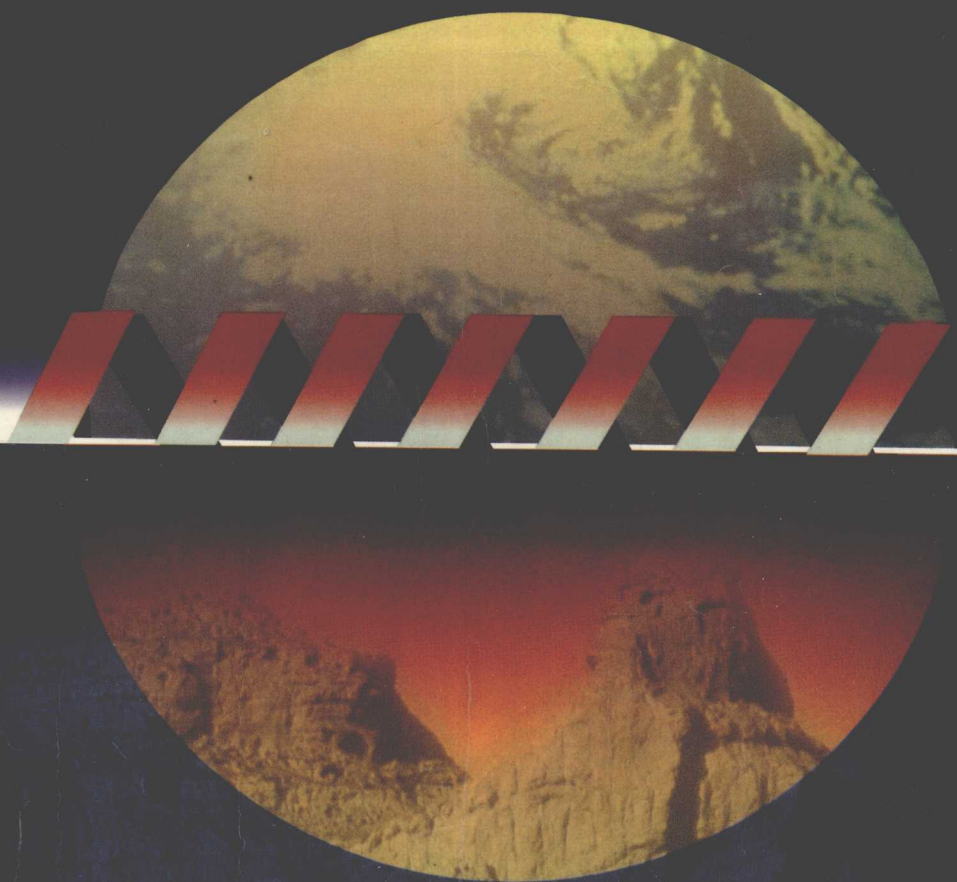


普通高等教育“九五”国家级重点教材

油气田开发 地质基础

(第三版)

黎文清 主编



PETROLEUM INDUSTRY PRESS

石油工业出版社



第三版前言

根据原中国石油天然气总公司人事教育局“九五”期间石油普通高等教育重点建设的精神，我们编写了1993年出版的《油气田开发地质基础》的第三版修订本。

在这次修订中，我们对教材的章节进行了必要的调整和简化，内容作了适度精简，增加了新的内容，保持并发挥了原版长期使用中被公认的优点和特色。

本版教材内容丰富、层次分明、论述清楚、理论结合实际、图文并茂，力求具有科学性、系统性、完整性、针对性，并着眼于实用性；同时，对当前国内外油气田开发地质的各种新成就、新动向，给予了适当的反映。部分章节引用了国外资料，其中保留了原英制单位。

本书由大庆石油学院黎文清任主编，白新华任副主编。

参加本版编写的人员有：大庆石油学院的黎文清（前言、绪论、第二章第一节），白新华（第六章和第八章），陈秉麟（第三章），曲淑琴（第二章第四节和第十章），罗笃清（第一章和第五章），云金表（第四章、第二章第二节和第三节），鲁兵（第七章第一、二、四节并负责全书的文字、图幅、常用参数符号及计量单位的规范和标准的核对），马世忠（第七章第三节和第九章）。黎文清、白新华对全书进行了统编和必要的修改。

本书由石油大学（北京）彭仕密、吴元燕主审，并提出了一些宝贵的修改意见；第二版主编之一李世安对第九章的修订提出了可贵的建议。

大庆石油管理局采油工艺研究所周望为本书编写提供了技术指导。在本次修订过程中，大庆石油学院教务处及勘探系领导给予了很大关切和支持。赵晓秋、董方晓承担了绘图工作，庞庆山、韩娟、姚秀敏、冯丽在稿件的录入和打印方面做了许多工作，在此一并表示感谢。

编者
1998年10月

金振全 谢庆宾

课堂 40学时 34学时 实验6学时

石油工程 岩石工程 生物地质

平时成绩 30% 期末考试(闭卷)成绩 70%

张永环 普通地质学

污损

第二版前言

根据石油工业部 1985 年在固安召开的石油高等院校教材工作会议的决定, 本书是 1981 年出版的教材《油气田开发地质基础》的第二版修订本。

由于开发专业的地质课程门数较少, 而地质、开发两专业的关系又很密切, 所以, 书中除强调动力地质学基础理论、基本知识、基本技能等方面的内容外, 还加强了碳酸盐岩、构造地质、沉积相、油气田地质等问题的研究, 增加了油气层的压力和温度及油气田勘探概论两章, 为后继课程进一步深入和提高打下了必要的基础。本书前半部分(基础地质)注重于内容的科学性、系统性和完整性, 立足于打好基础; 后半部分的各章节则按生、储、盖、运、聚进行专题叙述, 注重于内容的针对性和实用性, 立足于适应油田开发的生产实践和科学研究工作的需要。全书内容比课程计划要多一些, 授课教师可根据教学大纲基本要求和实际学时酌情取舍。

本书由大庆石油学院勘探系黎文清、李世安主编。参加编写的人员和分工如下:

