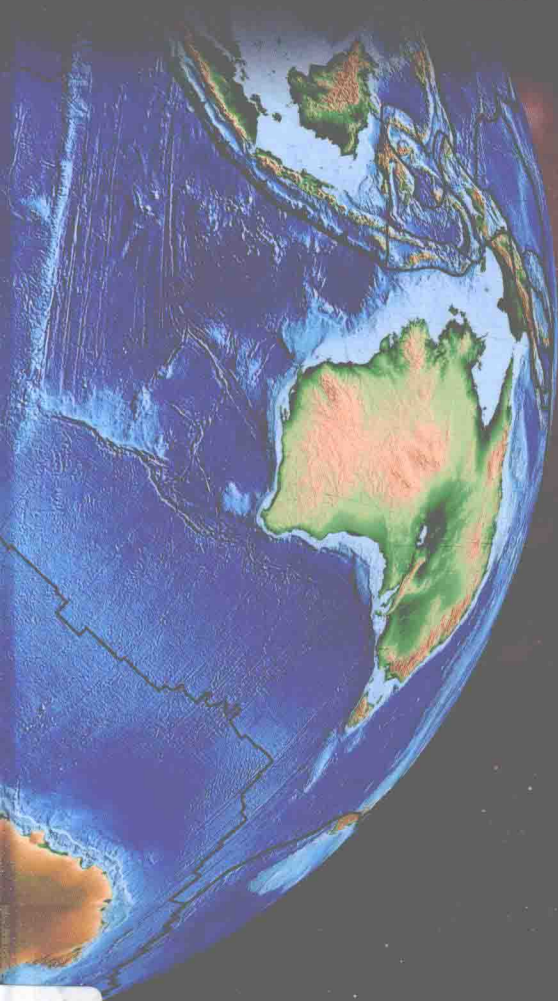


海底科学与技术丛书

PRINCIPLES OF SUBMARINE  
TECTONICS

# 海底构造原理

李三忠 索艳慧 郭玲莉/编著



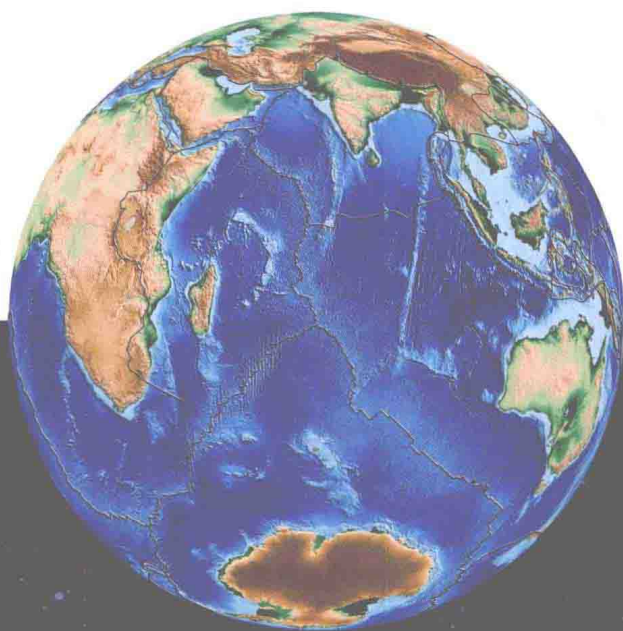
科学出版社

海底科学与技术丛书

# 海底构造原理

PRINCIPLES OF SUBMARINE  
TECTONICS

李三忠 索艳慧 郭玲莉/编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以地球系统为理念,以地球结构构造和物质组成的起源为主线,深入浅出地系统介绍了地壳、地幔和地核的基本概念、本质内涵和前沿研究;从现象到本质,从过程到机理,由表及里重点并系统介绍了地球、海水、洋壳、洋幔的成因认识、基本特征、发展与运行规律;按照认知海底构造的思想起源顺序,凝练概括了相关学说,包括大陆漂移学说、海底扩张学说、板块构造学说、地幔柱学说和前板块构造的发展历程、基本内容、基本原理、主要证据。

本书资料系统、图件精美,适用于从事海底科学研究的专业人员和大中专院校师生阅读。部分前沿知识,也可供对大地构造学、构造地质学、地球物理学、海洋地质学感兴趣的广大科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海底构造原理/李三忠,索艳慧,郭玲莉编著. —北京:科学出版社, 2017.9

