

海底科学与技术丛书

REGIONAL SUBMARINE TECTONICS

Volume One

区域海底构造

上册

李三忠 赵淑娟 索艳慧 刘 博 李玺瑶/编著



科学出版社

海底科学与技术丛书

介 简 容 内

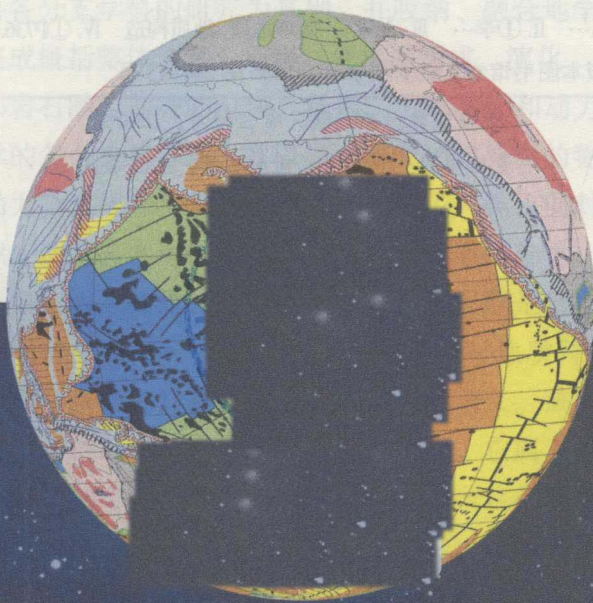
区域海底构造

上册

REGIONAL SUBMARINE TECTONICS

Volume One

李三忠 赵淑娟 索艳慧 刘 博 李玺瑶/编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

区域海底构造是介于海洋地质学、大地构造学和地史学之间的一门针对海底构造演化史的交叉学科。本书以地球系统科学思想为指导,首先重点介绍板块构造理论中的威尔逊旋回,进而拓展至超大陆旋回,再从系统论的角度,由表及里,遵循读者的认知规律,循序渐进地讲授海底各圈层之间的相互作用,是一本既有基础知识,又有研究前沿成果的教科书。《区域海底构造》(上册)从大洋盆地演化和洋底多圈层相互作用出发,条理化、凝练性介绍太平洋和印度洋的构造单元划分、典型构造分析及洋盆演化过程。

本书资料系统、图件精美,适合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

区域海底构造.上册/李三忠等编著. —北京:科学出版社,2019.1

(海底科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-059288-0

I. ①区… II. ①李… III. ①海底—区域地质—地质构造 IV. ①P736.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第244302号

责任编辑:李 敏/责任校对:张怡君

责任印制:张 伟/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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:460 000

定价:218.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

构造地质学是关于地球，重点是地壳与岩石圈的结构及其成因机制的一门学科，是地学中地质学科领域的基本理论和主要研究内容，也是地学高等教育的基础学科之一。广义的构造地质学包括基础构造地质学（即通常说的狭义构造地质学）、区域构造地质学和大地构造学。《区域海底构造》（上册、中册、下册）是关于海洋底部固体海洋的区域海底构造或海洋大地构造学教材。

大地构造学是地质学科中具有高度综合性与广泛指引性的上层基础理论学科，以研究整体地球、岩石圈与地壳的组成、结构、形成演化规律及其动力学为主要目标。它以地质学科各分支学科的研究为基础，并吸纳、融合地学和各自然科学的成果，综合研究、集成概括整体地壳、地幔、地核的构成、演化、地球动力学机制等，重点研究地球上部岩石圈与地壳的组成、结构、形成演化和动力学机制。因为它包含了固体地球科学的各个主要方面，并以综合研究地球外壳的物质与结构构造及其形成演化规律和动力学机制为主要任务，往往代表了人类目前对地球发展与演化规律的总体基本认识。因此，大地构造学（包括区域大地构造学）是地质科学的上层建筑和基础理论。也正因为如此，大地构造学的观点，既是地质科学各分支学科的理论基础，又是引领各分支学科的指导思想，它不仅对地质科学、固体地球科学，甚至对其他自然科学学科，都具有科学的借鉴与指导意义。该书是关于固体海洋的大地构造与区域海底构造的最新系统综合论述与教材。它属于大地构造与区域大地构造学，对于地球科学和海洋科学而言，具有如上述所言的同等重要意义，尤其过去的大地构造学和区域构造学多是偏重于大陆的问题，而该书则专门讨论关于海底的大地构造与区域构造学问题，因此更具特色和重要意义。

陆地占地球总面积的 29.2%，海洋占地球总面积的 70.8%。传统的区域大地构造学多数关心各自国家的大陆区域构造演化，如《中国大地构造》，即使是在论述介绍全球大地构造演化，也主要是讲述占全球面积约 1/3 的大陆。如今，该书则主要面对占全球面积约 2/3 的大洋，同时它面对的是看不见、摸不着的海底，特别是跨越学科界线，还要面对深海深部生物圈和地幔深层次问题等，而且不同于以往的二维角度讨论区域大地构造，该书要从三维视角全面看待地球动力学系统。由此可

