



涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其与气候的对应关系

龙雅婷, 余克服, 王 瑞, 马一方, 姜 伟, 范天来, 张 瑜, 许慎栋

Development of coral reefs around Weizhou Island and its bearing on climate

LONG Yating, YU Kefu, WANG Rui, MA Yifang, JIANG Wei, FAN Tianlai, ZHANG Yu, and XU Shendong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021103101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应](#)

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

[渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价](#)

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

[南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化](#)

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

[江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义](#)

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

[北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律](#)

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

[珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示](#)

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

龙雅婷, 余克服, 王瑞, 等. 涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其与气候的对应关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 184-193.

LONG Yating, YU Kefu, WANG Rui, et al. Development of coral reefs around Weizhou Island and its bearing on climate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 184-193.

涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其与气候的对应关系

龙雅婷^{1,2,3}, 余克服^{1,2,3}, 王瑞^{1,2,3}, 马一方^{1,2,3}, 姜伟^{1,2,3}, 范天来^{1,2,3}, 张瑜^{1,2,3}, 许慎栋^{1,2,3}

1. 广西大学海洋学院, 南宁 530004

2. 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 南宁 530004

3. 广西大学中国珊瑚礁研究中心, 南宁 530004

摘要: 涠洲岛位于热带北缘, 对珊瑚生长而言其纬度相对偏高, 冬季低温是制约其珊瑚生长和珊瑚礁发育的关键因素。重建涠洲岛珊瑚礁发育的过程, 对于了解珊瑚对过去气候的响应以及预测珊瑚礁的发育趋势等具有重要科学意义。以涠洲岛珊瑚礁钻孔(GS-3)为材料, 利用高精度铀系测年技术测定珊瑚年龄, 建立涠洲岛珊瑚礁发育的年代框架; 通过粒度、生物组分、矿物成分分析揭示了其物质组成。结果显示, GS-3 岩芯 5.57 m 处的珊瑚铀系年代为 3737 ± 17 aBP (相对于公元 1950 年), 基于此年代计算的珊瑚礁平均发育速率为 1.49 m/ka。在 3737~2476、2288~1191 以及 325 aBP 以来涠洲岛珊瑚礁快速发育, 其发育速率分别为 2.21、1.13 及 1.85 m/ka; 在 2476~2288、1191~325 aBP 珊瑚礁缓慢发育, 发育速率分别为 0.64、0.48 m/ka。沉积物的生物组分主要为珊瑚、珊瑚藻和软体动物; 矿物成分主要为文石和石英。基于珊瑚礁发育速率与气候背景的关系对比, 得出涠洲岛珊瑚礁快速发育阶段与全新世大暖期后期、罗马暖期以及现代暖期大致对应; 缓慢发育阶段与降温期、黑暗时代冷期后期、中世纪气候异常期、小冰期前期大致对应。总体来看, 相对高纬度的涠洲岛珊瑚礁的发育快慢受气候冷暖所调控, 暖期的气候有利于珊瑚生长和珊瑚礁发育, 冷期珊瑚礁发育慢。

关键词: 珊瑚礁; U-Th 年龄; 发育速率; 晚全新世; 涠洲岛

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021103101

Development of coral reefs around Weizhou Island and its bearing on climate

LONG Yating^{1,2,3}, YU Kefu^{1,2,3}, WANG Rui^{1,2,3}, MA Yifang^{1,2,3}, JIANG Wei^{1,2,3}, FAN Tianlai^{1,2,3}, ZHANG Yu^{1,2,3}, XU Shendong^{1,2,3}

1. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Nanning 530004, China

3. Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: The Weizhou Island, located in the northern border of the tropics, is relatively too high in latitude to coral growth. Low temperature in winter time is the key factor which limits the coral growth and reef development. Reconstructing the development of coral reefs on the Weizhou Island is of great scientific significance for understanding the response of corals to past climate and predicting the development trend of coral reefs in the future. This study is devoted to the drilling cores extracted from the Well GS-3 on the Weizhou Island. The cores were dated with high-precision uranium series dating, upon which the chronological framework of the coral reefs is established. Particle size, biological composition and mineral composition are analyzed for revealing the composition of the coral deposits. The age of the coral reefs at 5.57 m in depth of the core GS-3 is dated 3737 ± 17 aBP. The average vertical accretion rate of the coral reefs is 1.49 m/ka calculated based on this age. The growth of coral reefs on the Weizhou Island were accelerated during the periods of 3737~2476 aBP, 2288~1191 aBP and 325 years ago to present with vertical accretion rates of 2.21 m/ka, 1.13 m/ka and 1.85 m/ka respectively, and decelerated during the periods of 2476~2288 aBP and 1191~325 aBP and the correspondent vertical accretion rates were 0.64 m/ka and 0.48 m/ka respectively. The biological components of sediments are mainly composed of corals, coralline algae and mollusks, while the mineral compositions dominated by aragonite and quartz. The correlation between coral reef vertical accretion rate and its climate background suggests that the rapid development stage of coral reefs on

资助项目: 国家自然科学基金“全新世南海珊瑚礁发育的时-空差异及其对全球变暖的适应机制”(42030502); 国家自然科学基金重大项目“印太交汇区代表性物种的生物多样性演变及生态功能”(42090041); 广西科技基地与人才专项“全球变暖背景下北部湾珊瑚礁生态资源的发展机遇、干扰与对策”(AD17129063); 广西科技项目“北部湾珍稀生态系统与生物多样性保护研究与示范”(AA17204074)

作者简介: 龙雅婷(1995—), 女, 硕士, 主要从事海洋地质方面研究, E-mail: 496399100@qq.com

通讯作者: 余克服(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事南海珊瑚礁地质、生态与环境研究, E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

收稿日期: 2021-10-31; **改回日期:** 2021-11-24. 文凤英编辑

the Weizhou Island could roughly correlated to the Late Megathermal Period, Roman Warm Period and Current Warm Period, and the slowing down stages of development of reefs roughly corresponded to the cold periods, namely the Late Dark Ages Cold Period, the Medieval Climate Anomaly and the early Little Ice Age. In general, the development of coral reefs on the Weizhou Island at relatively high latitudes is depending on climate changes. The warm periods are conducive to coral growth and otherwise, coral reefs growth would slow down as cold periods came.

