

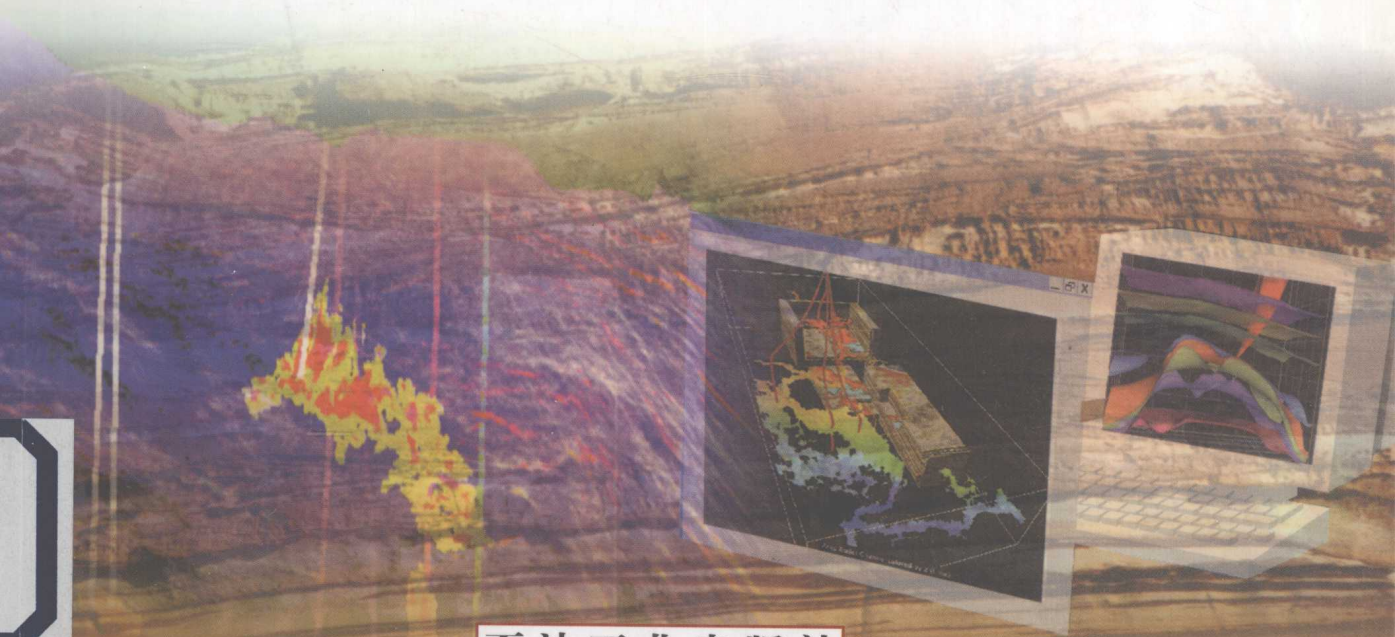


石油高等院校特色教材

地质学基础

张 琴 主编

朱筱敏 主审



石油工业出版社
Petroleum Industry Press



石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色教材

地质学基础

张 琴 主编

朱筱敏 主审

石油工业出版社

内 容 提 要

本书叙述了地质学的基本研究方法、地质作用、矿物、岩石、沉积相、古生物与地层、地质构造及石油地质基础知识。与同类教材相比,本教材加强了地质作用、岩石学、沉积相和石油地质基础知识。

本书可用作石油和地质类高等院校石油工程、地质勘查、地球探测与信息技术和地球化学等专业“普通地质学”或“地球科学概论”课程的教材,也可供其他高校、科研院所的有关专业教学及科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地质学基础/张琴主编.
北京:石油工业出版社,2008.8
石油高等院校特色教材
ISBN 978-7-5021-6673-1

- I. 地…
- II. 张…
- III. 地质学—高等学校—教材
- IV. P5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 102078 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址:www.petropub.com.cn
编辑部:(010) 64523612 发行部:(010) 64523620
经 销:全国新华书店
印 刷:中国石油报社印刷厂

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16
字数:403 千字

定价:24.00 元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

前 言

“十一五”期间，高等教育教材建设的主要目标是：按照改革创新的要求，根据不同专业类别的创新人才培养的目标和各学科、专业、课程建设的全面需求，在设计和优化课程体系、更新教学内容、推进文理渗透和学科交叉的基础上，编写、出版一批具有特色、充分适应新时期教学改革要求的内容新、水平高、实用性和适用性强的教材。本教材就是在此背景下，总结多位同行老师多年的教学经验，专为石油和地质院校非地质专业，如石油工程专业、地质勘察和信息与计算科学等专业的《普通地质学》或《地球科学概论》的本科教学编写的，也可供非地质类本科生考入地质类的研究生选修使用和广大从事地质研究的科研人员参考阅读。

本教材的编写体现了“以应用为目的，不削弱理论学习”的指导思想和编写原则，内容系统、全面，深度适宜，分量恰当；在教材的设计和编排上打破了传统的模式，以“野外露头 and 实际标本”导入，强调了学生理论与实际动手能力均衡发展，重点体现了学习技能的培养，突出了实用性和针对性。

本教材共包括十章内容，总体以岩石圈的物质组成（矿物和岩石）、地质作用和岩石圈的构造为主线，增加了与石油天然气等资源关系密切的地层学和地质年代的基本知识，并对沉积相有精而全的介绍，最后介绍了与石油工程和勘察等专业关系密切的“石油地质基础”相关知识。与同类教材相比，本教材加强了岩石学、地质作用、沉积相和石油地质基础知识。

