



海南岛岸礁中晚全新世沉积演化及其控制因素

徐红飞, 吴 峰, 叶茂松, 祝幼华, 王静雯

Depositional evolution and controlling factors of the middle-late Holocene fringing reef in Hainan Island

XU Hongfei, WU Feng, YE Maosong, ZHU Youhua, and WANG Jingwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024111101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海南岛西北部更新世海相地层的石英ESR测年探讨

Testing of quartz ESR dating for the marine strata on the northwestern coast of Hainan Island

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 123-132

7.8 kaBP以来海南岛东南陆架陆源碎屑来源及其环境响应

Provenance and environmental response of terrigenous debris in the southeastern continental shelf of Hainan Island since 7.8 kaBP

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 27-36

东亚和南亚典型大河三角洲晚第四纪地层结构及成因对比

A comparative study on the Late Quaternary stratigraphic architecture and formation of megadeltas in East and South Asia

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 12-21

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64-74

沉积成因Sr/Ba指示的福建潮控海湾全新世沉积环境及海平面意义

Holocene sedimentary environment and sea level significance of sedimentogenic Sr/Ba in Fujian tidal bays

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 95-106

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): 25-43



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐红飞, 吴峰, 叶茂松, 等. 海南岛岸礁中晚全新世沉积演化及其控制因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 1-12.

XU Hongfei, WU Feng, YE Maosong, et al. Depositional evolution and controlling factors of the middle-late Holocene fringing reef in Hainan Island [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 1-12.

海南岛岸礁中晚全新世沉积演化及其控制因素

徐红飞¹, 吴峰¹, 叶茂松², 祝幼华³, 王静雯¹

1. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 河海大学, 南京 210024

2. 海南省海洋与渔业科学院, 海口 571126

3. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008

摘要: 海南岛岸礁体系是中国重要的珊瑚礁资源之一, 然而针对其沉积演化过程仍然缺乏系统性的研究。基于海南岛文昌市长圯港近岸 ZK-6 钻井, 通过 AMS¹⁴C 定年、宏观岩芯观察、镜下薄片鉴定等方法, 对钻井沉积特征 (岩性、生物组分) 进行了精细刻画, 建立了研究区岸礁沉积演化序列, 探讨了岸礁发育演化控制因素。AMS¹⁴C 测年结果表明, 岸礁发育时间为中晚全新世 (7560~3410 aBP), 沉积相以礁坪相与礁后相多次交替出现为特征。岸礁发育演化的控制因素包括海平面变化和古海水温度。相对较低的海平面条件下研究区主要发育礁坪相, 而相对较高的海平面条件下研究区主要发育礁后相; 古海水温度对岸礁的影响主要体现在沉积速率上, 表现为古海水温度的升高会促进岸礁沉积的速率增大。研究认为, 海平面变化是海南岛东北侧岸礁在 7560~3410 aBP 期间发育演化的主要控制因素, 以此揭示了海南岛岸礁珊瑚群落生态系统演化规律, 为岸礁珊瑚群落生态系统的保护和恢复提供了重要的理论支持。

关键词: 沉积演化; 海平面; 岸礁; 中-晚全新世; 海南岛

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024111101

Depositional evolution and controlling factors of the middle-late Holocene fringing reef in Hainan Island

XU Hongfei¹, WU Feng¹, YE Maosong², ZHU Youhua³, WANG Jingwen¹

1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China

2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China

3. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: The fringing reef systems in the Hainan Island are important coral reef resources, but the systematic research on their depositional evolution is still rare. By AMS¹⁴C dating, macroscopic core observation, and microscopic identification, the sedimentary characteristics (including lithologic facies and biological components) of the middle-late Holocene interval from core ZK-6 in the Hainan Island were described in detail, the sedimentary evolution sequence was established, and the factors controlling reef development were discussed. The AMS¹⁴C dating indicates that the fringing reef development occurred during the middle-late Holocene (7560~3410 aBP). The sedimentary facies were characterized by an alternation of reef flat and backreef. Sea-level change and paleo-seawater-temperature variation controlled the fringing reef development. Results show that the reef-flat facies developed mainly in relatively low sea level, and the backreef facies mainly in relatively high sea level. The paleo-seawater temperature mainly influenced the sedimentation rate of the fringing reef, with a rise in paleo-seawater temperature enhancing the sedimentation rate. It is proposed that sea-level change was the main factor that led to the changes in the sedimentary facies zonation of the fringing reef from 7560 to 3410 aBP in the northeastern Hainan Island. This study revealed the evolution of coral community ecosystem in the Hainan Island, providing an important theoretical support for the protection and restoration of the reef ecosystem.

Key words: depositional evolution; sea level; fringing reef; Middle-late Holocene; Hainan Island

达尔文将珊瑚礁划分为岸礁、堡礁和环礁 3 种成因类型^[1], 其中, 岸礁指的是与海岸线连接、在非

碳酸盐地层上生长出来的珊瑚礁体系^[2], 也是目前热带浅水地区最常见的珊瑚礁类型^[3], 据估计, 东南

资助项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目 (424RC539); 2023 年海南省省本级部门预算常规科研类项目 (KYL-2023-03)

作者简介: 徐红飞 (1998—), 男, 硕士研究生, 海洋地质专业, E-mail: xhf51888666@163.com

通讯作者: 吴峰 (1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事碳酸盐岩沉积学、石油地质学、古气候与古海洋学研究, E-mail: finncug@hotmail.com

叶茂松 (1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋地质学、沉积学研究, E-mail: yeyegood3344@163.com

收稿日期: 2024-11-11; 改回日期: 2024-12-16. 周立君编辑

亚地区的岸礁面积约占世界珊瑚礁面积的30%^[4],岸礁以其独特的发育特征而具有重要的研究价值。首先,岸礁体系与海平面高度具有密切联系。研究证实,岸礁在海平面相对稳定的时期茁壮成长,并在随后的海平面加速变化中消亡^[5],因而岸礁被认为是作为古海平面恢复和古气候变化研究的可靠载体^[6-7]。其次,作为离海岸线最近的珊瑚礁类型,岸礁对海岸线的保护起到至关重要的作用^[8-9]。相关研究认为,岸礁能有效耗散平均97%的波浪能^[10],从而有效防止海浪的直接冲击对岸线造成的侵蚀。此外,相较其他两类珊瑚礁体系而言,岸礁生态系统更容易同时受到自然因素和人类活动的双重影响^[11]。针对岸礁沉积过程的研究将为预测珊瑚礁发育趋势提供重要的参考^[12-14]。

印度-太平洋海域是全球岸礁发育最丰富的地区。近二十年来,随着海洋调查和钻孔技术的发展,有关岸礁年代学^[15]、沉积特征^[13,16]及沉积演化^[17-18]等方面的研究已经取得了诸多成果。然而,目前研究成果多集中于澳大利亚大堡礁地区^[19-21],如前人对澳大利亚大堡礁帕鲁玛浅滩和布拉姆斯顿礁中全新世岸礁的研究发现,珊瑚礁在高浊度和高陆源碎屑含量的环境下也可以保持较高的活性^[16,22]。针对岸礁演化的控制因素研究发现,澳大利亚西北部金伯利生物区的海盗群岛礁、西南太平洋新喀里多尼亚边缘礁、全新世晚期大堡礁中部的近海礁坡等在全新世的沉积演化主要受控于海平面变化^[18,23-24],而大堡礁中部中岛礁滩和霍尔伯恩岛全新世岸礁演化过程除了受到海平面变化控制外,还受到气旋的影响。这些影响主要表现为当珊瑚礁垂直可容纳空间因海平面的下降或珊瑚礁的发育生长而减小时,强烈的气旋会对大堡礁中部中岛礁滩和霍尔伯恩岛上部外礁平面结构进行反复剥离,为较老的中全新世礁结构的重新生长提供了可容纳空间^[21,25]。Ryan等通过对大堡礁中部全新世以来不同离岸距离的岸礁进一步研究发现,较高的陆源沉积对离岸近的珊瑚礁发育有显著影响,而气旋则对离岸远的珊瑚礁的发育起着更重要的作用^[26]。西澳大利亚宁格鲁礁东部全新世边缘珊瑚礁的发育与消亡原因则较为复杂,为中全新世高水位期间的海平面上升、海岸洪水侵蚀、沉积浊度增加、水质下降和强风暴气旋天气等综合因素相互作用的结果^[27]。