见，该书的编著难度较大，编者也付出了大量心血。

地球科学研究总是从一个局部区域或构造单元、特定主要事件或事件序列、特殊阶段或专门主题开始，逐渐扩大深入，在层层分解的基础上，综合、概括、提取、凝练出普适性规律与原理，是一个由个别到整体、由特殊到一般的归纳总结过程。区域海底构造研究也是从不同地区与特定构造开始，逐渐扩展总结，归纳概括出普适规律的理论性认识，这正如板块构造理论就是在海底区域调查勘探中逐渐发展上升而提出成为理论学说的。

地球科学发展到今天，需要从区域到整体认知地球，反之也更需要从整体来研究认知区域，从而才能综合全面深入地研究认识地球。固体海洋科学现处在板块构造理论为主导的学术思想指导下，从全球板块构造出发，深化各个区域的精细构造研究状态。因而，该书就是在已有《海底构造原理》《海底构造系统》等整体认识基础上，再往前深入开展区域海底构造的研究与介绍，也就是在全球整体把握认识的基础上，从整体走向区域、从浅部走向深部的认知探索。深海深部物质运动和能量转换，是支撑地球系统和生命体系的根基，也是重大自然灾害产生的基本根源之一。纵观人类发展史，历经石器时代、青铜时代、铁器时代、电器及信息时代，包括煤炭和油气能源的开发利用，就是一部矿物资源不断发现、利用的持续深化发展的进步史。当前，地表和浅部资源开采趋于殆尽，新资源能源探测深度越来越深，难度越来越大，因此在可预见的未来，深部矿产资源和化石能源的开发和利用，已是不可或缺的，并是亟待开发利用的领域。同时，自然灾害（地震、火山、海底滑坡等）也多起源于地球深部，人类赖以生存的地表系统和过程，如成山、成盆、成藏、成矿和成灾作用，几乎也都主要受控于深部过程。因此，探测深海深部结构、物质组成和深部行为的海底科学与探测技术，已经是人类社会发 展之紧迫需求，也已成为西方发达国家优先部署的国家战略和大国、强国科技竞争的热点。其中，深海区域海底构造就是各国抢占地学制高点的必争之地。海陆结合、统筹研究古太平洋-太平洋动力系统与新特提斯洋-印度洋动力系统联合对东亚大陆构造格局与演化和地表系统格局的控制，破译大陆地质难题，已是区域海底构造研究的主要或典型代表性的任务和内 容，是理解地表系统变化和深部地球动力学及其相互关系的关键科学问题和区域，也是提升我国国防安全保障能力，构筑立体军事防御体系的国家之急需。总之，为探测透视海底深部结构、发现深海深部资源、透视地球、深掘资源、拓展空间，必须要适时地加强认知区域海底构造。因此，加强发展海底科学与探测技术已至关重要和紧迫，是资源海洋、健康海洋、生态海洋建设的重要科学支撑。

《区域海底构造》一书介绍的是介于海洋地质学、大地构造学和地史学的一门针对区域海底构造演化的交叉学科，应是一项探索开拓之举和新编教材的创新尝

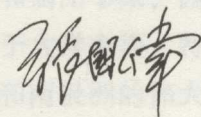
试。全面掌握全球海底组成、结构构造与演化,摸清其蕴藏丰富的自然资源和具战略地位的深海大洋的海底结构状态及动力学,就是海底构造和洋底动力学研究的基本任务与目的。区域海底结构、组成、过程、演化和机制异常复杂,但迄今还没有专门的教材系统讲授全球现今各大洋海底构造特征、过程和机制。鉴于此,该书专门就海底构造,追根溯源,探索其形成演化历史,继而拓展到古大洋演化的板块重建和古洋陆格局恢复,探讨了特提斯洋、古亚洲洋和古太平洋变迁,从四维角度全面展示区域海底构造研究的广阔时空领域及区域海底构造的形成与演化机理。

该书以地球系统科学为指导,首先重点介绍板块构造理论中的威尔逊(Wilson)旋回,进而拓展至超大陆旋回,再从系统论的角度,由表及里,遵循读者的认知规律,循序渐进地讲授海底各圈层之间的相互作用,是一本既有基础知识,又有研究前沿成果的教科书,既适合初学者入门,也适合相关专门研究人员参考。