本教材由中国石油大学（北京）张琴主编，参加编写的人员还有朱才伐、朱毅秀、宋刚、季汉成等。各章节具体分工如下：张琴主持、组织本教材的申请立项、编写大纲、分工起草及全部书稿的审查定稿，并执笔编写绪论、第一章、第二章、第三章、第七章、第九章、附录；朱毅秀编写第四章、第五章；张琴、季汉成编写第六章；朱才伐编写第八章；宋刚编写第十章。

朱筱敏教授担任本教材主审，提出了许多宝贵的意见并给予了有效的指导。本教材在编写过程中听取了普通地质学教学组许多同志的意见，参考了兄弟院校教材中的不少材料。季汉成老师和陈冬霞老师在书稿编写过程中给予了大力的指导和帮助。中国石油大学（北京）将本书作为校级教材建设项目立项，并给予了大力的支持。所有这些，对本书质量的提高均起了良好的作用，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免会有不少错误和缺点，希望使用本教材的广大师生和读者批评指正。

编者

2008年4月

目 录

绪论	1
第一节 地质学的研究对象、内容及分科	1
第二节 地质学的主要特点	1
第三节 地质学的研究方法	2
第四节 地质学在现代经济建设中的作用	3
第一章 地球概述	4
第一节 地球的物理性质	5
第二节 地球的圈层特征	8
第三节 岩石圈	14
第二章 地质作用	18
第一节 内动力地质作用	18
第二节 外动力地质作用	26
第三章 矿物	43
第一节 矿物的基本特征	43
第二节 矿物的分类及主要类型	50
第四章 岩浆岩	56
第一节 岩浆岩的基本特征与分类	56
第二节 岩浆岩的主要类型	64
第五章 变质岩	69
第一节 变质岩的基本特征与分类	69
第二节 变质岩的主要类型	76
第六章 沉积岩	81
第一节 沉积岩的概念及分类	81
第二节 碎屑岩	83
第三节 火山碎屑岩	108
第四节 碳酸盐岩	112
第七章 沉积相	126
第一节 沉积相的概念及分类	126
第二节 陆相组沉积相	127
第三节 海相组沉积相	140
第四节 海陆过渡相组沉积相	146
第五节 碳酸盐岩沉积相	158
第八章 古生物与地层	169
第一节 古生物学基础	169
第二节 地层学基础	177

第三节 地质年代与地层系统·····	180
第九章 构造地质 ·····	186
第一节 岩层及其产状·····	186
第二节 褶皱构造·····	189
第三节 断裂构造·····	193
第四节 大地构造简介·····	203
第十章 石油地质基础 ·····	209
第一节 石油与天然气的性质·····	209
第二节 石油与天然气的生成·····	213
第三节 生油岩、储集层、盖层·····	216
第四节 油气运移·····	220
第五节 油气藏的形成·····	222
第六节 油气资源分布·····	231
附录 地质学基础实验指导 ·····	239
实验一 矿物·····	239
实验二 岩浆岩·····	239
实验三 变质岩·····	240
实验四 沉积岩·····	241
实验五 岩石学综合实验·····	242
实验六 古生物·····	242
参考文献 ·····	244

绪 论

第一节 地质学的研究对象、内容及分科

地球科学是以整体的地球系统作为研究对象的科学。所谓地球系统，是指由固体地球、大气圈、水圈和生物圈构成的一个复杂的开放系统。目前，由于探测的深度有限，地球科学研究的对象主要局限于地球的表层，即大气圈、水圈、生物圈和岩石圈。地球科学是六大基础自然科学（数、理、化、天、地、生）之一，是一个以多学科知识为基础的庞大超级学科。它的分支包括地质学、地理学、气象学、海洋学、土壤学、地球物理学等等。其中地质学由于其研究领域广博，分支学科较多，并以研究地球的本质特征为目的，因而成为地球科学的主要组成部分。

地质学作为地球科学的一个重要分支，是以研究地球的岩石圈为主要研究对象的科学。

随着生产的发展和科学的进步，地质学广泛运用近代物理、数学、化学、天文学、地理学、生物学及生物地球化学等自然学科的理论及现代科学技术手段，针对不同的任务和内容进行研究，而且研究的内容越来越广泛和深入，并随之出现了很多分支学科。地质学的主要研究内容和对应的分支学科如下：

(1) 研究岩石圈的物质组成，如元素、矿物、岩石和矿产的特征、形成条件和分布规律。对应的分支学科包括矿物学、结晶学、岩石学及地球化学等等。

(2) 研究局部地区、大陆以至整个岩石圈和地球的发展及演化史。对应的分支学科包括地史学、古生物学、地层学、同位素年代学、古气候学、古地理学、第四纪地质学等等。

(3) 研究区域地质构造、岩石圈的结构和运动规律等。对应的分支学科包括动力地质学、地球动力学、构造地质学、区域构造学、大地构造学、地震地质学、板块构造学、构造物理学、地质力学等等。

