



# 珊瑚礁科学概论

Introduction to the Science of  
Coral Reefs

余克服 主编



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 珊瑚礁科学概论

Introduction to the Science of Coral Reefs

余克服 主编



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书将珊瑚礁作为一个系统进行了全面而深入的介绍,包括珊瑚礁的基本概念、珊瑚礁生态系统、生物多样性、地质、地貌、发育演化、环境记录、白化与生态修复、地下水资源、经济价值评估与保护管理、监测技术、岛礁工程、钙质砂的岩土力学性能等诸多方面。本书是 50 多位科技工作者在过去 20 多年的研究过程中,对国内外珊瑚礁文献进行整理和综述的基础上完成的,所述内容既清晰地阐述了珊瑚礁学科的基础知识、发展过程,也紧扣了珊瑚礁学科发展的前沿领域和最新动态,同时还涉及全球气候变暖、海平面变化、海洋酸化、碳循环、人类活动的生态影响、生态系统退化、岛礁工程建设等大众关心的科学问题。本书将有助于不同学科方向的科技人员快速了解珊瑚礁科学的内涵、精髓和前沿进展,有助于促进不同学科的交叉融合和科学发展。

本书既适于海洋、生物、环境和地质等领域的专业科技工作者和研究生、大学生使用,也是海洋管理、决策部门的重要参考资料,并可供广大海洋爱好者、生态环境保护志愿者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

珊瑚礁科学概论/余克服主编. —北京:科学出版社,2018.9  
ISBN 978-7-03-057488-6

I. ①珊… II. ①余… III. ①珊瑚礁—海洋生物学—概论 IV. ①P737.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 107067 号

---

责任编辑:朱 瑾 郝晨扬 / 责任校对:郑金红

责任印制:肖 兴 / 封面设计:铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 9 月第 一 版 开本:889×1194 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张:37 1/2

字数:1 220 000

定价:398.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言<sup>①</sup>

星罗棋布于南海的珊瑚礁是南海最重要的地质、地貌和生态特征之一，也是我国南海唯一的陆地国土类型，在维护我国海洋领土完整、行使国家主权和资源供给等方面一直发挥着重要作用。从分布面积来看，南海的珊瑚礁与澳大利亚的大堡礁大体相当，但我国珊瑚礁方面的专业人才非常少，仅相当于澳大利亚珊瑚礁专业人才的 1%（我国人口总数约是澳大利亚的 70 倍），这在很大程度上与我国对珊瑚礁的认识和重视程度低、对珊瑚礁科学知识的普及少等因素有关；当然，缺少系统介绍珊瑚礁的书籍无疑也是导致上述现象的最主要原因之一。

我国珊瑚礁领域的书籍不仅太少，而且太专，这也制约着我国珊瑚礁科学知识的普及。目前我国有关珊瑚礁的书籍基本上都是围绕某一专题进行论述，如我参与撰写的《南沙群岛及其邻近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系》《南沙群岛永暑礁新生代珊瑚礁地质》等。而珊瑚礁本身是一个系统，正如珊瑚礁区的生物多样性一样，珊瑚礁方方面面的内容都相当丰富且彼此关联，所以我国仅有的珊瑚礁专题论述著作远不能解决诸多关于珊瑚礁的疑问。我国珊瑚礁知识匮乏的问题在过去 2 年多的南海岛礁建设工程中突出地显现出来，如珊瑚礁区工程选址、钙质砂的施工工艺、岛礁建设过程中的生态环境保护策略等涉及大量的专业知识，根本无法从现有的、零散的著作中找到答案。同样，我国珊瑚礁领域专业人才不足的问题也在这次南海岛礁工程建设中暴露出来，我国珊瑚礁领域几位已经退休多年的老同志（有的已逾 80 岁高龄）还不得不多次奔赴南海岛礁建设现场进行专业指导。

其实，关于我国珊瑚礁领域人才不足、重视不够、满足不了国家需求的问题，我的博士研究生导师刘东生院士早在 1999 年就已经意识到。刘先生是我国 2003 年度国家最高科学技术奖获得者。1999 年已 82 岁高龄的刘先生与我一起到南沙群岛开展珊瑚礁科学考察、采集我的博士论文所需要的珊瑚样品，历时 30 多天，在乘坐“实验 3 号”科学考察船返程途中，刘先生与我谈了不少研究方面的事情，建议我要建立中国的珊瑚礁研究中心。虽然当时我还是一名博士研究生，但那时我国研究南海珊瑚礁的博士并不多，反映了老师对我的信任与期望。2006 年我应邀到北京为中国科学院研究生院的研究生做珊瑚礁研究专题讲座，20 个学时的讲座结束之后我到刘先生家里拜访，刘先生又再次提及中国珊瑚礁研究中心建立一事。

