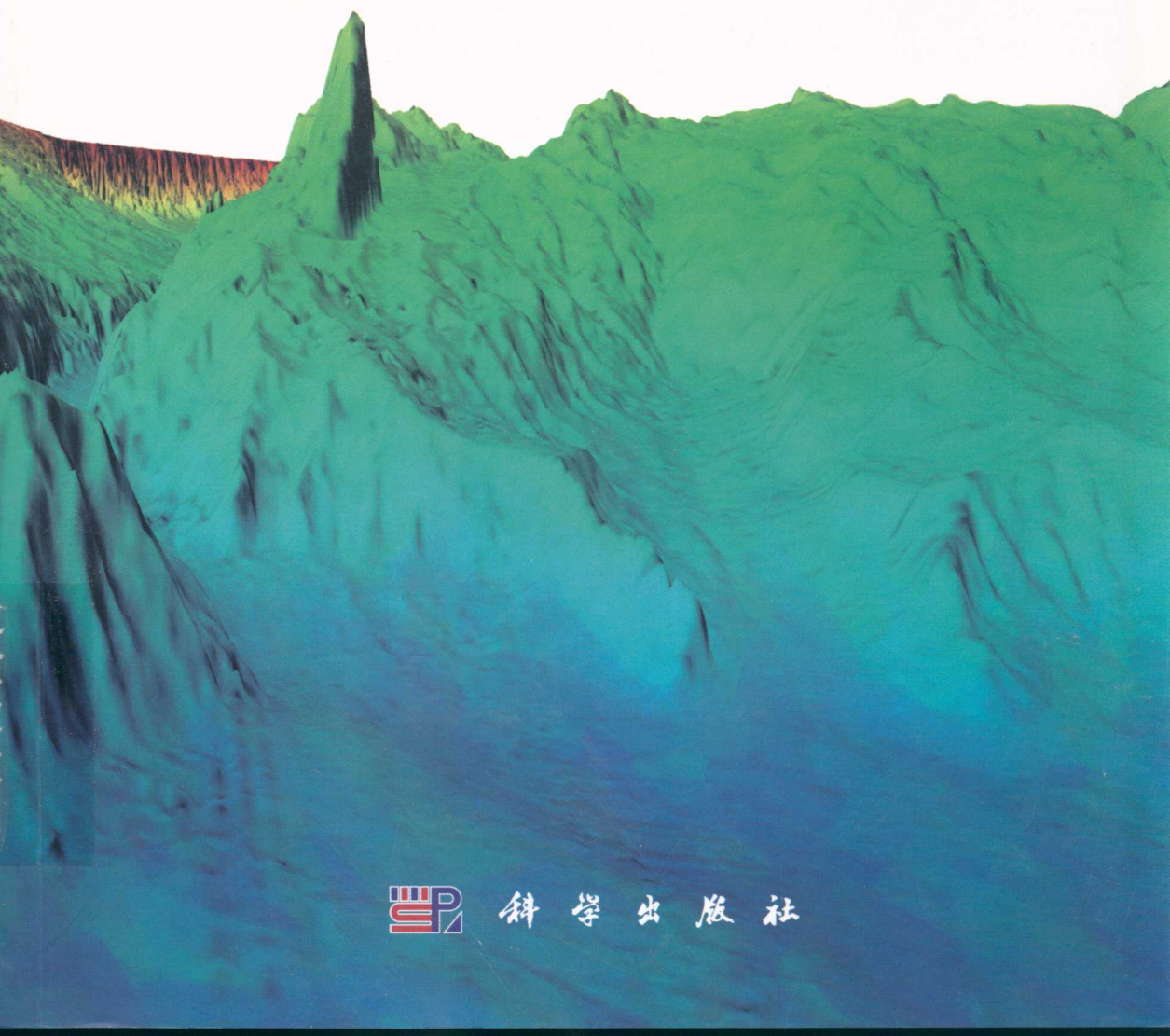


海底构造与 地球物理学

吴时国 张 健 编著



科学出版社

海底构造与地球物理学

吴时国 张 健 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书综合海洋地球物理、海底构造学和海洋地质学等学科近年来的研究成果,强调海洋地球物理与海底构造学之间的学科交叉,系统地介绍了海洋地球物理的基本理论与方法技术,厘定了海底构造和地球物理的基本概念,分析了学科的发展趋势和创新点,论述了海底构造的形成演化及动力学过程。