(海底科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-053593-1

I. ①海… II. ①李… ②索… ③郭… III. ①海底-地质构造 IV. ①P736.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 131971 号

责任编辑:周 杰 / 责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴 / 封面设计:无极书装

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

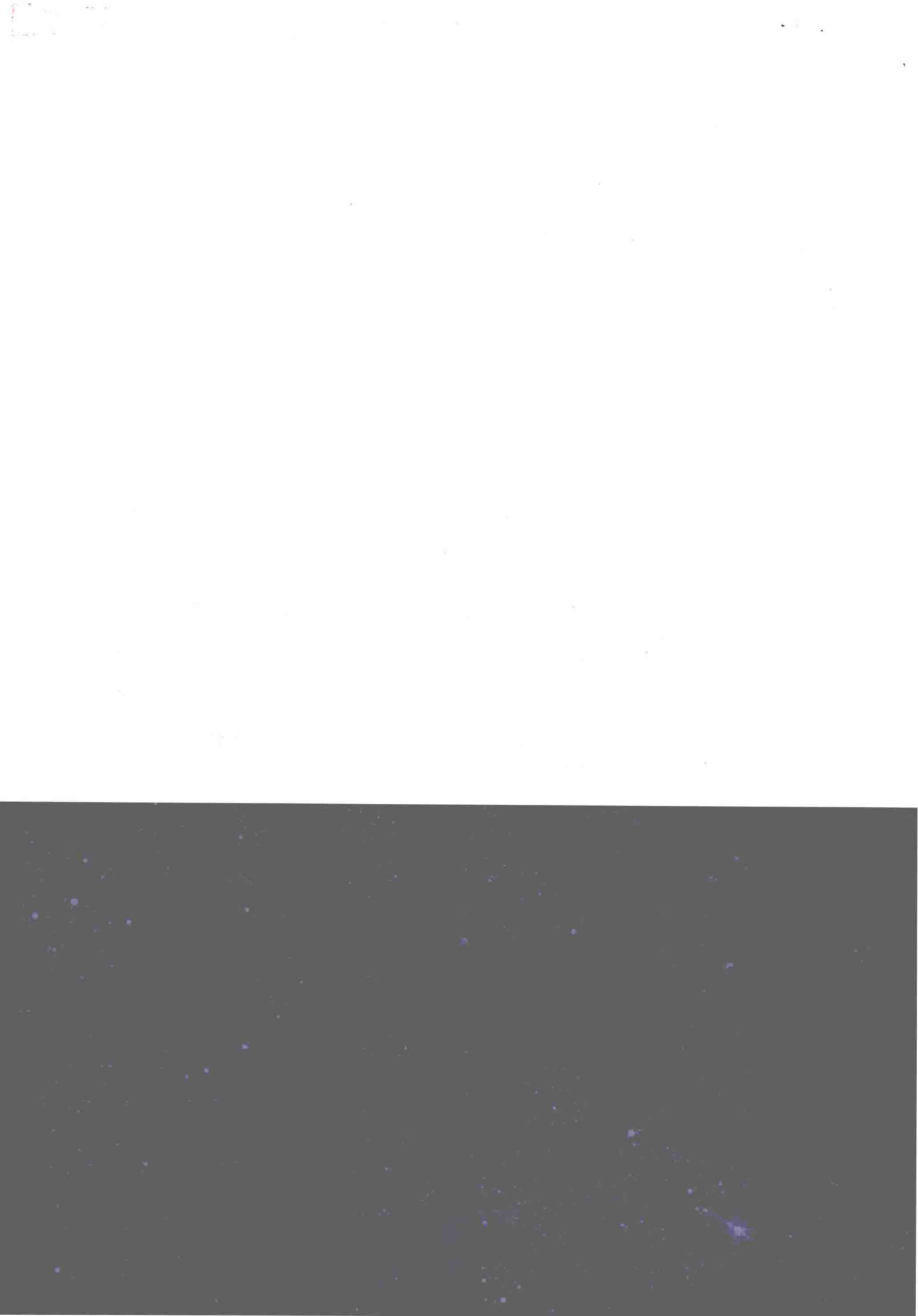
2017 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 9 月第一次印刷 印张:19

字数:460 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 序

该书是一部关于海底地质与构造的教科书，若简要回顾地质科学的研究发展历程，就会深有感知地认识到，这是一本综合海洋地质与地质科学的跨学科教材。

人类社会的自然科学，以宇宙客观存在的自然规律为研究对象。人类自诞生以来，历经发现认知自然的人类社会历程长期实践与探索研究，满足人类社会发展的实际需求与追求的同时，观察、体验、实验、检验、论证、应用，不断发展深化扩展，才逐渐构成既密切相关统一而又各自相对独立的科学规律系统，形成现今的自然科学与技术体系，统称为自然科学。现今它通常又分为数学、物理、化学、生物、地球科学等自然科学门类。显然，地球科学是自然科学中一门主要的基本科学门类，是以地球为主要研究对象的系统科学。地球科学是一门内涵复杂的综合科学体系，现今通常又有地质（地球化学）、地理、大气、海洋、地球物理等五个学科的划分。其中，海洋科学又分为海洋地质、物理海洋、海洋化学、海洋生物等多个分支学科。海洋地质是海洋科学的主要基础学科，它与地质科学密不可分，可以说它就是对海洋科学中关于海洋底部固体及其周边的地质科学问题以及与海洋水体关系的探索研究，所以可简称为海底科学。相对于以水为主体的流体海洋学而言，它是关于固体海洋学的研究，因此它又是海洋与地质两学科的交叉学科的分支学科。海洋地质与地质科学密不可分，它实际亦即地质科学不可或缺的基本组成部分。自然，它首先是海洋科学最基本的学科。海洋地质包括了海洋底部固体的组成、结构、形成演化与动力学及各种效应等科学内涵系统。这部《海底构造原理》就是侧重海底组成、结构构造及其形成演化基本内容与理论的一部最新著作，是一部在前人成果基础上集最新研究的一部最新教科书。

