之时，
光明的太阳在哪里躲藏？

卢克莱修的《物性论》

卓越的罗马诗人卢克莱修（公元前 96 一公元前 55）的《物性论》[1]是一部长达 7000 余行的长诗，以常见的事物素材，以通俗易懂的语言，阐述了他的宇宙的基本原理和一般规律。在《物性论》的开头，诗人写到：

[1] 卢克莱修：《物性论》，方书春译，三联书店，1958 年版。

恐惧之所以能统治亿万众生，
只是因为看见那大地寰宇，
有无数他们不解其因的事物，
以为一切都有神灵在操纵。
而当我们一旦知道
无中不能生有，我们就会
更清楚地猜到我们寻求的
万物由之造成的那些元素，
以及万物之造成如何未借神助。

在卢克莱修看来，宇宙间除了原子和空虚别无他物。原子在空虚中运动犹如草原上的羊群奔跑。这世界的创造力就根源于原子的偏斜碰撞：

原子因自身重量而通过虚空垂直下落，
在偶然的时刻和偶然的空间场所，
它们偏斜了一点，
这偏斜之微以致你难以叫它偏斜。
若不是有这么一点偏斜，
原子将会像暴雨的雨点那样垂直下落。
若不是有这么一点偏斜，
原子之流中就既没有碰撞也没有卷缠，
自然也就不能把任何东西创造。

世上的一切都是由原子的无目的的碰撞所形成的排列结果。无生命的东西如此，有生命的东西也是如此，人的心灵也不例外：

我说心灵是由微细的粒子构成的。
假如你注意就会感到——
没有什么东西的运动，
像心灵想象和机体启动那样快。
心灵比任何眼前事更易激发，
它的显示如此之快，
必定是由很圆和很小的原子组成，
得以靠最小的脉动传递。

卢克莱修断定：大地、太阳、月亮、海洋以及其他一切，在宇宙里都不是单独存在的，宇宙间的事物远远超出任何人的能力。在长诗的结尾处诗人高歌：

自然是自由自在的，
不受天使们的主宰，
宇宙自己运动，
不烦神仙理睬。
谁有能力驾驭这不可名数的世界？
哪里有那样的大手能执着硕大无比的缰鞭？
谁能同步协调地旋转那天穹？
谁又能煽动天火
使大地温暖，
养育稻、麦、黍、菽于无穷？
谁能驾风驭云

使大地顿时昏暗，
驱弛雷霆摧毁庙宇，
使无辜者遭霹雳之殃，
而坏蛋却逍遥法外？

世界走向混乱还是走向秩序

宇宙的结构是井然有序的：地球绕着太阳转，太阳绕着银核转，银河在星团里转……这样的有序结构是怎样来的？有两种针锋相对的观点：一种观点认为，它是从比今天更有序的结构衰败而来，今后还要衰败下去，直至走到完全无序：另一种观点认为，它是从完全无序的状态发展而来，并继续发展下去。前者是“宇宙热寂说”，后者是“宇宙膨胀说”

宇宙热寂说

在 100 多年前曾经团科学知识引起一次宇宙热死的恐惧。英国诗人斯温伯恩（1837—1909）曾写下这样一首诗：不论是星星还是太阳

都将不再升起，
到处是黑暗一片，
没有溪流潺潺，
没有声响也没有景色，
没有冬天的枯叶，
也没有春的嫩枝，
没有白天，
没有白天劳作的欢乐，
甚至没有夜晚，
因为没有夜晚的梦幻。

英国物理学家斯诺（1905—1980）在其著作《两种文化与科学革命》（1959 年）中评论说，一位对热力学第二定律一无所知的人文学者与一位对莎士比亚一无所知的科学家同样糟糕。

热力学第二定律指出，一个孤立的系统，如果原来其中各部分温度不同，演化的结果一定是温度均匀化，即处处一样，这叫热平衡，即一个系统的自发过程总是从非平衡态演化到平衡态，相反的过程不会是自然的。这种从非平衡到平衡的自然过程也叫熵产生的过程。因而熵被认为是无序的量度。对第二定律的发现者克劳修斯（1828—1888）和对熵给出统计解释的玻耳兹曼（1844—1906）以及不少物理学家来说，熵理论的宇宙学含义是显然的。按热力学第二定律，宇宙的有序储存不断减少，正在走向衰败。热力学刚问世不久，物理学家亥姆霍兹（1821—1894），在一次演讲（1854 年）中就明确说过，热力学第二定律意味着整个宇宙最终将处于温度均匀的热平衡状态，从而陷入永恒的静止状态。

在 19 世纪初期，宇宙热寂说的社会震动颇大，宗教神学借它来宣告“世界末日”，有些历史学家把它推广为人种将从坏到更坏直至绝灭。在 20 世纪还有人发展出一种世界观，认为走向混乱与死亡是宇宙的一条普遍规律。《熵：一种新的世界观》的作者里夫金和霍华德甚至认为，人类的任何进步

都加快了自己灭亡的步伐。

宇宙膨胀说

与宇宙热寂说相反，宇宙膨胀说认为宇宙是从无序走向有序，即从热平衡态演化为非平衡态，或者说，从温度均匀的状态演化到温度不均匀的状态。

宇宙膨胀首先是理论的预言。自爱因斯坦（1879—1955）发表《广义相对论的宇宙学考察》（1917 年）一文以后，以广义相对论为理论基础的现代宇宙学迅速发展起来，将爱因斯坦的引力场方程用于各向均匀同性的宇宙，得到的模型宇宙中，有一种是其半径可以不断增大的，即膨胀着的宇宙。后来，发现来自遥远星系光谱线波长的变化可以解释为这些天体正在以同距离成正比的速度离我们而去，并且宇宙中还弥漫着十分接近各向均匀分布的 3K 微波辐射。如果不认为我们的地球在宇宙中有特殊的地位，那么可以认为 3K 辐射是宇宙早期各向均匀假设的证据，而星系退行是宇宙在膨胀的表现，因而这两者极有力地支持了宇宙膨胀假说。当基本粒子物理学的一些结果引入后，宇宙膨胀假说变得更完善了。

如果宇宙膨胀假说是对的，因为它假定了宇宙的初始状态是均匀的，而我们今天所看到的宇宙是不均匀的，是由行星系统、恒星系统和星系团组成的有序结构，那么宇宙膨胀假说所描绘的是从物质分布的均匀状态走向不均匀状态，亦即在结构上从无序走向有序。

那么宇宙膨胀说的宇宙进化同热力学所描述的宇宙退化的矛盾怎么解决呢？这并非表明热力学第二定律错了，所错在于它在宇宙中的应用忽略了不应忽略的“引力”的存在。在宇宙尺度上，我们可以把天体视为宇宙“气体”的“粒子”作热力学处理，但它与一盒子气体是不同的。对于空气之类的气体，它们之间的引力作用微小到足以忽略，而对宇宙气体则不能，必须把它看成一个自引力系统。

所谓“自引力系统”，是靠引力维系的系统，并且是加热降温而放热则升温的系统。例如，太阳就是一个自引力系统，太阳之所以作为一个整体而不离散成碎片全靠引力维系，并且如果太阳内的核反应停止后向外辐射能量，它不但不会降温反而升温。太阳系、银河系以及星系团等都是这类自引力系统。

对于作为自引力系统的宇宙气体，我们可以假设它的分布是均匀的，但涨落还是存在的，由于引力的存在会使涨落增强，从而由均匀分布变为不均匀分布。涨落服从“N 的平方根定律”，即若分子的平均数为 N 则这一数量的涨落接近于 N 的平方根。如在室温和标准气压下。1 立方厘米空气包含 10^{19} 个分子，其涨落绝对值为 10^{9}，相对值为 10^{-10}。又如太阳包含 10^{57} 个氢原子，其绝对涨落值为 10^{28}，相对涨落值为 10^{-29}。尽管这种随机的热涨落相对值很小，但对自引力体系来说它可以被增强。例如，宇宙气体的某处由于涨落造成密度有所增加，因而引力有所增强，也就会吸收更多的物质，造成更高的密度。相反，如果某处由于涨落造成密度有所减少，因而引力有所减弱，也就会使更多的物质逃离，造成更低的密度。正是引力的这种加强涨落的作用使宇宙气体从均匀状态变为非均匀状态。

宇宙始于火还是始于冰

关于宇宙演化有两个对立的方案：一个方案认为宇宙始于火；另一个方案认为宇宙始于冰。前者能较好地说明宇宙早期的演化，后者自认为能说明宇宙演化晚期团块结构的形成。

火球假说

宇宙始于原始火球的一次爆炸，所发展出的宇宙演化模型，为大多数宇宙学家所偏爱，被称为“标准模型”

按照标准模型，距今 150 亿年前的宇宙物质的状态是密度和温度的无穷大或接近无穷大的状态。宇宙的原始状态是一种对称的真空状态，以 10^{50} 或更大的系数开始膨胀。这时，四种基本相互作用力，即引力、强力、弱力和电磁力仍不可区分。随着宇宙的膨胀和降温，犹如水变成冰那样，真空发生了一系列的相变。到爆炸后的 10^{-43} 秒，温度降为 10^{32} 开尔文时，超统一相变发生，引力首先分化出来，夸克和轻子可以相互转变。到爆炸后的 10^{-36} 秒，温度为 10^{28} 开尔文，大统一相变结束，强作用力和弱—电作用力分离，物质与反物质之间的不对称开始出现。到爆炸后的 10^{-10} 秒，温度降为 10^{20} 开尔文，弱电相变发生，弱电作用力和电磁作用力分离，完成四种基本作用力的全部分离。到爆炸后的 10^{-6} 秒，温度降为 10^{13} 开尔文，宇宙物质的密度仍为现在密度的 10^{39} 倍，宇宙半径的膨胀系数已为 10^{13}。这时宇宙已进入强子时代，但宇宙物质主要以辐射的形式存在，光子数与质子数之比约为 1 亿：1。在爆炸后的 10^{-2} 秒，温度降为 10^{11} 开尔文，宇宙进入轻子时代。到爆炸后的 1 秒，温度降为 10^{10} 开尔文，这时的宇宙物质还是由质子、中子、电子、光子等基本粒子组成的“宇宙汤”，但中子数与质子数以接近相等的比例冻结，正负电子湮灭。到爆炸后的 3 分钟，温度降为 10^{9} 开尔文时，宇宙才进入核合成的时代，由两个中子和两个质子构成的氦核形成，一些轻元素，如氘、氚、锂、铍、硼等也形成了。到爆炸后的 4 万年，温度降为 4000 开尔文，这时的宇宙才由以辐射为主转变为以物质为主，主要物质是质子和电子，它们结合成氢原子。到爆炸后的几亿年，温度降低到几百开尔文时，才开始进入星系形成的时期，中性原子在引力的作用下，逐渐凝聚为原星系，原星系集在一起形成等级结构的星系团，同时，星系本身也分裂为千万颗恒星。

这种热爆炸模型在详细解释宇宙成团结构时遇到困难，宇宙始于冰的“冰球假说”正是为解决这方面的难题而提出来的。

冰球假说

与火球假说相反，冰球假说认为，宇宙是从绝对零度或接近绝对零度的宏观均匀的稠密气体状态开始膨胀的。

在绝对零度这么低的温度下，怎么会是气态呢？这不是与水在摄氏零度就结冰的经验矛盾吗？物质的相态，究竟是气态还是液态或固态，决定于其内能总和的正负。如果内能为负值将表现为固态或液态，如果内能为正值则呈气态。一个物理体系的总内能是由组成物质的动能和位能之和构成的。宇宙初始的气态是它的高密度决定的。按照量子力学的测不准关系，在绝对零度时，一个电子或质子的平均动量近似等于普朗克常数除以粒子间的平均距

离。因为功能与动量的平方成正比，于是动能也就与粒子间平均距离的平方成反比了。而由化学内聚力决定的位能，即带有相反电荷的粒子之间的静电吸引能，是与粒子间平均距离成反比的。在高密度情况下，尽管温度极低，由于动能大于位能，总内能为正，因此介质呈气态。

冰球假说暗示，在现有物理定律起用前的不到 1 微秒，无论发生什么过程，均不会产生宏观密度变化或释放大量能量。关于宇宙演化的基本思想脉络是，完全无序的宇宙初始介质，从凝结然后破裂为固态氢组成的行星般大小的碎块开始呈现出结构序。在引力作用下，这些碎块“ 粒子 ”组成的冷“ 气体 ”宇宙产生密度的涨落，演化为自引力星团。这些团块又依次成为“ 粒子 ”，再三重复这一过程，一个蜂窝状的自引力系统等级结构就由小到大地构建起来。

冷的、高密度的气态宇宙介质，随着空间膨胀而来的是粒子间的平均距离增加，动能和相互作用能同时减少，但动能减少得更快，终使总内能变为负值。于是，宇宙介质发生相变，先是液化，随后凝结为固态。而这种固态介质不久就开始破碎，其破碎是以消耗能量最小的方式进行的，也就是碎块尽可能地大，以使表面积与体积之比尽可能小，这样单位质量所做的功也就小。但碎块的大小最终决定于其内聚力与自引力之和恰好维持其块状而不再进一步分离。这样就形成了其质量约为地球质量 10 倍的金属态氢组成的球。在形成了这样的金属氢组成的固态球之后，它作为早期宇宙的“ 粒子 ”，使宇宙的演化完全在引力的主宰下进行。

这时，我们可以把宇宙看作是由这些“ 粒子 ”组成的宏观均匀的引力“ 气体 ”。与火球假说不同，冷的引力气体内能一开始就是负值，随着宇宙的空间膨胀，其负值越来越大，引力积聚必然稳定增大。由于空间膨胀，动能和引力能都减少，但动能减少的速度比引力能减少的速度快。当两者的比例低于 2：3 时，“ 气体 ”在各个尺度上密度涨落的增长变得极不稳定，这种不稳定引起的运动会抑制这种不稳定的增长，最终在保持低于 2：3 的水平上实现膨胀和不稳定的平衡。二者的比值保持在 1：2 和 1：1 之间的一个定值，随着宇宙膨胀动能和引力能一起稳步增加，内能也以同一速率增加，终使介质变成比“ 粒子 ”

（行星般大小的固态氢球块）的平均间隔稍大的块状物。过密的团块比作为一个整体的介质膨胀得慢些，很快分离为独立存在的自引力星团。这一星团又作为“ 粒子 ”，在宇宙继续膨胀中形成“ 星团的星团 ”。这些星团的星团又作为粒子起作用，这样连续进行下去，就形成了蜂窝状的自引力星团等级结构。天体物理学家雷泽尔（DavidLayzer）极力主张这种冷演化的宇宙图像。

进化发展还是循环

由于引力的存在，膨胀的宇宙不会走向热寂，但它的未来却并非一种前途。按照现代宇宙学理论，一个膨胀着的宇宙既可能无限膨胀下去，也可能膨胀到一定程度开始收缩而形成一个胀一缩循环的无限过程。

什么决定着宇宙的未来

在爱因斯坦的宇宙方程中，包含着一个宇宙常数Λ。它并不是爱因斯坦广义相对论的一个自然结果，而是考虑到宇宙整体作为宇宙学研究对象而引进的。对于宇宙方程的诸多数学研究为宇宙的未来行为提供的判据，可依Λ的三种数值予以叙述。

第一种情况，$\Lambda<0$。在这种情况下，宇宙只以胀一缩的方式往复循环，别无它途。

第二种情况，$\Lambda=0$。在这种情况下，宇宙的未来行为由宇宙物质的相对密度Ω_0决定。相对密度为平均密度ρ_0与临界密度的比，即$\Omega_0=\rho_0/\rho_c$。对应于$\Omega_0\leq1$，宇宙将无限地膨胀下去；而对应于$\Omega_0>1$，宇宙则处于胀一缩的循环运动中。

第三种情况，$\Lambda>0$。在这种情况下，当$\Lambda<\Lambda_E$（某一值）时，宇宙将取胀一缩的运动方式，余皆为无限膨胀的方式。

无限膨胀的宇宙通常称为”开放的宇宙”，而往复胀一缩的宇宙则称为“封闭的宇宙”。宇宙究竟是开放的还是封闭的或只决定于宇宙数Λ的值，或决定于Λ和Ω_0两者的值。

我们现在能够预言宇宙的未来吗

现在的宇宙学理论多采取$\Lambda=0$ 的宇宙解，所以判断宇宙未来是走向开放还是走向封闭，取决于对Ω_0的认识。

现在的观测资料表明：宇宙间发光天体贡献的物质平均密度$\Omega_L\approx0.007$，星系周围的暗晕贡献的物质平均密度$\Omega_H\approx0.07\sim0.10$，星系团附近的物质对平均密度的贡献$\Omega_H\approx0.10\sim0.30$，三者之和的总贡献约为$\Omega_0\approx0.2$但是这没有包括星系团以上的大尺度天体，1980 年以来以星团动力学理论为基础的大尺度观测推断的结果是远远大于此值的，$\Omega_0\approx1\pm0.30$。这表明，在误差范围内，Ω_0既可能大于 1 也可能小于 1。

因为宇宙大部分天体是不发光的，如太阳系中行星和卫星都不发光，这给测量宇宙物质平均密度带来很大困难。由星团动力学方法测定的结果与光度学方法推算的结果相差悬殊。星团动力学理论上估计$\Omega_0\approx1$，但观测到的发光天体连同可能发光的天体估计在内，其质量贡献的总和还不及宇宙总质量的 1%。那些看不见的质量究竟是由什么组成的尚不十分清楚。随着天体尺度增大而增大的“暗物质”，可能是弱的红星、行星、黑洞，也可能是某种亚原子粒子、重子和非重子，它们只参与引力和弱力作用，而不参与相互作用。探测暗物质分布的努力，包括使用光学望远镜、红外和 X 射线天文卫星以及引力透镜，可望在未来有更精确的结果。

预言宇宙的未来的困难，不只是“观测”的问题，也许当前更重要的是理论上的问题。现在的宇宙学在理论上并没有完全实现宇宙整体性的要求，而这种整体性要求是现代宇宙学的出发点。现代宇宙学中宇宙的整体性是以下述几条基本原理为保证的：第一，宇宙在大尺度上和长时间，其性质是均匀、各向同性的，即宇宙学原理；第二，宇宙中的时空和物质是相互联系的，这由爱因斯坦的广义相对论来保证；第三，宇宙中的局部行为与整体相关，即爱因斯坦一赫原理，主要表现为宇宙常数Λ的存在；第四，物理学定律在

宇宙整体范围适用，即自然规律的普适原理。问题是现在的标准宇宙模型放弃了宇宙常数，即令Λ＝0。

诚然，爱因斯坦等人后来也受影响放弃了宇宙常数，但现在可能要重新认识这个问题。宇宙常数是否为零、本质上是真空是否有能量的问题，经典真空被界定为没有物质的状态，因而真空能应为零。然而量子场论视真空为场的基态，以场论估算的各种因素对空间能密度的贡献高出宇宙学观测事实所能接受的上限几十个量级。Λ＝0 的标准宇宙模型可能不对，或许作为空间（基态场）能量—动量张量系数的Λ是不能为零的。

宇宙循环论

历史循环论是不可取的，但宇宙循环论却是可以接受的。往复胀—缩的宇宙循环模式很可能就是我们生活于其中的宇宙的基本运行方式。早在 19 世纪恩格斯（1820—1895）就针对宇宙热寂说提出宇宙大循环的概念。他在 1875～1876 年写下的《自然辩证法》[①]导言中，用相当多的文字讨论了宇宙大循环问题。他从“一切产生出来的东西，都一定要灭亡”这一铁的定律说起，认为经过多少亿年，或多少万代生了又死了，终有这样的一天会无情地到来，那时太阳放出的热不再足以维持地球上的生命，地球也像其他行星一样变成一个死寂的世界，绕着冰冷的太阳旋转，而且所有其他星系最终也将遭到和太阳系同样的命运。但他确信运动的转化会使这种死亡获得新生。他猜测放射到太空中的热一定会通过某种途径转变为另一种形式，使已死的太阳重新转化为炽热的星云。他推断说：

> 这是物质运动的一个永恒的循环、这个循环只有在我们的地球年代不足以作为量度单位的时间内才能完成……在这个循环中，物质的任何有限的存在方式，不论是太阳或星云，个别的动物或动物种属，化学的合成或分解，都同样是暂时的，而且除永恒变化着、永恒运动着的物质以及这一切物质运动和变化所依据的规律外，再没有什么永恒的东西。但是，不论这循环在时间和空间中如何经常地和如何无情地完成着，不论有多少百万个太阳和星球产生和灭亡，不论要经历多么长时间才能在一个太阳系年而且只在一个星球上造成有机生命的条件，不论有无数的有机物一定产生和灭亡，然后具有能思维的脑子的动物才从它们中发展起来，在一个短时间年找到适于生活的条件，然后又残酷地被消灭，我们还是确信：物质在它的一切变化中永远是同一的，它的任何一个属性都永远不会丧失，因此，它虽然在某个时候一定以铁的必然性毁灭自己在地球上的美丽的花朵——思维着的精神，而在另外的某个地方和某个时候又以同样的铁的必然性把它重新产生出来。