作为学生，我对刘先生交给我的任务始终铭记于心。我理解珊瑚礁是一个系统，涉及多方面的学科领域，单凭自己一个人从事的珊瑚高分辨率环境记录或珊瑚礁地质方向建立研究中心明显不够。所以后来我自己成为研究生导师，从 2003 年招收研究生开始，我给研究生设计的研究方向便是多方面的，包括了珊瑚礁生态、珊瑚生长率、珊瑚礁区碳循环、珊瑚共生虫黄藻、相对高纬度珊瑚对全球变化的响应、珊瑚疾病、珊瑚对污染的记录与响应、珊瑚对全球变化的记录、珊瑚礁与海平面的关系等，并没有要求研究生围绕我承担的科研项目开展工作，目的是培养多学科方向的珊瑚礁专业人才。我自己的研究工作基本上都是从文献综述开始的，我深刻体会到文献综述是科学研究的有效捷径，这是因为在阅读和综述文献的过程中可以全面了解研究领域的来龙去脉，了解研究方向的最新进展和科学前沿，因此所开展的研究工作就不至于重复前人已有的结论，研究结果或多或少能够推进学科的发展。所以我作为导师指导研究生的工作也基本上从文献综述开始，通过文献综述把握研究领域的发展过程和未解决的科学问题，从而确定自己的研究题目。10 多年坚持下来，迄今已完成关于珊瑚礁不同方向的研究综述 30 多篇，概括

<sup>①</sup> 作者：余克服，广西大学珊瑚礁研究中心，广西大学海洋学院，南宁，530004. Email: kefuyu@scsio.ac.cn; kefuyu@gxu.edu.cn

了珊瑚礁的诸多方面,如珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能、珊瑚礁区的碳循环、珊瑚礁的白化及其生态影响、珊瑚礁区的底栖生物及其生态功能、大型海藻在珊瑚礁退化过程中的作用、珊瑚藻在珊瑚礁发育过程中的作用、珊瑚同位素对海洋酸化的记录、珊瑚元素和同位素对过去气候的记录等,大大丰富了人们对珊瑚礁的认识。

2014年初我来到广西大学,建立了“珊瑚礁研究中心”。最开始设想为“中国珊瑚礁研究中心”,但因为名称若冠以“中国”二字,则需要经过一系列的论证、审批等手续,最终选择使用“广西大学珊瑚礁研究中心”,但中心的英文名称用了Coral Reef Research Center of China,也算大体在形式上实现了我的老师刘东生先生交给我的任务。2014年9月又成立了广西大学海洋学院,并定位“以珊瑚礁与生态环境的关系研究为主线”,则海洋学院既可成为培养珊瑚礁专业人才的基地,也是珊瑚礁科学知识传播的平台,可真正实现刘先生关于建立我国珊瑚礁研究中心的宗旨。传播珊瑚礁知识的最有效途径是为大学生开设珊瑚礁方面的课程,因此我决定给广西大学海洋学院的本科生开设“珊瑚礁科学概论”这一课程。2016年广西大学海洋学院迎来了首届本科生,共58人,接下来招生人数将逐步增加。预计10年下来,将有近千人学习珊瑚礁知识,这对我国珊瑚礁学科的发展、珊瑚礁知识的普及、南海岛礁开发与管理专业人才的补充将是一个非常可观的贡献。现在我国真正了解、接触珊瑚礁的专业人才应该不足100人。相信星星之火终可燃成燎原之势。

设置“珊瑚礁科学概论”这一课程则需要相应的教材。目前我国已出版的关于珊瑚礁的书籍不多,且专业性太强,因此急需编著《珊瑚礁科学概论》这本教材。好在过去10多年来我本人以及我指导的研究生已经完成了关于珊瑚礁不同方面的30多篇文献综述,国内珊瑚礁同行也对此给予大力支持,赵焕庭、张乔民、韦刚健、汪稔、王丽荣等纷纷提供相关的文献综述作为《珊瑚礁科学概论》的素材。每一篇综述基本上都谈到研究主题的起源、发展过程、主要结论、存在的问题和进一步突破的方向,基本上收集到了本领域最有代表性、最新的文献,读者从内容上理解起来将是一个循序渐进、逐渐深化的过程,其中既有基础性的介绍,也有科学前沿的分析,既可满足对珊瑚礁一般意义上的了解,也是深入钻研珊瑚礁科学问题的引导材料。事实上每一篇综述从确定题目到反复修改和最终定稿,差不多都历时一年甚至更长的时间。因此,这一系列的研究综述是《珊瑚礁科学概论》的宝贵材料,并使这部教材有其独到的优势。

珊瑚礁学科的内容相当丰富,而我们对珊瑚礁的认识仍然十分有限,因此《珊瑚礁科学概论》很难说已经完美,事实上还有诸多不足,如关于珊瑚本身的论述明显不足、关于珊瑚礁区的鱼类也还没有涉及等。这令我想起了博士后合作导师同济大学汪品先院士对我的指导。2004年前后基于估算南海珊瑚礁对碳循环的贡献的角度,汪老师希望我估算南海珊瑚礁的面积,但由于对南海珊瑚礁的认识非常有限,面积估算的不确定性因素太多,汪老师说:“即使估算出来的面积有百分之百的误差,也是值得的,它至少为进一步完善提供了改进的基础”。《珊瑚礁科学概论》就是这样,它至少从一个系统的角度把珊瑚礁诸多方面的内容汇集起来,今后在教学和科研实践中再补充、再完善相对就容易多了。《珊瑚礁科学概论》一书出版的核心目的是为珊瑚礁学科培养人才、促进学科发展、服务国家需求。