纵观地质科学作为地球科学的主要基础学科，其形成发展已经历了漫长的历程，从远古的启蒙、地质知识积累、学科及其分支学科建立发展到近代和现代地质科学的形成。随着人类社会的发展，源远流长，即使是近代与现代地质科学的发展也已有 200 多年的历史。历经人类远古和古代有关地球与宇宙的实际感知与需求、早期相关哲学思辨与猜想，从初始的启蒙到初期的认知积累，人类有了一定的地质学发现与认识，尤其随着欧洲中世纪后期文艺复兴的社会重大发展，自然科学，包括

地质科学，都从宗教神学禁锢下解放出来，有了新的大发展。这时的地质科学已有一些先贤的重要学术思想与观点阐述发表，但总体还未形成系统独立的学科。直到18世纪中后叶开始，以瑞士德吕克（J. A. Deluc）1793年首次提出 Geology 一词，把地质学正式从原先的博物学中独立出来为标志，地质学才较快地发展，兴起野外地质的直接观察研究，地质理论、方法和学科及其分支学科才逐步建立。到18世纪中期，欧洲已建立起比较完善的近代地质学理论与方法体系，系列古典代表性论著出版，诸如布丰（G. L. Buffon）的《地球的理论》（1749），罗蒙诺索夫（M. B. Lomonosov）的《论地层》（1763），维尔纳（A. G. Werner）的《岩层的简明分类和描述》（1787），赫顿（J. Hutton）的《地球学说：证据和说明》，尤其是莱伊尔（C. Lyell）的《地质学原理》（1831~1833）和丹纳（J. D. Dana）的《系统矿物学》（1837）（中国1871年以《金石识别》翻译出版）以及《地球冷缩的某些结果——兼论山脉起源及地球内部的性质》（1873）提出“地壳均衡”原理与地槽说 [霍尔（J. Hall）先曾于1859年提出沉积区转化为造山带，后又为丹纳命名为地槽]，休斯（E. Suess）的《地球的面貌》（1865~1909），直到魏格纳（A. Wegener）的《大陆和海洋的形成》（1915）提出大陆漂移说等。在这个时期，地质科学发展中突出而重要的是持续发生了几次关于地球科学的学术大论争。如果说前期曾有“宇宙神创论”与“宇宙起源论”“日心说”与“地心说”“地平说”与“地球（圆）说”等的激烈带有宗教和社会政治色彩斗争的话，这一时期则主要是“水成论”与“火成论”“突（灾）变说”与“渐变说”和“固定论”与“活动论”激烈的学术争论。直到20世纪初，以魏格纳为代表的地壳水平运动活动论提出大陆漂移说，更激起了世界地学界的强烈论战，当时受到地球物理学界的激烈质疑与反对，由于魏格纳本人因灾难突然逝世和他的假说本身的不完善性，活动论的大陆漂移说随之沉寂下去，固定论与地槽说仍在地学界占主导。但在20世纪40~50年代，第二次世界大战以后，国际海洋的竞争和军事需求，全球范围的海洋地质和海洋地球物理调查研究得以广泛开展，先后发现了海洋地貌系统、大洋中脊系统、海底磁异常条带、转换断层等。基于系列海底科学的重要新发现新发展，以及20世纪50年代后期古地磁学进展，赫斯（H. H. Hess）和迪茨（R. S. Dietz）首先于1961~1962年提出了海底扩张说，威尔逊（J. T. Wilson）于1963年提出了转换断层与威尔逊演化旋回。因之，大陆漂移说再度兴起，并由勒皮雄（X. Lepichon）、摩根（W. J. Morgan）和麦肯齐（R. P. McKenzie）于1968年提出了板块构造理论，引起了20世纪一场深刻的地学革命，引领和改变了地球科学几乎每一个分支学科新的发展，使地质科学发展进入到以活动论板块构造说为主导的现代地质科学发展阶段。

