

海底科学与技术丛书

SUBMARINE TECTONIC SYSTEM

Volume Two

# 海底构造系统

下册

李三忠 索艳慧 刘博/编著



科学出版社

海底科学与技术丛书

# 海底构造系统

下册

SUBMARINE TECTONIC SYSTEM

Volume Two

李三忠 索艳慧 刘 博/编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以地球系统为理念,深入浅出地系统介绍了伸展裂解系统、洋中脊增生系统、深海盆地系统、转换构造系统、俯冲消减系统的基本概念、基本构造单元、物质组成、结构构造、地质地球物理特征、本质内涵和前沿研究;从现象到本质,从过程到机理,由浅及深重点分析了各子系统成因认识、基本特征、发展与运行规律。本书的核心和实质内容是板块构造理论框架下的活动大陆边缘、被动大陆边缘等,但同时也介绍了很多新概念、新技术、新理念。

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

海底构造系统·下册 / 李三忠, 索艳慧, 刘博编著. —北京: 科学出版社, 2018. 8

(海底科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-058131-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 135044 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

\*

2018 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 530 000

定价: **258.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 序

现今全球变化与社会可持续发展以及整体人类自然科学技术进步发展对地球科学提出了新的需求，需要我们整体认知地球系统，了解现状与其未来将会发生什么及其发展趋势。

现今我们知道，天体地球经历了 46 亿年，完成了从宇宙星尘到天体星球及生命的出现与发展的漫长演变。作为宇宙地球生命的最高形式，人类诞生的最近三百万年以来，在沧海桑田的变幻中，为了生存与发展和追求，人类逐步创造形成了对客观世界宇宙与地球等比较系统的自然科学知识体系。其中，地球科学就是人类自然科学中的一门重要基本科学系统。经长期发展，地球科学现仍主要处于多学科分子科学研究为主的状态；如气象、海洋、环境、地理、地质（包括地球化学、地球物理）等近两百年来虽已取得一系列重大认知突破，为人类社会发展做出了巨大贡献，然而，这一状态却给理论研究和实际应用带来很大的束缚以及整体学科的分割。地球作为整体，大气圈、水圈、生物圈、岩石圈以及地球内部其他圈层等，本是天体地球内外部物质运动、能量转换的统一体，以往单一学科、单一系统的解剖研究及其方式方法，难以认清地球系统整体全貌。而现今面对全球变化和资源、能源、环境与灾害问题，亟待我们重新整体认识地球，了解它的过去、现状和新发展趋势与动态，知晓它将会发生什么，加之科学技术的发展包括地球科学自身发展也需要综合整体探索，以认知、解决更为深层错综复杂的科学问题。特别是进入 21 世纪以来，上天、入地、下海、登极观察研究的发展及地球观测技术的快速进步，通过宏观、整体、综合、长期、连续观测，人类研究地球各种自然现象、自然规律、追本求源的能力大大提高，同时，海量信息、图像声音、影像视屏、测试结果等构成的地球大数据，给地球科学带来了巨大冲击与发展空间。可以预见，21 世纪必将是地球科学进入地球系统科学的时代，秉持地球系统科学的理念意识，必将推动地球科学的新发展，也必将为海洋科学包括海底构造研究，带来新的发现、认知与理论突破。

地球系统，包括三大子系统：外部的日地系统（Solar-Terrestrial System），包括从太阳一直到地球表层；内部的地球深部系统（Deep Earth System），包括地壳、地

幔和地核；介于前两者之间的地球表层系统（Earth Surface System），简称地表系统，包括土壤圈、水圈、大气圈及生物圈和岩石圈等圈层复合交汇。

这些子系统各有其演化规律，各系统之间也始终存在密切而复杂的物质和能量交换。因此，地球各圈层间的相互作用必然是地球系统科学的重点研究内容和领域，包括不同层圈之间的相互作用、循环及其动力学过程、资源环境与全球变化等。近年来，地球系统科学、全球变化和地球动力学等已经被广泛列入各种相关的科学前沿研究发展规划。认识地球内部和外部层圈的结构、成分和动力学，阐明不同层圈物理、化学与生物的相互作用及其特点与规律是地球系统科学的主要目标之一。当前，地球系统科学研究以地球大气圈—水圈—生物圈—土壤圈—岩石圈—地磁圈等之间的相互作用为主题：一方面，以地球不同层圈的物质组成、结构和性质及其与生命起源、资源形成和环境演化之间的关系为主线，研究不同时空尺度的地质环境变化及其对地球系统的影响，揭示各个地质历史时期地球内部变化对资源环境灾害的制约；另一方面，以地球环境与生态系统为主线，涉及地球各层圈的相互作用及其对生命、人类和社会的影响与协同演化，人类活动对地球环境的反馈及其发展趋势。

