

高等学校教材

石油与天然气地质概论

蒋裕强 陆廷清 编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

石油与天然气地质概论

蒋裕强 陆廷清 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从基础地质、油气地质和油气藏地质三个方面,阐述了石油天然气地质领域内的有关基础知识和基本理论。主要介绍了地球的结构与性质、矿物及其性质、地质作用与岩石记录、古生物与地层、沉积相与地质构造等基础地质知识;介绍了油气藏流体的基本组成与性质、油气的生成、运移和聚集、油气藏成因类型、油气聚集单元等油气地质基本理论以及油气藏的温度、压力系统与储量计算等有关油气藏地质基本知识。

本教材适合于石油高等院校的石油工程、油田化学、管理工程等专业学生学习使用。亦可作为高职院校、函授大学相关专业和职工培训的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油与天然气地质概论/蒋裕强等编.

北京:石油工业出版社,2010.1

高等学校教材

ISBN 978-7-5021-7313-5

I. 石…

II. 蒋…

III. 石油天然气地质-高等学校-教材

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 147004 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) 64523580 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17

字数:429 千字

定价:26.00 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

石油勘探类专业的学生对基础地质和油气地质理论有系统的、较深入的学习。“石油地质基础”是针对非石油勘探类专业学生开设的一门课程，目的是让学生了解地质学基础知识，掌握油气藏形成的基本理论，了解油气藏地质知识，为将来从事油气行业的工作奠定基础。本书是为该课程编写的配套教材。

本教材根据概略性、系统性、基础性的原则，从基础地质、油气地质和油气藏地质三个方面，阐述了石油天然气地质领域内的有关基础知识和基本理论。全书共十五章，第一章至第六章主要介绍地质学基础知识，包括地球的结构与性质、矿物及其性质、地质作用与岩石记录、古生物与地层、沉积相与地质构造。第七章至第十三章主要介绍油气藏流体的基本组成与性质，油气的生成、运移和聚集，油气藏的成因及类型，油气聚集单元等油气地质基本理论。第十四章至第十五章着重介绍油气藏的温度、压力系统与储量计算基本知识。基于“石油地质基础”教学大纲的要求，本书暂未编入有关钻井地质、油气层对比、油气藏勘探及开发方面的知识。

全书由蒋裕强、陆廷清、王占磊、何江、杨西燕编写。具体分工如下：蒋裕强（第八章至第十五章；第五章第五节、第六章第四节部分内容）、陆廷清（第一章、第四章、第六章）、王占磊（第三章、第七章）、何江（第二章）、杨西燕（第五章），全书最后由蒋裕强统稿并主编。本书的编者都是从事“石油天然气地质学”及“地质学基础”教学与科研工作的一线教师，具有丰富的教学经验，本书亦是他们多年教学科研经验的结晶。本书的文字整理工作由渠芳博士、研究生徐后伟、沈妍斐、漆麟协助完成；本书的全部图件由张红梅工程师及研究生季春海、张春、徐昌海、漆麟等绘制。

本教材适合于石油高等院校的石油工程、油田化学、管理工程等专业学生学习使用，亦可作为高职院校、函授大学相关专业和职工培训的教材。

本书的编写和出版得到了石油工业出版社、西南石油大学教务处及资源与环境学院有关领导的大力支持，在此，对他们表示衷心感谢。

本书在我校林维澄教授编写的《石油地质概论》教材的基础上经补充、修改、重新编写完成，书中参考和引用了大量文献，限于篇幅，在书后所附参考文献中未能全部列出，在此谨向有关文献作者表示衷心感谢。如有不当之处，敬请原谅。

由于编者水平有限，书中内容错误和不足之处难免存在，欢迎读者批评指正。

编 者
2009年6月

目 录

第一章 地球的一般特征	1
第一节 地球的形状和大小.....	1
第二节 地球表面的形态特征.....	2
第三节 地球的圈层结构.....	4
第四节 地球的物理性质.....	9
第二章 矿物	12
第一节 矿物的概念	12
第二节 矿物的性质	12
第三节 矿物的分类	18
第四节 常见矿物的特征	18
第三章 地质作用及岩石记录	27
第一节 地质作用概述	27
第二节 岩石的概念及分类	28
第三节 岩浆作用与岩浆岩	29
第四节 变质作用与变质岩	34
第五节 外动力地质作用与沉积岩	36
第六节 三大类岩石的互相转化	60
第四章 古生物与地层	62
第一节 古生物简述	62
第二节 地层划分与对比	63
第三节 地层单位与地质年代	68
第五章 沉积相	74
第一节 概述	74
第二节 山麓—洪积相	75
第三节 河流相	77
第四节 湖泊相	80
第五节 三角洲相	81
第六节 海相组	85
第七节 重力流沉积	88
第八节 碳酸盐岩沉积相	91
第六章 地质构造	96
第一节 构造运动	96
第二节 水平岩层与倾斜岩层	98
第三节 褶皱构造.....	100
第四节 断裂构造.....	104