Key words: coral reef; U-Th age; accretion rate; late Holocene; Weizhou Island

在过去几十年里, 全球珊瑚群落减少了将近 50%^[1], 珊瑚礁处于快速退化之中, 气候变化被认为是导致珊瑚礁退化的主要驱动力^[2-4]。在全球变暖的背景下, 不断上升的海水温度超过了珊瑚生存的上限温度, 引起珊瑚大量白化^[5-6]。为了应对气候变暖的威胁, 珊瑚栖息地可能向更高纬度区域转移, 相对高纬度珊瑚礁因此被视为珊瑚的避难所^[7-8]。目前已在全球各地发现热带鱼类以及热带珊瑚物种向相对高纬度珊瑚栖息地迁移的生态现象, 如热带珊瑚礁鱼类在澳大利亚东南部的温带地区出现^[8-9]; 澳大利亚东海岸的鹿角珊瑚(*Acropora*) 栖息地也被观察到向相对高纬度扩张^[10]; 日本温带地区的 4 种主要珊瑚种类(包括两种在热带地区形成珊瑚礁的关键种类 *Acropora hyacinthus*、*Acropora muricata*) 的分布范围自 20 世纪 30 年代以来以高达 14 km/a 的速度向相对高纬度扩展^[8]; 加勒比海地区和西大西洋地区的两个珊瑚物种 (*Acropora cervicornis*、*Acropora palmata*) 也正沿着佛罗里达半岛向高纬度扩展活动范围, 并进入墨西哥湾北部^[11]; 西班牙东南部 Torre Pirulico 地区 (37°4'70"N) 浅水出现大量的虫黄藻珊瑚 (*Oculina patagonica*), 使得原本以大型藻类占主导位置的地中海浅水群落转变为以珊瑚为主的群落^[12], 并快速向高纬度扩张^[13]。

我国南海相对高纬度珊瑚对全球变暖也表现出积极响应, 如大亚湾、涠洲岛珊瑚相比南海低纬度海区(如南沙群岛、西沙群岛)珊瑚具有更高的虫黄藻密度、叶绿素 a 含量、组织生物量, 并具有更厚的珊瑚组织厚度, 珊瑚个体的健康状况更好^[14-15]; 涠洲岛珊瑚栖息地还发现大量澄黄滨珊瑚 (*Porites lutea*) 幼株, 这种珊瑚具有更高的虫黄藻密度, 对环境变化具有更强的耐受力^[16]。在地质历史时期, 大亚湾^[17]、鹿回头珊瑚礁^[18] 在暖期大量发育而在冷期发育停滞的特点也显示了珊瑚对过去暖期的积极响应。

涠洲岛位于南海北缘相对高纬度海区, 自全新世以来广泛发育珊瑚礁^[19-20]。珊瑚生长的窄适性要求相对温暖的水域环境, 相对高纬度海区冬季的低温则不利于珊瑚生存。涠洲岛珊瑚在 1906—2009 年有 5 个冬季出现珊瑚冷白化^[21], 冬季低温是制约其

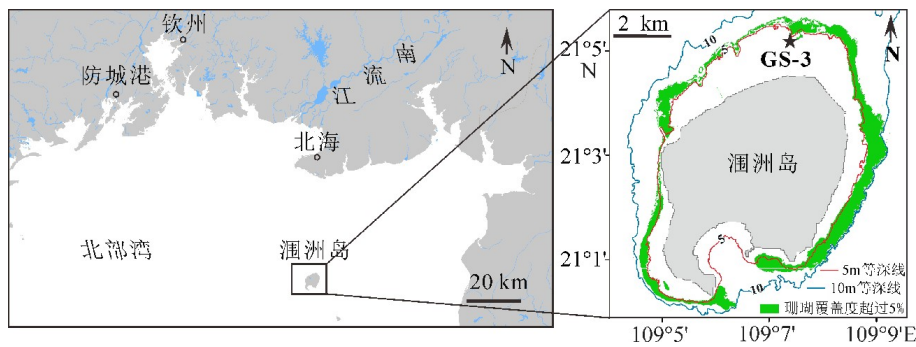
珊瑚生长和珊瑚礁发育的关键因素。重建涠洲岛珊瑚礁发育的过程, 对于了解珊瑚对过去气候的响应以及预测珊瑚礁的发育趋势等具有重要科学意义。本研究于 2018 年 6 月在涠洲岛北部珊瑚礁区钻取 GS-3 井, 该井井深 8.2 m, 贯穿整个珊瑚礁层, 底部到达火山碎屑基底。本文通过利用高精度铀系测年技术获取珊瑚年代以构建珊瑚礁年代框架, 结合沉积物粒度、生物组分、矿物成分分析等手段, 重建了涠洲岛全新世珊瑚礁的发育过程, 并将发育过程与重建的历史气候和环境记录进行探讨, 了解珊瑚礁发育对过去冷、暖期的响应, 为涠洲岛珊瑚礁历史时期的避难所功能提供依据, 并为未来珊瑚生长及珊瑚礁发育状况预测提供借鉴。

1 研究区域、材料和方法

1.1 研究区域及材料

涠洲岛位于中国南海北部, 处于热带北缘(图 1), 整岛总面积 26 km², 是由火山喷发堆积而形成的岛屿^[22-23]。该地属亚热带季风气候, 多年平均 SST 为 24.6℃, 月平均最高 SST 平均值为 30.4℃, 月平均最低 SST 平均值为 17.3℃, 年平均 SST 与全球温度距平呈准同步变化趋势^[19]。海水溶解氧含量变化为 5.40~8.69 mg/L, 平均 7.31 mg/L, 全年无缺氧现象^[24-26]。涠洲岛珊瑚礁的发育受海温及气候的控制, 除受到由全球变暖带来的夏季高温的影响外, 还受到由冬季冷气团入侵带来的冬季低温的影响^[27]。农业、水产养殖、旅游业等密集的人类活动加剧了涠洲岛环境的恶化^[28]。该岛珊瑚礁覆盖率急剧下降, 从 20 世纪 80 年代的约 50% 下降到 2015 年的约 6%^[29]。

GS-3 井位于涠洲岛北部珊瑚礁礁坪区中心位置(图 1), 位于水下 4.17 m, 为本研究于 2018 年 6 月钻取, 钻入深度 8.2 m。该钻井岩芯 0~3.8 m 层段以灰白色珊瑚断枝与珊瑚碎块为主, 含少量碎屑基质, 粒径较粗; 3.8~6.8 m 层段以灰白色碳酸岩碎屑基质为主, 其间含少量枝状珊瑚断枝, 沉积物粒径迅速变小; 6.8~7.6 m 层段转变为以棕黄色陆源砂

图1 研究区域位置图^[16]Fig.1 Location of the study area^[16]

质沉积为主的碎屑基质,其间含少量块状珊瑚碎块;7.6~8.2 m层段为黄绿色火山碎屑泥。

1.2 U-Th 测年

前人对南沙群岛珊瑚礁钻孔的研究提出,岩芯中表面结构完好保存的珊瑚枝的铀系年代能够非常好地代表岩芯的沉积年代^[30]。仿照这一方法,于岩芯中挑选出6个表面细微结构保存完好、新鲜致密的鹿角珊瑚(*Acropora*)枝样品。6个珊瑚枝位于钻井0~5.57 m层段,5.57 m以下层段以陆源砂质沉积为主,枝状珊瑚极少,未能找到理想的测年样品。珊瑚枝的集中分布导致部分层位的年代缺失是本文测年方法的主要局限性。本文利用微型电锯等工具去除珊瑚表面的生物附着物等,取出珊瑚的中心洁净部位,再将其进行破碎、超声波清洗、晾干和封存。之后在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室利用多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)进行铀系年代测试,样品的化学处理及实验流程参照实验室标准程序^[30-31]。

