

南海北部滨珊瑚微环礁的海平面指示意义及其反映的中全新世海平面历史

乐远福^{1*}, 赵毅恒¹, 唐立超², 张博¹, 熊海仙^{3*}, 张雅泽⁴

1. 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 珊瑚礁研究中心, 广西大学海洋学院, 南宁 530004

2. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093

3. 中山大学海洋学院, 珠海 519082

4. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 510070

摘要:南海北部雷琼海岸的珊瑚礁是研究古海平面变化的关键载体。但由于重建标准不统一, 相关数据存在显著时空差异性。本研究通过对海南岛东部珊瑚礁区 27 块现代滨珊瑚微环礁的顶面高程进行实地测量, 精确量化其海平面指示意义; 同时重新校正 65 个已发表的海平面标志点数据, 重建该区域海平面变化历史。研究表明, 这些顶部死亡但整体存活的现代滨珊瑚已达到生长上限, 其顶面高程位于清澜港平均潮位以下 146.09 cm, 最低低潮位以下 15.09 cm, 且生长上限高差仅 ± 8.35 cm, 呈现典型的滨珊瑚微环礁发育形态, 证实其生长主要受最低低潮位控制, 是理想的海平面标志物。海平面重建结果显示, 在 6143 ± 34 cal a BP 至 3013 ± 9 cal a BP 期间, 南海北部相对海平面呈波动下降趋势, 变化范围为 25 ± 9.8 cm 至 136.09 ± 9.8 cm。与周边地区海平面记录对比发现, 中全新世高海平面的出现时间和高度存在差异, 这可能与标志物的高程估算方法及测年技术差异有关。此外, 将研究结果和 GIA 模型(ICE-6G_HetML14)预测结果对比显示, 雷琼海岸 3 个地点的中晚全新世海平面数据均低于模型预测曲线, 表明该区域过去几千年可能经历构造沉降过程。本研究结果为预测南海北部未来海平面变化趋势提供重要科学依据, 也为区域构造演化研究提供新视角。

关键词: 南海北部; 中全新世; 相对海平面; 滨珊瑚(微环礁); 海平面指示意义; 构造沉降
中图分类号: P731 **收稿日期:** 2025-02-11

The sea-level indicative meaning of *Porites* microatolls and its application to mid-Holocene sea-level reconstructions in the northern South China Sea

Yuanfu Yue^{1*}, Yiheng Zhao¹, Lichao Tang², Bo Zhang¹, Haixian Xiong^{3*}, Yaze Zhang⁴

资助项目: 国家自然科学基金(42366002); 广西自然科学基金(2025GXNSFAA069160); 国家重点研发计划项目(2017YFA0603300); 自治区级大学生创新创业训练计划项目(S202410593449)。

作者简介: 乐远福(1982—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事全球变化与环境演变研究工作. ORCID: 0000-0002-5248-0056. Email: yuanfu.yue@gxu.edu.cn

通讯作者: 乐远福, Email: yuanfu.yue@gxu.edu.cn; 熊海仙, 博士, 副教授, Email: xionghx5@mail.sysu.edu.cn

1. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, School of Marine Sciences, Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004, China
2. Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China
3. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
4. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

Abstract:

The coral reefs along the Leiqiong Coast in the northern part of the South China Sea are key indicators for studying paleo-sea level changes. However, due to the lack of unified standards, significant spatiotemporal discrepancies exist in coral-derived sea-level data. In this study, through field measurements of the top surface elevation of 27 modern *Porites* microatolls in the coral reef area of eastern Hainan Island, the sea level indicative meaning of *Porites* microatolls was first precisely quantified. Meanwhile, 65 published sea-level index proxies based on U-Th dated fossil *Porites* (microatoll) corals from the region were systematically recalibrated and integrated to reconstruct a more accurate and reliable sea-level change history during the Middle Holocene in the northern South China Sea. The research reveals that those modern *Porites* colonies with dead upper surfaces but intact overall viability have reached their growth limits. Their top elevation lie 146.09 cm below the mean tide level of Qinglan Port and 15.09 cm below the lowest low water, and the height differences of the growth limit is only ± 8.35 cm, representing a typical developmental pattern of *Porites* microatolls. It is confirmed that their growth limits are primarily controlled by the lowest low tide level, and they are ideal indicators for reconstructing past sea levels. Sea level reconstruction results indicate that the relative sea level in the northern South China Sea exhibited a fluctuating downward trend from 6143 ± 34 cal a BP to 3013 ± 9 cal a BP, ranging from 25 ± 9.8 cm to 136.09 ± 9.8 cm. Comparison with sea level records from surrounding South China Sea regions reveals spatiotemporal variations in the timing and magnitude of mid-Holocene high sea-level, which may be attributable to differences in indicator elevation estimation methods and dating techniques. In addition, a comparison of the research results with the sea level predicted by the GIA model (ICE-6G_HetML14), reveals that the mid- and late-Holocene sea-level data at three locations along the Leiqiong coast are all below the model curve. This indicates that these regions may have undergone tectonic subsidence over the past several thousand years. The results of this study offer an important

scientific basis for predicting the future sea-level change trend in the northern South China Sea, and provide a new perspective on regional tectonic evolution studies.

Keywords: Northern South China Sea; middle Holocene; relative sea level, *Porites* coral/microatoll; indicative meaning; tectonic subsidence

1、引言

研究过去海平面变化的关键在于识别具有明确指示意义的海平面标志物（王绍鸿, 1989; 聂宝符, 1996; Yue et al., 2024），并对其高程和年代进行精确测定（Yue et al., 2024）。海平面标志物的指示意义体现为其与特征潮汐水位/海平面之间可量化的高程关系（Yue et al., 2024）。高质量的标志物需具备几个关键特征：形成或分布于相对狭窄的垂直区间内，具备可重复测量的精确高程和年代数据，且在地质记录中保存状态良好。基于上述标准，海平面标志物可划分为两大类：生物标志物（如硅藻、有孔虫、珊瑚/珊瑚礁等）和沉积与地貌标志物（如海滩岩、盐沼泥类、泥炭等）（王绍鸿, 1989）。

近年来，众多学者基于珊瑚(礁)、海滩岩、有孔虫、硅藻、盐沼、泥炭等典型海平面标志物，对南海北部全新世海平面历史开展了广泛研究，积累了丰富的海平面记录（聂宝符, 1996; Zhao and Yu, 2002; Zong, 2004; 时小军等, 2008; Yu et al., 2009; Yao et al., 2013; 唐立超和乐远福, 2023; 乐远福和唐立超, 2023）。然而，对现有成果的深入分析表明，利用不同海平面标志物重建的南海北部全新世同期海平面高程存在显著差异。例如，U-Th 定年的珊瑚礁记录显示中晚全新世海平面高于现代（时小军等, 2008; Yu et al., 2009），而基于 ^{14}C 定年的其他海平面标志物（如盐沼、泥炭等）重建的中全新世海平面却未显示高海平面（Zong, 2004）。这一矛盾引发了关于南海北部是否存在中全新世高海平面的学术争议，表明该区域海平面历史研究的共识缺失。此外，研究表明，不同海平面标志物或方法反演的海平面曲线存在显著差异和不确定性，甚至在部分场景下缺乏可比性（乐远福和唐立超, 2023）。显然，若无法实现海平面标志物的精确识别、指示意义的明确界定以及多源数据的有效同化，将难以获得准确可靠的海平面曲线（乐远福等, 2022; Yue et al., 2024）。因此，在典型海区（如南海北部，图 1），选择指示意义明确的海平面标志物并结合高精度测年技术，是重建连续、高分辨率海平面变化序列的必要途径。