第七章 油气与油田水的组成与性质	117
第一节 石油的组成与性质.....	117
第二节 天然气的组成与性质.....	125
第三节 油田水的组成与性质.....	129
第八章 油气的生成	132
第一节 油气成因概述.....	132
第二节 油气生成的原始有机物质.....	133
第三节 油气生成的地质条件与物理化学条件.....	136
第四节 油气生成的现代成因模式.....	138
第五节 天然气的成因类型简介.....	140
第六节 烃源岩.....	144
第九章 储集层与盖层	149
第一节 储层物理性质及其表征.....	149
第二节 储层类型.....	156
第三节 盖层.....	179
第十章 油气的运移	183
第一节 油气初次运移.....	183
第二节 油气二次运移.....	191
第十一章 油气藏的形成	199
第一节 圈闭与油气藏的基本概念.....	199
第二节 油气的聚集.....	203
第三节 油气藏形成的基本条件.....	209
第四节 油气藏的再形成.....	214
第十二章 油气藏类型	217
第一节 构造圈闭油气藏.....	217
第二节 岩性圈闭油气藏.....	224
第三节 地层圈闭油气藏.....	227
第四节 水动力圈闭油气藏.....	230
第五节 复合圈闭油气藏.....	231
第十三章 油气聚集单元	234
第一节 油气田.....	234
第二节 油气聚集带及含油气区.....	235
第三节 含油气盆地.....	236
第十四章 油气层压力与温度	242
第一节 油气层压力.....	242
第二节 异常地层压力.....	245
第三节 地层温度.....	249
第十五章 油气储量计算	253
第一节 资源量与储量分类.....	253
第二节 油气地质储量计算.....	255
参考文献	263

第一章 地球的一般特征

宇宙的物质创造了地球，地球创造了生物，也创造了人类。地球是我们人类现在唯一的生存和居住场所，人类一出现就开始不断地探索着自身及其所存在的宇宙空间。通过观察和研究了解到浩瀚的无边无际的宇宙是由无数个星系所构成的，太阳系仅是其中之一。

太阳系是以太阳为核心的一个天体系统。太阳位于整个体系的中央，是系统中质量和体积最大，能自己发光和辐射热能的一颗恒星。围绕着太阳旋转的是八大行星，自内向外依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星，它们旋转的轨道都是椭圆形；此外，太阳系中还有 33 颗围绕各个行星旋转的卫星、数千颗小行星和 10 万余颗彗星等。地球仅仅是太阳系的一个普通成员，它有一颗卫星，即月球。人们对地球的了解比其他行星要深刻得多，从地质学的角度上说，地球是我们研究的对象。

第一节 地球的形状和大小

关于地球的形状，自古以来人类就在不断地探索着，并早已证实它是一个球体。地球的表面崎岖不平，大部分为海水所覆盖。地球的几何形状一般是用大地测量方法测得的，为便于测算，以平均海平面通过大陆延伸所形成的封闭曲面(大地水准面)作为参考面，地球的形状和大小就是指大地水准面的形态和大小。1975 年 16 届国际大地测量和地球物理协会修订和公布的关于地球大小的数据：赤道半径(a)6378.140km，两极半径(c)6356.755km，平均半径(R)6371.004km，扁平率($\frac{a-c}{a}$) $\frac{1}{298.25}$ ，赤道周长($2\pi a$)40075.36km，子午线周长($2\pi c$)39940.670km，表面积($4\pi R^2$)510064471km²，体积($\frac{4}{3}\pi R^3$)1083206900000km³。

根据以上参数可勾绘出一个长、短半径相近的椭圆，再绕地球轴回转一周可得到一个旋转椭球体；利用最新的人造卫星资料分析结果，地球的实际形状与该椭球体稍有差异，赤道一带稍微凸出，南北半球也不对称，北极凸出约 10m，南极凹进约 30m，中纬度地区在北半球稍凹进，而在南半球稍凸出(不到 10m)，看似一个梨形(图 1-1 是地球形状的夸大示意图)。

地球的外形是其内部特征的反映：第一，地球接近于旋转椭球体，说明地球具有一定的塑性，是地球自转离心力作用的结果；第二，地球的实际外形与旋转椭球体并不完全重合，说明地球内部物质是不均匀的。

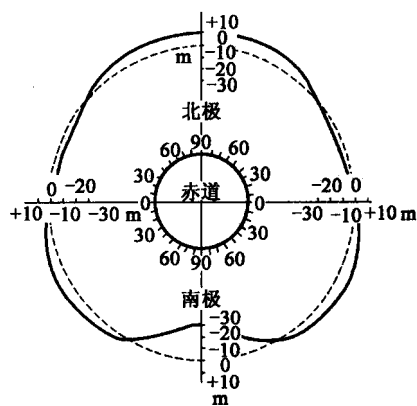


图 1-1 大地水准面的平均子午线剖面(实线)与扁平率为 1/298.25 的理想旋转椭球体(虚线)的关系 (据 King-Hele 等, 1969)

第二节 地球表面的形态特征

地球表面凹凸不平,以平均海平面为界,明显地分为海洋和大陆两大地理单元(图 1-2)。海洋总面积为 $3.61 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占地球表面积的 70.8%, 其平均水深约为 3900m, 最深处是西太平洋的马里亚纳海沟, 水深为 11034m。大陆面积为 $1.49 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占地球表面积的 29.2%, 平均海拔高度为 840m, 最高的是我国珠穆朗玛峰, 2005 年国家测绘局公布其海拔高度为 8844.43m。