1.3 粒度分析

依据前人的经验^[32-33],以20 cm为间距由顶及底依次取沉积样品,利用干筛法进行粒度分析。先将样品用去离子水进行清洗并烘干,然后利用2、1、0.5、0.25、0.125、0.074 mm的标准套筛将沉积物进行筛分,再将各粒级沉积物在电子天平上分别称重、记录,最后计算其平均粒度、分选系数、偏态、峰态。

1.4 生物组分分析

以40 cm为间距从顶部向底部依次取样。依据先前的经验^[33-34]及岩芯观察,珊瑚礁沉积物大于2 mm粒级主要为珊瑚断枝及珊瑚碎块,小于1 mm沉积物则以陆源碎屑为主,故取1~2 mm粒级珊瑚

沉积进行生物组分分析。首先将样品进行超声清洗、烘干,然后在实体显微镜下对沉积物的细微结构进行分辨,将生物碎屑划分为珊瑚、软体动物、珊瑚藻、有孔虫、仙掌藻和其他6个类别,按颗粒数占比分别统计六大类生物组分所占比例。

1.5 矿物组分分析

以40 cm为间距由顶及底依次取沉积样品。首先将沉积物用去离子水经超声振荡清洗,然后用玛瑙研钵研磨。再利用日本理学(RIGAKU)Ultima IV型X射线粉末衍射仪对样品进行分析,测试过程均由计算机全程控制,测定时保持试验条件相同。最后将仪器分析所获的X射线衍射图谱利用Jade软件结合国际衍射数据中心(ICDD)发布的PDF卡片进行分析,用“自清洗法”计算样品中文石、白云石、石英、高镁方解石、低镁方解石的相对占比^[35]。

2 结果

2.1 珊瑚 U-Th 年龄

铀系测年结果如表1所示,样品平均U含量为 3.08×10^{-6} ,初始 $\delta^{234}\text{U}$ 平均值为146.5,且均在 147 ± 3 的范围内,与原始珊瑚和现代海水相当^[36],这说明珊瑚文石仍处于封闭系统中,没有受到成岩作用的干扰。岩芯中的珊瑚年龄呈现出自上而下从新到老的年代序列,最新的年龄为 -27 ± 20 aBP(相对于公元1950年),最老的年龄为 3737 ± 17 aBP,跨度为3764年。

2.2 涠洲岛珊瑚礁沉积物组成特征

根据岩芯沉积物分析结果以及岩芯观察(图2),GS-3井岩芯沉积物由顶及底可划分为6层,详细的沉积物组成见表2。岩芯0~1 m层位为原生文石

表 1 涠洲岛 GS-3 井珊瑚样品 U-Th 测年结果统计表
Table 1 U-Th dating results of coral samples from Well GS-3, Weizhou Island

样品编号	深度/m	U/10 ⁻⁶	²³² Th/10 ⁻⁹	^{(230)Th} / ^{(232)Th}	^{(230)Th} / ^{(238)U}	^{(234)U} / ^{(238)U}	²³⁰ Th 年龄/a			δ ²³⁴ U (初始值T)
							未校正	校正	日历年/aBP	
GS3-1	0.34	3.3380±0.0036	5.125±0.008	1.71±0.02	0.00086±0.00001	1.1466±0.0014	82±1	42±20	-27±20	146.6±14
GS3-2	0.99	2.7900±0.0034	7.336±0.014	5.60±0.06	0.00485±0.00005	1.1481±0.0015	462±5	394±34	325±34	148.4±15
GS3-3	1.41	3.0110±0.0027	3.599±0.006	34.26±0.21	0.01350±0.00008	1.1466±0.0016	1291±8	1260±17	1191±17	147.1±16
GS3-4	2.66	3.3952±0.0039	2.487±0.005	102.32±0.44	0.02471±0.00010	1.1456±0.0015	2376±10	2357±14	2288±14	146.6±15
GS3-5	2.78	3.0751±0.0033	0.913±0.001	270.6±1.00	0.02649±0.00010	1.1445±0.0018	2553±10	2545±11	2476±11	145.5±18
GS3-6	5.57	2.8853±0.0029	2.413±0.003	143.15±0.43	0.03945±0.00011	1.1430±0.0018	3828±13	3806±17	3737±17	144.6±18

注: 括号中的比率是依据Cheng等^[37]公布的衰变常数以原子比计算的活度比; 所有数值均已根据实验室空白样进行了校正; 所有U-Th 数据误差为2s; 未校正的²³⁰Th年龄(a)使用Isoplot 3.75程序计算; δ²³⁴U=[^{(234)U}/^{(238)U}-1]×1000。BP表示距1950AD。

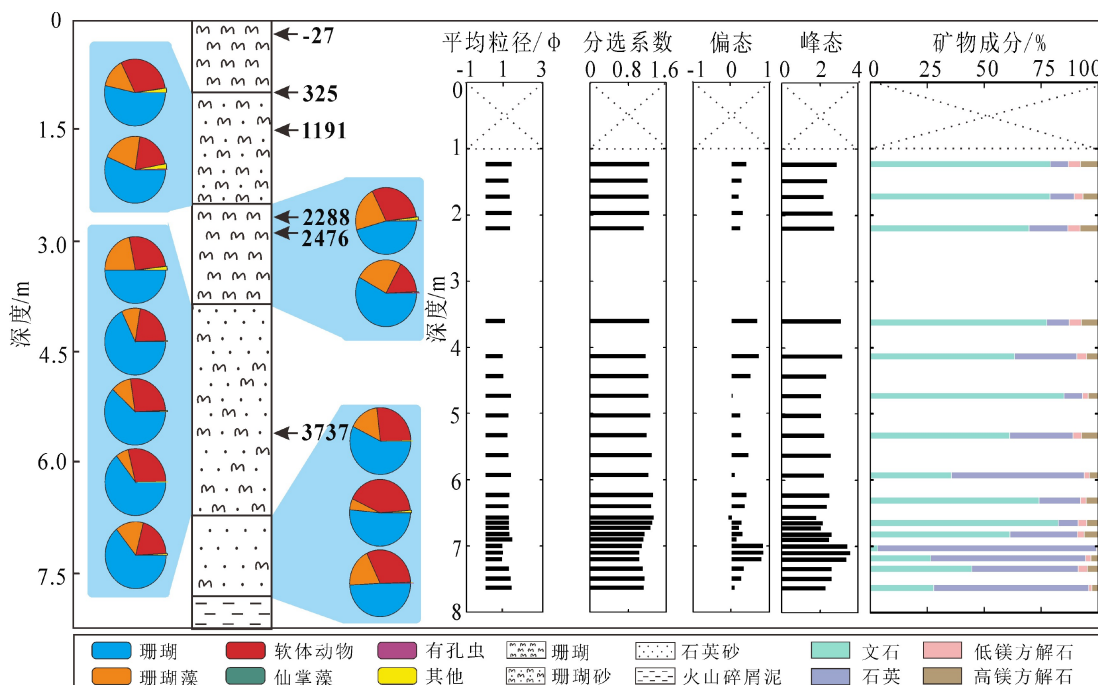


图 2 涠洲岛 GS-3 井综合沉积柱状图

Fig.2 Integrated sedimentary column of wells GS-3 on Weizhou Island

质珊瑚; 岩芯 1~6.8 m 以原生珊瑚为主, 陆源砂质组分由顶及底整体上呈增多的趋势; 6.8~7.6 m 转变为陆源砂质输入为主, 原生珊瑚减少; 7.6~8.2 m 为火山碎屑泥基底。