本书适合高等院校海洋、地质院系大学生和研究生作为教材使用,也力求满足海洋地质科技工作者、海洋油气和矿产勘探开发研究人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

海底构造与地球物理学 / 吴时国, 张健编著. —北京: 科学出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-03-040974-8

I. ①海… II. ①吴… ②张… III. ①海底-地质构造-研究生-教材 ②海底-地球物理学-研究生-教材 IV. ①P736.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 117668 号

责任编辑: 李 敏 周 杰 吕彩霞 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 李珊珊

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>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张: 24 插页: 2

字数: 400 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 一

正值中国科学院大学成立之际，吴时国、张健教授组织撰写《海底构造与地球物理学》一书，这对于中国科学院大学学生的培养，乃至海洋学界地质地球物理科学的研究都是一件意义深远的工作。我阅读之后，倍感欣慰。现谨手抄旧作七言诗一首，以表达对此书出版的大力支持。

狂想曲

大海揚帆天地闊。
雲濤蕩漾好唱歌。
水濺日暉彩虹橋，
魚龍起舞伴清波。
我欲踏浪游碧海。
須乘白鶴雲中來。
青龍引路玄水宮。
孔雀彩屏迎客開。
吳時國

吳時國
馬年春月
青島

序 二

海底构造与地球物理学科在中国科学院海洋研究所（简称海洋所）已有 50 多年的发展历史。1958 年，海洋地质地貌研究室成立之初，就设立了地质构造研究组（简称构造组）。那时，海洋所以海-陆-空立体模式全面发展与建设构造组，从苏联及国内相关单位引进了海底重力仪、深地壳测震仪、海底照相机等，组建海洋地震队，率先开展了渤海和南黄海的构造特征的调查实验，并与原石油部 641 厂合作完成了渤海第一口油井调查。

1978 年后，海底构造与地球物理学科迎来了科学的春天。海洋所建立了“科学一号”车载地质地球物理实验室，引进了先进的仪器设备，开始了真正意义上的海洋地球物理调查研究。由于那时主要使用地震、重力、地磁等地球物理手段研究海洋地质构造问题，所以当时及以后的构造组，也被称为“构造地球物理研究组”。1997 年年底，有关同志提出研究“边缘海形成演化及其资源环境效应”的建议，经国家重点基础研究发展规划小组同意后，1999 年 5 月海洋所联合中国科学院地球物理研究所、国家海洋局第二海洋研究所，正式提交了《中国边缘海形成演化及其资源环境效应》建议书，主要建议人有刘光鼎、金翔龙、秦蕴珊、高抒等。2000 年 3 月 28 日，该项目经过协调，演变为由中国科学院、国家海洋局、国土资源部联合推荐的“中国边缘海的形成演化及重要资源的关键问题”，被正式批准为 973 计划项目。

在那段艰苦奋斗的岁月里，海底构造与地球物理研究主要集中在石油等工程勘探开发中的地质地球物理调查、数字地震与海底地壳热动力学和海底地形与数字制图方面。同时，一系列的科研任务得以完成，如“东海及邻近地壳结构、构造特征和油气资源的研究”，“东海至菲律宾海的深部构造与构造演化”，“中国东南海陆岩石圈组成、结构和构造演化”等中国科学院与国家自然科学基金委员会的重大科研项目，此外还有中日东海海底地热调查研究以及国家“七五”、“八五”、“九五”相

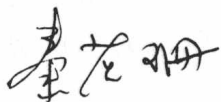
关海洋调查研究计划。

2000年以后的十年，由于仪器老化和人员调动等问题，海洋所海底构造与地球物理学科与兄弟单位相比发展迟缓，主要研究工作局限在大陆边缘反射地震、重磁测量及其在深水油气与天然气水合物等资源探测方面的应用基础研究。