中国南海珊瑚礁分布较为广泛,而岸礁多见于海南岛、台湾岛、雷州半岛西南岸、涠洲岛和斜阳岛^[28]。其中海南岛是我国大陆沿岸岸礁最发育的

地区之一。前人的研究表明,海南岛岸礁自全新世以来开始发育^[29-30],几乎在整个海南岛岸线均有分布^[31](图1黄色部分),是探讨南海地区岸礁体系发育特点的理想区域。前人对海南岛岸礁研究主要集中在以下几个方面:海南岛珊瑚对气候的记录^[32-35]、岸礁沉积相带的划分^[36-37]、海南岛珊瑚群落结构特征及其分布^[38-39]、珊瑚礁的保护与修复和人类活动对近代珊瑚的影响^[38-40]。具体而言,前人对海南岛鹿回头区珊瑚进行研究,发现全新世以来至少有4期相对高海平面阶段,且鹿回头珊瑚所反映的南海北部全新世高海平面具有全球背景,与气候变暖紧密相联^[32]。通过潭门珊瑚生长率重建了中全新世海平面的变化历史^[33],利用鹿回头岸礁中澄黄滨珊瑚骨骼氧、碳同位素分析了珊瑚生长期间的气候变化^[34],通过滨珊瑚重建了中全新世期间南海北部海表温度(SST)的变化过程,并进一步探究了SST的季节性和年际变化分别对东亚季风与ENSO活动的响应^[35]。前人分析了海南岛岸礁的形成环境,依据其结构特征划分了岸礁类型,探讨了岸礁发育与海平面的关系^[36]。在海南岛清澜港应用航空遥感彩色图片研究了珊瑚岸礁的分布,提出以“破浪带分布”为解译标志的岸礁间接解译法,并取得了较好的效果^[37]。研究近岸珊瑚发现,人类活动是导致近年来三亚鹿回头珊瑚种类和覆盖度显著下降的主要原因,而随着一系列保护政策和法规的出台,人类活动对岸礁的负面影响有所减小,让岸礁的生态情况有所好转^[38-40]。综上,前人对海南岛岸礁完整发育过程及其控制因素分析研究相对较少,缺乏对礁体的垂向沉积特征,包括岩性相和生物构成等方面的精细解剖,且尚未建立起系统的沉积演化模式。因此,重建海南岛中晚全新世岸礁发育的过程,对于理解珊瑚礁对历史气候的响应以及预测未来岸礁的发育演化趋势等具有重要的科学意义。

针对上述问题,海南省海洋与渔业科学院于2011年在海南省文昌市长圪港附近的岸礁区钻取了一口全取芯钻孔ZK-6井。该钻井从地表钻至基底,获取了岸礁沉积期完整序列的岩芯。基于钻孔岩芯资料的研究将为南海海域岸礁体系在中晚全新世的演变过程提供新的认识,同时可为岸礁体系的保护与管理提供科学依据。

1 地质背景

海南岛为南海大陆架岛屿,四周被海环绕,全岛面积为33920 km²,是中国海南省众多岛屿中面

积最大的岛^[33,41]。海南岛位于中国南海西北部,处于华南板块、太平洋板块、印支地块和南海地块的交汇处,具有复杂的构造历史^[42]。整体呈穹隆状,中间高,四周低。地形地势按山体、丘陵、玄武岩台地、海积阶地、冲积平原顺序逐渐降低。全新世以来发育有海岸沙坝、海滩岩、珊瑚礁、潟湖、滨海平原、河口三角洲等多种地貌^[43]。前人根据海南岛构造断裂特点将海南岛划分为若干个断隆区和断陷区^[44],而研究区就位于铺前-博鳌断裂带以东的清澜断陷区(图 1)。清澜断陷区周围断裂主要包括:王五-文教断裂,铺前-博鳌断裂以及铺前-清澜断裂(图 1)。根据前人研究发现,王五-文教断裂自更新世晚期以来没有明显活动^[45]。铺前-清澜断裂中的南部清澜港段研究较少,已有的研究显示,南部的活动时代在早更新世,研究区的整个构造环境在全新世较为稳定^[46]。

海南岛地处热带,沿岸表层海水年平均温度为 25.5℃。受热带季风气候影响,夏季盛行偏南季风,冬季盛行偏北季风,年降水量为 1000~2600 mm^[47],是珊瑚发育生长的优良场所,其珊瑚资源也十分丰富^[48]。文昌拥有较为广阔的浅海水域,面积达 51449 km²,主要发育岸礁。前人在文昌市云龙湾进行石珊瑚物种多样性调查时共发现石珊瑚 9 科

17 属 24 种,叶片蔷薇珊瑚为优势种,其次为分枝状的蔷薇珊瑚、鹿角珊瑚和皮壳块状的蔷薇珊瑚。珊瑚的总覆盖率为 38%,其中活珊瑚覆盖率 35%,死珊瑚覆盖率 3%,珊瑚的死亡率为 7.8%,主要受过度开发、污水排放等人类活动影响^[49-50]。

2 材料与方法

2.1 样品

ZK-6 钻井位于文昌市东北部的长圻港(图 1)。钻井采用回转式钻进方式,钻深 9.1 m,不同回次取芯率为 60%~80%,钻井钻取到完整的珊瑚礁沉积序列以及基底软泥。基于 ZK-6 井钻井岩芯材料,本文开展了年代学、沉积学、古生物学方面的研究。

2.2 AMS¹⁴C 测年

从所钻取的 ZK-6 井岩芯中挑选了 12 个珊瑚样品,将其洗净后送至武汉中地大环境地质研究院有限公司开展了矿物成分 X 射线衍射(XRD)分析,以获得每个样品的文石含量。选取 5 件文石含量超过 95% 的珊瑚样品(表明样品处于化学封闭体系中)进行 AMS¹⁴C 测年,以确保测年结果的可靠性和

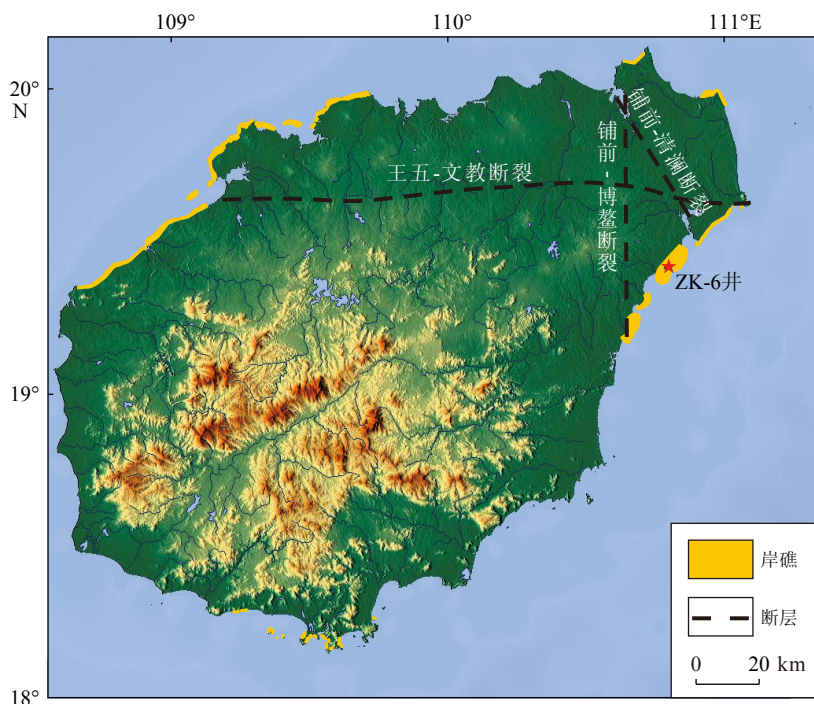


图 1 研究区域位置

地图改自 <https://maps-for-free.com/>, 珊瑚资料改自 <https://resourcewatch.org/>。

Fig.1 Location of the study area

Map from <https://maps-for-free.com/>, coral data from <https://resourcewatch.org/>.