3 讨论

3.1 涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其阶段性

GS-3 岩芯组成及矿物成分分析结果显示, 涠洲岛珊瑚礁发育基底为火山碎屑泥, 该沉积可能是涠洲岛在早中更新世 (1.42~0.49 Ma) 和晚更新世 (36~33 ka) 火山活动的产物^[38]。涠洲岛北部波浪

频率高但较平稳, 水动力虽活跃但破坏作用小, 在发育珊瑚礁之前, 该区以陆源海相沉积为主^[39]。在南海全新世高海平面时期^[40], 海平面上升使得海水淹没原有的陆源沉积, 为珊瑚礁的发育提供了可容纳空间。岩芯 7.6~6.8 m 层段含珊瑚碎块的陆源砂质沉积记录了涠洲岛北部沉积环境从陆源砂质沉积开始向礁源沉积转变的过程。铀系年代结果显示, 涠洲岛珊瑚礁 GS-3 岩芯 5.57 m 处的年龄为 3737±17 aBP (相对于公元 1950 年), 表明涠洲岛珊瑚礁至少于 3700 年前以火山碎屑泥为基底开始发育。基于此年代计算, 涠洲岛珊瑚礁在 3737~2476 aBP 以 2.21 m/ka 的速率发育; 2476~2288 aBP, 珊瑚礁发育速率减缓至 0.64 m/ka; 2288~1191 aBP, 其发

表2 涠洲岛GS-3井珊瑚礁沉积物组成
Table 2 Composition of coral reef sediments in Well GS-3 of Weizhou Island

分层	深度/m	岩心描述	粒度	生物组分	矿物成分	发育类型
1	0~1	主要为2~5 cm的枝状珊瑚(70%)、块状珊瑚(25%)的枝、砾,以及少量砂质组分(5%),偶见螺类、贝壳类的碎片。多数珊瑚碎屑的表面疏松多孔且有绿色藻类附着,其孔洞内存在大量现代双壳类、蠕虫等侵蚀生物	平均粒径为砾(>-1Φ),分选差	鹿角珊瑚属、蜂巢珊瑚属以及滨珊瑚属的珊瑚枝、砾为主,偶见软体动物	文石	原生珊瑚
2	1~2.4	块状珊瑚砾(70%)和砂质组分(30%)	平均粒径为中砂(1.29Φ),分选较差,偏态呈近对称,峰态宽平	54.79%珊瑚,25.01%软体动物,17.72%珊瑚藻,2.33%其他(蠕虫为主),零星有孔虫、仙人掌藻	75.9%文石,12.31%方解石,11.79%石英	原生珊瑚、陆源输入
3	2.4~3.8	2~5 cm的大型块状珊瑚(90%)和砂质组分(10%)	平均粒径为粗砂(0.99Φ),分选较差,偏态呈正偏分布,峰态很宽平	51.89%珊瑚,25.12%珊瑚藻,16.27%软体动物,零星有孔虫、仙人掌藻	77.52%文石,12.73%方解石,9.75%石英	原生珊瑚、陆源输入
4	3.8~6.8	枝状珊瑚(60%)和砂质组分(40%)	平均粒径为中砂(1.18Φ),分选较差,偏态为正偏,峰态宽平	61.61%珊瑚,24.76%软体动物,珊瑚藻(6.77%~21.76%)含量变化较大	66.98%文石,24.68%石英,8.33%方解石	原生珊瑚、陆源输入
5	6.8~7.6	块状珊瑚(40%)和砂质组分(60%),其间夹少量贝壳碎屑	中砂(1.11Φ),分选较差,偏态呈正偏,峰态很宽平	52.60%珊瑚,33.38%软体动物,13.33%珊瑚藻,零星有孔虫、仙人掌藻	61.58%石英,32.73%文石,5.69%方解石	陆源输入、原生珊瑚
6	7.6~8.2	黄绿色火山碎屑泥	粉砂,分选好	细小有孔虫、贝类	石英,火山碎屑等复杂成分	陆源输入

育速率提高至 1.13 m/ka; 1191~325 aBP,其发育速率下降至 0.48 m/ka; 325 aBP 至今,珊瑚礁发育速率迅速提升至 1.85 m/ka。涠洲岛珊瑚礁发育具有明显的阶段性,经历了 3 个快速发育阶段和 2 个缓慢发育阶段,快速发育阶段的发育速率是缓慢发育阶段的 1.8~4.6 倍。

在第一个快速发育阶段(3737±17)~(2476±11) aBP,珊瑚礁先发育枝状珊瑚和砂质沉积,后转向发育块状珊瑚,砂质沉积含量减少,粒径变粗。在第二个快速发育阶段(2288±14)~(1191±17) aBP,珊瑚礁前期以发育块状珊瑚为主,砂质沉积较少,后期陆源砂质沉积增多。在第三个快速发育阶段(325±34)~(-27±20) aBP,珊瑚礁以发育枝状珊瑚为主,陆源砂质沉积极少,粒径粗。整体而言,涠洲岛珊瑚礁快速发育时期具有发育枝状或块状珊瑚、砂质含量少、粒径粗的特点,此外,珊瑚礁发育枝状珊瑚时的发育速率较发育块状珊瑚时快。在第一个缓慢发育阶段约(2476±11)~(2288±14) aBP,珊瑚礁以发育块状珊瑚为主,砂质沉积含量少。在第二个缓慢发育阶段(1191±17)~(325±34) aBP,珊瑚礁以发育块状珊瑚为主,陆源砂质沉积含量多。整体而言,涠洲岛珊瑚礁缓慢发育阶段以发育块状珊瑚为主,且发育砂质沉积越多,发育速率越慢。