恩格斯的宇宙循环假说既像是给老子关于“道”的“独立不改。周行不殆”作注释，又像是为现代宇宙学的“胀—缩”模式提供先知。

现代宇宙学中的宇宙胀—缩模式把进化的发展和退化的发展统一在一个循环过程之中了：膨胀是进化的发展，而收缩则是退化的发展，只有两者的结合才是宇宙的完整过程。

[①] 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1984 年版。

太阳和地球的形成

关于太阳和地球的形成问题，对于在地球上栖止繁衍的人类来说，其期待莫可过者。从人类初租的太阳崇拜、旷古圣贤的哲学思辨，到今日智力精英的科学思考，所论可谓“殊途同归”和“同途殊归”互补。

在印度有《日神苏雅颂》祭诗，在中国则有《后羿射日》传说。在古印度人心目中，太阳神苏雅是天之眼，以其光明去除夜之黑暗，乘七马之车经行天空。而中国没有系统的神话，只是一些支离的故事。据说在尧的时代天有十日，晒得草木焦枯，流金砾石，危害人民。于是帝尧命后羿仰射十日。羿射十中九，一个幸免而存。这一个太阳乘由和羲驾驭的九龙车，飞驰长空。神话一般鲜于涉及太阳的形成问题，唯盘古开天辟地神话论及：“首生盘古，垂死化身，气成风云，声为雷霆，左眼为日，右眼为月，四肢五体为四极五岳，血液为江河，筋脉为地理，肌肉为田上，发髭为星辰，皮毛为草木，齿骨为金石，精髓为珠玉，汗流为雨泽，身之诸虫因风所感化为黎甿。”尽管神话荒诞，就其所涉及问题本身来说却是哲学思辨和科学思考的先导。

认识太阳系起源的困难

太阳是离我们最近的一颗恒星，也是太阳系的中心。太阳系的起源问题一直是哲学家、天文学家关注的一个问题。由于天体结构和星球形成的过程的不可再现性，使得对它的研究具有历史学的特征。人们或是依据经验观察作思辨的探讨，或是根据天文观测资料提出科学假说。从 12 世纪至今，有关太阳系形成的哲学思辨和科学假说有许多种。每一种哲学的思辨都为科学的思考提供了某种启示，每一种科学假说都在一个或儿个方面符合太阳系的运动参数。

哲学思辨的殊途同归

东西方哲学的差别之一是，中国哲学重以连续的元气作为物质基始，古希腊哲学重以分立的原子为物质基始。这两种物质基始观可谓哲学上的“殊途”，但是在宇宙形成问题上却达到了“同归”。中国哲学家朱熹的“元气漩涡说”与西方哲学家笛卡尔的“以太漩涡说”和康德的“星云说”，其基本思考方向是一致的。而且，这种思考方向与现代宇宙学的一致性，以致会使人认为他们是先知。朱熹（1130—1200）依据易学的太极生化思想提出来了元气漩涡说。他认为“太极”乃生物之初，阴阳结合是生长的基础：万物所生皆是如此，如牛羊草木，皆有牝牡，一为阴一为阳，凡天下事，一不能化，一阴一阳，始能生化万物。这就是他的以阴阳原理为基础的生化观。他把这个生化观运用于宇宙论，提出了一个具有物理机制的天地生成图式，以元气旋转解释天地形成的假说，并依据这一假说力驳历法家的天左旋而日月和五星右旋的天体运行模式。朱熹在其《类经图翼·运气》中对他的天地生成说有一个典型的表述：“这一气运行，磨来磨去，磨得急了，便拶出许多渣滓；里面无处出，变形成个地在中央；气之清者便为天，为日月，为星辰，只在外常周环运转，地便在中央不动，不是在下。”用现代物理的语言说，这是一个力学的气旋模型。如果把地在中央改成太阳在中央，它就是其后 500

年方出现的笛卡尔的宇宙形成的漩涡假说，也与 200 年后才提出的康德的宇宙形成的“ 星云说 ”十分相似。至今人们尚多不理解，朱熹为什么在天体运行模式上与历法家对抗，并且以其为哲学家干预科学而失误的典型。这对朱熹来说是很不公平的。孰不知，朱熹之所以批评历法家的天体运行模式，正是以其宇宙生成模式的动力学机制为依据的，而历法家的天体运行模式完全没有这类的物理机制。西汉时代的《夏历》一书就主张“ 列宿日月皆西移，列宿疾而日次之，月最迟，故日与列宿俱入西方 ”，认为日月也同天（列宿）一样从东向西行，称之为“ 左旋说 ”。而历法家则认为，天是从东向西行的，而日月则是从西向东行的，称之为“ 右旋说 ”。两者在天的运行方向上是一致的，而在日月的运行方向上有左旋和右旋之分。历法家并没有提供右旋的任何物理根据，而朱熹的左旋说则是以其宇宙生成的动力机制为基础的。在一气旋转中生成的一切天体，只能沿一致的方向旋转。

笛卡尔（1596—1650）的“ 以太漩涡说 ”是他在其著作《哲学原理》（1644 年）中提出来的。这个学说认为在太初混沌里，物质微粒逐渐获得涡流式的运动，各种大小的涡流以及它们之间的摩擦使原始物质匀滑，被挤出的一些物质落入漩涡中心，从而形成了太阳；较细微的残余物形成透明的天空；较粗大的物质块则被俘获在涡流里，形成了地球和各个行星；次级涡流俘获的物质则形成了卫星（见图 7）。这个学说是在牛顿提出万有引力定律之前出现的，不能很好地说明太阳系的运行规律。

图 7 笛卡尔的漩涡（据沃尔夫，A.，1985）

哲学家康德（1724—1804）的“ 星云说 ”是他在其著作《自然通史和天体论》（1755 年）中提出来的。他假定太阳系的所有天体都是从一团主要由固体尘埃微粒构成的稀薄的原始星云通过吸引力和排斥力的作用而逐渐形成的。他所说的吸引力就是牛顿的万有引力，而排斥力则主要是微粒之间的相互碰撞所产生的机械力。在万有引力作用下，星云内密度较大处的物质微粒把周围的物质微粒吸引过去，因而随引力增加而吸引更多的微粒，这样的连续过程就逐渐形成越来越大的团块。在这一过程中，团块之间有相互碰撞的机会，碰撞的结果是一些团块破碎了而另一些则合成更大的团块。这种吸引和碰撞进行到一定程度就形成了中心天体——太阳。当中心天体形成后，其周围的微粒或团块就会在中心力的作用下落向太阳；同时，在微粒或团块落向太阳的过程中，有些团块由于碰撞而发生偏斜并绕太阳转动起来，这些绕太阳转动的微粒和团块，由于吸引和排斥作用逐渐凝聚成行星。在形成行星的过程中，同样的吸引和排斥机制也形成了卫星。这样一个形成过程的结果是，密度较大的行星离太阳近，密度小的离太阳远，形成按密度大小由近到远排次的行星系统。

科学探讨的同途殊归

牛顿（1643—1727）实际上已接近从科学上探讨宇宙的起源。他在 1692 年 12 月 10 日致本特雷（1662—1742）主教的信中说：假使（形成）我们的太阳和它的行星的物质以及宇宙间其他物质是均匀地散布在太空，而且每个粒子都对其他粒子具有内在的引力、我们还假定散布着物质的整个空间只是有限大小，那么在这空间里的物质由于引力作用都从这空间的极边处自外向

内集合起来，其结果是在这空间的中心形成一个巨大的球状团块。他认为，假使物质是均匀地弥漫在无限空间，那么它们绝不会集合成一个团块，而是有一部分物质集合成一个团块，另一部分物质集合成其他团块。在这无限空间里就散布着相互之间距离极大的众多大团块。牛顿在这里提出了太阳和众星的引力成因,但真正启动科学的太阳系起源研究的是法国科学家布丰（1707—1788）和拉普拉斯（1749—1827），他们分别提出的假说开辟了两种类型的宇宙起源模式。

法国动物学家布丰，在其著作《一般和特殊的自然史》（1745 年）中提出了一个关于太阳系形成的假说，认为有一个质量巨大的替星，曾经与太阳相碰，使太阳发生自转，并有一部分物质裂为碎块，飞散到天空，成为行星和卫星，形成了当今的太阳系。这个学说认为太阳系的形成是一次灾变的结果，被称为“灾变说”。太阳系形成的这种“灾变说”是站不住脚的。因为彗星的质量非常小，即使与太阳发生碰撞也不足以使太阳的一部分物质飞散出来形成行星和卫星。

在布丰之后 50 年，法国物理学家拉普拉斯（1749—1827）在其著作《宇宙体系论》（1796 年）的附录 7 中，独立于哲学家康德提出了另一个太阳系起源的“星云假说”。他认为，太阳系中的所有天体都是由一团呈球状分布的、灼热的、缓慢地自转着的气态星云形成的（图 8）。这星云球的直径比现在的太阳系的直径要大得多，其温度也比现在的太阳的温度高得多。由于冷却收缩，自转加快，离心力加大，在平衡的向心力和离心力联合作用下，导致星云球变扁并逐渐成为扁平盘状。当离心力超过向心力时，便分离出一个旋转的气环。在星云继续冷却的过程中，不断重演气环分离的行为，逐渐形成许多环。最终，星云中心部分凝缩成太阳，各气环积聚成行星，而热的行星又以分离出气环的机制形成卫星。

20 世纪有关太阳系起源的探索大体是沿布丰和拉普拉斯所开辟的两个方向前进的。

沿灾变说的进路有张伯伦（1843—1928）的“星云说”（1900 年）、金斯（1877—1946）的“潮汐说”（1916 年）、施密特（1891—1956）的“陨星说”（1944 年）、霍伊尔（1915—）的“超新星说”（1960 年）。沿星云说的进路有魏札克（1912—）的“漩涡说”（1944 年）、阿尔文（1908—）的

图 8 星云假说之星云形成（据盖保民，1991）

“磁偶合说”（1942 年）、戴文赛（1911—1979 年）的“星云—星子说”

由于银河和其他星系中普遍存在气体星云和尘埃物质，近几十年的研究者已放弃发生几率极小的灾变起源的研究，转向观测证据较充分的“星云说”方向。

在星系中观测到的各种外形的气体星云，小的为太阳系直径的几倍，大的为其数万倍，一般其物质密度都很低，且主要成分是氢和氦。所以，多数研究者倾向，形成太阳系的物质是原始星云。在目前所见的太阳系形成的理论中，密度波理论因其在数学严密性方面的优点而为我所偏爱。我们关于太阳系形成的讨论，将以密度波理论为基础，并结合中国天文学家戴文塞有关太阳系起源模型，一个综合星云说和星子说的模型，加以描述。当然，大家不可以认为它是完全真实的过程，而只应把它看作可能接近真实的模型。

太阳系形成的过程

20 世纪以来，对太阳系形成问题的认识过程，本质上是灾变说与星云说交替进行的曲折过程。在天文观测基础上，世纪之初的布丰“灾变说”的迅猛复兴取代了古老的康德—拉普拉斯“星云说”，而在世纪之中的“星云说”重新复兴。我们将基于“星云说”所得到的图像，并且以数学严密性最令人满意的密度波理论所达到的认识为基础，综合天文学的观测结果加以叙说。

密度波理论用于太阳系形成的研究，所得到的结果大至如下所述。太阳系的原始星云是从银河系星云盘一个旅臂上分离出来的。它也像银河气体星云盘一样是个旋转着的星云气体盘，有稳定的边界。这个太阳系星云盘的单臂和诸环带叠加结构，使得在它们的文汇点上，由于引力势阱而发生星云物质的聚集，而最后形成环绕太阳中心的行星系统。对于太阳系形成这一问题来说，这还不是全过程，必须增加星云盘如何形成和星体如何在引力势阱处形成的内容。这就是本节的梗概。

太阳系星云盘的形成

太阳系的星云是从银河系的一个旋臂上分裂出来的。虽然银河星云是扁盘状的，但分裂出来的太阳星云却不一定一开始就是扁盘状。因为银河旋臂的厚度远大于现今太阳系的直径。最简单的假定认为，最初的太阳星云是球形分布的。这就有一个如何从球形变成圆盘形的过程。

天文界多认为,形成太阳系的原始星云是 1000 个太阳质量以上的大星际云的一小部分，在大星际云收缩到密度 $\rho=10^{-15}$ 克/厘米 ^{3} 时，瓦解为上千个小星云，其中之一就是太阳的原始星云。太阳系原始星云的物质，起初应当是均匀的。太阳系星云物质成分依其凝聚温度分为三类：凝聚温度力 1600～1400 开尔文的铁、硅、镁、镍及其氧化物、硅酸盐等土物质,凝聚温度为 200～60 开尔文的氧、氮、碳、硫及其与氢的化合物等冰物质，凝聚温度为 20 开尔文以下的氢、氦、氖等气物质。这三类物质按质量的百分比计，上物质占 0.4%，冰物质占 1.4%，气物质占 98.2%。

由这样的组分组成的旋转着的球形星云团,因自引力而发生的收缩是‘似落体”式的，内部收缩得快，外部收缩得慢。所以星云外部物质赶不上内部物质收缩而掉队，并且因为自转惯性离心力在极区不存在或很小而物质下落最快，因而趋向形成中间厚一些的扁平气盘。又因为在开始收缩时密度很小，收缩释放的引力能以辐射的形式发射出去，使得星云收缩近似等温过程。当密度增加到足以吸收自己发射出去的红外辐射时，才开始升温。到星云盘形成时，中心温度约为 2000 开尔文，而边缘温度则只为几十开尔文。这种沿半径方向有梯度差的温度分布，使星云盘物质的分布变得不均匀。在高温区，除了绝大部分土物质被保存下来外，冰物质的绝大部分被蒸发，气物质全部被蒸发：在中温区，不仅全部土物质和冰物质得以保留，而且也保留了绝大部分气物质；在低温区，虽然温度低，但因引力弱，大部分气物质得以逃逸，而留下土物质和冰物质。

这样的太阳系星云盘中，主要是气体形态的物质，也有少量的固体尘埃微粒，但只占星云总质量的 1%。根据对星际云的观察，尘粒的最初半径为

10^{-5} 厘米的量级。由于温度的径向梯度，在内部（包括类地行星区），硅酸盐和铁、镍物质熔成球粒状液滴；在外部（巨行星区），因温度低，气物质和冰物质凝成液滴和冰粒而土物质则不能成球而仍以固体尘粒形态存在。这些尘粒和液滴悬浮在气压变化的星云盘大气中向赤道面沉降的过程中，由于密度不同，在内部区铁物质比石物质先到达星云盘赤道面，而在外部区冰、气物质比土物质先到达赤道面，因而形成夹心饼干式的尘层结构。

密度波理论的太阳系结构形成图像

密度波指物质分布的密度波动。无论是分立的还是连续的物质体系，无论是这物质系的组元或部分的运动是规则的还是不规则的，其疏密不均的空间分布随时间而变化的特征，可以用密度波理论来描述。

密度波理论的基本方法是，把研究对象作流体处理，建立流体力学方程，并根据边条件求出波动解。林家翘将此方法发展为银河系结构理论（1964 年），李启斌又将其推广于太阳结构研究（1977 年），其结果均可与主要观测事实比较。

密度波理论用于银河系和太阳系，其对象当然是作为一个非常薄的气体盘处理，不仅应遵守流体定律，而且因为气体盘的质量较大，引力作用是不可忽略的。出于这些考虑建立起来的方程所导出的波动解和色散关系，为分析银河系和太阳系结构的特征提供了图像。

在密度波理论中，由恒星和星际尘埃组成的圆盘，其密度变化是以角速度 Ω_p 绕银心旋转的密度波，形成多臂的螺旋图样，旋臂延伸范围随旋臂数的增多而减小。而距银心 γ 处的银河物质绕银心的角速度 $\Omega=\Omega(\gamma)$，与 Ω_p 有一个差值。当银河物质的径向振荡频率与密度波的频率相同时发生共振，形成内外两个共振区。而当银河物质绕转的角速度与密度图样的角速度相等时又形成共转区。

银河系是以双臂为主的，在银心距的一定范围上表现为多臂结构。太阳系目前正处于银河系多臂范围内，位于内共转区和外共转区之间。

对于太阳系，其密度变化图样则是由一族环带和单旋臂及靠近共振圈的多臂叠加而成的。单臂与诸环带的交点形成一系列势阱，环带上星云物质向这些势阱聚集就形成行星（图 9），由于这共转圈两边的速度差还形成一个推动行星自转的力。靠近共振圈的次级势阱使星云物质形成小行星和替星。

星云凝聚成星体的过程

密度波理论只指出了环带和单臂交点所产生的势阱是星云凝聚形成天体的条件，并没有说明引力位阱在吸积星云物质的过程中以何种方式形成星体。关于星云凝聚成星体的过程已有数十种假说被提出。

按照戴文赛的学说，夹心结构星云盘中的尘粒先形成星子，然后由星子聚集成行星。在碰撞吸积过程中，相同成分的液滴相遇时即合并长大，而不同成分的液滴则不能聚合，犹如油珠和水珠不相合并一样。尘层的夹心饼干式的结构使得大星子形成的概率，在密度高的中心层远大于密度低的上下层。随着液滴的长大而成为“星子”。星子的长大，起初主要是碰撞吸积，以后由于碰撞合并而使星子总数变少，单个星子的质量也越来越大，终将变到引力吸积成为主导地位的地步。当星子长大到其表面的逃逸速度等于气体

分子的平均热速度时，固态星子（核）就开始吸积气体。

地球诞生之初

从 17 世纪开始，地球诞生之初的情况就已成为学者思考的课题。笛卡尔设想原初的地球也像太阳一样，是一个发光的球体，外围是太阳黑子似的斑点，它们随着地球的冷却转变成坚实的地壳。伯内特（T.Burnet）在其《神圣的地球》（1681 年）中认为，最初的地球仅仅是空气、水、油和土的混和物，后来按重量分离为重者在中，其次是水，最外是空气。莱布尼茨（1646—1716）在其论文《原始地神》（1693 年）中认为原始地球是炽热的球体，由于冷却收缩而形成波质壳层。不仅这些都早已成为历史，当代兴起的数十种假说也多为过眼烟云。我们的叙述不可能考虑纷纭众说，只能按照自己的判断来选择。

地质圈层结构的形成

根据最古老的岩石推断，我们的地球诞生在 46 亿年前。地球如上节所述是由气体星云凝聚形成的。根据地球形成的星云—星子说，蒋志在其著作《地质体（运动理论及其应用））（1995 年）中计算估计，从星子吸积到形成原始地球所需时间约为 100 万年。这个时间同地球 46 亿年的地质史相比是相当短暂的。

这样由星子吸积诞生的地球，是一个由较小的固态的核心外面包着很厚的气体层以及夹在这两者中间的液态组成的系统。气圈当然是地球吸积的原始星云气体，由于它很厚并在地表处造成很高气压，从而使一部分气体，主要是氢气被压缩成液态。这时地球的固态核还没有形成一个固体表面，因此整个地球还是个流体状态的星球。随着易挥发性的较轻物质向外发散和非挥发性的较重物质向地心凝聚，导致地球体积的不断缩小，物质密度不断增大。

随着体积的收缩、放射性元素的蜕变以及重物质向地心移动等过程，地球内部温度逐渐升高，使地球由冷变热。一旦这样的增温达到能造成地球局部物质熔化以及其他部分成为可塑状态，地球内部物质在重力作用下的化学分异就开始发生。

在局部熔化和大部分可塑的地球状态下，由于不同物质成分的熔点和比重的差异而导致圈层的分化。铁和镍的熔点比大多数硅酸盐的熔点低些，它们先熔化成熔融态金属，硅酸盐也发生软化。于是铁和镍等较重的物质向地心移动，而硅酸盐等较轻的物质则向地表移动。在这种圈层分化过程中，由于释放的重力能转变为热能.又使地球的温度进一步升高。反复进行的这种过程，最终形成以铁、镍为主的原始地核和以硅酸盐为主的原始地幔。地幔的温度高到不稳状态时，钠、钾、钙、铝等轻元素以及易挥发物质便向地表运动，最后喷发到地表并凝固起来形成原始的岩石圈，其中的气体和水则分异而形成原始大气圈和原始水圈。

地球形状的变化

古人凭直观经验很难想象人类居住的大地是个球体。中国古人猜测大地

是漂浮在水上的方形或圆形的板块状物体。在古希腊的哲学家阿那克西曼德（公元前 610—约公元前 545）猜测大地是个圆柱体，阿那克西美尼（盛年约在公元前 545 年）猜想大地是飘浮在空气中的扁平体。毕达哥拉斯（约公元前 560—公元前 480）出于美学的考虑，设想大地的形状是球体。

