

普通高等教育“十五”国家级规划教材

自然地理学

杨达源 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

自然地理学研究“气、水、土、生、地”组成的地理环境开放系统相关部分的物质、物质运动及其各部分之间互联、互动、正负反馈作用及其客观效应。本书把非常复杂的、人类赖以生存发展的地理环境系统,在横向上分成八大部分,在纵向上列为26章,构成符合客观实际的内容体系。每个章节的内容均引进了最新研究成果,特别注重全球环境与自然过程的分析研究,既有深度,又有广度,而且提供了进一步研究的方向、方法及可选择的途径。

本书可作为高等院校地理科学、地球科学、环境科学、土地科学、农林水利科学和工程建设各专业的教材,并可供各专业科学研究者参考。

图书在版编目(CIP)数据

自然地理学/杨达源主编. —北京:科学出版社,2006

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-03-016951-4

I. 自… II. 杨… III. 自然地理学-高等学校-教材 IV. P9

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第014466号

责任编辑:杨红 李久进/责任校对:陈丽珠

责任印制:张克忠/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年5月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年5月第一次印刷 印张:25

印数:1—3 000 字数:480 000

定价:33.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

目 录

绪论	1
----	---

第 1 部分 地球·地球环境·地球系统

第 1 章 地球环境	7
1.1 外部环境 :地球在群星之中	7
1.2 地球内部的地热流及其地理环境效应	17
1.3 地球内部的圈层结构及其地理环境效应	22
1.4 地球的重力与磁场特征及其地理环境效应	24
第 2 章 地球系统	29
2.1 地球自转运动及其地理环境效应	29
2.2 地球表层系统	31
2.3 地球表层系统的细分	34
2.4 地球表层系统是个复杂的巨系统	34

第 2 部分 地壳·地质·全球构造

第 3 章 地壳成分与地壳结构	39
3.1 地壳的物质组成	39
3.2 地壳结构特征	48
第 4 章 地质构造	52
4.1 地质构造类型	52
4.2 地质构造发育史	57
4.3 区域地质构造	59
4.4 新构造运动	62
第 5 章 全球构造体系	64
5.1 大陆漂移、海底扩张与海底地貌体系	64
5.2 板块构造与全球构造地貌	68

第 3 部分 大气·气候·全球气候变化

第 6 章 大气成分	75
------------	----

6.1	大气成分	75
6.2	大气成分的变化	77
第7章	大气运动	87
7.1	辐射平衡与能量系统	87
7.2	热力均衡	91
7.3	全球大气环流	94
7.4	区域大气环流	95
7.5	地方性大气环流	96
7.6	特殊的大气运动	97
7.7	大气降水	100
第8章	气候与环境	104
8.1	气候	104
8.2	气候带与环境	106
8.3	气候类型与环境	108
8.4	小气候	110
第9章	全球气候变化	114
9.1	全球气候变化研究	114
9.2	过去的气候变化	116
9.3	近期的气候变化	121
9.4	人类活动对气候变化的影响	126

第4部分 水·水文·水环境系统

第10章	水循环与水量平衡	131
10.1	全球水循环	131
10.2	水量平衡	133
10.3	水循环水量平衡过程	134
第11章	陆地水环境系统	136
11.1	冰雪(水)环境	136
11.2	河流水环境	139
11.3	湖泊水环境	145
11.4	地下水环境	151
第12章	海洋水环境	158
12.1	海与洋	158
12.2	海洋水物质成分与物质循环	159
12.3	海洋水的运动与能量转移	161

12.4	海洋水环境变化	167
第 13 章	水环境演化	173
13.1	“水环境”特性	173
13.2	区域水环境演化	175
13.3	河湖水环境演化	178
13.4	城市水环境演化	180
13.5	海洋水环境演化	181

第 5 部分 风化成土 · 土壤过程 · 土壤地理系统

第 14 章	风化成土	185
14.1	物理风化	185
14.2	化学风化	186
14.3	生物风化	188
14.4	风化速度	189
14.5	风化壳	192
第 15 章	土壤过程	196
15.1	新生土壤物质	196
15.2	成土过程	206
15.3	土壤退化	208
第 16 章	土壤环境	212
16.1	土壤发生层理化特征	212
16.2	土壤剖面	214
16.3	土壤与环境	216
16.4	时间进程与土壤年龄	220
16.5	人类活动与土壤过程	221
第 17 章	土壤地理	222
17.1	土壤类型	222
17.2	土壤类型的地理分布	223
17.3	土壤地理系统	235

第 6 部分 生物 · 生态 · 生态系统

第 18 章	生物群落	239
18.1	种群的基本特征	239
18.2	种群增长与种间关系	241
18.3	群落的外貌和结构	244

18.4	主要陆地群落类型	247
18.5	群落动态	250
第 19 章	生态环境	255
19.1	“生态”与“环境”	255
19.2	生态因子对生物的作用	257
19.3	生态环境的全球变化	264
第 20 章	生态系统	267
20.1	生态系统的组成与结构	267
20.2	生态系统的物质循环	271
20.3	生态系统的能量交换	277
20.4	湿地生态系统	279
20.5	河流、湖泊生态系统	284
20.6	海洋生态系统	289
20.7	全球变化的生态响应	298
第 21 章	生态修复	304
21.1	恢复生态学	304
21.2	“生态恢复”的认知	305
21.3	退化生态系统的恢复	308

第 7 部分 地貌·地貌过程·地貌体系

第 22 章	地貌发育	313
22.1	地貌发育动力	314
22.2	侵蚀(剥蚀)过程	315
第 23 章	陆地地貌系统	319
23.1	构造地貌	320
23.2	重力地貌	324
23.3	岩石地貌	329
23.4	外动力地貌	334
第 24 章	海洋地貌系统	355
24.1	海岸地貌	355
24.2	海底地貌	358
第 25 章	全球地貌体系	360
25.1	地貌形态、地貌类型与地貌系统	360
25.2	全球气候地貌系统	363
25.3	全球构造地貌系统	368

25.4 全球地貌区系·····	369
第 8 部分 自然地理环境·人与自然和谐	
第 26 章 自然地理环境·····	373
26.1 自然地理环境的构成·····	373
26.2 自然地理环境的空间结构·····	374
26.3 自然地理环境区划·····	379
26.4 自然地理环境的顺时变化·····	382
26.5 人类与自然地理环境·····	383
26.6 人与自然和谐·····	386
主要参考文献·····	387
后记·····	392

绪 论

自然地理学是研究地球表层自然环境的一门学科，其研究对象主要是人类赖以生存发展的自然环境，包括人周围由“气、水、土、生、地”的物质与物质运动，以及由“气、水、土、生、地”错综复杂的相互关系共同构成的自然环境。

自然地理学的研究为国土资源开发、城乡建设规划、减轻自然灾害、巩固国防、推动科学技术的进步、提升哲学思想、实现“人与自然和谐”等都做出了重大贡献。

自然地理学起源于古人的狩猎、放牧、采集与避免自然灾害等各种各样的迁徙活动及对自然的探索。中国有一本古书叫《周易》，可能萌于殷周之际，其《易传》的部分大致是战国或秦汉时代的作品，实际上《周易》本系八个方面（天、地、雷、风、水、火、山、泽）种种自然现象的记录、统计及其相互关系的分析。“易”含多变之意，阐述的是“刚柔相推，变在其中”的道理，并借以推测自然和社会未来的变化。

《周易》阐述了自然地理学研究的基本思路 and 技巧，即“现象实录—统计过去—预测未来”。在科学技术水平比较低下的时代，人们无法揭示各种自然现象之间除时空对应之外更多的内在联系及其原因机制，有人就错误地把时间不太长的现象记录和统计，视为永恒不变的“经典”，编成“经书”指点迷津，以至于其八卦形式被某些后人神秘地推演为不可以理喻的迷信。

许多经典著作或全部或部分，实为自然地理描述。如《尚书》中的《禹贡》篇，即用自然分区方法把全国分为九州，记述当时我国的地理情况，特别是该书的治水传说成为珍贵的古代地理记载。如《周礼》（亦称《周官》或《周官经》，可能出自战国时代）记载了当时的名山为“九州之镇山，在扬曰会稽，在荆曰衡，在雍曰华，在豫曰嵩，在兖曰岱，在青曰沂，在并曰恒，在幽曰医巫闾，在冀曰霍”。《水经》和《水经注》实为水系专著，前者载江河“百三十七”，并附《禹贡山水泽地所在》“凡六十条”，后者记载大江大河 1252 条，它所引用的书籍就多达 437 种，特别是《水经注》已有关于“川流戕改”与河道变迁研究的记载，其卷一《河水》记：“汉大司马张仲议曰：河水浊，清澄一石水，六斗泥。而民竞引河溉田，令河不通利。至三月，桃花水至则河决，以其噎不泄也。”指出了引黄河水灌溉的利弊。

明代潘季训（1521~1595 年）历时 27 年总理河道，著《两河管见》、《宸断

大工录》（在《四库全书》中改为《两河经略》与《河防一览》），陈述其治黄（河）策略为筑堤防溢，建坝减水速，以堤束水，以水攻沙，河行旧道，借黄通运（河）等。明代徐霞客（1586~1641年）一生游历名山大川，创造了“地形之分类”（丁文江，1928），而且发展了实地考察自然、系统地描述自然、对比分析、探索本质的研究方法。《资治通鉴》（北宋司马光，1019~1086年）、《天工开物》（明宋应星，1587~1667）等重要著作详述了自然地理学研究用于灾害防治、国土整治等，推动科学技术的进步，对国家建设、经济发展和社会安定起着重要的作用。中国自然地理学发展的主流是前赴后继地考察实践、总结经验、不断提高。