(4) 研究地质学的应用问题。对应的分支学科包括矿床学、石油地质学、煤田地质学、水文地质学、环境地质学、工程地质学、探矿工程学、灾害地质学等等。

(5) 研究地球矿产资源勘探的理论和方法。对应的分支学科包括地质制图学、地震勘探原理、地球物理勘探、地球化学勘探、矿产调查与勘探、油气田开发地质学等等。

第二节 地质学的主要特点

一、时间的漫长性

时间的漫长性有两种含义：一是指地质现象的形成过程比较缓慢；二是指地质事件发生的时间比较久远。据科学测算，地球的年龄长达 46 亿年。在这漫长的时间里，地球上曾发生过许多重要的自然事件，如岩石形成、海陆变迁、山脉隆起、海底扩张、生物进化、油气田的形成等，这些事件的发生过程多数是极其缓慢的，往往要经过数百万年甚至数千万年的

时间才能完成，短暂的人生很难目睹这些事件发生的全过程。因此，地质学中一般以百万年(Ma)为单位来计算时间：如喜马拉雅山山脉从海底隆起至今约有25Ma；大西洋的形成至今约200Ma；恐龙的灭绝发生在65Ma前。有些地质作用看起来其表现时间很短，如地震、火山爆发等，但其能量骤然释放之前能量的聚集则需很长的时间。因此，许多地质作用和地质过程是很难详细观察的，也很难在实验室中再现。

二、空间的广泛性

地质学的研究对象在横向上可以达几至几万千米，甚至达几十万千米，地质现象分布于每一高山、平原、海洋、沙漠、戈壁、冰川和雪原，同时带有强烈的地区特色。一些地质系统非常之大，难以在实验室内复制，如火山、大陆、海洋等。地质学的研究对象在纵向上可以达几十千米，地质现象发生在地表和地下深处的每一角落。所以，地质学的研究对象体现了空间广泛性的特点。

三、地质现象的复杂性

一种地质产物往往是多种因素、多种作用综合影响的结果，变量多，常常是“多元一次方程”，如海平面的变化、石油的形成等等。因此，地质结论常常是概率性的，而不是确定性的。同时，各种地质现象的形成因素非常复杂，从性质上，包括物理的、化学的、生物的；从规模上，大到全球乃至太阳系的宏观现象，小至原子和离子的微观过程。另外，地质学涉及生物、气象、天文、地理等一系列学科，知识领域极其广阔。

第三节 地质学的研究方法

一、建立认识地质事件的时空观

鉴于地质过程的漫长性，地质事件的演化过程不可能用人文史的年、月、日来计量，而通常用百万年(Ma)来计量。地质学研究的对象从地球整体到大洋、大陆，从山系、盆地的地质构造到矿物、岩石标本以及化石的内部结构，从地球卫星照片的观察利用到电子显微镜观察，其尺度变化很大。因此，讨论问题必须确定研究对象的尺度，不能主次混淆。

二、掌握辩证的思维方法

研究地质问题必须有全局观念、发展变化的观念以及由表及里的研究方法。要真正认识某一地质产物，必须了解它是在哪一个地质时代形成的，是在什么样的条件(古气候、古地理、温度、压力)下形成的，哪种因素占主导地位等等。

三、实践出真知

地质学是实践性非常强的一门学科。早期的地质工作者凭着简单的工具“地质三件宝”：铁锤、放大镜、罗盘，对地表出露的矿物、岩石和地质现象仔细观察、测绘，并通过室内鉴定和综合分析，总结出规律性的认识。虽说现代科学已高度发展，地质领域的高、精、尖仪器大量发展了，但对大学生来说，带着“地质三件宝”到野外现场识别矿物、岩石、地层、构造和多种地质现象仍然是理解和掌握地质学基本原理和基础知识的重要方法和手段。

四、历史比较法

历史比较法最早是由英国地质学家 C. Lyell (1797—1875) 提出来的, 又叫“将今论古”和“现实主义原则”, 是指通过各种地质事件遗留下来的地质现象与结果, 利用现今地质作用的规律, 反推古代地质事件发生的条件、过程及其特点。

五、实验和模拟

实验和模拟是指将野外采集的矿物、岩石、古生物、矿产以及其他各种分析化验样品进行室内鉴定、测试, 了解它们的形成、特征及控制因素, 近似地模拟某些地质构造的形成和发展演化历史, 再现地质作用的过程, 它是地质学非常重要和应用较广的一种研究方法。

第四节 地质学在现代经济建设中的作用

首先, 地质学在矿产资源的勘探与开发方面具有重要作用。随着现代经济建设的高度发展, 人类对矿产资源和能源的需求越来越多。人类要大量地获得地下地质资源, 就必须了解地质情况, 运用恰当的勘探方法。因此, 地质工作是国民经济各部门发展的“尖兵”和“参谋”。

其次, 地质学在工程建设方面有重要作用。现代化的工业、农业、交通等方面的建设, 都对建筑基地和地质环境提出了越来越高的要求, 需要进行地质勘察工作, 查明地下地质构造, 了解地壳的稳定性, 克服地质环境对各类工程建筑的不利影响。

第三, 地质学在保护和改善环境方面有重要作用。人们在勘探、开发和利用地质资源的同时, 已严重地破坏了生态环境的平衡; 反过来, 环境对人类活动的反作用也日益成为影响人类安危的重大课题。这就需要人们不断探索和寻找更加合理的方法来开发和利用资源, 以保护和改善我们的环境。

第四, 地质学在减少和预防地质灾害方面有重要作用。地震、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害给人类造成了极大的生命与财产损失, 严重影响了社会经济的发展。正确认识它们的本质、成因及灾变的演化规律性, 可为制定减灾对策、采取相应措施等提供重要的参考依据, 这也是地质科学研究的重要内容之一。