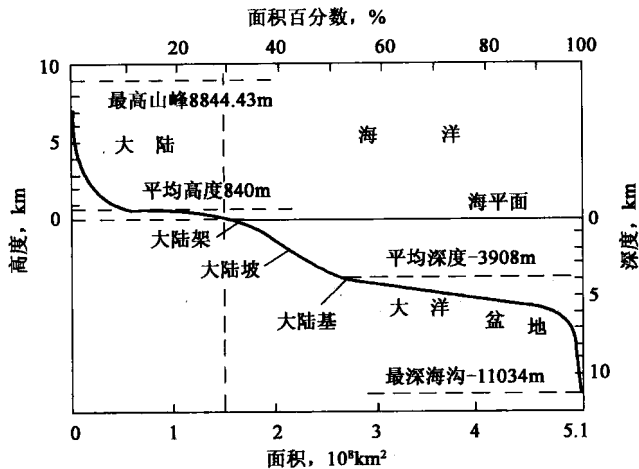


图 1-2 地球表面海陆起伏曲线图

一、大陆地表的形态

按照高程和起伏特征,陆地地形可分为山地、丘陵、平原、高原、盆地、洼地和裂谷等类型。

山地分为海拔高程在 500m 以上的低山、1000m 以上的中山和 3500m 以上的高山。线状延伸的山体叫山脉,成因上相联系的若干相邻山脉组成山系。在各大陆中,亚洲山地最多、最高,平均高度为 950m,比全球陆地平均高度高 110m。

丘陵是指高低不平、连绵不断、海拔高度在 500m 以下、相对高程不超过 200m 的低矮浑圆小山丘,如川中丘陵。

平原是指宽广平坦或略有起伏、海拔高度在 600m 以下的地区,如华北平原、西西伯利亚平原等。

高原是指相对面积较大,海拔高程在 600m 以上,地表较为平坦或略有起伏的地区。高原边缘常以崖壁或地形突降为限。青藏高原是世界上最为壮观的高原。

盆地是指四周是高原或山地,中央低平(平原或丘陵)的地区,四川盆地是十分典型的盆地。

洼地是指大陆内部高程在海平面以下的地区,新疆吐鲁番盆地的克鲁沁地区就低于海平面 155m。

裂谷是大陆上的一些规模宏伟的线状低洼谷地,其延伸可达数千公里,宽仅数十公里,

两壁或一壁为断崖。例如，世界上著名的东非大裂谷为一系列峡谷和湖泊组成，全长超过6500km。

二、海底地表的形态

被海水覆盖的海洋底，长期以来人们很难了解其真实面目，但随着海洋地质发展和海洋勘测技术的进步，人们对海底地形的了解越来越清楚。根据水深，一般把海洋从海岸线到大洋中心依次划分为滨海、浅海、半深海和深海四种环境(图 5-11)，与其相对应的海底地形分别称为大陆边缘(包括大陆架和大陆坡)、岛弧、海沟、大陆基、深海盆地、大洋脊和大洋隆(图 1-3，表 1-1)。

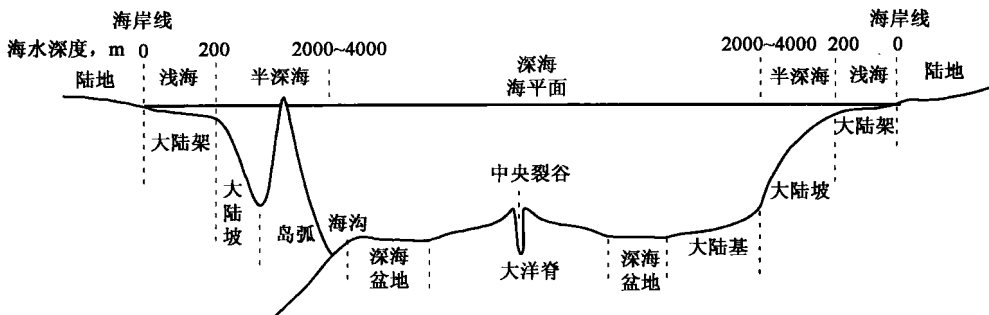


图 1-3 海洋的环境分区和海底地形

表 1-1 海洋地表的各地形单元面积统计表

地形单元	面积, 10^6 km^2	占海洋面积, %	占地球表面积, %
大陆边缘	55.4	15.3	10.9
大陆基	19.2	5.3	3.8
岛弧、海沟	6.1	1.7	1.2
深海盆地	157.2	43.5	30.8
大洋脊和大洋隆	124.0	34.2	24.0

(一) 大陆边缘

大陆与深海盆地之间被海水淹没的地带称为大陆边缘，它是大陆地壳的水下延伸部分，包括大陆架和大陆坡。

(1) 大陆架：大陆架是与陆地接壤的近海浅水平台，又叫陆棚。其范围是从海岸的低潮线起向海洋延伸到海底地形坡度显著增大的转折地段为止。大陆架地势平坦，坡度一般小于 0.3° 。外缘水深各地不一，一般不超过 200m，平均水深 130m。世界大陆架平均宽度为 70km。

(2) 大陆坡：大陆架外缘地形坡度较陡的地带称为大陆坡。其平均坡度为 3° ，最大可超过 20° ；水深范围从 200m 起到 3000m 以上。大陆坡是地球上最壮观的斜坡，它以 20~40km 宽度的条带围绕着大陆架。大陆坡上最显著的特征是发育许多两岸陡峭，高差很大的巨型槽谷，称为海底峡谷。