国外的自然地理学研究，最早是由古埃及亚历山大里亚城图书馆馆长埃拉托色尼（Eratosthenes）开始的。他把对地球的形状、大小与地球上的海陆分布等所做的探索性研究，撰写为《地理学》专著三卷。他根据埃及塞恩（Sene，即今阿斯旺城）与亚历山大里亚两地夏至日日影长度的不同，计算两地之间地面曲度及地球的周长和直径等。之后，继15世纪末期至16世纪初期的全球性地理大发现时代，在1650~1750年间地理上的测地时期，出现了定点天文测量和地理测量等，在欧洲相继问世三部代表性著作，即瓦伦纽斯（Varenius）的《地理学概论》（1650年），其中的“绝对部分”讨论了地球起源；里西奥利（Riccioli）的《地理学和水道改良论，第十二卷》（1661年），较详细地阐述了水文地理学；基尔歇尔（Ath. Kircher）的《地下世界》（1664年），不仅描述了种种自然现象，而且突出了数理地理学。

近代自然地理学基本特点是追究存在于自然界的因果关系而出现了学科的越来越细的分化。洪堡（Alexander von Humboldt）与李特尔（Karl Ritter）开创了大学地理教学并建立了多门分支学科，归纳了地理学的方法论等，使地理学有了科学的性质和系统。这时期相继在几个国家创立了地理学会，如巴黎地理学会（1821年）、柏林地理学会（1826年）和伦敦地理学会（1830年）等。中国地理学会始建于1919年。

近几十年来，自然地理学的发展动态，一是由于学科的分化而导致不断地重新讨论自然地理学的研究对象和目标，以及与分支学科之间的区别。各门分支学科均有十分明确的研究对象、方向和目标，所以发展很快，相继创新了研究技术和日趋完善的基本理论。但自然地理学本身，似乎被一点一点地抽空了，它的研究对象与研究重心似乎捉摸不定了，有的强调区域（A. Hettner, R. Hartshorne），有的强调人地关系（Vidal de Blache, J. Brunhes），前苏联的部分学者强调研究景观，还有的提出研究自然综合体或地理环境、地理圈、地理壳等。

在中国，1981年牛文元在《自然地理新论》中提出，自然地理学的研究对

象是地球上某个特定的“范围”；1985年潘树荣等在《自然地理学》（第二版）中认为，自然地理的研究对象是包括天然的和人为的自然地理环境，它是具有一定组分和结构的开放系统，分布于地球表层并构成一个地理圈；1986年，中国科学技术协会主席钱学森，在看清了“地理科学”应用现代科学技术、趋向综合化的前提下，提出地理科学研究的对象是地球表层。

新时代自然地理学最重要的变化：一是科学技术和科学理论有了显著的、越来越快的进步；二是自然地理科学知识有了广泛的社会宣传与普及，使得许多人有一定能力积极参与讨论，并对某些自然地理现象进行粗线条地分析和动态预测，尽管有可能存在偏差；三是以系统分析指路，设定理论体系；四是多学科大综合趋势；五是走进人类生活，敢于以“研究过去，预测未来”，实现“人与自然和谐”为己任。

第 1 部分 地球 · 地球环境 · 地球系统

地球的形状与大小：地球极半径 6356.78km

南极比北极半径短 42m

地球赤道半径 6378.14km，某些地方相对高出 430m

地球平均半径 6371.03km

地球表面：地球赤道圆周长 39 840km

地球表面积 $5.028 \times 10^8 \text{ km}^2$

海洋——面积 $3.524 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占地球表面约 71%

平均水深 3729m，最深点 - 11 033m

海洋水面的隆高最高 +76m

海洋水面的低洼最低 - 104m

陆地——面积 $1.484 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占地球表面约 29%

南半球陆地面积约占 17%

北半球陆地面积约占 39%

陆地平均高度 875m

陆地上的最高点珠穆朗玛峰 +8844.43m

陆地上的最低点死海水面 - 392m

地球的结构：

大气层	散逸层，约大于 800km
	热离子层，约 80~800km
	中间层，约 52~80km
	平流层，约 10~52km
	对流层，约 0~10km (极地上空 8km，赤道上空 16~18km)

地壳层平均厚度 17km，平均密度 2.8g/cm^3

地幔层平均厚度 2900km，平均密度 4.48g/cm^3

地核平均厚度 3470km，平均密度 10.7g/cm^3

地球质量： $5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$

地球平均密度： 5.52g/cm^3

地球年龄： 46×10^8 年

第1章 地球环境

地球，在宇宙空间中是一颗十分平常的星球。2004年“勇气”号与“机遇”号飞赴火星的考察与“惠更斯”号飞赴土卫六的考察，发现它们留有水或甲烷液作用的痕迹，土卫六星地貌酷似地球的地貌。宇宙中有的星球上可能真的有类似于地球上的某些生物的东西。

但是，地球在宇宙空间中又是一颗十分神奇的星球，从阿波罗（Apollo）宇宙飞行器发来的地球影像看，它是由蓝色的海洋、绿或褐色的陆地以及卷曲的白云组成的彩球。也就是说，与其他星球环境相比，地球环境已演化到一个非常神奇的且宜于人类诞生和人类生存的阶段。

2005年4月27日，俄罗斯宇航员夏利波夫在莫斯科郊外的记者招待会上说：“（在宇宙中）看到被工厂制造出的烟雾污染的地球，真是一件很令人悲伤的事情。”他还说：“到了宇宙中后，我第一次理解到我们的地球是多么容易被破坏掉。我们必须尽快致力于保护环境。”2005年7月26日升空的“发现”号航天飞机机长艾琳·柯林斯，8月4日与日本官员交谈时说，她从“发现”号上观测到地球的污染状况已非常严重，“有时候，你能够看到地球受到了怎样的侵蚀，地球上有多少森林遭到了砍伐，这种情况在世界一些地方非常普遍”，“从宇航员的观点出发，我们希望人们能够善待地球，填补上那些已经被消耗的资源”，“大气层就像是鸡蛋的蛋壳一样，非常薄”，“我们没有太多的空气，我们需要保护我们所拥有的。”

1.1 外部环境：地球在群星之中

夜空中群星闪烁，借助于哈勃望远镜还能看到更多的星星，它们组成多个庞大的星系，其中包含太阳系及其地球在内的一个星系称银河系。银河系是一个漩涡星系，与之相当的还有仙女座、大麦哲伦云、小麦哲伦云等19个星系，组成一个“本星系团”，相邻星系间的平均距离约 2000×10^4 光年（1光年等于 9.46053×10^{12} km）。银河系中大约有 $1 \times 10^{11} \sim 2 \times 10^{11}$ 颗恒星，总直径约 1×10^5 光年，圆盘的中心厚度约 2×10^4 光年。

1. 1. 1 银河系中的地球及其地理环境效应

地球随太阳在银河系中的位置 (图 1.1), 目前距银河系中心约 3.3×10^4 光年, 在银道面一侧约 26 光年处, 位于银河系的一个旋臂-猎户臂的内侧边缘。太阳系的空间规模在银河系中延伸约几百亿千米。

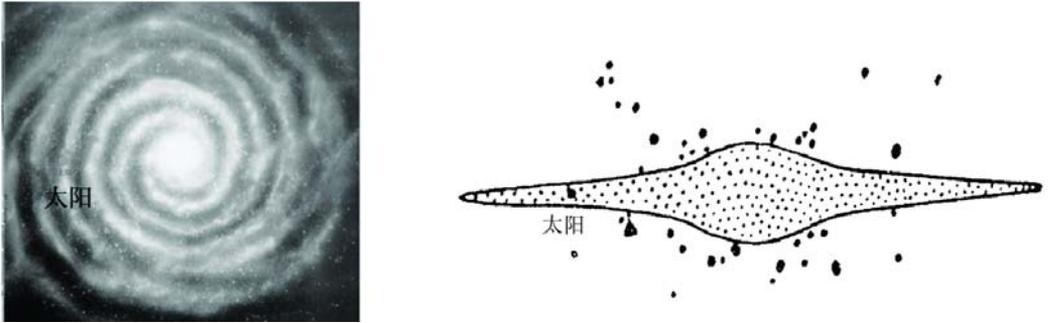


图 1.1 太阳在银河系中的位置示意图

1. 地球随太阳围绕银河系中心旋转运动

太阳绕银河系中心旋转一周约 $2.8 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8$ 年, 平均速度约 250 km/s , 轨道偏心率为 $0.07 \sim 0.10$, 它的近银点是退行的。同时, 太阳还在做追赶旋臂的相对运动, 并以 19.7 km/s 的速度向着邻近恒星武仙星座的一个点做相对运动。与太阳绕银河系中心旋转周期相当的是近 10×10^8 年以来地球表面曾发生过四次大规模的冰川作用, 每次延续数千万年之久, 最盛时期的年代分别为 $9.5 \times 10^8 \sim 9.4 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $6.2 \times 10^8 \sim 5.7 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $3.2 \times 10^8 \sim 2.6 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.1 \times 10^8 \text{ a BP}$ 至现代, 分别相当于前震旦纪一早震旦纪、前寒武纪一早寒武纪、石炭纪一二叠纪和晚新生代至今。1976 年伊尔文和普尔拉赫 (E. Irving and G. Pullaiah) 估算地磁极性最大熵谱中最显著的平均周期为 2.97×10^8 年 ($2.7 \times 10^8 \sim 3.03 \times 10^8$ 年), 似与上述大冰川作用周期较接近。有关学者认为地球上大冰川作用周期, 可能与太阳定期穿越高密度尘埃星云区有关。大冰川作用时期, 地球大气中二氧化碳的含量偏低。