总之,以往,我们的区域大地构造学主要偏重介绍的是大陆区的构造演化,多数较少或几乎不涉及更大区域的大洋区域海底构造演化。已有的 *Global Tectonics* 专著,也多是以陆地为主,难以满足当今海洋科学发展的需求。深海海底是中国海洋强国战略的新疆域、全球化战略的优选区,是地球系统科学研究的主要内容和方向,虽然传统板块构造理论相对已有概略骨架性简述,但深海大洋海底实质还是人类迄今为止的盲区,知之甚少。现今,新思想、新理念、新技术的不断涌现和交叉融合,多学科综合调查海底的能力已经具备,时机也已成熟,且需求更为迫切,开展其物理过程、化学过程与地球动力学过程研究,综合研究海底“湿点”(wetspot)、海洋核杂岩、热液和冷泉,揭示流体动力学和海底变形及其区域大地构造过程,综合分析深海沉积特征,探索深部碳、磷、氮、氧、铁等生命基础物质循环等系列复杂问题,均需要多学科高度的交叉,并亟待研究出更远、更久、更深、更强的探测技术手段,从而增强长期、实时、移动、立体、协同、智能的探测能力。立足全球,加强围绕区域海底构造研究,聚焦海底区域和前沿关键科学问题,应是海洋地质学实现新发展的重要切入点和突破口。为此,目前急需加速改变现状,尤为需要培养新一代青年科学家,以形成可持续发展的新生创造力量,求得新突破。

《区域海底构造》分上、中、下册,整理了全球海底典型构造、重点海域、重要成果,鲜明、突出地展现了对当今海底构造的最新研究认识与理解。我相信,这部教材必将有力地推动专业人才的培养和中国地球科学走向深海大洋,促进海洋科学的发展和人才的成长。

中国科学院院士



2018年5月28日

序

前言

自人类从非洲走出去开始，就不断认知地球的不同区域，从适应新环境，到融入新世界，在陆地区域拓展、空间资源利用中，获得了巨大的生存活力。人类是一群不甘愿寂寞的生物，他们不断地在寻找着新的刺激，甚至从陆地走向海洋，涌现了许多著名的航海家，如郑和（1371—1433）、恩里克（亨利王子，1394—1460）、达·伽马（1460 年左右至 1524 年 12 月 24 日）、巴尔托洛梅乌·迪亚士（Bartholmeu Dias，1450 年左右至 1500 年 5 月 24 日）、哥伦布（Christopher Columbus，1451—1506）、麦哲伦（Ferdinand Magellan，1480—1521）、詹姆斯·库克（James Cook，1728—1779）等。

特别是，13 世纪末，威尼斯商人马可·波罗的游记，把东方描绘成遍地黄金、富庶繁荣的乐土，引起了西方到东方寻找黄金的热潮。然而，奥斯曼土耳其帝国的崛起，控制了东西方交通要道，对往来过境的商人肆意征税勒索，加上战争和海盗的掠夺，东西方的贸易受到严重阻碍。到 15 世纪，葡萄牙和西班牙都完成了政治统一和中央集权化的过程，他们开辟前往东方的新航路，绕过近东、中东的人为障碍，寻找远东的黄金和香料，并将其作为重要的收入来源。就这样，两国的商人和封建主成为了世界上第一批殖民航海者。

虽然中国的航海发展得很早，在秦朝时期就有 3000 童男童女东渡日本的故事，后来著名的有鉴真东渡，但以明朝时期的郑和七下西洋为顶峰，更是创造了伟大的功绩。意大利航海家哥伦布先后 4 次出海远航，发现了美洲大陆，开辟了横渡大西洋到美洲的航路，证明了大地球形说的正确性，促进了旧大陆与新大陆的联系。麦哲伦从西班牙出发，绕过南美洲，发现麦哲伦海峡，然后横渡太平洋。虽然他在菲律宾被杀，但他的船队依然继续西航，回到西班牙，完成了史上第一次环球航行。因此，麦哲伦被世界认为是第一个环球航行的人。他依次经过的大洋是：大西洋、太平洋、印度洋。詹姆斯·库克是英国的一位探险家、航海家和制图学家，因进行了 3 次探险航行而闻名于世。通过这些探险考察，他给人们关于大洋方面，特别是太平洋方面的地理学知识增添了新的内容。库克船长在太平洋和南极洲的伟大的航行，为世界科学发展做出了巨大的贡献，同时，他也是第一位绘制澳大利亚东海岸

海图的人。

自哥伦布时代开启的地理大发现以来,随着大海的另一端新大陆的发现,人类现今依然在延续着“新大陆”、新疆域的发现。至2018年,持续了50年的国际大洋钻探计划已发展至国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IODP, 2013~2023),海洋大发现正当其时,无疑是人类传统思维的一种持续。本书也试图延续这种探险发现的思维模式,在新时代将这种发现拓展到海底、海底深层或深部和海底科学,这也是编著《区域海底构造》一书的目的。