南海北部作为全球变化的敏感区域，也是全球海平面研究的关键地带，全新世以来发育了丰富的海平面标志物，尤其在雷州半岛和海南岛沿海珊瑚礁区（图 1）。珊瑚礁的发育严格受海平面制约，被认为反映过去古海平面的重要标志（聂宝符, 1996）。造礁珊瑚中的滨珊瑚，

尤其是滨珊瑚微环礁，因具有清晰可辨的年生长纹层和持续的生长时间，且对铀—钍（Uranium–thorium, U-Th）测年方法具有良好的适用性（Bard et al., 1993; Zhao and Yu, 2002），被认为是理想的海平面标志物（Yue et al., 2024）。

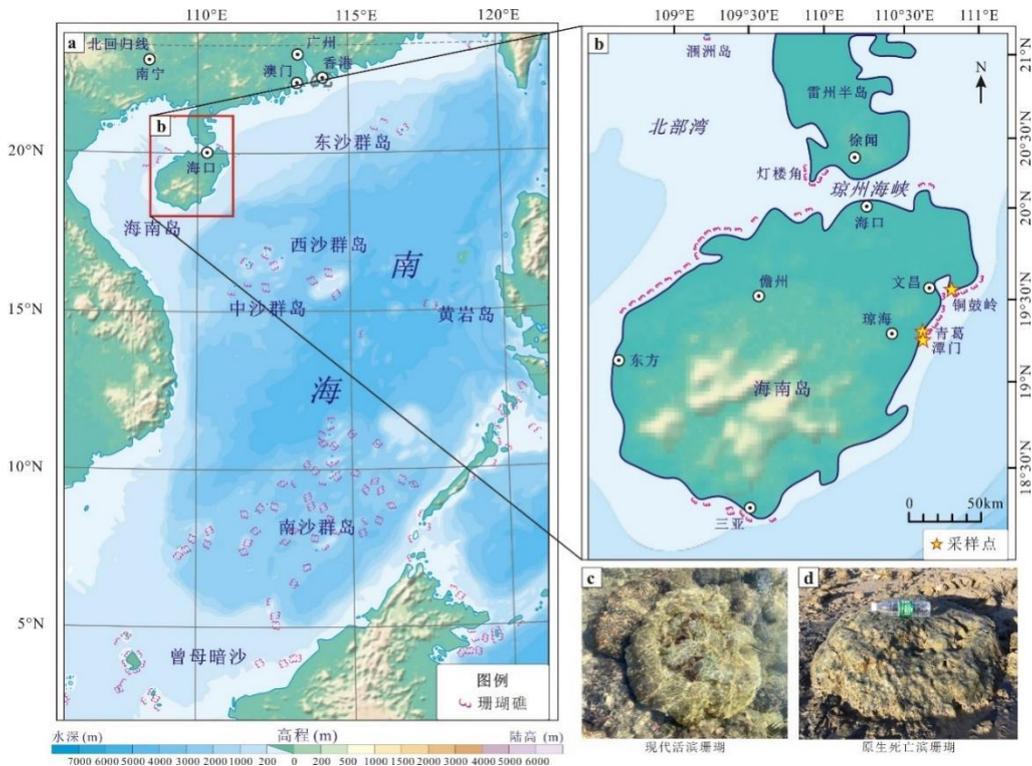


图 1 南海地理位置图 (a) 以及南海北部雷琼地区现代珊瑚礁空间分布 (b)，前期在海南岛东部沿海多个地点开展野外踏勘和滨珊瑚采样的地点 (b)，野外发现的现代 (c) 及化石滨珊瑚 (d)。

Figure 1 Geographical location map of the South China Sea (a), spatial distribution of modern coral reefs in Leiqiong area in the north of the South China Sea (b), and field survey and coral sampling sites along the east coast of Hainan Island (b), modern (c) and fossil *Porites* corals (d) found in the field.

当前，基于珊瑚礁的海平面变化研究主要依赖礁坪上出露海面的大型块状原生滨珊瑚（微环礁）的年代学与高程测量数据（聂宝符, 1996; Zhao and Yu, 2002; 时小军等, 2008; Yu et al., 2009; Yao et al., 2013; Hallmann et al., 2018; 乐远福和唐立超, 2023; Yue et al., 2024; Yan et al., 2024）。由滨珊瑚（微环礁）等大型块状珊瑚构成的礁顶面会随着海平面的变化而调整生长状态，呈现向上生长与侧向生长的双重趋势（Yu et al., 2009; 乐远福和唐立超, 2023）。关于滨珊瑚（微环礁）的生长上限的界定，传统研究认为其最高生长上限通常不超过大潮低潮面，多数情况下位于大潮低潮面以下约 1 米的位置（聂宝符, 1996 余克服等, 2002; 颜廷礼, 2022）。

但部分学者以平均低低潮面作为滨珊瑚的生长上限开展海平面重建(例如, Yao et al., 2013)。此外, 还有研究通过现代活滨珊瑚(微环礁)的顶面高程来进行相对海平面的重建(例如, 时小军等, 2008; Yu et al., 2009), 或依据化石滨珊瑚(微环礁)的高程变化来重建特定时段的海平面波动历史(Yan et al., 2024)。

可见, 目前对于对南海北部广泛分布的滨珊瑚(微环礁)与现代海平面之间的定量关系仍存在较大的不确定性。一方面, 不同研究采用的计算方法存在差异; 另一方面, 测年技术的多样性, 部分年代区间的数据库缺失, 以及多数海平面重建缺乏区域构造校正。这些因素导致基于滨珊瑚(微环礁)重建的中全新世同期海平面结果差异显著, 加剧了判断中全新世是否存在高海平面的学术争议。例如, 有学者质疑出露的化石滨珊瑚究竟是高海平面的产物, 还是构造抬升的结果(Yao et al., 2013)。这表明, 当前对滨珊瑚(微环礁)与海平面之间关系的探究仍处于半定量阶段, 对作为海平面标志物的滨珊瑚(微环礁)的顶面高程与现代海平面的对应关系及潮位指示范围尚未明确界定。因此, 亟需针对南海北部滨珊瑚(微环礁)开展高精度测量, 精确量化其顶面高程与现代海平面之间的关系以及潮位指示范围, 并基于“将今论古”原则, 高质量重建过去海平面历史。

在此背景下, 本研究对海南岛东部沿海已经达到生长上限的 27 块现代活滨珊瑚微环礁顶面高程开展测量, 通过精确量化其与海平面的关系, 建立海平面计算公式, 验证滨珊瑚微环礁作为海平面标志物的可靠性。然后, 以研究区礁坪上出露海面的大型块状原生化石滨珊瑚和滨珊瑚微环礁为研究对象, 通过高程测量和 U-Th 定年, 为南海北部提供新的可靠的海平面数据。同时, 收集该区域已有的滨珊瑚(微环礁)海平面数据并进行系统性校正, 集成新老数据以重建研究区中全新世的海平面变化历史, 进一步讨论了海平面变化与构造运动的关系。