3.2 气候变化对涠洲岛珊瑚礁发育的调控作用

涠洲岛珊瑚礁阶段性发育明显,在 3737~2476、

2288~1191 以及 325 aBP 以来涠洲岛珊瑚礁快速发育,以发育枝状或块状珊瑚、砂质含量少、粒径较粗为特征;在 2476~2288、1191~325 aBP 珊瑚礁缓慢发育,以发育块状珊瑚、砂质含量多为特征。涠洲岛地处相对高纬度,冬季低温是制约其珊瑚生长和珊瑚礁发育的关键因素,气候变化对珊瑚礁发育的调控作用可能是涠洲岛珊瑚礁阶段性发育的主要原因。基于珊瑚礁发育速率与气候背景的关系对比,涠洲岛珊瑚礁第一个快速发育阶段(3737±17)~(2476±11) aBP 与全新世大暖期(8500~3000 aBP)后期对应^[41];第二个快速发育阶段(2288±14)~(1191±17) aBP 与罗马暖期(约 2250~1650 aBP)和黑暗时代冷期(1650~1150 aBP)对应^[42-43];第三个快速发育阶段(325±34)~(-27±20) aBP 与小冰期(450~100 aBP)中后期和现代暖期(约 30 年以来)对应^[43]。而涠洲岛珊瑚礁第一个缓慢发育阶段(2476±11)~(2288±14) aBP 与降温期(约 2500 aBP)对应;第二个缓慢发育阶段(1191±17)~(325±34) aBP 与黑暗时代冷期(1650~1150 aBP)后期、中世纪气候异常期(1050~550 aBP)、小冰期(450~100 aBP)前期大致对应^[43-44]。

在涠洲岛珊瑚礁发育的第一个快速发育阶段(3737±17)~(2476±11) aBP,涠洲岛近岸底栖有孔虫壳体氧同位素指示了 5000~4000 aBP 的年均气温较今高 3~6℃^[45]。珠江三角洲孢粉指示了该阶段显著高温的气候背景(图 3c)^[46]。贵州董哥洞石笋 δ¹⁸O

指示了该阶段强劲的东亚夏季风(图 3d)^[47]。涠洲岛珊瑚礁在温暖的气候背景下开始发育成礁。在珊瑚礁第二个快速发育阶段(2288±14)~(1191±17) aBP, 前期气候背景以升温、强东亚夏季风为主要特征, 后期气温在小范围内波动, 东亚夏季风逐渐减弱(图 3)。在珊瑚礁的第三个快速发育阶段(325±34)~(-27±20) aBP, 高 SST(图 3b)^[48-49]、强东亚夏季风(图 3d)是该时期的主要气候特征。涠洲岛三个快速发育阶段分别与全新世大暖期后期、罗马暖期和黑暗时代冷期前中期、小冰期后期和现代暖期相对应, 其气候背景均以高温、强东亚夏季风为特征, 由此可见, 温暖的气候对涠洲岛珊瑚生长与珊瑚礁发育有利。黑暗时代冷期前中期、小冰期中后期与珊瑚礁快速发育阶段对应的结果可能是由于年代分辨率低, 未能将珊瑚礁在罗马暖期和黑暗时代冷期前中期、小冰期中后期和现代暖期的发育速率分离。涠洲岛西南部珊瑚礁在黑暗时代冷期及小冰期发育慢, 发育速率分别为 0.1 和 0.2 m/ka; 在中世纪暖期和现代暖期发育较快, 发育速率分别为 4.1 和 2.2 m/ka^[50]。整体来说, 涠洲岛快速发育阶段与暖期对应, 暖期珊瑚礁发育快。

在涠洲岛珊瑚礁第一个缓慢发育阶段(2476±11)~(2288±14) aBP, 雷州半岛珊瑚 Sr/Ca 指示的 SST 显著下降(图 3b), 并与珠江三角洲孢粉指示的气温骤降同步(图 3c)。贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示了该阶段弱东亚夏季风特征(图 3d)。在第二个缓慢发育阶段(1191±17)~(325±34) aBP, 气温在该阶段前期先增后降, 并在 1℃ 以内波动, 在后期气温显著下降 2℃(图 3c)。东亚夏季风在该阶段中期强度增强, 但整体与全新世大暖期, 罗马暖期以及现代暖期相比处于较弱水平(图 3d)^[47]。涠洲岛两个缓慢发育阶段与降温期(约 2500aBP)、黑暗时代冷期后期和中世纪气候异常期以及小冰期前期对应^[43], 其气候背景均以显著降温、弱东亚夏季风为特征, 由此可见, 寒冷的气候对涠洲岛珊瑚生长与珊瑚礁发育不利。中世纪气候异常期是一个自然暖期, 该时期与珊瑚礁缓慢发育阶段对应的结果可能是由于该时期频繁的 ENSO 事件带来的极端风浪直接破坏珊瑚礁, 珊瑚礁厚度变薄, 计算所得的发育速率偏小。整体来说, 涠洲岛缓慢发育阶段与冷期对应, 冷期珊瑚礁发育慢。

全新世珊瑚礁阶段性发育在全球各海区广泛存在^[18,34,51], 海平面、温度和气候等环境因子是导致珊瑚礁阶段性发育的主要因素^[52-53]。琉球群岛的石垣岛珊瑚礁发育速率从 7800~5800 aBP 的 7.5 m/ka

降到 5800 aBP 的 3.5 m/ka, 珊瑚礁发育速率的下降被认为与海平面上升变缓导致珊瑚生长空间受限有关^[54]。在日本海域发现的约 5900~5800、约 4400~4000 以及约 3300~3200 aBP 出现的全新世珊瑚礁发育间断被认为与黑潮活动减弱引发的 SST 下降有关^[55]。巴拿马海区珊瑚礁在约 4000~2500 aBP 的发育间断则被归因于 ENSO 事件频发^[34]。

在涠洲岛珊瑚礁发育缓慢时期, 即 2476~2288、1191~325 aBP, 雷州半岛珊瑚记录了 2800~2000 aBP 高海平面的存在^[40], 且在约 1200 aBP, 海平面至少比现在高 1.28 m^[56]。GS-3 钻井测年珊瑚深度信息及野外钻井水深记录数据显示, 珊瑚礁在发育缓慢时期发育于现代海平面以下约 6.95~6.83 以及 5.58~6.16 m。南海珊瑚指示的相对海平面记录了相对海平面从中全新世开始持续下降, 但在两个缓慢发育时期并无显著的海平面骤降, 海平面变化幅度小于 1 m(图 3f)^[57], 能够为珊瑚礁发育提供足够的生存空间。相对海平面的降低不应为涠洲岛珊瑚礁发育的限制因素。在涠洲岛珊瑚礁第三个快速发育时期(约 300 aBP 至现在), 海平面接近现代海平面, 低于缓慢发育时期的海平面, 进一步证实了海平面波动不是涠洲岛珊瑚礁发育的主要限制因素。