黎文清: 绪论及第一至第四章、第九章;

陈秉麟: 第六、七章;

李世安: 第八、十七章;

李茂林: 第十章;

白新华: 第十一、十二章;

郝书翰: 第十三至第十六章;

曲淑琴: 第五、十八章。

本书由石油大学张家环教授主审, 并提出了许多宝贵的修改意见; 梅曦、高瑜、赵晓秋同志承担了本书的绘图工作; 在改编过程中, 庞雄奇、王岫岩、吕延防、张绍臣、李椿等同志都给予了大力支持, 做了许多具体工作, 在此一并表示衷心感谢。

由于我们水平所限, 本书的错漏和问题定会不少, 恳请读者批评指正。

编者

1992 年 8 月

第一版前言

一、本书是根据石油化工部 1977 年 5 月“东营教材会议”分配的任务而编写的，为石油高等院校采油、油气田开发专业通用教材。

二、全书共分十四章，内容包括基础地质、石油地质、油气田地质研究、石油及天然气储量计算等，涉及的地质学科较多。本书注意加强基础理论、基本知识和基本技能等方面的内容，不论内容的深度和广度方面，都较实际学时所规定的深一些和广一些。书中共附有图表 380 幅。有些章节（如地球基本知识、地质作用、古生物、岩浆岩、变质岩、地球物理测井）教师只需做简要讲解，余者留给学生自学即可。

三、本书以自编《油田开发地质基础》上、中、下三册油印教材为基础，从有关院校和现场编写的书刊中选用了一部分内容，还收编了国内几个主要油田的现场实际资料和地质理论研究成果。针对专业需要，本书加强了碳酸盐岩、沉积相、地层对比、油层地质结构研究、储集岩等方面的内容，注意理论联系实际，立足于培养学生分析问题和解决问题的能力。本教材除适用于采油、油气田开发专业外，钻井、物探、测井诸专业也可选用，还可供其他地质工作者参考。

三、本书由大庆石油学院勘探系石油地质教研室李茂林、黎文清主编，由杜博民教授主审。书中第一至第七章由黎文清编写；第九、十、十二、十四章由李茂林编写；第十一章由李茂林、王子文、郝书翰编写；第八章由李世安、李茂林编写；第十三章由李世安编写；附图由梅熹、郭鹏英描绘。在编写过程中，普通地质教研室和石油地质教研室的有关教师参加了初稿讨论和初审工作，还有一部分同志参加了缮写工作。

四、本书的初稿承西南石油学院勘探系老师颜婉荪、官鸿本同志审阅并提出了宝贵意见，在此表示深切的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，请读者批评、指正。

编者

1979 年 12 月

目 录

绪论	(1)
第一章 地球概况及地质作用	(4)
第一节 地球的形态特征	(4)
第二节 地球的主要物理性质	(6)
第三节 地球的内部圈层构造特征	(9)
第四节 地球的外部圈层特征	(13)
第五节 地质作用概述	(14)
第二章 矿物及岩石	(31)
第一节 矿物	(31)
第二节 岩浆岩	(40)
第三节 变质岩	(48)
第四节 沉积岩	(49)
第三章 古生物地层	(75)
第一节 古生物学基本知识	(75)
第二节 重要古生物门类简介	(78)
第三节 地层学基本理论	(86)
第四节 地层单位	(88)
第五节 地层的划分与对比	(90)
第六节 含油气地层的分级及命名	(93)
第四章 沉积相	(95)
第一节 沉积相的概念及分类	(95)
第二节 河流沉积体系	(96)
第三节 湖泊沉积体系	(103)
第四节 滨岸沉积体系	(108)
第五节 海洋沉积体系	(113)
第六节 三角洲沉积体系	(115)
第五章 构造运动及地质构造	(124)
第一节 构造运动概述	(124)
第二节 岩石变形的概念	(125)
第三节 水平岩层及倾斜岩层	(127)
第四节 褶皱构造	(129)
第五节 断裂构造	(132)
第六节 同沉积构造	(137)
第六章 石油、天然气及油田水	(140)
第一节 石油	(140)

第二节	天然气	(145)
第三节	油田水	(148)
第七章	油源层、储集层及盖层概述	(153)
第一节	油源层	(153)
第二节	储集层	(158)
(1) 第三节	储层非均质性	(168)
(4) 第四节	盖层	(185)
第八章	油气聚集单元	(189)
(6) 第一节	油气聚集单元的概述	(189)
(9) 第二节	含油气盆地内的大地构造单元	(205)
第九章	油气田地质研究	(207)
(41) 第一节	油气田地质研究的意义和基础资料	(207)
(18) 第二节	油层对比	(217)
(18) 第三节	构造剖面图及构造图的编制	(226)
(10) 第四节	地下地质及流体的再认识	(233)
第十章	石油及天然气储量计算	(238)
(9) 第一节	油气储量的概念及其分类与分级	(238)
(27) 第二节	储量计算方法	(240)
参考文献		(256)
(87)	介筒类口磨主古要重	第二章
(88)	介腹本基学思思	第三章
(88)	立单思思	第四章
(90)	出板片位坡思思	第五章
(93)	各命必延位思思户断合	第六章
(92)	时路元	第四章
(92)	类代又念断的断用元	第一章
(96)	系利用元前断	第二章
(103)	系利用元前断	第三章
(108)	系利用元前断	第四章
(111)	系利用元前断	第五章
(112)	系利用元前断三	第六章
(124)	章路思思又板思思	第五章
(124)	板断思思又板断	第一章
(127)	念断思思又板断	第二章
(127)	思思断思思又思思平水	第三章
(129)	章路思思	第四章
(132)	章路思思	第五章
(127)	章路思思同	第六章
(140)	水田断思思断天	第六章
(140)	断思	第一章