2、研究区域

南海是我国近海中面积最大的海域(图 1a)。通过巴士海峡、苏禄海以及马六甲海峡等关键水道连接太平洋与印度洋。这一地理位置不仅赋予了南海独特的战略意义, 也使其拥有丰富的海洋资源和生物多样性。作为远场区域, 南海北部沿海低纬度地区(如北部湾中部海域涠洲岛, 雷州半岛和海南岛等), 自全新世以来气候与环境与构造相对稳定, 为珊瑚礁和海滩岩等海平面标志物的发育提供了理想的环境。尤其是雷州半岛和海南岛沿海地区(图 1b), 珊瑚礁以岸边基岩为附着基底大面积发育, 构成南海北缘和世界珊瑚礁重要的分布带。这些广泛分布的海平面标志物为研究过去海平面变化提供了宝贵的物质基础。

在海洋地质与珊瑚礁研究领域, 大型块状滨珊瑚的礁顶面与海平面升降的动态关系一直是研究重点。理论上, 大型块状滨珊瑚构成的礁顶面会随着海平面的升降变化而变化。当海平面稳定时, 大型块状滨珊瑚生长至接近其生长上限后转为横向扩展, 形成相对平坦的礁

顶面。若海平面下降，珊瑚的生长上限亦随之降低，顶部因暴露于空气中而死亡，滨珊瑚在较低位置继续横向生长，围绕死亡顶面形成环带状新礁顶面。当海平面上升时，滨珊瑚持续向上及侧向生长，沿礁体边缘向上延伸，在原礁顶形成突起环带，直至达到新的生长上限并形成新的礁顶面。这种生长机制使得多数微环礁（microatoll）由顶部死亡但保持侧向生长的环带状大型块状原位珊瑚演化而来。其中，由滨珊瑚发育成的滨珊瑚微环礁尤为典型。类似的现象在印度洋 Cocos 群岛珊瑚礁区（Smithers and Woodroffe, 2000）、南纬 3 珊瑚礁区（Natawidjaja et al., 2004）、海南岛青葛（时小军等, 2008）以及雷州半岛徐闻灯楼角（Yu et al., 2009）均有报道。这些区域的滨珊瑚微环礁，就是顶面已死亡但仍保持侧向生长呈环带状的滨珊瑚，个体顶面高程变化范围为 2.0-8.5 cm (2σ)，最低误差 <3 cm。上述研究表明，同一珊瑚礁区由滨珊瑚（微环礁）等造礁珊瑚构成的礁顶面严格受海平面控制，因而被视为是热带区域高精度海平面标志物（Smithers and Woodroffe, 2000; Yu et al., 2009），由这类珊瑚礁顶面构成的礁坪面也亦成为推断古海平面的关键证据，为研究地质历史时期海平面变化提供重要线索。

此外，南海作为西太平洋面积最大的边缘海，是太平洋与印度洋交汇的关键地带，该地区频繁遭受热带气旋/台风的侵袭（Yue et al., 2019）。由于紧邻印度-西太平洋暖池，且处于东亚季风区的核心区域，南海表层海洋环流深受东亚季风的显著调控（An, 2000），并呈现鲜明季节性特征：夏季，环流以东北向为主导，海水主要经卡里马塔海峡和卡斯帕海峡从爪哇海涌入南海，抵达南海北部后，大部分水体通过巴士海峡及巴林塘海峡流出并汇入黑潮主流，部分水流继续北上进入台湾海峡；冬季，环流则呈现逆时针方向流动，浙闽沿岸流与广东沿岸流自台湾海峡沿南海西部近岸向西南流动。

综上所述，南海北部作为南海向陆地过渡的关键地带，不仅是经济发达区域和大中城市集中区，更是全球气候变化的敏感热点区域之一。研究南海北部过去海平面变化历史，不仅有助于我们深入理解南海海洋环境和生态系统，还能为应对全球气候变化和推动可持续发展提供重要科学依据。

3、材料和方法

3.1 数据来源及可靠性分析

本文数据主要来源于 Yue et al. (2024)、颜廷礼 (2022)、Yan et al. (2024) 及时小军等 (2008)。其中珊瑚顶面高程数据来源于海南岛东部文昌沿海开放海域珊瑚礁区的 27 块顶部已经死亡的现代活滨珊瑚微环礁（Yue et al., 2024）。65 个海平面标志点数据则来源于海南岛东部文昌至琼海珊瑚礁区 51 块出露海面的大型块状原位化石滨珊瑚（微环礁），采样点分布

见图 1。包括 Yue et al. (2024) 的 6 个数据、颜廷礼 (2022) 和 Yan et al. (2024) 的 40 个新进发表数据。这些数据源自 2020-2022 年最低潮位期间在海南岛东部文昌铜鼓岭至琼海潭门沿海珊瑚礁区进行踏勘时采集的滨珊瑚（微环礁）样品。野外采样时利用徕卡 (Leica) GS18 T GNSS 接收机通过实时动态载波相位差分技术 (Real Time Kinematic, RTK) 对开放海域现代活以及化石原位滨珊瑚（微环礁）（图 1c-d）顶面进行了高精度高程测量。每个采样点至少进行 2 次独立测量，单次测量持续时间不少于 5 分钟，取平均值作为最终高程数据；重复测量的误差范围控制在 ± 2 cm 以内，确保数据可靠性。该仪器支持多频多星座定位系统 (GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou)，水平测量精度为 $8\text{ mm} + 1\text{ ppm}$ ，垂直测量精度为 $15\text{ mm} + 1\text{ ppm}$ 。另有 19 个滨珊瑚海平面数据来源于时小军等 (2008) 早年发表的研究。

本研究中当地平均潮位 (MTL) 数据基于海南清澜港长期潮位监测站 (1985—2020 年) 实测记录计算，其高程基准与 1985 国家高程基准 (即现代平均海平面, MSL) 一致，两者差值可忽略不计。文中涉及的滨珊瑚微环礁顶面高程均以该基准为参照。

上述 65 个海平面标志点数据的年代均通过 U-Th 测年获得。为了便于与其他基于 ^{14}C 测年的区域代用指标对比，所有 U-Th 测年结果均转换为距今年龄 (cal a BP, 起点为公元 1950 年)。65 个海平面标志点数据的原始数据、校正过程及最终结果详见附件《南海北部 65 个海平面标志点数据》，采样点分布见图 1，其中高程基准统一转换为现代平均海平面 (MSL)。