在地质科学发展历史中，中国地质科学同样经历了上述与西方相似而又不同的历程。我国在远古和古代时期，先人活动路径上的生物和矿产资源分布的认识在

《山海经》中就有了记录,到春秋战国时代(公元前5~3世纪),地学蒙发与认识毫不逊色于西方的希腊、罗马,11~12世纪到16~17世纪中期中国的沈括、朱熹、李时珍、徐霞客等关于地学的认知与论述,与之同时代的西方欧美国家也同等并有过之。但是自17世纪中叶中国明朝闭关自守,已无大作为,逐渐落后于西方。直到19世纪(1884年后),被迫开放,外国学者开始进入中国调查,主要学者如李希霍芬(F. Richthofen)、维理士(B. Willis)、奥布鲁契夫(V. A. Obrutchev)、马高温(Mcgowou)、慕威廉(Muirhead,他编著的“地理全志”中首次使用中文“地质”一词)、葛利普(A. W. Grabau)等。到20世纪早期章鸿钊、丁文江、翁文灏三位作为中国地质事业的奠基者,开始组建发展中国地质学及研究机构。中国人自己撰写地质文献的第一人是周树人(鲁迅,1903,1906)。后来李四光的《中国地质》(1939)、黄汲清的《中国主要构造单元》(1945)等先后发表,在国内外都有广泛的影响。中华人民共和国成立后,地质事业蓬勃全面发展,建立了完整的地质建制和科研、教育等系统,为国家做出了突出卓越贡献。其中,以20世纪五六十年代李四光、黄汲清、张文佑、张伯声、陈国达等中国大地构造的五大学派的活跃发展为代表,显示了中国地质科学的巨大发展,但这时地质科学学术思想仍以固定论的台槽说占主导。而板块构造最早是由尹赞勋、傅承义引入中国,国内李春昱等先后运用板块构造学说、地体学说解释了中国大地构造演化。随后,经历追踪引入和根据中国实际的探索创造,进入并行与创新发展的过程,板块构造被广泛应用并逐渐占据主导,极大地推动深化发展了中国地质科学。

但是,板块构造主要是植根于大洋海底构造研究基础上的,而且主要论述地球固体外壳的物理运动问题,其深层动力学问题只是借助了霍姆斯(A. Holmes)于1928~1931年提出的地幔对流说,但该假说至今仍有争论。20世纪中晚期,随着板块构造“登陆”,其对大陆的研究与验证,一方面推动深化发展了大陆问题,另一方面也暴露出板块构造原理的局限性:它不能完全认知和解释大陆问题,大陆地质具有复杂独特性,大陆不同于大洋,两者虽同是地球外壳统一的两个组成单元,两者从组成、结构、演化形成历史,从地壳到地幔虽有共同相似性,但更有本质差异,故大陆地质与大陆构造独具的多样复杂性不完全符合经典板块构造理论模式。因此,国际地学界开始涌现构造地质学和大地构造学未来发展方向的新思维,提出发展乃至超越板块构造(Beyond Plate Tectonics)的新观点,并提出将大陆流变学作为发展板块构造探索大陆地质和大陆构造与动力学研究的新起点。以1990年美国自然科学基金委发表的《大陆动力学》为代表,提出了大陆动力学问题,成为当代地球科学前沿主要研究领域之一。然而,20多年的探索,大陆动力学研究尚无根本性突破,目前仍处于整合集中统一更深入综合的研究进程之中。

当代大地构造学正面临板块构造发展的三大难题:板块起源、板块动力和板块

上陆问题,现正以统一整体地球系统科学思想,上天、入地、下海,深化发展当代占主导的板块构造,创建包括板块构造在内的新的地球构造观与理论。因之表明,当前地球科学正处于创建新的地学理论、构建地球系统科学、建立新的地学知识体系与技术方法的重要发展时期。显然,新的地球科学发展,需要从宇宙天体地球系统整体出发,从其内核到外层空间,多学科综合研究,自然当代首先是面对人类社会重大需求与科学发展的需求,即全球变化、资源环境问题,社会可持续发展问题和深化发展当代地学占主导的板块构造理论问题,例如上述提出的探索大陆动力学问题。我们在研究大陆问题的同时,还要通过陆地的最新研究来重新审视大洋,并从大洋最新的进展来认识研究大陆,因此,我们这里需要特别强调并提出建立洋底动力学学科体系,加强相关教学系列课程与实验室建设问题,这是非常必要而且十分重要的。

海洋科学正处于迅速发展时期,从 DSDP 到 IODP,再到海底观测网络、监测系统,世界正在更加全面地加速深入探索认知海洋,我们必须及时意识到未来海洋科学的发展。前文我们用不少笔墨回顾了地质科学的发展历史,目的是温故知新,为了更好地认识现今,瞻望和发展未来。特别是我国现正处在前所未有的海洋大发展时代,面临从海洋大国走向海洋强国。因此,除了国家海洋事业发展的各个方面外,加强海洋科技、发展海洋教育、培育海洋人才已是急需,其中,加强海洋地质科学研究与高等教育尤为重要,这也是海洋科学发展基础研究和培育基础人才之急需。基于现代地球科学,包括大陆地质和海洋地质科学的快速发展,我们可以预见大陆动力学和洋底动力学必将会成为创建地球系统科学新理论的核心内容,并会从时空尺度上超越仅涉及地壳或岩石圈层次的板块构造理论,进入深刻揭示岩石圈乃至整个地球从内核到外层空间、从早期地球到雪球地球和板块地球或海洋地球的各圈层的相互作用及其几何学、运动学和动力学,必将围绕宇宙天体地球系统多个圈层间物质的运动和运动的物质这两大主题开展源头创新性研究,引领地球科学重大发展。