绪 论

一、地质学的研究对象及内容

地质学是一门关于研究地球的科学。人类生活在地球上，与地球息息相关，了解和探索人类赖以生存的地球是地质学的研究任务。由于人类历史与地球漫长历史有巨大的差距，人类能触及的范围与庞大空间也有相当的差距。所以地质学的研究对象，目前局限于地球的表层——地壳或岩石圈，且主要是地壳，其中包括地壳或岩石圈的物质组成和分布；现代地质作用及圈层构造的形成；地球的起源、发展历史和演变规律；合理开发和利用地球资源、地球环境以及保护地球的理论和方法。

地质学的内容包罗万象，它广泛运用近代物理、数学、化学、天文学、地理学、生物学及生物地球化学等自然科学的理论及现代科学技术手段，并针对不同任务和内容进行研究。由于研究范围的广泛，因而出现了如下分科：

①在地球的物质成分、组成、结构及其变化规律和成因方面包括矿物学、结晶学、岩石学及地球化学等。

②在地球结构、构造、地表形态变化和各种地质作用及其成因方面包括动力地质学、地球动力学、火山学、地震地质学、构造地质学、大地构造学、区域地质学、板块构造学、构造物理学、地貌学、地质力学、深部地质学等。

③在地球历史及演变规律方面包括古生物学、地史学、同位素年代学、地层学、地震地层学、古气候学、古地理学、第四纪地质学等。

④在地球资源和环境方面包括矿床学、煤田地质学、石油地质学、天然气地质学、放射性地质学、水文地质学、环境地质学、工程地质学、油矿地质学、实验地质学等。

⑤在地球矿产资源调查勘探的理论和方法方面包括地质制图学、矿产调查与勘探、地球物理勘探、地球化学勘探、探矿工程学、油气田开发地质学等。

随着科学技术的高速发展，新的任务需要与其他学科渗透与联合，从而形成了一系列的边缘学科，如同位素地质学、数学地质学、地球物理学、航空地质学、宇宙地质学、遥感地质学、海洋地质学、行星地质学、旅游地质学等。

《油气田开发地质基础》全面介绍了地球及地质作用，矿物及岩石，古生物地层，沉积相，构造运动及地质构造，油源层、储集层及盖层，油气聚集单元，油田地质研究以及石油、天然气储量计算的基本理论和基本知识。

二、地质学的研究方法

地质学是一门探索性很强的科学。人类认识自然规律总是从小到大、由浅入深、从局部到整体、由个别规律的研究到整体规律的归纳。地球是一个巨大而复杂的星体。由于它具有历史久远、空间庞大、地质过程复杂等特点，因此，地质学在研究方法上也有其自身的特点，这就是开展地质考察和调查，并在室内进行综合研究。

要重视野外地质调查，收集可靠的原始资料。只有观察、收集到大量的反映自然界客观规律的地质现象，并加以综合分析研究，才能建立正确的地质理论。地球自形成以来，经历了漫长的发展历史。在地质历史时期，曾发生过许多的地质事件，在地层和岩石中留下各种

痕迹和地质现象，如岩石特征、地质构造特征、古生物化石特征等。这些地质记录，通过地面露头观察和钻探手段，可以直接观察地壳的上部，其深度不超过 15km。关于地球深部的情况，主要是应用地球物理勘探方法，进行间接推断。

按地质学的思维方法，室内综合研究一般有下列几种。

1. 历史比较法

The present is the key to the past.

历史比较法是指根据保留在地层和岩石中的各种痕迹和地质现象，结合现代正在发生的各种地质作用所出现的现象和造成的结果，“将今论古”与“古今结合”，分析和推断各个地质历史时期各种地质事件的存在及其特征。“将今论古”原则是由地质学创始人之一的 C. 莱伊尔 (1797~1875 年) 提出并广泛应用于地质学研究中的，在一定程度上推动了早期地质学的形成和发展。但这种简单的地质学思维方法，是建立在地质环境始终不变的假设之上的。事实上，在地球历史中，地球内部结构及外部圈层都有过重大的改变，说明古代与现代的地质作用可能处在完全不同的地质环境之中。因此，当应用历史比较法，根据地质记录去反推地球历史的过去、恢复地质事件的历程时，必须考虑到诸多条件的复杂性以及事物之间的联系与差别，不能用局部代替整体，用一孔之见窥视海阔天空。

2. 类比法

类比法是指将野外所采集的各种地质资料，进行整理、对比和综合分析，找出各种地质现象之间的异同点和内在联系，划分成不同的类别和单元，总结出合理的规律和结论，最后查明工作区域的地质情况及其发展历史。

3. 测试实验及实验模拟法

测试实验及实验模拟法是指将野外所采集的矿物、岩石、古生物化石、矿产以及其他各种分析化验样品，进行室内鉴定、测试，了解化石的种类和时代，分析矿物、岩石、矿产的成因、产状，以及各种沉积构造的形成条件，借以揭示地壳的某些构造特征，近似地模拟某些地质构造的形成和发展演变历史，再现地质作用过程。

三、地质学与油气田勘探开发的关系

近代创立并发展的石油地质学，在推动石油、天然气工业发展中发挥了重要的作用：一是在油气田发现以前，通过研究油气生成、运移、聚集和油气藏特点及油气分布规律，指导油气田勘探工作，力求以最快的速度、最有效的手段找到具有工业开采价值的油气田；二是在油气田投入开发之前通过研究油气藏类型、储集层和地下流体的原始状态及物理性质、储量分布及估算，为优化开发方案和优选开采方式提供必要的地质基础；三是当油气田投入开发后，通过研究开发过程中的油气藏结构、油层及流体的物理性质、油层压力系统、剩余油分布等动态变化规律，为制定开发调整措施、增加可采储量及改善总体开发效果，提供重要的地质依据。可以说，从油气田勘探到开发的整个过程中，石油地质学始终发挥着十分重要的指导作用。