2. 地球随太阳穿越银道面运动

太阳在银道面上上下下往返运动的距离约 $\pm 300 \times 10^{13} \text{ km}$, 时间周期为 0.67×10^8 年, 两次穿越银道面的时间间隔为 $(0.33 \pm 0.03) \times 10^8$ 年, 最近几次穿越银道面的具体时间为 $2.59 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $2.27 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.97 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.66 \times$

10^8 a BP、 1.35×10^8 a BP、 1.00×10^8 a BP、 0.64×10^8 a BP、 0.31×10^8 a BP。特别有意义的是地球历史上中生代以来三叠纪、侏罗纪、白垩纪、第三纪之间的分界时代 1.95×10^8 a BP、 1.37×10^8 a BP、 0.65×10^8 a BP（有的分界时代与这些数字有点差别），地球上多次多量生物灭绝的时代 2.45×10^8 a BP、 2.17×10^8 a BP、 1.93×10^8 a BP、 1.76×10^8 a BP、 1.44×10^8 a BP、 0.91×10^8 a BP、 0.65×10^8 a BP、 0.37×10^8 a BP，均与太阳多次穿越银道面的时代大致接近。另外，据1977年菲舍尔等研究 2×10^8 年以来的地表温度变化，发现低温期的时间间隔为 0.32×10^8 年；1981年阿格尔（D. V. Ager）研究中生代海面变化，发现主要的海退具有 0.3×10^8 年的周期，它们与太阳穿越银道面的时间间隔也大体相近。至于上述事件之间的相互关系，比较多的学者认为地球上的生物危机与太阳系行达银道面附近时遇陨星云而地球易遭陨星或其他天体撞击有关，有的学者还认为由于银道面附近恒星的分布比较集中，引力的异常也是导致地球上发生上列事件的原因（任振球，1990）。

3. 地球上可见流星与陨星

星际空间中较细小块体被称流星体，在它们闯入地球大气层时因摩擦而燃烧发光，才称流星。1999年8月12日，当地时间19:00，在北美见到每小时50~150颗流星燃烧着掠过天际，那是一年一度的英仙座流星雨。英仙座流星雨跟其他流星雨一样，本是彗星残骸。1999年撞入澳大利亚沙漠的一颗流星，发出“难以置信的蓝色亮光”和“蓝白色闪光”历时数分钟之久。1833年11月13日，北美见到了称为“狮子座流星群”型的流星雨，它看起来像是从狮子座中某一点辐射出来的，高空“焰火盛会”长达几小时之久。1873年11月27日一夜间有 16×10^4 颗流星划过夜空，那是因为大批彗星尘闯入地球轨道。

陨星是指质量较大的流星体在地球大气层中未完全烧毁而落到地面上的碎块。《春秋·庄公七年》记有“夜中星陨如雨”。1834年瑞典化学家柏泽里（J. Berzelius）率先对陨石进行化学分析。按化学成分，陨星分为五类即石陨星（陨石）、铁陨星（陨铁）和石铁陨星，三者的比例各约占92%、6%和2%；另外，还有冰陨星（陨冰）和玻璃陨星。美国国家航空和宇宙航行局（National Aeronautics and Space Administration）的科学家还在1998年3月22日的一块陨石里发现蓝色的岩盐晶体以及在其中漂浮的小水泡。经测定，该块陨石原本生成于 45×10^8 a BP。目前已知最大的陨铁重约60t，保存在纳米比亚。在新疆维吾尔自治区青河县境内的一块陨铁重约30t。1976年3月8日吉林地区的一场陨石雨散落范围达500km²，已收集到完整的陨石100多块，共重2t余，其中最大的一块重达1.77t。1936年美国天文学家尼宁格（H. H. Nininger）曾提出，玻璃陨星可能是巨大的陨星撞击月球时从月球表面溅射出来的碎片，然后又被地球吸引

过来的。散布在澳大利亚和东南亚的玻璃陨星形成于 70×10^4 a BP，与此同时发生了地球磁极的倒转。在中国海南岛等地称那时期的玻璃陨星为“雷公墨”。

陨星降落冲撞地面形成的坑穴称陨星坑（陨石坑）。陨星坑形状近乎圆形。地球上所见最大的陨星坑在加拿大魁北克（Quebec）清水湖处，直径 26km。化石陨星坑中最著名的是美国亚利桑那州科科尼诺的巴林杰（D. M. Barringer）陨星坑（图 1.2）、加纳的亚山蒂陨石坑以及墨西哥湾尤卡坦半岛的巨大陨星坑。巴林杰陨星坑直径 1300m，深 180m，周围缘高 30~45m，它形成于 25 000 年前。尤卡坦陨星坑的地质年代约 6500×10^4 年，恰是地球上恐龙灭绝的年代。但 2005 年有位美国学者发现，该陨星对地球的撞击比地球上恐龙灭绝的年代要早 30 万年之久，因而地球上恐龙的灭绝可能并非该陨星对地球的撞击所造成，很可能由地球上相继发生的特大规模的火山爆发所造成。月球上的环形山实际上也是陨星坑，其他行星、卫星上也有陨星坑。

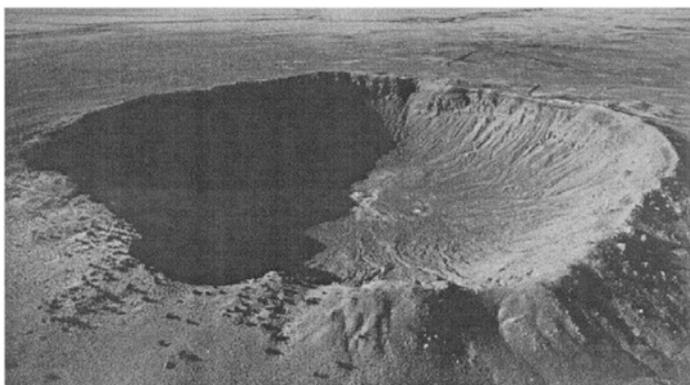


图 1.2 美国亚利桑那州巴林杰陨星坑

坠入地球大气的流星总数很大，有将近 2×10^8 颗大到足以发出人眼可见的光，此外还有几十亿颗更小的流星。借助于人造卫星上的传感或击声记录，每天大致有 3×10^3 t 流星物质进入地球大气，其中 5/6 的微流星构成地球轨道平面内的微流星尘。

1.1.2 太阳系中的地球及地理环境效应

关于太阳系的起源与演化，目前依然有多种不同的假说，即便是比较流行的现代星云说也包含有多种不同的说法。戴文赛教授发展了康德-拉普拉斯星云说关于整个太阳系是由同一原始星云形成的基本论点，并提出大约 50×10^8 a BP，宇宙中有一个总质量为今日太阳系几千倍的由气体和尘埃混合组成的星云，一方

面其各部分在万有引力作用下逐渐收缩；另一方面在其内部出现了许多湍涡流，并碎裂成许多小星云，其中的一块小星云就是太阳系的前身。当收缩到一定大小，赤道面上边缘处的惯性离心力等于中心部分对它的引力时，就会在赤道面上逐渐形成一个连续的内薄外厚的星云盘，星云盘中心的物质密度最大，星云盘物质的面密度与离星云盘中心的距离的平方成反比。星云盘内大小不等的固体微粒在运动中互相碰撞，结合成大小不同的颗粒，并在星云盘内组成“尘层”，之后又形成固态“星子”。初始星子的质量，内区为 $1 \times 10^{15} \text{ kg}$ ，外区为 $1 \times 10^{17} \text{ kg}$ 。大星子在运动中不断吸收所遇到的物质，吞并小星子，迅速长大。最大的星子成为行星胎，并进一步成长为行星；中心的大星子形成原始的太阳。

太阳系是由太阳、九大行星和它们的 60 多颗卫星、众多小行星、彗星以及大量的流星体和行星际物质组成的天体系统（图 1.3）。太阳的质量占太阳系总质量的 99% 以上，以其引力作用使太阳系中的其他成员都围绕它公转。