衷心感谢50多位作者对《珊瑚礁科学概论》的贡献,书中将在每一章节以脚注形式注明这些贡献者。有的综述已经被《生态学报》《热带地理》《热带海洋学报》等发表,我们也都同时注明出处并且在这里感谢这些刊物对珊瑚礁科学知识传播的贡献。考虑到每一个章节都是一个自圆其说的独立体系,我们尽可能尊重原文的完整性,即使有一些章节谈到了相似的主题,或者用到了不一致的数据(如关于珊瑚礁的面积,不论是区域性的还是全球的,因为统计方法不同等,迄今并无定论),我们也尽可能维持原状,参考文献也都直接附录在每一个章节的后面,使每一个章节都具有可读性。

感谢多年来支持我进行珊瑚礁科学研究的一系列科研项目,包括国家自然科学基金重点项目“全新世特征时期年际—年代际气候变化的南海珊瑚记录”(2003~2006年)、“全新世南海珊瑚礁白化的频率与

恢复周期”(2009~2012年)、“珊瑚礁千米深钻记录的西沙碳酸盐台地形成演化和环境变迁史”(2015~2018年),国家杰出青年基金项目“第四纪地质学”(2011~2014年),国家重大科学研究计划项目“南海珊瑚礁对多尺度热带海洋环境变化的响应、记录与适应对策研究”(2013~2017年),科技部重大基础研究前期专项“南海珊瑚礁记录的全新世纪冷、暖气候事件及其生态影响”(2003~2005年),973计划项目课题“热带海洋珊瑚礁台地与碳循环”(2007~2011年),国家海洋公益性行业科研专项项目“海南热带海洋生态资源可持续利用模式的研究”(2007~2010年),中国科学院知识创新工程重要方向性项目“南海珊瑚礁记录之4000年来年代际温度过程与生态响应”(2007~2009年),国家科技支撑计划课题“南沙海区珊瑚礁生态与工程地质环境调查技术及应用研究”(2006~2008年),广西“珊瑚礁资源与环境”八桂学者项目(2014~2019年)等。没有这些科研项目的支撑,我们就无法亲临珊瑚礁现场了解和研究珊瑚礁,无法培养这么多的研究生,当然也无法完成这么多的文献综述。

感谢左秀玲博士,她耐心地将不同作者撰写的内容进行了收集、整理、编辑和校对,使零散分布的内容成为一个整体,并对不少图、表进行了重新清绘。也感谢许莉佳博士及广西大学海洋学院的研究生姚秋翠、覃祯俊、廖芝衡、陈飏、党少华、覃业曼、刘文会、罗燕秋、骆雯雯、张惠雅、李雷云、江蕾蕾等参与书稿的校对。

前面介绍了这么多关于《珊瑚礁科学概论》一书出版的缘由,那么珊瑚礁究竟有多重要呢?

以造礁珊瑚为核心的珊瑚礁生态系统具有丰富的生物多样性、极高的初级生产力、快速的物质循环等特点,被称为“蓝色沙漠中的绿洲”“海洋中的热带雨林”,迄今为止地球上还没有发现像珊瑚礁一样支持众多物种的其他生态系统。因此长期以来,人们一直以“生态关键区”(ecologically critical area)来看待珊瑚礁生态系统。除了具有极高的生物多样性、丰富的资源(如海产品、药品、建筑和工业原材料等)之外,珊瑚礁还具有科学研究以及防浪护岸、保护环境、休闲娱乐等众多功能。据初步统计,健康的珊瑚礁每年每平方千米产鱼35t,全球约10%的经济鱼类来源于珊瑚礁区,而全球5亿人不同程度地依赖于珊瑚礁获得食物<sup>[1]</sup>。

从科学研究的角度来看,对环境变化极其敏感的珊瑚礁还是一系列环境信息的重要载体,是新物种、新基因、新药品等的重要源地,直接参与全球碳循环。珊瑚礁独特的海(海洋)-陆(岛屿)-空(大气)三维结构,使它与一系列的学科如地质、地理、工程、环境、生物、生态、水文、气象、遥感、物理、化学、药理学、天文、考古等直接相关,近年来深水机器人的试验也选择在珊瑚礁区,深海研究也以珊瑚礁为依托。从全球变化的角度来看,珊瑚礁作为高分辨率环境变化的重要载体,对揭示气候变化过程、事件和机制等做出了重要贡献。在国际顶级科学刊物 *Science* 和 *Nature* 上平均每年至少有20篇与珊瑚礁研究相关的报道;我国南海珊瑚礁的初步研究已经显示出了其在风暴、海平面、温度和厄尔尼诺(El Niño)等高分辨率环境记录研究中的巨大潜力。

全球变化是当今社会的热点,与人类的生存息息相关。从全球变化的角度来说,热带海洋珊瑚礁一直是优先关注的重点对象,主要有以下几个方面的原因。

第一,珊瑚礁对全球环境和人类社会的极端重要性。分布于热带海洋的珊瑚礁,是集生态资源、环境调节、休闲娱乐、海岸保护、国土安全、矿产油气和科学文化等于一体的重要的海洋生态系统,对人类社会和海洋生态环境的健康与可持续发展起着至关重要的作用。虽然分布于110个国家的珊瑚礁只占全球海域总面积的约0.5%,但珊瑚礁区的生物种类则占海洋生物总量的30%,包括4000多种鱼类和800多种珊瑚<sup>[2,3]</sup>。在陆地资源日益短缺的今天,热带海洋的珊瑚礁理应发挥越来越重要的作用。