(二) 大陆基

大陆基是大陆坡外缘与深海盆地之间的缓倾斜地区，坡度 $5' \sim 35'$ ，由于浊流和滑塌作用所带来的物质堆积而成。

(三) 岛弧、海沟

(1) 岛弧：呈弧形延伸很长的火山列岛，形成岛弧。

(2) 海沟：在岛弧靠大洋一侧常发育长条形的巨型深海凹槽，称为海沟。其深度一般大于 6000m，延伸可达数千公里。海沟是大陆地壳和大洋地壳的分界线，横剖面呈不对称的“V”字形，靠岛弧一侧坡度较陡，靠大洋一侧坡度较缓。

(四) 深海盆地

位于海沟和海底山脉之间宽阔而又相对平坦的大洋底，称为深海盆地。深海盆地水深一般为 4000~5000m，占海洋面积的 43.5%，有三种主要地形：

(1) 深海丘陵：由高度在几十米到几百米的圆形或椭圆形山丘组成，集中分布在大洋脊或岛屿附近，由火山活动形成。在太平洋中这类地形占据了 80%~90% 的洋底，成为分布最广的地形单元之一。

(2) 深海平原：深海平原水深一般在 4000~5000m，地势平坦，平均坡度小于 1/1000，甚至小于 1/10000，广布于大西洋大洋脊两侧。

(3) 海山：深海盆地中规模不大，地势比较突出的孤立高地称为海山。

(五) 大洋脊、大洋隆

大洋脊、大洋隆是大型海底山脉。构造运动活跃、有强烈火山活动的巨型海底山脉称为大洋脊。大洋脊被一系列横向断裂错开，错距达数百公里。大西洋大洋脊恰好位于大西洋的中央部位，故又称大洋中脊。大西洋、印度洋、北冰洋大洋脊的轴部有一明显纵向延伸的谷地，深 1000~2000m，宽数十公里，称为中央裂谷。但在东太平洋大洋脊无明显的裂谷，地震活动较弱，称为大洋隆。

从上述特征可知，海底地形或洋底地形与陆地地形类似，但有比大陆更广阔平坦的平原，也有更险峻、宏伟的山脉和陡深的峡谷，但形态简单。仔细研究发现，每个大洲或大洋及其各种表面形态的出现，都有它内在的原因。

第三节 地球的圈层结构

地球不是一个均质体，其组成物质的分布呈同心圈层结构。以地表为界，可将地球分为外部圈层和固体地球两部分，它们还可进一步划分为几个不同的圈层。每一个圈层都有自身的物质运动特征和物理、化学性质，它们对各种动力地质作用会产生程度不同的直接和间接影响。因此，了解各圈层的结构，将有助于加深对各种动力地质作用原理的理解。

一、外部圈层及其主要特征

地球外部圈层就是包围着固体地球表层的地球物质组成部分，根据物理性质和存在状态的不同，可将其分为大气圈、水圈和生物圈。外部圈层是一切生命活动必不可少的环境要素，也是外动力地质作用的动力来源。

(一) 大气圈

大气圈由气体组成，其总质量为 $5.13 \times 10^{15} \text{t}$ ，约为地球总质量的百万分之一。根据气

温的垂直变化及大气圈的成分和物理特征等，将大气圈自下而上分为对流层、平流层、中间层、电离层和扩散层。与人类活动和地质作用密切相关的是对流层，其次是平流层。

对流层是大气圈的最低层，平均厚度 10.5km，其主要成分是氮和氧，还有少量的二氧化碳、水汽和固态杂质。气温随高度而递减。大气对流是对流层的一个重要特征，它是产生风、雨、雪、雾多种天气现象的主要原因，也是推动水圈循环的重要因素。

对流层顶以上到 50~55km 以内的大气层为平流层。平流层气温基本上不受地面影响，大气以水平移动为主。在 30~50km 的高空上存在大量臭氧，形成一个臭氧层。臭氧能吸收太阳辐射紫外线、保护地面的生物免受强烈紫外线伤害。

(二) 水圈

地球表面的水组成一个连续的圈层，总水量为 $14 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，其中海水占 97.3%，分布在陆地上的河流、湖沼、表层岩石的空隙和土壤中以及以冰雪的形式存在于高山和寒冷地区的水占总量的 2.7%。此外，在大气层和生物圈中也含有微量水分。

大洋和大陆的水通过蒸发形成水蒸气，水蒸气进入大气圈的对流层后又凝结成雨、雪等降落地面，落到陆地的大气降水在重力作用下以地表水和地下水的形式流回海洋，从而使地球上的水处于不断循环中。

(三) 生物圈

从大陆到深海底，从大气圈中的 10km 高空到地下 3km 深处均有生物生存。按质量计算，90% 以上的生物量集中分布在陆地表面和海面至水深 200m 的范围内。生物个体的形态和大小差别可以很大，看起来各不相同，但实际上关系密切，相互依存，并自成系统，构成了介于岩石圈、水圈、大气圈之间的一个特殊的层圈——生物圈。生物圈是生物及其占领的空间的总称，是一个复杂综合体。生物圈中各种有机体的总量为 $11.48 \times 10^{12} \text{ t}$ ，占地壳总质量的十万分之一，但与其他相邻层圈之间并无截然界线。生物圈是地球外部圈层(大气、水、生物与岩石圈表层)相互作用的产物，反过来生物圈也可对地球外部其他圈层产生巨大的作用，使其物质成分或面貌发生变化。

