

涠洲岛珊瑚礁近千年的发展过程及其对气候变化的响应*

张婷^{1,2,3}, 胡敏航^{1,2}, 张文静^{1,2,3}, 陈天然^{1,3}, 刘猛⁴

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广东 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南方科技大学海洋科学与工程系, 广东 深圳 518055

摘要: 高纬度珊瑚栖息地能否成为气候变暖背景下热带珊瑚物种的“避难所”仍不明确, 南海北部的相关研究更是稀少。本文以取自涠洲岛的 2 根珊瑚礁沉积岩心为研究对象, 通过 U-Th 定年、沉积组分分析以及珊瑚种属鉴定等方法, 探讨近千年以来珊瑚礁的发展过程及其对气候变化的响应。研究发现, Core1(石螺口)岩心沉积的 3 个快速堆积阶段分别与罗马暖期、中世纪暖期和现代暖期大致对应; 而 2 个缓慢堆积阶段则分别与黑暗时代冷期和小冰期大致对应, 证实了温暖的气候对珊瑚礁发育有促进作用, 而寒冷的气候则不利于珊瑚礁的发育; 此外, 现代强烈的人为干扰可能也导致了涠洲岛珊瑚礁的迅速退化。Core2(南湾)中陆源沉积含量高, 珊瑚年龄主要集中在 800AD—950AD 和现代这两个时间段内, 其原因可能与环境变化、风暴作用及湾内现代珊瑚分布特征有关。通过对比这两个站位的珊瑚礁沉积特征, 本文进一步提出“完全避难所”和“非完全避难所”的概念, 揭示涠洲岛珊瑚可能同时具有低纬度热带珊瑚礁和高纬度珊瑚群落这两种发育特征和趋势。

关键词: 高纬度; 珊瑚礁发育; 气候变化; 避难所分类; 涠洲岛

中图分类号: P736.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2020)04-0070-10

Coral reef growth of Weizhou Island and its response to climate change in the past millennium

ZHANG Ting^{1,2,3}, HU Minhang^{1,2}, ZHANG Wenjing^{1,2,3}, CHEN Tianran^{1,3}, LIU Meng⁴

1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

Abstract: Whether high-latitude coral habitat could become “refuge” for tropical coral species under global warming is still unclear, and related research on the northern South China Sea is especially rare. Based on two reef cores drilled from Weizhou Island, the development history of coral reefs surrounding Weizhou Island and its response to climate change in the past millennium are explored with the help of U-Th dating technology, sedimentary component analyses and coral species identification. Three rapid accretion stages of Core1 (collected from Shiluokou) deposition roughly correspond to the Roman Warm Period, Medieval Warm Period and Present Warm Period, respectively. And two slow accretion stages roughly correspond to the Dark Age Cold Period and Little Ice Age. They suggested that warm climate promotes reef

收稿日期: 2019-10-16; 修订日期: 2019-11-26。姚衍桃编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476038、41676049); 广东省自然科学基金项目(2018A030313142)

作者简介: 张婷(1994—), 女, 甘肃省白银市人, 硕士研究生, 主要从事珊瑚礁地质研究。E-mail: zhangting173@mailsucas.ac.cn

通信作者: 陈天然。E-mail: chentianran@scsio.ac.cn

*感谢澳大利亚昆士兰大学研究人员赵建新、俸月星、刘芳、阮德爱在 U-Th 同位素测定中给予的帮助。

Received date: 2019-10-16; **Revised date:** 2019-11-26. Editor: YAO Yantao

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41476038, 41676049); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2018A030313142)

Corresponding author: CHEN Tianran. E-mail: chentianran@scsio.ac.cn

development, while cold climate has adverse impacts on coral reef development. Strong local disturbances may have caused the rapid degradation of Weizhou Island coral reefs in recent decades. Core2 (collected in Southern Bay) has high terrigenous sediment content. U-Th ages in Core2 are concentrated in a relatively narrow time interval of 800AD—950AD and present, probably referred to environment changes, storms and the distribution of modern corals. By comparing the two sites on the same island, we further suggest the concepts of “Complete Refuge” and “Incomplete Refuge”, and reveal that Weizhou Island corals may have both developmental characteristics and trends of low-latitude tropical coral reefs and high-latitude coral communities.

Key words: high-latitude; coral reef development; climate change; classification of refuges; Weizhou Island

相对于低纬度热带珊瑚, 高纬度珊瑚主要分布在相对高纬度的亚热带海域, 易受冬季低温($<18^{\circ}\text{C}$)影响(方立行, 1989; 陈天然 等, 2014)。在气候变暖背景下, 珊瑚栖息地的分布范围可能会向更高纬度延伸, 因此相对高纬度海域有可能成为未来的珊瑚避难所(Riegl et al, 2003; Halfar et al, 2005; Lybolt et al, 2011)。然而, 高纬度珊瑚也会受气候变化的负面影响, 比如极端高温($>30^{\circ}\text{C}$)和极端低温($<13^{\circ}\text{C}$)均会抑制珊瑚生长甚至导致珊瑚死亡(Chen et al, 2013)。因此, 高纬度珊瑚栖息地能否成为未来的珊瑚避难所, 以及哪种环境条件下的高纬度珊瑚栖息地能成为真正的避难所等科学问题, 迄今仍不清楚。

水下生态调查是评估珊瑚礁或珊瑚群落生态现状最直接的手段。然而, 有关南海珊瑚的现代监测记录只有短短几十年的历史(赵美霞 等, 2009), 对于预测珊瑚礁未来发育趋势远远不够。只有拉长时间尺度, 研究珊瑚礁在百年乃至千年尺度上的发育过程及其对气候变化的响应规律, 才能进行有效预测。

通过钻取珊瑚礁沉积岩心, 结合礁相分析和现代高精度定年技术, 探寻珊瑚礁的发育历史与气候变化的关系, 是拉长研究时间尺度的有效方法。目前, 对珊瑚礁岩心的研究主要集中在低纬度的热带海域, 如新喀里多尼亚(Cabioch, 2003)、留尼旺(Camoin et al, 1997)、伯里兹(Gischler et al, 2013)、美属维京群岛(Hubbard et al, 2005)、帕劳(Kayanne et al, 2002)、大堡礁(Perry et al, 2009; Roff et al, 2015)、塞舌尔(Braithwaite et al, 2000)、科摩罗群岛(Zinke et al, 2005)、马尔代夫(Kench et al, 2009)、巴拿马(Toth et al, 2015; Cramer et al, 2017)以及吕宋岛(Shen et al, 2010; Gong et al, 2013)等。高纬度珊瑚礁的发育过程及其受到的环境因素和调控作用可能更加复杂, 然而仅有的研究主要集中在日本海域(Yamano et al, 2001; Hongo et al,

2010; Hamanaka et al, 2012)。受黑潮暖流影响, 南海北部高纬度珊瑚礁的发育模式与日本珊瑚礁有很大差异, 因而有关气候变化如何影响南海高纬度珊瑚礁发育的问题依然不清楚。