第二,珊瑚礁对全球变化的敏感性和脆弱性。高生物多样性、高经济价值的珊瑚礁生态系统,在全球变化影响下,近几十年来处于急剧退化之中,被预言可能是因为全球变化而失去的第一个生态系统。从最能反映珊瑚礁健康状况的指标——活珊瑚覆盖度来看,世界上对珊瑚礁保护最好的澳大利亚大堡礁在1960~2003年活珊瑚覆盖度从约50%下降到约20%<sup>[4]</sup>,加勒比海珊瑚礁区在1977~2001

年活珊瑚覆盖度从约 50% 下降到约 10%<sup>[5]</sup>。从最能反映珊瑚健康状况的指标——珊瑚钙化率来看, 跨度约 2000km 的大堡礁自 1990 年以来珊瑚钙化率下降了 14.2%, 这种大幅度的下降是过去 400 年来从未出现过的现象<sup>[6]</sup>。全球已知的 845 种珊瑚中, 约 1/3 的种类 (32.8%) 面临灭绝的威胁<sup>[3]</sup>。对全球而言, 约 20% 的珊瑚礁已经彻底消失, 约 25% 的珊瑚礁处于威胁状态, 约 60% 的珊瑚礁可能在 2030 年消失, 现在世界上没有完好保存的珊瑚礁<sup>[7, 8]</sup>, 全球变化引起的海水变暖和酸化被认为是导致珊瑚礁退化的最主要原因。许多研究预测显示, 若全球变化趋势得不到有效控制, 则珊瑚礁难以幸存至 21 世纪末<sup>[9-13]</sup>。

第三, 珊瑚礁是记录全球变化的重要载体, 能够准确记录不同时间尺度热带海洋环境的变化过程及其与全球变化相互作用的机制。珊瑚具有对环境变化极其敏感 (如高温将导致珊瑚热白化、低温将导致珊瑚冷白化、海水酸化将减缓珊瑚钙化等)、年生长量大 (块状珊瑚每年长 1~2cm, 记录环境信息的时间分辨率可达月; 枝状珊瑚生长更快)、年际界线清楚 (像树轮一样)、连续生长时间长 (一般块状珊瑚可连续生长 200~300 年, 最长达 800 年左右)、环境信息记录准确 (如珊瑚骨骼 Sr/Ca 记录月分辨率海水温度的准确度高于  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>、文石质骨骼适合高精度的铀系测年 (如 12 年  $\pm 1$  年)、分布广等特点<sup>[15]</sup>, 是高分辨率地记录过去环境变化过程的重要载体, 并在揭示低纬度热带海区环境变化过程及其在全球气候变化中的作用等方面发挥着重要功能。例如, 印度洋近 194 年的珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  的记录显示太平洋可能通过厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 遥相关驱动其他区域年代际气候变化, 南太平洋近 271 年珊瑚的 Sr/Ca 记录显示热带驱动是太平洋年代际尺度气候变化的重要驱动机制<sup>[16]</sup>, 大堡礁近 420 年珊瑚的 Sr/Ca、U/Ca 和  $\delta^{18}\text{O}$  的组合研究显示全球小冰期气候在一定程度上是热带太平洋水汽加强向极地传输所致<sup>[17]</sup>。总之, 来源于热带的、非常有限的珊瑚记录业已揭示出低纬度热带海区在全球气候变化中起着相当关键的作用! 因此, 世界上一些大型的气候研究计划 [如气候变率与可预测性研究计划 (CLVAR)] 都明确指出, 在低纬度海区应该用珊瑚作为载体重建过去年际到年代际的气候序列。

从我国南海珊瑚礁的角度来看, 珊瑚礁是南海最重要、最具特色的生态系统, 直接影响到我国南海海域约 3 000 000km<sup>2</sup> 的生态特征。从近赤道的曾母暗沙 (约 4°N), 到南海北部雷州半岛、涠洲岛 (20°N~21°N) 以及台湾南岸恒春半岛 (24°N) 都分布着珊瑚礁; 从分布区域来看, 我国南海珊瑚礁可大体分为南沙群岛、西沙群岛、中沙群岛、东沙群岛、海南岛、台湾岛和华南大陆沿岸等七大区域; 包括环礁、台礁和岸礁等多种类型; 其发育历史可追溯至早中新世或晚渐新世。与世界其他海域的珊瑚礁一样, 南海珊瑚礁一直在南海的生物多样性维护、生态资源供给等方面发挥着极其重要的作用。在当今全球珊瑚礁急剧退化的大环境下, 南海珊瑚礁也未能幸免, 其退化速率甚至高于全球平均值。例如, 从最能反映珊瑚礁健康状况的活珊瑚覆盖度这一指标来看, 南海北部大亚湾海区活珊瑚覆盖度从 1977 年的 77% 下降到 2008 年的 15%<sup>[18]</sup>, 海南三亚鹿回头岸礁从 1960 年的 80%~90% 下降到 2009 年的 12%<sup>[19]</sup>, 西沙群岛永兴岛从 1980 年的 90% 下降到 2008~2009 年的 20%<sup>[20]</sup>, 总体来说这三个礁体活珊瑚覆盖度在过去 50 年内下降都达 80% 以上<sup>[21]</sup>, 严重影响到了南海的生态安全。研究的这三个礁体只是南海珊瑚礁的缩影, 今天的南海已经没有了原始状态的珊瑚礁。