该书是李三忠教授团队为适应海洋地质科学新发展的需求,近多年来潜心编著的系列教材第一本,其余计划尽快完成的还有《海底构造系统(上下册)》《区域海底构造》《洋底动力学》等。这本《海底构造原理》侧重洋底动力学入门的基本概念、基本知识、基本原理的介绍,它主要是阐述海底构造的基本内容,从易到难,揭示其深层科学本质,为海洋地质学习奠定系统扎实的基础知识,建立基本思维。

海洋占地球总面积的 70.8%,而深海大洋占据海洋约 92.4%,它拥有极其丰富的自然资源和突出的战略地位。深海大洋是海底构造和洋底动力学研究的主要对象,按照动力系统的不同,可以进一步分为洋脊增生系统、深海盆地系统和俯冲消减系统。因此,这一系列教材以地球系统科学为指导,针对洋底动力系统,由表及

里，遵循读者的认知规律，循序渐进地讲授海底构造学，是既有基础知识，又有研究前沿成果的教科书，所以既适合初学者入门，也适合各层次研究人员的需求参考。

海洋意识是人类生存与文化的意识，更需要有全球意识。海洋科学是宇宙与全球视野的科学。世界拥有一个不同多样而又沟通统一的海洋，一直为人类所需求、所重视，中国新的快速发展，愈益高度重视海洋科学的发展，从国家发展战略需求，由国家层面提出了海洋强国、“一带一路”等发展战略，体现了国家意志，而这就是海洋科学发展的强大动力。在新的形势下，近年来很多大学响应国家战略需求，纷纷成立海洋学院或相关研究机构，开展富有成效的科学技术研究，培养人才，推动国民经济主战场的发展。同时也凸显出海洋人才的匮乏和需求，既要发展，但也不可一拥而上。在现今新学校新学科的快速发展增长时期，急需新的教材，因已有培育人才的教材已显陈旧。所以新教材的编写就是应时代新发展需求，成为当今负责责任的教师的一个迫切而重要的任务。我希望在这种情况下，上述的系列教材能够为中国新的海洋地质科学的发展带来新的力量与贡献。

中国科学院院士



2017年7月22日

# 前言

撰写本书的初衷最早始于1998年，我刚从西北大学地质学博士后出站来到中国海洋大学任教，教授的第一门课就是《海洋地质学》本科生课程。由于该课程涉及面极广，如海底地形地貌、沉积动力、海底岩石、海底构造与现代海底成矿作用等，故当时该课程由4位教授承担。10多年来，我始终承担其中的海底构造部分教学。当时全国也仅有4本正式教材，即1997年李学伦主编的《海洋地质学》、1991年朱而勤主编的《近代海洋地质学》、1982年同济大学海洋地质系主编的《海洋地质学概论》和1992年翻译的肯尼特主编的《海洋地质学》。

进入21世纪后，各大专院校也认识到海洋地质学领域教材的匮乏，并先后编写了多个版本的与海底构造相关的教材，如马宗晋等（2003）编著的《地球构造与动力学》、吴时国和喻普之（2006）编著的《海底构造学导论》、周祖翼和李春峰（2008）撰写的《大陆边缘构造与地球动力学》、任建业（2008）主编的《海洋底构造导论》、吕炳全（2008）编著的《海洋地质学概论》、张训华（2008）编著的《中国海域构造地质学》、徐茂泉和陈友飞（2010）编著的《海洋地质学》等。由于海底构造内涵丰富，这些教材虽然各有侧重，但依然不能全面反映海底构造的基本内容和前沿进展。2009年教学改革时，我曾提议将海底构造内容单独分列成系列深浅不一的四个层次来教授，建议分别称为海底构造原理、海底构造系统、区域海底构造、洋底动力学，依次侧重海底构造相关基本理论、海底构造基本知识、区域洋盆演化、洋底构造成因和机理，并由浅入深、由表及里分别向本科生、硕士生和博士生讲授。

通过18年的不断积累和讲授，本书综合国际最新科学动态和前沿进展，尽可能给读者选择和展示一些当下较美的图件、最前沿的成果和最新的理念，以响应“一带一路”倡议以及适应当代中国走向深海大洋、建设海洋强国的国家战略需求。本书强调基本概念、基础知识、基本事实、基本原理，但也在不同的章节为高层次读者展示了当前研究中的前沿问题和历史争论，期望能从中体现一些地质思想，并让读者从地质思想的形成演变中训练形成自己独有的地质思维模式。本书力求完整，在讲授时宜针对不同层次的学生有所选择，循序渐进地讲授。为了便于阅读或学科交叉，插入了一些与其他学科密切相关的基本知识。为了加强专业外语，本书中的

与海底构造相关的基本概念首次出现时，附注了英文。同时，为了贯穿地球系统理念，本书也节选了一些海洋环境要素的内容，便于致力于将海洋环流系统与海底壳-幔系统耦合起来研究的专家参考，如海洋生物地球化学、沉积动力学专家。