准确性。AMS¹⁴C 测年是在美国 Beta 实验室完成, 由 4 台 NEC 加速器质谱仪和 4 台 Thermo 同位素比值质谱仪开展测年实验, 具体样品预处理过程参见 Douka^[51]。根据 AMS¹⁴C 测年的年龄数据, 建立起 ZK-6 井岸礁体系沉积年龄格架。

2.3 沉积特征与生物组分分析

首先针对岩芯开展宏观特征观察和描述, 同时, 从 ZK-6 井中选取 23 个样品制成岩石薄片, 平均间距为 25 cm, 其中少量层段取芯率较低, 未取样品。薄片大小为 7.5 cm×2.5 cm, 利用莱卡 DM2700M 型偏光显微镜开展薄片观察, 综合识别研究层段的沉积特征、生物组分。对于珊瑚大化石, 首先将样品用去离子水进行超声清洗、烘干, 然后使用放大镜进行珊瑚种属鉴别。其他生物(红藻、有孔虫、棘皮、腹足)的鉴定均在偏光显微镜下完成。岩芯与薄片的沉积和生物组分分析工作均在河海大学海洋科学实验中心完成。

3 结果与解释

3.1 AMS¹⁴C 年龄与沉积速率

对表 1 中的原始数据(即测定值), 采用高概率密度范围法(HPD)并使用海洋校正曲线 Marine20, 扣除海洋储库效应($\Delta R=-25\pm 20$)^[52-53]后对年代数据进行重新矫正。在此基础上, 利用 R 语言中的 Bacon 年龄-深度模型构建年龄框架。该模型在¹⁴C 年龄和预设的先验条件下, 通过 Bayesian 方法经过数百万迭代运算并剔除年龄异常值后, 最终拟合出一条带有 95% 置信区间的最优年龄-深度曲线, 进而重建沉积演化历史^[54](ZK6C-1 与 ZK6C-2 测年结果非常相近, 两者差别接近测试误差, 因此本次模拟只采用了 ZK6C-1 的测试结果)。表 1 中珊瑚样品的 AMS¹⁴C 测年结果表明 ZK-6 井为中晚全新

世沉积。岩芯年龄数据显示, 年龄从下到上逐渐减小, 其中最老的年龄为 7376 cal.aBP, 最新的年龄为 4139 cal.aBP, 没有出现地层倒转的现象(图 2)。图 3 中岩芯不同深度位置的年龄数据由 Bacon 年龄-深度模型运算得出。7376~6478 cal.aBP 平均沉积速率为 0.78 mm/a, 6478~5534 cal.aBP 平均沉积速率为 1.56 mm/a, 5534~4139 cal.aBP 平均沉积速率为 2.73 mm/a。

3.2 岩芯特征

根据岩芯观察和薄片观察的综合结果, 将岩芯共分为 5 种岩性相(图 3): 含生物砂质珊瑚碎屑灰沙相、珊瑚骨架/碎屑灰沙相、含砂质珊瑚碎屑灰沙相、含泥质珊瑚碎屑灰沙相、红色泥层基底相。ZK-6 井岩芯沉积物岩性由下到上依次为: 8.2~7.5 m 红色泥层基底, 7.5~6.7 m 珊瑚骨架/碎屑灰沙, 6.5~6.17 m 含砂质珊瑚碎屑灰沙, 6.17~5.8 m 珊瑚骨架/碎屑灰沙, 5.4~5.2 m 含砂质珊瑚碎屑灰沙, 5.2~4.95 m 含泥质珊瑚碎屑灰沙, 4.95~4.6 m 珊瑚骨架/碎屑灰沙, 3.0~2.78 m 含砂质珊瑚碎屑灰沙, 2.78~1.9 m 珊瑚骨架/碎屑灰沙, 1.7~1.35 m 含砂质珊瑚碎屑灰沙, 1.35~0 m 含生物砂质珊瑚碎屑灰沙。岩芯局部位置铁质浸染现象显著。

含生物砂质珊瑚碎屑灰沙相由含生物砂质珊瑚碎屑灰沙(图 4A)组成, 珊瑚多成块体破碎, 砂质含量>20%。生物主要包括珊瑚、红藻(图 4B)、底栖有孔虫(图 4C)、腹足(图 4C)和棘皮(图 4C)。岩芯局部位置见明显的铁质浸染, 沉积物被浸染呈褐黄色(图 4A 红圈部分)。珊瑚骨架/碎屑灰沙相主要由珊瑚骨架(图 4D)组成, 次要由珊瑚碎屑灰沙组成, 珊瑚块体较完整, 骨架结构清晰。生物主要包括珊瑚(图 4E、F)、红藻、底栖有孔虫。含砂质珊瑚碎屑灰沙相主要由珊瑚碎屑灰沙(图 4G)组成, 珊瑚块体破碎, 砂质含量在 10%~20% 之间。生物主要包括珊瑚、红藻、底栖有孔虫、棘皮和腹

表 1 海南岛 ZK-6 井珊瑚样品 AMS¹⁴C 测年结果
Table 1 AMS¹⁴C dating result of coral from Core ZK-6, Hainan Island

样品编号	深度/m	测定值/cal.aBP	常规年龄/aBP	校正年/cal.aBP	中值/cal.aBP
ZK6C-1	7.05	6660±30	7080±30	7520~7245	7376
ZK6C-2	6.76	6620±30	7040±30	7489~7212	7345
ZK6C-3	6.35	5860±30	6260±30	6658~6335	6478
ZK6C-4	4.92	4970±30	5380±30	5719~5406	5534
ZK6C-5	1.52	3830±30	4230±30	4327~3960	4139

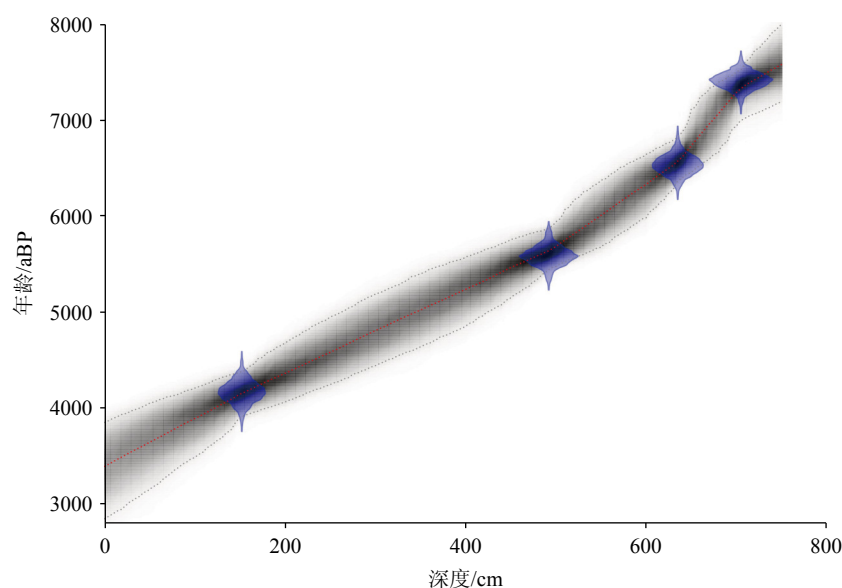


图 2 海南岛 ZK-6 井年龄格架

Fig.2 The age-depth plot of Core ZK-6, Hainan Island

足。含泥质珊瑚碎屑灰沙相(图 4H)生物组分以珊瑚碎屑为主,珊瑚块体破碎,泥质含量为 10%~20%。生物主要包括珊瑚、红藻、底栖有孔虫、腹足。红色泥层(图 4I)整体呈现暗红色,由砂质泥层组成,发育块状构造,未见生物化石。该泥层之上发育珊瑚骨架沉积。

3.3 生物化石类群特征

ZK-6 井主要包含的生物化石有造礁珊瑚、红藻、底栖有孔虫、棘皮、腹足五大类。其中造礁珊瑚为主要生物类型,而其他生物化石含量整体偏低。

3.3.1 珊瑚属

ZK-6 井共发育 7 个珊瑚属和多个未定属。珊瑚属的数量从下往上,呈现出减小-增大-减小的趋势,而破碎程度呈现先增大后降低的趋势(表 2)。其中,以珊瑚骨架形式存在的珊瑚类型包括蜂房珊瑚(*Favia*)、滨珊瑚(*Porites*)、鹿角珊瑚(*Acropora*)、角蜂巢珊瑚(*Favites*)、石芝珊瑚(*Fungia*)、盔形珊瑚(*Galexea*);砂质珊瑚碎屑灰沙中的珊瑚类型包括鹿角珊瑚(*Acropora*)、滨珊瑚(*Porites*)、刺星珊瑚(*Cyphastrea*);含生物砂质珊瑚碎屑灰沙中的珊瑚类型包括鹿角珊瑚(*Acropora*)、盔形珊瑚(*Galexea*)和少量未定属(图 5)。