2012年，随着大科学工程“科学”号考察船的正式下水，海洋所海底构造与地球物理学科迎来了历史最好机遇。该船装备有全海深多波束系统、多道数字地震系统、海底地震仪、重磁测量、声学深拖、ROV、电视抓斗等先进设备，完全具备进军深海大洋考察的能力，将实现我国的深海探测目标。

海底构造与地球物理学科在海洋所发展50余年，具有很好的历史沉淀。该学科不但放响了我国海洋构造地球物理调查研究的第一炮，获得了我国第一张海底地震剖面，吹响了我国向大陆架进军的号角，而且培养和锻炼出了大批专业人员。目前，海底构造与地球物理学科研究组正以饱满的热情，承担中国科学院科技先导专项课题，进军西太平洋深海探测。

海底构造与地球物理学是海洋科学的重要组成部分，中国科学院吴时国研究员、张健教授组织撰写《海底构造与地球物理学》一书，既是对中国科学院“海底构造与地球物理”学科的传承，也是中国科学院大学研究生培养工作的客观需求。这是一件非常有价值的工作，我十分乐意为此书作序，并希望此书能够激励年轻的研究生们将此学科继续发扬光大，为谱写新的篇章而努力奋斗。



2013年8月15日

前 言

本书编者自 1984 年大学毕业至今,从事地学研究工作近 30 年,致力于海底构造与地球物理学的专门研究也已有 20 年。在职业生涯中,我们一直秉承地质与地球物理相结合的原则,把地球物理技术用于海底构造科学研究与资源探测。尽管海底构造是从海洋地球物理的调查发展而来,与地球物理学有着不可分割的密切关系,但是,由于研究水平所限,关于两者的交叉是否形成“海洋构造与地球物理”这一新学科仍不确定。所以,我们仍以《海底构造与地球物理学》作为书名,希望年轻的研究生在研读此书的基础上能够提炼出一个新学科,明确学科解决的科学目标,完善研究手段与技术方法,加强海上现场调查,突破关键科学问题。《海底构造与地球物理学》一书共 14 章,其中第 1 章与第 2 章为地球系统的基础知识和研究手段与方法介绍,第 3~9 章为海洋地球物理原理和方法,第 10~14 章为海底构造学的相关内容。此书综合了“海底构造学”和“海洋地球物理学”两个学科的基础知识、基本理论,按照少而精的原则精简和调整,根据近年来的发展趋势充实了新的研究成果,从而使这部书兼备基础性和前沿性。

本书主要目的是供中国科学院大学地质、地球物理、海洋、大气等相关学科的研究生参考。本书的编写以中国科学院大学地球科学学院教学大纲为基础,并结合了最近 5 年来的教学实践和教学经验。为了加深学生对本书内容的理解,巩固对授课内容的记忆,在每章节之后均列有若干思考题。为提高教学效果,建议选此书为教材的教师在课堂上组织学生对某些习题开展讨论、争论,培养学生独立分析问题、解决问题的能力。

与此同时,海底构造学与地球物理学在海洋研究中不断发展和突破,但在某些重要方面仍处于探索阶段,一些前沿研究迄今还无定论。本书也吸收了海底构造与地球物理研究的前沿成果,对于海洋院系大学生、海洋地质科技工作者、海洋油气和矿产勘探学家具有重要的参

考价值。

本书由中国科学院海洋研究所海底构造与地球物理学科组和中国科学院大学地球动力学学科组共同完成, 35 位同志提供了大量的研究材料。在本书中做出重要贡献的同志有 (按姓名笔画排序): 于磊、马本俊、王大伟、王吉亮、王秀娟、王真真、王磊、田洁、孙启良、苏道磊、杨振、李午阳、李伟、李翠琳、张峤、张新元、陈传绪、陈泽满、陈端新、范建柯、罗青、孟林、赵芳、赵俐红、侯正瑜、贾连凯、钱进、栾奕、高金尉、高翔、黄昱丞、曹令敏、董冬冬。

在本书稿完成之际, 特别感谢中国科学院海洋研究所和中国科学院大学的领导和同事的支持和关心, 感谢上述 35 位同志的努力工作。为完成本书, 编写组曾多次开会商讨编写大纲, 汇集意见。特别是编写过程中, 刘光鼎院士、秦蕴珊院士提出了宝贵的意见和建议, 在此一并感谢。

限于作者写作水平, 书中难免有不足之处, 敬请读者批评、指正!