南海北部的涠洲岛海域不受暖流影响, 当地珊瑚礁是高纬度珊瑚礁发育模式的典范。本文以涠洲岛珊瑚礁为研究对象, 通过获取礁区 2 根柱状岩心, 分析其沉积物组成和造礁优势珊瑚等礁相的变化, 结合高精度 U-Th 定年手段, 还原涠洲岛珊瑚礁的发育历史, 综合探讨近千年来气候变暖、人类活动加剧背景下的高纬度珊瑚礁发育过程及其响应和适应机理。

1 材料与方法

1.1 研究地点与样品采集

涠洲岛位于南海北部湾的东北部(图 1a), 是我国最大、最年轻的由火山喷发堆积而成的岛屿(王文欢 等, 2016)。涠洲岛属于亚热带季风气候区, 年平均海表水温(Sea Surface Temperature, SST)为 24.6°C , 季节 SST 变化约在 $15\sim 31^{\circ}\text{C}$ 之间(陈天然 等, 2013)。涠洲岛的珊瑚礁主要分布在该岛北部、东部和西南部约 10m 水深海域, 全新世以来发育成礁(梁文 等, 2002)。由于人为破坏, 当地珊瑚礁生态系统呈严重退化趋势(黄晖 等, 2009)。

2017 年 4 月, 本研究分别在涠洲岛西南部的石螺口礁坪区和南部的南湾内水深约 3m 处(图 1b), 通过振动式沉积岩心取样方法, 获得 2 根完整的珊瑚礁沉积岩心。岩心钻井深度约为 1m, 但振动式取心会导致岩心发生一定程度的压实, 最终所获取的珊瑚礁岩心长度分别为 50cm(石螺口, Core1)和 46cm(南湾, Core2), 压实率在 50%左右(图 2)。

1.2 样品处理

对采回的岩心, 首先用电锯将铝管剖开, 对沉积物进行高分辨率照相记录。然后按照 1cm 的间距

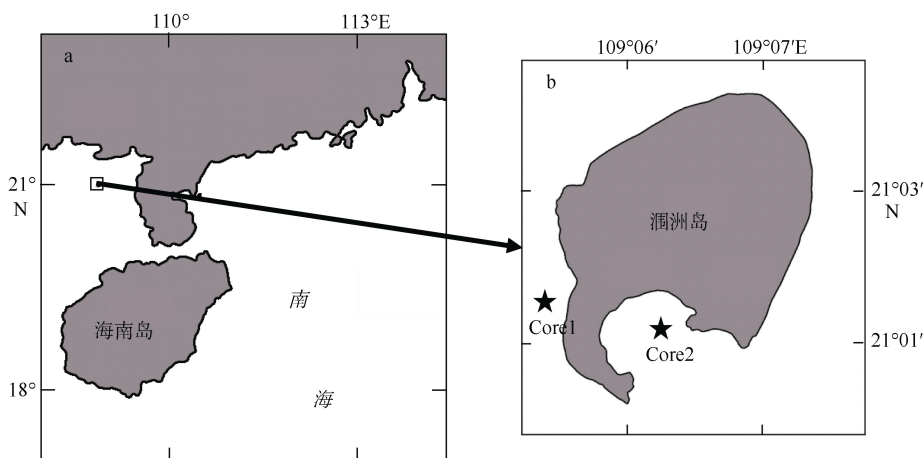


图 1 涠洲岛地理位置及沉积岩心采样地点

该图基于“百度地图个性在线编辑器”中审图号为 GS(2019)5218 号的标准地图制作

Fig. 1 Weizhou Island and sampling locations

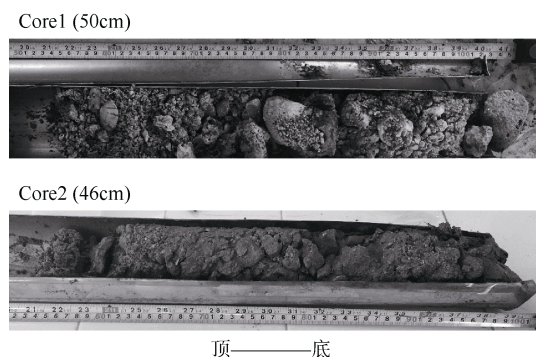


图 2 岩心沉积物照片

Fig. 2 Core sediment photographs

从岩心顶部向底部依次取样, 如遇到较大珊瑚砾则相应增大取样间距, 最终 Core1 获得 15 份样品, Core2 获得 20 份样品。清洗样品时, 将每份样品倒入烧杯, 注入适量去离子水进行超声振荡, 静置后将水缓缓倒出, 再放入烘箱烘干。

对烘干后的沉积物样品进行分选。首先, 根据以往珊瑚礁钙质砂分选经验(Chen et al, 2019), 用网筛将沉积物筛分为 >2mm(砾)、1~2mm(极粗砂)、0.5~1mm(粗砂)和 <0.5mm(细-中砂)4 个粒级。其次, 将体积较大(一般 >1cm)且肉眼可辨别的珊瑚碎屑挑出, 包括枝状珊瑚、块状珊瑚和皮壳状珊瑚等。然后, 将肉眼可分辨的其他生物介壳碎屑(一般 >5mm)挑出, 主要包括软体动物(Mollusca)中的双壳类(Bivalvia)和腹足类(Gastropoda), 还有棘皮动物(Echinodermata)中的海胆(Echinoidea)等。最后, 将分选出的珊瑚碎屑、其他生物介壳碎屑和剩余的各粒级沉积物在电子天平上分别称重并记录。

1.3 铀系同位素年代测定

从 2 根岩心的沉积物中共挑选出 15 块珊瑚骨骼样品(表 1), 每块样品用微型电锯切割出一小块(约 2g), 并将其表面的生物附着和侵蚀等痕迹打磨, 将新鲜的珊瑚骨骼碾碎成 0.5~1mm 大小的颗粒并称重。后续的进一步清洗以及 U、Th 分离等化学处理, 按照 Clark 等(2014)介绍的详细步骤在澳大利亚昆士兰大学地球与环境科学学院的放射性同位素超净实验室(Radiogenic Isotope Facility, RIF)完成, 最后在多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上进行 U-Th 同位素比值测量, 进而计算珊瑚礁样品的准确年龄, 并建立相应的沉积年代框架。

需要注意的是, 表 1 中所列取样深度均指样品在岩心压实前的深度, 即样品在礁区沉积的“真实”深度。Core1 压实前后的岩心长度分别为 104cm 和 50cm, Core2 压实前后的岩心长度分别为 100cm 和 46cm, 假设岩心随深度的压实程度是恒定的, 则压实前样品深度=压实后样品深度÷压实后岩心长度×压实前岩心长度。下文所列取样深度均指压实前样品深度。