3.3.2 其他生物

除珊瑚外,还发现了红藻、有孔虫、棘皮和腹足等生物。其中红藻(图 4B)含量最高,主要识别出两个属:石孔藻(*lithoporella*)和似锦藻(*Spongites*)。底栖有孔虫(图 4C)含量次之,识别的属较多,主要有

四类:双盖虫(*Amphistegina*)、小粟虫(miliolid)、异鳞虫(*Heterolepa*)、马刺虫(*Calcarina*)。棘皮(图 4C)只存在于 5~5.4、2.7~2.9、0.4~0.7 m。腹足(图 4C)也只存在于 5.3~5.4、1.5~1.6、0~0.7 m。棘皮与腹足多出现在含砂质珊瑚碎屑灰沙、含泥质珊瑚碎屑灰沙、含生物砂质珊瑚碎屑灰沙之中,且均为破碎状。

4 讨论

4.1 沉积环境

基于岩芯观察和古生物鉴定,ZK-6 井岸礁沉积相主要包括礁坪相与礁后相,其中礁坪相由珊瑚骨架/碎屑灰沙组成,礁后相由含砂质珊瑚碎屑灰沙、含泥质珊瑚碎屑灰沙、含生物砂质珊瑚碎屑灰沙组成(图 3)。珊瑚骨架沉积中的珊瑚呈块状形态,部分珊瑚被打碎呈碎片状,说明沉积环境水动力较强、水深较浅,珊瑚搬运距离极短,整体代表珊瑚礁发育的主体部分,因而属于礁坪相。同时,在薄片观察中发现含有红藻、底栖有孔虫、腹足和双壳等深生物碎屑,但含量极少。含砂质珊瑚碎屑灰沙、含泥质珊瑚碎屑灰沙、含生物砂质珊瑚碎屑灰沙主要由不同含量的生物碎屑与砂泥质(包括石英、长石、岩屑、黏土等)沉积组成。生物碎屑主要为珊瑚碎屑,类型较多,而红藻、底栖有孔虫、腹足和双壳等生物碎屑含量相对较低。含砂质珊瑚碎屑灰沙、含泥质珊瑚碎屑灰沙、含生物砂质珊瑚碎屑灰

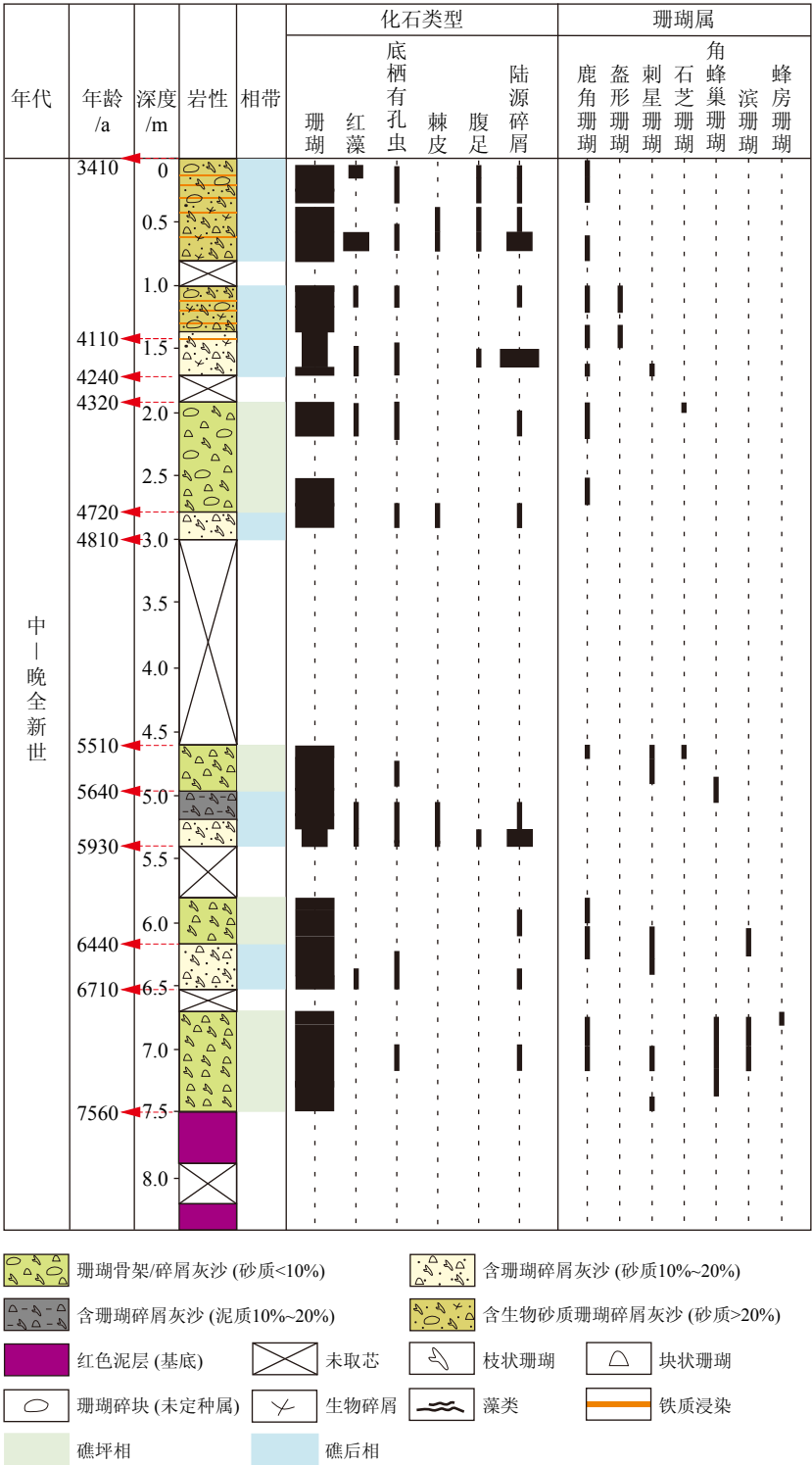


图 3 海南岛 ZK-6 井柱状图

Fig.3 Integrated sedimentary data of core ZK-6 in Hainan Island

沙主要反映了在生物碎屑沉积背景之下混合了少量陆源碎屑沉积, 因此这三种岩性属于礁后相沉积。一方面, 来自岸礁的富珊瑚碎屑在被水流搬运后在研究区发生沉积, 另一方面, 来自岛屿的石英、长石、岩屑、黏土等陆源碎屑在被搬运后在研究区与富珊瑚碎屑发生混合堆积。整体而言, 陆源碎屑

以石英、长石、岩屑为主, 反映了水体整体较浅, 水动力条件较强。

4.2 沉积演化主控因素

4.2.1 海平面变化

前人研究表明, 研究区 7560 aBP 以来构造较为

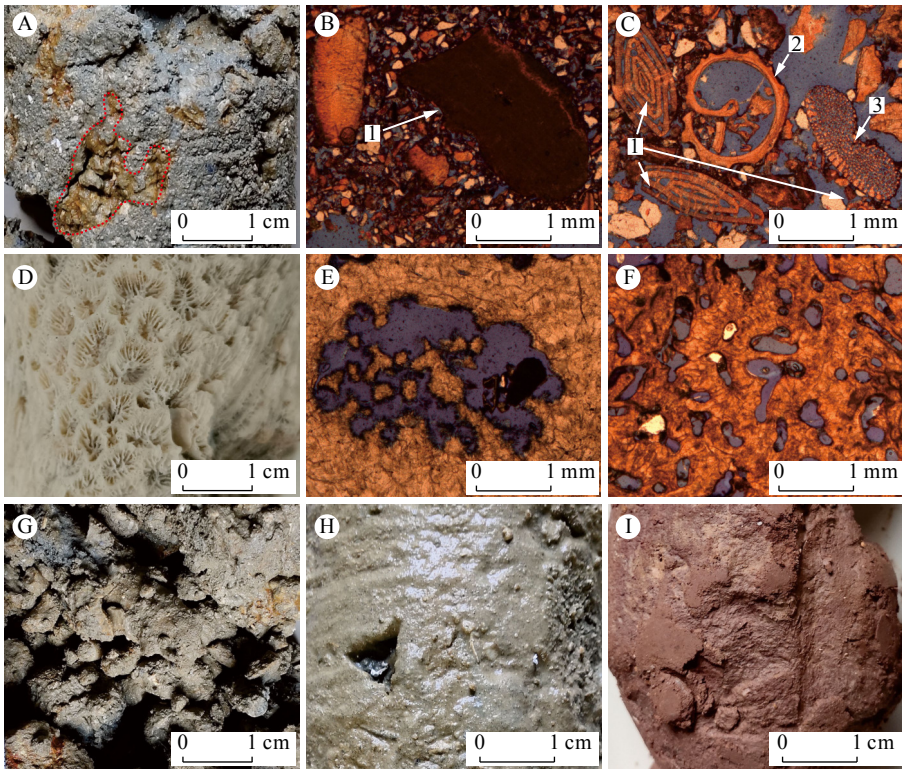


图 4 海南岛 ZK-6 井岩芯古生物及薄片照片

A: 含生物砂质珊瑚碎屑灰沙(砂质>20%), 其中红色虚线区域表示铁质浸染; B: 1 代表红藻; C: 1 代表有孔虫、2 代表腹足、3 代表棘皮; D: 珊瑚骨架/碎屑灰沙(砂质<10%); E: 珊瑚; F: 珊瑚; G: 含珊瑚碎屑灰沙(砂质 10%~20%); H: 含珊瑚碎屑灰沙(泥质 10%~20%); I: 红色泥层。