海底构造是专门介绍海底物质组成、结构和构造特征及其演化机制的学科，是针对掌握了一定普通地质学、沉积岩石学、岩浆岩石学、变质岩石学、构造地质学、地球化学和地球物理学基础理论知识的高年级本科生而设立的，部分高深知识是针对研究生而撰写的，需要掌握一些地震层析成像、地震学、岩石成因和成矿理论等知识。本书力求系统，读者在阅读时，可跳跃看，涉及不懂的概念，在本书中都可查询到，因而也可以将本书当作工具书。

因为传统的板块构造理论只解决岩石圈层次构造，地幔柱理论只解决比岩石圈更深的深部地幔构造，前板块构造只解决板块构造出现之前的早期地球构造演化问题，因此，为了突破这些理论上的局限性，并实现融合，本书以地球系统科学为指导，遵循“起源到过程、机制，现象到本质、趋势”的主线，编排了各种零散信息。后续几部教材也将按照基本原理、系统构成、区域解剖、动力探索的顺序进行编排。

在本书即将付梓之时，编者之一的索艳慧博士重绘了所有图件，并做了最后编辑整理，付出了巨大辛劳。郭玲莉博士整理了参考文献等。此外，编者感谢为本书做了大量内容整理和图件清绘工作的青年教师和研究生团队，他们分别是戴黎明、刘鑫、赵淑娟、曹花花、李玺瑶、王永明、许立青、王倩、兰浩圆、张剑、胡梦颖、李少俊、郭润华、惠格格、张臻、张勇、臧艺博、郑祺亮、孙文军等。同时，感谢专家和编辑的仔细校改及提出的许多建设性修改建议。感谢编者家人的支持，没有他们的鼓励和帮助，我们不可能全身心投入到教材的建设中。为了全面反映学科内容，本书有部分内容引用了前人的成果和书籍，涉及内容庞大，编辑时非常难统一风格，难免有未能标注清楚的地方，有些为了阅读的连续性，删除了一些繁杂的引用，请多多谅解。

特别感谢带我走入《海洋地质学》之门的李学伦教授等，是他们的积累孕育了这一系列教材；也特别感谢中国海洋大学海洋地球科学学院很多同事和领导长期的支持和鼓励，我们也是本着为学生提供一本好教材的本意、初心，整理编辑了这一系列教材，也以此奉献给学校、学院和各位同仁，因为这里面也有他们的默默支持、大量辛劳、历史沉淀和学术结晶。由于我们知识水平有限，疏漏在所难免，引用遗漏也不可能避免，敬请读者及时指正、谅解，我们将不断提升和修改。

本书是在前辈教材与基础上编写的，也学习吸收了他们的成果并纳入到该系列教材中，所以该系列教材也应是前辈教学事业的继续，也因为他们长期的积累，才有了现在教材的系统性、持续性与创新性，在此，我们应向长期做出贡献的老一辈

科学家和教师们表示诚挚感谢和敬意。

最后,要感谢以下项目对本书出版给予的联合资助:国家自然科学基金委员会国家杰出青年基金项目(41325009)、山东省泰山学者特聘教授计划、青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山卓越科学家计划(2015ASTP-0S10)、国家海洋局重大专项(GASI-GEOGE-01)、国家重点研发计划项目(2016YFC0601002,2017YFC0601401)、国家自然科学基金委员会-山东海洋科学中心联合项目(U1606401)和国家科技重大专项项目(2016ZX05004001-003)等。