1.4 沉积组划分

由于受到陆源输入的影响, 涠洲岛礁区沉积物主要分为陆源碎屑和碳酸盐碎屑(王国忠等, 1987), 其中碳酸盐碎屑又包括珊瑚碎屑和其他生物碎屑。沉积物中的深色物质主要来源于涠洲岛上的火山岩碎屑, 而浅色物质则来源于碳酸盐生物碎屑, 所以岩心中深色物质和浅色物质的质量分数分别代表了陆源碎屑质量分数和碳酸盐质量分数。Core1 取自珊瑚礁发育良好的石螺口礁坪区, 粒径 <1mm 的沉

积物碎屑颜色较深，可将其质量与沉积物总质量的比值粗略算作陆源碎屑质量分数；粒径>1mm 的砂砾碎屑基本可辨别为碳酸盐生物碎屑，因此将粒径>1mm 的碎屑质量占沉积物总质量的比值算作碳酸盐碎屑质量分数。其中，将样品处理时挑选出来的珊瑚枝块和生物介壳分别算作珊瑚碎屑质量分数和生物介壳碎屑质量分数，其余粒径>1mm 的沉积物质量分数算作混合碎屑质量分数。Core2 取自陆源输入较强的南湾，可以明显观察到粒径<2mm 的沉积物基本呈现深褐色，将其质量与沉积物总质量的比值粗略算作陆源碎屑的质量分数；粒径>2mm 的砾级碎屑基本可辨别为碳酸盐生物碎屑，因此将粒径>2mm 的碎屑质量占沉积物总质量的比值算作碳酸盐碎屑质量分数。其中，将样品处理时挑选出来的珊瑚枝块和生物介壳分别算作珊瑚碎屑质量分数和生物介壳碎屑质量分数，其余粒径>2mm 的沉积物质量分数算作混合碎屑质量分数。

1.5 珊瑚种属鉴定

在显微镜下仔细分辨珊瑚骨骼细结构，以此鉴定岩心沉积物中挑选出的珊瑚种属，鉴定参考依据是《Corals of the world》(Veron, 2000)和《造礁石珊瑚》(中国科学院中国动物志编辑委员会, 2001)这两部权威书籍。

2 研究结果

2.1 珊瑚 U-Th 年代

表 1 为 2 根岩心的珊瑚 U-Th 年代测定结果。Core1 中最老的珊瑚年龄是 335±18AD，最新的年龄是 1993±5AD，整体上呈现出自下而上由老到新的年代序列。岩心中部(42~67cm)的较老年龄样品(1298±21AD)虽出现在较新年龄样品(1301±12AD)之上，但因两者年龄差在误差范围内，故不属于年龄倒转。根据珊瑚年龄在岩心中的分布，Core1 岩心沉积可明显划分为 3 个快速堆积阶段和 2 个缓慢堆积阶段(图 3a)。3 个快速堆积阶段从下向上依次是 335±18AD—339±17AD、1239±13AD—1298±21AD 和 1974±20AD—1993±5AD，2 个缓慢堆积阶段从下向上依次是 339±17AD—1239±13AD 和 1298±21AD—1974±20AD。

Core2 中最老的珊瑚年龄是 801±9AD，最新的年龄是 1990±7AD。岩心中出现极为明显的年龄倒转现象，除顶部(11~13cm)样品年龄为 1990±7AD 以外，其余 7 个珊瑚年龄呈现出混乱的排列方式，且集中在 800AD—950AD 的时间范围内(图 3b)。振动式取心过程中的扰动和压实作用会引起部分沉积碎

屑的流失，导致取样管中某些部位空隙较大，而较大的空隙又使里面的珊瑚树枝或碎块极易发生位移，这可能是岩心中出现年龄倒转的原因之一。

表 1 珊瑚 U-Th 年龄
Tab. 1 U-Th dates for fossil coral rubbles collected in the reef cores

样品编号	定年材料	取样位置/cm	U-Th 年龄 (年份/AD)	误差(2σ)/a
1-7	鹿角珊瑚属	27~29	1993	±5
1-8	盔型珊瑚属	29~35	1974	±20
1-10	蜂巢珊瑚属	42~48	1298	±21
1-11	蜂巢珊瑚属	48~67	1301	±12
1-12	蔷薇珊瑚属	67~71	1239	±13
1-13	蔷薇珊瑚属	71~83	339	±17
1-15	蜂巢珊瑚属	87~104	335	±18
2-6	鹿角珊瑚属	11~13	1990	±7
2-8	陀螺珊瑚属	17~26	801	±9
2-10	盔型珊瑚属	37~46	811	±8
2-11	蜂巢珊瑚属	46~57	819	±12
2-13	蜂巢珊瑚属	59~65	859	±12
2-14	鹿角珊瑚属	65~70	938	±10
2-17	鹿角珊瑚属	78~83	871	±10
2-20	蜂巢珊瑚属	91~100	827	±9

2.2 沉积特征

根据岩心沉积组分的分析结果(图 4)，Core1 岩心沉积物主要由浅色珊瑚碎屑及其他钙质生物碎屑组成。岩心底部(104~86cm)含有较多体积较大的珊瑚枝块(>1cm)，其次含有少量陆源碎屑和极少量生物介壳碎屑；岩心下部(86~66cm)与底部的沉积特征相似，局部(86~82cm)陆源碎屑含量突增；岩心中部(66~41cm)的珊瑚枝块数量增多，陆源碎屑含量减少，其他生物介壳碎屑几乎不可见；岩心上部(41~27cm)的珊瑚碎屑含量减少，陆源碎屑含量变化不大，其他生物介壳碎屑含量增加；岩心顶部(27~0cm)的碎屑粒径比上部大，珊瑚枝块数量急剧减少，陆源碎屑含量明显增加，其他生物介壳碎屑含量与上部相当(图 4a)。从整体看，Core1 岩心沉积物的粒度呈现出由底部向上逐步变粗的趋势(图 4b—d)；珊瑚碎屑的平均质量分数约为 40%，变化幅度较大；陆源碎屑含量较少，平均质量分数约为 12%；生物介壳碎屑的含量极少，平均质量分数只有约 5%。