Fig.4 Pictures of facies and fossils in core and thin sections of core ZK-6 in Hainan Island

A: Coral bioclastic sediments with rich terrigenous sand (sand abundance >20%), and the area circled by red dashed line shows iron stains; B: number 1 points to red algae; C: number 1 points to foraminifera, number 2 points to gastropod, number 3 points to echinoid; D: coral framestone (sand abundance <10%); E: coral framestone; F: coral framestone; G: coral bioclastic sediments with some terrigenous sand (sand abundance 10%~20%); H: coral bioclastic sediments with some terrigenous sand (mud abundance. 10%~20%); I: red mud layer.

表 2 海南岛 ZK-6 井主要珊瑚属

Table 2 Various coral genera from core ZK-6, Hainan Island

深度/m	珊瑚属	破碎程度
0~1.3	鹿角珊瑚、盔形珊瑚、未定属	较高
1.3~1.7	鹿角珊瑚、刺星珊瑚、盔形珊瑚、未定属	高
1.9~3.0	鹿角珊瑚、石芝珊瑚、未定属	高
4.6~5.4	鹿角珊瑚、角蜂巢珊瑚、刺星珊瑚、石芝珊瑚、未定属	较高
5.8~6.2	鹿角珊瑚、滨珊瑚、刺星珊瑚、未定属	较高
6.2~6.5	鹿角珊瑚、滨珊瑚、刺星珊瑚、未定属	较高
6.7~7.5	鹿角珊瑚、蜂房珊瑚、角蜂巢珊瑚、滨珊瑚、刺星珊瑚	较低

稳定,因此研究区水深变化主要受海平面变化所影响。研究区的珊瑚礁发育于 7560 aBP 前,珊瑚主要包括鹿角珊瑚(*Acropora*)、刺星珊瑚(*Cyphastrea*)、滨珊瑚(*Porites*)、角蜂巢珊瑚(*Favites*)、蜂房珊瑚(*Favia*),这些珊瑚主要发育在水深 20 m 以内^[55]。南海北部雷州半岛重建 7560 aBP 以来相对海平面

显示,早期海平面呈现上升趋势(图 6)。在 7560 aBP 左右,随着海平面逐渐上升,海水覆盖研究区,礁坪相开始发育,珊瑚礁随海平面缓慢升高而快速发育。在 6710~6470 aBP 期间,海平面达到相对较高位置,研究区礁坪相一边向上生长发育,一边向外海方向迁移,礁后相随之发育面积增大,从而覆盖

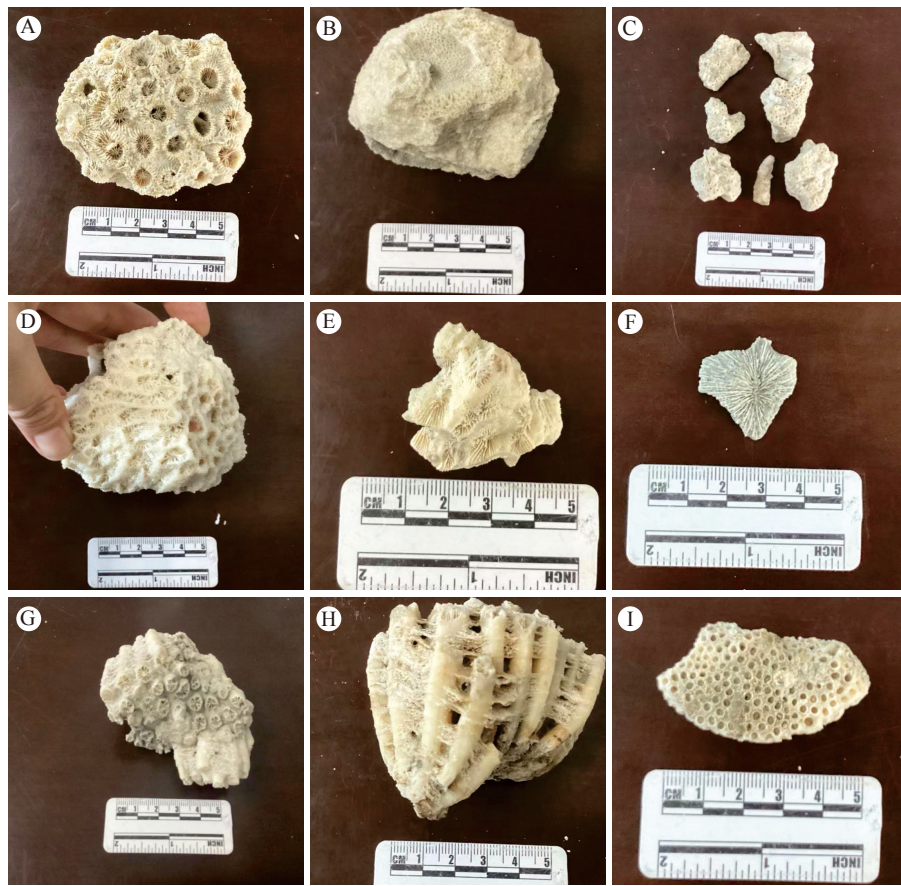


图 5 海南岛 ZK-6 井主要珊瑚类型

A-蜂房珊瑚, B-滨珊瑚, C-鹿角珊瑚, D-角蜂巢珊瑚, E-角蜂巢珊瑚, F-石芝珊瑚, G-盔形珊瑚, H-盔形珊瑚, I-刺星珊瑚。

Fig.5 Pictures of various coral genera from core ZK-6, Hainan Island

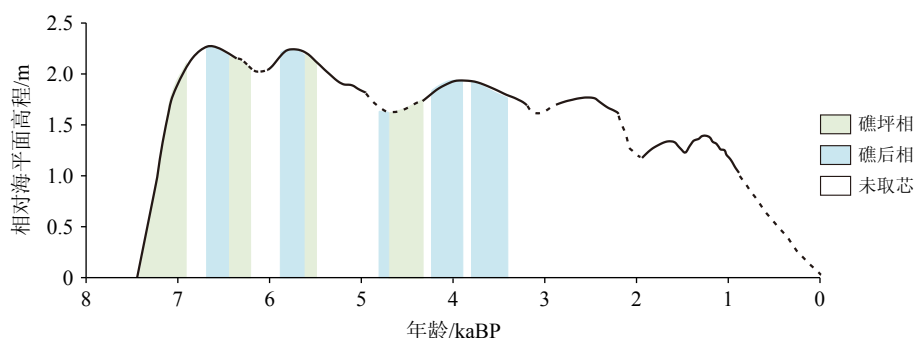
A-*Favia*, B-*Porites*, C-*Acropora*, D-*Favites*, E-*Favites*, F-*Fungia*, G-*Galeaxea*, H-*Galeaxea*, I-*Cyphastrea*.