因此需要对南海珊瑚礁生态系统及其生态功能给予高度关注, 迫切需要一批专业人才来规划、管理、保护和可持续开发利用南海的珊瑚礁。希望《珊瑚礁科学概论》能够发挥这一作用。

## 参 考 文 献

- [1] Wilkinson C. Status of coral reefs over the world: 2008 global coral reef monitoring network and reef and rainforest research centre. *Coral Reefs*, 2008: 296.
- [2] Normile D. Bringing coral reefs back from the living dead. *Science*, 2009, 325(5940): 559-561.
- [3] Carpenter K E, Abrar M, Aeby G, et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and

- local impacts. *Science*, 2008, 321(5888): 560-563.
- [4] Bellwood D R, Hughes T P, Folke C, et al. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 2004, 429(6994): 827-833.
- [5] Gardner T A, Côté I M, Gill J A, et al. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 2003, 301(5635): 958-960.
- [6] De'Ath G, Lough J M, Fabricius K E. Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 2009, 323(5910): 116-119.
- [7] Riegl B, Bruckner A, Coles S L, et al. Coral reefs: threats and conservation in an era of global change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162(1): 136-186.
- [8] Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, et al. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 2003, 301(5635): 929-933.
- [9] Lesser M P. Coral reef bleaching and global climate change: can corals survive the next century? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(13): 5259-5260.
- [10] Buddemeier R W, Lane D R, Martinich J A. Modeling regional coral reef responses to global warming and changes in ocean chemistry: Caribbean case study. *Climatic Change*, 2011, 109(3-4): 375-397.
- [11] Hoegh-Guldberg O. Climate change and coral reefs: Trojan horse or false prophecy? *Coral Reefs*, 2009, 28(3): 569-575.
- [12] Pandolfi J M, Bradbury R H, Sala E, et al. Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science*, 2003, 301(5635): 955.
- [13] Cantin N E, Cohen A L, Karnauskas K B, et al. Ocean warming slows coral growth in the Central Red Sea. *Science*, 2010, 329(5989): 322-325.
- [14] Beck J W, Edwards R L, Ito E, et al. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science*, 1992, 257(5070): 644-647.
- [15] Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  records of *Porites lutea*, corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2-4): 301-316.
- [16] Linsley B K, Wellington G M, Schrag D P. Decadal sea surface temperature variability in the subtropical South Pacific from 1726 to 1997 AD. *Science*, 2000, 290(5494): 1145-1148.
- [17] Hendy E J, Gagan M K, Alibert C A, et al. Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at end of little ice age. *Science*, 2002, 295(5559): 1511-1514.
- [18] Chen T R, Yu K F, Shi Q, et al. Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12): 2107-2117.
- [19] Zhao M X, Yu K, Zhang Q, et al. Long-term decline of a fringing coral reef in the northern South China Sea. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(5): 1088-1099.
- [20] Shi Q, Liu G H, Yan H Q, et al. Black disease (*Terpios hoshinota*): a probable cause for the rapid coral mortality at the northern reef of Yongxing Island in the South China Sea. *Ambio*, 2012, 41(5): 446-455.
- [21] Yu K F. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(8): 1217-1229.



# 目 录

第一章 珊瑚礁及其形成演化	1
第一节 珊瑚礁的定义与类型	1
参考文献	2
第二节 珊瑚的基本结构及生理特点	2
参考文献	5
第三节 石珊瑚的形态、分布与主要属种	6
一、珊瑚的主要形状	6
二、珊瑚的主要地理分布	7
三、常见珊瑚属	7
参考文献	11
第四节 珊瑚礁形成机制	11
一、珊瑚礁形成的学说	12
二、区域珊瑚礁形成机制的研究	16
三、结论	19
参考文献	19
第二章 珊瑚礁地貌	22
第一节 环礁地貌与现代沉积	22
一、南沙群岛环礁地貌带的划分	22
二、环礁的现代沉积特征	24
参考文献	26
第二节 灰沙岛地貌与现代沉积	27
一、永兴岛的地貌	27
二、永兴岛现代沉积分布	28
三、生物组分在各地貌-沉积带的特征	32
四、讨论	32
参考文献	34
第三节 华南珊瑚礁的海岸生物地貌过程	34
参考文献	37
第三章 珊瑚礁生态系	39
第一节 珊瑚礁生态系的一般特点	39
一、珊瑚礁生态系的概念	39
二、珊瑚礁生态系的类型与地理分布	39