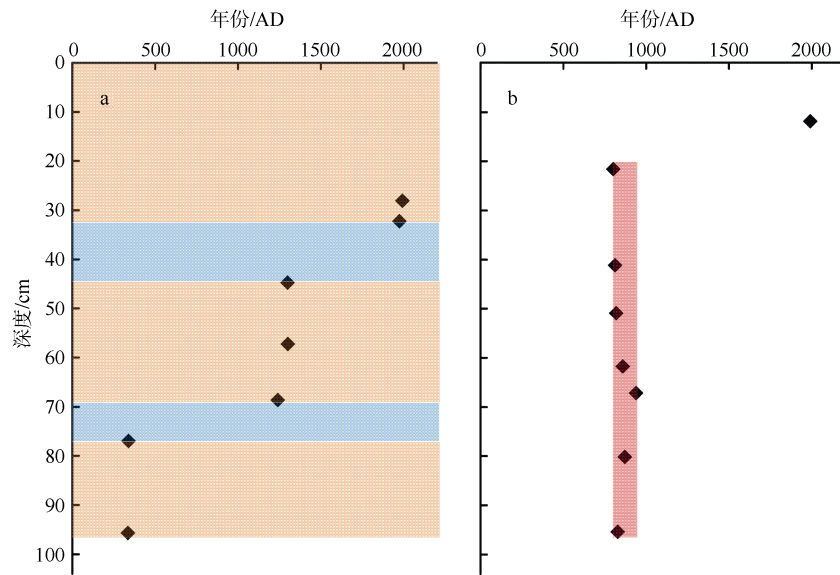


图3 珊瑚 U-Th 年龄在岩心 Core1(a)和 Core2(b)中的分布

图 a 中的橘色和蓝色区域分别代表快速堆积阶段和缓慢堆积阶段; 图 b 中的粉红色区域为主要年龄分布范围

Fig. 3 Distribution of U-Th ages in Core1 (a) and Core2 (b). The orange rectangles show three rapid accretion stages, and the blue rectangles show two slow accretion stages of Core1. The pink rectangle shows the main age distribution range of Core2

与 Core1 相比, Core2 岩心沉积物中深色陆源物质所占比例明显增加。岩心底部(100~87cm)含有较多粒径较大的珊瑚砾石, 其次为陆源碎屑, 生物介壳碎屑几乎不可见; 岩心下部(87~66cm)的珊瑚枝块数量明显减少, 陆源碎屑含量明显增加, 可见少量生物介壳碎屑; 岩心中部(66~46cm)的珊瑚碎屑粒径变小, 但含量增加, 陆源碎屑含量减少, 含有极少量生物介壳碎屑; 岩心上部(46~17cm)的沉积物以较大珊瑚砾石为主, 陆源碎屑和生物介壳碎屑的含量与中部相当; 岩心顶部(17~0cm)的珊瑚碎屑含量急剧减少, 基本无大粒径的珊瑚砾石, 陆源碎屑含量明显增加, 生物介壳碎屑含量几乎不变(图 4e)。整体来看, Core2 岩心沉积物的粒度由底部向上缓慢变粗, 到中部骤然变细, 往顶部又逐步变粗(图 4f—h); 珊瑚碎屑含量变化幅度大, 其质量分数从最底部(100cm)的 71%递减至最顶部(0cm)的 0%, 平均值约为 39%; 陆源碎屑含量较高, 下部(87~66cm)及顶部(9~0cm)的质量分数甚至超过 50%, 平均质量分数约为 48%; 生物介壳碎屑的含量极少, 平均质量分数只有约 3%。

2.3 珊瑚类群变化

根据岩心中挑选出的较为完整的珊瑚骨骼, 共鉴定出 8 个珊瑚属, 包括: 蜂巢珊瑚属(*Favia* spp.)、角蜂巢珊瑚属(*Favites* spp.)、鹿角珊瑚属(*Acropora* spp.)、蔷薇珊瑚属(*Montipora* spp.)、陀螺珊瑚属(*Turbinaria* spp.)、盔型珊瑚属(*Galaxea*

spp.)、滨珊瑚属(*Porites* spp.)以及牡丹珊瑚属(*Pavona* spp.)。其中, 蜂巢珊瑚属和角蜂巢珊瑚属均属于蜂巢珊瑚科(Faviidae), 且二者生理特征、骨骼结构和生长环境等非常相似, 因此以下将二者合并, 以蜂巢珊瑚科为单元来分析蜂巢珊瑚在岩心中的分布特征。

Core1 中珊瑚的优势类群和类群组合随深度变化如图 5a—g 所示。岩心底部(104~86cm)以块状的蜂巢珊瑚科占绝对优势, 并伴有少量鹿角珊瑚属、蔷薇珊瑚属和盔型珊瑚属; 岩心下部(86~66cm)以蔷薇珊瑚属为优势属, 同时含有少量的鹿角珊瑚属和极少量的滨珊瑚属; 岩心中部(66~41cm)以蜂巢珊瑚科为主, 伴有极少量的鹿角珊瑚属和滨珊瑚属; 岩心上部(41~27cm)的珊瑚多样性程度较高, 以蜂巢珊瑚科为主, 其次含有块状的蔷薇珊瑚属、滨珊瑚属和牡丹珊瑚属, 此外也有枝状的鹿角珊瑚属和盔型珊瑚属; 岩心顶部(27~0cm)的珊瑚碎枝或碎块急剧减少, 仅见部分鹿角珊瑚碎枝, 以及少量蔷薇珊瑚属和蜂巢珊瑚科碎块。从整个岩心来看, 鹿角珊瑚属、蜂巢珊瑚科和蔷薇珊瑚属所占比例较高, 平均质量分数依次为 30%、30%和 28%; 牡丹珊瑚属、滨珊瑚属和盔形珊瑚属含量极低, 平均质量分数均只有 3%左右。