涠洲岛珊瑚礁处于相对高纬度, 冬季的大幅度降温过程或低温事件直接威胁着珊瑚的生存^[21]。在暖期, 温暖的气候带来的冬季海水温度的上升能够帮助相对高纬度珊瑚摆脱低温威胁, 从而提高珊瑚礁的发育速率。强劲的东亚夏季风能够促进南海北部环流和黑潮将较暖的海水以及热带珊瑚幼虫从南海和印度-太平洋暖池输送到相对高纬度地区, 有利于珊瑚生长和珊瑚礁发育^[17]。在冷期, 东亚夏季风减弱使得冬季海温下降, 过低的冬季海温会引起珊瑚的冷白化, 对珊瑚生长不利甚至导致珊瑚死亡^[58], 从而降低珊瑚礁的发育速率。已有报道表明雷州半岛珊瑚礁在 7500~7000 aBP 发生的多次冷白化事件是由异常东亚季风引起的冬季极端低温导致^[59]。涠洲岛珊瑚礁快速发育阶段与全新世大暖期(8500~3000 aBP)后期、罗马暖期(约 2250~1650 aBP)以及现代暖期(30 年以来)大致对应; 缓慢发育阶段与降温期(约 2500 aBP)、黑暗时代冷期(1650~1150 aBP)后期、中世纪气候异常期(1050~550 aBP)、小冰期(450~100 aBP)前期大致对应。总体而言, 相对高纬度的涠洲岛珊瑚礁的发育快慢受气候冷暖所调控, 暖期的气候有利于珊瑚生长和珊瑚礁发育, 冷期珊瑚礁发育慢。

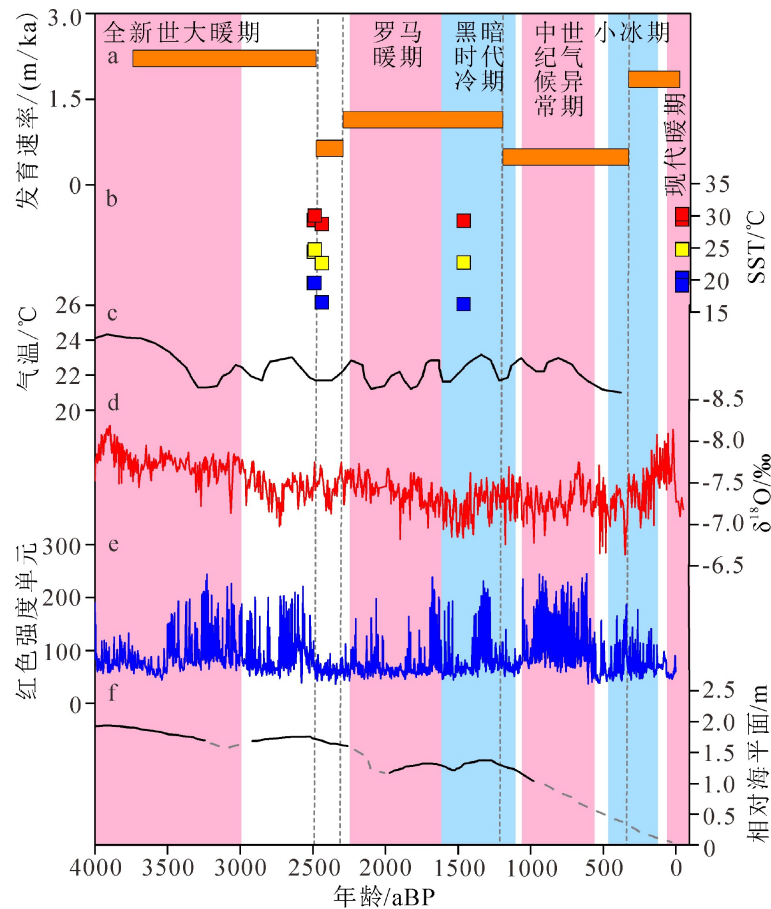


图3 4000年来涠洲岛珊瑚礁的发育速率与古气候代用指标的对比

a. 涠洲岛珊瑚礁发育速率: 全新世大暖期^[41]; 罗马暖期^[42]; 黑暗时代冷期, 中世纪气候异常期, 小冰期和现代暖期^[43]; 粉色阴影和蓝阴影分别代表暖期和冷期; b. 南海雷州半岛珊瑚 Sr/Ca 指示的 SST^[48-49]: 红点表示平均最大 SST, 黄点表示年平均 SST, 蓝点表示平均最小 SST; c. 珠江三角洲孢粉指示的气温^[46]; d. 贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的东亚夏季风^[47]; e. 赤道东太平洋沿岸湖泊纹层色度指示的 ENSO 活动^[60]; f. 珊瑚指示的南海相对海平面^[57]。

Fig.3 Correlation between the development rate of coral reefs on Weizhou Island and paleoclimate proxy in the past 4000 years

(a) Coral reef development rate on Weizhou island: Megathermal^[41]; Roman Warm Period^[42]; Dark Age Cold, Medieval Climate Anomaly, Little Ice Age and Current Warm Period^[43]; Pink-shaded bars and blue-shaded bars represent warm and cold periods, respectively; (b) SST indicated by coral from Leizhou Peninsula in the South China Sea, refers to Yu et al, 2005^[48] and Wei et al, 2004^[49]; red dot indicates the mean maximum SST, yellow dot indicates the mean annual SST and blue dot indicates the mean minimum SST; (c) Temperature indicated by sporopollen in the Zhujiang Delta, refers to Li et al, 1991^[46]; (d) East Asian summer monsoon indicated by $\delta^{18}\text{O}$ of Dongge cave in Guizhou, refers to Conroy et al, 2008^[47]; (e) ENSO variability indicated by red color intensity of lake sediments on the coast of eastern equatorial pacific area, refers to Moy et al, 2002^[60]; (f) Relative sea level indicated by coral in the South China Sea, refers to Yu et al, 2012^[57].

涠洲岛珊瑚礁位于热带北缘, 处于相对高纬度, 依据避难所理论, 涠洲岛珊瑚礁是南海珊瑚的潜在避难所。涠洲岛北部珊瑚礁至少于 3700 年前在全新世大暖期的气候背景下开始发育, 其发育速率高低的交替变化与暖冷期的转变基本一致, 暖期珊瑚礁发育快, 冷期发育慢。进入现代暖期以来, 涠洲岛北部珊瑚礁发育枝状珊瑚且沉积物中珊瑚文石含量达发育历史中的最高值, 珊瑚礁发育速率在现代暖期仅次于全新世大暖期, 处于珊瑚礁发育的鼎盛时期。涠洲岛北部珊瑚礁发育过程及其对

过去暖期的积极响应为涠洲岛珊瑚礁在历史时期的避难所功能提供了科学依据。涠洲岛珊瑚礁在现代暖期的鼎盛发育指示了其作为全球变暖背景下南海珊瑚避难所的潜力。

4 结论

(1) 涠洲岛北部珊瑚礁至少于 3700 aBP 开始发育至今。(3737±17)~(2476±11) aBP、(2288±14)~(1191±17) aBP、(325±34) aBP 以来 3 个时期为涠洲

岛珊瑚礁快速发育期,发育速率分别为 2.21、1.13 及 1.85 m/ka; (2476±11)~(2288±14) aBP 和 (1191±17)~(325±34) aBP 两个时期为涠洲岛珊瑚礁缓慢发育期,发育速率分别为 0.64、0.48 m/ka。快速发育期的发育速率是缓慢发育期的 1.8~4.6 倍。