第一个测量地球大小的是古希腊天文学家埃拉托斯特尼（约公元前 276—公元前 195）。他依据大地是球体的观念，利用两个不同地点太阳正午时距和纬度差推算地球的周长。他选择的两个地点是塞恩（今阿斯旺）和亚里山大城。夏至这天，塞恩中午的太阳正巧过中天，阳光可直射井底：而在其北约 800 公里的亚里山大城的太阳在中午时天顶距为圆周的 1/50。埃拉托斯特尼据此断言，地球的周长是此两地纬度差的 50 倍，即 39625 公里。其后 100 年，波西当尼（约公元前 135—公元前 51）利用老人星在洛德和亚里山大城中天时的地平高度差，确定两地的纬度差并推算出地球的周长为 28530 公里。

大地球形的观念还激励了航海家冒险环球航行。意大利威尼斯商人马可·波罗（1254—1324）的《马可·波罗游记》所描绘的富庶的东方，一度激起欧洲人去东方冒险的热情。由于奥斯曼帝国灭亡了东罗马帝国（1453 年）并控制了东西方传统贸易的通道，醉心于到东方发财的商人不得不开辟新航线。葡萄牙人首先发起大规模的航海探险活动。享利亲王首创航海学校，发展航海技术，派遣船队探险非洲西海岸，发现好望角，到达印度，开辟了通往东方的新航线。这时的意大利航海家哥伦布（1446—1506）依据大地球形的观念坚信沿大西洋西行可以到达东方，他作为西班牙王室的船队的成员随船队于 1492 年 8 月起航，向西航行 70 天到达华特林岛，又继续航行到古巴、海地等中美洲地区，“ 发现了新大陆 ”。哥伦布的事业激励了更多人继续探险。葡萄牙航海家麦哲伦（1480—1572）在西班牙王室的支持下，于 1519 年率 265 人的船队经 3 年的努力，终于实现了环球航行，证实了大地是球形的。

其实大地并非理想的球形。1667 年，皮卡德（1620—1682）在法国北部测得 1 弧度对应的经线长为 112801 米，后来他与卡西尼（1625—1712）和伊尔（1640—1718）在法国南部测得的则是 113054 米，于是断言地球是两极伸长的椭球体。1671 年让·里歇（1630—1696）发现在法国巴黎校准的摆钟到南美洲圭亚那的卡宴（北纬 4 ° 46 ′ ）变慢了 2 分 28 秒，他把这解释为重力减小，并断言地球是两极扁平的椭球。这个矛盾摆在法国科学家面前。1687 年牛顿的《自然哲学数学原理》出版，并很快被介绍到法国。按牛顿的重力理论，地球应是扁椭球，支持让·里歇的断言。掌管法国天文台的卡西尼家族不肯放弃长椭球的观点，但争论并不曾止息。为了解决这个凝难，他们组织了两个测量队，一队由博格（1698—1758）和拉孔达米纳（1701—1774）率领，于 1735 年奔赴秘鲁的基多。另一队由克莱尔（1713—1765）和莫破丢（1698—1759）率领，于 1736 年奔赴拉普兰的托尔尼欧。测量的结果是，对应一弧度的经线长，在南部秘鲁是 112371 米，比法国本土值小，而在北部拉普兰是 113727 米，比法国本土值大。于是，“ 地球是扁椭球 ”的说法被肯定。

当代精确的测量表明，地球的极赤半径比 ε =0.99665。在地球上空的人造卫星测得的地球是似梨形的，北极的洋面凸出 14 米，而南极大陆凹陷 24 米，且从赤道到北纬 45 ° 的地区低于基准面，而从赤道到南纬 60 ° 的地区又高于基准面。就地球重力场的等势面说，海上测量结果与卫星测量结果相反，

地球是倒梨形的。总之，地球是三轴不对称的椭球体。

那么，地球的形状在它诞生之初就是这样吗？不是的。理论上的推测认为，地球最初是长椭球，后来变成扁椭球，现在正在由椭球向圆球转变。这是由地球演化的三个过程决定的。地球形成的第一阶段是吸积，而且是在旋转的过程中吸积，所以它的等势面应是个长椭球面，即极半径大于赤半径。以这样的等势吸积形成的地球必是长椭球，其极赤比是随时间而变化的，一直增大到 $\varepsilon=1.27$，这都发生在 45 亿年前。其后，由于地球自转和重力的作用，产生来自两极的挤压力，使地球由长椭球变成 $\varepsilon=0.995$ 的扁椭球。这个过程大约经历了 27 亿年，即前 45 亿年到前 18 亿年。这时地球已演化到与自转和引力相适应的阶段，随着地球自转的变慢又开始了由椭圆向圆转变的缓慢过程。

地球脉动的大周期

地质研究所获得的经验资料表明，地球的演化有大时间尺度的周期性，这表现在气候的冷暖、岩浆活动和生物进化等方面。地质学家认为，这种周期性是可以用对数螺旋线表示的。对数螺旋线图表明，凡在 ψ 为 π 的整数倍时，地球处于冷期，以基性、超基性岩浆活动力主；凡 ψ 为 π 的半整数倍时，地球处于暖期，以中酸性岩浆活动为主，这些大的时间段对应于古生物进化的大阶段。

是什么力量主宰着这种变化呢？这只有从地球内部和地球的宇宙环境中去找。地质学家们的分析表明，亿年以上的周期可能来自银河系的影响，而十万年或万年级的周期来自太阳的影响。

地球随太阳绕银心运动肯定受到一定的影响。太阳以大约 250 公里/秒的速度绕银心作椭圆运动，大约 3 亿年绕行一周。但这种运动轨迹并不是一个封闭的轨道，人们假定它以螺旋线的方式趋向中心。这样，从最近的银河年为 2.88 亿年可推知其前的银河年当稍大。有的天文学家估算，以此向前推算的银河年依次为 3.15 亿年、3.42 亿年、3.63 亿年、3.78 亿年、3.89 亿年、3.95 亿年、3.98 亿年，银河年的差依次为 0.35 亿年、0.27 亿年、0.21 亿年、0.15 亿年、0.11 亿年、0.06 亿年、0.03 亿年。而且太阳绕银心运动轨道的扁率也在变化，依太阳现在的银心距推算的最近的一个银河年内，太阳轨道的扁率 $e=0.080$ 往前推，其扁率依次为 0.133、0.186、0.239、0.239。可见几亿年来，太阳的轨道越来越扁，其银河年也越来越短。此外，不容忽视的是，太阳绕银心运动还往复穿过银道面。现在太阳位于银道面上方 20 光年的地方，估计它穿过银道面再回到原位置附近约需 2.38 亿年。太阳的轨道面在银道面上下各 20 光年的范围内波动，其周期也并不整齐，大约往返三次轨道有一定的对称性，更好的重复约需 9.18 亿年，但方向却相反了。

太阳对地球的长周期影响，地球轨道扁率、黄赤交角和岁差等周期性变化是重要的因素。地球轨道扁率的变化周期约为 10 万年，黄赤交角的变化周期约为 4 万年，岁差的周期约为 2 万年。这些轨道参量的周期性变化造成地球日照量的周期性变化，从而影响气候。

海陆构造的变迁

关于海陆变迁莫过于柏拉图（公元前 427—公元前 347）记载的“ 大西洲神秘消亡 ”的传说令人刻骨铭心了。他在《蒂迈欧》和《克里蒂亚斯》两篇对话中，介绍了梭伦游历埃及记事中一段迷人的故事。埃及的一位祭司告诉梭伦说，在海格立斯（今直布罗陀）之外的滔天大洋中，一个名为亚特兰提斯的大陆及其上的繁荣的大帝国，在距今 11500 年前的某个时候突然消亡了。柏拉图把它叫作大西洲，并说它的面积比非洲的一部分和整个亚洲加起来还要大，从它可到达的彼岸为大洋环抱的大陆。柏拉图把大西洲描写成地球上的伊甸园，其上强大的亚特兰提斯王国有 12 个属国。对这个传说的研究几乎形成了一门学问——亚特兰提斯学。

亚特兰提斯之谜虽至今未有定论，但这个谜本身提出的是海陆变迁的问题。

人类对局部海水进退的认识较早，唐代的颜真卿曾根据今江西南城县麻姑山有蚌壳认为“ 高山石中犹有螺蚌壳，或以为桑田所变 ”。但对全球海陆结构格局的真实了解则是 16 世纪初环球航海以后的事，而对于人类所见的这种海陆格局是如何演变而来的思考还要晚一二百年，直至 20 世纪初大陆漂移说的提出及 20 世纪 60 年代海底扩张说和板块结构理论的提出，才算有了真正解决它的明确目标。

形态的经验分析

打开世界地图你会看到，大西洋两岸遥遥相对的海岸轮廓非常相似。自墨卡托（1512—1594）1569 年把大西洋两岸绘成确切的地图以来，这个引人注意的特征不断为一些有心人思考，它们的可拼接性最终导致大陆漂移说的诞生。

大陆漂移说的诞生

培根（1561—1626）在其著作《新工具》（1620 年）中就曾认为这不会是巧合。在追寻原因的过程中，宗教神秘的影响一度盛行。普莱斯特（P.Placet）主张美洲与欧洲和非洲曾经是连在一起的，诺亚时期的大洪水使其裂开（1658 年）。德国地理学家洪堡（1769—1859）认为，大西洋原是一条大河谷，诺亚方舟就航行其上（1800 年）。

19 世纪中叶以来，对这个问题的思考就不再是笼统而神秘的了。地质学家斯奈德（A.Snider）在其著作《地球形状及其奥秘》（1858 年）中，第一次用地质资料，即植物化石的相似性，论证两岸曾经连在一起，并绘出第一张大西洋周围大陆的复原图（见图 10）。因为这些化石是 3 亿年前的，这意味着大西洋东西两大陆在 3 亿年前还是合在一起的。

由于从地理分布上看，大部分大陆和大洋是对称的，格林（L、Green）认为理想的古陆应分布在四面体的四个角上，于是设想了一个地球古大陆四角分布的假说（1875 年）

图 11 格林的地球四面体说（据盖保民，1991）

在 19 世纪末，地质学界对南半球各大陆之间的关系进行了广泛的讨论。地质学家休斯（1831—1914）在其著作《地球面貌》（1885～1909 年）中，根据南半球大陆的岩层和生物化石的相似性，设想它们原为统一的大陆，称之为冈瓦纳大陆。这样就产生了大陆漂移的思想，泰勒（1860—1938）在其论文《第三纪山带对地壳起源的意义》（1910 年）中提出大陆漂移的观点。这种大西洋两岸的可拼合性，也为贝克（H.B.Baker）注意，他在 1911～1928 年间发表了一系列论文，用大西洋两岸山脉构造可拼接起来的事实，论证大陆曾经发生过漂移，并绘出大陆拼合图（见图 12）。

对大陆漂移作出深刻而又详细论证的是魏格纳（1880—1936），他先发表了他的两次讲演《根据地球物理学论地壳（大陆和海洋）的形成》（1912 年）和《大陆的水平位移》（1912 年），后来出版著作《海陆的起源》（1915 年），1920 及 1922 年两次修订，系统地论述了他那著名的“大陆漂移说”。他运用取自地球物理学、地质学、古生物学、古气候学以及大地测量学等备方面的论据，详细论述了他设想的大陆漂移过程。在魏格纳看来，大陆漂移的大格局是“大陆块移向赤道和向西漂移”，并且认为其动力“可以归结为两种分力”。

图 12 贝克提出的大陆拼合图（据盖保民，1991）

魏格纳在其 1912 年的论文中，设想全球的大陆曾经都连在一起，称之为“联合古陆”，是一个单一的巨大陆块。但他在标明边界时，把这一古大陆的很多部位标为浅海。他对这一联合古陆的成因也作了一些推测。在这种思想的指导下，他给出了联合古陆破裂、漂移过程的图示（见图 13）

魏格纳的“大陆漂移说”虽然有其信徒，但由于证据不完善，特别是漂移动因的不可靠而未被大多数研究者接受，甚至被认为是不可思议的设想，而作为神话故事看待。在大陆漂移说的这种境遇下，杜托特（1878—1948）的著作《我们漂移的大陆》（1937 年）的出版是一个重要的例外。他把目前的大陆综括为两大类，提出两个原始大陆的设想。杜托特认为这两个古大陆原在两极处形成，以后逐渐破裂，并可能生长，一部分漂移到现在大陆块的位置，并以图（见图 14）标示其设想。在南极的古陆他沿用休斯的名称，称为冈瓦纳古陆；在北极的古陆，他称之为劳亚古陆。冈瓦纳古陆包括现今的南美洲、非洲、阿拉伯半岛、斯里兰卡岛、印度半岛、南极洲、澳大利亚和新西兰。劳亚古陆是亚洲和北美洲的联合体，由几个古老的陆块合并而成，它们包括北美陆块、古欧陆块、古西伯利亚陆块和中国陆块，由活动的海槽和大洋分隔，经靠拢碰撞连接成一个整体。

图 13 魏格纳提出的大陆漂移说图示（据盖保民，1991）

大陆上的网点区代表浅海。今日的海陆轮廓和河流仅供辨认之用。

经纬线是假定的（以今日的非洲为标准）

海底扩张说的提出

由于洋底地质探查获得的资料，对大陆漂移提供了新的认识而提出海底扩张说。

洋底勘察表明三大洋都存在近南北向的洋中脊，而且普遍存在近东西走向的切断洋脊并显著错移开的转换断层，还有大洋边缘的海沟。海洋资料还

表明洋壳与陆壳的明显差异，洋壳厚度一般在 50～70 公里，而陆壳则一般厚 100～140 公里，并且洋壳远比陆壳年轻，主要是第三纪和第四纪的岩山，即形成时间不足 1 亿年。

根据这些经验资料，20 世纪 60 年代以来，人们倾向认为，大洋中脊轴下面曾经发生过大量岩浆上涌而形成新洋壳，并向中脊两侧扩张。这可以得出海底扩张推动大陆漂移的结论。

“海底扩张”这一术语是迪茨（1914—）在其论文《通过海底扩张的大陆和大洋盆地的演化》（1961 年）中首先使用的。不过人们多认为赫斯（1906—1969）是海底

扩张说的首创者，因为正是他的论文《大洋盆地的历史》（1962 年）引起人们对该学说的重视。

图 14 杜托特设想的劳亚古陆（上图）

和冈瓦纳古陆（下图）

赫斯主张，海底沿洋中脊的顶部张裂开，新的海底在这里形成，并向洋脊顶的两侧扩张，大陆不是作为独立体系运动的，而是与海底连在一起并随其一起在软流圈上运动。迪茨与霍尔登（J.C.HOlden）合作，依海底扩张和板块运动解释 2 亿年前的联合古陆及其解体移动过程时（1970 年），给出新的图示（见图 15）

图 15 联合古陆解体的五个阶段（据盖保民，1991）

箭头表示推测的板块运动方向；■表示洋中裂谷；■表示岛弧—海沟

动力的理论思考

魏格纳提出“两种分力”，但并未找出这些力来自何方。这个问题是理论思考的核心问题，即地球动力学的主要问题。这些力被归纳为三个来源：一个是地球体积的胀缩，另一个是地球内的地幔对流，再一个是地球自转相关力。

地球体积变化力

地球收缩说是解决地壳运动动力来源的最早的假说。它可以追溯到 16 世纪的干瘪苹果的类比，自康德—拉普拉斯星云说提出以后，就以科学的形态出现了。波蒙（1798—1874）第一个提出比较完整的地球收缩假说（1852 年）。他认为地球从太阳分离出来时是一个炽热的熔融体，表面冷却成固体地壳后，由于内部继续冷却使地壳失去支撑而塌陷，产生侧向压力，造成褶皱和拗陷。休斯（1831—1914）在其《地球面貌》（1885～1909 年）中也采取地球收缩说，以刚性地块推挤和压缩柔性地块说明褶皱山脉的形成。杰弗里斯（1891—？）把地球的收缩过程设想得更具体，认为地球收缩发生在地表下 70～700 公里深度的范围，使得 70 公里厚的地壳遭受挤压，发生褶皱。

地球膨胀的思想，培根在 1620 年就已提出。用地球膨胀解释大西洋两岸的相似性始于曼托瓦尼（MantOvani），他在 19 世纪末提出了这种观点。进入 20 世纪，林迪曼（B.Lindeman）认为大西洋的形成是地球体积膨胀导致地

壳拉张破裂的结果（1927 年）。希尔根伯格（O.C.Hilgenberg）根据大陆可以拼合成一个球面，提出地球是从很小的体积急剧膨大而使表面张裂，逐渐分离成现在的各大陆块的（1933 年）。哈尔姆（J.K.E.Halm）依据天体演化的观点，认为原始地球的密度很高，半径可能仅为 5430 公里，经不断膨胀才到今日的 6371 公里。埃吉德（L.Egyed）以水体总量不变为前提（1955 年），依据古地图计算各时期的大陆面积,推算出地球半径增长的速率为 0.24 毫米/年。凯里（S.W.Carey）自 1958 年以来，通过排除后期变化，对大陆进行各种合并，复原漂移前的形状，推论出原始地球的半径仅为今日地球半径的 3/4。但另有一些研究表明，几亿年前的地球半径与今日地球半径的差别并不大。

虽然地球膨胀说的信奉者仍在研究，并为其论点辩护，但因其尚有许多疑问，而不为多数研究者接受。地球大规模膨胀的可能很值得怀疑，如果半径以 2 的因数增加，地球表面则以 4 的因数增加，体积则以 8 的因数增加，因而地球物质的密度当以 8 的因数减小，从现今的平均密度 5.52 克/厘米 ^{3} 回推过去，原始地球的密度当为 44 克/厘米 ^{3}，这样的高密度尚难解释。1968 年，贝尔茨（F.Birch）根据地球内部高压冲击波的资料，推断地球半径的变化不会超过 100 公里。

由于收缩说和膨胀说的种种困难，于是缩胀交替的脉动说被提出。布契尔（W.H.Bucher）在 1933 年提出地球的收缩和膨胀周期性地交替发生，在收缩期地壳受挤压产生褶皱，在膨胀期地壳受拉张产生裂谷。1936 年，葛利普（1870—1946）把地质史上古生代全球性的反复进行的海进和海退同地球的脉动联系起来考虑，得出地球的脉动周期与这个代的纪相当的结论。1943 年，施奈德罗夫（A.J.Shneider0v）用地球脉动说解释全球大地构造的发展过程，认为每次地球收缩都比前次膨胀的幅度要小些，亦即地球是脉动地膨胀着的，并据此得出较大幅度的急剧膨胀使地壳受拉张作用而形成大洋，较小幅度的缓慢收缩使地壳受挤压作用而褶皱成山脉的结论。1950 年，乌姆格罗夫（J.H.F.Umbgr0v）把造山运动、岩浆活动、海进海退和生物演化等全球性循环都归因于地球脉动。1963 年，沃德（M.A.Ward）通过对古地磁资料的研究，计算出几亿年前地球半径的变化，与泥盆纪、二叠纪和三叠纪相应时的地球半径，分别为今日地球半径的 1.12 倍、0.94 倍和 0.99 倍，似乎证明了地球的脉动。1982 年，张伯声等把地球体积的胀缩同地球自转速度的变化联系起来，根据地球自转速度、地质演变期变慢，认为地球是脉动地收缩着的。

地幔对流力

作为地壳运动的动力来源之一，地幔对流早已被推测。虽然霍普金斯（W.H0pkins）早在 1839 年就推断地壳下部存在物质对流，但把它作为地质动力提出来的是费希尔（0.Fisher）。费希尔在其著作《地壳物理学》（1881 年）中用地幔对流解释火山和造山的尝试，曾一度被认为是无稽之谈而被忽视。霍姆斯（A.H0lmes）首次用地幔对流解释大陆漂移的理论（1928 年）也未引起重视。1935 年，皮克里斯（C.L.Pekeris）建立了对流模式（见图 16），以上升流动解释大陆的生成，以下降流动解释大洋的生成，并认为只要大陆自动保持比大洋热些，地幔对流就将持久维持下去。皮克里斯的工作引来了

格里格斯（D.Griggs）、迈纳兹（F.A.VeningMeinesz）和钱德雷斯卡（S.Chandrasekhar）等后继者。到 20 世纪 60 年代，作为海底扩张和板块运动的主要动力机制，地幔对流说得以进一步发展。各种地幔对流模式相继提出，先是“深地幔对流模式”居主导，后来为“浅地幔对流模式”取代。后来又有考虑地球自转的对流模式，以及把深浅地幔对流结合起来考虑的模式，如波动模式和热柱对流模式。福塞思（D.F0rsyth）通过对板块运动的整理分析认为，即使地幔对流存在也不起主要作用。就目前的状况，有关地幔对流的机制还是众说纷纭，至于它是否能驱动板块作有规律的运动也仍是悬而未决的问题。

图 16 皮克里斯的对流模式（据盖保民，1991）
箭头的长度表示运动的相对速度

地球自转相关力

地球体积变化和地幔对流所产生的作用力不足以形成大陆块定向的漂移运动，地球自转相关力就显得尤为重要。这个问题涉及三个方面：一是地壳所受到的自转惯性离心力；二是自转速度变化造成地壳物质移动的构造力；三是地壳与内圈自转速度差造成的相对运动力。在魏格纳的时代，前两种自转相关力都已被讨论，而第三种则是近十多年才被关注的。