对财富的执著、对新事物的好奇是人类发展不竭的动力源泉,困难挡不住人类探索的脚步,古代某个已消失王国的宝藏,向龙穴的巨龙发起挑战的勇士,美丽的精灵,凶残的兽人,灵巧的矮人……众多的未知激励着古人去探寻,无数的宝藏等待着未来的贤能去发掘,大探险的时代已经来临,无论什么都无法阻止人类探索的心态。

尽管一系列的探险和航行取得了重大成就,但这一切都是停留在海洋表面活动。海底分散着巨大的新需求、“长生不老药”的特殊基因、载有丰富宝物的古沉船……海底成为未来人类的探险仙境,人类探险空间在向“深空”拓展的同时,也在向“深海”进军。随着技术的进步,人类潜得更深、航行得更远更久,在深潜、深钻、深网等不断发展的同时,人类在深时、深树(deep trees, trees指生命树)、深矿(深部成矿、深层油气和深水水合物)、深质(深海基因、纳米尺度物质构成、高精度极微量元素测定)等领域不断突破,深海进入、深海勘探、深海开采必将成为人类活动的常态。

20世纪,人类科学事业得到空前的发展,人类认识自然界的范围无论向内(微观世界),还是向外(宏观世界),都扩大了10万倍以上(王顺义,2002)。人类认识问题的性质也在不断地变化:从研究存在的自然界,进一步发展到研究演化的自然界;从分圈层研究到跨圈层认知;从分科研究到“地球是一个活的超级有机体”的“盖娅”(Gaia)学说的整体综合探索;从研究具有必然性、精确性、渐进性、有序性和规则的自然现象,发展到进一步研究具有偶然性、模糊性、突变性、无序性和不规则性的自然现象。所有这些进步,都与20世纪层出不穷的科学革命有关,它们更深入地揭示了自然界方方面面的本质和规律,其成就体现在革命性的四大自然科学理论,其中,地学的板块构造理论被誉为四大自然科学理论之一,1968年确立的主导大地构造理论,可媲美于物理学的相对论、生物学的基因理论、天文学的大爆炸理论。

大地构造学是研究地壳构造、运动、形成机制和动力来源的学科。板块构造理论是20世纪海洋地质学和大地构造学研究的革命性成就,迄今依然展现着其强大的生命力,依然保持着其世界最盛行理论的稳固地位。特别值得一提的是,板块构造

理论首先是海洋地质学研究的直接产物。国内外一些大学基本将《板块构造》或 *Plate Tectonics* 作为教授大地构造学的专门课程，取代《区域大地构造学》等。在中国，《中国区域大地构造学》课程是以引入一些板块构造理论知识来认识中国大陆或周边地质构造演化为主，区域性海底构造演化的内容很少。基于这些原因，我们认为《板块构造》不能代表一切海底构造，《中国区域大地构造学》也存在其地域局限性，因此，将课程试图命名为《区域海底构造》，立足中国海，放眼世界大洋，这样可以囊括地幔柱、热点、大火成岩省、大洋地幔动力学、大陆边缘构造、洋陆过渡带、洋-陆转换带等新内容，空间上向深层拓展，内涵也更为丰富；也是中国“走出去”的“一带一路”倡议、创新驱动战略、海洋强国战略之急需。

在我们编写过程中也意识到阅读本书的难点：涉及非常多的全球各地地名，我们尽可能选用地质发展史上有典范意义或有经典地质现象的著名地名。此外，涉及几乎所有地质时代和大量地方性复杂地层名称，要完全记忆这些地质时代和相关地层名称也是非常困难的。因此，为了便于读者随时对照绝对时间，理顺各海域地质演化历史，我们在本书后附上了最新国际地层年表；要知晓所述地点就只能靠读者买本翔实的《世界地图》或者仔细看书中间有限的地名标注了。

本书初稿由李三忠、赵淑娟、索艳慧等完成，最终全书统稿由李三忠、刘博完成。具体分工撰写章节如下：第1章由李三忠、赵淑娟编写；第2章由李三忠、唐长燕、刘博编写；第3章由赵淑娟、李三忠编写；第4章由索艳慧、李三忠、李玺瑶编写。

在本书即将付梓之时，赵淑娟、刘博、索艳慧、唐长燕等博士组织整理重绘了所有图件，并做了最后编辑整理，付出巨大辛劳。此外，编者感谢为此书做了大量内容整理工作的团队青年教师和研究生们，包括郭玲莉、王永明、李园洁、王誉桦等博士后，尤其是王鹏程、惠格格、张臻、王倩、牟敦玲、赵林涛、兰浩圆、张剑、郭润华、胡梦颖、李少俊、陶建丽、马芳芳、甄立冰、刘金平、孟繁等研究生们为初版图件清绘做出了很大贡献。