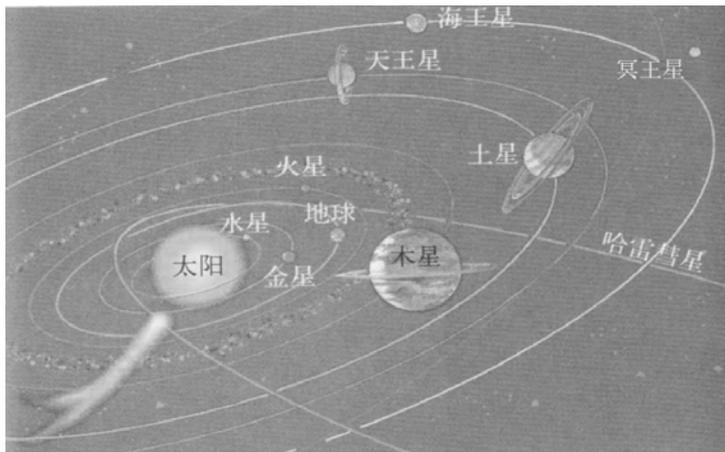


图 1.3 太阳系的组成与行星的公转运动

太阳是一个炽热的气体球，质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{ t}$ ，平均密度为 1.409 g/cm^3 ，直径约为 $139.2 \times 10^4 \text{ km}$ ，转动惯量约为 $5.7 \times 10^{53} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ ，角动量为 $1.63 \times 10^{48} \text{ g} \cdot \text{cm}^2 / \text{s}$ 。太阳球的结构，从里向外分为核心、辐射层、对流层、太阳大气等几个部分，太阳大气又可分为光球层、色球层与日冕等几个部分。太阳核心的温度高达 $1000 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上，光球层温度约为 $6000 \text{ }^\circ\text{C}$ ，色球层与日冕的温度高达几千万摄氏度。太阳在约 $46 \times 10^8 \text{ a BP}$ 由气体和尘粒物质开始积聚而从星云中形成。物质积聚，使其内部的压强和温度急剧升高，温度升高到足以发生核聚变，以至太阳最终成为一颗恒星。太阳内部的热核反应是 4 个氢原子核聚变成 1 个氦原子核，在这种聚变中会有 7% 的质量亏损，转化为光和热。估计太阳还能维持约 50×10^8 年。

太阳对地球的贡献,包括散发太阳辐射能、太阳粒子流,并以太阳引力迫使地球围绕太阳公转。

太阳每秒钟有 $6 \times 10^8 \text{ t}$ 的氢聚变为氦,其中有 $400 \times 10^4 \text{ t}$ 物质转化为能量,这就是太阳辐射能的来源。太阳的总辐射值(太阳光度)为 $3.83 \times 10^{26} \text{ J/s}$,其中到达地球的太阳能量占太阳发出的总能量的 $1/22$ 亿。就是这很小的一小部分太阳辐射能,温暖了地球表层。

太阳粒子流为自太阳的高温日冕流出的带电粒子流,也称太阳风。在地球轨道附近,太阳风的电子和质子密度大约为 8 个/cm^3 ,速度为 450 km/s ,但有时可高达 1000 km/s 。在太阳的色球层上有时会突然出现一些亮斑(耀斑),在几分钟至十几分钟内喷发出数十亿吨的带电粒子,辐射出大量的能量。太阳喷出的带电粒子流在地球轨道附近被约束在地球磁力线上,构成包裹地球的在背太阳风方向延伸较远的辐射带(J. A. Van Allen 辐射带),也称磁层,在太阳爆发的时候出现的辐射带称磁暴。另一种最常见的太阳活动是太阳黑子,实际上是太阳表面灼热气体的巨大的旋涡,内部气体的运动速度达 2000 km/s ,温度大约为 4500°C ,其亮度低于周围的光球,看上去像暗黑的斑点,直径从 1 km 以下到 $10 \times 10^4 \text{ km}$ 以上不等。太阳黑子的多少呈周期性变化,平均周期大约为 11 年。

太阳“风暴”平均每 $10 \sim 11$ 年一次,所释放的能量会对地球上的电子通信、输电及对人类的宇宙航行等有严重的影响。据 1999 年报道,美国三位天文学家观察邻近类似太阳的其他恒星,发现了 9 宗恒星爆发的“超级耀斑”个案,它将辐射和带电粒子射向太空,令环绕该恒星的行星大受影响,进而推测若太阳爆发“超级耀斑”,地球上空会到处泛起阵阵极光,电离层会瓦解,臭氧层会被毁,地球气温会迅速上升,致命的辐射和带电粒子直射地面,会令地球上几乎所有生物丧命,仅深海生物能幸免于难,似乎太阳尚未爆发过那样的超级耀斑。

太阳黑子数的周期性变化,导致地球气候也具有相应的周期性变化。另外,英国科学家还发现太阳发出的带电粒子形成的太阳磁场强度,自 1964 年以来增强了约 0.4 倍,推算自 1901 年以来增强了约 1.3 倍。太阳磁场的变动会对地球云层产生影响,从而对地球气候变化产生作用。那几位英国科学家推测,在过去的 130 年中,全球气候变暖的一半可能是由太阳磁场强度增强所产生的。从 1970 年以来,太阳活动因素对地球气候变化加剧所起作用降为只有 $1/3$ 左右,另外 $2/3$ 为人类活动的作用。

太阳对地球的引力可据牛顿创立的万有引力公式计算:

$$F = Gm \cdot m / r^2$$

式中, G 为引力常数,通用的值为 $6.6720 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{s}^2)$; m 、 m 分别为相距 r 的两质点的质量值。

太阳的质量比月球要高出 2700×10^4 倍,但日-地距比月-地距要多出大约

400倍，日-地间引力只有月-地间引力的1/6。

地球公转，即地球围绕太阳的周年旋转运动（实际上并非地心绕日心公转，而是地-月系质心绕太阳系公共质心公转），也称地球公转运动或轨道运动。地球公转轨道为一椭圆，长半径为 $1.4959 \times 10^8 \text{ km}$ ，短半径为 $1.4957 \times 10^8 \text{ km}$ ，偏心率为 0.016 722。太阳位于地球公转椭圆轨道内的一个焦点上，地球的近日距离为 $1.471 \times 10^8 \text{ km}$ ，远日距离为 $1.521 \times 10^8 \text{ km}$ ，近日点时间为每年的1月3日或4日，远日点为每年的7月2日或3日。地球公转的平均速度为 29.79 km/s，地球的绕日运动在等时间内扫过的面积相等，因而在地球近日点时公转速度最快，达 30.27 km/s，远日点时最慢，仅 29.27 km/s。因此，北半球处冬半年（自秋分至春分）的时间为 179 天，夏半年（自春分至秋分）的时间为 186 天。南半球的情况相反。

公转轨道偏心率的变化，据张家祥于 1982 年推算，其变化范围为 0.0024 ~ 0.0571；据贝格尔 (A. Berger) 于 1984 年推算，其变化范围为 0.0005 ~ 0.0607。偏心率最大的时候，地球的远日距为 $1.581 \times 10^8 \text{ km}$ ，比近日距要远 $0.171 \times 10^8 \text{ km}$ 左右，比目前的 $0.05 \times 10^8 \text{ km}$ 要大 3.4 倍左右；偏心率最小的时候，公转轨道近于正圆。贝格尔于 1984 年推算，公转轨道偏心率从最小到最大又到最小的变化准周期为 9.5×10^4 年或 10×10^4 年。据么枕生计算，目前近日点位于冬至日附近，太阳辐射强度在近日点要大于远日点 7%。因此，当偏心率增大和远日公转速度放慢、时日延长的时候，地球接收的太阳辐射总量就会有所减少，尤其是北半球夏半年的太阳辐射总量会比较多地减少，会出现连续几万年的气候变冷。

许多学者认为地球公转轨道偏心率的变化，是近百万年以来地球气候准 10×10^4 年周期性冰期间冰期交替变化的主要原因。冰期时代，高纬地带发育厚逾 3000m 的冰盖，纬向气候带均向赤道方向推移，中国东部季风气候区发展冷槽，比世界同纬度其他地区更为偏冷、偏干一些。因为引起地球公转轨道偏心率发生变化的摄动并不稳定，所以仍有可能其偏心率的变小，乃是日地距离平均增加到与远日点日地距离相近，地球接收的太阳辐射总量减少，并出现冰期。

岁差，即表现为地球自转轴的进动引起春分点在黄道上反地球公转方向的缓慢运行，而使回归年比恒星年略短的现象。春分点在黄道上运行的速度为 $50.2786' / \text{a}$ ，大约 2.58×10^4 年运行一周。近日点在黄道上顺地球公转方向移动，两者在黄道上会合所需时间为 2.17×10^4 年。目前，地球在黄道上过近日点的时间为每年的1月3日或4日，过远日点的时间为每年的7月2日或3日，上次近日点与冬至点重合的时间是公元 1250 年，近日点与夏至点重合的时间是 11ka BP 前后，下次将是公元 11 500 年前后。显然，近日点与冬至点重合或与夏至点重合，势必影响到北半球直接接收的太阳辐射量。

1.1.3 九大行星之一的地球及其地理环境效应

九大行星，是太阳系中的水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。前四颗离太阳较近的称为地球族行星（地组），共同特点是体积小、平均密度大、自转速度慢、卫星数少；后五颗离太阳较远的称为大行星（木组），共同特点是体积大、平均密度小、自转速度快、卫星数多。有些方面，如木组行星气体（氢气、氦气）含量高、密度低等，使它们更像太阳，而不同于地球族行星。若以冥王星轨道为太阳系的边界，太阳系直径为 79AU，约 $120 \times 10^8 \text{ km}$ （表 1.1）。