三、珊瑚礁生态系的结构和功能 .....	40
四、影响珊瑚礁生态系稳定的生态压力 .....	43
五、珊瑚礁生态系的保护和管理 .....	43
参考文献 .....	44
第二节 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能 .....	45
一、珊瑚礁生物的物种多样性 .....	45
二、珊瑚礁生物多样性的空间特征 .....	46
三、珊瑚礁的生态功能 .....	46
四、珊瑚礁生物多样性研究发展趋势 .....	48
五、我国珊瑚礁生物多样性研究概况和展望 .....	50
参考文献 .....	51
第三节 珊瑚藻在珊瑚礁发育过程中的作用 .....	53
一、珊瑚藻的一般特征 .....	54
二、珊瑚礁生态系统中珊瑚藻的研究 .....	56
三、珊瑚藻对珊瑚礁发育的作用 .....	56
四、问题及展望 .....	58
五、结论 .....	59
参考文献 .....	59
第四节 珊瑚礁区草皮海藻的生态功能 .....	61
一、草皮海藻的概述 .....	62
二、珊瑚礁区草皮海藻的生态功能 .....	64
三、问题与展望 .....	67
参考文献 .....	68
第五节 大型海藻在珊瑚礁退化过程中的作用 .....	72
一、珊瑚礁中的海藻 .....	72
二、珊瑚礁退化概况 .....	73
三、大型海藻在珊瑚礁退化中的表现 .....	73
四、大型海藻对珊瑚的直接影响 .....	74
五、大型海藻与珊瑚的竞争机制 .....	76
六、研究展望 .....	77
参考文献 .....	78
第六节 珊瑚礁区底栖动物群落的特点及其生态功能 .....	80
一、珊瑚礁区底栖动物群落的总体特点 .....	81
二、珊瑚礁区底栖动物的生态功能 .....	83
三、全球变化和人类活动对珊瑚礁区底栖动物的生态影响 .....	84
四、我国珊瑚礁区底栖动物研究现状 .....	87
参考文献 .....	89

第七节 珊瑚礁区海胆的生态功能 .....	93
一、珊瑚礁海胆的种类、形态特征及其生活习性 .....	93
二、海胆的化学成分及活性 .....	95
三、海胆对珊瑚礁区海藻的生态影响 .....	95
四、海胆对珊瑚礁区珊瑚的生态影响 .....	97
五、海胆对珊瑚礁区其他动物的影响 .....	97
六、海胆密度与珊瑚礁系统健康的关系 .....	98
七、影响海胆在珊瑚礁生态系统中分布和丰度的因素 .....	98
八、总结 .....	100
参考文献 .....	100
第八节 珊瑚礁区的有孔虫及其环境指示意义 .....	103
一、珊瑚礁区现代有孔虫的物种多样性与组合特征 .....	103
二、珊瑚礁区有孔虫对环境的响应与记录 .....	105
三、有孔虫对珊瑚礁生态系统健康状况的指示 .....	109
参考文献 .....	109
第四章 珊瑚共生微生物 .....	115
一、引言 .....	115
二、珊瑚共生微生物的研究方法 .....	115
三、珊瑚共生微生物的多样性 .....	117
四、珊瑚共生微生物的环境响应 .....	118
五、珊瑚益生菌假说 .....	119
六、珊瑚共生微生物资源的开发与利用 .....	120
七、展望 .....	121
参考文献 .....	122
第五章 珊瑚黏液及其功能 .....	126
一、珊瑚黏液层的形成过程 .....	126
二、珊瑚黏液的组成 .....	127
三、珊瑚黏液的生物学功能 .....	128
四、结论与展望 .....	130
参考文献 .....	130
第六章 珊瑚礁白化研究进展 .....	133
一、珊瑚虫和虫黄藻共生：珊瑚礁发育的最基本生态特征 .....	133
二、珊瑚礁白化的诱发因素 .....	135
三、珊瑚礁白化机制 .....	137
四、珊瑚礁白化后的恢复 .....	138
五、珊瑚礁白化的生态影响 .....	139

六、珊瑚礁对全球变化的可能适应 .....	140
七、我国珊瑚礁白化的研究现状 .....	140
八、结论 .....	141
参考文献 .....	141
<b>第七章 珊瑚疾病的主要类型、生态危害及其与环境的关系 .....</b>	<b>145</b>
一、珊瑚疾病的主要类型 .....	146
二、珊瑚疾病的生态危害 .....	150
三、珊瑚疾病与环境的关系 .....	151
四、珊瑚礁疾病研究对我国现代珊瑚礁学科发展的启示 .....	154
五、结论 .....	155
参考文献 .....	155
<b>第八章 珊瑚礁生态系统服务及其价值 .....</b>	<b>159</b>
<b>第一节 珊瑚礁生态系统服务及其价值评估 .....</b>	<b>159</b>
一、引言 .....	159
二、珊瑚礁生态系统服务 .....	160
三、珊瑚礁生态系统服务价值 .....	161
四、珊瑚礁生态系统价值的评价方法 .....	162
五、中国珊瑚礁生态系统服务及其价值的研究概况与前景 .....	164
参考文献 .....	164
<b>第二节 南海珊瑚礁经济价值评估 .....</b>	<b>166</b>
一、研究区域概况 .....	167
二、研究方法 .....	167
三、结果与分析 .....	167
四、讨论 .....	170
参考文献 .....	171
<b>第九章 珊瑚礁区碳循环研究进展 .....</b>	<b>173</b>
一、珊瑚礁区海-气界面 CO <sub>2</sub> 交换 .....	173
二、珊瑚礁区海水中碳的迁移转化 .....	174
三、珊瑚礁区海水-沉积物界面间碳的迁移转化 .....	176
四、珊瑚礁区碳循环的影响因素 .....	177
五、生物在珊瑚礁区碳循环中的作用 .....	179
六、研究展望 .....	179
参考文献 .....	180
<b>第十章 珊瑚礁生态系统氮循环 .....</b>	<b>182</b>
一、珊瑚礁与营养盐 .....	182
二、珊瑚礁氮循环 .....	183