地球系统科学研究的各圈层，岩石圈的形成和动力学演化是关键，因而，岩石圈在地球系统中占据着重要地位。岩石圈包括地壳和下伏岩石圈地幔，是人类最能接近且更直接影响人类生存的上部固体地球圈层。岩石圈的结构、组成与演化影响控制着壳幔演化、构造运动（包括地震和其他地质灾害）、岩浆活动及大规模成矿作用的发生以及对应的生态环境效应。故而，岩石圈的结构、组成与演化始终是地球动力学研究的主题之一，也是地球科学研究的核心主题之一，是研究地球演化的重要组成部分，其研究成果为矿产资源的勘探开发、生态环境保护治理、地震和其他地质灾害的预测预防提供了科学基础。因此，岩石圈与动力学也是地球固体系统动力学研究的主要内容。

岩石圈可以分为大陆岩石圈和大洋岩石圈。大陆岩石圈动力学及其资源、环境和灾害效应是大陆动力学研究的主题，而大洋岩石圈动力学及其资源、环境和灾害效应是洋底动力学的主题。

该书以地球系统科学理念，侧重固体海洋在地球系统中的关键过程和作用。海洋占地球总面积的70.8%，而深海大洋占据海洋约92.4%，因此，洋底更是了解众多地球过程的主要窗口之一。从空间展布和大地构造位置角度，洋底动力系统可以划分为洋脊增生系统、转换构造系统、深海盆地系统、俯冲消减系统和地幔动力系统等，基本对应动力学角度的伸展裂解系统、转换构造系统、俯冲消减系统等。不同于以往讲授板块构造理论时常划分为活动大陆边缘、被动大陆边缘、转换型大陆边缘逐个介绍的方式，该书改为俯冲消减系统、伸展裂解系统、转换构造系统论

述,这一改变,应是学术思想和系统研究的新发展与重要新思维。

通过这个“系统”观,综合认知地球物质运动,揭示运动的物质跨圈层、跨相态、跨时间尺度的变化,必然涉及相关学科和新的科技成果。当前海洋地质学已经摆脱单一学科制约,成为多学科交叉融合的起点,以物理海洋、海洋化学、海洋地球化学与海洋地球物理等高新探测和处理技术、观测网络建设为依托,国际上逐步开始实施一系列不同级别的海底观测网络建设计划,通过大量传感器,侧重探测海底各种大地构造背景各级尺度的结构、构造和过程以及动力学过程的各个变量要素,监测不同圈层界面和圈层之间的物质和能量交换、传输、转变、循环等相互作用的过程,为了解地球系统变化提供了技术保障。

针对深海大洋岩石圈动力学与物质循环中的洋脊增生系统、俯冲消减系统的构造动力-岩浆-流体系统之间的海陆耦合、深浅耦合、流固耦合关系研究,成为当今洋底动力学研究的重点,一些国际合作计划亦将其作为研究的重点。当前科学研究仪器设备日益更新,效率也越来越高,而且,探测手段和方法也从哥伦布时代的走航式、不连续、单点式、低效率、单一学科观察和测量,发展为原位、连续、实时、多学科、数字化、信息化、网络化、高效率观察和测量。例如,水深测量从重锤测深转变为多波束测深,重力测量从简单的海洋重力仪发展为卫星海洋重力测量,地震技术从浅剖发展为地震层析成像,使得不同深度的洋底结构构造显现出来,也揭示了板块构造学说没有阐明的俯冲洋壳的去向问题。目前,虽然研究对象依旧是按照板块构造理论为指导,集中于研究板块边缘,即主要集中在洋脊增生系统和大陆边缘的俯冲消减系统以及相关领域的科学研究,但是研究已更具有广泛国际性,具体表现在两个国际计划的设立上,即1992年开始的国际大洋中脊计划(Inter-Ridge)和1999年开始的国际大陆边缘计划(Margins)及后续的“地质棱镜”计划(GeoPRISMs),大大促进了该领域的发展。另外,不可忽视的是,深海大洋研究中关于大火成岩省的研究,将对地幔柱构造理论的发展和建立起着关键作用,这必将从更深层次揭示地球的动力学本质。