吴时国 张 健

2013 年 7 月 16 日

目 录

第1章 地球系统	(1)
1.1 地球结构与内部物质组成	(1)
1.1.1 地球基本结构	(1)
1.1.2 地球内部物质组成	(5)
1.2 地球表面特征和物理性质	(8)
1.2.1 地球的表面特征	(8)
1.2.2 地球的物理性质	(10)
1.3 地层单位和地质年代	(12)
1.4 海洋科学概述	(14)
1.4.1 海与洋	(14)
1.4.2 海洋科学发展历史	(15)
1.4.3 海洋地质学	(17)
1.4.4 海底矿产资源	(18)
1.5 思考题	(22)
第2章 海底构造与地球物理研究方法和手段	(23)
2.1 概述	(23)
2.2 船载地球物理调查	(24)
2.2.1 海洋科学考察船	(24)
2.2.2 常用船载地球物理方法	(27)
2.2.3 深拖技术	(28)
2.3 海底观测系统	(29)
2.3.1 载人潜器	(29)
2.3.2 无人潜器	(31)
2.3.3 深海海底观测网络	(32)
2.3.4 海底地球物理系统	(36)
2.4 海底钻探	(37)
2.4.1 钻探技术	(37)
2.4.2 测井技术	(37)
2.4.3 岩石地球化学方法	(39)

2.5 思考题	(40)
第3章 海底地形地貌	(42)
3.1 概述	(42)
3.2 海底地形的声波探测原理	(44)
3.2.1 利用声波确定海底地貌	(44)
3.2.2 回声测深法	(45)
3.2.3 旁侧声呐测深法	(47)
3.2.4 多换能器测深法	(49)
3.2.5 多波束测深法	(51)
3.2.6 具有旁侧声呐和多波束组合功能的多波束测深法	(55)
3.3 海底地形地貌的研究实例	(56)
3.3.1 马里亚纳海沟地形地貌	(56)
3.3.2 大西洋中脊 Oceanographer 转换断层地形地貌	(57)
3.3.3 台湾岛东海岸海底峡谷地形地貌	(58)
3.3.4 孟加拉湾深海扇地形地貌	(59)
3.3.5 南海陆架海海底沙波地貌	(60)
3.4 思考题	(62)
第4章 海洋地震探测	(63)
4.1 概述	(63)
4.2 海洋反射地震探测原理与方法	(64)
4.2.1 地震波的传播	(64)
4.2.2 海洋反射地震探测	(65)
4.2.3 共炮点反射波时距曲线方程	(70)
4.3 海底折射地震探测原理与方法	(74)
4.3.1 层状介质中的传播	(74)
4.3.2 速度梯度和波的传播	(76)
4.4 地震数据采集与资料处理技术	(80)
4.4.1 地震数据采集	(80)
4.4.2 地震资料处理技术	(89)
4.5 应用实例	(100)
4.5.1 海洋2D反射地震资料处理	(100)
4.5.2 OBS数据处理	(109)
4.6 思考题	(115)
第5章 海洋重磁测量	(116)
5.1 概述	(116)

5.2 海洋重磁测量原理	(117)
5.2.1 海洋重力测量	(117)
5.2.2 海上磁异常测量	(119)
5.3 海上重磁采集技术与数据处理方法	(121)
5.3.1 海上重力采集技术与数据处理方法	(121)
5.3.2 海上磁法采集技术与数据处理方法	(127)
5.4 应用实例	(134)
5.5 思考题	(135)
第6章 海洋地热测量	(136)
6.1 概述	(136)
6.2 海洋地热测量原理	(136)
6.2.1 大地热流密度	(136)
6.2.2 岩石热传导理论	(140)
6.2.3 地热来源	(142)
6.3 海底热流测量方法与技术	(144)
6.3.1 海底热流测量简介	(144)
6.3.2 地温梯度的测量	(146)
6.3.3 热导率的测量	(148)
6.4 应用实例	(150)
6.4.1 海底沉积与剥蚀	(150)
6.4.2 海底地形与热流	(151)
6.4.3 冷却海底模型	(152)
6.4.4 海底的热对流	(152)
6.4.5 盆地拉张的热流	(153)
6.5 思考题	(154)
第7章 海洋电磁法	(155)
7.1 概述	(155)
7.2 方法原理	(155)
7.2.1 自然极化法	(155)
7.2.2 激发极化法	(156)
7.2.3 直流电阻率法	(156)
7.2.4 大地电磁法	(158)
7.2.5 磁测电阻率法	(159)
7.2.6 可控源电磁法 (CSEM)	(160)
7.2.7 海底静态测量法	(161)