(2) 涠洲岛珊瑚礁快速发育期与暖期(全新世大暖期后期、罗马暖期以及现代暖期)大致对应,缓慢发育期与冷期(2500 aBP 降温期、黑暗时代冷期后期、中世纪气候异常期、小冰期前期)大致对应。

(3) 涠洲岛珊瑚礁的发育快慢受气候冷暖所调控,温暖的气候有利于珊瑚礁发育,而寒冷的气候对珊瑚礁发育不利。涠洲岛珊瑚礁发育对现代暖期气候变暖的积极响应指示了其作为全球变暖背景下南海珊瑚避难所的潜力。

致谢: 澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室承担样品的铀系年代测定。

参考文献 (References)

- [1] Bruno J F, Selig E R. Regional Decline of Coral Cover in the Indo-Pacific: Timing, Extent, and Subregional Comparisons [J]. *PLoS One*, 2007, 2(8): e711.
- [2] Gardner T A, Cote I M, Gill J A, et al. Long-term region-wide declines in Caribbean corals [J]. *Science*, 2003, 301(5635): 958-960.
- [3] Bellwood D R, Hughes T P, Folke C, et al. Confronting the coral reef crisis [J]. *Nature*, 2004, 429(6994): 827-833.
- [4] Hoegh-Guldberg O, Mumby P J, Hooten A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1737-1742.
- [5] Hughes T P, Graham N A J, Jackson J B C, et al. Rising to the challenge of sustaining coral reef resilience [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(11): 633-642.
- [6] Pandolfi J M, Connolly S R, Marshall D J, et al. Projecting Coral Reef Futures Under Global Warming and Ocean Acidification [J]. *Science*, 2011, 333(6041): 418-422.
- [7] Beger M, Sommer B, Harrison P L, et al. Conserving potential coral reef refuges at high latitudes [J]. *Diversity and Distributions*, 2014, 20(3): 245-257.
- [8] Yamano H, Sugihara K, Nomura K. Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(4): L04601.
- [9] Booth D J, Figueira W F, Gregson M A, et al. Occurrence of tropical fishes in temperate southeastern Australia: Role of the East Australian Current [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72(1-2): 102-114.
- [10] Baird A H, Sommer B, Madin J S. Pole-ward range expansion of *Acropora* spp. along the east coast of Australia [J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(4): 1063-1063.
- [11] Precht W F, Aronson R B. Climate Flickers and Range Shifts of Reef Corals [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(6): 307-314.
- [12] Serrano E, Coma R, Ribes M. A phase shift from macroalgal to coral dominance in the Mediterranean [J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(4): 1199-1199.
- [13] Serrano E, Coma R, Ribes M, et al. Rapid Northward Spread of a Zooxanthellate Coral Enhanced by Artificial Structures and Sea Warming in the Western Mediterranean [J]. *PLoS One*, 2013, 8(1): e52739.
- [14] Qin Z J, Yu K F, Wang Y H, et al. Spatial and Intergeneric Variation in Physiological Indicators of Corals in the South China Sea: Insights Into Their Current State and Their Adaptability to Environmental Stress [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2019, 124(5): 3317-3332.
- [15] Qin Z J, Yu K F, Liang Y T, et al. Latitudinal variation in reef coral tissue thickness in the South China Sea: Potential linkage with coral tolerance to environmental stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134610.
- [16] Yu W J, Wang W H, Yu K F, et al. Rapid decline of a relatively high latitude coral assemblage at Weizhou Island, northern South China Sea [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(14): 3925-3949.
- [17] Clark T R, Chen X F, Leonard N D, et al. Episodic coral growth in China's subtropical coral communities linked to broad-scale climatic change [J]. *Geology*, 2019, 47(1): 79-82.
- [18] Yan S, Zhao J X, Lau A Y A, et al. 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*, 2019, 124(4): 1032-1043.
- [19] 余克服, 蒋明星, 程志强, 等. 涠洲岛42年来海面温度变化及其对珊瑚礁的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 506-510. [YU Kefu, JIANG Mingxing, CHENG Zhiqiang, et al. Latest forty two years' sea surface temperature change of Weizhou Island and its influence on coral reef ecosystem [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 506-510.]
- [20] 梁文, 黎广钊. 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*, 2002, 15(6): 5-7,16. [LIANG Wen, LI Guangzhao. Preliminary study on characteristics of coral reef distribution and environmental protection in Weizhou Island [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(6): 5-7,16.]
- [21] 周雄, 李鸣, 郑兆勇, 等. 近50年涠洲岛5次珊瑚冷白化的海洋站 SST指标变化趋势分析[J]. *热带地理*, 2010, 30(6): 582-586. [ZHOU Xiong, LI Ming, ZHENG Zhaoyong, et al. An analysis on the trend of sea surface temperature indices for coral cold bleaching in Weizhou Island ocean observation station during 1960-2009 [J]. *Tropical Geography*, 2010, 30(6): 582-586.]
- [22] 刘敬合, 黎广钊, 农华琼. 涠洲岛地貌与第四纪地质特征[J]. *广西科学院学报*, 1991, 7(1): 27-36. [LIU Jinghe, LI Guangzhao, NONG Huaqiong. Features of geomorphy and quaternary geology of the Weizhou Island [J]. *Journal of the Guangxi Academy of Sciences*, 1991, 7(1): 27-36.]
- [23] 叶维强, 黎广钊, 庞衍军, 等. 北部湾涠洲岛珊瑚礁海岸及第四纪沉