上述针对固体地球系统的国际研究计划不亚于地球系统科学联盟(ESSP)提出的世界上有关全球气候与环境变化的四大科学计划[世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球环境变化人文因素计划(IHDP)、生物多样性计划(DIVER-SITAS)]。这些表层地球系统的全球计划针对地球系统及其变化、对全球可持续发展的影响,旨在促进各学科的深入和交叉,弥补观测和资料上的空白,以增强人类认识和理解复杂地球系统的能力。因此,人们一致认为建立描述地球系统内部的过程及其相互作用的理论模式,亦即“地球系统动力学模式”(曾庆存等,2008),不仅可以阐明全球(包括大地区)气候和环境变化的机理并进行预测,而且可以助于揭示地球动力学的本质,真正实现实时多圈层相互作用的研究。

国际上深海领域的竞争日趋激烈, 21 世纪初前后, 各海洋强国及国际组织纷纷制定、调整海洋发展战略计划和科技政策, 如《新世纪日本海洋政策框架 (2002)》《美国海洋行动计划 (2004)》和《欧盟海洋发展战略 (2007)》等, 并采取有效措施, 在政策、研发和投入等方面给予强力支持, 以确保在新一轮海洋竞争中占据先机。相应的国际和区域海洋监测网络逐步实施, 如美国的 OOI、HOB0、LEO-15、H2O、NJSOS、MARS、DEIMOS 等, 欧洲的 NEMO、SN-1、ESONET 等, 美国和加拿大联合建立的 NEPTURE 及其扩展成的全球 ORION, 日本的 ARENA 和之后的 DONET, 它们成为全球的 GOOS (Global Ocean Observing System) 对海观测网的一部分。GOOS 最终与全球环境监测系统 (GEMS, Global Environment Monitoring System)、全球陆地观测系统 (GTOS, Global Terrestrial Observing System)、全球气候观测系统 (GCOS, Global Climate Observing System) 共同构成世界气象组织的 WIGOS (WMO Integrated Global Observing Systems) 观测系统, 最终建成 2003 年倡导建立的名为 GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) 的全球统一的综合网络, 并成为 GEOSS 的核心组成。GOOS 积极发展先进的机电集成技术、传感器、ROVs、AUVs、通讯技术、能源供应技术、海底布网技术、网络接驳技术, 建设海底观测站、观测链、观测网等不同级别和目标的海底观测平台, 实现天基 (space-based)、空基 (air-based)、地基 (land-based) 以及从岸基 (coast-based) 到海基 (ocean-based, 覆盖海面、海水、海床) 全面覆盖海洋的实时立体观测网。地质学上它们以热液现象、地震监测、海啸预报、海洋环境变化、全球气候等为科学目标。我国“九五”期间 863 计划已逐步开始实施类似计划, 但类似前述国际性的具重大影响的监测网络建设才刚刚起步。

鉴于地球科学的发展, 尤其海洋科学发展和培养人才的需求, 中国海洋大学李三忠教授团队新编写了系列新教材, 《海底构造系统》(上、下册) 是其系列教材的第二本和第三本, 也是构建“完整海底构造系统”理论的核心内容, 系统介绍了岩石圈及地球更深层动力学的基本概念、基本规律、基本过程。这些知识是认知海底的基础, 也是为其他圈层研究或学科发展、深化、拓展所必需, 更是走向系统完整认知地球的起点, 其终极目标是揭示海底或洋底的本质与规律及其与其他圈层的关联。

洋底动力学旨在研究洋底固态圈层的结构构造、物质组成和时空演化规律及机制, 研究洋底固态圈层与其他相关圈层, 如软流圈、水圈、大气圈和生物圈之间相互作用和耦合机理, 以及由此产生的资源、灾害和环境效应。它以传统地质学和板块构造理论及其最新发展为基础, 在地球系统科学思想的指导下, 以海洋地质、海洋地球化学与海洋地球物理及其高新探测和处理技术为依托, 侧重研究伸展裂解系统、洋脊增生系统、深海盆地系统和俯冲消减系统的过程及动力学, 包括不同圈层