特别感谢中国海洋大学的前辈，他们的积累孕育了我们这一系列的教材；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，因为这里面有他们的默默支持、大量辛劳、历史沉淀和学术结晶；特别感谢很多同行许可引用他们对相关内容的系统总结纳入本教材。由于编者知识水平有限，不足之处在所难免，引用遗漏也可能不少，敬请读者谅解并及时指正，我们将不断提升和修改。

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)、国家实验室深海专项 (预研) (2016ASKJ3) 和国家科技重大专项项目 (2016ZX05004001-003) 等, 特别是中国海洋大学出资了大部分出版经费, 特此感谢。

编者



2018年6月30日

目 录

第 1 章 大洋盆地演化	1
1.1 大陆裂解/洋盆孕育	3
1.2 大陆分离/大洋诞生	6
1.3 大陆相背漂移/大洋扩展成长	12
1.4 大陆相向漂移/大洋收缩消减	15
1.5 大陆靠拢/大洋关闭	18
1.6 大陆碰撞/大洋消亡	21
1.7 超大陆与超大洋旋回	28
1.7.1 地球的超大陆历史	29
1.7.2 地球的超大洋旋回	32
第 2 章 洋底多圈层相互作用	34
2.1 水圈-岩石圈相互作用	35
2.1.1 地壳浅部流体系统	37
2.1.2 地壳深部流体系统	43
2.1.3 浅部和深部流体系统的关系	44
2.1.4 流体系统与构造过程的关系	48
2.2 岩石圈-生物圈相互作用	48
2.3 脊-柱相互作用	54
2.4 脊-沟相互作用	58
2.5 柱-沟相互作用	61
2.6 洋-陆系统耦合	65
2.6.1 青藏高原隆升	66
2.6.2 水合物动态变化与陆坡稳定性	73
2.6.3 古环境与全球变化	75

2.7	地表系统—地幔动力耦合	79
2.7.1	深、浅部构造耦合	80
2.7.2	深、浅部物质循环	82
第3章	太平洋板块系统演化	87
3.1	构造单元划分	88
3.1.1	洋中脊	89
3.1.2	深海洋盆	90
3.1.3	俯冲系统	91
3.1.4	边缘海盆	99
3.1.5	微板块类型	100
3.2	典型构造分析	117
3.2.1	洋中脊构造系统	117
3.2.2	海盆构造系统	126
3.2.3	俯冲系统	131
3.2.4	弧后盆地	139
3.2.5	破碎带	163
3.3	板块重建与构造演化	166
3.3.1	太平洋板块形成机制	166
3.3.2	太平洋晚白垩世以来的演化历史	168
3.3.3	西北太平洋新生代重建	171
3.3.4	西南太平洋新生代重建	173
3.3.5	西太平洋俯冲板块年龄	180
3.3.6	加勒比板块重建	182
3.3.7	斯科舍板块重建	188
3.4	太平洋板块研究前沿	197
第4章	印度洋板块系统演化	209
4.1	构造单元划分	215
4.1.1	构造单元划分原则	217
4.1.2	构造地貌单元分级	220
4.2	典型构造分析	224
4.2.1	地幔柱—洋中脊相互作用	224
4.2.2	微板块	232

4.2.3 欧文破碎带..... 236

4.2.4 巽他—班达弯山构造..... 239

4.2.5 弧后走滑拉分盆地——安达曼盆地..... 245

4.3 板块重建与构造演化..... 246

4.3.1 印度洋洋中脊构造过程重建..... 249

4.3.2 洋中脊-热点相互作用过程 249

4.4 印度洋板块研究前沿 256

参考文献 264

附录一 288

附录二 289

后记 290

随后两个板块的分离运动相背漂移，脊底不断展宽（如大西洋），成熟的大洋在板块边缘通过俯冲作用逐渐收缩变小（如太平洋），两侧大陆相向漂移，相向运动板块的前缘大陆相互接近，之间的大洋趋于关闭（如地中海），当俯冲板块的前缘陆块相遇，大洋消亡，大陆相互碰撞，褶皱、隆起形成高大山脉（如喜马拉雅山）。

威尔逊在认真研究了上述大陆分合与大洋开闭的关系后，将上述大洋盆地的形成和发展归纳为六个阶段（表1-1，图1-1）。其中，前三个阶段代表大洋的形成和扩展，后三个阶段标志着大洋的收缩和关闭，这就是迄今具有重要意义著名的“威尔逊旋回”（Wilson Cycle）。这是板块构造理论的核心内容之一。人们据此认为，大陆一旦启动裂解、分离过程就会遵循这个威尔逊旋回顺序一直发展下去，因而不承认有大陆内造山带，只将造山带划分为与俯冲有关的俯冲造山带和与碰撞有关的碰撞造山带。根据“威尔逊旋回”，现今的大西洋和印度洋正在扩展，太平洋则处于收缩阶段。