为了验证数据，对 65 个海平面标志点数据进行了系统性可靠性评估。1、生长纹与测年精度验证：将化石珊瑚样品打磨至 7mm 厚的珊瑚板，通过数字化 X 射线成像判断珊瑚样品生长纹清晰度。对生长纹清晰的新增珊瑚样品进行重复 U-Th 测试，以验证 U-Th 测年方法的精确性与结果的可靠性。举例来说，当数字化 X 射线成像清晰地展示出珊瑚的生长纹，则表明该珊瑚样品适合 U-Th 测年并可获得准确数据 (Yue et al., 2024)。2、 $\delta^{234}\text{U}$ 值封闭系统检验：将所有化石滨珊瑚样品的 $\delta^{234}\text{U}$ 与现代海水 ($144\% \pm 2\%$) (Chen et al., 1986) 及现代珊瑚 ($156\% \pm 6\%$) (Stirling et al., 1995) 的 $\delta^{234}\text{U}$ 对比，若这些化石滨珊瑚样品在地质历史中保持封闭系统，其 $\delta^{234}\text{U}$ 值应落于上述现代参照值范围内，相应测年数据视为可信；反之，若偏离此范围，则质疑数据的可信度。3、铀浓度成岩作用评估：以南海北部 276 块珊瑚样品铀浓度平均值 (3.0721×10^{-6} ppm) (Yue et al., 2024) 为基准，若珊瑚样品 U 浓度异常偏低，可能指示文石向方解石转化的成岩作用导致铀流失，相关数据判定为不可靠。

3.2 全新世海平面重建及验证

通过定量研究滨珊瑚微环礁顶面高程与现代海平面之间的关系及潮位指示范围，明确现代活滨珊瑚微环礁的指示意义 (Indicative meaning, IM) 是开展过去海平面重建的基础。对于仅发现化石滨珊瑚 (微环礁) 但缺少现代活体滨珊瑚微环礁作为参照的区域，可采用以下公式估算当地古海平面高度：

$$RSL = H_{fossil} - IM$$

其中， RSL 为古海平面高度， H_{fossil} 是原生化石滨珊瑚 (微环礁) 的顶面测量高程。对于同时存在化石滨珊瑚微环礁和活体滨珊瑚微环礁的海岸，古海平面高度为原生化石滨珊瑚微环礁与现代活体滨珊瑚微环礁顶面高程 (H_{modern}) 的垂直高度差。公式如下：

$$RSL = H_{fossil} - H_{modern}$$

注意，计算中 IM 、 H_{fossil} 和 H_{modern} 应转换为同一高程基准。若 RSL 为正值，表明古海平面高度高于现今海平面。由于大型块状原生滨珊瑚 (微环礁) 的侵蚀高度难以精确测定，本文所计算的海平面数值代表当时可能存在的最低海平面高度。

古海平面垂直高度的误差主要来源于海平面标志物的指示意义及其范围，以及样品采集和处理过程中的固有因素 (如测量误差、样品厚度变化以及分样误差等)。量化误差可采用以下公式 (Shennan and Horton, 2002) 进行计算：

$$E = (e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2)^{1/2}$$

其中 E 代表海平面标志物所代表的 RSL 的总误差， $e_1 \dots e_n$ 代表各种误差来源。

最后，将南海北部中全新世海平面重建结果与冰川均衡调整 (Glacial isostatic adjustment, GIA) 模型 (ICE-6G_HetML140, 数据来自南洋理工大学李堂华博士) 进行对比，以分析海平面变化的驱动机制。该模型采用三维横向非均匀黏弹性地球模型 HetML140 (Li et al., 2018; Li and Wu, 2018) 和 ICE-6G_C 冰盖模型 (Peltier et al., 2015)，GIA 响应通过耦合位扰动拉普拉斯方程的三维有限元算法 (CLFE) 计算 (Wu, 2004)。

4、结果

4.1 现代活滨珊瑚 (微环礁) 上顶面高程

根据野外勘探，海南岛文昌铜鼓岭珊瑚礁区开放海域随机选取的 27 块现代活滨珊瑚微环礁，除顶部已经死亡以外的其他部位均处于存活状态 (Yue et al., 2024)。根据这 27 块样品的

礁顶面高程测量数据 (Yue et al., 2024), 这些滨珊瑚微环礁的顶面高程平均值为-43.09 cm MSL (图 2a), 个体变化范围为-51.6 cm MSL 至-34.94 cm MSL, 表明顶面高差最大为 16.66 cm, 相对高度变化幅度为 ± 8.33 cm。以海南清澜港平均潮位 (103 cm, 1985 国家高程基准), 这些滨珊瑚微环礁顶面高度为-146.09 cm MSL (图 2b 和 2c), 揭示其顶面高程与当地相对海平面存在可量化关系。

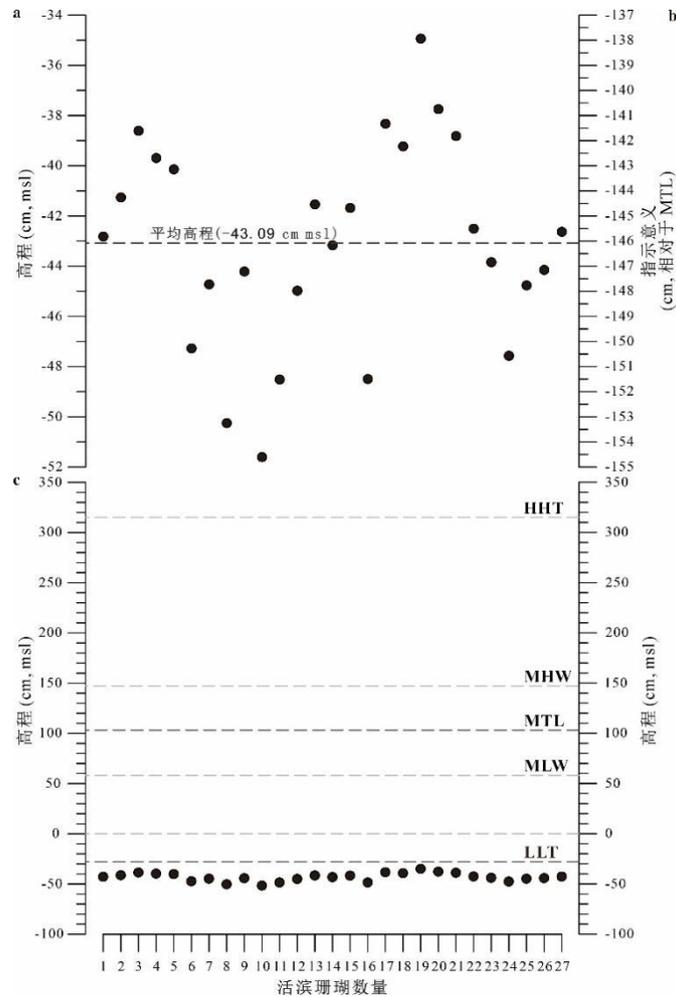


图 2 海南岛文昌铜鼓岭珊瑚礁区 27 块现代活滨珊瑚 (微环礁) 顶面高程 (高程数据由 Leica GS18 T RTK 设备测量获取) 与清澜港潮汐的关系。清澜港属不正规日潮, 基于 1985 年国家高程基准, 其平均潮位 (Mean Tide Level, MTL) 为 103 cm, 平均低潮位 (Mean Lower Low Water, MLW) 为 58 cm, 平均高潮位 (Mean High Water, MHW) 为 147 cm, 最高高潮位 (Highest High Tide, HHT) 为 315 cm, 最低低潮位 (Lowest Low Tide, LLT) 为-28 cm, 平均潮差为 89 cm, 最大潮差为 255 cm (中国人民解放军海军司令部航海保证部编制, 2022)。