在早期礁坪相之上(图 6)。在 6470 aBP 之后,海平面逐渐下降至较低位置,礁坪相向陆地方向发生迁移,进而使得研究区礁坪相重新覆盖在礁后相之上。在 6100 aBP 左右,海平面逐渐上升(图 6),礁坪相再次向外海方向迁移。在 6100~5640 aBP 期间,海平面相对较高,研究区主要发育礁后相。在 5640~5510 aBP 期间,海平面逐渐下降,向陆迁移的礁坪相再次在研究区出现。在 4810~4320 aBP 期间,海平面整体相对较低(图 6),研究区以礁坪相为主。在 4320~3410 aBP 期间,海平面又一次上升至相对较高位置。在该阶段内,研究区主要发育礁后相。其中,在 4320~4110 aBP 期间,主要发育含砂质珊瑚碎屑灰沙,而在 4110~3410 aBP 期间,主要发育含生物砂质珊瑚碎屑灰沙。4320~4110 aBP 期间,海平面逐渐上升,而 4110~3410 aBP 期间,海平面逐渐下降,研究区沉积由含砂质珊瑚碎屑灰沙转变为含生物砂质珊瑚碎屑灰沙,表明下降的海平面使得陆源碎屑向海输入增多。此外,值得注意的是,在 4110~3410 aBP 层段岩芯中可见多个暴露

面,表明在这期间珊瑚礁多次因高频海平面的下降而暴露于海面之上,接受大气淋滤。然而,由于缺乏更精细短尺度的海平面变化,目前无法将这些暴露面与海平面准确对应起来。综上,海平面在刚开始上升时,主要以垂向加积为主发育礁坪相。随着海平面的升高,礁坪向外海方向发生进积,导致早期礁坪沉积逐渐被礁后沉积所覆盖。当海平面稳定或开始下降时,珊瑚礁垂向生长空间减小,开始以向陆迁移加积为主,从而在礁后沉积之上发育新的礁坪沉积。基于上述讨论,海南岛东北侧岸礁的发育演化显著受控于海平面变化。

4.2.2 温度变化

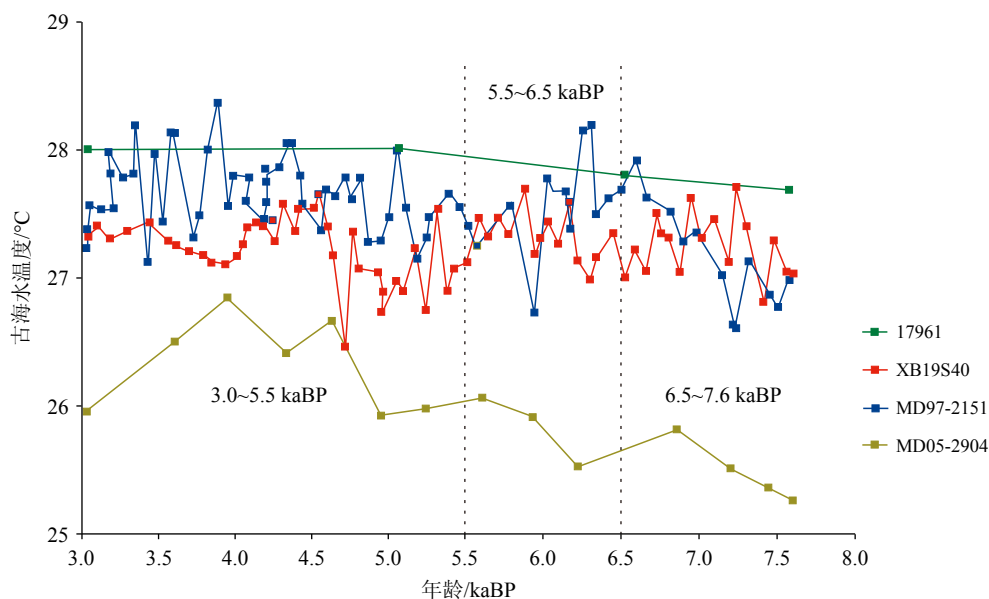
温度对生物的生长发育同样起着重要作用,人们在对珊瑚的长期研究中发现,珊瑚生活的水温范围为 20~36 ℃,最适宜的温度为 25~29 ℃^[57]。本文的研究材料年龄为 7560~3410 aBP。前人研究表明,中全新世(8200~4200 aBP)是全新世大暖期,其温度在全新世中均呈现出较高值^[58-59],所以本文岸礁的生长发育基本处于全新世大暖期。据前

图 6 雷州半岛珊瑚记录之千年尺度的海平面波动^[56]Fig.6 Sea-level fluctuations after 7.5 kaBP recorded in corals in Leizhou Peninsula^[56]

人重建南海不同海域 7600 aBP 以来的古海水温度 (图 7)^[60], 在 7600~3410 aBP 南海古海水温度处于 25~28.5 °C, 整体位于适合珊瑚生长发育的温度范围之内, 所以古海水温度并不是导致本文岸礁沉积相发生变化的主要因素。前人研究表明, 珊瑚沉积速率与古海水温度呈显著正相关^[61-62]。南海不同海域重建的 7600 aBP 以来古水温变化曲线显示, 在 7600~6500、6500~5500、5500~3000 aBP 三个时间范围内, 南海整体古海水温度呈现出逐渐上升的趋势。在 7600~6500 aBP 期间温度较低, 研究区岸礁平均沉积速率为 0.78 mm/a; 6500~5500 aBP 期间温度有所升高, 研究区岸礁平均沉积速率为 1.56 mm/a; 5500~3000 aBP 内温度进一步升高, 平均沉积速率为 2.73 mm/a。海南岛岸礁沉积速率与南海古海水温度变化趋势一致。综上, 在 7600~3000 aBP 古海水温度的升高促进了海南岛岸礁珊瑚沉积速率的增大(图 2)。

4.3 沉积演化过程

7560~3410 aBP, 研究区构造稳定, 温度适宜, 岸礁相带发育主要受海平面变化控制, 岸礁沉积速率也受古海水温度影响。在 7560 aBP 初期, 随着海平面的初步上升, 研究区红色泥质基底被海水覆盖, 由珊瑚骨架/碎屑灰沙组成的礁坪相开始发育。在 6710~6470 aBP 期间, 海平面逐渐上升至较高位置的同时, 促进研究区礁坪相一边向上生长一边向外海方向迁移, 珊瑚碎屑灰沙组成的礁后相发育面积也逐渐增大, 从而覆盖在早期礁坪相之上。该阶段温度整体相对较低, 研究区岸礁沉积速率也相对较低。在 6470~5640 aBP 期间, 海平面整体较高, 古水温也有所升高。其中, 在 6470~6210 aBP 海平面下降期间, 礁坪相向陆地方向发生迁移, 进而使得研究区礁坪相重新覆盖在早期的礁后相之上。陆源碎屑随着海平面的降低而增多, 导致形成礁坪

图 7 南海多站点 8.0~3.0 kaBP 古海水温度变化^[60]Fig.7 Variations in paleo-sea surface temperature from 8.0 to 3.0 kaBP recorded in the South China Sea^[60]

相的岩性由含砂质珊瑚碎屑灰沙向含生物砂质珊瑚碎屑灰沙转变。在 6210~5640 aBP 海平面上升期间,礁坪相再次向海发生迁移,研究区以礁后相为主。在 6470~5640 aBP 期间升高的温度使得研究区岸礁沉积速率整体有所增大。此后,在 5640~3410 aBP 期间,海平面整体偏低,温度进一步上升。其中,研究区相带随着海平面的升降重复着上述变化。虽然岩性受不同时期石英、长石、岩屑、黏土等陆源碎屑含量影响而发生改变,但研究区主体沉积相依然表现为在高海平面时期主要发育礁后相,在低海平面时期主要发育礁坪相。该阶段古海水温度整体较高,研究区岸礁沉积速率进一步增大。

5 结论

利用海南岛文昌市长圪港 ZK-6 井所取得的岩芯,通过 AMS¹⁴C 定年、镜下岩芯薄片鉴定等方法,对研究区沉积特征(包括岩性相和生物组分)进行了精细刻画,建立了研究区中晚全新世沉积演化序列,并对其发育演化的控制因素进行了探讨。

(1)岩芯可以分为 5 种岩性相和两个沉积相。岩性相包括:珊瑚骨架/碎屑灰沙相、含砂质珊瑚碎屑灰沙相、含泥质珊瑚碎屑灰沙相、含生物砂质珊瑚碎屑灰沙相、红色泥层基底相。其中,珊瑚骨架/碎屑灰沙组成了礁坪相,含砂质珊瑚碎屑灰沙、含泥质珊瑚碎屑灰沙、含生物砂质珊瑚碎屑灰沙组成了礁后相。