参考文献	189
第十一章 珊瑚礁与海洋环境	196
第一节 珊瑚礁区海洋环境要素概况	196
参考文献	199
第二节 消失的珊瑚礁	201
参考文献	204
第三节 海洋酸化对造礁珊瑚的影响	204
一、CO <sub>2</sub> 浓度变化对海洋碳酸盐系统的影响	204
二、CO <sub>2</sub> 浓度变化对造礁珊瑚的影响	205
参考文献	208
第四节 重金属对珊瑚生长的影响研究综述	210
一、引言	210
二、重金属对珊瑚的影响	211
三、珊瑚对重金属污染的历史记录	214
四、结论	215
参考文献	215
第十二章 珊瑚对海洋环境变化的记录	218
第一节 珊瑚骨骼生长研究评述	218
一、珊瑚骨骼架构	218
二、珊瑚骨骼生长的周期性	220
三、块状珊瑚骨骼密度变化	220
四、珊瑚骨骼钙化作用	224
五、结语	225
参考文献	225
第二节 利用珊瑚生长率重建西沙海域中晚全新世海温变化	228
一、研究区域、样品和方法	228
二、珊瑚生长率温度计的构建	229
三、结果与讨论	230
四、西沙海域海水表层温度变化的驱动机制	233
五、结论	234
参考文献	234
第三节 造礁珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的过去气候研究进展	236
参考文献	240
第四节 造礁珊瑚骨骼 $\delta^{13}\text{C}$ 及其反映的环境信息研究概况	241
一、影响造礁珊瑚骨骼 $\delta^{13}\text{C}$ 的环境因素	242
二、珊瑚骨骼 $\delta^{13}\text{C}$ 反映的环境信息	243
三、珊瑚骨骼 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系及其反映的环境信息	244

参考文献	245
第五节 造礁珊瑚骨骼碳同位素组成研究进展	246
一、引言	246
二、造礁珊瑚骨骼 $^{13}\text{C}$ 的影响因素	247
三、造礁珊瑚骨骼 $\delta^{13}\text{C}$ 对环境变化的记录	255
四、小结	258
参考文献	258
第六节 珊瑚骨骼 Sr/Ca 温度计	261
一、珊瑚骨骼 Sr/Ca 值与海水表层温度关系的研究	261
二、珊瑚骨骼的 Sr/Ca 古温度计中存在的问题	263
三、影响珊瑚骨骼 Sr/Ca 值的可能因素	263
参考文献	264
第七节 热带海洋气候环境变化的珊瑚地球化学记录	264
一、热带海洋气候环境变化研究中常用的珊瑚地球化学指标	265
二、珊瑚地球化学指标对热带海洋气候变化的记录	268
三、珊瑚地球化学指标对海水环境变化的记录	275
四、我国南海珊瑚对气候环境演变的记录	276
五、存在的问题和未来的发展方向	281
参考文献	282
第八节 造礁珊瑚碳、氮、硼同位素的海洋酸化指示意义	288
一、海洋酸化与海洋碳酸盐平衡体系的改变	288
二、造礁珊瑚对海洋酸化的响应	289
三、珊瑚骨骼同位素指标对海洋酸化的记录	290
四、结论与展望	292
参考文献	293
第九节 珊瑚礁对赤潮的响应与记录	295
一、赤潮发生的机制和水化学特征	296
二、赤潮的生态影响与珊瑚礁对赤潮的响应	297
三、珊瑚骨骼对赤潮的记录	297
四、结语和展望	300
参考文献	300
第十节 稀土元素地球化学在珊瑚礁环境记录中的研究	302
一、珊瑚礁稀土元素记录的原理及应用	303
二、珊瑚礁稀土元素记录环境指标的局限性	308
三、珊瑚礁稀土元素研究展望	308
四、结语	309
参考文献	310