大庆油田是目前我国第一大油田，也是世界级特大型陆相非均质、多油层砂岩油田。这个油田从勘探到开发，始终把油田地质研究作为一项基础工作，取得令世人瞩目的辉煌成果。勘探期间在板块地质理论指导下，认真研究区域地质和油气分布规律，甩开勘探，合理部署，只用了不到三年时间，就探明了面积在 1 000km² 以上的大油田，确定了内部注水保持压力开采和提高油田最终采收率的开发方针。37 年来，针对非均质、多油层油田不同注水开发阶段的特点，通过广泛深入的地质研究，先后提出并实施了分层开采、接替稳产、综合调整、“稳油控水”和三次采油等一系列油田地质开发新方法和新技术，有力地保证了大

庆油田年产原油 5 000 万 t 以上，连续稳产 20 多年，创出了世界同类型油田开发的新水平。大庆油田的实践证明，石油地质理论的发展促进了油田勘探与开发的技术进步，而油田勘探与开发实践又推动着石油地质理论不断向前发展。

建国以来，我国石油天然气工业在石油地质理论的指导下，从小到大，由弱到强，取得了一个又一个胜利。目前，我国已进入世界产油大国的行列。根据国民经济“九五”计划和 2010 年远景发展目标，我国石油天然气工业将面临新的机遇和挑战，任务光荣而艰巨。为此，必须按照“稳定东部、发展西部”和“油气并重”的战略方针，大力研究、应用最新石油地质理论，发展并形成以增加可采储量为重点的开发工艺技术系列，努力使我国石油天然气工业持续发展，为实现 2010 年宏伟奋斗目标作出新的贡献。

第一章 地球的形状和大小

地球是一个不规则的球体，其形状和大小是地球物理学研究的重要内容。地球的形状和大小不仅影响着地球的引力场，而且也影响着地球的自转和公转。在地球物理学中，地球的形状和大小通常用地球的半径、赤道半径、极半径、扁率等参数来描述。这些参数的测定对于地球物理学的发展具有重要意义。

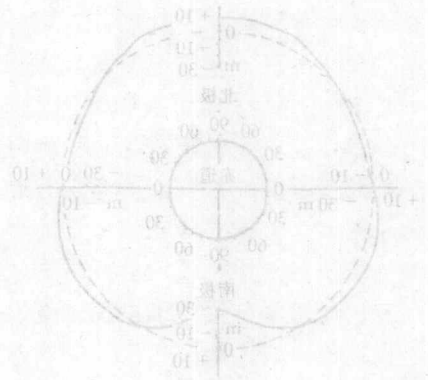


图 1-1 地球的形状和大小

图 1-1 取自《地球物理学》(1979)

赤道半径 (a): 6 378.137 km;
极半径 (c): 6 356.752 km;
平均半径 $\bar{R} = \frac{1}{3}(2a + c) = 6 371.012 \text{ km}$;
扁率 $f = \frac{a - c}{a} = 1/298.253$;
赤道周长 ($2\pi a$): 40 075.7 km;
子午线周长 ($2\pi c$): 40 008.08 km。

表面积 ($4\pi R^2$): $5.1010 \times 10^8 \text{ km}^2$;
体积 ($\frac{4}{3}\pi R^3$): $1.0832 \times 10^{12} \text{ km}^3$ 。

二、地球表面形态特征

地球表面形态特征是指地球表面的起伏、高低、坡度等。地球表面形态特征的研究对于地球物理学的发展具有重要意义。地球表面形态特征的研究可以分为宏观形态特征和微观形态特征。宏观形态特征是指地球表面的大尺度起伏，如大陆、海洋、山脉等。微观形态特征是指地球表面的小尺度起伏，如丘陵、山谷、河流等。地球表面形态特征的研究对于地球物理学的发展具有重要意义。

(一) 地球表面形态特征

地球表面形态特征的研究可以分为宏观形态特征和微观形态特征。宏观形态特征是指地球表面的大尺度起伏，如大陆、海洋、山脉等。微观形态特征是指地球表面的小尺度起伏，如丘陵、山谷、河流等。地球表面形态特征的研究对于地球物理学的发展具有重要意义。

第一章 地球概况及地质作用

地球是地质学的研究对象，也是地质作用产生的发源地和场所。因此，了解地球的情况，将有助于学习本课的相关内容和了解地球与地质作用的内在关系。

地球是太阳系一个主要成员，是自太阳向外的第三颗行星，也是太阳系中惟一既有浓密大气和大量液态水，又有生命存在的行星。人们赖以生存的生活和生产资源都取自地球，如有机矿产（石油、天然气、煤、油页岩等）和无机矿产（如铁、铜、铅、锌、金、银、铬、镍）以及建筑材料和农用肥料等。

第一节 地球的形态特征

一、地球的形状

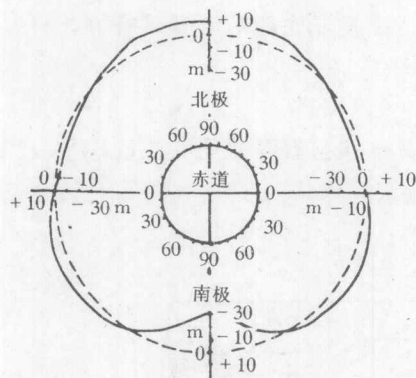


图 1-1 地球的梨状体形态

(据 J.A. 雅各布斯《地质学教程》，1979)

地球表面高低起伏不平，我们把平均海平面和该面扩展到大陆下面构成的理论上的连续面称为大地水准面。大地水准面构成的球面反映了地球的形状，它是非标准的、呈梨形的旋转椭圆球体（见图 1-1）。其北极凸出约 10m，南极凹进约 30m，中纬度地区在北半球向里凹，在南半球则略向外凸。

1980 年国际大地测量与地球物理联合会公布的数值可反映地球的大小：

赤道半径 (a): 6 378.137km;

两极半径 (c): 6 356.752km;

平均半径 [$R = (a^2c)^{1/3}$]: 6 371.012km;

扁率 [$(a - c) / a$]: 1/298.253;

赤道周长 ($2\pi a$): 40 075.7km;

子午线周长 ($2\pi c$): 40 008.08km;

表面积 ($4\pi R^2$): $5.1010 \times 10^8 \text{ km}^2$;