Figure 2 Relationship between the top elevation of 27 modern live *Porites* (microatolls) in Tongguling coral reef area and tides at Qinglan Harbor in Wenchang, Hainan Island

4.2 海平面数据对应的同位素数据和 U-Th 测年结果

65 个海平面标志点数据对应的珊瑚同位素 $\delta^{234}\text{U}(\text{T})$ 变化 (图 3a)、U 浓度(图 3b) 和 U-Th 年龄分布(图 3c)如图 3 所示。

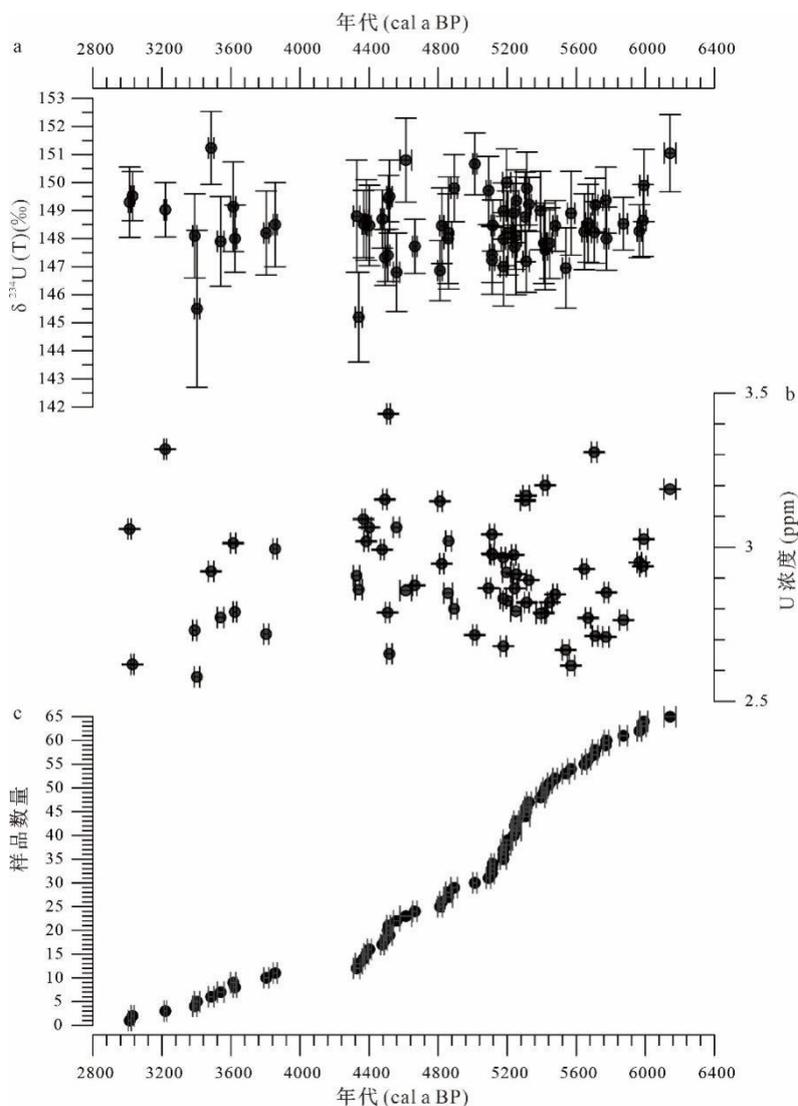


图 3 样品的 $\delta^{234}\text{U}(\text{T})$ 变化 (a)、U 浓度(b) 和 U-Th 年龄分布(c)

Figure 3 $\delta^{234}\text{U}(\text{T})$ change (a), U concentration (b) and U-Th age distribution (c)

首先, 65 个海平面标志点数据所对应的化石滨珊瑚样品的 $\delta^{234}\text{U}(\text{T})$ 变化范围为 $(145.2 \pm 1.3)\%$ ~ $(151.2 \pm 1.6)\%$, 平均值为 148.50% , 处于现代珊瑚(Stirling et al., 1995)和海水(Chen et al., 1986)的 $\delta^{234}\text{U}(\text{T})$ 之间。其次, U 浓度平均值为 2.912×10^{-6} (ppm), 变化范围介于 2.5753×10^{-6} ~ 3.4326×10^{-6} (ppm) 之间, 与南海北部新近报道的 276 个全新世珊瑚样品校正后 U 浓度 (3.0721×10^{-6} ppm) (Yue et al., 2024) 高度吻合。最后, 测年结果显示, 这些滨珊

瑚（微环礁）顶部年龄处于 3013 ± 9 cal a BP 至 6143 ± 34 cal a BP 之间，属于中全新世范围，年代跨度约 3100 年，年代误差 (2σ) 为 8-34 年。

4.3 南海北部中全新世海平面重建结果

通过对海南岛东部沿海珊瑚礁区 27 块现代活的滨珊瑚微环礁顶面高程的高精度测量，可以确定该区现代活滨珊瑚微环礁的海平面指示意义为当地平均潮位以下 143.09 cm (图 2b)。采用误差计算公式，可以对新增珊瑚样品的海平面总误差进行量化。例如，27 块现代活滨珊瑚微环礁顶面高程自身存在 8.33 cm 的误差，而 RTK 测量仪器总误差为 5 cm，采样厚度 1 cm，计算得海平面高程数据总误差为 ± 9.8 cm。为了便于计算，对校正后的 65 个海平面标志点数据都赋予这个误差值。

基于 3.2 部分所述的海平面重建公式，获得海南岛东部珊瑚礁区 65 个新的海平面标志点数据 (见附件：南海北部 65 个海平面标志点数据，图 4)，为重建南海北部海南岛东岸中全新世的海平面变化历史奠定可靠基础。如图 4 所示，在 6143 ± 34 cal a BP 到 3013 ± 9 cal a BP 的 3100 年期间，南海北部的相对海平面波动范围为 25-136.09 cm，整体呈现持续波动下降趋势。

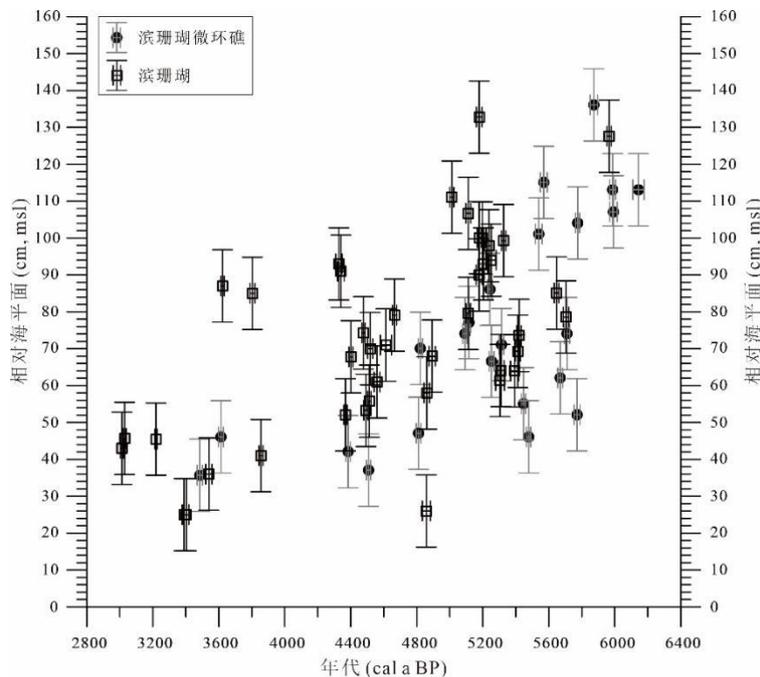


图 4 基于滨珊瑚及滨珊瑚微环礁重建的南海北部中全新世海平面

Figure 4 Middle Holocene sea level reconstruction of the northern South China Sea based on *Porites* corals and *Porites* microatolls.