7.3 应用实例	(162)
7.3.1 大陆架调查	(162)
7.3.2 深海测量	(162)
7.3.3 拖拽式可控源系统及其在油气勘探中的应用	(164)
7.4 思考题	(168)
第8章 放射性测量	(169)
8.1 概述	(169)
8.2 方法原理	(169)
8.2.1 地球内部 γ 射线的放射	(169)
8.2.2 γ 射线的衰减	(171)
8.2.3 γ 射线通量的测量	(171)
8.2.4 元素丰度的估计	(172)
8.2.5 用于海底勘探的 γ 射线探测器	(174)
8.3 应用实例	(175)
8.3.1 海格福热斯花岗岩	(175)
8.3.2 深海放射性探测剖面	(176)
8.4 思考题	(178)
第9章 海洋地球物理测井	(179)
9.1 概述	(179)
9.2 基本原理	(179)
9.2.1 电阻率测井	(179)
9.2.2 放射性测井	(184)
9.2.3 声波速度测井	(186)
9.2.4 其他测井技术	(188)
9.3 应用实例	(192)
9.3.1 综合解释 DSDP 395A 钻孔的火山岩层序	(192)
9.3.2 利用电测井曲线识别裂隙中充填的天然气水合物	(196)
9.4 思考题	(201)
第10章 海底构造理论	(202)
10.1 洋壳	(202)
10.1.1 洋壳结构	(202)
10.1.2 洋壳的起源	(203)
10.1.3 洋壳的演化	(204)
10.2 岩石物理	(205)
10.2.1 脆性和塑性	(205)

10.2.2 岩石流变学	(205)
10.2.3 地幔的流变学	(205)
10.2.4 地壳的流变学	(205)
10.2.5 完全弹性的塑性流变学	(206)
10.2.6 流变学模型	(207)
10.2.7 黏弹性物质的流变学方程	(207)
10.3 地壳的垂直运动与水平运动	(208)
10.3.1 地壳的垂直运动	(209)
10.3.2 地壳水平运动	(211)
10.4 从大陆漂移到板块构造	(215)
10.4.1 大陆漂移学说	(215)
10.4.2 海底扩张学说	(218)
10.4.3 板块构造学说	(221)
10.5 威尔逊旋回	(224)
10.6 思考题	(226)
第 11 章 大陆边缘构造	(227)
11.1 活动大陆边缘	(228)
11.1.1 活动大陆边缘的构造单元	(228)
11.1.2 俯冲带的特征	(233)
11.1.3 俯冲带的类型	(238)
11.1.4 洋脊俯冲	(239)
11.1.5 边缘海盆地	(242)
11.2 被动大陆边缘	(243)
11.2.1 被动大陆边缘的地形地貌特征	(244)
11.2.2 被动大陆边缘的伸展减薄	(245)
11.2.3 被动大陆边缘岩石圈的变形	(249)
11.2.4 被动大陆边缘裂谷盆地的动力学过程	(253)
11.3 转换大陆边缘	(255)
11.3.1 典型转换大陆边缘	(256)
11.3.2 走滑边缘的构造演化	(258)
11.3.3 走滑边缘的发育阶段	(261)
11.4 思考题	(262)
第 12 章 大洋中脊	(263)
12.1 大洋中脊的类型与特征	(264)
12.1.1 大洋中脊类型	(264)