体积 ($4/3\pi R^3$): $1.0832 \times 10^{12} \text{ km}^3$ 。

二、地球表面的形态特征

地球表面高低起伏，地表形态可分为海洋和陆地两大地形单元。海洋面积为 $3.61 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占地球表面积的 70.8%；陆地面积为 $1.49 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占地球表面积的 29.2%。海、陆分布是不均匀的，陆地主要集中在北半球，大陆的平均高度约为 875m，最高点珠穆朗玛峰，海拔高度为 8 848.13m。海洋平均深度约为 3 729m，最深处在西太平洋的马里亚纳海沟，深达 11 034m。

(一) 陆地地形特征

根据海拔高程和地形起伏特征，陆地地形主要可划分为山地、高原、盆地、丘陵、平原等多种地形单元。

(1) 山地 是指海拔高度大于 500m, 并且有明显山峰、山坡和山麓的地形单元。呈长条形延伸的山地称山脉, 多条平行山脉组合成山系, 如阿尔卑斯—喜马拉雅山系。

(2) 高原 是指海拔高度大于 500m, 面积较大, 表面较为平坦或略有起伏的地区。世界上最高的高原是我国青藏高原, 海拔在 4 000m 以上; 最大的高原是南美洲的巴西高原, 面积达 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

(3) 盆地 是指陆地上四周为山地或高原, 中央低平的地区。世界上最大的盆地是刚果盆地, 面积达 337 万 km^2 。我国主要的盆地有塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和四川盆地等。盆地是石油和天然气生成、运移、聚集的基本单元。

(4) 丘陵 是指海拔高度小于 500m, 顶部浑圆、坡度平缓、坡脚不明显的低矮山丘群。

(5) 平原 是指海拔高度小于 200m, 宽广、平坦或略有起伏的平地, 如我国的松辽平原、华北平原和长江中下游平原等。

(二) 海底地形

陆地上的河水、湖水、地下水, 总是向着低处流动, 许多水流都在海洋中汇合。在地球表面上聚集水体的巨大洼地称为洋。地球表面有四大洋, 即大西洋、印度洋、太平洋和北冰洋。四大洋的水体是相互连通的。每个大洋与陆地接触的水体称为海, 如我国的渤海、黄海、东海、南海等, 都是太平洋西部的一些海湾。海与洋统称为海洋。

海洋调查表明, 洋底地形和大陆地形一样复杂多样, 根据洋底地形的基本特征, 可分为大陆边缘、大洋盆地和大洋中脊三部分。

1. 大陆边缘

大陆边缘是指大陆与洋盆之间被海水淹没的地带, 是陆地与海洋之间的过渡地带 (见图 1-2)。其包括大陆架、大陆坡和大陆基, 占海洋面积的 22.4%。

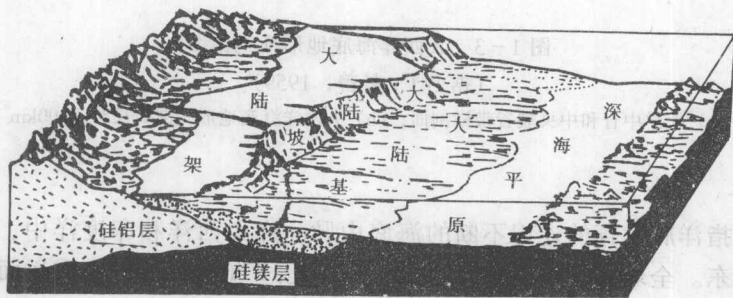


图 1-2 大陆边缘地形示意图

(据李淑达《动力地质学原理》第 2 版, 1994)

大陆架又称浅海陆棚, 是大陆周围坡度平缓的浅水区。其范围从低潮线开始, 到海底坡底突然增大的深度为止, 地势平坦, 坡度一般小于 0.3° 。

大陆架外缘水深各地不一样, 平均水深约 133m。大陆架的宽度也不一样, 平均为 75km。大陆架的地壳结构与大陆相同, 可以认为是被海水淹没的大陆部分。

大陆坡是位于大陆架外缘的巨大斜坡, 坡度较大, 平均坡度为 3° , 最大坡度可达 20° 以上, 致使水深各地不同, 从 200m 至 3 000m 以上不等。大陆坡的宽度为 20~100km。

大陆基又称大陆隆、大陆裙，是大陆坡外缘缓缓倾向洋底的斜坡地带，由沉积物堆积而成。坡度为 $5^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ，水深为 $2\,000\sim 4\,000\text{m}$ 。在大西洋及印度洋，大陆基宽度可达 500km 。在太平洋地区却无大陆基存在，但海沟发育。海沟是洋底狭长而深渊的洼地，宽度不到 100km ，延伸可达几百到几千公里，水深大于 $5\,500\text{m}$ ，最大可达 $8\,000\sim 10\,000\text{m}$ ，是地球表面地势最低的地区。

2. 大洋盆地

大洋盆地是指大陆边缘之外，大洋中脊两侧的深海盆地（见图1-3），平均水深 $4\,750\text{m}$ ，是海洋的主体部分，占海洋面积的 44.9% 。大洋盆地地势十分平坦，以深海平原为主，在洋中脊附近发育深海丘陵。