二、地球内部圈层及其主要特征

(一) 划分依据

到目前为止，人们尚不能直接观察到固体地球内部的情况。人们如何了解地球内部结构的呢？

最初是通过对地表出露的岩石进行研究，这些岩石有些本来就生成于地表，有的却生成于地下数公里甚至更深的地方，这些岩石提供了地下一定深度的地质信息。另外，通过地下开采的矿井也可直接观察地球内部，但深度只有数公里，世界上最深的人工钻井深度也仅在 12km 以内。人类竭尽全力收集到的地质资料只反映固体地球表层不超过 30km 的深度范围。

后来开始利用地震波进行研究。地震产生的地震波通过地球内部后再回到地面，能够被地震仪所接收。地球物理学家通过接收到的地震波加以研究，来了解地球内部的结构。

(二) 地球内部地震波速度突变的主要界面

了解地球内部结构靠的是纵波与横波，它们是迄今为止仅有的能穿越地球内部的旅行者。地震波在地球内的传播途中遇到密度不同和不同物理性质介质的界面会发生折射和反

射，同时改变波速。深入研究发现，地球内部存在着地震波速度突变的若干界面，这些界面显示了地球内部具有圈层结构(图 1-4)。

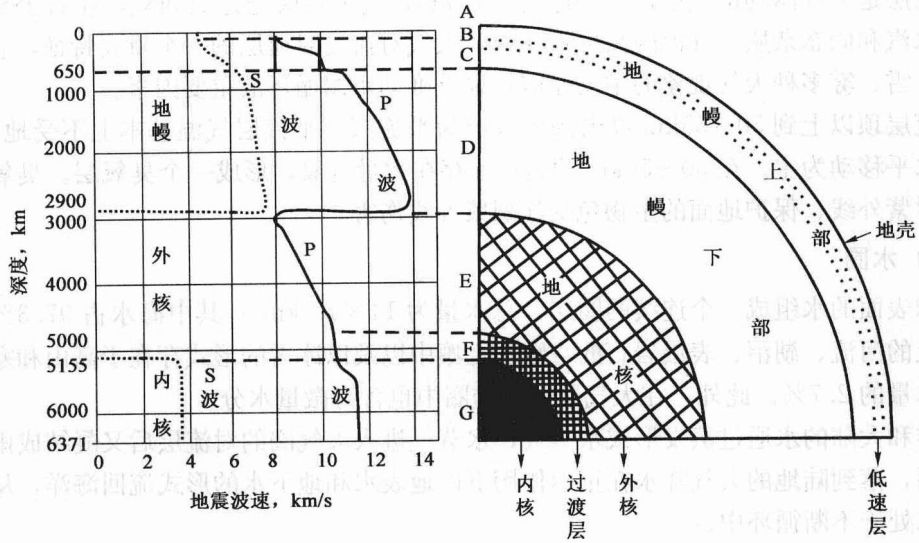


图 1-4 地球内部结构与地震波速的变化(引自陶世龙等, 1999; 略有改动)
 P波为纵波; S波为横波; A层为地壳; B、C、D层为地幔(其中B层为上地幔, C层为过渡层, D层为下地幔); E、F、G层为地核(其中E层为外核, F层为内、外核过渡层, G层为内核)

1. 莫霍面

莫霍面位于地表以下数公里到 30~40km 深度。纵波达到这一界面后，其速度由平均为 6~7km/s 突然升到 8.1km/s，这一突变具有全球性。此界面的深度在大陆深，在海洋浅，这一事实是前南斯拉夫学者莫霍洛维奇(Mohorovicic)于 1909 年首先发现的，被称为莫霍洛维奇面(Mohorovicic discontinuity)，简称莫霍面(Moho)。莫霍面以上部分称为地壳，以下部分称为地幔。

2. 古登堡面

古登堡面位于地下 2900km，横波到达这一界面就消失了，纵波能够通过，通过后其速度由原先逐渐加快的状态转变为突然减慢(由 13.64km/s 降为 8.10km/s)。同时，纵波到达该界面还明显地发生反射与折射，造成在地表的一定区间出现收不到的阴影带。为纪念最早(1914 年)研究这一界面的美国地球物理学家古登堡(B. Gutenberg)，将此界面称为古登堡面(Gutenberg discontinuity)。它是高密度的固体地幔与具有液态外核的地核之间的界面。

这两个界面是地球内部第一级界面，它将地球内部分为地壳、地幔、地核等三个圈层(图 1-4)。

(三) 地球内部各圈层的主要特征

1. 地壳

地壳即 A 层，是莫霍面以上由固体岩石组成的地球最外一圈，是目前地质学、地球物理学、地理学研究以及油气勘探的主要场所，是与人类日常生活密切相关的一个圈层。

1) 地壳的双层结构

地壳分为洋壳和陆壳。陆壳，其厚度各地不一，平均厚度为 33km。陆壳具有双层结构，上层主要成分是氧、硅、铝等轻元素，故称硅铝层。其平均密度为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，主要岩石为酸性岩浆岩(如花岗岩)和变质岩(如片麻岩)等，故也称花岗岩质层。下层主要成分是氧、硅、铁、镁，故称硅镁层。其平均密度为 $3.0\text{g}/\text{cm}^3$ ，主要岩石为基性岩浆岩(玄武岩)，故又称为玄武岩质层(表 1-2，图 1-5)。