5、讨论

5.1 滨珊瑚微环礁的海平面指示意义

滨珊瑚微环礁是高精度海平面重建的理想标志物。海南岛东部沿海珊瑚礁区 27 块现代活的滨珊瑚微环礁野外测量结果显示，其分布于开放海域，顶面高程与海平面/参考潮位有可量化的垂直关系 (Yue et al., 2024)。

首先, 27 块现代活的滨珊瑚微环礁所在的海南岛东部沿海文昌铜鼓岭珊瑚礁区相对平坦, 无显著局部凹陷, 且与开放海域直接相通, 即使是处于 2020 年 7 月的最低潮期间, 海水也可以与外海自由交换。这就排除了局地地形对这 27 块现代活滨珊瑚微环礁生长的影响。更为重要的是, 该区域属于海南铜鼓岭国家级自然保护区。据我们 2020 年野外初步估算, 该珊瑚礁区生态系统健康, 珊瑚种类丰富 (常见种包括 *Porites*, *Platygyra*, *Montipora solanderi*, *Acropora austera*, *Facia speciose*, *Pocillopora*, *Fungia fungites* 等), 且活珊瑚覆盖度较高。这说明该区 27 块现代活的滨珊瑚顶部死亡是因为达到本身的生长上限而导致的。

其次, 从形态特征看, 27 块现代活滨珊瑚的顶面高程波动于 -51.6 cm 至 -34.94 cm 之间, 变化范围为 ± 8.33 cm, 呈现出相对平坦却又在平顶中间凹凸不平的礁顶面, 符合滨珊瑚微环礁的典型发育形态。此外, 从生长状态分析, 其顶部均已死亡, 平均高度 (-43.09 cm MSL) 较海南岛清澜港最低低潮位 (-28 cm) 低 15.09 cm, 较平均潮位 (103 cm) 低 146.09 cm (图 c), 表明最低低潮是这些滨珊瑚微环礁理论生长上限。同时, 这些现代活滨珊瑚顶面高度近乎一致、生长范围狭窄, 指示其海平面变化响应区间狭窄且指示意义统一, 符合滨珊瑚微环礁的典型特征, 说明它们作为理想海平面标志物的可靠性。基于上述特性, 可通过这 27 块达到生长上限的现代活滨珊瑚微环礁, 推算出目前出露海面的化石滨珊瑚 (微环礁) 礁顶面代表的最低海平面高度, 为海平面研究提供关键数据支持。

5.2 中全新世海平面高程差异的原因分析

尽管以往基于滨珊瑚 (微环礁) 的海平面重建研究未深入探讨滨珊瑚 (微环礁) 的海平面指示意义, 但需强调的是, 现今沿海珊瑚礁区域礁坪上高出潮面的死亡大型块状原生滨珊瑚 (微环礁), 直接指示其发育时期海平面高于当前海平面。理论上, 精确测定这些滨珊瑚 (微环礁) 顶面的年代及高程, 即可有效推测其发育时期的海平面高度。基于此, 有学者依据雷琼地区 4 个珊瑚礁的 ^{14}C 测年数据及其高程信息, 推断该地区中全新世 ($7120 \pm 165 - 4010 \pm 110$ a BP, 未校正) 海平面波动范围为 200—250 cm (余克服等, 2002)。同时, 另有学者通过测量雷州半岛南部沿海的古珊瑚礁礁顶面高程, 并结合 ^{14}C 测年技术, 估算出中全新世期间 (如

6550±130—5300±80 a BP, 未校正) 海平面比现今高出 300—400 cm (Ma et al., 2003)。在不考虑中全新世以来地壳升降影响的情况下, 通过对该地区 7 块滨珊瑚进行的 16 个 U-Th 年龄测定结果, 进一步推测南海北部 7240±319—5009±54 a BP (相对于公元 2001 年) 期间海平面高度至少比现代高出 290—380 cm (Zhao and Yu, 2002)。然而, 与上述 300—400 cm 高海平面结论不同, Yu et al. (2009) 通过对比不同时期大型滨珊瑚微环礁与现代微环礁顶面高程, 结合 5 个微环礁的 18 个 U-Th 年龄数据及微地貌结构特征, 指出在 7050±32 至 6603±41 cal a BP (校正后, 以公元 1950 年为基准) 期间, 雷州半岛海平面高度为现今水平之上 171±8.5 至 219±8.5 cm, 并揭示至少 4 次百年尺度的周期性波动。这些海平面研究为南海北部中全新世高海平面提供了珊瑚礁证据。

从海平面高度时空变化视角分析, 南海北部全新世海平面重建结果呈现出显著的差异性, 根源可能在于所采用的海平面重建方法, 其中海平面标志物的高程估算精度以及测年技术是影响重建结果准确性的关键因素。

首先, 在海平面高程估算方面, 不同研究对滨珊瑚的海平面指示意义存在显著认知分歧。现有研究采用了多元参考标准, 例如, 有研究是以大潮低潮面/潮高基准面以下 1 m 作为滨珊瑚的实际生长上限 (聂宝符, 1996), 也有研究以平均低潮面作为滨珊瑚的生长上限 (Yao et al., 2013), 还有研究基于现代活滨珊瑚微环境顶面高程进行海平面重建 (Yu et al., 2009)。尽管雷琼地区前人海平面重建结果均采用 1985 国家高程基准或与之可转换的潮高基准面, 但具体指标选取上存在明显分化——部分以平均低潮面为参考, 部分以大潮低潮面为参考。这一差异成为导致区域海平面高程重建结果矛盾、限制横向可比性的主要原因。本研究通过将所有数据统一转换至现代平均海平面, 有效消除基准差异对区域对比的影响, 为区域对比提供了统一、可靠的分析基础。

本研究通过对海南岛东部沿海珊瑚礁区达到生长上限的现代滨珊瑚微环礁顶部高程测量, 明确其顶面高程与现代海平面的关系以及潮位指示范围, 量化滨珊瑚微环礁的海平面指示意义, 为其他珊瑚礁区的滨珊瑚 (微环礁) 海平面重建提供了新范式和依据。