第一章 地球概述

地球是太阳系中的八大行星（水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星）之一（2006年8月24日，国际天文学联合会大会通过决议，把备受争议的冥王星“开除”出太阳系行星行列，这样太阳系的行星数目就只剩下了八颗），是目前发现的太阳系中唯一既有浓密大气和大量液态水，又有生命存在的行星（图1-1）。

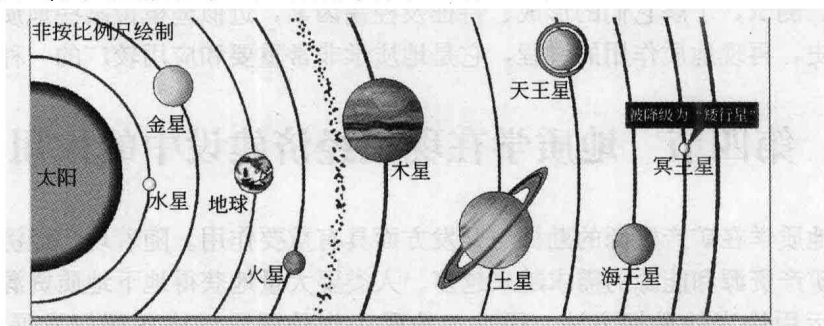


图 1-1 太阳系中的八大行星分布示意图

关于地球的起源有几种不同的看法，如星云假说（德国康德，1755；法国拉普拉斯，1796）、潮汐假说（吉恩兹，1916）、俘获假说（施密特，1946）。目前流行的看法是大约在46亿年前从太阳星云中分化出的原始地球逐渐演化而成的，即星云假说。

根据人造卫星轨道参数分析测算所得出的地球真实形状为北极略凸、南极略凹的极近似于旋转椭球体的星体（图1-2）。北极比旋转椭球体凸出约10m，南极凹进约30m。中纬度在北半球稍凹进，而在南半球稍凸出（不到10m）。据此可以推论，地球极近似于旋转椭球体，这是地球自转所致，表明它具有弹性；地球不是严格的旋转椭球体，表明其内部物质分布不均匀。

1980年，国际大地测量和地球物理联合会修订和公布的关于地球大小的主要数据如表1-1所示。

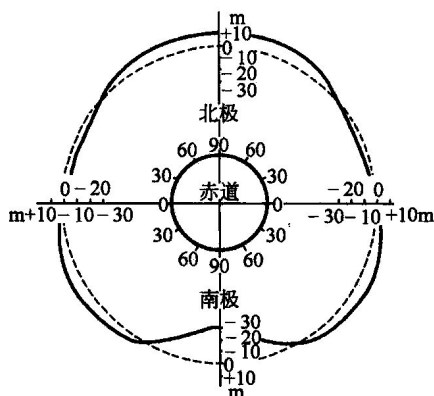


图 1-2 地球的形状示意图

（据 D. G. King-Hele 等，1969）

实线为大地水准面圈闭的形状（比例夸大）；
虚线为地理理想扁球体

表 1-1 表征地球大小的参数

地球大小参数	数值
赤道半径 (a), km	6378.137
两极半径 (c), km	6356.752
平均半径 [$R = (a^2c)^{1/3}$], km	6371.012
扁率 [$(a-c)/a$]	1/298.253
赤道周长 ($2\pi a$), km	40075.7
子午线周长 ($2\pi c$), km	40008.08
表面积 ($4\pi R^2$), km ²	5.101×10^8
体积 ($4/3\pi R^3$), km ³	1.0832×10^{12}
质量 (m), kg	$(5.9742 \pm 0.0006) \times 10^{24}$

第一节 地球的物理性质

固体地球的主要物理性质包括它的质量和密度、重力、压力、温度、磁性、弹性和塑性。

一、地球的质量和密度

根据牛顿万有引力定律计算出地球的质量为 $(5.9742 \pm 0.0006) \times 10^{24} \text{ kg}$ (IUGG^①, 1980), 地球的平均密度为 5.516 g/cm^3 。但在地表出露的岩石中, 砂岩、页岩和石灰岩等沉积岩的平均密度为 2.6 g/cm^3 , 花岗岩的密度为 2.67 g/cm^3 , 玄武岩的密度为 2.85 g/cm^3 , 都远小于地球的平均密度。由此可以推断, 地球内部大部分物质的密度应大于地球的平均密度。

目前世界上最深的钻井仅达 12km, 因此地球内部更深处的密度只能根据地震波速、地内重力和转动惯量等来推算。推算结果认为, 地球内部的密度是随深度不断增大的, 但不是均匀增加的, 而是存在几个明显变化的界面: 在 670km 处, 从 3.99 g/cm^3 跃至 4.39 g/cm^3 ; 在 2891km 处, 从 5.57 g/cm^3 跃至 9.90 g/cm^3 ; 在 5150km 处, 从 12.17 g/cm^3 跃至 12.75 g/cm^3 (图 1-3)。这些变化反映出地球内部物质具有圈层特征, 也反映地球内部物质成分和存在状态的变化。