2017年2月20日

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第 1 章 地球的起源、结构和组成 ..... | 1   |
| 1.1 地球的起源 .....         | 1   |
| 1.1.1 从宇宙环境到原始地球 .....  | 1   |
| 1.1.2 原始地壳和原始地核 .....   | 7   |
| 1.2 地球的结构与组成 .....      | 8   |
| 1.2.1 地壳 .....          | 12  |
| 1.2.2 地幔 .....          | 18  |
| 1.2.3 地核 .....          | 23  |
| 1.2.4 低速层与软流层 .....     | 27  |
| 1.2.5 岩石圈 .....         | 29  |
| 1.3 海洋和海水的起源 .....      | 32  |
| 1.3.1 海洋和海水的成因 .....    | 32  |
| 1.3.2 海洋环境要素 .....      | 35  |
| 1.4 洋壳的起源 .....         | 78  |
| 1.4.1 洋壳与陆壳的起源 .....    | 78  |
| 1.4.2 洋壳起源论争 .....      | 80  |
| 第 2 章 海底的地形和地貌 .....    | 89  |
| 2.1 海底地貌特征与划分 .....     | 91  |
| 2.2 大陆边缘地貌 .....        | 94  |
| 2.2.1 大陆架 .....         | 94  |
| 2.2.2 大陆坡 .....         | 97  |
| 2.2.3 大陆隆 .....         | 98  |
| 2.2.4 海沟 .....          | 98  |
| 2.2.5 岛弧 .....          | 100 |
| 2.2.6 弧后盆地 .....        | 102 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 2.2.7 大陆边缘类型·····          | 102 |
| 2.3 深海盆地地貌·····            | 104 |
| 2.3.1 海山·····              | 104 |
| 2.3.2 环礁·····              | 105 |
| 2.3.3 岛链·····              | 106 |
| 2.3.4 深海平原·····            | 107 |
| 2.3.5 深海丘陵·····            | 108 |
| 2.3.6 平顶海山·····            | 108 |
| 2.3.7 无震海岭·····            | 109 |
| 2.4 洋中脊地貌·····             | 110 |
| 2.4.1 平面展布·····            | 110 |
| 2.4.2 剖面特征·····            | 113 |
| 2.4.3 四大洋差异·····           | 114 |
| <b>第3章 洋壳演化的基本原理</b> ····· | 123 |
| 3.1 大陆漂移学说·····            | 123 |
| 3.1.1 发展历史与基本内容·····       | 123 |
| 3.1.2 主要依据·····            | 125 |
| 3.1.3 大陆漂移机制·····          | 139 |
| 3.1.4 大陆漂移效应·····          | 140 |
| 3.1.5 大陆漂移学说的缺陷·····       | 140 |
| 3.1.6 联合古陆的重建与大陆漂移过程·····  | 141 |
| 3.2 海底扩张学说·····            | 146 |
| 3.2.1 产生背景·····            | 146 |
| 3.2.2 基本内容·····            | 147 |
| 3.2.3 事实论证·····            | 148 |
| 3.3 板块构造理论·····            | 155 |
| 3.3.1 基本内容·····            | 156 |
| 3.3.2 板块划分与边界类型·····       | 157 |
| 3.3.3 板块运动学·····           | 165 |
| 3.3.4 板块动力学·····           | 172 |
| 3.3.5 板块构造起源·····          | 185 |
| 3.4 地体学说·····              | 198 |

|        |              |     |
|--------|--------------|-----|
| 3.4.1  | 基本概念         | 199 |
| 3.4.2  | 地体类型         | 200 |
| 3.4.3  | 地体演化         | 203 |
| 3.4.4  | 地体研究方法       | 206 |
| 3.5    | 地幔柱学说        | 211 |
| 3.5.1  | 思想溯源         | 212 |
| 3.5.2  | 热幔柱          | 214 |
| 3.5.3  | 冷幔柱          | 220 |
| 3.5.4  | 地球全局性物质对流    | 223 |
| 3.6    | 前板块构造        | 232 |
| 3.6.1  | 早前寒武纪独特的构造样式 | 233 |
| 3.6.2  | 前板块构造过程与体制   | 239 |
| 主要参考文献 |              | 258 |
| 索引     |              | 279 |
| 后记     |              | 281 |

## 1.1 地球的起源

### 1.1.1 从宇宙环境到原始地球

地球是宇宙演化到一定时期的产物，为此，必须认识宇宙起源才能更好地理解地球的起源。宇宙起源于“空”或“无”的思想可以追溯到 2500 多年前的圣人老子。《道德经》中第四章所言的“道冲而用之或不盈，渊兮，似万物之宗”，“冲”就是虚空（即现代物理学中的真空场涨落，平均值为 0），“不盈”是无穷尽之意，刻画了“道”的本质：空洞或空无。宇宙演化就如其第四十二章所言“道生一，一生二，二生三，三生万物。万物负阴而抱阳，冲气以为和”，可见，“道”为空，是万物之宗，万物包含有我们可见的“明物质”（阳）和不可见的“暗物质”（阴），它们在宇宙中和谐共存。四方上下曰宇，古往今来曰宙，因而古人认为宇宙的本质就是时间与空间，但现今的宇宙本质中还包括物质和能量（李三忠等，2015a）。

早在牛顿提出力学第三定律的年代，人们认为宇宙中一切天体运行都是遵循牛顿第三定律的，宇宙是稳态发展的、可预测和计算的，这个理论被称为宇宙的稳恒态理论。但自 1927 年，勒梅特（Georges Henri Joseph Édouard Lemaître）提出宇宙灾变起源后，许多学者认为宇宙源于大爆炸（big bang），而并非是稳态发展的。20 世纪 20 年代发现的遥远星系中的光谱红移现象（图 1-1）和 1929 年美国天文学家哈勃（Hubble）提出星系谱线红移和星系与地球之间的距离成正比的规律，证实了现在宇宙依然在膨胀的事实。之后，天体物理学家伽莫夫（George Gamow）于 1946 年将爱因斯坦的广义相对论融入宇宙理论中，提出了宇宙大爆炸模型。再后来，宇宙背景辐射被发现，再次证实了宇宙大爆炸理论。美国麻省理工学院的艾伦·古思（Alan Guth）于 1980 年首次提出了暴胀理论。直到 20 世纪 90 年代，宇宙学界、离子物理学界认为，宇宙起源于 137 亿年前的大爆炸，一切物质、能量、时间和空间都由此产生。大爆炸理论认为，现在的宇宙曾有一段温度从高到低、物质密度从大到小的演化史；但也有不同观点，认为宇宙一诞生就是均一的，密度保持不变。