其次, 在测年方法方面, 研究表明珊瑚样品的 ^{14}C 测年结果相较于其对应的 U-Th 测年结果, 系统性呈现约 200-1000 年, 甚至 3000-3500 年的年轻化趋势, 即使经过校正, 仍可能存在 80-600 年差距 (Bard et al., 1993)。这种差异可能源于海洋碳库效应的时空变异性、环境的改变, 或晚期成岩作用 (Bard et al., 1993)。此外, 不同软件或不同版本的同一软件对全新世 ^{14}C 年龄的校正结果, 可能存在十年甚至上千年的差异 (乐远福和唐立超, 2023; 唐立超和乐远福, 2023)。以本研究 65 个滨珊瑚 (微环礁) 海平面标志点数据为例, U-Th 测年的 2σ 误差范围为 14-34 年, 且同一块滨珊瑚 (微环礁) 测年结果基本一致, 凸显 U-Th 测年方法的高精度。同时, 有学者通过对全新世珊瑚样品年代学数据, 发现 U-Th 年龄与树木年代学校准结果高度吻合 (Bard et al., 1993), 进一步验证了 U-Th 测年技术的准确性及其作为地质年代计

的高精度特征。综上，选择指示意义明确的海平面标志物并采用精确测年方法，是高质量重建过去海平面的关键。对于滨珊瑚（微环礁）而言，U-Th 测年技术较 ^{14}C 测年方法具更高的海平面重建可信度。

在海平面重建研究中，无论采用何种海平面标志物，均需遵循以下关键流程：首先明确所选海平面标志物的指示意义。其次，提升定年技术精度并严格控制误差，同时开展必要的构造校正以消除地质构造运动的影响。在此基础上，通过多源数据交叉验证提升结果的可靠性，最后整合多元海平面记录以解决争议性问题。

与全球中全新世海平面记录对比表明，南海北部海平面变化既呈现全球共性，也存在区域分异。全球尺度上，中全新世早期海平面上升、中期维持相对高位是普遍特征，但不同区域的上升速率和高位持续时间差异显著。例如，泰国和越南现代海岸在 8 000~7 000 cal a BP 已出明确海侵的证据，并在约 6 000 cal a BP 达到接近 1.5 m 的峰值 (Tanabe, 2003; Stattegger et al., 2013)。与此同时，马来西亚半岛东海岸海平面在约 7 000 cal a BP 期间波动于 1.4~3.0 m (Parham et al., 2014)，6 500 cal a BP 时为 1.5 m，至 4 500 cal a BP 进一步上升至 2 m (Zhang et al., 2021)。此外，印度尼西亚勿里洞岛在 6 800~6 600 cal a BP 期间记录到 1.8 m 的海平面高度。此外，巽他陆架 (Meltzner et al., 2017)、澳大利亚大堡礁 (Chappell, 1983)、太平洋波利尼西亚 (Pirazzoli et al., 1988)、和东印度洋科科斯环礁 (Woodroffe et al., 1999) 的化石珊瑚礁记录均显示中全新世处于高海面期。这表明南海北部中全新世高海平面的出现与南海周边区域基本同步，可能具有全球驱动背景。然而，热带太平洋地区中全新世早期海平面上升速率略高于南海北部，中期高位持续时间更长。这种差异可能与海洋地理环境、地壳均衡调整以及构造运动有关。南海北部受东亚季风和西太平洋暖池的影响，对区域气候系统变化更为敏感；而板块边界等构造活跃区，海平面变化则可能叠加了地壳升降运动的影响。

值得注意的是，中全新世是一个高温时期，南海北部海表温度 (Sea surface temperature, SST) 较现在高 0~2°C (Wei et al., 2007)。最新研究显示，基于滨珊瑚重建的南海北部中全新世高海平面和陆地孢粉重建的高温期高度重叠，表明高海平面可能与气候变暖密切相关 (Yue et al., 2024)。在当前全球变暖背景下，1980—2020 年全球海平面上升已经进入加速状态，且未来持续快速上升 (乐远福和唐立超, 2023)，极有可能重现中全新世高海平面情景，这将对南海北部低洼地区的人类生存环境和沿海生态环境带来严重威胁，包括加剧海水入侵、土壤盐碱化等问题。因而，亟需采取有效措施应对海平面上升的潜在风险，以保障区域生态安全和居民生命财产安全。

5.3 区域构造升降运动因素分析

相对海平面变化是全球融冰过程、地壳均衡调整、局地构造运动和沉积压实等效应的综合响应。通过对比海平面变化地质数据与 GIA 模型的差异，有望从中分离出区域和当地的构造信号。为探讨南海北部雷琼海岸过去几千年的构造升降过程，本研究将海南岛东岸（本文研究区，图 5a）、西岸（Yao et al., 2013, 图 5b）和雷州半岛南端（Yu et al., 2009, 图 5c）中晚全新世滨珊瑚（微环礁）海平面数据与 GIA 模型（ICE-6G_HetML140）进行对比。

假设 GIA 模型预测准确，其与海平面数据的差异理论上反映当地构造升降量。如图 5 所示，雷琼海岸中晚全新世海平面数据均位于 GIA 预测曲线下方，表明这些区域过去几千年处于构造沉降状态。其中，海南岛东岸中全新世数据与模型的差值小于 1 m，至 3000 aBP 缩小至约 0.5 m，反映沉降速率较低 (0.12 ± 0.06 mm/a)。尽管海南岛西岸和雷州半岛的海平面数据较少，不足以进行定量对比，但均表现出明显构造沉降迹象。