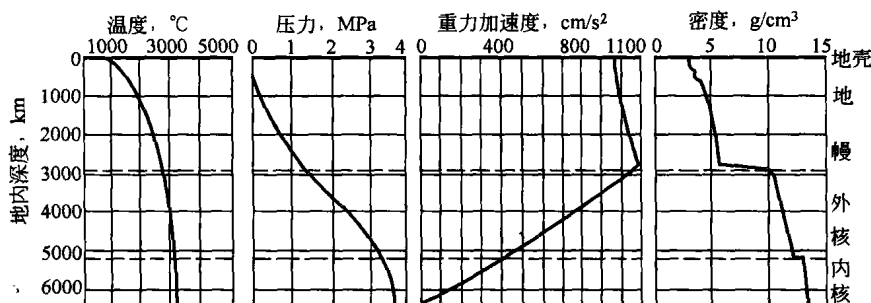


图 1-3 地球内部物理性质垂直分布图

(据叶俊林, 1996)

二、地球的重力

地球上某处的重力是该处所受地心引力与地球自转离心力 (垂直地面分力) 的合力。

地球表面的重力随纬度值的增大而增大。重力加速度在赤道处为 978.0318 cm/s^2 , 在两极处为 983.2177 cm/s^2 。此外, 重力还随海拔高度增加而减小, 海拔每升高 1km, 重力加速度值减少 31 cm/s^2 。

在地球内部, 重力加速度随深度的增加而缓慢增大, 到 2891km 深处, 重力加速度达到极大值 1068 cm/s^2 。2891km 以下, 重力加速度急剧减小, 地心的重力加速度为零, 重力也为零 (图 1-3)。

① 国际大地测量与地球物理学联合会 (the International Union of Geodesy and Geophysics) 的简写。

假定地球为一均质体，以海平面为基准计算得出的地面重力为标准重力值，上述的赤道和两极的重力均为标准重力。重力的标准值（理论值）随纬度而不同，计算公式为：

$$g=978.0318 \times (1+0.0053024\sin^2\Phi-0.0000059\sin^22\Phi) \quad (1-1)$$

式中 g ——重力加速度， cm/s^2 ；

Φ ——纬度。

实际上，由于地面起伏甚大，加之地球物质密度分布不均和结构的差异等因素，会使实测值和理论值不一致，这种现象称为重力异常（gravity anomaly）。实测值经过高程和地形校正以后，如果比理论值大称为正异常；比理论值小称为负异常。重力异常一般和地下物质的密度大小有关。存在一些密度较大物质的地区，如铁、铜、铅等金属矿区，常表现为正异常；而存在一些密度较小物质的地区，如石油、煤、盐类以及地下水等，常表现为负异常。重力勘探就是利用这个原理，通过寻找地壳中局部重力异常区的办法，来找矿和了解地下地质构造的。

三、地球的压力

地球内部某处的压力是指由上覆地球物质的重量所产生的静压力。静压力的大小与所处的深度、上覆物质的平均密度及平均重力加速度成正相关，其计算公式为：

$$p=\rho hg \quad (1-2)$$

式中 p ——静压力， 10^5Pa ；

h ——深度， m ；

ρ ——上覆物质的密度， g/cm^3 ；

g ——重力加速度， m/s^2 。

由于地球内部物质的密度并不是随深度的增加而均匀增加的，因而压力与深度的关系大致为一条曲线（图 1-3），地球内部的压力总体随深度增加而增大。

四、地球的温度

火山喷发、温泉和深矿井温度增高等现象都表明地球内部是热的。自地面向地下深处，地温是不均匀增加的（图 1-3）。通过多种间接方法测算，地下 100km 处的温度为 1300℃；1000km 处的温度为 2000℃；2891km 处的温度为 2700℃；地心的温度高于 3200℃，有的学者推断，可能高于 4000~5000℃。从地面向地内深处可以分为外热层、常温层和内热层三层。

（一）外热层（变温层）

外热层处于固体地球的最表层，主要受太阳光辐射热的影响，其温度随季节、昼夜的变化而变化，故又称为变温层。外热层年变化影响的深度在一般为 10~20m，内陆或沙漠地区可达 30~40m；日变化影响深度较小，一般仅 1~1.5m。由于组成地表的岩石或土层热导率小，温度向下迅速减低。到一定深度，温度变化开始不明显，而且趋于与常年平均温度一致，此处即为外热层的下界。

（二）常温层（恒温层）

在太阳热能所能影响的深度以下，存在一个地温常年保持不变的带，与当地的年平均温度大致相当，不受季节变化的影响，这个带称为常温层或恒温层，其深度大致 20~40m，—

般在中纬度及内陆区位置较深，在海滨及高纬度地区位置较浅。

(三) 增温层 (内热层)

在常温层以下，地温随深度增大而增加，不受太阳辐射热的影响，而且不同地区差异较大。目前通常用地温梯度 (geothermal gradient) (地热增温率) 来计量地温的增加。地温梯度指在内热层里，深度每增加 100m 所升高的温度数值，其单位为 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。一般为 $0.9\sim 5.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，平均为 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。如我国华北平原的地温梯度为 $2\sim 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，安徽庐江一带则为 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

地温梯度的高低与热源及岩石热导率等条件有关。若地下存在较高的热源，离热源较近，如火山地震区和年轻山区，地温梯度较高。地温梯度在不同深度也不同：在地表至地球内部 70km 范围内，地温梯度平均为 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ；再往深部地温梯度逐渐变小，一般为 $0.5\sim 1.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