根据板块构造理论，大洋的张开和关闭与大陆的分合与拼合是相辅相成的，大洋的形成和演化表现为张开和关闭的暂时运动。由于大洋盆地是全球规模最大的构造地貌单元，占据地球表面的60%左右，因此，大洋张开和关闭的演化旋回就控制了地球表面岩石圈构造变动和演化的格局。下面就按“威尔逊旋回”来讨论大陆分合与大洋开闭的关系和具体特征、过程。

第1章

大洋盆地演化

以活动论为核心的海底扩张学说和板块构造理论的诞生和不断完善,使人们对于大洋盆地起源与演化的认识发生了根本的变化。活动论观点认为,大洋盆地的形成和发展与岩石圈板块的分离和汇聚运动密切相关。

板块构造理论主张,大洋洋壳出现之前经历了由大陆拉张、出现大陆裂谷;随着拉张运动持续,大陆分离,出现新生洋壳(如红海),一个板块分裂为两个;随后两个板块的分离运动和相背漂移,洋底不断展宽(如大西洋);成熟的大洋在板块边缘通过俯冲作用逐渐收缩变小(如太平洋),两侧大陆相向漂移;相向运动板块的前缘大陆相互接近,之间的大洋趋于关闭(如地中海);当俯冲板块的前缘陆块相遇,大洋消亡,大陆板块碰撞、挤压、隆起形成高大山脉(如喜马拉雅山)。

威尔逊在认真研究了上述大陆分合与大洋开闭的关系后,将上述大洋盆地的形成和发展归纳为六个阶段(表1-1,图1-1)。其中,前三个阶段代表大洋的形成和扩展,后三个阶段标志着大洋的收缩和关闭,这就是迄今具有重要意义的著名的“威尔逊旋回”(Wilson Cycle)。这是板块构造理论的核心内容之一。人们据此认为,大陆一旦启动裂解、分离进程就会遵循这个威尔逊旋回顺序一直发展下去,因而不承认存在陆内造山带,只将造山带划分为与俯冲有关的俯冲造山带和与碰撞有关的碰撞造山带。根据“威尔逊旋回”,现今的大西洋和印度洋正在扩展,太平洋则处于收缩阶段。

根据板块构造理论,大洋的张开和关闭与大陆的分离与拼合是相辅相成的,大洋的形成和演化表现为张开和关闭的旋回运动。由于大洋盆地是全球规模最大的构造地貌单元,占据地球表面的60%左右,因此,大洋张开和关闭的演化旋回就控制了地球表层岩石圈构造变动和演化的格局。下面就按“威尔逊旋回”来讨论大陆分合与大洋开闭的关系和具体特征、过程。

表 1-1 大洋盆地演化的威尔逊旋回各阶段的特征

阶段	实例	主导运动	特征形态	典型火成岩	典型沉积	变质作用
I. 胚胎期	东非裂谷	抬升	裂谷	溢流拉斑玄武岩, 碱性玄武岩, 双峰式火山岩为特征	较弱的沉积作用	热液蚀变
II. 幼年期	红海、亚丁湾	扩张	窄海 (有平行的海岸及中央凹陷)	溢流拉斑玄武岩, 碱性玄武岩	陆架与海盆沉积, 通常发育蒸发岩	热液蚀变
III. 成年期	大西洋	扩张	有活动洋中脊的洋盆	溢流拉斑玄武岩, 碱性玄武岩, 但活动集中于洋中脊	丰富的陆架沉积 (冒地槽)	热液蚀变、海洋核杂岩相关变质
IV. 衰退期	太平洋	收缩	环绕陆缘的岛弧及毗邻海沟	陆缘的安山岩及花岗闪长岩为典型	大量源于岛弧的沉积物	洋中脊洋底变质、俯冲带高压-超高压变质
V. 终了期	地中海	收缩抬升	年青山系	陆缘的安山岩及花岗闪长岩为典型	大量源于岛弧的沉积物, 可发育蒸发岩	蓝片岩等高压-超高压变质
VI. 遗迹 (缝合线)	喜马拉雅山的缝合线	收缩抬升	年青山系	大量同造山花岗岩	红层	巴罗式递进变质带等区域变质作用