泰勒在 20 世纪初，把大陆漂移的动力归结为地球自转产生的离心力。这种力在赤道处最大，向两极逐渐减小，到地极处为零。为了说明大陆漂移发生在第三纪，他假定那时地球因俘获了快速旋转的月球作为卫星而增大了自转速度，因而导致离心力增大，造成大陆漂移。但这种力很小，只为引力的 1/300。所以，魏格纳主张月球和太阳对地球表面的潮汐摩擦减小地球的自转速度所产生的力推动着大陆向西漂移。

重力指地球的引力与地球自转离心力的合力，杜托特以重力驱动机制说明大陆漂移。这种重力说实际上是一种古老的地质构造说。地球内部的重力随深度而增加，到核面开始直线下降，到地心为零。地球重力的不平衡是地壳运动的重要原因。

“离极力说”也都同自转有关。“离极力”指浮力与重力的合力，这一概念是由姚特佛斯（R.V.EÖtvÖs）首先提出的。由于它的方向指向赤道，魏格纳以它作为驱动大陆块向赤道移动的原动力。其后爱泼斯坦（P.S.Epstein）等人通过计算证明，离极力确实能推动大陆块移动。

地壳与地球内圈的相对运动也是地球自转的一种次级效益。由于在地球的地质演化过程中，内圈物质不断向中心集中，使内圈的转动质量不断变小，因而自转动量不断加大。又由于地幔与地壳之间有一薄的软流层，造成内圈的自转速度大于地壳的自转速度，发生相对运动，地壳相对于内圈反自旋方向运动，于是提供了一种驱动大陆块向西移动的原动力。近年已报道了来自地震波分析的结果：内核自转速度比地壳的自转速度快少许。

海陆格局形成的过程

地壳运动的动力源是上述起作用的各种力的综合，在地球的脉动中，基

本上都得以体现，表现为地球上部的力场导引下的地球内部的平衡移动。蒋志的《地质体运动理论及其应用》（1995 年）在这种思路下描述了当今地球的海陆结构的形成过程。

古陆的萌生

在地质过程中，地壳的行为主要由地球上部力场决定。所谓上部力场，表现为地球形状变化带来的两极压缩力、地球自转变化带来的惯性力和地球半径变化带来的侧向作用力。尽管这些变化的量不大，但对地球内部的力平衡的破坏则是相当明显的。

在地球形成之初，作为一个旋转着的长椭球的地球，在其逐渐变扁的过程中，来自两极的挤压力在南、北纬 45°左右最强，其强度可达重力的 1/10，是它今日之值的 100 倍。虽然这种压缩力会随着时间的增长而变小，即使在 20 亿年前它也是现在值的 10 倍，它在 18 亿年前的作用比其后强得多，并且由于那时地球内部热能积累尚不十分高，推动地质运动的主要是这种两极挤压力。

地球自转产生的离心惯性力和纬向惯性力，不仅有区域性特征，而且有时间上交替变化的特点。在 7 亿年以前，离心惯性力一直是赤道向两极的，并且也发育在南、北纬 45°附近；而纬向惯性力则一直是向西的。

两极压力和自转惯性力所形成的地球上部力场（见图 17），是萌生古陆的驱动力。两个南北向力场、两极挤压力和离心惯性力，在南、北纬 45°附近交汇，造成原始地球表面发生变化的特殊区域。纬向惯性力比较复杂，虽然方向向西，但升高半球与降低半球有差别，总的效果是升高半球的向西力大于降低半球的向西力。在这样的力场作用下，在 7 亿年以前的漫长地质史中，升高半球可能形成一个两向的牛轭形古陆，其北翼在北纬 45°附近，南翼在南纬 45°附近，两端跨赤道连接南北翼，在这牛轭形古陆之间是古海洋，降低半球的部分也是古海洋，但其中可能萌生一小块古陆——太平洋古陆。也就是说，形成地球的一半为大陆，陆中有洋；另一半为海洋，洋中有陆。这是一个对称的格局（见图 18）。

大陆漂移

由于地球胀缩的交替发生，原始古陆经过古大西洋开闭过程而过渡到联合古陆，然后又破裂解体，冈瓦纳和劳亚以相反的方向旋转，直至南、北美洲向西漂移而重开大西洋。具体过程按时段分述如下：在前 7 亿～前 5 亿年间，地球收缩，自转加速，水平作用力向南向西期中，古大陆在前 6.5 亿年张开而形成大西洋，靠北极的澳大利亚向赤道漂移。在前 5 亿～前 3 亿年间，地球膨胀，自转减速，水平作用力向极向西期中，前 4 亿年古大西洋闭合，形成联合古陆，已越过赤道的澳大利亚向南极漂移。在前 2.8 亿～前 1 亿年间，地球收缩，自转加速，水平作用力向赤向东期中，联合古陆解体，冈瓦纳部分逆时针旋转、劳亚部分顺时针旋转各约 20°，印度由南半球向赤道漂移。1 亿年以来，地球膨胀，自转减速，水平作用力向极向西期中，南、北美洲向西运动，重新张开大西洋，已越过赤道的印度向北漂移。板块运动的总体方向和海陆分布的大格局就这样由地球上部的力场造就了。

生命的诞生和进化

为地球上生命的诞生和进化提供线索的是地层中的生物化石。古希腊的思想家们已非常了解化石。正当欧洲中世纪经院哲学反对把化石看作古生物遗迹时，中国的沈括（1031—1095）和朱熹确认它们是生物的遗迹。斯特诺（1638—1712）和卢伊德（1660—1790）等人的工作为古生物学与解剖学结合研究生物遗迹提供了原初的动力。随着生物化石积累的增多，经过以居维叶（1769—1832）为代表的灾变说和以赖尔（1797—1875）为代表的渐变说的争论，以及达尔文（1809—1882）进化论的胜利进展，特别是 20 世纪以来的对前寒武纪地层化石研究的进展，使地球生物进化的线索越来越多。

在地球上，目前发现的最古老的生物化石遗迹约是 35 亿年前的，简单的生命形式可追溯到更古老的地质年代。在大约 28 亿年前的岩石中已有细菌和蓝藻等植物的化石，这类原始生物在 7 亿年前已进入繁盛期。在 5.7 亿年前的生物化石中已有大量水生无脊椎动物，此后的生物演化变得相对清楚了。

但是，不仅化石不够充分，而且进化论本身也遇到许多疑难问题，甚至生命和非生命的界线究竟应划在那里都很难明确，所以有关地球上生命的诞生和进化还有许许多多的谜，或许它是永恒的历史课题。

生命的奥秘

生命活动的基础

现代生物学已进展到确切知道氨基酸聚合成蛋白质和核苷酸聚合成核酸。但研究者在蛋白质和核酸如何发展出原始生命问题上尚无共识。

我们已经知道，蛋白质是生命活动的主要承担者，并且几乎所有的蛋白质都是由 20 种氨基酸以肽键的形式连接而成的。蛋白质中氨基酸依一定的顺序排列成肽链，肽链卷曲折叠形成三维空间结构，而成为具有生物功能的活性蛋白。我们也知道，核酸是遗传信息的承担者，核酸分子是由许许多多核苷酸相连接的长链，而每个核苷酸都包含碱基、核糖和磷酸三部分。依据核糖结构的不同，核酸被分为两类，含核糖的和含脱氧核糖的，分别称之为 RNA（核糖核酸）和 DNA（脱氧核糖核酸）。虽然碱基种类较多，但 DNA 和 RNA 都分别各含四种碱基，构成四种核苷酸。生命的奥秘就在于 DNA 直接用 20 种氨基酸编码。20 世纪 50 年代发现了 DNA 分子的双螺旋结构（见图 19），虽然此后发现有不同类型的双股和三股螺旋结构，但是核酸分子的主要生物功能仍然是由特定的双螺旋结构承担的。DNA 双链像一个扶梯，其“扶手”由三个单元组成（见图 20）的可严格重复的结构，而其“横档”是由成对的互补碱基构成（见图 21）的。氨基酸和 DNA 的结构已经查清。氨基酸的化学结构（见图 22）中有一个可变的支链 R，它并不参与多肽中相邻氨基酸的键合。因此，多肽像 DNA 链一样，具有严格重复的主干（见图 23）

图 19DNA 的双螺旋结构（据雷泽尔，D.，1992）

我们可以把 20 种氨基酸或它们的支链看作字母表中的字母，那么一种蛋白质中的氨基酸序列就像一个句子。蛋白质像句子一样是一种有序结构。像一个句子是有意义的一样，蛋白质的有序结构也表达一种意义，其意义越精

确专一，它所包含的序也就越多。20 种氨基酸中的每一种都是由一组或多组三个连续排列的碱基（三联体）确定的。因为存在四种碱基，所以就有 64 种不同的三联体。64 种三联体中，除了三种作为表示蛋白质句子结束的编码符号外，其余皆用于为特定的氨基酸编码。核酸中的核苷酸序列与蛋白质的氨基酸序列的这种对应正是核酸与蛋白质之间的本质联系。

图 20DNA 的双螺旋扶手（据雷泽尔，D.，1992）

RNA 的作用是控制蛋白质的合成。RNA 是一种单链的分子，其结构非常类似于 DNA 双链中的一条，差别只在 RNA 的糖单元是核糖和碱基的尿嘧啶取代的胸腺嘧啶与嘌呤配对。因此单股 DNA 可以作为一个模板与 RNA 互补地装配成一个双螺旋链，于是这样的 RNA 也就具有了从 DNA 来的信息。这等于说，RNA 把 DNA 上的信息“转录”了，这种“转录”了信息的 RNA 分子称为 mRNA（信使核糖核酸）。此外，在细胞质中还有 tRNA（转移核糖核酸），它具有把氨基酸转移到合成蛋白质模板上的功能。这种过程由于涉及两种不同的‘字母”（核苷酸和氨基酸）系统的转换，被称之为“翻译”。tRNA 携带各种氨基酸并将之转移到模板的适当位置上，于是氨基酸按遗传信息所规定的次序排列就形成了蛋白质。遗传信息由 DNA 到 RNA 再到蛋白质的过程称为中心法则，是生命活动的基础。

图 21DNA 的双螺旋横挡（据雷泽尔，D.，1992）

生命起源和进化的疑难

现在我们转向有关生命起源的疑难问题。第一个问题是，在生命起源问题上是蛋白质在先还是核酸在先。先有奥巴林和福克斯（1912—）的主蛋白质论；艾根（1927—）的超循环论则把蛋白质与核酸的循环过程看作原初的基本单元；20 世纪 80 年代切赫（T.R.Cech)和阿尔特曼（S.Alt-mann）分别发现核酸酶，即具有转换酶或水解酶活性的 RNA，而倾向“核糖核酸为生命的起源”；1982 年戴森（F.DysOn）提出生命的两次起源说，他把蛋白质和核酸看作两种独立的生命，并认为首先是具有代谢功能的蛋白质的诞生，然后才有具有复制功能的核酸的诞生。

第二个问题是，为什么蛋白质只由左旋的氨基酸组成而核酸只由右旋的糖组成。1995 年在洛杉矶举行的“生命中手征起源”的国际会议上，与会者一致认为、手征均一是生命所必需，从微生物到人类，为了保持有机体的生存和复制，细胞必须建立在遗传物质右旋和氨基酸左旋的基础上。于是遇到是手征在先还是生命在先的问题。在生物学界有人主张手征在先，如邦纳（W.BOnner);有人主张生命在先，如巴达（Bada）。在物理学家赫格斯特龙（P.HegstrOn）看来，由于弱作用衰变产物的旋向性，设想生物分子的手征性源于辐射的影响。

第三个重要的问题是，早期生命起源能量转换物质问题。这也仍是众说纷坛的领域，萨根（Sagen)认为是核苷酸中的碱基吸收紫外线为有机小分子的活化和聚合提供条件，而德杜瓦（DeDuve）主张是硫的酯类化合物，巴尔切夫斯基（H.Baltscheffsky）认为是焦磷酸醋，马赫特绍塞尔（G.Wachterschauser）又认为是铁—硫。

最后一个问题是，核酸—蛋白质密码关系问题。沃斯（WOese）认为，在进化早期无酶的情况下，核苷酸与氨基酸的直接相互作用是遗传密码的基础，于是又出现原始 tRNA 与氨酰 tRNA 合成酶孰先孰后的问题。

地球生命起源的两难

关于生命的诞生，生物学界已基本认定，第一阶段是从简单的无机化合物在特定的条件下形成原始的有机物质——碳氢化合物及其衍生物，直至氨基酸、嘌呤、嘧啶、核苷酸等有机小分子；第二阶段是从有机小分子进一步发展成复杂的有机物质——核酸和蛋白质等有机大分子；第三阶段是从有机大分子物质组成多分子体系；第四阶段是这些多分子体系演化出具有新陈代谢和自我繁殖功能的原始生命。这样的生命诞生过程，既可以设想是在地球上进行的，也可以设想是在宇宙空间或某些其他天体上进行的，因此而产生了两种同样可能的假说。

关于地球上生命起源的这两类科学假说，一类是“化学进化说”；另一类是“宇宙胚种说”。前者主张地球上的生命源于原始地球从无机物到有机物、由简单到复杂的化学进化过程；后者则认为地球上的生命来自地球外宇宙空间的胚种。在 1993 年巴塞罗那召开的第 10 届国际生命起源学术会议上，与会者所提交的论文仍然反映着生命起源研究上这种两难局面。

化学进化说

1936 年奥巴林（1894—1980）明确提出，地球的原始大气由甲烷、氨、氢和水蒸气组成，由于闪电和太阳辐射的作用可能在地球上产生第一批作为生命物质基础的有机分子。1953 年米勒（1930—）首次以模拟实验成功地证实了奥巴林的假说。米勒以氢、甲烷、氨和水蒸气模拟原始地球上的大气成分，通过加热和火花放电，合成了氨基酸。其后又有许多人在模拟地球原始的条件下的实验中，合成了其他的一些生命物质分子，如嘌呤、嘧啶、核糖、脱氧核糖、核苷、核苷酸、脂肪酸、卟啉、脂质等组成生命物质的原材料。中国科学家于 1965 年首先在世界上人工合成牛胰岛素蛋白质分子，继之又于 1981 年首先在世界上合成酵母丙氨酸转移核糖核酸。虽然至今科学家对蛋白质和核酸如何发展成具生命特征的蛋白体仍没有一致的看法，但对原始地球上生命物质的形成过程已有许多可理解的设想。

诞生生命的条件可能在地球刚刚形成不久就具备了。这些条件包括组成生命物质的原材料、适当温度和外来能源。原始大气中含有大量的氢而没有游离的氧，也就不可能在大气上层形成臭氧层，太阳发射的紫外线便不受阻碍地射到地球表面，从而为无机物质向有机物质的转化提供了充分的能源。在这种条件下，许多最初的有机物有充分的时间变化和发展，为后来生命机体的产生提供物质基础。在有机物的形成过程中，一方面地球表面的温度降低到 55～66 摄氏度，为生命物质的合成和存在提供了合适的温度；另一方面，彗星、陨石和火山爆发不断提供合成生命物质所必需的碳化物。这样，大气中和地球表面的二氧化碳，由于太阳紫外线、电离辐射、雷击、闪电等作用，在局部高温、高压下分解，有的与水化合成甲醛而放出初生态的氧，有的与水化合成碳酸。碳酸在局部高温、高压下分解并与氨化合成甲醛氨。

甲醛和甲醛氨又相互合成一种最简单的氨基酸——甘氨酸。这些无金属的碳化物的相互作用，以及同地球内冲出的金属碳化物相互作用，并吸收一部分硫、磷等，便可能产生多种有机化合物。这就为更复杂的氨基酸直至蛋白质和核酸大分子的聚成奠定了基础。

通过蛋白质和核酸长期的化学进化，地球上诞生了原始生命。关于地球上原始生命诞生的时间和地点问题至今也不是十分清楚。最古老的生物化石是 32 亿年前后的蓝藻化石，在 38 亿年前的岩石中发现有机分子，这就是目前所知的地球上原始生命出现的上限。至于原始生命的诞生地，人们有各种猜测，多数人倾向于原始海洋。原始海洋中有机分子浓度高的地方，合成速度会超过分解速度，通过蒸发、沉淀、结冰，形成界膜等机制，已合成的原始蛋白质和原始核酸等分子，可能形成稳定的多分子系统，进而发展为原始生命。

宇宙胚种说

诞生生命的条件不仅存在于地球，也存在于宇宙空间或具他星球。这不仅可以设想而且是可以检验的。

早在 20 世纪 60 年代，人们就已通过微波谱线搜寻到四种星际分子，此后 30 多年来又发现了近百种星际分子。在已发现的星际分子中，有机分子多于无机分子，且有相当数量是地球上或实验室中尚未发现的。在大量的有机分子中，最主要的是甲醛、氰化氢和氢基乙炔分子，它们恰好是生命前物质中的最主要成分。这表明星际空间有形成生命的物质基础，而且通过近几十年来对陨石的分析还发现，其中包含有氨基酸、嘌呤以及 DNA 成分。这表明星际空间也有合成有机大分子的物理和化学条件。对星际消光曲线的研究还发现，星际空间还存在病毒和细菌的微粒，这表明有机物质乃至低级生命形式，在太阳系形成以前就已存在于银河系了。

据此，对于地球上的生命来源，奥巴林提出其他星球“传染”到地球的假说（1957 年），开尔文提出由陨石带到地球上来的假说，霍伊尔（1915—）提出由彗星带到地球上来的假说（1981 年）。在 1993 年召开的第 10 届国际生命起源学术会议上，有人坚持认为，造成化学反应并导致生命产生的有机物质毫无疑问是与地球碰撞的彗星带来的。

霍伊尔是宇宙胚种说的代表。他对星际云中的有机分子如何迸到太阳系作出了猜测，认为天王星和海王星是孕育生命孢子的“温床”，而彗星是将其运到地球上来的“搬运夫”。

天王星和海王星何以有温床的作用？按有些太阳系起源假说，天王星和海王星的形成要比地球晚，在地球诞生后的一段时期内，它们所在区域仍是弥漫的星云物质，经约 3～5 亿年才凝聚成了星体。在凝聚过程中，先是形成大量彗星似的冰质星云，其核径约为 10 公里，外层可能保留着从星际来的有机物质。在形成天体的过程中，星云由于受到小物体的冲击，可能形成局部“热塘”。由于离太阳远而没有致命的辐射，有机物在这里有可能由简单形式发展为相当复杂的生命形式，然后再由彗星带到地球上来。

彗星把生命物质带到地球附近，由于引力的作用，带有生命物质的部分星云可能形成椭圆轨道。它们在接近太阳时就会蒸发而进入星际空间，当它们接近地球时就有可能落人地球大气的上部而最终达到地球表面。

由于彗星挥发含量的成分与细菌和哺乳动物的含量很接近，且与星际霜也很近似，使得许多人觉得宇宙胚种说可以作为假说接受。

地球生物的进化

有关地球生命进化问题的研究，最初的历史性争论是突变说与渐进说之争。在开采矿物和修路的过程中，人们掌握了大量的古生物进化资料。在对这些资料的比较和分析的基础上，对地壳和生物演化形成了两种对立的思想，并在 19 世纪上半叶互相争鸣。居维叶首先在其著作《四足动物骨化石研究》（1812～1821 年）中提出全球性大变动是突然发生的所谓“灾变说”思想，不久又在其著作（论地球表面的变动》（1826～1830 年）中作了系统的论述。赖尔在其著作《地质学原理》（1830—1833 年）中针锋相对地提出，地球的变化不是突如其来的，而是渐进发生的。虽然随着达尔文进化论的传播渐变说长时间占上风，但随着巨大规模的突发性地质事件的增多，20 世纪 70 年代又有“新灾变说”兴起。所以灾变与渐变之争还是个历史悬案。

因此，我们暂不必顾及“灾变”和“渐变”的谁是谁非，先把注意力集中到生物发展进程的事实上。因为地球的历史已有几十亿年，不能以年计时。所以，我们要先介绍以同位素半衰期测定和生物化特征为基础的地质年代划分，然后进入生物发展进程的叙说。

地质年代的划分

在地质学中将地质年代划分为宙、代、纪、世四级。宙分冥古宙（前 45 亿～前 40 亿年）、太古宙（前 40 亿～前 25 亿年）、元古宙（前 25 亿～前 5.7 亿年）和显生宙（前 5.7 亿年以来）。冥古宙不分代。太古宙分为始太古代、古太古代、中太古代和新太古代。元古宙分为古元古代（前 25 亿～前 16 亿年）、中元古代（前 16 亿～前 10 亿年）和新元古代（前 10 亿～前 5.7 亿年，亦称前寒武纪）。新元古代的晚期为震旦纪（前 8 亿～前 5.7 亿年）2.3 亿年。冥古宙和太古宙亦合称为隐生宙。显生宙划分为三代，即古生代（前 5.7 亿～前 2.5 亿年）、中生代（前 2.5 亿～前 0.65 亿年）和新生代（前 0.65 亿年至今）。