五、地球的磁性

地球是一个磁化的球体，地磁场近似磁偶极子的磁场 (图 1-4)，它具有两个地磁极 (偶极子磁轴与地面的交点)。地磁场的南北极和地理两极并不一致，两者相差 1280km。这是因为地磁轴和地球自转轴有 11.5° 交角。地磁极的位置是不固定的，它逐年发生一定的变化。

地磁场由磁偏角 (D)、磁倾角 (I) 和磁场强度 (F) 三个地磁要素来表示 (图 1-5)。在地球表面，通过两个地理极的大圆或经线称为地理子午线；通过两磁极的磁力线称为地磁子午线。地磁子午线与地理子午线之间的交角称为磁偏角 (D)。正是由于磁偏角的存在，磁针所指不是地理南北，而是地磁南北。所以当使用地质罗盘在地形图上定方位时，需要对地质罗盘进行磁偏角校正，从而得到地理方位，以指北针为准，指北针偏在经线东边的叫东偏角，符号为正 (+)；指北针偏在经线西边的叫西偏角，符号为负 (-)。不同地区的磁偏角不一样，故磁偏角校正要因地制宜。磁针与水平面之间的夹角称为磁倾角 (I)，以指北针为准，下倾者为正 (在北半球)，上仰者为负 (在南半球)。在赤道附近，磁针水平，磁倾角为 0；纬度越高，磁倾角越大；在磁极上，磁针竖立，磁倾角为 90° 。磁场中磁力的大小称为磁场强度 (F)，其单位为 A/m 。它是矢量，可分解为水平分量 (H) 和竖向分量 (Z)。地面上每一点都可以从理论上计算出它的磁偏角和磁倾角。

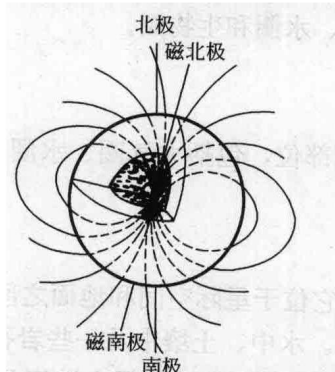


图 1-4 地球的偶极场示意图
(据叶俊林, 1996)

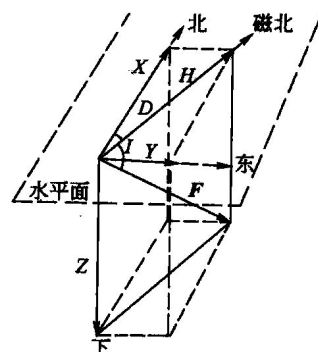


图 1-5 地磁要素示意图
(据叶俊林, 1996)

F —总地磁场强度； H —水平分量； Z —竖向分量；
 D —磁偏角； I —磁倾角； X —北向分量； Y —东向分量

地磁场的变化具体表现为地磁要素的变化。通过设在各地的地磁台所测的地磁要素数据，可以推算出世界各地的基本地磁数据，作为地磁场的“正常值”。在实际测定时，如果所测的地磁要素数据与“正常值”偏离称为地磁异常。地磁正异常一般是由于地下赋存高磁性矿物或岩石，如磁铁矿、镍矿、超基性岩等；地磁负异常多是由于地下赋存金矿、铜矿、盐矿、石油、花岗岩等低磁性或反磁性的矿物和岩石。磁法勘探就是利用这个原理寻找磁力异常区，勘探有用矿物的。

古地磁是指地质历史时期的地磁场。岩石在其形成过程中因受古地磁场的影响而获得磁性，这种磁性与古地磁场方向是协调的，这些受磁化的岩石在磁场发生改变后仍可将原来磁化的性质部分地保留下来，形成所谓的“剩余磁性”。测量岩石中的“剩余磁性”可以帮助了解地质历史时期的地磁场情况，如古地磁极的位置和当时古地磁场的特征。

六、地球的弹性及塑性

地球具有弹性，表现在能传播地震波，因为地震波是弹性波；另外，用精密仪器可观测到地球固体表层在日月引力下也有潮汐现象，就像地表海水在日月引力下所发生的潮汐现象一样，地面升降幅度可达7~15cm，称为固体潮。这也说明固体地球具有弹性。

固体地球具有塑性，表现在地球在自转作用下呈一个近似旋转椭球体；另外，岩石受力的下发生剧烈而复杂的弯曲（如褶皱构造）却没有断裂开，也是典型的塑性表现。

固体地球的弹性和塑性在不同条件下可以转化：在作用速度快、持续时间短的力（如地震波、潮汐力）的条件下，地球表现为弹性体；在作用缓慢、持续时间长的力（如地球旋转力、重力）的条件下，则表现为塑性体。这种条件是相对的，与地球物质的松弛时间有关。固体从弹性变形完全转变为塑性变形所需的时间叫松弛时间。地球物质受到作用力时，如果作用力时间比该物质的松弛时间短，则表现为弹性；如果作用力时间比该物质的松弛时间长，则表现为塑性。

第二节 地球的圈层特征

地球并非是一个均质体，而是具有层圈构造的，以地表为界可以分为内部圈层和外部圈层。内部圈层指固体地球部分，外部圈层则包括大气圈、水圈和生物圈。

一、地球的外部圈层

地球的外部圈层包括从地表以上到地球大气的边界部位，包括大气圈、水圈及生物圈。它们包围地球，各自形成连续完整的圈层。

（一）大气圈

大气圈（atmosphere）是地球最外面的一个圈层，它位于星际空间和地面之间，由包围在固体地球外面的大气层构成，厚度可达几万千米以上。水中、土壤中及一些岩石中也含有少量空气，但其深度一般不超过4km。大气圈没有明显的物理上界，据人造卫星观测，在赤道上方4200km处和两极上方2800km处仍有大气存在的迹象。