表 1.1 太阳系主要星体的基本参数

行星	赤道半径/km	扁率	质量 (地球=1)	密度/ (g/cm^3)	重力 (地球=1)	恒星日长	赤道对 轨道倾 斜度	绕太阳旋 转一周时 间/地 球年	卫星数	公转平均 半径/km
地组										
水星	2440	0.0	0.05	5.46	0.38	58.6d	< 10	0.241	0	58×10^6
金星	6050	0.0	0.82	5.26	0.89	243d	6	0.616	0	109×10^6
地球	6378	0.0034	1.000	5.52	1.00	23h56min	23° 27'	1.00	1	150×10^6
火星	3395	0.0052	0.11	3.96	0.38	24h37min	24° 55'	1.88	2	229×10^6
木组										
木星	71 400	0.062	317.94	1.33	2.64	9h50min	3° 4'	11.99	16	779×10^6
土星	60 000	0.108	95.18	0.70	1.17	10h14min	26° 45'	29.5	23	1427×10^6
天王星	25 900	0.01	14.63	1.24	1.03	约 24h	97° 53'	84.0	8	2871×10^6
海王星	24 750	0.026	17.22	1.66	1.50	约 23h	28° 48'	165	2	4496×10^6
冥王星	1350		0.0024	1.5		6.39d		248	1	5913×10^6
太阳	69.6×10^4		33×10^4	1.409		日面赤道自转周期 25d		表面温度 5770K, 中心温度 $1500 \times 10^4 \text{ K}$		
月球	1738.2		1/81	3.341		月地平均距离 3.844×10^5 ($3.564 \times 10^5 \sim 4.067 \times 10^5$) km, 月球公转平面不超过地球上 28° 36' N ~ 28° 36' S 区间				

九大行星都围绕太阳作同方向自西向东的轨道运动，且轨道平面都接近于太阳的赤道平面。虽然各行星公转一圈所需时间不尽相同（表 1.1），但它们的相对位置有一个平均为 178.7 年的会合周期，聚列在一个展开角度较小的范围内，过去称为“行星直列”、“九星联珠”，后来称为“九大行星会聚”（九星会聚）（任振球，1990）。严格地说，准周期 178.7 年的九星会聚，应将冥王星除外。最近几次行星会聚的时间分别是 1126 年 9 月 21 日、1304 年 10 月 21 日、1483 年 11 月 16 日、

1665年1月6日、1844年1月24日、1982年11月2日,下一次将是2163年1月21日。

九大行星之间也存在引力。格里宾和普拉格曼曾认为,当九星都在太阳的同一侧排列时,对太阳施加的潮汐力可达到最大值,会引起太阳黑子增多和爆发,较多的太阳粒子到达地球的高层大气,导致地球大气的气团异常移动,并由此改变地球自转速度和触发地震。但梅乌斯则认为,实际上不可能出现九星于太阳同一侧直列的“日心会聚”,且行星对太阳的潮汐效应极微,因此不可能发生如格里宾认为的现象。任振球提出九星的“日心会聚”多发生在1~5月,且展开角偏大,不会对地球产生多大的地理环境效应,唯九星的“地心会聚”,即地球单独位于太阳的一侧,其他行星在太阳的另一侧时,地球公转半径将增加1%,若值北半球冬季,那么该年冬半年将延长1.79天,夏半年减少1.79天,再累积几年,将导致北半球气候变冷趋势,以及地球自转速度的放慢等,并有可能出现自然灾害事件频发群发,如17世纪小冰期盛期时的自然灾害事件的群发。

据2005年7月29日欧洲航天局(European Space Agency)称,日前,被派至火星上空进行探测的火星快速探测器使用高科技照相机,拍摄到火星北极地区——广阔平原瓦斯提塔斯·伯里里斯的一个撞击坑中心,有一层水冻冰块,在撞击坑边缘和边壁上,也出现了模糊的冰块痕迹。科学家还称,这个未知名的撞击坑直径约为38.6km,深度约为2.09km。由于坑内全年的温度和大气压力变化不大,使得这一巨大圆形水冻冰块全年存在于撞击坑内而没有融化。

但是,2005年7月29日,美国的麦克·布朗等在2003年10月天文望远镜拍摄的照片上发现了太阳系的“第十大行星”,它由岩石和冰组成,距太阳约97AU,3倍于冥王星到太阳的距离,绕日周期为560年,轨道呈椭圆形,但其轨道面对黄道面倾角达44°。但有的学者认为称它为“第十大行星”为时尚早。

太阳系中的小行星是指火星与木星轨道之间的谷神星、智神星等约2400多颗小行星。本来,太阳系中各颗行星与太阳的距离是按1766年提出的提丢斯-波得定则(Titius-Boderule)排列的。按照这个定则,应在火星与木星轨道之间,即距太阳约2.8AU处还有一颗同样绕太阳运转的大行星,但始终没有发现,恰在这个空间范围内自1801年以来相继发现了谷神星、智神星等约2400多颗小行星。它们的形状不规则,绕太阳旋转的周期为1~14年左右,它们很可能曾是一颗大行星遭撞击破碎的产物。美国科学家分析哈勃天文望远镜拍摄的照片,发现名为“灶神星”的一颗微型行星可能是小行星之母。“灶神星”的直径只有531km,其上的一个陨星坑宽达459km,深约13km,估计是由其他天体撞击形成的。

1972年8月10日白天,美国加利福尼亚州上空58km处掠过一颗巨大的火球,并传出隆隆巨响,美国国家航空和宇宙航行局的空间红外探测器记录表明,

它是一颗小行星，直径约 10m，质量数千吨，当时的飞行速度为 15km/s。1908 年 6 月 30 日晨，一颗燃烧着的小行星在西伯利亚通古斯上空 8km 高处爆炸，强大的冲击波与高温大火摧毁了约 2000km² 的原始森林，并留下了 3 个直径 90~200m 的爆炸坑。

彗星有可能来自距太阳 30~100AU 的“柯伊伯带”盘状的彗星区，那儿有几亿到上百亿颗彗星，或来自距太阳几万天文单位 (AU) 的“奥尔特云”球壳状星区，那儿有上千亿颗彗星。彗星的运动轨道为非常扁的椭圆，受行近的恒星的引力摄动而改变轨道，当运行到离太阳较近时，由冰与尘埃冻结而成的彗核的表层，会蒸发成带尘的彗星大气 (彗发)，受太阳辐射作用而发出荧光，并形成上千千米长的彗尾。有的彗星与地球相逢后便一去不复返，但哈雷彗星每 76 年回归一次。到地球上来的陨星，多是彗星的碎块裂片。一颗彗星每次接近太阳，可能损失 0.5% 的质量。彗星还会发生崩溃，19 世纪的“贝拉彗”就是在天文学家眼前发生崩溃的，在它的轨道上留下了一片流星云。

1.1.4 在地-月系中的地球及其地理环境效应

卫星是围绕行星运动的天体。“惠更斯”号飞赴的土卫六是太阳系中的第二大卫星，半径 2575km。火星有 2 颗卫星，地球只有 1 个卫星即月球。

月亮最初形成于 47 亿年前，月海中最激烈的玄武岩溢流发生在 38 亿~31 亿年前，自那之后月球已基本终止演化。月球的若干参数见表 1.1，其地月质量比约为 81.3，地月平均密度比约为 1.652。通过遥测和载人或不载人的登月探测，月球表土层是几十亿年来由微陨石、宇宙线与太阳粒子轰击产生的岩石碎块屑简单堆积而成。月球重力只有地球的 1/6，没有如地球维持大气圈的重力引力。月球上缺水。所找到的月球岩石都已磁化。在月球运行接近地球时，有时发生月震。据此推测，月球可能是由太阳系的另一部分，在失去挥发元素的高温环境形成的，后来被地球捕获而成为地球的卫星。2000 年美国太空署的科学家又提出月球本是早期地球半熔融状尚未冷却的时候，遭流浪行星撞击而分裂出去的一块。

地-月系统中最为突出的是引力作用。在太阳系内，月球与其绕转的地球的质量比，高于其他卫星与其绕转的行星的质量比。月球对地球的引力要比太阳对地球的引力大一倍多，其他行星对地球的引潮力小于月球引潮力的万分之一。

在地-月系统中地球和月球均绕地-月系公共质心运动。地-月系公共质心距离地心 4.671×10^3 km，近于地球半径的 3/4。月地平均距离 3.844×10^5 km，近地距离 3.564×10^5 km，远地距离 4.067×10^5 km，朔望月周期约 29.53 天，所谓月球绕地球一周，实际上是月球绕地-月系公共质心运行一周，同时地球似偏心轮

般地绕地-月系公共质心旋转一周，所以月球始终是以其一侧面向地球的。

月球的绕行轨道比较接近各行星绕太阳运行的公转平面，不会超过地球上 $28^{\circ}36'N \sim 28^{\circ}36'S$ 的区间。月球在固定的轨道上围地球绕行，可能是地球自转运动较为稳定不摇摆的主要原因。月球的绕行加上地球自转，地-月引力导致在地球表面产生比较规则的潮波，包括海潮、湖海潮与固体潮等，并对大气环流也有一定的影响。持之以恒的海潮被认为是地质历史时期地球自转速度稳定放慢的原因。