古生代分早古生代（前 5.7 亿～前 4.1 亿年）和晚古生代（前 4.1 亿～前 2.5 亿年）。早古生代划分为三个纪，即寒武纪（前 5.7 亿～前 5.1 亿年）0.6 亿年、奥陶纪（前 5.10 亿～前 4.39 亿年）0.71 亿年和志留纪（前 4.39 亿～前 4.10 亿年）0.29 亿年。晚古生代划分为三纪，即泥盆纪（前 4.1 亿～前 3.55 亿年）0.55 亿年、石炭纪（前 3.55 亿～前 2.90 亿年）0.65 亿年和二叠纪（前 2.90 亿～前 2.50 亿年）0、40 亿年。寒武纪分早寒武世、中寒武世和晚寒武世，臭陶纪分早奥陶世和晚奥陶世，泥盆纪分早泥盆世和晚泥盆世，石炭纪分早石炭世和晚石炭世，二叠纪分早二叠世和晚二叠世。

中生优划分为三纪，即三叠纪（前 2.50 亿～前 2.08 亿年）0.42 亿年、侏罗纪（前 2.08 亿～前 1.35 亿年）0.73 亿年和白垩纪（前 1.35 亿～前 0.65 亿年）0.70 亿年。其中各纪又都分为若干世，即有早三叠世、中三叠世、晚三叠世、早侏罗世、中侏罗世、晚侏罗世、早白垩世和晚白垩世。

新生代划分二纪，即第三纪（前 0.65 亿～前 0.02 亿年）0.63 亿年和第

四纪（前 0.02 亿～至今）。第三纪分早第三纪和晚第三纪，早第三纪分为古新世、始新世和渐新世，晚第三纪分为中新世和上新世；而第四纪分为更新世和全新世。

常用英文字母标志地质年代中的各纪，其对应关系如表 2 所示。

表 2 地质年代中的各纪及其代表符号纪

地球生物发展的进程

古生物地质学研究表明，冥古宙是地球形成期，太古宙就产生了生命，整个元古宙都是菌藻植物的世界。进入显生宙的古生代，从寒武纪才出现无脊椎动物，志留纪末期才出现裸蕨等陆生植物，泥盆纪鱼类繁盛，石炭纪和二叠纪是蕨类植物和两栖类动物兴盛的时期。整个中生代是裸子植物和恐龙等爬行动物的时代，只是在白垩纪才有被子植物兴起。新生代是被子植物和哺乳动物的繁盛期，第四纪才有了人类的出现和发展。

生物在地球上立足是从利用太阳能开始的。估计在前 30 亿～前 28 亿年间，生物开始具有了光合作用的能力，即有机分子利用太阳光生长和繁殖。有机体通过光合作用利用二氧化碳和水在体内产生葡萄糖和氧，把太阳能储存在葡萄糖里并放出氧。光合作用为一切生物的生命活动提供了有机物、氧气和能量，没有光合作用就没有生物的进一步演化和繁荣。大约在前 20 亿年的时候，地球大气中的氧量开始增加。在氧量增加的过程中，生物由简单向复杂发展。首先出现核细胞，然后生物出现性别之分，从而加速了其发展。当氧的含量增加到一定程度时，大气层中出现了臭氧层。由于臭氧层屏蔽了太阳的紫外线，降低了地表温度，使地表生物从水中发展到陆地。一些动物具备了外骨骼或内骨骼，进一步发展到哺乳动物。

绿色真核单细胞生物原始鞭毛藻是一切植物和动物的共同祖先。鞭毛藻断离，保留叶绿体的原始鞭毛藻逐渐演变成了植物，而失去叶绿体的原始鞭毛藻则逐渐演变成动物。结构复杂的多细胞生物的出现是生物发展的一大飞跃，从此细胞在形态和功能上越分越细，植物形成根、茎、叶、花、果等组织，动物形成心、肺、胃、肠等器官，由不同的组织器官构成的生命个体，在适应环境的过程中发展，植物沿菌藻植物—苔藓植物—蕨类植物—裸子植物—被子植物的方向发展，动物沿无脊椎动物到脊椎动物，脊椎动物沿鱼类动物—两栖类动物，两栖类又分别向鸟类和哺乳类发展。

但地史上的一系列的重大事件的突现，目前还很难用地球环境本身的变化来解释。前 20 亿年海生菌藻突然扩张性地暴发，前 14 亿年一些细菌和蓝藻明显地分化，前 8 亿年菌藻分化明显地降低，前 6.5 亿年高级动物群突然诞生，前 5.7 亿年硬骨骼动物突然暴增。这些好像不是逐渐进化的结果，因此有人向地外影响寻找原因。

对古生物发展的研究表明，许多门类的生物发展有明显的阶段性。对于这种阶段性的原因，由于尚不能仅以地球环境变化加以解释，而提出许多地外因素影响的猜测。我们这里分别就植物、动物和生物总体的阶段性予以讨论。

就植物来说，自太古宙至志留纪中叶的植物化石都是以海生菌藻类植物为主，在志留纪和泥盆纪交界期，陆生蕨类植物突然出现并在石炭纪和二叠纪兴盛发展，从三叠纪开始裸子植物开始兴盛，到侏罗纪、白垩纪之交出现

被子植物。有人通过将植物发展的转变期与太阳绕银河系轨道近银心点和远银心点的比较发现，陆生植物的出现与远银心点对应、裸子植物的出现与近银心点对应，而被子植物的出现与远银心点对应，并试图以此说明植物发展的这种阶段性可能根源于银河的影响。

就动物来说，寒武纪大爆发出现的古杯海绵、腕足类、软体动物、节肢动物、棘皮动物等许多不相关的无脊椎动物都一下子有了骨骼，从石炭纪开始两栖类动物的发展达到高峰，而进入新生代又成为哺乳动物的世界。这三次变化的突发性似乎难于仅从地球环境的变化来解释，于是有人牵强地将其与太阳在银河系的运行轨道联系起来。

就生物总体来说，在 20 世纪 70 年代曾有人对 129 种动、植物门类在地球上的生存时间作过统计，发现平均生存期为 1.86 亿年。他们把生物发展划分为三大阶段，即兴起、繁盛和衰落，并得出 2/3 门类的繁盛期对应于太阳公转轨道的近银心点时期。

根据生物化石所得到的有关生物发展的这些阶段性，虽说不一定就是生物发展的真实情况，但总是现存的证据。致于把它们同太阳绕银心运动的轨道特征联系在一起，目前还不能完全令人信服。也可以说生物发展的这种阶段性还仍然是个谜。

寒武纪大爆发的奥秘

在长达 38 亿年的化石记录中，最令人费解的是“ 寒武纪大爆发 ”

在地质史上，以前 5.7 亿年为界，其前的隐生宙与其后的显生宙，在动物化石方面有明显的不同。根据中国澄江早寒武世（前 5.5 亿年）化石、加拿大布尔吉斯中寒武世（前 5.3 亿年）页岩等大量地质资料可以确知，在寒武纪（前 5.7 亿～前 5 亿年），几乎所有已知的动物门，从原生动物门到脊椎动物门，都有了各自的代表。而在寒武纪之前，不仅多细胞生物化石非常稀少，而且在以埃迪卡拉动物群为代表的迄今所发现的新元古代的各种化石中，尚元一种可以确认为已知动物门的祖先。也就是说，绝大多数已知动物门是在寒武纪突然出现的，因此人们称其为“ 寒武纪大爆发 ”。

按照达尔文生物进化论的观点，寒武纪出现的多细胞动物，必在其前经历了一个漫长的早期演化阶段。如果我们站在生物进化论的立场，那么寒武纪大爆发的确引发了人们关于地球生物进化的许多疑问，也提出许多猜测。虽然在这个问题上还没有取得共识，但这些探索对于深入理解地球上生物进化过程的意义是显然的。

在对寒武纪大爆发的讨论中，自然要关注“ 埃迪卡拉动物群 ”。在前 6.5 亿年前后，地球各处都突然发育有埃迪卡拉动物群，从而开始了地球上高级生物的发育史。澳大利亚古生物学家格莱斯纳站在进化论的立场认为，新元古代的埃迪卡拉动物群是由无骨骼的软体多细胞动物组成的，是显生宙动物群的先驱，它们中绝大多数或全属种可能在寒武纪到来之前都已绝灭，因为体小和软弱无骨而未保存下化石。近来比较流行的观点认为，寒武纪的动物是同时产生的，埃迪卡拉动物群的“ 动物 ”比较特殊，与寒武纪以来出现的多细胞动物的根本区别是，它们的形体大而扁平，并缺少明显的消化器官和活动能力，其营养方式似乎分于自养和异养之间。

一个“ 寒武纪大爆发 ”，一个“ 埃迪卡拉群大绝灭 ”，总得有个“ 爆发 ”

和“ 绝灭 ”的原因。这就涉及到对当时生态环境的讨论。现有的化石虽然少，但毕竟能表明多细胞生物在寒武纪之前已有 10 亿年的历史。分子生物学研究也表明，多细胞动物的演化分异，在寒武纪前有一个漫长的过程。如果站在进化论的立场，就得考虑多细胞动物在前寒武纪进化缓慢的原因。一种估计是在前寒武纪大气圈中氧含量长期偏低，埃迪卡拉动物群的奇特体形结构可能是适应缺氧环境所致。但埃迪卡拉动物群只是新元古代末期多细胞生物的很小一部分，远不足以反映当时海洋生态的真实面貌。另一种推测是，随着大气含氧量的增加，到寒武纪长期适应贫氧环境的埃迪卡拉动物群由于厌氧而绝灭，而那些长期受贫氧环境制约的许多演化尝试则由于喜氧而迅速得到发展。

自然地貌的演化

我们这个地球不仅有五洲四海的海陆格局，而且在陆地上还有高山峡谷、江河沼泽、荒漠沙丘、黄土高坡、沃野平原，其上或寸草不生或绿被覆盖。这种自然地貌是怎么演变而来？是地球脉动和各圈层相互作用的结果。

在此要介绍的是板块的运动与造山、风与沙漠和黄土高原的形成、大川与峡谷和冲积平原的形成、土壤与植被的形成。

我们中国人总是自称“黄河儿女”，这不仅是因为我们渴饮黄河水、饥食黄河鱼，也不只是因为“黄河九曲唯富一套”，更重要的是因为黄河造就了作为中华五千年文明基地的大平原。是西北吹来的风，经过几十万年的持续不懈，用西伯利亚一带的沙尘，垫起了一个宽为几十万平方公里、厚约几百米的西北黄土高原。而黄河又用了一二万年的时间，以挟带泥沙的形式填海，造就成一个几十万平方公里的华北大平原。有了这平原沃壤和温带的气候环境，森林草禾才得以繁茂，中华民族才得以在这里创造自己的文明。

谁要是忘记西北风和黄河，谁就在有意无意地割断了中华民族的存在与大地之初的联系。

板块的运动与造山

关于山，中国的先秦典籍《山海经》，在世界上也算得上很了不起的早期专门著作了。它包括《山经》和《海经》两部分，共有 31000 字。其中《山经》按南、西、北、东、中的方位划分为《南山经》、《西山经》、《北山经》、《东山经》和《中山经》。《山经》主要记述黄河和长江两大流域的自然环境，共记载大山 447 座，其中《南山经》实记 39 山，《西山经》实记 77 山，《北山经》实记 88 山，《东山经》实记 46 山，《中山经》实记 197 山。《山经》以山为中心，描述了南至广东南海、北至内蒙古阴山、西至青海湖、东至舟山群岛的广大区域内的自然地貌。对每座山的地理位置、水文、动植物、矿产甚至神话传说，都有详略不一的记述。这是一种极可贵的科学尝试，然而对山的成因，除神话传说几无所述。在中国，直至宋代才有沈括和朱熹依据山上的水生动植物化石，有了“高山为谷，深谷为陵”的猜测。

后人毕竟聪于古人，现代地学家从地球脉动导致的岩石板块运动找到了造山的动力。今日之科学已发展到不仅能对每座山的历史给出有根有据的分析，而且还能对全球山脉大格局的形成达到轮廓性的了解。

全球板块结构及其运动

20 世纪 60 年代末，在大陆漂移说和海底扩张说的基础上，由美国的摩根（J.M0rgan)、法国的勒比雄（ＸLePich0n）和英国的麦肯齐（P.McＫenzie）共同提出岩石圈板块构造说。地震学的研究成果支持了板块构造说，使得越来越多的人接受并承认这一学说。于是岩石圈板块的相对运动被视为岩石圈大陆构造的原因，板块构造学说也就被视为新全球构造理论。

按照岩石圈板块学说，一个刚性的岩石圈可依其地质构造特征区分成若干岩石板块。经过地质学家们的研究，多倾向把岩石圈区分为 7 个大板块和 7 个小板块，每个板块又可区分成若干地块。板块边界的地质构造主要有三

种构造体系：全球洋脊构造体系、大陆新造山带构造体系和岛弧—海沟构造体系。这三种构造体系都是明显的变形破碎地带，活动性很强。因此全球的地震、火山绝大部分发生在板块的边界地带。板块的边界是某些地块的边缘。地块边缘的地质构造体系为大陆上老的褶皱带构造体系、大陆裂谷构造体系、稳定大陆边缘构造体系、洋底的海岭构造体系、大陆大断裂带构造体系和洋底大断裂带构造体系。这 7 个大板块是太平洋板块、亚欧板块、印澳板块、非洲板块、北美板块、南美板块和南极板块。

太平洋板块是由单一的大洋岩石圈组成的大洋型板块。这个板块有 9 个地块。

亚欧板块主要由大陆组成。中国地处亚欧板块之中。亚欧板块的内部结构最为复杂。亚欧板块有 24 个地块。

印澳板块有 9 个地块。

非洲板块主要是非洲大陆。大西洋的部分海域也被划分在该板块中。非洲板块有 9 个地块。

北美板块包括北美大陆和北冰洋盆地的绝大部分，有 14 个地块。

南美板块主要是南美大陆，有 6 个地块。

南极板块有 9 个地块。

地球在不停地运动着。由于地球的自转，地球内圈之间存在着相对运动，这 7 大板块作为一个整体相对于地球的内圈有一个向西的转动。除此之外，岩石圈的板块还存在一个离极运动。北半球的板块向赤道方向运动，南半球的板块也向赤道方向运动，但南北两半球板块的运动方向相反。因此岩石圈板块作为整体相对内圈的运动是这两种运动的合成（见图 24）。岩石圈板块除了有整体运动之外，各板块之间还存在相对运动（见图 25）。岩石圈板块之间相对运动有三种形式：板块相互分离、板块相互汇聚和板块相互平移。目前，全球岩石圈板块相对运动的速率大部分已被确定下来。根据板块的这三种相对运动形式，其边界可称为分离型板块边界、汇聚型板块边界和平移型板块边界。

板块相互分离运动一般发生在较古老的大陆块的破裂带。分离运动的结果会产生一个新生大洋盆地。

板块汇聚运动表现为板块之间的相互碰撞挤压。这种相对运动与全球大规模造山运动有密切关系。

板块平移运动表现为两个板块以简单的方式相互滑过。板块平移运动在许多情况下是沿某种形式的扭动构造带发生的，它与板块的分离运动和汇聚运动紧密联系在一起。

全球新造山带构造体系

所谓新造山带指晚近地质时期，即中生代以来形成的褶皱山脉，同时又是岩石圈中现在正在发生大规模造山运动的地带。新造山带基本位于两大狭窄的地带内，相应地两大造山带分别称为环太平洋造山带和阿尔卑斯—喜马拉雅—东南亚造山带。环太平洋造山带经菲律宾、日本和阿拉斯加，以及美洲大陆西缘的落基山脉和安第斯山脉，最后延伸至南极洲。阿尔卑斯—喜马拉雅—东南亚造山带延伸，经阿尔卑斯、喜马拉雅、印度尼西亚，最后同新几内亚相接，大体横跨北非、欧洲和亚洲。

位于太平洋板块东部的北美板块，相对于地球内圈由东北向西南方向运动。北美板块的西部与太平洋板块发生碰撞挤压，使太平洋板块东部的一部分参与造山运动而被北美板块吞并，形成北美大陆西缘的巨大褶皱山系。南美板块的运动方向是向西向北的。由于南美板块接近赤道，有一部分在赤道上，所以南美板块向西的运动胜过向北的运动，它的西部边缘与太平洋板块碰撞挤压，也使南美板块西部产生巨大的褶皱山系。北美板块与南美板块西缘的由北至南的褶皱山脉连起来成为环太平洋褶皱山系的一部分。在北美板块与南美板块的东部则形成了蜿蜒曲折而又破碎的海岸形态。

亚欧板块主要由大陆构成，由东北向西南运动，并相对印澳板块向西推进。印澳板块包括印度半岛、印度洋东部洋底、澳大利亚及其周围部分洋底。印澳板块的 9 个地块有 5 个在南半球，2 个在北半球，其余 2 个跨越赤道，其中大部分在南半球，小部分地区在赤道以上。印澳板块作为一个整体运动板块，其方向由东南向西北。印澳板块与亚欧板块平行挤压形成了沿东西走向的褶皱山系。世界屋脊喜马拉雅、苏莱曼等山脉构成亚欧板块的阿尔卑斯—喜马拉雅—东南亚褶皱山系的一部分。亚欧板块的北部形成了为数众多的大陆壳岛屿。印澳板块的南部使澳大利亚岛与新西兰岛分离，形成了塔斯曼盆地。

总之，环太平洋造山带和阿尔卑斯—喜马拉雅—东南亚造山带就这样形成了，它大体上可以看作是全球性的连续造山体系（见图 26）

风与沙漠和黄土高原的形成

风花雪月，历来是诗人抒发感情的比照物。春风的生机和秋风的杀机，炎夏的急风骤雨和严冬的狂飚暴雪的威

图 26 全球新造山带构造体系与板块汇聚边界的关系（据盖保民，1991）

上图表示现代板块位置和新造山带（点区）的分布形式，黑实线表示扩张带，黑虚线表示板块缝合线。下图表示 200 百万年前大陆的分布形式；它们所经历的水平位移造成了新造山带（箭头指示相对于欧亚大陆的位移方向）力，无不进入诗人的意境。从杜甫（712—770）的“八月秋高风怒号，卷我屋上三重茅”到白居易（772—846）的“野火烧不尽，春风吹又生”，从刘邦（公元前 256—公元前 195）的“大风起兮云飞扬。威加海内兮归故乡”到毛泽东（1893—1976）的“风雨送春归，飞雪迎春到”等诗句，无不对“风”的力量倾注了感情。但诗人毕竟不是科学家，对风的地质力量的认识成果还是得自科学家。

在《论地下矿藏的源地和成因》（1546 年）中，阿格里克拉（1494？—1555）第一个清楚地阐明了水和风在景观刻蚀中所起的作用。托里拆利（1608—1647）早在 1715 年就以气压差解释风的形成。哈雷（1656—1742）在其论文《信风和季风》（1686 年）中第一次综述了三大洋盛行的风并附一张风图。从此，科学的步伐越来越快，使我们今人对风的地质作用的认识积知甚多。

全球大气环流

对流层是大气圈层的最下层，与岩石圈层相接。大气主要集聚在对流层，

它的运动对岩石圈层有着非常直接的影响。

对流层大气运动有垂直运动和水平运动两种，力源是气压差和地球自转。

作用于大气垂直方向的力主要由气体的垂直压力梯度与重力的合力决定，作用于大气水平方向上的力由气压的水平压差和地球自转决定。由于大气压水平分布不均匀而产生的气压梯度，存在一个从气压高的地方指向气压低的地方的力。产生气压水平分布不均匀的原因是地球表面的温度不同。地球表面温度不同是由于地球表面接收太阳的热辐射的量值不同。不同的季节、一天中不同的时间，地球表面温度都有所变化。在地理位置上，纬度高的地区接收到的热辐射量少，纬度低的地区接收到的热辐射量多。例如，在赤道地带，天空晴朗的非洲东北部的广大沙漠地区，每年每平方厘米能接收到的热辐射高达 921096 焦耳。在北纬 40°的地区，每平方厘米每年能接收到的热辐射是 586152 焦耳，而在北纬 60°的地区每平方厘米每年能接收到的热辐射是 334944 焦耳，纬度再升高，接收到的热辐射就更少。根据观测，北纬 40°到南纬 35°的区域是热量的净得区。因净得热量使该区域大气温度增高，天气热。北纬 40°以北及南纬 35°以南的区域是热量的净失区，困净失热量使该区域大气温度降低，天气冷。由于赤道的温度比两极高，使这两个地区的气压高低不同，因此存在一个从赤道指向两极的力。第二种，由于地球的自转，地面与大气之间的摩擦使大气受到一个因地球自转而产生的力。大气各层之间也存在摩擦力。这两种力作用的结果是使气体流动形成了风。风的速度与方向都由气体受力的大小和方向决定。