Core2 中珊瑚的优势类群和类群组合同样多变(图 5h—n)。岩心底部(100~87cm)以体积较大的块状蜂巢珊瑚科为主, 其次含有粗大的枝状鹿角

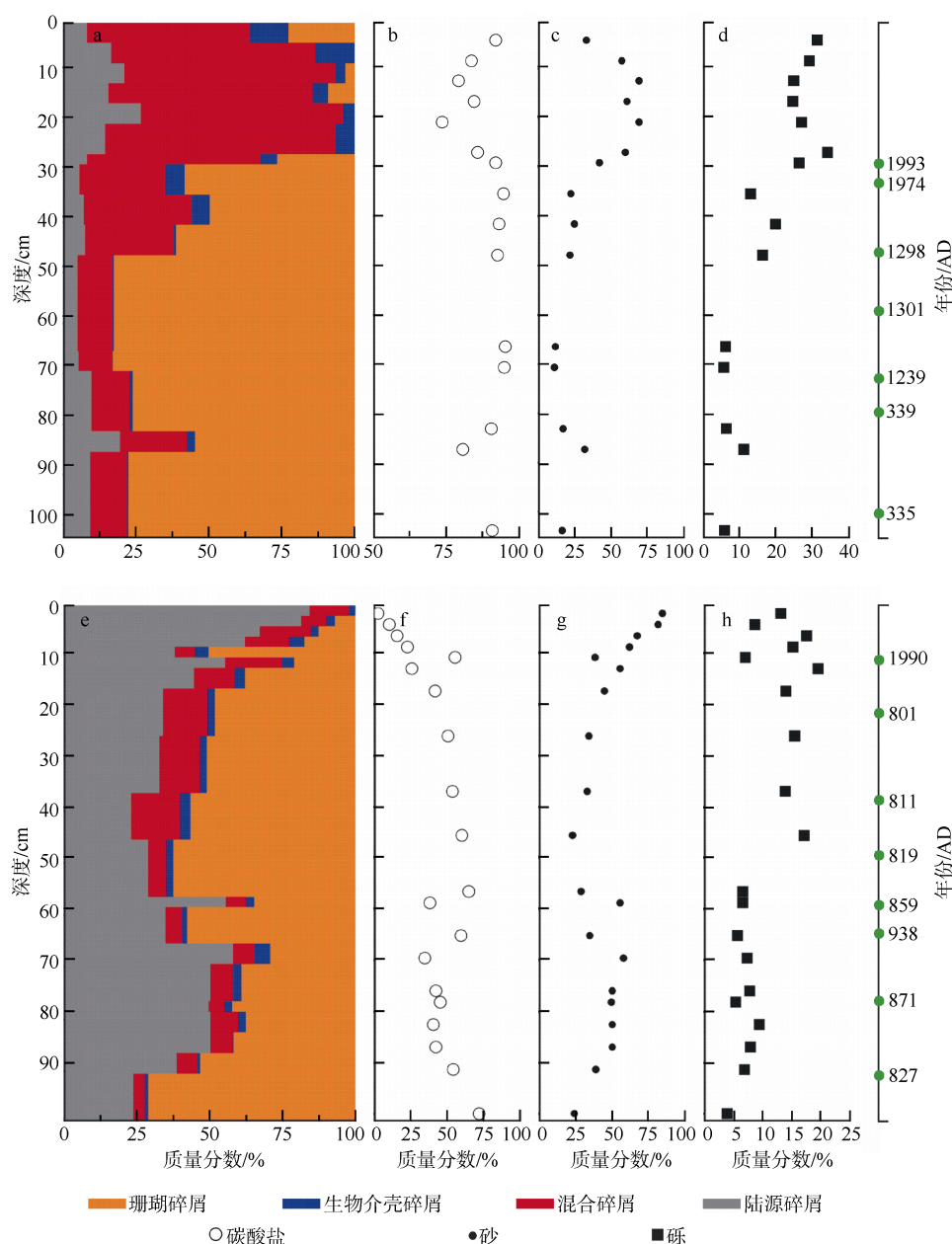


图 4 岩心 Core1(a—d)和 Core2(e—h)中沉积组分的质量分数分布

Fig. 4 Contents of sediment components in Core1 (a—d) and Core2 (e—h)

珊瑚属, 还有少量的皮壳状陀螺珊瑚属和块状牡丹珊瑚属; 岩心下部(87~66cm)主要是鹿角珊瑚属和陀螺珊瑚属交替变化, 同时含有少量的蜂巢珊瑚科、蔷薇珊瑚属和盔形珊瑚属; 岩心中上部(66~17cm)的珊瑚砾石体积较大, 优势珊瑚依次是蜂巢珊瑚科(66~46cm)和陀螺珊瑚属(46~17cm), 伴有少量鹿角珊瑚属; 顶部(17~0cm)以块状的蔷薇珊瑚属为主, 夹杂着鹿角珊瑚属碎枝。总体上, Core2 以鹿角珊瑚属含量最高, 平均质量分数为 28%; 其次为蔷薇珊瑚属, 平均质量分数为 25%, 其在岩心顶部(17~0cm)所占比例较大, 达到了 76%; 蜂巢珊瑚科和陀螺珊瑚属的平均质量分数均为 21%; 盔形珊瑚

属和牡丹珊瑚属的含量极低, 平均质量分数只有约 2%。Core2 与 Core1 相比, 显著的区别是出现陀螺珊瑚属, 同时缺失滨珊瑚属。

3 讨论

3.1 涠洲岛珊瑚礁发育与气候变化

Core1 岩心沉积可划分为 3 个快速堆积阶段和 2 个缓慢堆积阶段(图 3a)。这些快速/缓慢堆积阶段可与气候学上的暖、冷气候特征期大致对应, 即罗马暖期(Roman Warm Period, RWP; 约 100BC—350AD)、黑暗时代冷期(Dark Age Cold Period, DACP; 约 400AD—900AD)、中世纪暖期(Medieval