大气圈总质量估计为 5.136×10^{15} t，占地球总质量的千万分之九。由于地球的引力作用，大气质量的97%主要集中在底部小于29km的范围内，其中3/4又集中于10km以下的

高度范围内。因此，越接近地面，大气的密度越大。大气的密度和压力与距地面的高度成反比。大气的温度也随高度的增加而降低。

大气圈的主要成分为氮气 (N₂) 和氧气 (O₂)，其中氮气占大气总体积的 78.09%，氧气占 20.95%。其次，有氩气 (Ar, 占 0.93%)、二氧化碳 (CO₂, 占 0.03%)，另外，还含有少量臭氧 (O₃)、水蒸气和气溶胶质粒子。水蒸气在大气中的含量随温度和高度的不同而发生变化。在海平面附近的湿热大气中，水蒸气含量可达 2%；但在 5km 高空以上的大气中几乎不含水蒸气。

根据大气中温度和密度随高度垂直分布的特点，自下而上可将大气圈划分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层 (图 1-6)。

1. 对流层

对流层是大气圈的最底层，从地面起到温度下降到最低处，其高度在赤道为 18km，两极为 9km，中纬度为 10.5km。对流层的厚度随纬度、季节等条件而变化，在赤道最厚，两极最薄；随夏季升温而增厚，冬季降温而减薄。受地心引力的影响，对流层的密度最大，其质量占大气圈总量的 79.5%，水蒸气几乎全分布在对流层。由于温度主要来自地面反射回来的太阳辐射热，所以近地面的温度高，气温随高度上升而递减，平均每升高 1km，气温下降 6℃，称为大气降温率。按此规律，对流层顶部气温可降至 -53℃ (两极上空) 及 -83℃ (赤道上空)。气温、气压和气体密度在不同高度、不同纬度具有一定差异，因而形成空气的对流。对流表现为底层的热空气可因密度较小而上浮；高层冷空气可因密度增大而下沉，产生大气的上、下对流；由于地表各处的温度有明显的差异，又可产生横向对流。空气的对流是引起风、云、雷、电、雨、雪等气象现象的重要原因。对流层对人类与生物影响最大，是大气科研的重点研究对象。

2. 平流层

从对流层顶到 35~55km 高度的范围内为平流层，其厚度在赤道小于两极。尽管厚度是对流层的两倍，但质量却只占大气圈总质量的 20%，空气较为稀薄。平流层的大气下重上轻，只能随地球自转产生的温差而进行水平流动，故平流层最显著的特点是气流的运动以水平方向为主，所以平流层是超音速飞机飞行的理想层，也是卫星、航天器载入大气时计算表面加热的重要资料。平流层基本不含水蒸气和尘埃物质，不存在对流层中的各种天气现象。

平流层的气温受地面影响很小，下层气温随高度增加变化极小，25km 高度以上由于 O₃ 含量明显增多，气温随高度上升而增加，并形成高空暖区，52km 高度达 -3~-17℃。

3. 中间层

从平流层顶至 85km 左右高空的大气层为中间层，气温随高度增加而降低，顶部气温可降至 -113~-83℃。层内水蒸气极少，几乎没有云层出现。由于垂直温度梯度大，在平流层与中间层之间会产生强烈的垂直的对流运动，也称高空对流层。

4. 热层

从中间层顶至 800km 的高空为热层 (或称暖层)。该层因直接吸收太阳紫外线辐射而使

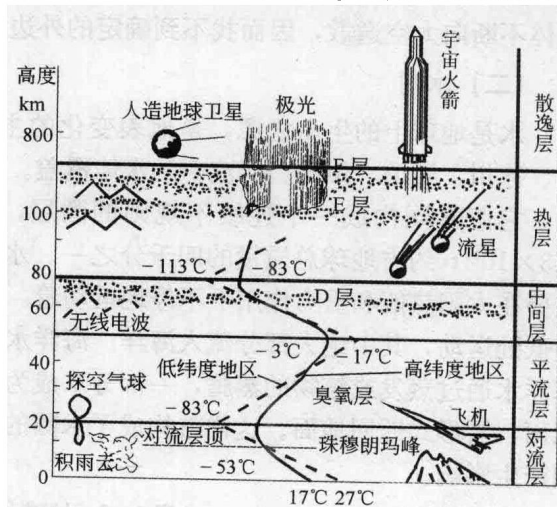


图 1-6 大气圈的垂直分层

温度升高至数百摄氏度以上，故称热层。该层空气极为稀薄，因吸收太阳的紫外线和 X 射线使大气中的氧和氮分子分离成为原子或离子，因而又称为电离层，它可以反射地面发射出的无线电通信短波。

5. 散逸层

800km 以上至数万千米的高空称为散逸层，又叫外层，是大气圈与星际空间的过渡带，其温度也随高度的增加而升高。散逸层的空气已极为稀薄。由于远离地面，引力作用微弱，气体不断向太空逸散，因而找不到确定的外边界。