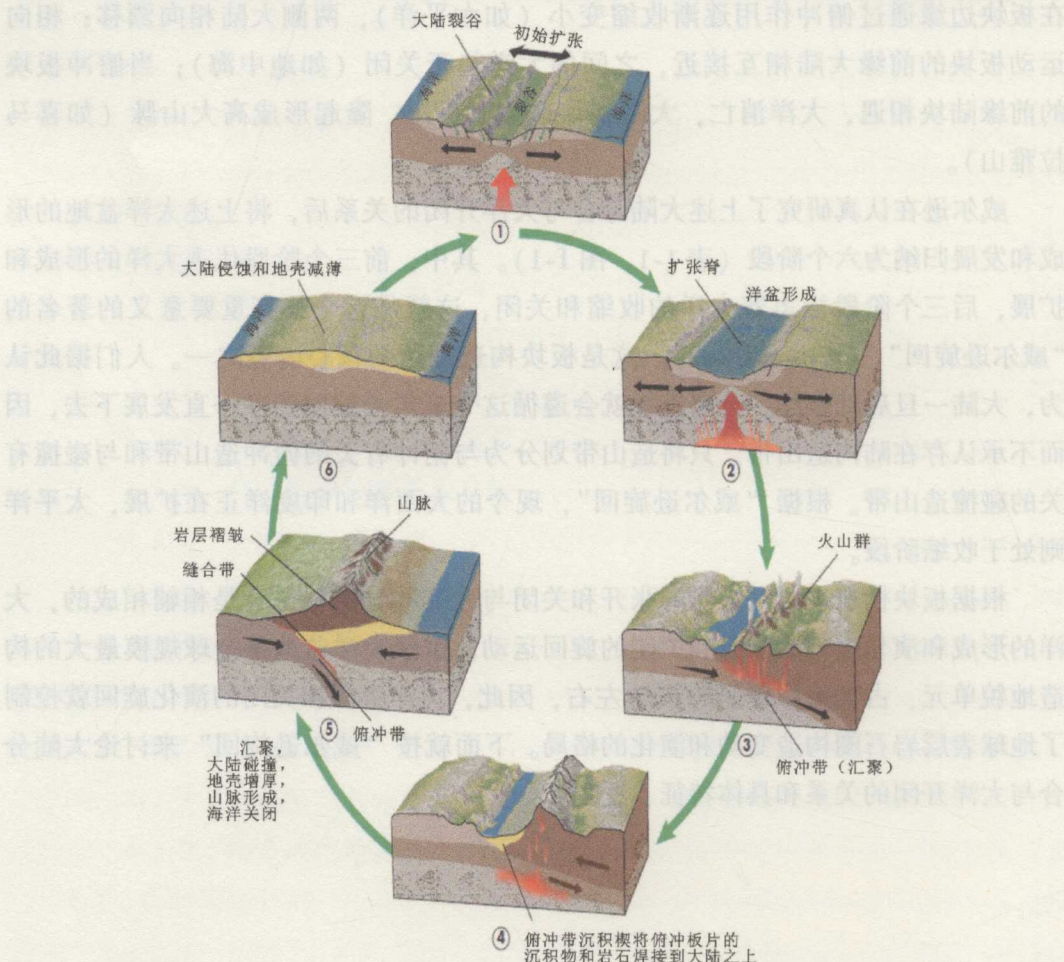


图 1-1 威尔逊旋回图解

1.1 大陆裂解/洋盆孕育

板块构造理论认为，大陆裂谷是大洋形成过程中的胚胎或孕育阶段。东非大裂谷为其典型实例（图 1-2），实为多支裂谷构成的裂谷系，故也称为东非裂谷系。东非大裂谷不仅是威尔逊旋回的起点，也是人类的摇篮。认识东非大裂谷深、浅部状态，对于人类认识自身起源也具有重要的意义。



图 1-2 东非裂谷与红海—亚丁湾

白色箭头为拉张伸展方向

东非大裂谷北起红海，南至莫桑比克的赞比西河，全长 4000km 以上，宽数十千米至 300 多千米，两缘为高角度正断层构成的裂谷肩部崖壁，一般高出谷底数百米至 2000m。裂谷内发育了一系列深陷谷地和狭长湖泊（图 1-3），如坦噶尼喀湖长约 720km，最深 1435m，低于海面 662m；再如马拉维湖，长约 560km，最深处 706m，低于海面 234m（图 1-1）。

东非裂谷系的地壳厚度约 30km, 比相邻正常地壳减薄了 10km 左右。壳下观测到 V_p 为 7.4 ~ 7.6km/s 的异常地幔, 故推测这个异常地幔为上涌的高温低密度地幔物质。裂谷以高热流值 (80 ~ 200mW/m² 甚或更高) 和浅源 (<45km) 地震活动为特征, 这个特征可与洋中脊的中央裂谷类比。东非大裂谷发育着众多的火山和温泉 (图 1-3), 火山岩以玄武岩为主, 谷壁岩石剥蚀强烈, 以陆相红层和陆源粗碎屑沉积为主。