12.1.2 大洋中脊特征	(265)
12.2 结构构造	(271)
12.2.1 地球物理场	(271)
12.2.2 岩石圈结构	(273)
12.2.3 洋中脊的岩浆房	(273)
12.2.4 洋中脊下的底辟构造	(274)
12.2.5 大洋核杂岩	(276)
12.3 海底扩张运动学与动力学	(278)
12.3.1 海底构造运动	(278)
12.3.2 海底磁异常与古地磁反转	(278)
12.3.3 海底扩张动力学机制	(285)
12.4 转换断层	(287)
12.4.1 转换断层的类型	(287)
12.4.2 转换断层的特征	(288)
12.4.3 转换断层的形成机制	(289)
12.4.4 转换断层的作用	(290)
12.5 思考题	(291)
第13章 大洋盆地构造	(292)
13.1 大洋盆地	(292)
13.1.1 大洋盆地的特征	(292)
13.1.2 深海沉积	(293)
13.2 海山	(294)
13.2.1 海山的概念	(294)
13.2.2 海山分布特征	(295)
13.2.3 太平洋板内海山成因	(296)
13.3 大火成岩省	(300)
13.3.1 大火成岩省的特征	(300)
13.3.2 大火成岩省的组成和类型	(304)
13.3.3 大火成岩省形成的源区和构造背景	(305)
13.4 地幔热点	(306)
13.4.1 地幔热点定义	(306)
13.4.2 地幔柱的形态	(307)
13.4.3 地幔热点的类型与分布	(307)
13.4.4 热点成因	(309)
13.4.5 热点与洋中脊的相互作用	(312)

13.4.6 地幔柱假说的贡献及局限性	(317)
13.5 思考题	(319)
第14章 海底构造与地球物理学的前沿领域	(320)
14.1 国家海洋计划	(320)
14.2 国际海底科学钻探计划	(321)
14.2.1 深海钻探计划	(321)
14.2.2 大洋钻探计划	(321)
14.2.3 综合大洋钻探计划	(322)
14.2.4 国际大洋发现计划	(322)
14.3 我国海底探测技术的若干进展	(323)
14.3.1 海底地震仪	(323)
14.3.2 海底电磁仪	(324)
14.3.3 海洋放射性探测设备	(325)
14.3.4 深潜器	(326)
14.3.5 国际海底探测技术发展趋势	(327)
14.4 若干科学前沿	(327)
14.4.1 核幔边界动力学	(327)
14.4.2 俯冲工厂	(332)
14.4.3 洋脊俯冲	(334)
14.4.4 大陆边缘张裂过程	(335)
14.4.5 深水盆地演化	(340)
14.4.6 大洋中脊	(344)
14.5 思考题	(346)
参考文献	(347)

第 1 章 | 地球系统

1.1 地球结构与内部物质组成

1.1.1 地球基本结构

地球是太阳系中一颗重要的行星，它近似球体，但表面形状很不规则（图 1-1）。通常，借助大地水准面与最接近地球形状的旋转椭球体之间的偏差，确定地球形状和研究地球表面的不规则性。赤道半径为 6378.164km，极半径为 6356.779km，赤道半径/极半径约为 1.003，扁率约为 0.003 35，平均半径约为 6371.02km，表面积为 $5.1007 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，体积为 $1.0832 \times 10^{12} \text{ km}^3$ 。