(2)研究区内岸礁发育于 7560~3410 aBP,礁坪相与礁后相多次交替出现。从海平面变化和古海水温度两个角度对岸礁的发育演化进行了分析和探讨,发现海平面变化控制了岸礁的相带发育,在海平面较高时发育礁后相,而在海平面较低时发育礁坪相,海平面变化是岸礁沉积相带发生变化的主要因素;岸礁主要发育于全新世大暖期,古海水温度适合岸礁生长发育。古海水温度对岸礁的影响主要体现在岸礁沉积速率上,表现为古海水温度的升高会促进岸礁沉积速率的增大。

致谢: 感谢中山大学姚思怡对年代框架建立所提供的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Darwin C. The Structure and Distribution of Coral Reefs[M]. Berkeley: University of California Press, 1976.
- [2] Kennedy D M, Woodroffe C D. Fringing reef growth and morphology: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57(3-4): 255-277.
- [3] Smithers S. Fringing reefs[M]//Hopley D. Encyclopedia of Modern Coral Reefs. Dordrecht: Springer, 2011: 430-446.
- [4] Tomascik T, Mah A J, Nontji A, et al. The Ecology of the Indonesian Seas[M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [5] Hartman G, Niemi T M, Ben-Avraham Z, et al. Distinct relict fringing reefs in the northern shelf of the Gulf of Elat/Aqaba: markers of Quaternary eustatic and climatic episodes[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(2): 516-540.
- [6] Montaggioni L E. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: development patterns and controlling factors[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 71(1-2): 1-75.
- [7] Salas-Saavedra M, Webb G E, Sanborn K L, et al. Holocene microbialite geochemistry records > 6000 years of secular influence of terrigenous flux on water quality for the southern Great Barrier Reef[J]. *Chemical Geology*, 2022, 604: 120871.
- [8] Elliff C I, Silva I R. Coral reefs as the first line of defense: shoreline protection in face of climate change[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 127: 148-154.
- [9] Zhao M X, Zhang H Y, Zhong Y, et al. The status of coral reefs and its importance for coastal protection: a case study of northeastern Hainan Island, South China Sea[J]. *Sustainability*, 2019, 11(16): 4354.
- [10] Ferrario F, Beck M W, Storlazzi C D, et al. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3794.
- [11] Liu M Y, Li C, Zhang F, et al. A persistent increase in primary productivity east off Hainan Island (northwestern South China Sea) over the last decades as inferred from sediment records[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 158: 111428.
- [12] Smithers S G, Hopley D, Parnell K E. Fringing and nearshore coral reefs of the great barrier reef: episodic Holocene development and future prospects[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(1): 175-187.
- [13] Johnson J A, Perry C T, Smithers S G, et al. Palaeoecological records of coral community development on a turbid, nearshore reef complex: baselines for assessing ecological change[J]. *Coral Reefs*, 2017, 36(3): 685-700.
- [14] Woodroffe C D, Linklater M, Brooke B P, et al. Reef growth and carbonate sedimentation at the southernmost Pacific reefs[J]. *Marine Geology*, 2023, 459: 107033.
- [15] Leonard N D, Lepore M L, Zhao J X, et al. Re-evaluating mid-Holocene reef "turn-off" on the inshore Southern Great Barrier Reef[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 244: 106518.
- [16] Ryan E J, Smithers S G, Lewis S E, et al. Chronostratigraphy of Bramston Reef reveals a long-term record of fringing reef growth under muddy conditions in the central Great Barrier Reef[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 441: 734-747.
- [17] Perry C T, Smithers S G, Gulliver P. Rapid vertical accretion on a 'young' shore-detached turbid zone reef: offshore Paluma Shoals, central Great Barrier Reef, Australia[J]. *Coral Reefs*, 2013, 32(4): 1143-1148.
- [18] Solihuddin T, O'Leary M J, Blakeway D, et al. Holocene reef evolu-

- tion in a macrotidal setting: buccaneer Archipelago, Kimberley Bioregion, Northwest Australia[J]. *Coral Reefs*, 2016, 35(3): 783-794.
- [19] Sanborn K L, Webster J M, Webb G E, et al. A new model of Holocene reef initiation and growth in response to sea-level rise on the Southern Great Barrier Reef[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 397: 105556.
- [20] Lewis S E, Wüst R A J, Webster J M, et al. Development of an inshore fringing coral reef using textural, compositional and stratigraphic data from Magnetic Island, Great Barrier Reef, Australia[J]. *Marine Geology*, 2012, 299-302: 18-32.
- [21] Ryan E J, Smithers S G, Lewis S E, et al. Fringing reef growth over a shallow last interglacial reef foundation at a mid-shelf high island: holbourne Island, central Great Barrier Reef[J]. *Marine Geology*, 2018, 398: 137-150.
- [22] Palmer S E, Perry C T, Smithers S G, et al. Internal structure and accretionary history of a nearshore, turbid-zone coral reef: paluma Shoals, central Great Barrier Reef, Australia[J]. *Marine Geology*, 2010, 276(1-4): 14-29.
- [23] Cabioch G, Montaggioni L F, Faure G. Holocene initiation and development of New Caledonian fringing reefs, SW Pacific[J]. *Coral Reefs*, 1995, 14(3): 131-140.
- [24] Roff G, Zhao J X, Pandolfi J M. Rapid accretion of inshore reef slopes from the central Great Barrier Reef during the late Holocene[J]. *Geology*, 2015, 43(4): 343-346.
- [25] Ryan E J, Smithers S G, Lewis S E, et al. The influence of sea level and cyclones on Holocene reef flat development: middle Island, central Great Barrier Reef[J]. *Coral Reefs*, 2016, 35(3): 805-818.
- [26] Ryan E J, Smithers S G, Lewis S E, et al. The variable influences of sea level, sedimentation and exposure on Holocene reef development over a cross-shelf transect, central Great Barrier Reef[J]. *Diversity*, 2018, 10(4): 110.
- [27] Twigg E J, Collins L B. Development and demise of a fringing coral reef during Holocene environmental change, eastern Ningaloo Reef, Western Australia[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1-4): 20-36.
- [28] 邵超. 海滩—珊瑚礁海岸侵蚀及适应性管理研究 [D]. 国家海洋局第三海洋研究所硕士学位论文, 2016. [SHAO Chao. Study on coastal erosion of beach-coral system and its adaptive management[D]. Master Dissertation of Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016.]
- [29] 张明书, 刘健, 李浩, 等. 海南岛周缘珊瑚礁的基本特征和成礁时代 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(2): 25-43. [ZHANG Mingshu, LIU Jian, LI Hao, et al. Basic characteristics and formation time of peripheral coral reefs in Hainan Island[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(2): 25-43.]
- [30] 黄德银, 施祺, 张叶春, 等. 海南岛鹿回头造礁珊瑚的¹⁴C 年代及珊瑚礁的发育演化 [J]. 海洋通报, 2004, 23(6): 31-37. [HUANG Deyin, SHI Qi, ZHANG Yechun, et al. The ¹⁴C ages and evolvement of coral reef in Luhuitou Peninsula, Hainan Island[J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(6): 31-37.]
- [31] 吴钟解, 陈石泉, 陈敏, 等. 海南岛造礁石珊瑚资源初步调查与分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2013(2): 44-50. [WU Zhongjie, CHEN Shiquan, CHEN Min, et al. Preliminary survey and analysis of the resources of hermatypic corals in Hainan Island[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(2): 44-50.]
- [32] 黄德银, 施祺, 张叶春. 海南岛鹿回头珊瑚礁与全新世高海平面 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4): 1-7. [HUANG Deyin, SHI Qi, ZHANG Yechun. The coral reef and high sea level in Luhuitou, Hainan Island during Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 1-7.]
- [33] 颜廷礼. 海南潭门镇珊瑚岸礁的轴系年代及其对全新世海平面变化的记录 [D]. 广西大学硕士学位论文, 2022. [YAN Tingli. Records of sea level changes over the Mid-holocene from U-series ages of shore reefs in Tanmen, Hainan Island[D]. Master Dissertation of Guangxi University, 2022.]
- [34] 吕炳全, 王红罡, 大场忠道, 等. 海南岛沙老岸礁区滨珊瑚氧、碳同位素对气候的记录 [J]. 地球化学, 2002, 31(4): 315-320. [LÜ Bingquan, WANG Honggang, Oba T, et al. Monsoon climatic record of oxygen and carbon isotopic data from *Porites lutea* in Shalao fringing reef, Hainan Island[J]. *Geochimica*, 2002, 31(4): 315-320.]
- [35] 李悦儿. 海南岛滨珊瑚对全新世海表温度及其季节性和年际变化的记录 [D]. 广西大学硕士学位论文, 2024. [LI Yue'er. *Porites* coral records of the middle Holocene sea surface temperature and its seasonal and interannual variations from Hainan Island[D]. Master Dissertation of Guangxi University, 2024.]
- [36] 吕炳全, 王国忠, 全松青. 海南岛珊瑚岸礁的特征 [J]. 地理研究, 1984, 3(3): 1-16. [LÜ Bingquan, WANG Guozhong, QUAN Songqing. The characteristics of fringing reefs of Hainan Island[J]. *Geographical Research*, 1984, 3(3): 1-16.]
- [37] 陈世敢, 滕骏华. 海南岛清澜港口及其东侧沿岸珊瑚岸礁分布航空遥感初探 [J]. 台湾海峡, 1996, 15(1): 75-80. [CHEN Shigan, TENG Junhua. Preliminary study of distribution of fringing reef at Qinglan Bay and eastern coast, Hainan Island[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1996, 15(1): 75-80.]
- [38] 施祺, 赵美霞, 黄玲英, 等. 三亚鹿回头岸礁区人类活动及其对珊瑚礁的影响 [J]. 热带地理, 2010, 30(5): 486-490, 509. [SHI Qi, ZHAO Meixia, HUANG Lingying, et al. Human activities and impacts on coral reef at the Luhuitou fringing reef, Sanya[J]. *Tropical Geography*, 2010, 30(5): 486-490, 509.]
- [39] 廖芝衡. 南海珊瑚群落和底栖海藻的空间分布特征及其生态影响 [D]. 广西大学博士学位论文, 2021. [LIAO Zhiheng. Spatial distribution of coral community and benthic algae and their ecological impacts across the South China sea[D]. Doctor Dissertation of Guangxi University, 2021.]
- [40] 李秀保, 王爱民, 刘胜, 等. 海南岛珊瑚礁的保护与修复 [C]//第三届现代海洋(淡水)牧场学术研讨会摘要集. 海口: 中国水产学会, 2019. [LI Xiubao, WANG Aimin, LIU Sheng, et al. Protection and restoration of coral reef in Hainan Island[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Modern Marine & Freshwater Ranching. Haikou: China Society of Fisheries, 2019.]
- [41] 何金宝. 近 30 年海南岛岸线时空变迁与分析预测 [D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2020. [HE Jinbao. Spatial-temporal changes and analysis of the coastline of Hainan Island in the past 30 years[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2020.]