地球与月球绕地-月系公共质心的旋转运动有以下几方面的变化：一是由于月球在旋转轨道上也有远地与近地之别，远地时地-月距离比近地时地-月距离要远约 $5.03 \times 10^4 \text{ km}$ ，相当于近地距离的 14.1%，可使地心与地-月公共质心之间的距离有 611km 的变化。它又使地球围绕地-月公共质心旋转的惯性离心力发生变化。二是月球对地球的引潮力实际上是月球的引力与地球绕地-月公共质心旋转的惯性离心力的合力。一方面由于地-月距离在变化，月球引力与地球的惯性离心力均发生变化；另一方面由于月球轨道平面斜切赤道附近的纬圈并经常发生变化，从而在地球表面产生复杂的多种月潮运动周期性变化和潮高、潮低的交替变化。三是以地-月系统绕太阳公转，真正的公转轨道是地-月系统公共质心的轨道，地心的运动轨道则时而在公转轨道以内，时而又在公转轨道之外，时而超前于地-月公共质心，时而又落后于地-月公共质心。具体为在朔时（农历初一），由于月球位在日-地之间，故地心在公转轨道之外 4671km；在望时（农历十五或十六），由于地球在日-月之间，故地心又在公转轨道以内 4671km；在上弦时它超前地-月公共质心；在下弦时又落后于地-月公共质心。也就是说，实际上，地球绕日公转的速度是变化的，自下弦至朔至上弦期间相对加快，要从落后于地-月公共质点到超前于它，所以地球公转速度要加快，超上去 9342km；自上弦至望至下弦期间则相反。自朔至望，日-地距离要增大 9342km；自望至朔又相反。

中国古人比较重视地-月系统中月球的运行对地球表面环境与生命的影响。中国先哲乐于据日月（“易”）运动的规律变化解释自然、社会、人等一切事物的存在与变化现象。阴阳学说认为月亮为群阴之本，并很早就发现了生物的朔望月周期节律和半太阴日周期节律。如《吕氏春秋》述，“月者群阴之本。月望则蚌蛤实，群阴盈。月晦则蚌蛤虚，群阴湫”。钱尚言与曹福崇曾认为“太极图”代表日-地与地-月系之综合。近代，有的学者专门研究月球朔望的不同相位变化与地球大气环流和天气现象之间的关系。

1.2 地球内部的地热流及其地理环境效应

地球本是太阳系旋涡中的一个行星，它在运动中不断吸积所遇到的宇宙物

质，并吞并许多小星子而长大。在这个漫长的过程中，伴随地球不断长大，在地球内部发生一系列的物理化学过程以及物质与能量的转换过程，从而影响地理环境并在地球内部逐渐形成趋于有序的圈层结构。

地热来自被吸收到地球上来的原始地球物质，所具有的运动能量在集聚中转化为地球所具有的热能，虽然其大部分通过热辐射又散失到宇宙空间中，但有相当部分被保留在生长中的地球上。它一方面被后来增加的微星体层掩埋，另一方面则不断地吸纳后来投落的微星体所带入的能量，特别是摩擦产生的热能和压缩增温效应所产生的热能。据普雷斯等大多数地球物理学家认为，增积和压缩作用会使新形成的行星内部平均温度增达 1000℃。接着是放射性元素的自发衰变释放热量（表 1.2），并由于导热率低而积累。虽然放射性热的生成十分缓慢，但若考虑到它是多少亿年的积累，将会引起地球内部的增热，并进入新的演化过程。

表 1.2 地球各圈层的放射性产热量 (10¹⁸ J/a)

圈层	²³⁵ U	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	合计	占总产热量的比例/%
地壳	22.6	537.1	544.2	158.8	1262.8	76.3
地幔	5.9	144.2	168.5	46.0	364.5	21.7
地核	0.8	16.7	14.6	—	32.2	2.0
合计	29.3	698.1	727.3	204.8	1659.5	100
占总产热量比例/%	1.7	41.7	44.3	12.8	100	

引自夏邦栋等，1992。

地热流是地球内部积累的热能向表面扩散。地热流值为地球岩石的导热率与地热增温率的乘积。如美国落基山某地的地热增温率为 25℃/km，岩石标本的导热率为 0.033J/(cm·s·℃)，算得该地的热流值为 8.25×10⁻⁶J/(cm²·s)，即每秒每平方厘米传热 8.25×10⁻⁶J。根据全球 5417 个热流测量数据，平均每平方厘米地面上每秒钟散热约 1.47JHU^①，它被称为平均热流值。全球每年的地热量为 10.24×10²⁰J，超过了平均全年的地震释放总能量的 1000 倍，超过了人类总消耗能量的 10 倍，超过把北美落基山脉抬高 1cm 所需能量的 1000 倍，不过与来自太阳辐射的能量相比，地热能只有它的 1/5000 左右。

实测的地热流值，于大陆上构造运动不活跃地区，如加拿大的中部和东部前寒武纪岩层出露的广大地区大约为 4.18×10⁻⁶J/(cm²·s)；在最新造山带、火山活动区即构造运动活跃地区，如阿尔卑斯或美国西部约为 8.4×10⁻⁶J/(cm²·s)。世界大洋底的平均热流值，在大洋中脊地带平均大于 8.4×10⁻⁶J/(cm²·s)。

① JHU 为热量单位，1JHU=41.868×10⁶J。

· s)，大洋盆地区平均为 $5 \times 10^{-6} \text{ J} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ，大洋边缘深海沟地带平均小于 $4.18 \times 10^{-6} \text{ J} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

由于岩石的导热率很低（表 1.3），如果单靠岩石的导热传导的话，地球内部积累的热能向表面扩散就会很慢。大洋洋底的地热流每传导 10m 大约需要 3 年，100m 厚的熔岩流大约要经 300 年才冷却，通过 400km 厚的岩石层大约需要 50×10^8 年。后者差不多已超过地球年龄了。因此，在地球内部就会有越来越多的热能的积累和地球内部越来越高的增温，并导致地球内部进入新的演化过程。

热熔即地球内部因增温而部分物质熔融（图 1.4）。

表 1.3 岩石的导热率 [$10^{-3} \text{ J} / \text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$]

岩石名称	导热率	岩石名称	导热率
花岗岩	25~38	白云岩	38~59
粗玄岩	29~33	砂岩	17~46
片麻岩（垂直于片麻理）	21~38	页岩	13~25
片麻岩（平行于片麻理）	26~46	岩盐	54~71
石英岩	29~79	含水的海洋沉积物	7~10
石灰岩	17~29		

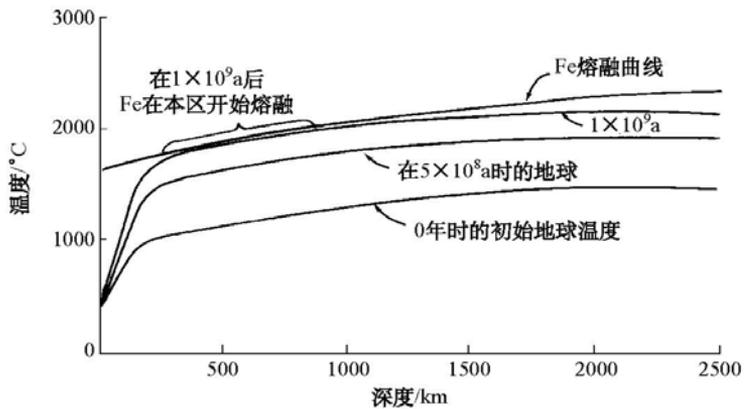


图 1.4 最初 10 亿余年地球内部的温度与部分物质的熔融（普雷斯等，1982）

地球物质的分异运动即在地球自身旋转的情况下，若干比重和密度比较大的原始地球物质就向地心方向渗聚，并挤动原处内部的其他物质向外运动，从而产生地球内部物质的对换和在地球内部逐步出现按物质比重和密度大小从里向外的分层结构。如铁是一种高丰度元素，而且比地球上其他普通元素较重一些，于是在地球内部熔融的铁元素就向地心方向渗聚，并在地心部位积聚。在这个过程中，又释放巨大的重力能，再转变为热能并积累起来，会使地球内部增温到

2000℃以上(图 1.4),并引起更多物质再熔融以及更有利于地球内部重力分异物质的翻转对流和较轻物质的上浮。

地球化学元素的分带由地球内部物质的翻转对流和按物质密度的分层所产生的地球化学元素分布的分带性特征,即原始地球物质的各种元素与化合物受其熔点、化学亲和力、密度、迁移速度等因素的控制,而在特定的地带内集储。如金、铂等重元素,对氧和硅几乎没有化学亲和力,沉向地核;镁-铁硅酸盐,不太容易熔融,而且比长石还重些,则储存在地幔层中;铀、钍等强烈地趋于形成氧化物和硅酸盐,便上浮到地壳层中聚集。分异的结果是使地球内部产生相对稳定的密度圈层结构,并使放射性产热物质集中到外层来,其后的放射性产热较易向地表传导。

地球内部温度由表及里不断升高。中国华北钻孔的测温数据:近地表小于 20℃,800m 深处 40℃,1400m 深处 60℃,5000m 深处 180℃。该地的地热增温率或地温梯度,即深度每增加 100m 的温度增加,在深度 800m 以内为 2.5℃/hm,1400m 以内为 2.86℃/hm,5000m 深度以内平均为 3.2℃/hm,相当于 32℃/km。根据地热流的观测值推算地球深部的温度,到 50km 深处大约为 980℃(表 1.4);再根据地震波传播速度变化情况推测,100km 深处约 1100~1200℃,400km 深处约 1500℃,700km 深处约 1900℃,2900km 深处约 4000℃,地球中心的温度估计为 5500℃左右。