赤道地面温度比高空温度高，地面气压大于高空气压，气体上升，从而加大了高空的气压，同时地面的气压降低。在两极的高空，由于温度低、气压低，于是在地球上空，气体从气压高的地方流向气压低的地方，即从赤道的上空向两极运动。赤道的热气体到达两极后，两极高空的气体密度增加，两极的冷空气向地面运动，地面附近的气体密度增加而使气压增高，气体在地面附近从气压高的地方流向气压低的地方，即从两极流向赤道。冷空气到达赤道，吸收赤道上的热能而导致温度升高，于是形成了赤道一两极的气体环流（见图 27）。当赤道高空的气体向两极流动，受到地球自转力的作用后，又使气流改变方向。这两种力作用的结果是，大约在北纬 30°的上空使气体流动方向转为与纬线相平行，形成了西风，从而阻碍赤道上空的热气流继续向北移动。同时该地区的冷空气下沉到地面附近，导致气体密度增加，在北纬 30°附近形成了气体的高压带。高压带附近的气体在地面附近向赤道和北极两个方向流动。向赤道方向流动的气体，成为流向赤道的东北信风。向北极流动的气体，通常称为盛行西风。同样地，在南半球也形成和北半球相对称的风向（见图 27）。以上的分析是假定地球的岩石圈是平坦的，但实际上高高的山脉对风的走向有阻碍作用。位于青藏高原的“世界屋脊”喜马拉雅山脉就阻挡向北运动的气流。

图 27 大气环流和盛行风的模式（据盖保民，1991）

风的侵蚀和搬运力

风对岩石圈的作用是非常重要的。风对地表的作用表现为对地表的侵蚀

及对松散碎屑物质的搬运和堆积作用。在干旱和半干旱地区，风的作用尤为显著。

年平均降水量不足 250 毫米的地区称为干旱地区。在干旱地区，由于缺水，地面植被变得稀疏，气候变得干燥。地表岩石的热容量小，日气温及年气温的变化大，使得气压也随之变化，所以干旱地区多风。风对岩石有风化作用，结果使岩石变成碎屑，使干旱地区变成荒漠，植被更加稀少。这种恶性循环使干旱地区沙漠化。现在，世界上荒漠面积约占陆地总面积的 1/5。它们以大沙漠的形式分布在非洲、亚洲和澳大利亚。

风对岩石的侵蚀作用可以使陡峭的岩壁被侵蚀成直径 20 厘米左右、深度为 10～15 厘米、大小不等的小洞穴和凹坑，使得岩石具有蜂窝状的外貌。有些岩石长期受到风的侵蚀，形成下细上粗的蘑菇状。被风侵蚀的岩石的这些奇特外观将会成为旅游胜地的一大景观。

当风的速度达到或超过 5 米/秒时，地面泥沙的 90%可以被吹扬到离地面 10 厘米的范围内。含泥沙的风称为风沙流。风速越大，风沙流中的含沙量越大。当风的速度减小时，风沙流中部分泥沙下沉落到地面。当风速度为零，即风停止时，风沙流中的泥沙全部沉落到地面，被风沙大面积覆盖的地区便成了沙漠。若风吹扬的不是沙粒而是粉沙或尘土，风停止之后下沉覆盖的部分便是黄土。黄土是风的产物，因此黄土的分布应当与风的方向有关。世界上的黄土多分布在气候干燥的中纬度地区。在北半球多分布在北纬 30°～60°范围内。南半球的黄土分布在南回归线以南。全球黄土的分布呈断续的条带状（见图 28）。全世界黄土面积约为 1300 万平方公里。

中国的黄土主要分布在黄河的中下游地区，即现在的黄土高原。阴山以南、秦岭以北也有大面积的黄土。除此之外，新疆和东北地区也有部分黄土。黄土覆盖总面积达 632520 平方公里，占世界黄土面积的 4.9%。根据华北地区高空取样，中国的黄土高原是西风把西伯利亚、蒙古和新疆等地的粉沙和尘土吹到黄河中游地区上空然后下沉所造成的。今日黄土仍以每年 1 毫米厚的速率沉积推算，土层 400 多米厚的黄土高原应是近 40 万年形成的。

黄土覆盖在原丘陵、盆地、河谷之上，因此黄土高原的地貌的主要特征也应当与地下岩石圈上的古地貌相似。但是地表的黄土仍将受到风的作用和水的冲刷，使黄土高原的地貌又有不同于古地貌的地方。

大川与峡谷和冲积平原的形成

关于水的威力人们的认识较早，古巴比伦人、亚述人、波斯人、埃及人、印度人、中国人，都世世代传述那远古洪水的传说。大禹治水的故事在中国家喻户晓，诺亚方舟在基督教世界人人皆知。《圣经》对洪水的描述好像是有根有据的：当诺亚 600 岁 2 月 17 日那天，开天辟地第一回下了雨，千万条水线从高天直通地面，如同无崖的瀑布骤然倾泻；大雨不停地下了 40 个昼夜，江河湖海暴涨，冲决了堤坝；滚滚洪水席卷了沟壑、洼地、平原、丘陵和山岭，……人群、庄稼和牛羊，以及一切獐狍野鹿全都陷入灭顶之灾，在劈头盖脸的浪头里挣扎、叫喊……山巅之上的树木也节节没入洪水之中。无论这故事是无稽之谈还是有几分真实，有一点是肯定的，那就是先民们对洪水威力的恐惧。

科学地认识水的地质作用的先驱当推中国的沈括。1074 年，他赴浙东察

访，所见雁荡诸峰皆峭拔险峻，穷崖巨谷耸天千尺。他认为这与西北黄土高原的百尺沟壑一样，皆为流水侵蚀所致，两处之不同只在土石之别而已。后世的科学家对流水侵蚀造峡和冲积平原的研究当然是越来越精确的。他们的辛劳成果为我们今人理解地球的自然地貌提供了科学的根据。

流水的侵蚀作用

存在于陆地上的水有两种形式：一种是流水，如江河：一种是相对稳定的湖泊和沼泽地中的水。

海洋、湖泊和江河表面吸收太阳的热能，使水蒸发成为水蒸气上升到空中，遇冷空气凝结成水珠落到河面。除此之外，地下水或冰雪融水也源源不断地补充给江河，使之川流不息。雨季到来，水珠集中落到地面后也可能形成沟谷流水和坡面流水。雨季过后，沟谷和坡面可能断流。不论是江河流水还是沟谷或坡面流水，对地表面都有很强烈的的侵蚀及搬运作用。

植被稀薄地面的流水的侵蚀作用表现为水土流失。不论是年均降雨量不足 400 毫米的黄土高原的半干旱地区，还是气候湿润的南方，只要地表的植被稀薄或遭破坏，流水的冲刷就会造成严重的水土流失。冲刷下来的物质流入江河，成为江河泥沙的来源。

江河流水对地面的侵蚀有三种方式：一种是下切侵蚀；另一种是侧向侵蚀；再一种是向源侵蚀。这三种侵蚀都是砂、砾石和滚石在流水中沿河底搬运时产生的磨蚀。而这三种侵蚀对一条河流来说是同时存在的。

下切侵蚀是流动的河水对河床上的粘土、砂和砾石等未固定的松散物质的侵蚀作用，水力能将其冲走，甚至还能切穿基岩。水力作用的结果是陆地上出现许多狭长的大河谷。这种现象在江河的上游表现明显。因为在上游地带，河床的海拔高，河水落差大，因而河水的流速大，水的冲击力也大，河水的下蚀作用明显。例如，长江上游的滇西北一带的河谷，由于河水的下蚀作用，在 200 万年内已加深了 1200 米，目前还在继续加深。有瀑布的河流下蚀作用十分严重。瀑布的水从很高的悬崖上飞泻下来，较大的水位差所造成的较大的动能，产生显著的下蚀作用。世界著名的尼亚加拉瀑布位于坚硬的石灰岩与软弱的页岩交界处。瀑布的急流侵蚀瀑布底下面的软岩层，能将基部掏空，而导致岩石崩塌。尼亚加拉瀑布以每年平均 1.3 米的速度不断向上游退移，形成尼亚加拉峡谷，就是这种下切侵蚀作用的结果（见图 29）

图 29 尼亚加拉瀑布后退过程（据盖保民，1991）

流水的侧蚀可以使河床变曲。造成河道不稳定。由于河床弯曲，河水在弯曲处受到一个指向河道外侧的离心力的作用，使流水偏转，不断冲刷河道的外侧，造成河道的弯曲度加大。在弯曲处的内侧，由于河水的流速比较小，被河水搬移的物质会堆积起来。河流侧蚀的结果是变曲的河流形成曲流。平原地区土质较为松软，河流侧蚀的结果不仅造成河床不稳定，甚至造成河流改道，在洪水作用下凹岸弯曲处后退现象十分严重。

江河的搬运力

流水对地面物质的搬运作用有两种形式：一种是化学搬运；一种是机械

搬运。

化学搬运是河水在其流域中溶解岩石化合物，使溶解物，即水中的矿物质，随着河水流动，从上游搬运到下游。能够溶解于水的化台物有碳酸氢钙、碳酸钠、氯化钠、硫酸铁及其他含有镁离子、钾离子的可溶性盐。溶解后的化合物以离子的形式存在于水中。一般情况下，河水溶解的化合物远远达不到饱和状态，因此不论河水的流量和流速有多大，这些矿物质都会随着水流而被搬运。一旦由于水温、水量发生较大的变化，使河水从不饱和溶液变成饱和溶液时，部分矿物质就会沉积在河底。当河水发生化学变化时，在河水中也会沉积一些不溶性的矿物质。虽然化学搬运作用所搬运的矿物质的量很少，但它对水质的影响是不可忽视的。

机械搬运是以河水为动力将河边、河底或水中的松散碎屑物质、沙砾，甚至巨大的砾石冲刷到下游，或长途搬运到海洋、湖泊。

若被搬运的物质是泥沙或者其他的悬浮物，在河水流动过程中，它们悬浮在水面上或水中随同河水一起流动。在一定条件下，河水能搬运的泥沙数量称为挟沙能力。挟沙能力与水的流量和水中的含沙量有关。水的流量增大，挟沙能力也增大；水的含沙量增大，挟沙能力也增大。河水的含沙量增加到一定程度，超出允许的挟沙能力时，部分泥沙会逐渐沉积。

若被搬运的物质是沙砾或砾石，这些砾石处于河底，河水的搬运作用表现为推移。这些沙砾或砾石称为推移质。推移质的体积与重量都与河水的流速有关。

水流开始推动推移质起动的速度称为起动流速，用 V_0 表示。推移质的粒径与 V_0 的平方成正比，推移质的重量则与 V_0 的 6 次方成正比。当水的流速增加一倍时，可推动的砾石的粒径就增加 4 倍，能推动砾石的重量就要增加 64 倍。在一般情况下，平均流速为 0.162 米/秒时，细沙开始移动，平均流速为 0.216 米/秒，粗沙开始起动；平均速度为 0.312 米/秒，细卵石能起动；平均流速为 0.975 米/秒，中卵石开始起动；平均流速大于 1.62 米/秒，大卵石能起动。因此，河流上游发生的暴雨急流可以将许多大的或巨大的砾石冲到下游。暴雨停止，这些砾石便停留在那里。一般情况下，河流上游的流速高于下游，因此在河流入海或流入湖泊的这段路程中，推移质的分布规律为：河源头附近有较大的砾石，上游有较小的砾石，中游分布较多的泥沙，下游分布细沙，在入海口或入湖泊口有粉沙或淤泥。

推移质的数量与河水的流量有关。水的流量增加，推移质的数量也增加。当山洪爆发或洪水到来时，河水的流速和水量都猛增，可能导致许多的推移质及泥沙向下游流去。

流水的搬运作用是不可低估的，每年的机械搬运量也是惊人的。据测量，黄河和长江的机械搬运量分别为每年 136 亿吨和 4.905 亿吨。黄河最大含沙量为 42.29%，黄河支流无定河的最大含沙量达 78%，黄河每年搬运到海里的泥沙达 12 亿立方米。黄河和长江的化学搬运量每年 2018 万吨和 17790 万吨。

流入海洋或湖泊的河水，在入海口或入湖口由于地势平缓而流速变小，于是被搬运和冲刷的大量泥沙沉积在那里，形成大面积的冲积平原或三角洲。华北平原是由黄河、淮河和海何等许多河流频繁改道而形成的大冲积平原。世界上许多大河流一般都堆积形成大型三角洲，如尼罗河三角洲、密西西比河三角洲、恒河三角洲、尼日尔河三角洲、长江三角洲及黄河三角洲。

土壤和植被的形成

中国是有重农传统的国家，自然对土壤多有关注。先秦典籍《吕氏春秋》中四篇中国最早的农学论文《上农》、《任地》、《辩土》和《审时》中，有两篇是针对“土”的，但关于土壤的形成理论却长期停留在哲学思辨的水平上。直至 17 世纪仍然在“五行”学说的基础上思考问题。“土”作为五行的元素之一，在宋应星（1587—1666）看来土是由水和火演变而来的，而且同时代哲学家也持类似的看法，其前有王廷相（1474—1544）把五行分为水火、土、金木三个层次，李时珍（1518—1592）主张“首以水火，次之以土”。这样，土壤形成的科学探索就让位于西方科学家了。

从地质学视角讨论土壤问题的先驱是阿格里科拉（1490/1494—1555），他在其著作《论地下矿藏的源地和成因》（1646 年）中实质上提出了土壤的风化成因说。利斯特（1638—1712）绘制了历史上第一张土壤和矿物图，并对砂和粘土作了详细的分类，在 1684 年发表一篇题目长得怕人的论文。19 世纪初人们对土壤的研究还是或作为化学系统或作为地质系统单独研究，1883 年道库恰耶夫（В.В.Докучаев）提出较全面的成土说，认为土壤是母岩、气候、生物、地形和时间五种因素综合作用下的产物，科学的土壤形成理论从此开始了。冗长的历史叙述未必有多大好处，我们还是总括一下 400 多年来的认识成果吧。

风化与土壤的形成

裸露在地表的岩石，经过与大气圈、水圈和生物圈的漫长作用，由整块变成碎块再变成碎屑，这是一个岩石的风化过程。被风化的岩石是土壤的母质。生物圈的动植物给这些母质提供了养分，使其成为有一定肥力的土壤。岩石在整个风化过程中可表现为两种风化形式：物理风化、化学风化和生物风化。在 4 亿年前，地球上少有植物覆盖，气候恶劣、物理和化学风化作用很强。

物理风化是一种物理过程，岩石在崩解破碎过程中不改变矿物成分和成学成分。地球上的岩石是在高温和高压的环境条件下形成的。地表的温度和压力降低，岩石表现出一种不稳定性。岩石受到的种种机械破坏作用以冰冻作用最为显著。在寒冷地区，气温在零度上下波动，反复地收缩和膨胀使岩石破裂。

化学风化是岩石的化学分解过程。在水、氧气和二氧化碳的作用下，岩石会产生化学反应。有的岩石被氧化，有的岩石被水溶解，有的岩石被分解，因而破坏了矿物质的内部结构并产生新的矿物质。气温和水温对化学风化的速度有很大的影响。高温潮湿的气候有利于岩石的化学风化。在热带森林带，年平均降水量在 3000 毫米左右，年平均蒸发量在 900 毫米左右，年平均温度达 25 摄氏度。热带森林地区充足的雨量和较高的气温，使得化学风化较亚热带森林带、热带草原带、温带森林带、温带草原带、半荒漠草原带、荒漠带及苔原带等地带都更强烈，花岗岩类岩石的长石完全变成粘土矿物。热带森林带的化学风化对岩石的破坏深度可达 70 米，形成很厚的土壤层。

生物风化是岩石在生物的作用下发生的机械破碎和化学分解过程。生长

在岩石裂隙中的植物，尤其是根深叶茂的大树，其根系深入到岩石内部达几十厘米甚至 1 米，作用于岩石上的压力可使每平方厘米的岩石受到 10～15 公斤力，导致岩石的裂隙加大，最终使岩石崩碎、瓦解。

物理风化与化学风化都包含有多种物理、化学过程、在多数情况下是互相配合同时对岩石起作用的。物理风化和化学风化的结果使岩石破裂最终成为细粉，并为土壤提供了矿物质，即简单的盐类。生物的作用，特别是植物和微生物的作用给土壤提供了其他养分，使物理、化学的风化物成为具有肥力的土壤。

土壤中的氮是由某些固氮微生物吸收空气中的氮并将其固定在土壤中形成的，如大豆的根瘤菌就能起到固氮作用。微生物的另一个重要作用是使死亡后的动植物产生一种生物化学作用，使得动植物的有机质一部分经过微生物的分解转化，被正在生长着的植物直接吸收；一部分经过一个复杂的合成过程，使动植物尸体转变成为腐殖质埋藏在土壤中。

土壤与生态循环

土壤是植物生长的物质基础。有了土壤，地球上的生物才能生机勃勃。从前 4 亿年产生陆生植物后，植物在地球上逐渐繁衍。从煤矿和石油矿的分布看，从石炭纪到晚第三纪的近 4 亿年间，在中纬度及其附近地区森林广泛覆盖地表。全球煤碳和石油的贮藏量估计达上万亿吨，其含碳量是地球现有活有机体含碳总量的五十多倍。

植物生长所必需的水分和营养物质主要是通过根系取之于土壤。绿色植物吸收空气中的二氧化碳，利用绿叶中保存的叶绿素吸收太阳光的能量，完成绿色植物的光合作用。光合作用的过程可用化学方程式表示为：

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{叶绿素}]{\text{太阳光}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

其中 $C_6H_{12}O_6$ 是葡萄糖的分子式。光合作用生成 1 克分子的葡萄糖需要消耗 3867480 焦耳的能量。光合作用将太阳的能量转化为植物的内在能量，维持植物的生长。

不仅植物吸收二氧化碳，许多植物还可以吸收其他气体，如夹竹桃对二氧化硫、氯气、氟化氢等有害气体有很强的吸收能力，并在光合作用后放出氧气。植物的这种能力对提高空气的含氧量、清新空气、改善动植物的生存环境都是有利的。

植物对于调节气候也是非常重要的，尤其是在干旱和半干旱地区，如果在那里种植能生长的植物，增加植被，就可以阻挡风沙的侵袭，固定土壤，防止水土流失。植物叶面蒸发水分，可以使气候湿润起来，从而达到调节气温的作用。

生物的生存是以能够获得足够的能量为前提的。植物经过光合作用，将太阳的光能转化为植物的内能，维持植物的生长。草食动物咀嚼植物获得能量维持其生长。食肉动物以食用草食动物作为其生存的条件。未被吞食的动植物残体经过微生物的生物化学作用变成腐殖质进入土壤，成为植物生长所必需的营养物质。这样一个食物链，维持了地球上所有动植物的生命，构成了地球上的生物圈。

生物圈、气圈、水圈和岩石圈的相互作用形成了一个大的循环（见图

30）。

地下宝藏的储布

我们的地球，不仅以其沃野平原为农民提供农耕的土地、以其江河湖海为渔民提供捕捞鱼虾的水域、以其山林草原为牧民提供蓄养牲畜的牧场，而且还以地下埋藏着的数千种矿物为人类的工业生产提供能源和原料。那么，这些矿物是怎样形成的呢？在古代，几乎各民族的先民都认为矿物是大地生长出来的。在中国有所谓“土经五百年变成银，银再经五百年变成金”的说法，直至 17 世纪宋应星还坚持认为“土为金之母，金为土之子”。在西方，宋应星同时代的本·章生的剧作《炼丹家》，注意到生成的时性，把黄金的生成推到远古之初：

是啊，
大自然在大地把黄金生，
怎能是在一瞬间？
瞬间生成的臆测，
实在荒唐透顶，
因为某事件已在以前发生。
远古的物质啊，
一定存于那遥远的早先。

是的，与粒子物理学结合的爆胀宇宙学已能断言，地球上的元素诞生在 150 亿年以前。在“宇宙结构的起源”一章中我们已经说到，宇宙大爆炸后 3 分钟是元素形成的时代。地球上的元素都来源于此爆炸，但在地球上形成矿物又经历了几十亿年的复杂历程。

阿格里拉(1490/1494—1555)的著作《论地下矿藏的源地和成因》(1494～1546 年）、《论化石的性质》（1546 年）和《论金属》（1655 年）是有关矿物的早期著作。其后的历史不必一一介绍，我们跳过历史直入现代。

矿物和岩石

岩石圈中的绝大部分元素并不是作为单个原子出现的，而是结合为复杂的结晶物质，即所谓矿物。矿物是由地质作用形成的天然单质或化合物，它具有相对固定的化学成分和物理性质。矿物在一定的地质条件下相对稳定地存在着，而当外界条件变化时原有的矿物就会发生变化。

矿物的分类

矿物是由元素组成的。除人造元素外，人类已知的几十种化学元素在岩石中都已被发现。但在岩石中，不同元素的重量百分比是很不同的。根据地质学家的研究，氧、硅、铝、铁、钙、钠、镁、钾、钛和氢等十种元素占了地壳总重量的 99.96%；其中氧接近一半，硅占 1/4 强。