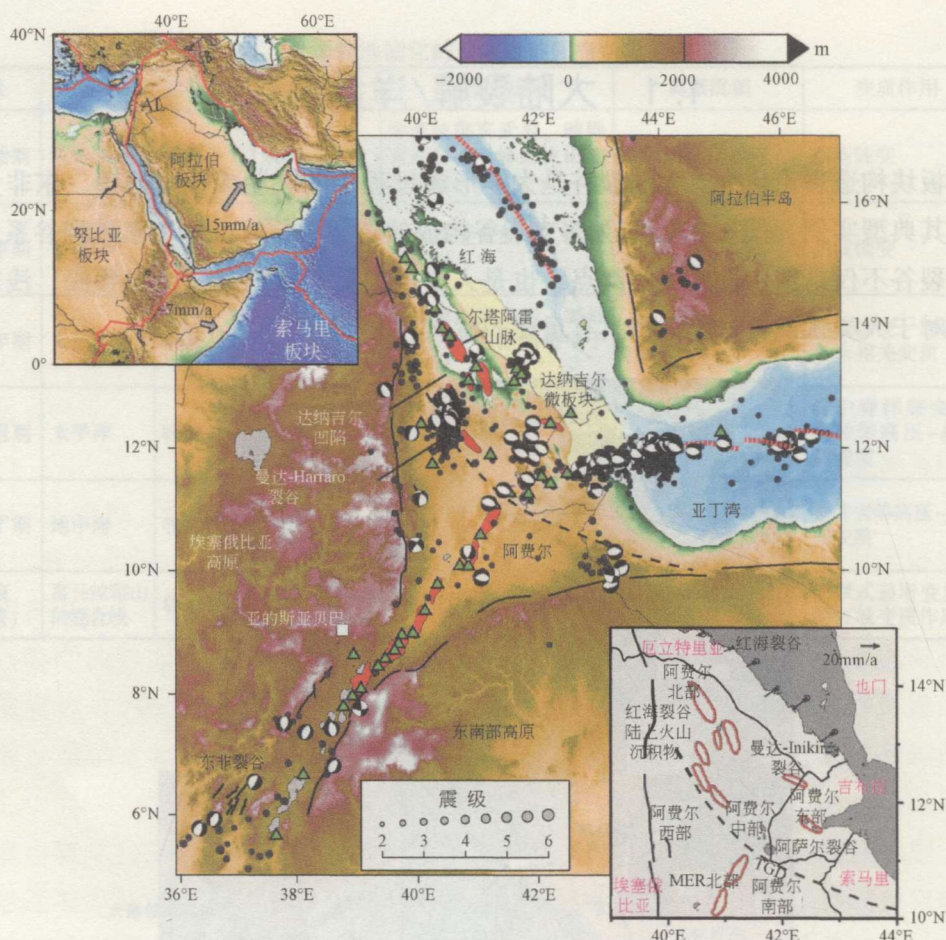


图 1-3 东非大裂谷北部大地构造位置与应力状态 (据 Keir et al., 2013)

阿费尔 (Afar) 拗陷的构造背景。黑色实线指示红海、亚丁湾和东非大裂谷渐新世—中新世的边界断裂，红色段指示第四纪至今的陆上裂谷轴，绿色三角指示全新世火山。虚线指示 Tendaho-Goba'ad 不整合面 (TGD)。达纳吉尔微陆块以浅黄色阴影表示，黑色圆圈指示 1973~2012 年的大地震。上部左侧插图：东北非和阿拉伯地形图和板块格局，注意这里将裂谷中心也作为一类板块边界，与传统板块构造理论中的洋中脊、俯冲带、转换断层三类板块边界划分不同。灰色箭头指示相对于固定的努比亚板块的板块运动速度。下部右侧插图：渐新世—中新世边界断层 (黑色) 和第四纪至今的陆上裂谷轴 (红线)，箭头指示达纳吉尔微板块的运动。MER. 主埃塞俄比亚裂谷；AL-亚喀巴—勒凡特转换断层 (Abaga-Levant)

据推测，大陆裂谷的形成可能与地幔物质的上涌有关 (图 1-4)，处于 $\pi\pi\pi$ 三节点部位 (图 1-2 上部左侧插图)。地幔物质上升导致岩石圈拱升呈穹形隆起 [图 1-5 (b)]，岩石圈拉张减薄，隆起的相对高度为 1~2km。地幔物质上升至岩石圈底部发生扩散，产生张应力。在张力作用下，穹隆上出现放射状张性裂隙，进而发育成正断层，并伴有碱性玄武岩和双峰系列的岩浆活动 (图 1-6)。随着岩石圈继续拉张变薄，穹隆顶部断裂陷落，形成典型的半地堑—地堑系 [图 1-5 (b)]。各穹隆的地堑系彼此连接，沿整条破碎带延展，就形成了大致连续的裂谷体系。拉张裂陷使大陆岩石圈的完整性丧失，并导致压力释放，则岩浆活动愈益强烈。不过，大洋洋壳诞生前的胚胎期 (大陆裂谷阶段) 相当漫长，大约需要几千万年的时间。据威尔逊旋回的演进顺序推测，东非大裂谷总有一天会完全裂开，迎进海水，成为海洋。