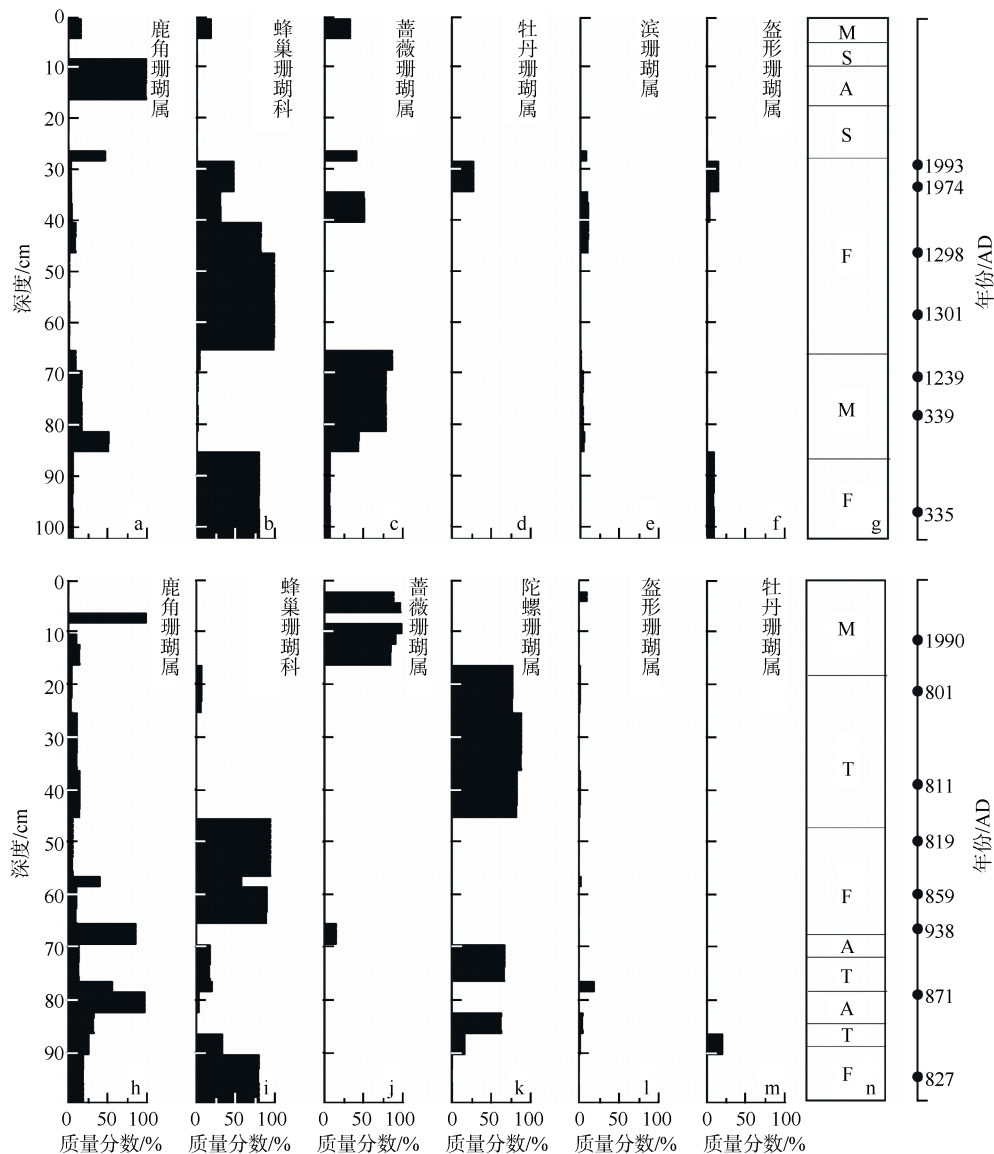


图5 岩心 Core1(a—g)和 Core2(h—n)中的珊瑚类群分布

图 g、n 中的大写字母代表该深度的优势珊瑚: A 为鹿角珊瑚属; F 为蜂巢珊瑚科; M 为蔷薇珊瑚属; T 为陀螺珊瑚属; S 为珊瑚砂

Fig. 5 Variation of coral species with depth in Core1 (a~g) and Core2 (h~n). Letters in (g) and (n) represent the dominant corals at the depth: A is *Acropora*; F is *Faviidae*; M is *Montipora*; T is *Turbinaria*; and S is Coral sand

Warm Period, MWP; 约 950AD—1300AD)、小冰期 (Little Ice Age, LIA; 约 1400AD—1850AD)以及现代暖期(Present Warm Period, 约 1900AD 以来)。具体划分如下:

1) 罗马暖期对应的 Core1 珊瑚年龄区间为 $335 \pm 18 \text{AD} - 339 \pm 17 \text{AD}$, 珊瑚礁沉积速率高达 $46.8 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 珊瑚礁发育状况较佳, 陆源碎屑含量低, 珊瑚碎屑含量高, 优势类群为蜂巢珊瑚科。该时期海平面上升(余克服等, 2009), 进入约 400AD 后气候逐渐变冷(竺可桢, 1973)。

2) 黑暗时代冷期对应的 Core1 珊瑚年龄区间为 $339 \pm 17 \text{AD} - 1239 \pm 13 \text{AD}$, 珊瑚礁沉积速率只有 $0.1 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 珊瑚礁发育状况较差, 陆源碎屑及珊

瑚碎屑的含量与罗马暖期时相比均无较大变化, 此时珊瑚的优势类群为蔷薇珊瑚属, 伴有少量鹿角珊瑚属。

3) 中世纪暖期对应的 Core1 珊瑚年龄区间为 $1239 \pm 13 \text{AD} - 1298 \pm 21 \text{AD}$, 珊瑚礁沉积速率为 $4.1 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 珊瑚礁发育状况较好, 陆源碎屑含量降低, 珊瑚碎屑含量升高, 优势类群为蜂巢珊瑚科, 与罗马暖期时相同。

4) 小冰期对应的 Core1 珊瑚年龄区间为 $1298 \pm 21 \text{AD} - 1974 \pm 20 \text{AD}$, 珊瑚礁沉积速率只有 $0.2 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 珊瑚礁发育状况较差, 陆源碎屑含量升高, 珊瑚碎屑含量降低, 优势珊瑚为蔷薇珊瑚属, 与黑暗时代冷期时一致。

5) 现代暖期对应的 Core1 珊瑚年龄区间为 1974±20AD—1993±5AD, 珊瑚礁沉积速率为 $2.2\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 陆源碎屑含量明显增加, 珊瑚碎屑含量大幅度降低, 珊瑚优势类群为鹿角珊瑚属, 同时含有少量蔷薇珊瑚属和蜂巢珊瑚科。

温暖的气候对珊瑚礁发育有促进作用(Clark et al, 2018; Yan et al, 2019), 而寒冷的气候则不利于珊瑚礁的发育, 导致珊瑚礁沉积速率减缓甚至停滞(Cabioch, 2003; Hamanaka et al, 2012; Toth et al, 2015), 本文研究结果与前人研究结果基本一致。即暖期时, 海水温度适宜, 珊瑚多样性较高, 珊瑚礁整体发育较好, 沉积速率高, 且沉积物中珊瑚碎屑含量高; 而冷期时, 海水温度较低, 珊瑚多样性相对较低, 珊瑚礁发育减缓甚至停滞, 沉积速率低, 沉积物中珊瑚碎屑含量与暖期时相比有所降低。

值得注意的是, 罗马暖期时的沉积速率($46.8\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)远高于中世纪暖期($4.1\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)和现代暖期($2.2\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), 该时期的岩心沉积物粒度也较粗, 这很可能与风暴沉积作用有关, 如强烈的风暴作用导致印度—太平洋沿岸珊瑚礁的沉积速率高达 $37\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Montaggioni, 1988; Cabioch et al, 1995)。进入现代暖期后, 珊瑚礁沉积速率($2.2\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)虽高于黑暗时代冷期($0.1\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)和小冰期($0.2\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), 但同时也低于罗马暖期($46.8\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)和中世纪暖期($4.1\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)的沉积速率, 且陆源碎屑质量分数增幅明显, 而珊瑚碎屑质量分数大幅度下降甚至为 0, 作为罗马暖期和中世纪暖期时的珊瑚优势类群(蜂巢珊瑚科)也极少出现。这些异常极有可能与 20 世纪以来当地强烈的人为干扰有关, 其中泥沙输入过量、过度捕捞、污染、物理损伤(踩踏、抛锚、水下工程等)等被认为是造成涠洲岛珊瑚礁近年来衰退的主要原因(黄晖等, 2009; 周浩郎等, 2014)。

3.2 南海高纬度珊瑚避难所前景

Core2 所在的南湾和 Core1 所在的石螺口的珊瑚生长环境具有很大的差异。南湾存在极强的陆源沉积输入, 加上湾内与湾外海水交换不足(水动力较弱), 导致南湾具有高沉积速率、高浑浊度的特征, 非常不利于珊瑚礁的发育。Core2 中虽然有珊瑚碎屑沉积, 但珊瑚年龄在岩心中的分布较为混乱, 且集中在 800AD—950AD 和现代, 推测其原因可能是: 1) 800AD—950AD 期间南湾内有珊瑚生长并沉积, 在此之后当地环境恶化导致再无珊瑚生长, 而风暴作用使原来沉积的珊瑚碎枝及碎块不断发生搬运和再沉积, 因此导致 Core2 岩心中珊瑚年龄的无序分

布; 2) 湾内的现代珊瑚仅零星生长在湾口附近的礁石上, 推测这是该岩心现代珊瑚碎屑沉积的主要来源, 类似于更高纬度海域中未成礁的珊瑚群落, 如大亚湾海域(Chen et al, 2009)。