由几十种元素构成的矿物约有 3000 余种，最常见的矿物只五六十种，其中硅酸岩是构成岩石的主要成分。根据化学成分的不同，一般把矿物分成六类：

（1）自然元素类，为自然产出的由原子自相结合而成的单质矿物，其种类和分布都很少。

（2）硫化物类，除硫化氢外，此类矿物都是金属的硫化物。

（3）氧化物及氢氧化物类，此类矿物约 200 余种，广泛分布于地表氧化环境中，其中以硅、铝、铁、锰的氧化物或氢氧化物最常见。

（4）卤化物类，为各种轻金属阳离子与卤族元素的阴离子结合成的化合物。

（5）含氧盐类，包括硅酸盐、碳酸盐和磷酸盐等，几乎占已知矿物的 2/3，其中硅酸盐作为造岩的主要矿物占地壳总重量的 75%～80%。

（6）有机化合物类，主要由碳、氢、氧、氮、硫等元素组成，各种化合物常合在一起，并有固态、液态和气态等类型。

绝大部分矿物是固态无机物，液态和气体矿物以及有机矿物极少。固体矿物大部分是结晶质，少有非结晶质。

岩石的分类

岩石是由矿物或岩屑通过一定的地质作用聚合而成的集合体。关于岩石的成因，英国的伍德沃德（1665—1728）在其论文《地球自然历史试探》（1695 年）中先提出水成说，后有意大利的莫罗（1687—1764）在论文《论在山里发现的海洋生物》（1740 年）中提出的火成说。遂有 18 世纪地质学界关于岩石成因的水成说和火成说之争。德国地质学家维尔纳（1750—1817）在其论文《关于地壳结构及岩层层序》（1787 年）中提出，地球上一切岩石和矿石都是在水中沉积形成的。而英国地质学家赫顿（1726—1797）在其论文《地球理论》（1785 年）中，在不否认水的沉积成岩作用的同时，强调了火山爆发和岩浆侵入等作用和由此而形成的火成岩类的重要性。19 世纪中叶的“水”“火”之争，以水成说学派的瓦解而告终。水成和火成是两种不同的成因，而且变质岩还另有成因。大多数岩石由若干种矿物组成。按其成因，岩石可分为三类：岩浆岩（或火成岩）、沉积岩（或水成岩）和变质岩。

岩浆岩是地下的岩浆从地壳薄弱处侵入或喷出地表，由于温度降低而最后冷凝形成的岩石。岩浆岩构成了岩石圈的绝大部分，分布也非常广泛。岩浆岩的主要造岩矿物是石英、正长石、斜长石、黑云母、角闪石、辉石和橄榄石，在各种岩浆岩中它们的比例分配是不同的。分析这些矿物的化学成分可知，组成岩浆岩的主要元素是氧、硅、钼、铁、镁、钙、钾、钠八种，占总量的 98%。依含硅或硅酸的多少将岩浆岩分为酸性岩、中性岩、基性岩和超基性岩四类，少数钾、钠含量特别高的岩浆岩称为碱性岩。最主要的岩浆岩有花岗岩、流纹岩、闪长岩、安山岩、辉长岩、玄武岩和橄榄岩。

沉积岩是在地表或接近地表的环境下，由各种沉积物硬结而成的岩石。沉积物来源于地表的岩石和大气、水和生物的相互作用。沉积岩中常见的物质成分有矿物、岩屑、化学沉淀物、有机质及胶结物，此外尚有一些火山物质和宇宙物质。沉积岩具有明显的层构造特点，最主要的构造是层理，按其形态被分为水平层理、斜层理和交错层理。此外，结核、化石波痕和泥裂也是沉积岩的特征。沉积岩在陆地表面分布最广，占陆地表面积的 3/4。但从地表往下沉积岩所占比例逐渐下降，到地表下 16～20 公里处仅占 5%。

变质岩是已存在的岩石由于变质作用发生成分和结构变化而形成的新岩石。所谓变质作用，指在温度、压力和溶媒的推动下，原物质中的矿物在固相下重新结晶或分解重组而形成新物质的过程。变质岩常残留有原岩的某些

特征，其普遍的特征是有变晶结构，而其构造特点是多具片理结构。最常见的变质岩有板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、大理岩和石英岩。变质岩主要分布在大陆区域。

成矿的机制和过程

岩石圈是由固体岩石组成的，而岩石又是由矿物组成的。那么矿物是怎样在地球演化中形成的呢？

所谓“成矿”是指矿化元素在地质体的有利部位富集的运动。地质体是由各种各样的化学元素微粒构成的。地质体的运动不仅作为整体有板块运动，而且作为其组分的小微粒也在地质体内部作随机的运动。随机运动着的微粒依其本身的化学性质和地质环境的地球化学特性，在特定的区域转化为矿化态，正是这种矿化元素随机转移，在合适的条件下集积而形成矿物的空间分布。

成矿过程有三种基本类型：第一种叫残积过程，即矿质因围岩部分迁移提供了空间而被富集起来的过程。第二种叫来积过程，即矿质以各种不同的途径向围岩中富集的过程。第三种叫吸积过程，即矿质就近从围岩中富集的过程。当然，这三种基本过程的各种组合也都是可实际发生的成矿过程。应该说，成矿过程不可能是一次发生的。因为随地球不断地脉动，地质体的外部和内部运动也是不断变化的。现在的所谓“矿床”，就是在长期的历史演变过程中形成的那些元素含量达到工业品位、规模达到可开采程度的成矿区域。

矿物微粒的运动

矿物微粒在地质体中的运动是形成矿物的基础。这种物质运动的作用过程，在蒋志的著作《地质体运动理论及其应用》（1995 年）中被区分为五种作用过程，即岩浆作用过程、伟晶作用过程、热液作用过程、表生作用过程和变质作用过程。

岩浆作用过程是在高温、高压条件下，岩浆熔体中形成各种矿物并进而形成矿物集合体岩浆岩的过程。在这个过程中，化学元素或呈离子形式，或呈群聚体形式。或呈早期结晶矿物的形式，或呈其他形式，不仅它们可在岩浆熔体内沿任何方向运动，而且岩浆熔体在整体上也是运动的。

伟晶作用过程是在较低的温度和压力条件下，岩浆残余熔体或溶液中化学元素结晶形成矿物的过程。在这一过程中，化学元素或以一定的化合物结晶，或以矿粒重结晶，或者矿粒在饱和的气相介质中进一步生长，或者早期矿物被后期溶液再溶解、淋滤，并在开放空间中再沉淀。

热液作用过程是在更低的温度和更小压力下的溶液中，化学元素或者呈化合物的形式搬运，或者呈络合物的形式搬运，或者呈胶体状态搬运的过程。在温度和压力变化时，矿物微粒因过饱和氧化还原条件和酸碱条件变化，生成新的化合物，或因凝聚而沉淀。

表生作用过程是在地表常温、常压下进行的过程，包括风化、氧化、搬运、沉积等。在这个过程中，化学元素或者以矿物的形式，或者以岩石碎屑的形式，或者以胶体悬浮物的形式，或者呈吸附状态，或者呈分子、离子、

有机化合物等状态进行运动。

变质作用过程是原来岩石在温度、压力和组分浓度改变时其结构发生变化而导致原地质体性质改变的过程。在这个过程中，化学元素的运动主要表现为沿岩石的孔隙系统渗滤和扩散，并与原岩石发生成分交换或结构改变，形成交替作用或重结晶作用，有时仅仅表现为原岩石的重结晶作用。

成矿域和成矿幕

所谓成矿域是指矿物集中的有一定地质构造特点的区域。而所谓成矿幕是指成矿集中的有一定地质体运动特点的时期。成矿总是在某个成矿幕和某种成矿域中实现的，因而了解成矿域和成矿幕是认识成矿过程的重要一环。

主要的成矿域有古陆成矿域、陆洼成矿域、陆槽成矿域、海洼成矿域和海槽成矿域。牛轭形古陆是地球形成至前 7 亿年间形成的古陆，其太古宙部分的主要构造格式有绿岩—花岗岩带和麻粒岩—片麻岩两种，而元古宙部分的主要构造格式为石英—砾石岩和侵入岩以及蛇绿岩。古陆成矿域主要在形成发展中的牛轭形古陆和破碎的太平洋古陆上。陆洼有膨胀陆洼和收缩陆洼的区别，前者是膨胀期陆壳中的洼地，而后者是收缩期陆壳中的洼地。膨胀期陆洼的特点是：陆壳 I 型张裂体系发育，岩浆活动由以中酸性为主向以基性、超基性为主演化，以海退、变干冷、风化壳发育为主要趋势；收缩陆洼的主要特点是，陆壳 X 型剪切断裂体系发育，岩浆活动由以基性、超基性为主向以中酸性为主演化，以海进、变湿热、化学沉积为主要趋势。陆洼控矿的主要特点之一是结构控矿，成矿往往在断裂体系上。陆槽是地球膨胀期陆壳受侧向引张作用的产物，包括热点、裂谷和大陆边缘都是成矿的主要部位，主要成矿域在古大陆内部的破裂带上。海洼，无论是膨胀期海洼还是收缩期海洼，都是由洋脊诞生的洋壳的改造形态，主要形态是所谓的大洋盆地。海洼成矿首先是继承洋底成矿，然后是改造成矿，主要成矿域在牛轭形古陆以外的洋壳。海槽包括海沟—岛弧系和山弧系以及大陆碰撞带，是成矿最丰富的地区。自显生宙以来，海槽成矿域主要在环太平洋带和特提斯带，或牛轭形古陆的外部边缘带，世界大部分金属矿集中在这里。

成矿幕分收缩期成矿幕和膨胀期成矿幕。所谓收缩期成矿幕，指由于地球收缩而在地壳上产生的地台、陆洼、陆槽、海岭、海洼、海糟在成矿作用中的暂态表现之总称。在地球收缩期，地台成矿以受海进和湿热气候控制为主，陆洼成矿以收缩期陆洼成矿类型为主，陆槽因仅依水平力场方向变化而发育较差，作为缓慢生长洋脊的海岭是铁、锰的氧化物和氢化物矿化发育的结果，海洼成矿以收缩期海洼成矿类型为主，海槽成矿为收缩期成矿幕的高潮期。最典型的收缩期成矿幕在中生代，矿床具有多样性，最突出的特征是存在大量热液矿床，金属矿广泛分布，是钨、锡、锑成矿的鼎盛期。所谓膨胀期成矿幕，指由于地球膨胀而在地壳上产生的地台、陆洼、陆槽、海岭、海洼、海槽在成矿作用中的暂态表现之总称。在地球膨胀期，地台成矿以受海退和干冷气候控制为主，陆洼成矿以膨胀期陆洼成矿类型为主，陆槽所控制的矿物发育较好，作为加速生长洋脊的海岭是铁、锰的氧化物和氢化物矿化发育的结果，海洼成矿以膨胀期海洼成矿类型为主，海槽成矿中岛弧系统的作用强于山弧系统的作用。最典型的膨胀期成矿幕在新生代，矿化非常活跃，是有色金属矿床分布最为广泛的时期。

矿床围岩和矿床类型的演化

地球脉动导致的构造—岩浆演化，会导致矿床围岩和矿床类型的演化，并且依不同的矿种而形成不同的演化系列。

矿床围岩的演化是岩壳不断发展变化的必然结果。因为地球的脉动，大部分岩壳经历了多次膨胀和收缩。对于陆壳中的矿物来说，不断发展变化的陆壳就构成了矿床的不断发展变化着的围岩。古老的围岩因其所经历的地球脉动次数多而变化大，新的围岩因其所经历的地球脉动次数少而变化小。在同一地区比较新旧围岩，按其变化程度排序，可得矿床围岩演化序列。世界上许多地区的矿床围岩都表现出演化特征。例如，中国的金矿围岩，在太古宙地层中以混合岩和变质岩为主，在元古宙地层中以变质岩为主，在古生代地层中以变质岩、沉积岩、侵入岩为主，在中生代地层中以侵入岩、火山岩、次火山岩为主，在新生代地层中以火山岩、次火山岩为主。因此，中国金矿床围岩的变化顺序是火山岩、次火山岩—侵入岩—沉积岩—变质岩—混合岩。这也就是说，太古宙地层中的金矿床围岩已演化到上述序列的最后阶段。

基于与矿床围岩演化同样的原因，矿床类型的演化也往往形成演化系列。还以金矿为例，在太古宙地层中，主要有花岗岩化热液型、变质热液型和沉积—变质型；在元古宙地层中，以变质热液型为主；在古生代地层中，是变质热液型、热水溶液型和岩浆热液型；在中生代地层中，主要是岩浆热液型、火山岩和次火山岩热液型。因此，中国金矿床类型的演变顺序是火山岩、次火山岩热液型—岩浆热液型—热水渗滤型—变质热液型—沉积—变质型—花岗岩化热液型。

全球成矿概观

主要矿物分布在全球什么位置，它们是在什么地质年代形成的，这种全球成矿大观无疑是由元素的化学性质和全球地质格局及其变化过程决定的。地球化学家蒋志在其著作《地质体运动理论及其应用》（1995 年）中，在地球脉动大背景下，依据不同化学元素的成矿特点，对主要矿藏的全球分布和成矿时期，作出了轮廓性的描述，提供了成矿域和成矿幕的全球景观。

概括地说，自地球诞生以来，地球上经历了 9 大成矿幕，它们分别对应于地球的膨胀期和收缩期。对于成矿域，按元素种类分析也可以有个轮廓性认识。近铁族元素矿物主要沿牛轭形古陆分布，亲铜族元素矿物主要分布在牛轭形古陆、环太平洋带和特提斯带上，钨钼族元素矿物主要分布在环太平洋带和特提斯带上，珍稀矿物和非金属矿物主要分布在海槽和陆槽附近，煤、石油和天然气主要分布在中纬度地区。

全球成矿期的划分

全球成矿的历史，以前 7.5 亿年为界分为前后两大阶段。从地球形成到前 7.5 忆年间是地球上部水平力场向西向极为主的时期，是牛轭形古陆和太平洋古陆形成和发展阶段，包含三个膨胀期成矿幕和两个收缩期成矿幕。从前 7.5 亿年至今，是地球上部水平力场方向发生变化，导致牛轭形古陆和太

平洋古陆解体、漂移甚至消亡的阶段，包含两个收缩期成矿幕和两个膨胀期成矿幕。

膨胀期成矿幕Ⅰ含前 35.71 亿～前 25.59 亿年间的 10.12 亿年，大体相当于新太古代。在这一时期内，由于两极挤压作用力相当强，并且处于牛轭形古陆和太平洋古陆的初成期，在中纬度地区的许多矿的成矿特点类似于收缩期成矿幕。

收缩期成矿幕Ⅰ含前 25.59 亿～前 17.94 亿年间的 7.65 亿年,大体相当于古元古代。在这个时期内，由于两极挤压力仍较强，并且牛轭形古陆和太平洋古陆已成雏形，中纬度地区的收缩成矿较其他地区更为明显。

膨胀期成矿幕Ⅱ含前 17.94 亿～前 13.41 亿年间的 4.53 亿年,大体相当于中元古代早、中期。这是牛轭形古陆和太平洋古陆稳定生长的时期。

收缩期成矿幕Ⅱ含前 13.41 亿～前 10.01 亿年间的 3.40 亿年,大体相当于中元古代晚期。这时仍是牛轭形古陆和太平洋古陆稳定生长的时期。

膨胀期成矿幕Ⅲ含前 10.01 亿～前 7.25 亿年间的 2.76 亿年，大体相当于新元古代早、中期。这时牛轭形古陆和太平洋古陆的生长已进入最后阶段。

收缩期成矿幕Ⅲ含前 7.25 亿～前 4.91 亿年间的 2.34 亿年,大体相当于震旦纪和寒武纪。在这期间的前 6 亿年前后，地球上部水平力场第一次向赤道，使牛轭形古陆进入解体状态。

膨胀期成矿幕Ⅳ含前 4.91 亿～前 2.84 亿年间的 2.07 亿年,大体相当于古生代的四个纪，即奥陶纪、志留纪、泥盆纪和石碳纪。在这期间，地球上部水平力场又恢复了向西向极的方向，初步张开的牛轭形古陆重新闭合为联合古陆。

收缩期成矿幕Ⅳ含前 2.84 亿～前 1.02 亿年间的 1.82 亿年,大体相当于古生代的二叠纪和中生代的三叠纪、侏罗纪和白垩纪。在这期间，地球上部水平力场又一次向赤道，在前 2 亿年前后第一次向东，使联合古陆和太平洋古陆迅速解体。

膨胀期成矿幕Ⅴ含前 1.02 亿～未来 0.65 亿年间的 1.67 亿年,大体相当于中生代白垩纪的晚白垩世和整个新生代。在这期间，地球上部水平力场又恢复向西向极的方向，已经解体的联合古陆向各方漂移，形成今天的海陆格局。

主要矿物的时空分布

矿物的时空分布决定于成矿的地质环境和元素的地球化学特性。几十种主要矿物，其成矿元素的地球化学特性各异，但也有共性和相近之处。基于某些方面的共性可以分类叙述主要矿物的时空分布。蒋志在其著作《地质体运动理论及其应用》（1995 年）中，分近铁族、亲铜族、钨钼族、珍稀和外营力矿物五类。

近铁族元素矿物以铁元素为中心，包括前铁元素钛、钒、铬、锰和后铁元素钴、镍。在时空分布方面，前铁元素和后铁元素与铁元素大体相同，它们的分布既受牛轭形古陆的控制又受气温和大气氧量的制约。由于铁元素在地球内基性岩和超基性岩中的丰度远高于其在中性岩和酸性岩中的丰度，并且随从地壳到地核和从陆壳到洋壳的过渡顺序增高，以及它亲硫和亲氧的二重性，其矿床建造分为条带状含铁建造和■状铁石岩型两类。条带状含铁建

造主要形成于太古宙和早元古代，而■状铁石岩型则从元古宙到上新世都是它的形成期。全球铁矿主要沿牛轭形古陆分布。

亲铜族元素矿物以铜为代表，包括铅锌、锑汞和金。亲铜族元素在地球化学性质上多有相似，其中铅与锌和锑与汞彼此之间更相似。钼是亲硫元素，主要以硫化物和含硫盐形式存在。全球铜矿床主要集中在牛轭形古陆、环太平洋带和特提斯带上，前寒武纪和新生代是它的主要成矿期。铅锌矿的分布与铜矿的分布类似，但成矿期集中在中元古代和古生代。锑汞矿与铜矿的不同之处在于，其分布多在硅酸岩和碳酸岩中而不是如铜矿那样在褶皱带和再造发育带上。金矿的两大成矿部位（牛轭形古陆和古陆周边）和两大成矿期（太古宙至古元古代和新生代）也与铜矿的情况有相合之处。

钨钼族元素矿物除钨和钼两元素外，还包括锡。在化学性质方面它们之间的关系表现出一种过渡的特性，即钨具有亲氧性，锡既亲氧又亲硫，而钼则亲硫。它们的成矿期都主要在中生代和新生代，其成矿区都集中在环太平洋带上。有所不同的是钨矿还分布在特提斯带上，锡的成矿期可上溯到前寒武纪。

珍稀矿物包括稀有、稀土和放射性元素矿物，如锂、铍、铌、钽、锆、铪、稀土、铀、钍矿等。亲石、亲氧和富集于地壳及陆壳是它们的共性。锂、铍、铀的矿化与酸性岩结缘，铌、锆、铪、稀土和钍的矿化与碱性岩相关，而钽的矿化则与 S 型花岗岩有关。锂、铍、铀的矿化与收缩期的陆洼和海槽作用有关，而铌、钽、铪、稀土和针的矿化则与膨胀期的陆洼和陆槽作用有关。

外营力矿物包括铝、煤、石油、天然气及非金属矿物。它们实际是三类不同的矿物，只是从外营力观点考虑便于放在一起叙述。铝矿属金属矿，其矿床有风化红土型铝土矿和沉积型铝土矿两大类，前者分布在赤道附近的低纬度地区，后者分布在北半球纬度较高的地区，成矿期在古生代、中生代和新生代。煤、石油和天然气属能源矿，其时空分布有相关性。它们都是生物的遗骸，当总碳达到 80%的煤阶时石油就开始形成，而当总碳达到 90%的煤阶时有气伴生的轻质油和干气就开始形成。成煤的沼泽条件是气温和雨量两者造成的，成煤的最佳场所在中纬度地区，在温暖期向高纬度地区移动，而在寒冷期则向低纬度地区移动。石油和天然气的分布与煤大体一致，所不同的是由于成油原料之一的珊瑚集中在低纬度地区，所以石油矿多向低纬度地区集中，且由于需要造成圈闭油藏和裂谷，成油期多在易于形成它们的石炭纪以来的时期。钾盐、硼砂、溴和硝与海水进退和气候干湿冷暖有关，而磷灰石、硫铁矿、石墨、金刚石、石棉、菱美矿与地球的脉动有关，它们大体沿海槽和陆槽分布。