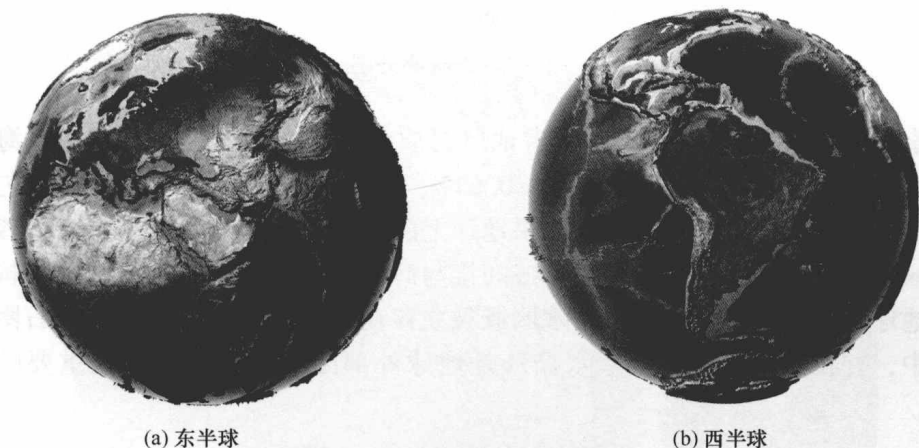


图 1-1 地球形状

1.1.1.1 地球外部圈层

地球外部圈层主要包括大气圈、水圈等。大气圈总质量估计为 $5.136 \times 10^{18} \text{ kg}$ ，约为地球总质量的 0.000 09%。由于地心引力，大气圈 79% 的质量都集中在海平面以上 18km 范围内。大气圈的密度和压力与高度成反比，在 0℃ 条件下，干燥空气的气压直减率为每上升 20km 气压减小 10 倍（限 60km 高度以下）。大气的温度随高度变化而变化，通常根据大气中温度随高度垂直分布的特征，将大气圈划分为对流层、平流层、中间层、热层和逸散层（图 1-2）。

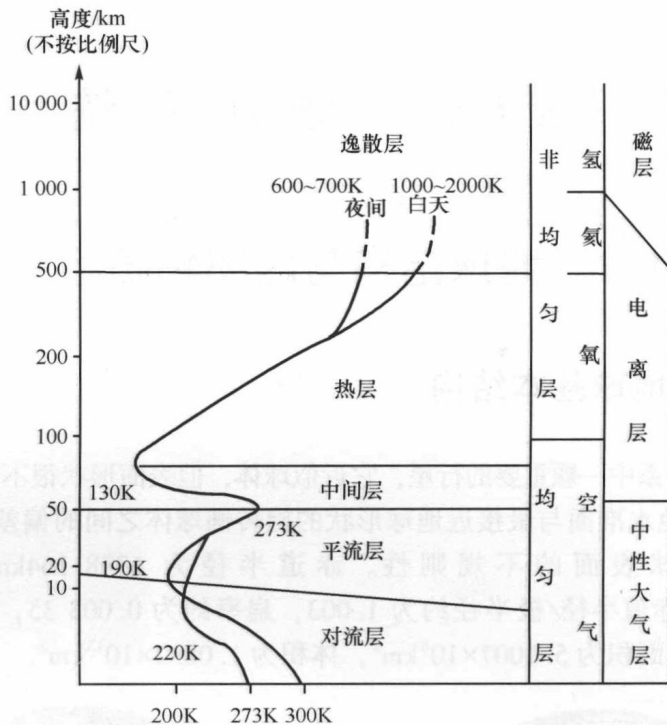


图 1-2 大气圈分层

水圈的质量约 1.45×10^{21} kg，占地球总质量的 0.0254% 左右。其中，海水占 97.15%，冰川占 2.21%，其他水占 0.64%。假如地表平坦，全球水体均匀覆盖地面，则平均水深可达 2745m。如果地球上的冰雪全部融化，则海平面将普遍升高 70m。陆上江河湖沼的水或直接或间接与海洋相通，所以地球上的水体构成了包围地球的完整圈层——水圈。水圈既独立存在，又渗透于大气圈、岩石圈和生物圈中，并在其间不断循环。水循环是地球外部圈层物质循环中最重要的方式之一。

1.1.1.2 地球内部圈层

地球内部圈层按照组成成分的变化分为地壳、地幔、地核三个圈层，按照物质的力学或流变学性质变化分为岩石圈、软流圈。

对地壳、地幔、地核圈层结构的认识主要来自地震波资料。据此，地球内部圈层结构被莫霍面（M 面）和古登堡面（G 面）划分为地壳、地幔和地核三部分（图 1-3）。

(1) 分界面

1) 莫霍（M）面。1909 年南斯拉夫的地震学家莫霍洛维奇发现，地震波速度由 5.6 km/s 逐渐增大到 7.6 km/s 后，突然变化到 8.0~8.2 km/s。以后，人们就把这个间断面称为莫霍面或 M 面。M 面以上部分称地壳，以下部分称地幔（图 1-3）。