- [42] 李献华, 周汉文, 丁式江, 等. 海南岛“邦溪-晨星蛇绿岩片”的时代及其构造意义: Sm-Nd 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 425-432. [LI Xianhua, ZHOU Hanwen, DING Shijiang, et al. Sm-Nd isotopic constraints on the age of the Bangxi-Chenxing ophiolite in Hainan Island: implications for the tectonic evolution of eastern Paleotethys[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(3): 425-432.]
- [43] 高抒, 周亮, 李高聪, 等. 海南岛全新世海岸演化过程与沉积记录 [J]. 第四纪研究, 2016, 36(1): 1-17. [GAO Shu, ZHOU Liang, LI Gaocong, et al. Processes and sedimentary records for Holocene coastal environmental changes, Hainan Island: an overview[J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(1): 1-17.]
- [44] 刘瑞华, 张仲英. 海南岛的新构造运动特征 [J]. 热带地理, 1989, 9(2): 174-182. [LIU Ruihua, ZHANG Zhongying. Characteristics of neotectonic movement in Hainan Island[J]. Tropical Geography, 1989, 9(2): 174-182.]
- [45] 张军龙, 田勤俭, 李峰, 等. 海南岛西北部新构造特征及其演化研究 [J]. 地震, 2008, 28(3): 85-94. [ZHANG Junlong, TIAN Qinjian, LI Feng, et al. Study on neotectonic characteristics and its evolution in northwestern Hainan Island[J]. Earthquake, 2008, 28(3): 85-94.]
- [46] 徐晓枫, 王惠琳, 胡久常, 等. 铺前-清澜断裂带附近地震的重定位及其构造意义的初步分析 [J]. 华南地震, 2017, 37(2): 10-16. [XU Xiaofeng, WANG Huilin, HU Jiuchang, et al. Relocation of earthquakes near the Puqian-Qinglan fault and preliminary analysis of tectonic significance[J]. South China Journal of Seismology, 2017, 37(2): 10-16.]
- [47] 王颖. 海南岛海岸环境特征 [J]. 海洋地质动态, 2002, 18(3): 1-9. [WANG Ying. Features of Hainan Island coastal environment[J]. Marine Geology Letters, 2002, 18(3): 1-9.]
- [48] 丘世钧. 海南岛珊瑚礁海岸地貌 [J]. 热带地貌, 1985, 6(1): 1-24. [QIU Shijun. Geomorphic development of coral reef of Hainan Island[J]. Tropical Geomorphology, 1985, 6(1): 1-24.]
- [49] 杨晨. 文昌市云龙湾沿岸造礁石珊瑚生物多样性调查及眼斑双锯鱼的人工繁育 [D]. 海南大学硕士学位论文, 2012. [YANG Chen. Diversity of coral species along the Yunlong bay, Wenchang city and Artificial breeding of *amphiprion ocellaris*[D]. Master Dissertation of Hainan University, 2012.]
- [50] 周红英, 姚雪梅, 黎李, 等. 海南岛周边海域造礁石珊瑚的群落结构及其分布 [J]. 生物多样性, 2017, 25(10): 1123-1130. [ZHOU Hongying, YAO Xuemei, LI Li, et al. Scleractinian coral community structure and distribution in the coastal waters surrounding Hainan Island[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(10): 1123-1130.]
- [51] Douka K, Hedges R E M, Higham T F G. Improved AMS ^{14}C dating of shell carbonates using high-precision X-ray diffraction and a novel density separation protocol (CarDS)[J]. Radiocarbon, 2010, 52(2): 735-751.
- [52] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. Radiocarbon, 2002, 44(1): 167-180.
- [53] 赵晋军. 西沙七连屿海鸟遗迹 ^{14}C 年代模型及生态意义 [D]. 合肥工业大学硕士学位论文, 2018. [ZHAO Jinjun. Age models of seabird remains from the Qilian Yu in the Xisha Archipelago and its ecological implications[D]. Master Dissertation of Hefei University of Technology, 2018.]
- [54] Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences[J]. Quaternary Geochronology, 2010, 5(5): 512-518.
- [55] Zweifler (Zvifler) A, O'Leary M, Morgan K, et al. Turbid coral reefs: past, present and future: a review[J]. Diversity, 2021, 13(6): 251.
- [56] Yu K F. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(8): 1217-1229.
- [57] 余克服. 珊瑚礁科学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2018. [YU Kefu. Introduction to the Science of Coral Reefs[M]. Beijing: Science Press, 2018.]
- [58] 施雅风, 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, 1992(12): 1300-1308. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin. Major events of the climate variations during the megathermal of Holocene in China[J]. Science in China (Series B), 1992(12): 1300-1308.]
- [59] Demenocal P, Ortiz J, Guilderson T, et al. Coherent high- and low-latitude climate variability during the Holocene warm period[J]. Science, 2000, 288(5474): 2198-2202.
- [60] Yang J W, Peng S Y, Xu J L, et al. A multiproxy reconstruction of Asian winter monsoon variability since the last glacial from southeast offshore Hainan Island, South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2024, 263: 106030.
- [61] 李悦儿, 余克服, 颜廷礼, 等. 中全新世海南潭门滨珊瑚的生长率特征及其气候意义 [J]. 热带地理, 2023, 43(10): 1843-1855. [LI Yue'er, YU Kefu, YAN Tingli, et al. Growth rate of Porites corals from Tanmen, Hainan Island: climatic significance during mid-Holocene[J]. Tropical Geography, 2023, 43(10): 1843-1855.]
- [62] 江巧文, 曹志敏, 王道儒, 等. 琼东海域橙黄滨珊瑚骨骼生长特性及其主要影响因素 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 953-962. [JIANG Qiaowen, CAO Zhimin, WANG Daoru, et al. Growth characteristics of Porites lutea skeleton in east sea area of Hainan Island, China and main affecting environmental factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 953-962.]