地史重大事件之谜

我们说打开科学谜宫的钥匙是问号，是因为科学始于问题。科学活动就是永不停息地解谜。尽管科学已经猜中了许多大自然的谜底，但还没亮出的谜底要比已猜中的多得多。

本章介绍地史上最引人注意的三大谜：大冰川之谜、生物大绝灭之谜和地磁极性倒转之谜。几十年来，有关学者进行了大量的研究，对于这些地质事件的相关因素已有所了解，但远没有一个清晰的认识。近十几年才得到发展的天文地质学在揭示这三大地史之谜方面所付出的心力非同一般，甚至可以说它的兴起就源于这些地史之谜。自 20 世纪 20 年代南斯拉夫学者米兰柯维奇（M.MlankOvich）以地球公转轨道要素解释冰期成因以来，由于在 20 世纪 60 年代对大冰期出现、古生物绝灭、古地磁极性倒转等地史事件研究的全面展开，导致天文地质学的兴起。中国学者徐道一等编著了《天文地质学概论》（1983 年）

本书既以“天地之初”为题，自然应对天文地质学的研究感兴趣。通过天文地质学的研究成果了解地史重大事件之谜，是为我们讲述宇宙故事的终章。

大冰期之谜

所谓大冰期，指地质时期中的地球表面广布冰川，气候十分寒冷的时期，只占历史 10%的时间。确定大冰期的主要依据是冰碛物和冰水沉积物，同时考虑生物组合和同位素测定结果。已知亿年间隔的大冰期有七次，即新太古代大冰期（前 26 亿～前 25 亿年）、前寒武纪早期大冰期（前 9.5 亿年前后）、前寒武纪中期大冰期（前 7.7 亿年前后）、前寒武纪晚期大冰期（前 7 亿～前 6.5 亿年）奥陶—志留纪大冰期（前 4.70 亿～前 4.10 亿年）、石炭—二叠纪大冰期（前 3.5 亿～前 2.7 亿年）、第四纪大冰期（前 0.02 亿年以来），并且大冰期之间还有小冰期。对于这些冰期虽有许多研究，特别是对第四纪冰期，但对冰期寒冷气候的成因尚不十分清楚。

主要大冰期的概况

前寒武纪晚期冰期的强度为 6 级，其沉积物分布主要相应于中、低纬度的广大地区，被区分为南沱亚冰期和长安亚冰期，以及四个冰期阶段。在北半球，冰碛物和冰水沉积物有延续 1500 公里以上者，在中国南方各省多有发现，在湘、鄂、黔、桂地区发现震旦纪冰碛物，广西北部的冰碛物厚达 3000 多米。在南半球，冰碛物的分布比北半球还要广。

石炭—二叠纪冰期的强度为 4～5 级,其遗迹多为晚石炭纪和早二叠纪期间的冰碛物，广泛分布在南美洲、非洲、印度、澳大利亚、南极洲和中国西藏等地区，相应于冈瓦那古陆地区。

第四纪冰期的强度为 3 级，其遗迹主要分布在北美洲、欧洲大陆和西伯利亚西部。这次大冰期内还存在不同级别的小冰期和小间冰期，全球范围可比的小冰期一般认为有 4～5 期，也有人认为可多达 20 期。关于这次冰期是否结束也还认识不一，一些人认为高潮已过，另一些人则认为尚处在间冰期。

这三大冰期间的间隔为 2.8～3.5 亿年左右（见图 31），遂引起研究者对冰期的周期性的特别关注。

冰期成因的探讨

关于大冰期的成因已有许多探讨，诸多探讨中所提出来的论点可归为两类：一类为天文因素，包括太阳辐射热减少、地球轨道要素变化和太阳轨道位置的变化；另一类是地球本身的因素，包括大陆上升对气候的影响、大陆漂移造成陆块地理位置的变化和大气组成的变化。这些因素中哪个是主导，诸因素又是怎样偶合的都还没弄得很清楚。近年来有关冰期成因的研究，涉及银河、太阳和地球轨道要素等天文因素者多。

关于银河的影响，所论主要涉及同太阳的银河年有关的要素，如近银心和远银心的情况、银道面物质密度不均匀、通过银河旋臂的密度波变化。有几位研究者发现第四纪大冰期和石炭—二叠纪大冰期在太阳轨道近银心点附近，而致力于太阳轨道近银心点与大冰期的对应关系的研究。结果斯台奈尔（J.Steiner）发现，在 30 亿年中的 11 个近银心点有 7 个可与已发现的 7 个大冰期对应，平均误差 0.13 亿年（见图 32）。如果这种对应是规律的。那么可预言尚未发现的 5 个冰期当分别在前 11.20 亿年、前 14.90 亿年、前 18.70 亿年、前 20.60 亿年和前 30.60 亿年前后。另一些研究者注意到前寒武纪以来的大冰期的平均间隔约 1.6 亿年，恰与银河年的一半对应，因而猜测地球冰期的形成与太阳系通过银河系的位置有关。还有的研究者注意到主要大冰期的间隔约为 2.5～3 亿年、一个大冰期延续约几百万年、小冰期延续约 5 万年，与太阳通过旋臂所需的时间（约 1 亿年）、通过大星云的时间（几百万年）、通过较小星云的时间（几万年）分别相当。

图 316 亿多年来冰期和盐类沉积的变化示意图
（据徐道一等，1983）

对地球轨道要素的变化与气候变化关系的研究首推米兰科维奇。他提出日照量与地球的三个轨道要素（轨道偏心率 e、岁差 p 和黄赤交角 ε）关系的公式，并计算了 20°、40°和 60°三个纬度的日照量曲线，发现 60 万年内的日照量所有极小值都可找到冰期对应。威廉斯（G.E.Wiliams）大胆猜测在几十亿年的地史期间 ε 可能在 0°～360°之间变化。按这种设想，通过对冰碛物分布的分析，他提出大陆和海洋冰川沉积的时空分布与黄赤交角 ε 的对应关系（见图 33）。

图 32 银河系的向银心力(CGF)在 30 亿年中变化及 7 次冰期时间分布(据徐道一等，1983 年)

A.远银心点；P.近银心点；P_r-1 表示前一个银河年，余类推

生物大绝灭之谜

根据对生物化石的统计分析，动物主要门类的科数在显生宙的变化表现出几次大量生物绝灭。大绝灭的时期有五次，即晚奥陶世、晚泥盆世、晚二

叠世、晚三叠世和晚白垩世。所谓大绝灭是指生物绝灭率突然大幅度升高，各种生物门类、大量生物属种在全球范围、短暂地质时期（100 万～300 万年）内绝灭了。这种绝灭总量具有实质意义，导致陆地与海洋生物正常分异度的陡然下跌。这种生物绝灭事件重塑了生物发展的历程，变革了原有的生物进化模式，改变了生物界的分异度和古生物地理系统的格局。

生物大绝灭的证据

在晚奥陶世、晚泥盆世、晚二叠世、晚三叠世和晚白垩世以后，科绝灭数迅速降低。下面分别介绍不同门类生物的绝灭期。造礁生物的四次绝灭发生在晚奥陶世、晚泥盆世、晚二叠世和晚白垩世。头足类有两次绝灭，一次是杆石亚纲在晚二叠世绝灭，另一次是菊花石亚纲在晚白垩世绝灭。五次大绝灭的情况也有差别，在晚奥陶世，三叶虫的 60 个科的 2/3 消失，在晚二叠世，生物总科数减量为 52%，其中海生动物 50%的科绝灭，两栖类动物 75%的科绝灭，爬行类动物 80%的科绝灭。在晚三叠世，海相无脊椎动物绝灭科数占总科数的约 10%。在晚白垩世，按种计 75%绝灭，按科计 52%绝灭，其中海洋生物的绝灭大于淡水生物。在晚白垩纪超微化石减少 98%，陆地上的爬行动物（如恐龙、鳄、蜥蜴等）大量死亡，海洋中的爬行类亦有绝灭，哺乳类有一半的属绝灭，高等植物有 1/3 绝灭。图 34 为恐龙、珊瑚、有孔虫和厚壳蛤四个动物属在中、新生代的波浪式起伏变化，它表明在白垩纪生物大量死亡。

生物大绝灭有这样一些特点：较低分类单位（科、属、种）绝灭的比重大于较高分类单位（门、纲、目），重复绝灭规模大小不等，绝灭时间尺度难于精确估计，与地球气候变化不完全同步。

有些研究者归纳了有关这些大绝灭的八个难题：历史大绝灭中全球生态系统为什么迅速瓦解？不同类别生物绝灭的起因是否相同？绝灭后的生物复苏及其生态系统重建是如何进行的？历次绝灭及复苏是渐变的还是突变的？绝灭与复苏是否存在选择性？历次绝灭与复苏是否有统一的模式？大绝灭是周期性的还是随机的？大绝灭能否预测？

图 34 动物四个重要门类的属数在中、新生代的变化
（据徐道一等，1983）

众说纷纭的追因

有关生物绝灭原因的分析，假说众多，可归结为两类：一类着重于地球环境的变化（地内成因）;另一类着重于地球外宇宙环境的变化（地外成因）。地内成因包括生物的（习性特殊化、食物营养）、气候的（区域气候变化、气温变化）、海洋的（盐度变化、海平面变化、有害金属影响）和地质的（造山影响海陆面积、火山爆发、地磁极性倒转）等。地外成因包括太阳系的（耀斑爆发、小行星撞击、彗星撞击）和银河系的（超新星爆发、高密度星云）。

几次古生物大绝灭的时限相对来说是短暂的，爆发性事件作为绝灭的起因受到许多研究者的重视。所以，超新星爆发、太阳耀斑、小行星撞击这些突发事件被讨论。

超新星爆发并非罕见，在宇宙中每年可观察到十几次，在银河系约 70 年一次，在约 1 亿年内可有一次距太阳数十光年的近距离超新星爆发。一颗超新星爆发，在数百天内释放的总能量达 10^{-47} 焦耳，辐射波长集中在（0.7～8）$\times10^{-7}$ 米，可使数十光年内的物质离化，并持续几十万年。如果在距离地球数十光年的范围内出现超新星爆发，地球上可接受到的紫外线强度可达 10^{-4} 焦耳/厘米^2·秒，比来自太阳的紫外线强几百倍。这样近距离的一颗超新星爆发，在 1 万年内其扩散壳可到达地球，使大气电离增强数倍，破坏臭氧层。臭氧层每减少 1%，紫外线透过率增强 2%。波长小于 3.1×10^{-7} 米的紫外线能破坏 DNA 而导致细胞死亡。因而近距离超新星爆发可导致生物大量死亡。

太阳耀斑在数十分钟内释放 10^{23}～10^{26} 焦耳的高额能量，8 分钟年以光速行进的 X 射线首先到达地球，稍后而来的是紫外线，然后是质子，最后是低能的带电粒子，而且，在地史上可能发生过更强的耀斑爆发，甚至强于现在的百倍。太阳耀斑爆发可使海平面来自太阳的粒子流增加约 20 倍。太阳耀斑爆发的质子事件可在高磁纬的同温层中产生大量的一氧化氮。一氧化氮可与臭氧作用形成二氧化氮而消耗臭氧。一个一氧化氮分子在其消失前可使 1000 个臭氧分子分解。臭氧层破坏导致大量紫外线无阻挡地到达地面，由于水也不是紫外线的好的屏蔽物，因而无论陆生还是水生生物都将遭受紫外线辐射的灭顶之灾，特别是在地磁极性倒转期，由于磁场屏蔽作用消失或大大减弱，因而太阳辐射直接射到地球表面。

小行星冲击地球的频数估计约为每百万年 3 次，所以在几十亿年的地质史中，碰撞频数是可观的，即使是在几千万年的尺度内也是不太低的。小行星碰撞地球的后果是，首先形成了大陨石坑，被粉碎的物质上抛可高达同温层，并且散布全球，在相当长的时期内影响气候变化、生物生长，乃至引起生物大量死亡。小行星碰撞导致大量生物死亡的原因估计主要是碰撞使地球温度增高。

地磁极性倒转之谜

近 20 多年来的研究发现，地磁极性在地史上有频繁的倒转现象，即在相对地史来说相当短的时间中，正向极性转变为反向极性。虽然每次极性延续时间长短不一，但极性所占时间比例的统计分布表明，这种极性倒转还表现为不同层次的准周期性，即数亿年的周期上叠有千万年级、百万年级、十万年级和万年级的周期，并且地磁极性倒转期间，一般有长约 1000～2000 年的时间地球处于零磁场时期。

极性倒转的发现

1906 年在法国首次发现反向磁化岩石后，法、日、英等国的古地磁研究也活跃起来。英国地球物理学家布莱克特（1897—1974）和兰康（S.K.Runc0rn)开创了运用岩石中化石磁性资料探讨古地磁场的特征和变化历史的研究。

1967 年，斯台奈尔通过对古地磁极性倒转资料的分析发现，极性倒转有周期性，石炭纪一二叠纪和第三纪—白垩纪是两个以正负性为主的时期，间

隔数亿年。1977 年，通过更详尽的研究，对显生宙以来的古地磁极性有了较多的认识，绘出了极性变化曲线（见图 35）。从图 35 中可以看出：

前寒武纪末—中寒武世	负极性为主
中寒武世—中泥盆世	正极性为主
中泥盆世—三叠纪末	负极性为主
二叠纪末—白坐纪末	正极性为主
白垩世末—至今	负极性为主

倒转的相关因素

对地磁极性倒转的原因已提出诸多猜测，如陨石冲击、地外宇宙线冲击的突然加强、太阳超级耀斑爆发、较大地外飞行天体的摄动等，都因缺少观测证据而少受关注。较为可理解的假说是斯台奈尔的“宇宙成因说”（1967 年）和蒋志（1939—）的“核—幔差异说”（1983 年）。

斯台奈尔认为，古地磁极性倒转是由于地球随太阳运动时与银河系旋臂交汇造成的。因为太阳系在银河系中的运动轨道是偏心的椭圆，偏心率 e＜0.1，周期约为 3 亿年，并且还已发现其轨道有往返于银道面两侧的位移，周期约为 2.38 亿年。因为银河系磁场在银道面上下的方向是相反的，这种情况有可能影响地球磁场，使其改变方向。他依据北半球正极性资料给出了百分比曲线。

早在 1976 年就有研究者主张,地磁极性倒转可能起因于核幔之间的交互作用，由于地幔对流等原因，使两者之间的相对位置有缓慢的变化。蒋志的“核幔差异说”认为，地球自转变化引起核幔差异运动是地球磁场赖以产生的动力来源，从而可以解释地磁极性倒转现象。影响地球自转角速度的两大因素是日月潮汐和银河拢动引力场。但蒋志认为，由于外地壳的流体性，引力扰动可能不影响地核，内核的自转角速度的变化只与潮汐摩擦项有关。基于此种认识和地磁场内部发电机模型，他导出地磁场的周期性。蒋志的理论计算除了与已发现的冰期周期对应外，还预言了万年级、千年级、百年级和十年级的周期。

三大地史之谜的相关性

由于大冰期、生物大绝灭和地磁极性倒转都有某种程度的周期性，人们试图寻找它们之间的相关关系，以便揭开这些谜的谜底。诸多研究可区分为经验上的比较和理论上的探索。

经验上的比较

迈耶尔霍夫（A.A.Meyrh0ff）对 8 亿年以来的生物绝灭、大冰期、同位素硫、蒸发岩发育之间关系进行比较（见图 36）后认为，寒武纪、泥盆纪末和二叠纪末的生物绝灭似乎与蒸发岩发育相关，而与大冰期无时期对应关系。

克莱因（I.K.Crain）把生物绝灭指数（总科数）与古地磁极性倒转速率进行了比较，发现两条曲线拟合得较好（见图 37），因而认为两者是时间相

关的。

马克西莫夫（C.MakcHMOB）通过对六种地质和地球物理过程在显生宙的旋回性发展的比较（见图 38），发现了 6 亿年来古气候变化的周期与古地磁变化周期的一致性。

中国天文地质学家徐道一在其所编著的《天文地质学概论》（1983 年）中，反复强调地质旋回周期的一致性方面的重要性，尽管还有诸多不一致的方面。

理论上的探索

在理论探索方面，中国地质学家蒋志的工作很有特色。他从地球脉动出发所进行的理论计算表明，大冰期、地磁极性倒转和生物发展阶段性的时间相关是合理的（见表 3）。

表 3 大冰期、地磁极性倒转和生物发展阶段性的时间相关关系表

时间/亿年	地球脉动	气温冷暖	地磁正反	植物	动物
0.65		大冷	反向	↑	↑
	膨胀			被子	鸟、哺乳
前 1.02		大暖	正向	↑	↑
	收缩			裸子	爬行
前 2.84		大冷	反向	↑	↑
	膨胀			孢子	脊椎
前 4.91		大暖	正向	↑	↑
	收缩			海藻	无脊椎
前 7.25		大冷	反向	↑	↑
	膨胀			多细胞	多细胞
前 10.01		大暖	正向	↑	↑
	收缩			动植分化	
前 13.41		大冷	反向	↑	
	膨胀			真核生物	
前 17.94		大暖	正向	↑	
	收缩			原核生物繁盛	
前 25.59		大冷	反向	↑	
	膨胀			原核生物	
前 35.41		大暖	正向	↑	
				原始生命	

结语———人类的终极悲剧和生命的意义

“天地之初”的故事讲完了。

这故事告诉我们，我们人类只不过是地球上亿万物种之一。而这地球在宇宙中只是微不足道的细微末节，它与其他行星一起环绕一颗并非特殊的恒星———太阳运动，而这并不特殊的太阳又在一个也并非特殊的恒星系统———银河系中运动，而这并不特殊的银河系又是作为并非特殊的星系团的一员……如此看来，我们人类必须承认自己是渺小的。但这浩瀚宇宙之中渺小生命的灵性却是伟大的。人类最主要的伟大之处就在于，以最持久不懈的努力去揭示宇宙的真面目，以懂得如何去适应这个宇宙。这就是世世代代讲述那不断翻新的宇宙故事的情由。

这样看来，我们这里所讲的“天地之初”的故事不算是完整的宇宙故事。完整的宇宙故事应包括人类本身的故事，即人类创造文化的故事。人类创造了绚烂多彩的文化，包括语言、科学、艺术、社会建制和政治建制、宗教和意识形态等各种人类生存方式的形态。文化创造是自然创序的延续，在化学序、物理序和生物序之上又增加了社会序。但具有社会序的文化本质上是反自然的，即反具有物理序和生物序的自然。

人类自诞生时起就处在自然与文化的夹缝中。自然是人类的生存条件，文化是人类的生存方式。而人类既是自然的又是文化的。就其作为自然演化的产物说是自然的，而就其作为文化的创造者说又是文化的。由于人类的这种二重性，文化的反自然必然殃及人的自然。这就是文化对人的异化，简称“文化的异化”

正如成复旺在其《中国古代的人学和美学》（1992 年）中所论证的：文化是理性的，而人的自然是感性的，所谓文化的异化，其实即理性对感性的偏离。理性作为人类对待客观的自然和社会的一种态度总是社会的，所以称之为“社会理性”。文化的异化亦即社会理性对人的感性自然之偏离。消解文化异化的途径是克服社会理性对人的感性自然的偏离。这种克服就是常说的“超越”。

处在自然和文化夹缝中的人，站在文化的立场只有两种选择，或是“超越自我”或是“超越客观”。所谓超越自我，就是自我制约人的感性自然，不是作自然的奴隶就是作社会理性的奴隶，这当然是不可取的。超越客观，改造客观自然和社会，以适合于人的感性需要，才是克服文化的异化之正道。这是一个新理性取代旧理性的理性重建的过程，而且这正是文化进化的机制。在当代的理性重建中，科学扮演着重要的角色。由于科学不断揭开大自然的谜底，为文化自然化的发展提供了根据和助力。

但处在自然和文化夹缝中的人，其一切认识都必然受生存条件和生存方式的制约。正如尼采（1844—1900）在其《权力意志》（1895 年）中所强调过的那样，既然人类是自然的偶然产物，又因偶然的生存条件而形成了一种偶然的认识方式，那么任何认识都不具有绝对的和终极的真理地位，于是就有了人类的终极悲剧。

人类既生活在这个世界上又反抗这个世界，也就是既不能超越这个世界又要超越这个世界，这就是人类的悲剧。成复旺说：“悲剧即人，人即悲剧：悲剧之外无人生，人生之外无悲剧。”然而人生的意义就在这终极悲剧之中。为了“超越”所进行的一切“反抗”都是进取的过程，是创造的过程，是壮

丽的“宇宙故事”的一幕。

怎样使自己的生活更有意义？敞开你的心扉，同沉默不语的宇宙对话；迈开你的双腿，学夸父逐日，奔向那永远不能超越的地平线。

后记

本书在写作过程中，一些资料甚至观点来自蒋志先生的《地球运动理论及其应用》（1995 年），盖保民先生的《地球演化》（1991 年），徐道一、杨宗正、张勤文、孙亦因先生的《天文地质学》（1983 年），专此致谢。还要特别申说的是，本书“人类在宇宙中的地位”和“自然地貌的演化”由北京大学田昆玉先生执笔，为封面未能题记她的姓名表示抱歉。

作者

1996.12.24.