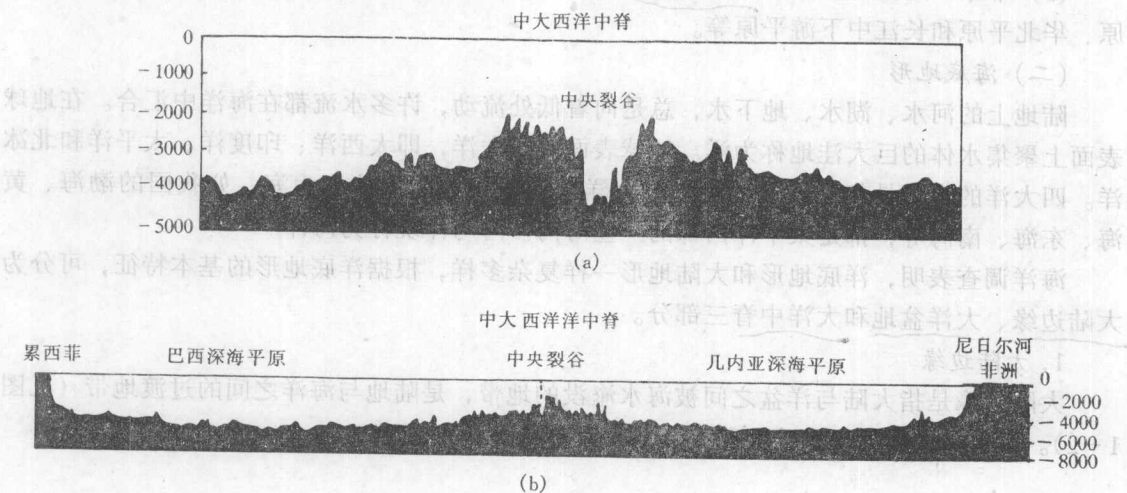


图1-3 大西洋海底地形横剖面图

(据 B.C. 赫曾, 1959)

(a) 大洋中脊和中央裂谷带横剖面；(b) 大西洋海底地形，剖面长约 $4\,800\text{km}$

3. 大洋中脊

大洋中脊是指洋底发育的连绵不断的海底山脉。在大西洋和印度洋中，位居大洋中部，在太平洋中则偏东。全球大洋中脊相互连接，全长超过 $70\,000\text{km}$ ，占海洋面积的 32.7% 。

第二节 地球的主要物理性质

一、地球的密度及压力

根据万有引力定律可计算出地球质量为 $5.974\times 10^{27}\text{g}$ ，地球的体积为 $1.083\times 10^{27}\text{cm}^3$ ，因此地球的平均密度为 5.516g/cm^3 。由于组成地壳的主要岩石为花岗岩和玄武岩，其密度分别为 2.7g/cm^3 和 2.9g/cm^3 ，所以地球深部物质的密度应比地表密度和平均密度都高，即由地表向地心，地球密度是增加的。这种变化无法直接观测，一般通过地震波速、地球内部重力和转动惯量等计算，或通过其与陨石物质成分类比来推断。地球的密度是随深度增加而逐渐增大的，但不是均匀增加，而是存在几个明显变化的界面，这反映出地球内部物质具有

层圈特征。

地球内部压力是由上覆地球物质质量所产生的静压力，其计算公式为：

$$p = h\rho g \quad (1-1)$$

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， $980\text{m}/\text{s}^2$ 。

由式 (1-1) 可知，深度越大，压力越大。但压力增加的速度因深度而不同，地球浅部压力递增慢，地球深部压力升高幅度快。

地层压力是油田的灵魂，油井能自喷采油，主要依靠地层压力，保持油层的地层压力是合理开发油田的关键之一。

二、地球内部的温度

地球内部热物质（火山熔浆、温泉）的涌出表明地内是热的。维持地球温度的热源主要是地球内部放射性元素衰变所产生的热和太阳辐射热。根据地内温度分布状况，由地表向地心可划分为三个层：外热层、常温层和内热层。

(1) 外热层 又称变温层，是指受太阳辐射而具有一定温度的地球表层，由地表向内温度降低。外热层厚度等于太阳辐射热所能影响的深度，一般很薄，年变化所能影响的深度在 $10\sim 20\text{m}$ ，平均约为 15m ，在内陆地区最大可达 $30\sim 40\text{m}$ 。

(2) 常温层 是指外热层的最下限，年变化幅度为零，温度常年保持不变，等于当地年平均温度。外热层和常温层厚度很小，因此，地球内部的温度主要由内热层构成。

(3) 内热层 又称增温层，是指常温层以下到地球中心地带，温度随深度而逐渐增加。热源来自地球内部的放射热，增温具有规律性。通常把常温层以下，深度每增加 100m 时所升高的温度值称为地温梯度或地热增温率，用 $^{\circ}\text{C}$ 表示；把常温层以下，温度每升高 1°C 所增加的深度值称为地温深度或地热增温级，用 m 表示。地温梯度与地温深度两者互为倒数关系，常用的是地温梯度。地球上不同地区的地温梯度不同，从 $0.9\sim 5.2^{\circ}\text{C}$ 不等。地温梯度的高低与热源及岩石热导率有关。地表至地球内部 70km 范围内，地温梯度平均为 2.5°C ；再往深部地温梯度逐渐变小，一般为 $0.5\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 。地温梯度高的沉积盆地有利于有机质向油气转化，也有利于油气生成。地层温度直接影响到油层物理性质，也是优选油田开发方案的决定因素之一。

三、地球的重力

地球的重力是指地球的引力与地球自转产生的离心力的合力。地球的引力与质量成正比，与地心距离的平方成反比，地心引力在赤道最小，两极最大；离心力与其到地轴的距离和地球转动的角速度平方成正比，在赤道区最大，两极最小。由于离心力的最大值只有地心引力最小值的 $1/289$ ，所以重力主要取决于地心引力，且指向地心。

重力在地表的分布决定于地球的形状及其内部质量的分布。假定地球为一均质体，以大地水准面为基准计算出来的地面重力值称为正常（或标准）重力值。地表某点的实测重力值与标准重力值不符合时，称为重力异常；比标准重力值大的称正异常，比标准值小的称负异常。引起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、锌等金属矿区，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。

四、地球的磁性

地球是一个均匀磁化球体，磁力线的分布特征和棒形磁铁的磁场相似，形成一个偶极子磁场（见图 1-4）。偶极子磁轴与地面的交点称为地磁极，地磁力线分布的范围，称为地磁场。地磁场的南北两极与地理南北极是不一致的，即地磁轴与地球自转轴不重合。在地质历史过程中，地磁场发生了变化。实际观测发现，从 1922~1972 年的 50 年间，磁北极在纬度上移动了 2° ，磁南极则移动了 $4^\circ 25'$ 。随着地磁的移动，各地地磁要素也相应发生变化。为此，国际组织规定每 5 年重编一次世界地磁图。