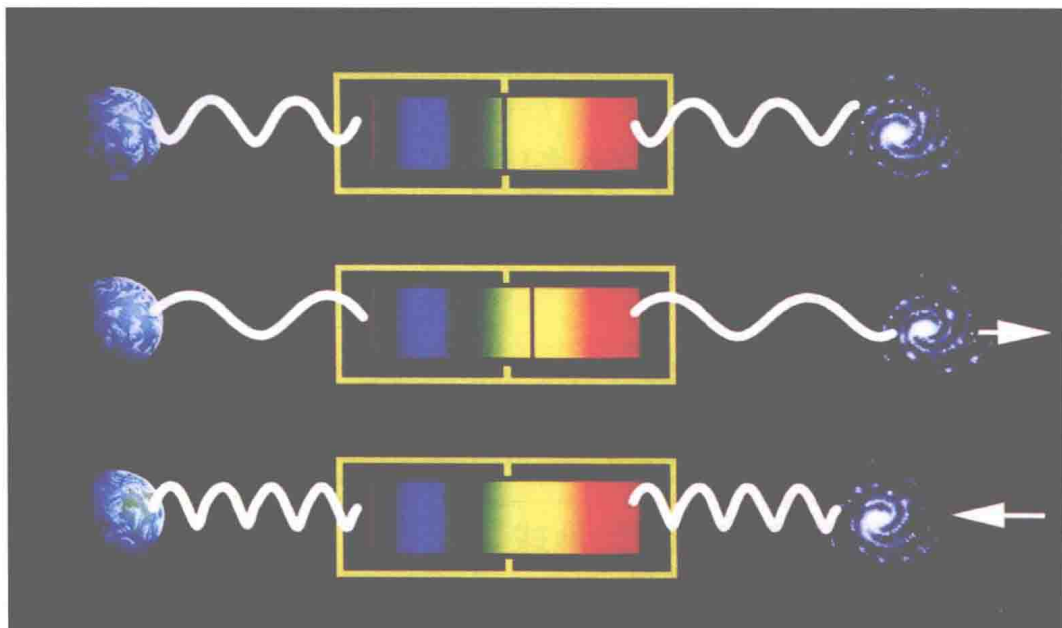


图 1-1 遥远星系的光谱红移现象

上部图像表明物体（如星系）没有运动时的光谱状态，黄线为谱线黑色位置；中间图像表明物体远离时，引起光谱中黑线向红色一段偏移，叫红移；下部图像表明物体向观察者移动，引起谱线向蓝色迁移，叫蓝移

资料来源：<http://astronomyonline.org/exoplanets/Exoplanets.asp>

爆炸前，宇宙所有的能量和物质都浓缩为一个质点（奇点）。2006 年，诺贝尔物理学奖获得者约翰·马瑟（John Mather）提出，大爆炸前整个宇宙只有数十立方厘米，原始物质的约  $10\text{cm}^3$  可能构成了现在的整个宇宙。这似乎不可理解。约翰·马瑟通过一系列计算指出，这是因为现今宇宙是由空洞构成的，正如原子核相对原子来说，原子核的体积非常渺小，宏观宇宙和其微观构成都是大大可压缩的。20 世纪最伟大的天文学家霍金（Hawking）对宇宙大爆炸  $10^{-43}\text{s}$  后的演化图景作出了清晰阐释。在宇宙大爆炸的瞬间，大爆炸  $10^{-43}\text{s}$  后宇宙从量子背景出现，称普朗克时代，温度高达  $10^{32}\text{K}$ （图 1-2）。大爆炸  $10^{-35}\text{s}$  后称大统一时代，温度高达  $10^{28}\text{K}$ ，可能因自发性破缺，原始“超力”开始破裂，出现强核力、电弱力和引力，同时氚（ $\text{T}$  或  $^3\text{H}$ ）、氦（ $\text{He}$ ）类稳定原子出现。大爆炸  $10^{-6}\text{s}$  后为强子时代，温度高达  $10^{14}\text{K}$ 。大爆炸  $10^{-5}\text{s}$  后质子和中子形成。大爆炸后约  $0.01\text{s}$  为轻子时代，宇宙的温度是 1000 亿  $^{\circ}\text{C}$  或  $10^{12}\text{K}$ ，物质以光子、电子和中微子为主，质子、中子仅占  $1/10$ ，大爆炸后的  $1\text{s}$  宇宙温度是 100 亿  $^{\circ}\text{C}$ ，大爆炸后  $1\sim 10\text{s}$  称为辐射时代，温度是  $10^{10}\sim 5\times 10^9\text{K}$ ，基本粒子开始合成原子核，能量以光子辐射形式出现。大爆炸后  $3\text{min}$ ，温度降至  $10^9\text{K}$ ，进入氦形成时代，宇宙直径膨胀到约 1 光年。大爆炸后 1000~2000 年，进入物质时代，温度降至  $10^5\text{K}$ ，物质密度大于辐射密度，物质从辐射背景中透明出来，物质温度低于辐射温度（图 1-2）。