将 Core2 和 Core1 对比, 分析两种环境下的珊瑚生长状况, 不难发现: Core1 取自礁区, 珊瑚礁整体发育状况较好, 岩心中的珊瑚年龄基本无倒转, 碳酸盐碎屑含量高, 优势珊瑚类群依次为鹿角珊瑚属、蜂巢珊瑚科和蔷薇珊瑚属; Core2 取自湾内, 珊瑚礁整体发育状况较差或未成礁, 岩心中的珊瑚年龄顺序混乱, 陆源碎屑含量较高, 与 Core1 相比, 珊瑚碎屑中出现陀螺珊瑚属但缺失滨珊瑚属。

涠洲岛位于热带和亚热带交界处, 属于南海珊瑚礁发育区的北缘, 珊瑚生长既受夏季高温的胁迫, 也受冬季低温的抑制。特殊的地理位置和气候环境造就了当地珊瑚礁特殊的发育模式, 即涠洲岛珊瑚礁可能同时具备往南的热带珊瑚礁发育模式(如海南岛)和往北的高纬度珊瑚群落发育模式(如大亚湾), 本文所选择的石螺口成礁区(Core1)和南湾(Core2)可以分别代表这两种模式。

通过本研究, 我们提出“完全避难所”和“非完全避难所”的概念。完全避难所是指位于相对高纬度海域、珊瑚礁发育状况良好的珊瑚栖息地, 其环境较为适宜珊瑚生长, 成礁历史较长。只要保护得当, 此类珊瑚栖息地在未来有望成为大部分低纬度热带珊瑚的避难所。非完全避难所是指位于更高纬度海域、仅分布有珊瑚群落但不成礁的珊瑚栖息地, 它一般受陆源沉积影响较大, 珊瑚生长环境较为恶劣, 即使珊瑚群落具有较长的历史却依旧不能成礁(Clark et al, 2018), 可能只有少部分对低温和浑浊耐受程度高的珊瑚属种能够迁移到此(Chen et al, 2009), 因此此类珊瑚栖息地在未来只能成为少部分热带珊瑚的避难所。

4 结论

本文以取自南海北部涠洲岛的 2 根珊瑚礁岩心为研究对象, 通过珊瑚 U-Th 定年、沉积组分分析以及珊瑚种属鉴定等手段, 重建了涠洲岛珊瑚礁近千年的发展历史, 综合研究了涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其对气候变化的响应, 主要得出以下结论:

1) 石螺口的珊瑚发育较好, Core1 岩心沉积可划分为 3 个快速堆积阶段和 2 个缓慢堆积阶段, 分别与气候学上的暖、冷气候特征期大致对应, 表明温暖的气候对珊瑚生长有促进作用, 而寒冷的气候

则不利于珊瑚生长, 导致珊瑚礁沉积减缓甚至停滞。20 世纪以来当地强烈的人类活动可能是涠洲岛珊瑚礁近代迅速退化的主要原因。

2) 南湾的珊瑚发育较差, Core2 中陆源碎屑含量明显较高, 岩心中的珊瑚年龄分布混乱且集中在 800AD—950AD 和现代, 这可能与环境恶化、风暴作用及湾内现代珊瑚发育分布有关。

3) 涠洲岛珊瑚礁可能同时具备往南的热带珊

瑚礁发育模式(如海南岛)和往北的高纬度珊瑚群落发育模式(如大亚湾), 石螺口(Core1)和南湾(Core2)可以分别代表这两种模式, 由此本文提出“完全避难所”和“非完全避难所”的概念。只要建立有效的保护措施, 完全避难所在未来有望成为大部分低纬度热带珊瑚的避难所, 而非完全避难所则可能只成为少部分能够耐受低温和高浑浊的特定种属的避难所。

参考文献 References

- 陈天然, 郑兆勇, 莫少华, 等, 2013. 涠洲岛滨珊瑚骨骼生长率变化对气候变暖和极端事件增加的响应[J]. 热带海洋学报, 32(5): 79–84. CHEN TIANRAN, ZHENG ZHAOYONG, MO SHAOHUA, et al, 2013. Variation of skeletal extension rate for Porites corals around Weizhou Island in response to global warming and increase of extreme events[J]. Journal of Tropical Oceanography, 32(5): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- 陈天然, 余克服, 2014. 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[J]. 第四纪研究, 34(6): 1288–1295. CHEN TIANRAN, YU KEFU, 2014. Responses and high-resolution records for marine environment changes in the relatively high-latitude corals from the South China Sea[J]. Quaternary Sciences, 34(6): 1288–1295 (in Chinese with English abstract).
- 方力行, 1989. 珊瑚学[M]. 台北: 黎明文化事业股份有限公司, 1–178 (in Chinese).
- 黄晖, 马斌儒, 练健生, 等, 2009. 广西涠洲岛海域珊瑚礁现状及其保护策略研究[J]. 热带地理, 29(4): 307–312, 318. HUANG HUI, MA BINRU, LIAN JIANSHENG, et al, 2009. Status and conservation strategies of the coral reef in Weizhou Island, Guangxi[J]. Tropical Geography, 29(4): 307–312, 318 (in Chinese with English abstract).
- 梁文, 黎广钊, 2002. 涠洲岛珊瑚礁分布特征与环境保护的初步研究[J]. 环境科学研究, 15(6): 5–7, 16. LIANG WEN, LI GUANGZHAO, 2002. Preliminary study on characteristics of coral reef distribution and environmental protection in Weizhou Island[J]. Research of Environmental Sciences, 15(6): 5–7, 16 (in Chinese with English abstract).
- 王国忠, 吕炳全, 全松青, 1987. 现代碳酸盐和陆源碎屑的混合沉积作用——涠洲岛珊瑚岸礁实例[J]. 石油与天然气地质, 8(1): 15–25. WANG GUOZHONG, LV BINGQUAN, QUAN SONGQING, 1987. Mixed sedimentation of recent carbonates and terrigenous clastics-example of the coral reef of the Weizhou island[J]. Oil & Gas Geology, 8(1): 15–25 (in Chinese with English abstract).
- 王文欢, 余克服, 王英辉, 2016. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究历史、现状与特色[J]. 热带地理, 36(1): 72–79. WANG WENHUAN, YU KEFU, WANG YINGHUI, 2016. A review on the research of coral reefs in the Weizhou Island, Beibu Gulf[J]. Tropical Geography, 36(1): 72–79 (in Chinese with English abstract).
- 余克服, 陈特固, 2009. 南海北部晚全新世高海平面及其波动的海滩沉积证据[J]. 地学前缘, 16: 138–145. YU KEFU, CHEN TEGU, 2009. Beach sediments from northern South China Sea suggest high and oscillating sea level during the late Holocene[J]. Earth Science Frontiers, 16(6): 138–145 (in Chinese with English abstract).
- 赵美霞, 余克服, 张乔民, 等, 2009. 近 50a 来三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的演变特征及其环境意义[J]. 海洋环境科学, 28(2): 125–130. ZHAO MEIXIA, YU KEFU, ZHANG QIAOMIN, et al, 2009. Evolution and its environmental significance of coral diversity on Luhuitou fringing reef, Sanya[J]. Marine Environmental Science, 28(2): 125–130 (in Chinese with English abstract).
- 中国科学院中国动物志编辑委员会, 2001. 中国动物志: 造礁石珊瑚[M]. 北京: 科学出版社 (in Chinese).
- 周浩郎, 黎广钊, 2014. 涠洲岛珊瑚礁健康评估[J]. 广西科学院学报, (4): 238–247. ZHOU HAOLANG, LI GUANGZHAO, 2014. Assessment on the health of coral reefs at Weizhou Island[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, (4): 238–247 (in Chinese with English abstract).
- 竺可桢, 1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, (2): 15–38 (in Chinese).
- BRAITHWAITE C J R, MONTAGGIONI L F, CAMOIN G F, et al, 2000. Origins and development of Holocene coral reefs: a revisited model based on reef boreholes in the Seychelles, Indian Ocean[J]. International Journal of Earth Sciences, 89(2): 431–445.
- CABIOCH G, 2003. Postglacial reef development in the South-West Pacific: case studies from New Caledonia and Vanuatu[J]. Sedimentary Geology, 159(1–2): 43–59.
- CABIOCH G, MONTAGGIONI L F, FAURE G, 1995. Holocene initiation and development of New Caledonian fringing reefs, SW Pacific[J]. Coral Reefs, 14(3): 131–140.
- CAMOIN G F, COLONNA M, MONTAGGIONI L F, et al, 1997. Holocene sea level changes and reef development in the southwestern Indian Ocean[J]. Coral Reefs, 16(4): 247–259.
- CHEN TIANRAN, ROFF G, FENG YUEXING, et al, 2019. Tropical sand cays as natural paleocyclone archives[J]. Geophysical Research Letters, 46(16): 9796–9803, doi: 10.1029/2019GL084274.
- CHEN TIANRAN, YU KEFU, CHEN TEGU, 2013. Sr/Ca–sea surface temperature calibration in the coral *Porites lutea* from