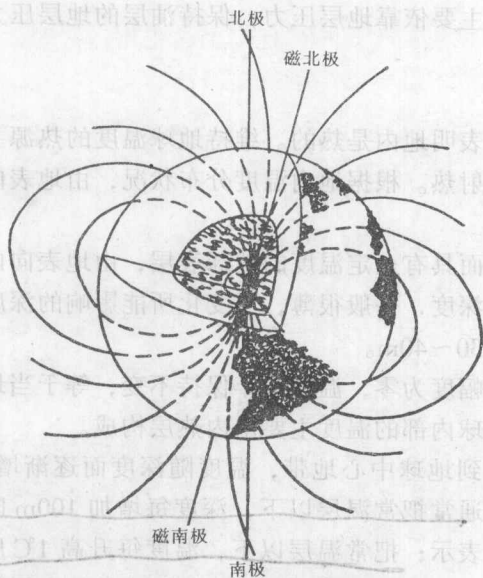


图 1-4 地磁场

称为地磁异常。引起地磁异常的原因一般与地下含有带磁性及反磁性的物体存在有关。地球物理磁法勘探就是利用这个原理寻找磁力异常区，从而发现地下深处隐伏的磁铁矿等高磁性矿床，还可以利用它来预测地震。

五、地球的弹性及塑性

地球具有弹性，表现在传播地震波，因为地震波是弹性波。地球具有塑性则表现在地壳中的岩层发生剧烈的弯曲变形及形成褶皱构造。地球内部的弹性状况是通过地震波在地球内部的传播速度来确定的。地震波分两大类型，一类能在地球内部传播的称为体波；另一类只能沿地面（界面）传播的称为面波。体波又包括纵波和横波两类。纵波是指质点振动方向与波传播方向一致的地震波，通常记作 P 波；横波是指质点振动方向与波传播方向垂直的地震波，通常记作 S 波。在地表介质中，纵波的传播速度比横波快 0.73 倍。面波是指沿界面或介质表面传播的地震波，通常记作 L 波，其速度只有横波速度的 $3/4$ 。

地震波速的快慢与物体的密度和弹性有关，它们的关系可用式 (1-2) 和式 (1-3) 表示：

$$v_P^2 = \frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \quad (1-2)$$

$$v_S^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-3)$$

式中 v_P ——纵波速度, m/s;
 v_S ——横波速度, m/s;
 ρ ——介质的密度, kg/m³;
 k ——介质体变模量, Pa;
 μ ——介质切变模量, Pa。

由式 (1-2) 和式 (1-3) 可见, 波速与密度成反比。与弹性模量成正比。在固体中纵波和横波都可传播, 而在液体中, 因切变模量为零, 故横波不能通过液体。

此外, 还有一种由大地震激起的地球自由振动, 它是地球所具有的, 周期为几分钟到 1h 的固有振动。研究这种振动有助于了解地球的内部构造。

第三节 地球的内部圈层构造特征

河流侵蚀地表岩石、采矿挖掘的矿井和坑道以及油气勘探钻井等, 这些都能揭示地球内部的一些情况, 但揭露的深度非常有限, 最深不超过 15km。即使是火山喷发物, 其最深来源也不超过 200km。因此, 探索地球深部奥密主要依靠地球物理等间接方法。

地球的物理性质, 特别是地震波传播速度随深度变化情况表明, 地球是非均质体, 地球内部具有明显的圈层构造特征。地震波速度变化明显的深度, 反映该深度上下的地球物质在成分上或物理状态上有改变, 或两者都有改变。这个深度标志着两种物质的分界面, 称为不连续面或界面。地球内部存在两个重要的一级不连续面, 即莫霍面和古登堡面, 以及一些次级不连续面。

莫霍面是由前南斯拉夫地震学家 A. 莫霍洛维奇 (Andrija Mohorovicic, 1857~1936 年) 于 1909 年发现的, 又称 M 间断面。莫霍面是地表向下的第一个一级不连续面。其使纵波波速由 7.6km/s 增至 8.0km/s, 横波波速由 4.2km/s 增至 4.4km/s。莫霍面深度不一, 大陆区平均为 35km, 最长达 70km 以上; 大洋区平均约 6km, 最薄不足 5km。古登堡面由美国地球物理学家 B. 古登堡 (B. Gutenberg, 1889~1960 年) 于 1914 年发现。古登堡面在地表以下约 2 900km 深处, 纵波波速由 13.64km/s 骤降为 7.98km/s, 横波则不能通过该界面 (见图 1-5)。



图 1-5 莫霍面与古登堡面处发生突变的波形

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 (见图 1-6), 各个圈层的化学成分、物理性质和物质状态都有显著区别, 并且还可划分出一些次级圈层 (见表 1-1)。

表 1-1 地球内部圈层及物理数据

圈 层			地震波速度, km/s			密度 g/cm ³	重力 加速度 cm/s ²	压力 10 ¹⁰ Pa	温度 ℃	附注	
名 称	代号	深度 km	纵波	横波							
		0	5.6	3.4	2.6	981	0.0	14	岩石圈		
地 壳	A	10	6.0	3.6	2.7	983	0.3	180~300			
			6.6	3.8	2.9						
莫 霍 面		33	7.6	4.2	3.0	984	1	400~1000			
			8.0	4.4	3.32						
地 幔	上地幔	低 速 带	60	8.2	4.6	3.34	984.7	1.9	500~1 100	软流层	
			150	7.7	4.0	3.5	987.5	4.9	800~1 400		
			250	8.2	4.55	3.6	989	6.8	1 000~1 600		
			400	9.0	4.98	3.85	994	14	1 200~2 000		
			C	9.84	11.43	6.35	4.6	994	40	1 850~3 000	物质不均匀
	下地幔	D									
	古 登 堡 面		2 898	13.32	7.11	5.7	1030	150	2 850~4 400	液态	
			8.1	0.0	9.7						
地 核	外 核	E	4 640	10.4	2.07	12.0	610	298	4 500~5 000		
	过渡层	F	4 900	10.4	1.24	12.2	500	320	4 700~5 700		
			5 155	11.0	3.6	12.7	430	332	4 720~5 720		
	内 核	G	6 371	11.3	3.7	13.0	0	370	5 000~6 000		