表 1-2 大陆地壳和海洋地壳对比表

内 容	大 陆 地 壳	大 洋 地 壳
比例	占地壳总面积的 40% 占地壳总体积的 79% 占地壳总质量的 63%	占地壳总面积的 60% 占地壳总体积的 21% 占地壳总质量的 37%
平均厚度	33km	6km
平均密度	$2.7\text{g}/\text{cm}^3$	$3.0\text{g}/\text{cm}^3$
成分	沉积岩、岩浆岩和变质岩均有， SiO_2 含量大于 60%；镁的含量低，为 3.1%，铁的含量高	几乎全由火山岩组成， SiO_2 含量小于 50%，镁和低价铁含量高，但铁的总含量低
岩石时代	各地质时期形成的岩石都有，最老的岩石年龄可达 38 亿年	岩石年龄较新，大都是在近 5 千万年前形成的，最老不超过 2 亿年
地质作用和地质构造	岩石受强烈的挤压，形成褶皱断裂，区域变质作用普遍	主要以火山作用为主，没有区域变质作用，张性大断裂发育
重力异常	以负异常为主	以正异常为主
结构	双层结构，上为硅铝层，下为硅镁层，表层具有不连续分布的松散沉积物	仅有硅镁层一层，上部表面覆盖一层松散沉积物

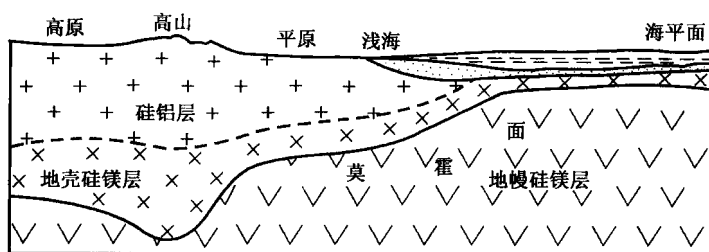


图 1-5 地壳的双层结构示意图

大洋地壳，其厚度变化在 5~8km 之间，平均厚度 6km。缺失硅铝层，只有硅镁层。

需要说明的是，大陆地壳和海洋地壳的分界线并不在海岸线处，虽然大陆架与大陆坡被海水淹没，仍属大陆地壳。大陆地壳和海洋地壳的分界线在大陆坡角处。

2) 地壳的化学组成

地壳和其他物体一样，其基本组成是各种元素。研究地壳中的化学成分及各种元素在地壳中的分布规律，也是地质学的重要课题之一。迄今为止，地壳中已发现的元素共有几十种，但它们的分布极不均匀。19 世纪以来，许多学者从世界各地采集了具有代表性的岩石标本进行定量分析，以确定各元素在地壳中的含量。美国人克拉克(F. W. Clark)在大量工

作的基础上最早提出地壳中各类元素分布的百分含量(丰度)表,后来为纪念他,国际上将各种元素在地壳中分布的质量百分比称为克拉克值。地壳中各种主要元素的克拉克值见表 1-3。

表 1-3 地壳中主要元素的克拉克值

氧 O	46.95	钠 Na	2.78
硅 Si	27.88	钾 K	2.58
铝 Al	8.13	镁 Mg	2.06
铁 Fe	5.17	钛 Ti	0.26
钙 Ca	3.65	氢 H	0.14

2. 地幔

地幔即 B、C、D 层,地幔介于莫霍面和古登堡面之间,厚度在 2800km 以上,平均密度为 4.5g/cm^3 。地幔的横向变化比较均匀,根据地震波速的变化(以 984km 深度为界)将地幔进一步划分为上地幔(B、C 层)和下地幔(D 层)两个次级圈层(表 1-4)。

表 1-4 地球内部分层和地球物理特征

圈层	代号	深度 km	纵波速 v_p km/s	横波速 v_s km/s	密度 ρ g/cm ³	压力 10^{11}Pa	重力 cm/s ²	温度 °C	其他
地壳	沉积岩层 花岗岩质层	0	5.6	3.4	2.6	0	982	14	有明显的构造变动,是深部构造作用的反映
		10	6.0	3.6	2.7	-0.003	-983	180~300	
	玄武岩质层	33	6.6	3.6	2.9	-0.009	-985	600~800	
		33	7.6	4.2	3.0				
地幔	上地幔	60	8.0	4.4	3.32				软流圈 活跃的构造活动带,岩浆活动本源可深达 80~140km,深震源可影响到 720km
		150	8.2	4.6	3.34				
		413	7.7	4.0	3.5				
	下地幔	413	8.97	4.98	3.85				物质不均匀
		984	11.43	6.35	4.6	0.4	994		
	D	2900	13.32	7.11	5.7	-1.5	-1037	-3700	地幔—地核边界 ρ 和 v_p 突然改变, v_s 不能进入界面
地核	外核	E	8.1	0	9.7				构造活动相对平静带,液态
	“过渡层”	F	4640	10.4	2.07	12.0		610	
		4900	10.4	1.24	12.5				
	内核	G	5155	11.0	3.6	12.7		430	
6371		11.3	3.7	13.0	3.7	0	<5000		

在上地幔中地震波速在 60~150km 的深度范围内降低最为明显,该带的物质可能为熔融状态,整体呈塑性状态。超过 400km 界线,波速又逐渐上升,恢复“正常”,所以称该地震波速降低的低速带为软流圈。并把其上的由固体岩石组成的上地幔的一部分和地壳合称为