界面和圈层之间的物质和能量交换、传输、转变、循环等相互作用的过程，为探索海底起源和演化、发展海洋科学和地球科学，保障人类开发海底资源等各种海洋活动、维护海洋权益和保护海洋环境服务的学科。该书就是为其培养基础人才和普及基本知识的新编教材，是洋底动力学关注的核心内容，值得推荐。

中国科学院院士



2018年5月28日



# 前 言

海底构造是一门专门介绍海底物质组成、结构和构造特征及其演化的学科，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，本书的部分高深知识是针对研究生而撰写的，需要阅读者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，也可跳跃看，涉及不熟悉的概念，在本书都可搜索到，因而本书也可以当做工具书。

撰写《海底科学与技术丛书》的初衷始于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，从海底地形地貌、沉积动力、海底岩石到海底构造与现代成矿作用等，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本正式教材可参考，即李学伦主编的《海洋地质学》、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，各大专院校也发现海洋地质学领域教材的匮乏，先后编写了多个版本的海底构造相关的教材，这些教材各有侧重，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，本书综合国际最新学科动态和前沿进展，尽可能给读者选择和展示一些当下最美的图件、最前沿的成果和最创新的理念，以响应“一带一路”倡议以及适应当代中国走向深海大洋、海洋强国、创新驱动的国家战略需求。本书强调基本概念、基础知识、基本事实、基本系统，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，也插入了一些与之密切相关的其他学科的基本知识。而且，为了加强专业外语，本书在海底构造相关的基本概念首次出现时附注了英文。

在以往的课程体系中，关于海底构造系统的知识内容有的称为板块构造，并不断强化教授给学生。但是，正如《海底构造原理》一书中所展示的，海底构造不只是板块构造，还有地体构造、地幔柱构造、前板块构造体制等。例如，板块构造理论不能解释板块构造出现之前的太古宙海底的构造，也不能解决超越岩石圈演化的地幔动力学、地幔柱起源等。因此，本书对海底构造不再按照 *Global Tectonics* 一书中讲授的方案划分，即按裂谷、被动大陆边缘、活动大陆边缘和转换型大陆边缘这类概念来按顺序讲授，本书将这类术语改称或重新归并如下：伸展裂解系统、俯冲消减系统、深海盆地系统、转换构造系统、洋脊增生系统。例如，对于“活动大陆边缘”来说，它难以包括马里亚纳岛弧这类洋-洋俯冲形成的类似活动大陆边缘的现象。然而，马里亚纳岛弧从动力学和成因上与活动大陆边缘别无二致，都属于俯冲消减系统。这样的做法，主要是试图解决板块构造术语运用存在的局限性。再如，如果本书将“板块构造”这个概念拓展到板块构造体制尚未出现的早前寒武纪，就不会被人们所广泛接受。然而，很多地球化学家又通过岩石地球化学特征识别出了很多板块构造出现之前的活动大陆边缘地球化学特性，如岛弧型岩石地球化学特性，尽管“活动大陆边缘”这个概念可以用于早前寒武纪地质中，但是岛弧型岩石地球化学特性不一定就是板块构造体制下的产物，因为俯冲消减系统也可以形成活动大陆边缘的岛弧型岩石地球化学特性，这样岛弧型岩石地球化学特性就与有无板块构造体制无关了。实际上，地球化学方法难以确定板块构造体制的存在与否。这是因为板块构造体制的出现是一种物理机制，化学记录只是其衍生产物。本书提出的用俯冲消减系统替代活动大陆边缘的概念，有助于强调系统性。从分类体系看，活动大陆边缘只是洋-陆型或陆-洋型俯冲消减系统的一种，并没包括洋-洋型俯冲消减系统。从平面上看，活动大陆边缘强调的只是大陆一侧的产物，如边缘海或弧后盆地、相关变形变质和岩浆、成矿等，而俯冲消减系统还强调俯冲的输入部分，也就是俯冲板块一侧；从深度或垂向上，俯冲消减系统还包括俯冲板片以及深部过程（如地幔楔对流循环、脱水脱碳等过程）。基于上述种种原因，无论是从时空范畴，还是从板块构造与前板块构造之间过渡过程的知识重构上，《海底构造系统》（上、下册）中的伸展裂解系统、俯冲消减系统、深海盆地系统、转换构造系统、洋脊增生系统的术语完全可以适用于前板块构造，也可以用于板块构造理论中，这应当是板块构造理论的一种延伸或发展。板块构造理论中的被动大陆边缘、活动大陆边缘和转换型大陆边缘术语当然同样也可以继续适用于对前板块构造描述。这样，可以将现有知识体系与新术语体系建立起一种紧密联系，逐渐将板块构