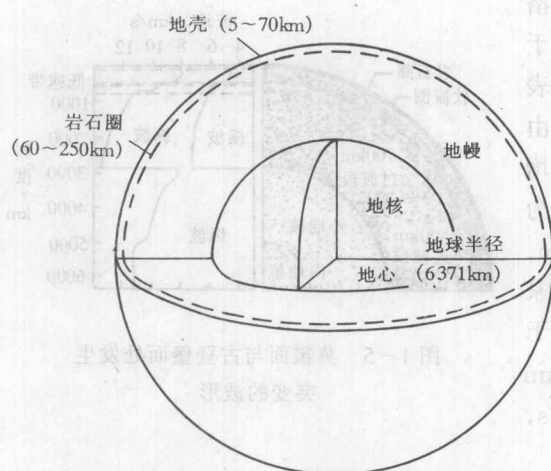


图 1-6 固体地球、地壳、岩石圈示意图

一、地壳

地壳是指地表至莫霍面之间的固体地球部分，是固体地球最外一个圈层。地壳由各类岩石组成，厚度变化大，大洋区较薄，最薄者不足 5km；大陆区较厚，最厚超过 70km。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 24×10^{24} g，占地球总质量的 0.4%。

地球内部圈层及物理数据见表 1-1 所示。

地壳可以分为大陆地壳和大洋地壳两种基本类型（见图 1-7）。大陆地壳（或陆壳）分布在大陆和被海水淹没的大陆边缘地区。陆壳厚度较大，平均 33~36km，但厚

度很不均匀。总体上陆壳厚度与地表地形起伏呈镜像关系。高山区和高原区地壳较厚,可达50~70km;丘陵和平原区较薄,厚度为30~40km,并向大陆架、大陆坡减薄为10~20km。陆壳由沉积岩层、硅铝层和硅镁层组成。沉积岩层分布在地壳最表层,由各种沉积岩或沉积物组成,平均厚度为1.8km,最大厚度达10km以上(如珠穆朗玛峰),在部分地区缺失。硅铝层位于地壳上部(或上地壳),主要由酸性岩浆岩和变质岩组成,主要成分为氧、硅、铝等轻元素,岩石成分相当于花岗岩成分,故又称为花岗质层,平均厚度为15~20km,平均密度为 $2.6\sim 2.7\text{g/cm}^3$;硅镁层位于地壳下部(或下地壳),主要由氧、硅、铁、镁等元素组成;岩石成分相当于玄武岩成分,故又称为玄武质层。平均厚度为15~20km,平均密度为 $2.9\sim 3.0\text{g/cm}^3$ 。

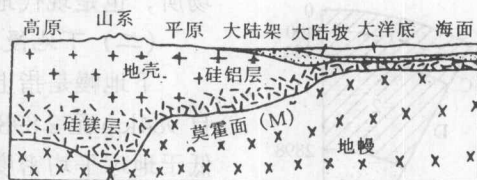


图1-7 地壳结构示意图

(据徐成彦等《普通地质学》,1988)

大洋地壳(或洋壳)分布在大洋盆地和洋中脊等洋底地区。洋壳厚度较小,平均厚度为6~8km,厚度较稳定,变化较小;一般洋中脊地壳最薄,有的小于5km;洋盆的地壳厚度较均匀,接近平均值,并向大陆方向增厚,在大陆斜坡下部向大陆地壳过渡。洋壳由沉积层和硅镁层组成,缺失在陆壳普遍发育的硅铝层。沉积层主要由0~2km厚的松散沉积物组成,洋中脊轴部一般缺失沉积层,平均密度 2.2g/cm^3 。硅镁层或玄武质层是洋壳的主要组成部分,由玄武岩、变质玄武岩或辉长岩组成,厚度一般为4~7km,密度约为 $2.9\sim 3.0\text{g/cm}^3$,成分较单一、稳定。

陆壳和洋壳存在较大的差异,高山区、高原区地壳厚度大,地壳密度较小;大洋区地壳厚度小,地壳密度较大。表明地壳下面的莫霍面起伏不平,使地壳的厚度各处不同,在横向上地壳的密度也不是均一的。因此,不同地形区在地下某一深度上,都存在着一个统一的重力等压面(或重力均衡补偿面)。在该均衡补偿面之上的地壳物质总质量大致相等,以达到重力平衡。这种地壳物质为适应重力作用,力求在深部的物质上达到平衡状态的现象,称为地壳的重力均衡或地壳均衡作用。地壳均衡作用在地史时期不断处于破坏和调整中,是引起地壳升降运动的一种重要因素。

二、地幔

莫霍面与古登堡面之间的地球圈层称为地幔,厚度达2865km,占地球体积的83%,质量约 $4030\times 10^{24}\text{g}$,占地球总质量的67.6%,平均密度为 4.5g/cm^3 。地幔物质横向变化比较均匀,根据地震波速变化特征,大致以984km为界将地幔分为上地幔和下地幔两部分(见图1-8)。

(一) 上地幔

上地幔是指莫霍面至深度为984km之间的地幔上部圈层,厚度为951km,平均密度为 3.5g/cm^3 。其主要成分为超基性岩,称为地幔岩,由55%的橄榄石、35%的辉石和10%的石榴子石组成,相当于石陨石成分。上地幔内地震波传播速度是不均匀的,在60~250km范围内地震波波速最低,称为低速带,又称为软流圈。据推测,上地幔是大量放射性元素集中带,放射热能导致地幔物质处于熔融状态,因此,软流圈是岩浆发源地。软流圈之上到地表,为地壳和上地幔岩石层,由固体岩石组成,故称岩石圈。它包括沉积岩层、花岗质层、