表 1.4 地表以下流体静压力与温度的变化

深度/km	静压力 / 10 ⁸ kPa	温度 / °C
0	0	0
5	1.3	200
10	2.7	350
20	5.5	550
30	8.5	700
40	11.5	850
50	15.0	980

地球的热膨胀,即由于地球内部物质受热而其体积发生膨胀,或地球物质发生化学反应及其发生相变等而使其体积发生膨胀,地球内部物质体积的膨胀又转化为驱动力,推动周围物质发生位移,全球表层物质被向外推移即发生所谓的地球热膨胀。

过去曾有过关于地球膨胀的讨论。回顾本书关于地球内部不断增温以及关于地球热膨胀的描述,本书作者特别提出,应该把地球内部的不断增温与地球的热膨胀视为代表行星地球的演化本就有的一种自然过程,图 1.4 所示为普雷斯所描述的最初 10 亿余年地球内部的温度变化与部分物质开始熔融的过程,估计上述

过程在地球历史的中生代侏罗纪距今 2 亿余年以来仍在继续。我们早就注意到关于世界大洋洋底年龄的研究成果，以及关于超壳深大断裂的探测成果，难道占地球表面积 2/3 的洋底地壳，在 2 亿余年以来，果真全部都通过板块边缘消减带潜入地下深处而转换一新了吗？从全球大陆裂谷的发育、洋中脊的增生过程以及板块边缘消减带的实际规模来看，这期间全球大陆的漂移并没有吞噬多少洋底地壳，而地球表面新生洋底的面积却增加很多，所以两方面的差值实际上代表了 2 亿余年以来地球的继续膨胀。

地幔热对流概念最早是 20 世纪 30 年代由霍姆斯 (A. Holmes) 提出来的。大约 40 年之后，特科特和奥克斯伯 (D. L. Turcotte and E. R. Oxburgh) 结合大洋中脊地热流值高，且多火山熔岩、地势相对较高等特点，提出了上地幔中可能存在的热对流图式。大洋中脊部位是上升热柱，然后往两侧扩张，在大洋的传输过程中冷却、凝固而成为具脆性的岩石圈板块。板块边缘消减带俯冲岩石圈即下降的冷柱，向下回流，在深层被加热，再上升，在地表下几百千米形成反向流而完成对流环。对流是由轻的、热的上升柱的浮力和冷的、重的下降柱的下降力驱动的。按模式计算对流的速度与海底扩张的速率是一致的，散失到地表的热与实测热流值符合得也很好。这个可能存在于地幔中的热对流图式，后被视为热的地幔物质向上涌、冷的地幔物质反向下沉所构成的地幔对流。

岩浆活动是熔融物质侵入岩石圈层或喷出地表，前者谓岩浆侵入，后者谓火山喷发。地下深部的地热增温、岩石圈中局部的动力摩擦热熔以及局部减压造成的岩石熔融等，都能在地下深部形成岩浆源，埋在不同的深部，空间规模差别也很大，但是岩浆源的热熔作用以及热膨胀都能转化为动力，伴随地球的膨胀，触发岩浆的侵入或喷出。

热点概指地幔物质上涌的地方，在地球表面为深部岩浆喷出的地点。已被认定的热点全球共有 120 多个，多数分布在岩石圈大板块的边缘部，但以非洲-阿拉伯板块及东非裂谷两侧最为密集 (图 1.5)。热点部位地幔物质上涌，在岩石圈层中形成地幔柱，在地表出现深部岩浆上涌的火山喷发。如岩石圈板块滑移通过热点，该地点会有一系列的火山按生成时代顺序排列形成火山链或火山岛链。北太平洋上南南东向的皇帝海山链，其北北西端的海山年龄为 75×10^6 a BP，南南东端的海山年龄为 40×10^6 a BP；下接南东东向的夏威夷群岛火山岛链，在其中的中途岛火山年龄为 25×10^6 a BP，其南东东端基拉韦厄活火山，在其东南方海面以下 980m 深处还有一座正在喷发的海底活火山——洛希火山。

热力驱动是指热点部位地幔物质的上涌及其热膨胀作用，驱动两侧岩石圈板块的位移运动，实际上它还包括过去的上涌地幔物质的冷却收缩，所产生的拉裂作用。有的学者曾认为热力驱动系大陆漂移或岩石圈板块位移运动的原动力。

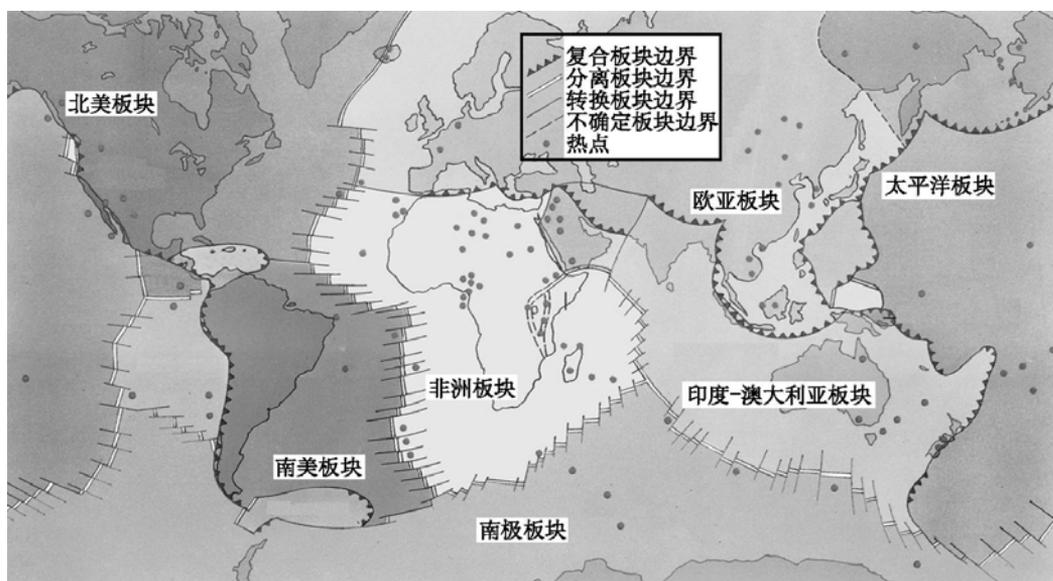


图 1.5 全球热点的分布 (Elsom, 1992)

1.3 地球内部的圈层结构及其地理环境效应

中国东汉时代的张衡利用水力转动的“浑天仪”和测定地震方位的“地动仪”，监测大范围内四面八方发生的地震活动。现代地震仪多借助于着地支架与悬锤相随运动的时间差，记录与地震波相应的地面运动，已能记下微弱到 10^{-8} cm 振幅的瞬时地面运动。与此同时，借助于地震波的若干特性，可以探测地球内部的圈层结构。

地震是地震震中部位岩石中巨大能量的骤然释放，岩石突然错断或折裂，并伴有强烈的振动以及热、声、光、电、岩石变形和永久性位移等一系列效应。从震源向外发射的地震波，按传播方式分为以下三类：一是纵波，也称推进波或 P 波。P 波在固态、液态及气态物质中均能传播，而且速度较快，在岩石中可达 $5.5\sim 7\text{km/s}$ ，它最先从震源到达震中或设置地震仪的观测地点，所以又称初始波。二是横波，也称剪切波或 S 波。S 波只能在固体中传播，而且速度较慢。P 波的传播比 S 波约快 1.7 倍，故 S 波比 P 波晚到震中或设置地震仪的观测地点，所以又称次波。P 波与 S 波穿透地球，合称体波。三是面波，又称 L 波，沿固-气、液-气的界面传播，质点的运动兼有 P 波和 S 波的特点，近乎做圆周运动，在垂直界面的方向上迅速衰减。面波，波长长，振幅大，传播速度比横波约小 1 倍，但其振幅大，能使地面建筑物遭强烈损坏。

由于地震波的传播均系质点运动，所以在质点密度与质点结合方式不同的物

质中，地震波的传播速度也有差异，P波在松散砂矿层（密度 2.0g/cm^3 左右）中的传播速度为 $0.5\sim 2\text{km/s}$ ，在砂岩页岩（密度 2.5g/cm^3 左右）中为 $1.5\sim 4.5\text{km/s}$ ，在石灰岩（密度 2.5g/cm^3 左右）中为 $3\sim 5.2\text{km/s}$ ，在白云岩中为 $4.8\sim 6\text{km/s}$ ，在花岗岩（密度 2.7g/cm^3 ）中为 $4.0\sim 6.0\text{km/s}$ ，在玄武岩浑长岩（密度 3.0g/cm^3 ）中为 $4.8\sim 6.0\text{km/s}$ ，在纯橄榄岩（密度 3.3g/cm^3 ）中为 $7.3\sim 7.8\text{km/s}$ 。