岩石圈。岩石圈是地球的一个刚性外壳，“浮”在具塑性状态的软流圈之上。地质学研究的各种地质作用几乎全发生在岩石圈中。

3. 地核

地核即 E、F、G 层，由 2900km 深度至地心为地核。地震波在 2900km 处波速急剧降低，纵波波速由 13km/s 降至 8km/s，横波中断，表明 2900km 的古登堡面两侧物质状态发生剧变。地核又可根据 4640km 和 5155km 深度的两个界面划分为外核(E 层)、过渡层(F 层)及内核(G 层)三个次级圈层(表 1-4)。

外核的平均密度约 10.5g/cm^3 。由于纵波速度降低，横波不能通过，说明刚性为零，呈液体状态。过渡层的波速变化复杂，并测到速度不大的横波，可能是由液态开始向固态过渡。内核平均密度约 12.9g/cm^3 。测得内核的纵波速度为 11.2km/s，横波速度为 3.7km/s，显然内核的横波是由到达内核的纵波重新转化而来的，这表明内核为固体。

地核的成分是根据从宇宙中掉进地球的铁镍陨石推断的。这种陨石可能是其他行星被破碎后留下的核心残块。因为固体地球的表层及外圈都没有密度高达这样大的物质，故推测铁镍是地核的主要成分，除此之外，还混有少量较轻的硅、硫等元素。

第四节 地球的物理性质

地球物理性质主要是指它的密度、压力、重力、磁性、温度(地温)、电性、弹塑性、放射性等。

一、密度和压力

据万有引力公式推算地球质量为 $5.9742 \times 10^{27}\text{g}$ ，将该质量除以地球的体积得到平均密度为 5.516g/cm^3 。人们直接测得地球表层岩石的平均密度为 2.7g/cm^3 ，覆盖地表约 3/4 面积的海水密度为 1g/cm^3 ，由此可推测地球内部必然有大于 5.516g/cm^3 的物质。根据地震波速、地内重力、转动惯量等推算得知，地球密度是随深度的增加而增加的。

地球内部的压力是由上覆物质的重量所产生的静压力，它是由地球本身的物质重量引起的，其内部的压力基本上是随深度的增加而增大(图 1-6)。

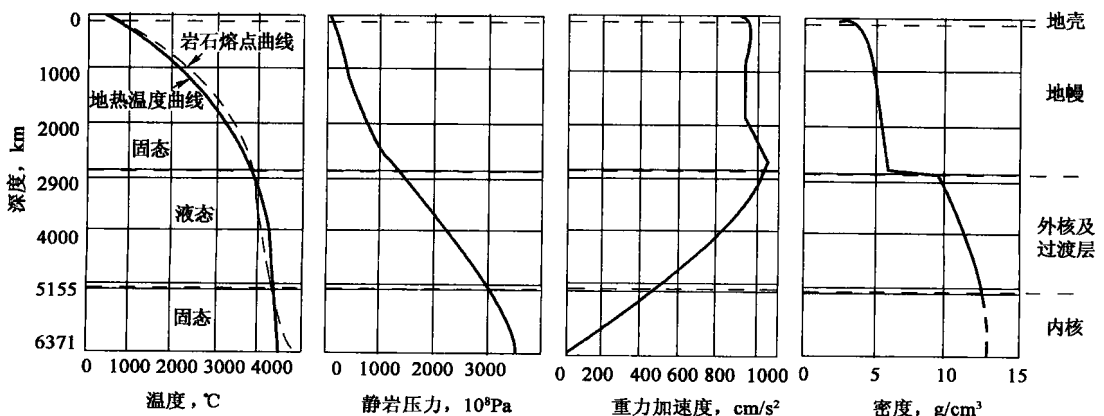


图 1-6 地球内部的主要物理性质

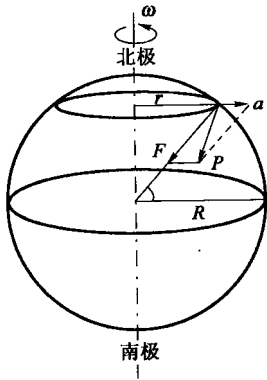


图 1-7 重力作用方向示意图

a —离心力； F —地球的吸引力；
 P —重力(a 与 F 的合力)；
 r —物体到自转轴的半径；
 R —地球半径； ω —自转角速度

二、重力

在地球上的物体，无不受重力的控制。在地球表面上的物体，不仅受到来自地心引力的吸引，还要受到地球自转所产生的惯性离心力的影响，这个离心力和地球引力的合力为地球的重力(图 1-7)。重力在此处就是加速度，单位是 cm/s^2 。

地心引力以赤道最小，两极最大。离心力则相反，赤道最大，约相当于引力的 $1/289$ ，两极最小，为零。所以在一般情况下引力可近似代表重力，而且地表的重力随纬度的增高而增大，随着海拔高度的增高而减小。

如果把地球看作是一个表面光滑的均质体，从理论上可计算出地球表面各处的重力值，该值称为正常值或理论值。但实际上各地实测值与理论值有差异，其差值称为重力异常。引起重力异常的原因很多，主要是由于地下物质组成不同引起的。实测值大为正异常，表明地下埋藏着密度大的物质，如铁、铜、铅、锌等金属矿产；实测值小为负异常，地下可能有石油、煤、盐、地下水等低密度物质。因此，通过重力测量可以探测地下矿产以及研究地球内部情况。