造理论拓展，并试图建立地球全史的统一动力学理论体系，回答从古至今的哲人或科学家的千年追问。

屈原在他的伟大诗篇《天问》里写道：“遂古之初，谁传道之？上下未形，何由考之？冥昭瞢暗，谁能极之？冯翼惟象，何以识之？明明暗暗，惟时何为？阴阳三合，何本何化？圜则九重，孰营度之？惟兹何功，孰初作之？”本书认为，2300多年前屈原《天问》篇的部分内容是先人的宇宙观，故结合现今宇宙学和地球系统科学理念，理解上述屈原之问如下：盘古开天，是谁首先认知和传承的？那时天地混沌未分，是怎么知道的？天地暗中有明，总体混沌晦暗，谁能彻底认清呢？光明广大的虚空也只是一个表象，又是怎么理解呢？忽明忽暗之间，只是时间转换导致的吗？阴阳参差交错，天、地、人又是如何起源和如何演进呢？天上环绕运行的星辰，是什么控制的呢？如此浩大的体系，最初是谁创造呢？《天问》接着写道：“斡维焉系，天极焉加？八柱何当，东南何亏？九天之际，安放安属？隅隈多有，谁知其数？天何所沓？十二焉分？日月安属？列星安陈？出自汤谷，次于蒙汜。自明及晦，所行几里？夜光何德，死则又育？厥利维何，而顾菟在腹？女岐无合，夫焉取九子？伯强何处？惠气安在？何阖而晦？何开而明？”直译如下：天体运转的轴心系在天轴的什么地方？天轴的顶部，又安置在哪里？八根擎天柱又由什么支撑着呢？为什么东南角下沉了呢？天的中心和边界又在哪里、又是什么呢？宇宙角落有很多的时空弯曲，谁知道具体数目是多少呢？天地交合在何处？为什么将它十二分呢？在这个体系中，日月属于何处？所有的星星又如何摆放？太阳从汤谷这个地方升起，陨落于蒙汜这个地方，从白天到黑夜，要走多远呢？月光的什么特性以至于会阴晴圆缺、生灭变换呢？到底什么有利因素使月亮能孕育一只兔子呢？宇宙生命又是如何诞生的呢？可怕的瘟疫又起源何处呢？和生万物的氛围环境又在何处？什么关闭导致晦暗？什么开启导致明朗？本书认为，这部分是屈原处于当时盖天说或浑天说背景下，对当下现代科学也在追问的天体运行根源及对生命起源等的发问。

如同2005年7月*Science*杂志创刊125周年提出的125个重要科学问题（涉及生命科学的问题占46%，关系宇宙和地球的问题占16%，与物质科学相关的问题占14%以上，认知科学问题占9%），这些问题都反映了中国先人的宇宙观、世界观、历史观。这些问题也是当代科学前沿，是我们自然科学工作者千百年来乐此不疲、不断追求的本质和重大基础性科学问题。其中，部分问题已经在《海底构造原理》一书中进行了综合解释和阐述。作为地球科学工作者，要超越先人，站在现代科学理论之上，去深度认知宇宙、世界、社会、人类。为此，对于人居中心的地球，我们也要系统综合整体加以理解，以往西方国家的分科研究并不能全面认识这个庞大无垠而又各尺度多层次交织的体系，存在科学的局限性或非科学性。例如，上述提到的125个问题中与地球相关的有：宇宙是否唯一？是什么驱动宇宙膨胀？重力的本

质是什么？第一颗恒星与星系何时产生、怎样产生？驱动太阳磁周期的原因是什么？行星怎样形成？地球内部如何运行？使地球磁场逆转的原因是什么？是什么引发了冰期？水的结构如何？是否存在有助于预报的地震先兆？太阳系的其他星球上现在和过去是否存在生命？地球生命在何处产生、如何产生？谁是世界的共同祖先？什么是物种？什么决定了物种的多样性？地球上有多少物种？一些恐龙为什么如此庞大？生态系统对全球变暖的反应如何？外界环境压迫下，植物的变异基础是什么？能否避免物种消亡？迁徙生物怎样发现其迁移路线？地球人类在宇宙中是否独一无二？什么是人种，人种如何进化？自然界中手性原则的起源是什么？是什么提升了现代人类的行为？什么是人类文化的根源？地球到底能负担多少人口？……这些问题都不是孤立的，某种程度上存在千丝万缕的联系，需要整体系统分析。我们钦佩中国先人具有的科学思想，它增强了民族自信、文化自信，乃至科学自信。在新的地球认知历程中，在《海底构造系统》（上、下册）中，我们要系统地、科学地认知地球系统。