- 积特征[J]. 海洋科学, 1988, 12(6): 13-17. [YE Weiqiang, LI Guangzhao, PANG Yanjun, et al. Characteristics of the coastal reef and quaternary sediment from the Weizhou Island, Beibu Gulf [J]. Marine Sciences, 1988, 12(6): 13-17.]
- [24] 黎广钊, 梁文, 农华琼, 等. 涠洲岛珊瑚礁生态环境条件初步研究[J]. 广西科学, 2004, 11(4): 379-384. [LI Guangzhao, LIANG Wen, NONG Huaqiong, et al. Preliminary study on conditions of coral reef ecological environment along the coast of Weizhou Island [J]. Guangxi Sciences, 2004, 11(4): 379-384.]
- [25] 邱绍芳. 涠洲岛附近海域水质和底质环境的分析与评价[J]. 广西科学院学报, 1999, 15(4): 170-173. [QIU Shaofang. Analysis and evaluation of substrate environment and water quality of the sea area around Weizhou Island [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1999, 15(4): 170-173.]
- [26] 韦蔓新, 赖廷和, 何本茂. 涠洲岛水域生物理化环境特征及其相互关系[J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 67-71. [WEI Manxin, LAI Tinghe, HE Benmao. The biological and physical and chemical characteristics of environment and their mutual relationships in the waters of Weizhou Island [J]. Marine Sciences, 2003, 27(2): 67-71.]
- [27] Chen T R, Li S, Yu K F, et al. Increasing temperature anomalies reduce coral growth in the Weizhou Island, northern South China Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 130: 121-126.
- [28] 黄晖, 马斌儒, 练健生, 等. 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, 2009, 29(4): 307-312, 318. [HUANG Hui, MA Binru, LIAN Jiansheng, et al. Status and conservation strategies of the coral reef in Weizhou Island, Guangxi [J]. Tropical Geography, 2009, 29(4): 307-312, 318.]
- [29] 王文欢, 余克服, 王英辉. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究历史、现状与特色[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 72-79. [WANG Wenhuan, YU Kefu, WANG Yinghui. A Review on the research of coral reefs in the Weizhou Island, Beibu Gulf [J]. Tropical Geography, 2016, 36(1): 72-79.]
- [30] Yu K F, Zhao J X, Wang P X, et al. High-precision TIMS U-series and AMS ^{14}C dating of a coral reef lagoon sediment core from southern South China Sea [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(17-18): 2420-2430.
- [31] Clark T R, Roff G, Zhao J X, et al. Testing the precision and accuracy of the U-Th chronometer for dating coral mortality events in the last 100 years [J]. Quaternary Geochronology, 2014, 23: 35-45.
- [32] McManus J F, Anderson R F, Broecker W S, et al. Radiometrically determined sedimentary fluxes in the sub-polar North Atlantic during the last 140, 000 years [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 155(1-2): 29-43.
- [33] Chen T R, Roff G, Feng Y X, et al. Tropical Sand Cays as Natural Paleocyclone Archives [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(16): 9796-9803.
- [34] Toth L T, Aronson R B, Vollmer S V, et al. ENSO drove 2500-year collapse of eastern Pacific coral reefs [J]. Science, 2012, 337(6090): 81-84.
- [35] 曲高生. 西沙群岛琛航岛碳酸盐沉积物X射线定量分析方法研究[J]. 矿物学报, 1990, 10(4): 360-369. [QU Gaosheng. Quantitative X-ray diffraction analysis of carbonate sediments from Chenhang Island, Xisha Island, China: a methodological study [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1990, 10(4): 360-369.]
- [36] Shen C C, Li K S, Sieh K, et al. Variation of initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ and limits of high precision U-Th dating of shallow-water corals [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(17): 4201-4223.
- [37] Cheng H, Edwards R L, Hoff J, et al. The half-lives of uranium-234 and thorium-230 [J]. Chemical Geology, 2000, 169(1-2): 17-33.
- [38] 樊祺诚, 孙谦, 隋建立, 等. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山岩微量元素和同位素地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1323-1332. [FAN Qicheng, SUN Qian, SUI Jianli, et al. Trace-element and isotopic geochemistry of volcanic rocks and its tectonic implications in Weizhou Island and Xieyang Island, Northern Bay [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1323-1332.]
- [39] 王国忠, 全松青, 吕炳全. 南海涠洲岛区现代沉积环境和沉积作用演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(1): 69-82. [WANG Guozhong, QUAN Songqing, LYU Bingquan. Evolution of modern sedimentary environments and sedimentations in the Weizhou Island area, south China sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(1): 69-82.]
- [40] 余克服, 钟晋梁, 赵建新, 等. 雷州半岛珊瑚礁生物地貌带与全新世多期相对高海平面[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 27-33. [YU Kefu, ZHONG Jinliang, ZHAO Jianxin, et al. Biological-geomorphological zones in a coral reef area at southwest Leizhou Peninsula unveil multiple sea level high-stands in the Holocene [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(2): 27-33.]
- [41] 施雅凤, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. 中国科学(B辑), 1994, 37(3): 353-365. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. The climate fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China [J]. Science in China. Series B, Chemistry, Life Science & Earth Sciences, 1994, 37(3): 353-365.]
- [42] Lam H H. Climate: present, past and future[M]. London: Methuen, 1977.
- [43] 黄博津, 余克服, 陈特固. 过去2000年的特征气候时段及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 97-108. [HUANG Bojin, YU Kefu, CHEN Tegou. Recent progress on specific climatic stages and driving forces over last 2000 years [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(1): 97-108.]
- [44] Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly [J]. Science, 2009, 326(5957): 1256-1260.
- [45] 黎广钊, 梁文, 廖思明, 等. 广西沿海全新世以来气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(3): 49-60. [LI Guangzhao, LIANG Wen, LIAO Siming, et al. Climatic changes since Holocene along Guangxi coast [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(3): 49-60.]
- [46] 李平日, 方国祥, 黄光庆. 珠江三角洲全新世环境演变[J]. 第四纪研究, 1991, 11(2): 130-139. [LI Pingri, FANG Guoxiang, HUANG Guangqing. Holocene environmental changes in Zhujiang delta [J]. Quaternary Sciences, 1991, 11(2): 130-139.]
- [47] Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E, et al. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment

- record [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(11-12): 1166-1180.
- [48] 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 [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2-4): 301-316.
- [49] Wei G J, Yu K F, Zhao J X. Sea surface temperature variations recorded on coralline Sr/Ca ratios during Mid-Late Holocene in Leizhou Peninsula [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(17): 1876-1881.
- [50] 张婷, 胡敏航, 张文静, 等. 涠洲岛珊瑚礁近千年的发育过程及其对气候变化的响应[J]. *热带海洋学报*, 2020, 39(4): 70-79. [ZHANG Ting, HU Minhang, ZHANG Wenjing, et al. Coral reef growth of Weizhou Island and its response to climate change in the past millennium [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(4): 70-79.]
- [51] Davies P J, Montaggioni L. Reef growth and sea-level change: the environmental signature[C]//Proceedings of the Fifth International Coral Reef Symposium. Tahiti: Martin, 1985: 477-515.
- [52] Sarg J F. Carbonate Sequence Stratigraphy[M]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G S C, et al. SEPM Special Publication: Sea-Level Changes-An Integrated Approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 155-181.
- [53] Vecsei A. A new estimate of global reefal carbonate production including the fore-reefs [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 43(1-2): 1-18.
- [54] Hongo C, Kayanne H. Holocene coral reef development under windward and leeward locations at Ishigaki Island, Ryukyu Islands, Japan [J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 214(1-4): 62-73.
- [55] Hamanaka N, Kan H, Yokoyama Y, et al. Disturbances with hiatuses in high-latitude coral reef growth during the Holocene: Correlation with millennial-scale global climate change [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81: 21-35.
- [56] 余克服, 陈特固. 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*, 2009, 16(6): 138-145. [YU Kefu, CHEN Tegu. Beach sediments from northern South China Sea suggest high and oscillating sea level during the lat Holocene [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 138-145.]
- [57] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 55(8): 1217-1229. [YU Kefu. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes [J]. *Science China Earth Science*, 2012, 55(8): 1217-1229.]
- [58] Hoegh-Guldberg O, Fine M, Skirving W, et al. Coral bleaching following wintry weather [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50(1): 265-271.
- [59] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(1-2): 143-155.
- [60] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell DT, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch [J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 162-165.