地球内部的不连续面，是利用地震波的传播特征，发现地球内部物质密度与物相的变化，继而确定地球内部的多个地震波传播的不连续界面。如内、外地核的界面、古登堡（Gutenberg）面、软流层的顶面和底面、莫霍洛维契克（Mohorovičić）面以及康拉德（Conrad）面等，并借以划分地球内部的圈层。

内、外地核的界面深度约 $4703\sim 5154\text{km}$ ，其间存在厚约 451km 的过渡层。过渡层以下的内地核，P波波速达 11.23km/s 以上，并出现由P波派生出来的S波，说明内地核是固态物质，物质密度大于 $12\sim 14\text{g/cm}^3$ 。

古登堡面是地核与地幔之间的界面，它的深度约 2900km ，S波的传播至此消失，P波的波速由 13.64km/s 骤降为 8.10km/s ，并出现P波的反射与折射，致使地面上较大跨度区域成为接收不到某个地震的P波的阴影带。

软流层的顶面和底面深度分别为 $50\sim 70\text{km}$ 与 250km 左右。在软流层厚度范围内，S波的传播速度由 4.6km/s 骤降为 $4.2\sim 4.0\text{km/s}$ ，P波的波速也由大于 8.1km/s 降为 7.8km/s ，往下又增达 8.97km/s ，所以软流层也称低速带。实验证明地震波在液态结晶混合物中速度减慢并衰减，推测软流层有 $1\%\sim 10\%$ 的物质熔融。它是原始玄武岩岩浆源，并使其上的岩石圈板块易于平移和局部向下楔入。

莫霍洛维契克面是地壳与地幔之间的界面，P波的波速由 $6\sim 7\text{km/s}$ 陡然增加到 $8\sim 8.1\text{km/s}$ 。莫霍洛维契克面的深度于海洋深处海底以下只有 5km 左右，于高山和青藏高原以下埋深达 $64\sim 70\text{km}$ 以下，平均深度 17km 左右。

康拉德面位于地壳内，表现为P波波速从 6km/s 向下增达 6.6km/s ，有的地方为突变，有的地方为渐变，海洋地壳中则没有这样的界面。

地壳位在固体地球的最表层，平均密度 2.8g/cm^3 。地壳中的康拉德面反映了大陆地壳与大洋地壳的差异以及大陆地壳的双层结构。大陆地壳的上层由花岗岩与花岗岩成分的变质岩和薄层沉积岩组成，也称硅铝层；下层由玄武岩或辉长岩组成，也称玄武岩层或硅镁层。硅铝层厚 10km 左右，硅镁层厚 20km 以上。大洋地壳只有硅镁层，平均厚度为 $7\sim 8\text{km}$ 。

地幔位在莫霍洛维契克面以下到古登堡面以上，平均厚度 2900km 。莫霍洛维契克面以下的地幔物质的密度约 $3.32\sim 3.5\text{g/cm}^3$ ，至古登堡面增达 5.66g/cm^3 ，平均 4.48g/cm^3 。大体在 400km 深度与 700km 深度为两个波速与密度的

较快变化带。地幔由超基性岩类物质组成，按相应的温度与压力实验为 55% 的橄榄石、35% 的辉石与 10% 的石榴子石的混合物，下地幔则可能含有更多的铁、镁物质。自上至下，随着温度与压力的增加，物质的相态变化也比较大。

地核位在古登堡面以下，从地下 2900km 左右到大约 4703~5154km 深度为外地核，它显然是液态物质，密度从 $9.71\text{g}/\text{cm}^3$ 向下增加到 $11.76\text{g}/\text{cm}^3$ 左右。内地核是固态物质，物质密度大于 $12\sim 14\text{g}/\text{cm}^3$ 。地核的物质组成是铁与少量镍、硫的混合物，总质量约为 $1.947\times 10^{27}\text{g}$ ，平均密度为 $10.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。

1.4 地球的重力与磁场特征及其地理环境效应

地球内部的圈层结构及其圈层之间的相对运动，决定着地球具有地心对地表物质的吸引力以及特定的地球磁性、地球磁场等特征，并对地球表面地理环境的形成及其发展变化产生重大影响，包括上文提到的地球磁力线圈对太阳粒子流的屏蔽作用，使地球表面及地球上的生命避免遭受太阳粒子的轰击。

重力，即地球核心对地球表面物体所具有的吸引力，它还受到地球自转而产生的惯性离心力等其他许多因素的细微影响。重力测量仪原理类似弹簧秤的称重。现代重力测量仪已能测到 $0.000\ 001\text{cm}/\text{s}^2$ 的重力变化。

重力测量大概始于 19 世纪中期在印度进行的一次大地测量，共有两种方法。一种方法是地面测量；另一种方法是所谓的天文测量，即观测星球位置与铅垂线之间夹角的变化，铅垂线是受地球引力作用而指向地心的重力线。两种方法测量的结果因受喜马拉雅山南约 100km 的卡利纳 (Kaliana) 与约 600km 的卡利安普 (Kalianpur) 之间距离的影响存在约 150m 的误差不能弥合。在这种情况下，有人提出了重摆受喜马拉雅山体吸引而发生偏斜的解释，但实际计算又发现由喜马拉雅山体的吸引所引起的距离误差应是 450m 而不是 150m，由此而诞生了均衡补偿理论和重力测量校正。

重力测量的自由空气校正所考虑的是与地心距离远近的差别，为此要把不同观测点和不同高度的实测重力值统一归算到海平面位置上来。重力测量的布格 (Bouguer) 校正所考虑的是观测台站与海平面位置之间岩石质量的引力效应，即扣除岩石物质所构成的地形对重力实测值影响的校正。在山地丘陵区，大约每高出海平面 1m，扣除岩石引力效应大约 0.1mGal ^①。海上重力测量要对低密度水做布格校正，增加实测重力值。

重力测量首先为论证地球形状系旋转椭球体做出了贡献：离心力的作用总使地球表面物体趋于飞离旋转体，赤道位置距地心比极地距地心距离要远，所以同

^① 伽 (Gal) 为非法定单位， $1\text{Gal} = 1\text{cm}/\text{s}^2$ 。

一物体在赤道位置的重力较小，向极地方向重力随纬度增加而增大，到极地的重力达相对最大，要增大 0.5% 左右。

根据引力计算出地球质量和地球的平均密度达 $(5.518 \pm 0.004) \text{ g/cm}^3$ ，然而地表所见岩石的密度一般只有 $2.6 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ ，极少达到 3.3 g/cm^3 。坠落到地表的石陨石的密度为 $3 \sim 3.5 \text{ g/cm}^3$ ，石铁陨石的密度为 $5.5 \sim 6 \text{ g/cm}^3$ ，铁陨石的密度为 $8 \sim 8.5 \text{ g/cm}^3$ 。所以，地球核心部分应该是具有很高密度的物质，且重力对于地球各圈层的形成、各圈层内以及各圈层之间的物质运动，也即对地球环境的形成乃至相对稳定性，起着决定性的作用。因此，有的学者认为，重力在地球环境中起着最小“公分母”的作用，包括对地球上一切生命形式也起共同的作用。

重力异常及其效应，是指实测重力值经过上述自由空气校正与布格校正之后，仍不等于按公式计算的数值，比其大者称为正异常，比其小者称为负异常。它是由较高密度物质在地球内部分布不均而引起的。艾利 (George Airy) 于 1855 年认为，上述印度北部大地测量中铅垂线偏离现象是因为高山深处岩石的密度比相同深处其他地方的岩石密度要小，这一特征被称为“山根”。这种密度上的亏损基本上补偿了山脉的附加质量。大洋盆地的正重力异常表示质量过剩，密度较大的地幔岩非常接近地表，这个特征也叫“反根”。因此，实测重力剖面线的起伏与莫霍洛维契克面的起伏基本相似，它们与地形的高低起伏似呈镜像反照 (图 1.6)。

重力均衡运动，如大陆剥蚀区不断剥蚀、地面降低，就有重力均衡运动地面回升以补偿；沉积区不断增积、地面增高，就有重力均衡运动地面沉降以补偿；大冰盖区冰盖增厚、冰体荷载，就有重力均衡运动地面沉降以补偿；大冰盖区冰体消融、减荷，就有重力均衡运动地面回升以补偿；海洋或大湖区水层增厚、水位上升，就有重力均衡运动底面沉降以补偿；海洋或大湖区水层减薄、水位下降，就有重力均衡运动底面抬升以补偿等。上述的地面载荷增减，重力均衡均能影响到岩石圈层以下软流层物质的潜移；在载荷增减与重力均衡补偿之间，一方面存在时间上的滞后，另一方面由于岩石圈层的永久性变形而造成均衡补偿升降幅值方面的损失。北欧斯堪的纳维亚地区，于 1 万余年以前冰期鼎盛时期曾发育厚逾 2000~3000m 以上的大冰盖，冰盖消融后的瑞典中西部地区，近万年来地面抬升了 200m 左右，平均速率达 5 cm/a ，目前还有 -50 mGal 剩余重力异常，估计还将继续上升 200m。北美哈德逊湾地区劳伦冰盖消融后也有类似的拱形隆起现象。

地球的磁性及地球磁场恰似在地中心置有巨大磁棒。磁极与地球的地轴交角约 11.5° ，罗盘磁针与磁力线保持一致，指向地磁北极与地理北极之间的偏离称为 (地) 磁偏角。在地球表面的磁极点，磁力线及磁针与地面相垂直；在赤道附