在本书即将付梓之时，索艳慧博士和刘博博士编撰了部分内容且整理重绘了所有图件，并进行了最后编辑整理和校稿工作，付出巨大辛劳。此外，编者感谢为本书做了大量内容整理工作的青年教师和研究生团队，他们是戴黎明、刘鑫、曹花花等副教授和郭玲莉、赵淑娟、王永明、王誉桦、李园洁等博士后及唐长燕博士；兰浩圆、张剑、郭润华、胡梦颖、李少俊、陶建丽、马芳芳等硕士为初稿图件清绘做出了很大贡献。同时，感谢专家和编辑的仔细校改以及提出的建设性修改建议。也感谢编者家人的支持，没有他们的鼓励和帮助，编者不可能全身心投入教材的建设中。为了全面反映学科内容，本书有些内容引用了前人优秀的综述论文成果、书籍和图件，精选了300多幅图件，涉及内容庞大，由于编辑时非常难统一风格，难免有未能标注清楚的，有些为了阅读的连续性，删除了一些繁杂的引用，敬请读者多多谅解。

特别感谢中国海洋大学的前辈们，他们的积累孕育了该系列的教材，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，编者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、学院和全国同行，因为本书中也有他们的默默支持、大量辛劳、历史沉淀和学术结晶；特别感谢中国地震局马宗晋院士、中国地质大学（武汉）的任建业教授、肖龙教授许可引用他们对相关内容的系统总结。由于编者知识水平有限，疏漏在所难免，遗漏引用也可能不少，敬请读者及时指正、谅解，我们将不断提升和修改。

最后，感谢以下项目对本书出版给予的联合资助：山东省泰山学者特聘教授计划、国家自然科学基金委员会国家杰出青年科学基金项目（41325009）、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）、国家实验室深海专项西太平洋-印度洋关键地质过程与环境演化（2016ASKJ13）和国家科技重大专项项目（2016ZX05004001-003）等。



2017年11月10日

# 目 录

第 1 章 洋脊增生系统 .....	1
1.1 洋中脊基本特征 .....	1
1.1.1 地球物理特征 .....	1
1.1.2 正断层组合、分级与生长 .....	4
1.2 洋中脊类型 .....	10
1.2.1 快速扩张脊 .....	14
1.2.2 慢速扩张脊 .....	15
1.2.3 超慢速扩张脊 .....	16
1.3 洋中脊结构 .....	17
1.3.1 洋中脊拓展与叠接 .....	17
1.3.2 洋中脊分段 .....	25
1.3.3 三节点 .....	33
1.4 洋中脊的增生与变形 .....	44
1.4.1 岩浆房特征 .....	44
1.4.2 洋中脊岩浆起源 .....	44
1.4.3 岩浆房过程 .....	52
1.4.4 海底热液循环系统 .....	55
1.4.5 海洋核杂岩 .....	64
1.4.6 洋中脊热液成矿系统 .....	73
1.4.7 洋中脊的变格、跃迁和废弃 .....	91
1.5 洋中脊构造动力学 .....	95
1.5.1 中央裂谷起源 .....	95
1.5.2 洋中脊岩浆动力学 .....	100
1.5.3 洋中脊动力要素 .....	112