第十一节 荧光分析方法在古环境分析中的应用 .....	314
一、珊瑚骨骼中黄-绿荧光带的发现及其形成原因 .....	314
二、导致珊瑚骨骼中黄-绿荧光带的富啡酸来源于陆地 .....	315
三、珊瑚骨骼黄-绿荧光带与陆地降雨量之间关系的研究 .....	315
四、光分析方法在古环境研究中的应用 .....	317
五、注意的问题和应用前景 .....	318
参考文献 .....	318
第十二节 用珊瑚研究过去的地震 .....	318
一、用珊瑚研究过去地震的原理 .....	319
二、研究实例 .....	319
参考文献 .....	320
第十三节 微环礁的高分辨率海平面指示意义 .....	320
一、微环礁的定义和特征 .....	320
二、微环礁记录海平面的原理 .....	322
三、微环礁记录海平面的研究进展 .....	324
四、结语和研究展望 .....	326
参考文献 .....	326
第十四节 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展 .....	329
一、全新世古海平面研究的标志物 .....	329
二、南海周边地区的全新世高海平面证据 .....	330
三、研究热点与争议 .....	331
四、问题与探讨 .....	334
五、结语 .....	336
参考文献 .....	336
第十三章 南海相对高纬度珊瑚对海洋环境变化的响应和高分辨率记录 .....	339
一、相对高纬度珊瑚的研究意义 .....	339
二、南海北部相对高纬度珊瑚礁和珊瑚群落 .....	340
三、气候变暖和极端事件在珊瑚骨骼中的记录信号 .....	340
四、珊瑚骨骼元素地球化学指标对水环境变化的高分辨率记录 .....	342
五、亚热带珊瑚 Sr/Ca-SST 温度计的建立 .....	343
参考文献 .....	344
第十四章 全新世珊瑚礁的发育概况及其记录的环境信息 .....	347
一、引言 .....	347
二、全新世珊瑚礁的发育概况 .....	347
三、全新世珊瑚礁对环境变化的记录 .....	354
四、结论 .....	357
参考文献 .....	357

第十五章 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录和响应 .....	361
一、南海珊瑚礁的分布与生态现状 .....	361
二、南海珊瑚礁记录的环境变化过程 .....	363
三、南海珊瑚礁对历史时期气候变化的响应规律 .....	367
四、结论 .....	369
参考文献 .....	370
第十六章 冷水珊瑚礁研究进展与评述 .....	373
一、冷水珊瑚礁的重要性 .....	373
二、国际冷水珊瑚礁研究动态 .....	374
三、展望 .....	376
参考文献 .....	376
第十七章 珊瑚礁的成岩作用 .....	380
一、珊瑚礁的现代沉积特征 .....	381
二、主要成岩作用过程 .....	381
三、成岩作用的发育模式 .....	388
四、成岩作用的古气候、古环境意义 .....	389
五、结语 .....	391
参考文献 .....	391
第十八章 珊瑚礁区的海滩岩及其记录的环境信息 .....	396
一、引言 .....	396
二、珊瑚礁区海滩岩的岩石学特征 .....	397
三、珊瑚礁区海滩岩的形成机制 .....	402
四、珊瑚礁区海滩岩的环境意义 .....	404
五、结论 .....	406
参考文献 .....	406
第十九章 珊瑚礁地下水 .....	409
第一节 珊瑚礁岛屿淡水透镜体研究综述 .....	409
一、淡水透镜体的形成 .....	409
二、淡水透镜体形成发育的影响因素 .....	411
三、自然和人为因素对淡水透镜体的压力 .....	413
四、淡水透镜体的研究模型 .....	415
五、我国对珊瑚礁岛屿淡水透镜体的研究 .....	416
六、展望 .....	417
参考文献 .....	417
第二节 南海诸岛灰沙岛淡水透镜体研究述评 .....	420
一、淡水透镜体的理论 .....	421
二、永兴岛地质地貌环境 .....	421
三、永兴岛淡水透镜体 .....	424



四、南海珊瑚礁灰沙岛淡水透镜体的开发利用问题 .....	427
五、结论 .....	428
参考文献 .....	429
<b>第二十章 珊瑚礁工程</b> .....	<b>431</b>
<b>第一节 珊瑚礁工程地质研究的内容和方法</b> .....	<b>431</b>
一、珊瑚礁工程地质研究内容 .....	431
二、珊瑚礁工程地质研究方法 .....	433
三、结语 .....	435
参考文献 .....	435
<b>第二节 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展</b> .....	<b>436</b>
一、引言 .....	436
二、珊瑚礁岩土的组成 .....	436
三、珊瑚礁钙质砂的物理性质 .....	436
四、珊瑚礁钙质砂的静力学特性 .....	437
五、珊瑚礁岩土中的桩基工程特性 .....	438
六、珊瑚礁混凝土的特性 .....	439
七、珊瑚礁岩土固结成岩后的工程特性 .....	440
八、珊瑚礁岩土工程研究展望 .....	440
参考文献 .....	441
<b>第三节 钙质砂的工程性质研究进展与展望</b> .....	<b>443</b>
一、引言 .....	443
二、钙质砂的成因与分布 .....	443
三、钙质砂的力学特性 .....	443
四、钙质砂的特殊力学性能 .....	445
五、钙质砂中的基础类型 .....	446
六、珊瑚礁上修建大型工程的探讨 .....	447
七、钙质砂的研究展望 .....	447
参考文献 .....	447
<b>第四节 钙质砂中的桩基工程研究进展述评</b> .....	<b>449</b>
一、引言 .....	449
二、桩基场址岩土工程调查和现场测试 .....	450
三、桩侧摩阻力特性 .....	451
四、桩端阻力性状 .....	453
五、水平承载特性 .....	455
六、其他特性简述 .....	456
七、结论与展望 .....	456
参考文献 .....	456