三、温度

深矿井温度升高、地下热量的流出和高温岩浆的喷出等现象，都说明地球内部是热的，并且蕴藏着巨大的热能。根据地内温度变化状况可以分为外热层、常温层和增温层。

1. 外热层(变温层)

外热层为固体地球的最表层，一般陆地区深度为 $10\sim 20\text{m}$ ，内陆或沙漠地区可达 $30\sim 40\text{m}$ 。本层热量来自太阳辐射，由于组成地表的岩石或土层热导率小，温度向下迅速减低。但总的看来，到一定深度，温度变化开始不明显，此处即为外热层的下界。

2. 常温层

常温层在外热层下界一带，是一个厚度不大的层带。由于这个带内温度常年不变，相当于当地的年平均温度，故称常温层。

3. 增温层

增温层在常温层之下，热量由地球内热提供，温度随深度增加而增加，而且很有规律。地温增量有两种表示方法：深度每增加 100m 所升高的温度数值，称为地温梯度或地热增温率；温度每升高 1°C 所需增加的深度，称为地温深度，又称地热增温级。上述两种表示方法互为倒数，例如，地温梯度为 2°C ，则地温深度为 50m 。

四、地球的磁性

地球是一个磁化的球体，具有两个地磁极。地磁场的南北两极和地理南北极并不一致，两者相差 1280km ，这是因为地磁轴和地球自转轴之间有 11.5° 交角(图 1-8)。

地磁场包围着整个地球，其范围可延伸到 10^4km 以上的天空。地磁场中无数条通过南北两个磁极的磁子午线与地理子午线有一个交角，叫做磁偏角。指北针偏在地理子午线东边者叫东偏角，用正号“+”表示；指北针偏在地理子午线西边者称为西偏角，用负号“-”表示。

地磁磁力线在赤道地区是水平的，在两极地区则是直立的，除此之外的其他地区，地磁磁力线与水平面有一定的夹角，这个夹角就是磁倾角。

在地球磁场内，磁力的大小称为磁场强度。这必须用磁力仪来测定，一般以特斯拉(T)作为计量单位。地球的磁场强度一般很弱，平均为 $50\mu\text{T}$ ，只有永久磁铁的万分之一左右。

磁场强度、磁偏角和磁倾角称为地磁三要素，地表任何一点的磁场特征均可用三要素来表示。

把地磁场看成是一个均匀的磁化球体产生的磁场，这种磁场称为正常磁场；如果实测到的地磁场与正常磁场不一致，则称为磁异常。实际测得的磁场大于正常磁场者称为正磁异常，实际测得的磁场小于正常磁场者称为负磁异常。根据磁异常的范围大小可将其分为大陆磁异常、区域磁异常和局部磁异常三种。其中局部磁异常是由小范围分布的浅处磁性岩体、矿体等因素引起的。利用磁异常来探测地下矿产的方法叫做磁法勘探，它是重要的物探方法之一。在有磁铁矿、镍矿、超基性岩体的地区，常显比较强的正磁异常；而在金、铜、盐、石油等矿区一般显负磁异常。

五、地球的弹性和塑性

固体地球在一定条件下表现为塑性，例如，地球自转产生离心力使地球内部物质向赤道移动，致使赤道半径大于两极半径而成扁球体，这是塑性变形的表现；野外经常见到成层岩层弯曲成各种各样的褶曲形态，这也是塑性变形的一种表现。

地球还具有弹性，具体表现在以下几个方面：首先，固体地球也和海水一样，在日月引力作用下会产生潮汐现象，这种潮汐为固体潮，固体潮没有液体潮明显，地壳因潮汐作用升降最大仅几十厘米，一般需用精密仪器才能观测到；另外，地球能传播地震波，地震波是弹性波。这些现象都说明地球具有弹性。

正因为地球具有导电性、磁性、密度、地震波传播等属性以及这些性质所表现出来的各种物理现象，可以根据地质学和物理学的原理，运用电子学和信息论等学科的新技术，来了解上述物理现象的变化，进一步了解地下岩石的性质及其变化规律，达到寻找地下油气的目的。

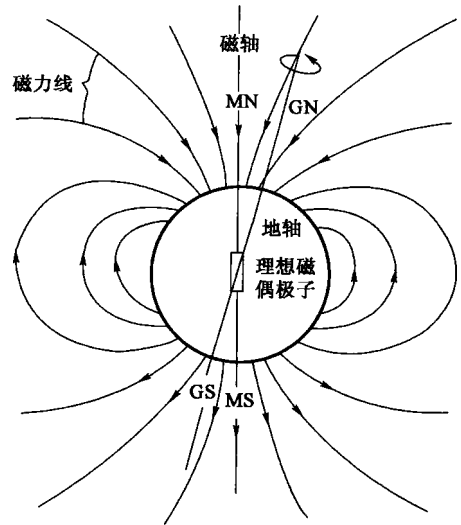


图 1-8 地球的磁场

复习思考题

1. 地球表面海陆是如何分布的？
2. 地球有哪些基本的物理性质？
3. 怎样确定地球的密度？
4. 地球内部的温度是怎样分布的？
5. 哪些证据可以说明地球具有弹性、塑性？
6. 地球外部有哪些圈层？它们之间有何关系？
7. 试简述地球内部圈层的划分依据和划分方案。
8. 地壳在元素组成方面有哪些基本特点？
9. 大洋地壳与大陆地壳有何区别？