(二) 水圈

水是地球上的生命之源，是地表变化的主要媒介。地球表面四分之三以上的面积被海洋、冰川、湖泊、沼泽、河流中的水体覆盖。地面以下的土壤和岩石中也赋存有大量的地下水，它们共同构成一个连续不规则的圈层，称为水圈 (hydrosphere)。水圈的质量约为 $143 \times 10^{16} \text{t}$ ，约占地球总质量的四千万分之一。水圈中各种水体的储量见表 1-2。水圈中的水主要在太阳热能和重力作用下不停地运动着。陆地上的地表水、地下水和冰川水都可自高处向低处运动，其中绝大部分流入海洋。海洋水在不停地进行水平运动或上下运动。地表水和海洋水通过蒸发或植物的蒸腾，一部分水成为水蒸气而进入大气圈，由大气循环带到各处，以雨、雪形式返回地面。这样就构成了水圈的循环 (图 1-7)，并对岩石圈、大气圈和生物圈产生影响。

表 1-2 地球上各种水体的水量

水的类型	水量, 10^{13}m^3	所占比例, %	水体平均替换时间	
海洋	134990	97.2725	2500a	
地表水	河流	0.125	0.0001	16d
	湖泊、沼泽	22.9	0.0165	5~17a
	冰川	2920	2.1041	10000a
地下水	840.7	0.6057	1400a	
生物水	0.12	0.0001	数小时	
大气水	1.3	0.0010	8d	
总计	138775.145	100	—	



图 1-7 水圈的循环示意图

(据叶俊林, 1996)

(三) 生物圈

生物圈 (biosphere) 是指地球表层由生物及其生命活动的地带所构成的连续圈层, 是地球上所有生物及其生存环境的总称。生物圈包括大气圈的下部、水圈和岩石圈的表层, 厚约 20km, 其中的部分生物个体集中分布在地表上下约 100m 厚的、环绕地球的薄层范围内。生物圈中生物及有机体总质量约 $11.48 \times 10^{12} \text{t}$ 。

生物圈是一个十分活跃的圈层, 由于它的存在, 使得地球各个自然圈层之间发生更加密切的相互联系及各种物质与能量的相互渗透, 并使得地球上的自然环境发生极其深刻的变化。生物通过活动、新陈代谢及死后遗体分解有机酸等方式对地表岩石进行风化和破坏, 是改造地表面貌的重要动力之一。生物遗体被埋藏、保存和演化可形成大量有机可燃性矿产, 如石油、天然气、煤、油页岩等。古生物化石是确定相对地质年代, 研究生物起源和演化, 研究地球的形成及地球演化历史的最重要依据。

二、地球的内部层圈构造

到目前为止, 人们还不能直接观察地球的内部情况, 世界上最深的钻井也只不过 12km 的深度, 只占地球半径的 $1/530$ 。因此, 目前对地球内部物质和结构的认识主要依靠各种间接的依据。例如, 通过对大量陨石的成分和结构的鉴定与对比分析; 通过研究重力、地磁、地电、地热及地震波的传播所获得的信息进行分析等。其中通过地震方法所获得的信息最为丰富。

1849 年英国学者斯托克斯 (G. G. Stokes, 1819—1903) 证实, 地震时会产生两种弹性波: 纵波 (P 波, 主波) 和横波 (S 波, 次波)。纵波 (primary waves) 是指质点的振动方向与传播方向一致的地震波。横波 (secondary waves) 是指质点的振动方向与传播方向垂直的地震波。同一介质中, P 波的速度为 S 波的 1.73 倍。S 波只能在固体介质中传播。当纵波和横波传播到两种不同介质的界面时, 会发生波速变化, 产生反射、折射, 同时改变波速。从地震纵波和横波波速的变化特征发现, 地下深处 12km (大洋区) 与 33km (大陆区)、670km、2891km 及 5150km 等四处, 波速发生显著的跃变 (图 1-8)。由此可以推断, 在上述几个深度上下物质的成分和状态有明显的变化。33km 处的界面是由前南斯拉夫地震学家莫霍洛维奇 (Andrija Mohorovicic, 1857—1936) 于 1909 年首次发现的, 因而以他的名字命名, 简称莫霍面, 又称 M 间断面。莫霍面是地表向下的第一个一级不连续面, 其使 v_p 由 6.8km/s 增至 8.1km/s, v_s 由 3.9km/s 增至 4.4km/s。莫霍面深度不一, 大陆区平均为 35km, 最深达 70km 以上; 大洋区平均约 7km, 最薄不足 5km。2891km 处的界面是由美国地球物理学家 B. 古登堡 (B. Gutenberg, 1889—1960) 于 1914 年发现的, 称为古登堡面。该面上下 v_p 由 13.64km/s 骤降为 7.98km/s; v_s 从 7.3km/s 到突然消失, 表明界面上为固态物质, 以下为液态物质 (图 1-8)。

莫霍面和古登堡面将地球内部划分为地壳、地幔和地核三个主要圈层 (图 1-9)。莫霍面以上为地壳, 莫霍面与古登堡面之间为地幔, 古登堡面以下为地核。

(一) 地壳

地壳 (crust) 是指地表至莫霍面之间的固体地球部分。地壳由各类岩石组成, 厚度变化大, 大洋区较薄, 平均 7km; 大陆区较厚, 平均 33km (图 1-10)。全球地壳平均厚度约 16km, 只有地球半径的 $1/400$ 。地壳体积占地球总体积的 0.8%, 质量约 $24 \times 10^{24} \text{g}$, 占地