第2章 转换构造系统 .....	120
2.1 转换断层的结构与类型 .....	122
2.1.1 转换断层与走滑断层 .....	122
2.1.2 转换断层类型 .....	128
2.1.3 转换断层分布 .....	129
2.1.4 地质地球物理特征 .....	129
2.2 转换断层的运动学 .....	132
2.2.1 转换断层与地震 .....	132
2.2.2 转换断层发育与扩张速率 .....	133
2.2.3 转换断层运动学 .....	133
2.2.4 转换断层与洋中脊、海沟的连接 .....	135
2.3 转换断层成因 .....	137
2.3.1 转换断层启动的触发因素 .....	137
2.3.2 岩浆房对转换断层间距的影响 .....	139
2.3.3 大洋转换断层起源 .....	141
2.3.4 边缘海转换断层成因模式 .....	160
2.4 转换型陆缘与演化 .....	175
2.4.1 转换型陆缘特征 .....	175
2.4.2 转换型陆缘演化阶段 .....	176
第3章 深海盆地系统 .....	180
3.1 深海沉积与成矿 .....	180
3.1.1 基本特征 .....	181
3.1.2 主要沉积物类型 .....	186
3.1.3 深海沉积物的空间分布 .....	187
3.1.4 深海沉积的影响因素 .....	189
3.1.5 海底矿产资源 .....	189
3.2 热点与岛链 .....	198
3.2.1 地幔柱特征与识别标准 .....	202
3.2.2 热点类型 .....	205
3.3 非热点海山系统与小尺度对流 .....	210
3.4 地幔柱和大火成岩省 .....	215
3.4.1 大火成岩省的组成和类型 .....	218

3.4.2	大火成岩省源区和构造背景·····	226
3.4.3	大火成岩省地幔动力学·····	233
3.4.4	与大火成岩省有关的成矿作用·····	248
3.4.5	大火成岩省成矿系统和成矿系列·····	250
3.5	地幔柱和超大洋开合·····	251
3.5.1	超大洋旋回·····	254
3.5.2	超大洋闭合方式·····	256
3.6	地幔柱事件和地球-生命系统·····	258
3.6.1	全球构造与地球环境·····	258
3.6.2	生命与地球协同演化·····	261
3.6.3	地幔柱与古海洋事件·····	262
<b>第4章</b>	<b>海底观测网</b> ·····	<b>273</b>
4.1	国际海底观测网·····	273
4.1.1	伸展裂解系统探测·····	279
4.1.2	俯冲消减系统探测·····	281
4.1.3	洋脊增生系统探测·····	285
4.1.4	深海盆地系统探测·····	286
4.1.5	多圈层相互作用综合观测系统·····	294
4.2	海底观测网的科学目标·····	297
<b>参考文献</b>	·····	<b>300</b>
<b>后记</b>	·····	<b>327</b>



自板块构造理论诞生之初，洋中脊研究就得到高度重视，成果不断创新，将原本的地球以“崭新”的面貌展现在人类面前，不断冲击着人类的思维和思想。从磁条带成因的瓦因-马修斯假说、Wilson 的转换断层到海底黑烟囱、深海深部生物圈，人类的认识逐步深化，不断飞跃。而今，洋中脊研究进入了多学科交叉综合研究的关键阶段，人们不再只关注构造过程，与构造过程密切相关的岩浆动力学也不断得到重视，实现了构造-岩浆-流体过程的一体化研究。由于类似的交叉和研究领域的拓展不断发展，因此，本书不再按照传统的板块构造理论介绍方式，即专门列出一章“洋中脊”，而是称其为洋脊增生系统，以系统的理念，综合架构各种现象之间的关联，引导大家认识系统的整体过程，从而服务于多学科交叉复合型人才的培养。

## 1.1 洋中脊基本特征

### 1.1.1 地球物理特征

通过地震波的观测，如反射地震、折射地震、海底地震仪探测、海底大地电磁技术和层析成像等技术方法，可揭示洋中脊的轴部垂向结构及其深部状态、动力机制等；用多波束测深、航空和近海底地磁测量、重力测量等方法，可揭示洋中脊的平面结构，并可据此探索洋中脊的动力过程或扩张历史。其他的地球物理技术像热流量测量、声学测量、海底电磁或电流传导测量等，是理解洋中脊的生命和动力学、综合建立一个洋中脊壳幔结构和运动模型的主要手段（Levi, 1998）。长期探测表明，洋中脊重力、磁力、热流、地震折射等地球物理特征鲜明（图 1-1），具体如下。

1) 低地震波速度：以 11°S 处南大西洋洋中脊为例，该处宽 1000km、深 26 ~ 36km 处的地震波速度为 7.7 ~ 7.8km/s 的透镜体几乎与洋中脊一样宽。在这个透镜体之上是两个较低的低速带，宽 450 ~ 600km。

2) 带状分布的高热流值：地壳上部的温度梯度可以通过直接测量不同高程并