- subtropical northern South China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 392: 98–104.
- CHEN TIANRAN, YU KEFU, SHI QI, et al, 2009. 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[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(12): 2107–2117.
- CLARK T R, CHEN XUEFEI, LEONARD N D, et al, 2018. Episodic coral growth in China's subtropical coral communities linked to broad-scale climatic change[J]. *Geology*, 47(1): 79–82.
- CLARK T R, ROFF G, ZHAO JIANXIN, et al, 2014. Testing the precision and accuracy of the U–Th chronometer for dating coral mortality events in the last 100 years[J]. *Quaternary Geochronology*, 23: 35–45.
- CRAMER K L, O'DEA A, CLARK T R, et al, 2017. Prehistorical and historical declines in Caribbean coral reef accretion rates driven by loss of parrotfish[J]. *Nature Communications*, 8: 14160.
- GISCHLER E, ANSELMETTI F S, SHINN E A, 2013. Seismic stratigraphy of the blue hole (lighthouse reef, Belize), a late Holocene climate and storm archive[J]. *Marine Geology*, 344: 155–162.
- GONG S Y, WU T R, SIRINGAN F P, et al, 2013. An abrupt backreef infilling in a Holocene reef, Paraoir, northwestern Luzon, Philippines[J]. *Coral Reefs*, 32(1): 293–303.
- HALFAR J, GODINEZ-ORTA L, RIEGL B, et al, 2005. Living on the edge: high-latitude *Porites* carbonate production under temperate eutrophic conditions[J]. *Coral Reefs*, 24(4): 582–592.
- HAMANAKA N, KAN H, YOKOYAMA Y, et al, 2012. Disturbances with hiatuses in high-latitude coral reef growth during the Holocene: Correlation with millennial-scale global climate change[J]. *Global and Planetary Change*, 80–81: 21–35.
- HONGO C, KAYANNE H, 2010. Holocene sea-level record from corals: Reliability of paleodepth indicators at Ishigaki Island, Ryukyu Islands, Japan[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 287(1–4): 143–151.
- HUBBARD D K, ZANKL H, VAN HEERDEN I V, et al, 2005. Development along the Northeastern St. Croix Shelf, Buck Island, U.S. Virgin Islands[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 75(1): 97–113.
- KAYANNE H, YAMANO H, RANDALL R H, 2002. Holocene sea-level changes and barrier reef formation on an oceanic island, Palau Islands, western Pacific[J]. *Sedimentary Geology*, 150(1–2): 47–60.
- KENCH P S, SMITHERS S G, MCLEAN R F, et al, 2009. Holocene reef growth in the Maldives: evidence of a mid-Holocene sea-level highstand in the central Indian Ocean[J]. *Geology*, 37(5): 455–458.
- LYBOLT M, NEIL D, ZHAO JIANXIN, et al, 2011. Instability in a marginal coral reef: the shift from natural variability to a human-dominated seascape[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(3): 154–160.
- MONTAGGIONI L F, 1988. Holocene reef growth history in mid-plate high volcanic islands[C]//*Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*. Berlin: Springer, 3: 455–460.
- PERRY C T, SMITHERS S G, JOHNSON K G, 2009. Long-term coral community records from Luggar Shoal on the terrigenous inner-shelf of the central Great Barrier Reef, Australia[J]. *Coral Reefs*, 28(4): 941–948.
- RIEGL B, PILLER W E, 2003. Possible refugia for reefs in times of environmental stress[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 92(4): 520–531.
- ROFF G, ZHAO JIANXIN, PANDOLFI J M, 2015. Rapid accretion of inshore reef slopes from the central great barrier reef during the late Holocene[J]. *Geology*, 43(4): 343–346.
- SHEN CHUANCHOU, SIRINGAN F P, LIN KE, et al, 2010. Sea-level rise and coral-reef development of Northwestern Luzon since 9.9 ka[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 292(3–4): 465–473.
- TOTH L T, ARONSON R B, COBB K M, et al, 2015. Climatic and biotic thresholds of coral-reef shutdown[J]. *Nature Climate Change*, 5(4): 369–374.
- VERON J E N, 2000. *Corals of the world*[M]. Townsville MC: Australian Institute of Marine Science.
- YAMANO H, HORI K, YAMAUCHI M, et al, 2001. Highest-latitude coral reef at Iki Island, Japan[J]. *Coral Reefs*, 20(1): 9–12.
- YAN SHUANG, ZHAO JIANXIN, LAU A Y A, et al, 2019. Episodic reef growth in the northern South China Sea linked to warm climate during the Past 7,000 years: Potential for future coral refugia[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(4): 1032–1043.
- ZINKE J, REIJMER J J G, TAVIANI M, et al, 2005. Facies and faunal assemblage changes in response to the Holocene transgression in the Lagoon of Mayotte (Comoro Archipelago, SW Indian Ocean)[J]. *Facies*, 50(3–4): 391–408.