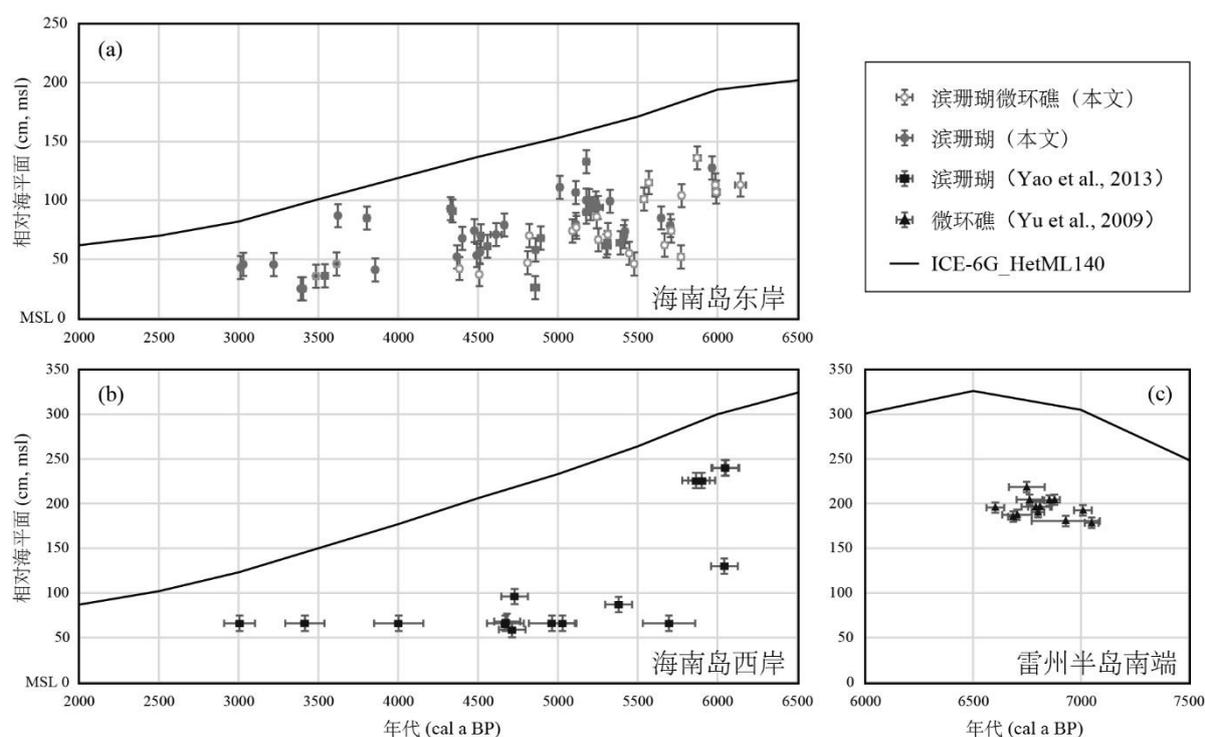


图 5. 基于滨[1]珊瑚及滨珊瑚微环礁重建的南海北部中全新世海平面与 GIA 模型预测海平面曲线对比图。a, b 和 c 分别为海南岛东岸、西岸以及雷州半岛南端地区。

Figure 5 Comparison of the mid-Holocene sea level reconstructed from Porites and Porites microatolls in the northern South China Sea with the sea level curves predicted by the GIA model. a, b, and c represent the eastern coast of Hainan Island, the western coast of Hainan Island, and the southern tip of Leizhou Peninsula, respectively.

上述结果与前人提出的雷琼地区全新世构造抬升结论（詹文欢等 2006; Yao et al., 2013）存在显著差异。例如，粤西与海南地区的中全新世高海平面（Zong et al., 2004）及海南岛西部河流的全新世阶地（陈康林等 2024）常被解释为构造抬升证据。然而，从本研究的最新数据-模型对比表明，雷琼海岸的中全新世高海面现象可能是水动型 GIA 效应的结果，而非构造抬升——远场 GIA 高海平面效应掩盖了局地较弱的构造沉降信号，导致对全新世地质资料的误读。国家一等水准网垂直形变观测数据显示，近 50 年来海南岛及雷州半岛海岸表现出明显沉降趋势（郭鑫伟等，2022），为本研究提出的中长期构造沉降提供了佐证。从新生代板块运动和南海的演变背景看，南海洋盆沉陷驱动南海北部大陆架向南扩张并伴随沉降（Wang et al., 2024; 张健与石耀霖 2003），这可能是雷琼海岸中晚全新世构造沉降的区域动力学机制。

需要注意的是，以上推论依赖于 GIA 模型的准确性，而 ICE-6G 冰模型主要基于北极地区的融冰历史构建，对远场区域的预测存在不确定性。雷琼地区处于新构造活跃带，第四纪晚期经历复杂的间歇性差异性升降（詹文欢等，2006; 陈康林等，2024），内陆与海岸可能表现不同升降模式。因此，证实雷琼海岸长期构造升降模式并精确量化速率，仍需更多可靠的地质证据及模型交叉验证。

本研究受限于现有数据量与模型精度，暂未对海平面代用指标进行构造校正。研究中雷琼海岸 GIA 模型与实测数据的差异（图 5），已初步暗示构造因素对海平面变化的潜在影响，但量化分析仍需进一步探索

6、结论和展望

本研究针对南海北部中全新世海平面变化争议及构造信号分离问题，通过分析海南岛东部珊瑚礁区 27 块顶面死亡的现代滨珊瑚微环礁顶面高程，明确其海平面指示意义，并对该区 65 个海平面标志点数据进行系统性评估与校正，进而重建南海北部中全新世海平面变化历史。主要结论如下：

1. 滨珊瑚微环礁海平面指示意义的精确量化。现代滨珊瑚微环礁平均高度(-43.09 cm MSL,)位于当地最低低潮位 (-28 cm) 以下 15.09 cm，证实最低低潮位是滨珊瑚微环礁的理论上生长上限，表明海平面是该地区滨珊瑚微环礁发育的关键因素。这些滨珊瑚微环礁平均高程(-43.09 cm MSL)相对于海南岛清澜港平均潮位（103 cm）为-146.09 cm，为滨珊瑚微环礁的海平面指示意义提供了量化基准，解决了前人因指示意义不明确导致的重建结果矛盾问题。

2. 中全新世海平面变化特征。本研究重建的是南海北部中全新世相对海平面变化，数据均以现代平均海平面（MSL）为基准，确保与全球其他地区记录具有可比性。海平面重建结果显示，在 6143 ± 34 cal a BP 至 3013 ± 9 cal a BP 期间，南海北部的相对海平面波动范围为 25 ± 9.8 cm 至 136.09 ± 9.8 cm，整体呈波动下降趋势。与全球中全新世海平面记录对比，南

海北部的海平面变化既呈现与全球一致的趋势,也存在区域差异特征,这可能与南海北部受东亚季风和西太平洋暖池的气候调控效应有关,以及叠加了地壳升降运动的影响。

3. 构造沉降的新证据。通过海平面变化地质数据与 GIA 模型的对比分析,发现南海北部雷琼海岸过去几千年整体处于构造沉降状态(海南岛东岸沉降速率为 0.12 ± 0.06 mm/a),修正了前人将中全新世高海平面归因于构造抬升的认识。远场 GIA 效应掩盖了局部沉降信号,导致对地质资料的误读。国家水准网观测数据与区域板块运动背景(南海洋盆沉陷驱动大陆架扩张)进一步支持了长期沉降机制。

4. 研究局限性与展望。本研究依赖北极融冰历史构建的 GIA 模型,对远场区域的预测存在不确定性。若要精确量化雷琼海岸长期构造升降速率,未来需结合更多钻孔资料、高精度测年数据及区域构造模型,验证长期沉降模式并量化速率,为准确分离气候与构造信号提供更坚实的基础。

参考文献

- An, Z., 2000. The History and Variability of the East Asian Paleomonsoon Climate. *Quaternary Science Reviews* 19(15), 171-187, doi: 10.1016/S0277-3791(99)00060-8.
- Bard, E., Arnold, M., Fairbanks, R.G., Hamelin, B., 1993. ^{230}Th - ^{234}U and ^{14}C Ages Obtained by Mass Spectrometry on Corals. *Radiocarbon* 35, 191-199, doi:10.1017/s0033822200013886.
- Chappell, J., 1983. Evidence for Smoothly Falling Sea Level Relative to North Queensland, Australia, during the past 6,000 yr. *Nature* 302, 406-408, doi:10.1038/302406a0.
- Chen, J.H., Lawrence Edwards, R., Wasserburg, G.J., 1986. ^{238}U , ^{234}U and ^{232}Th in Seawater. *Earth and Planetary Science Letters* 80, 241-251, doi: 10.1016/0012-821X(86)90108-1.
- Hallmann, N., Camoin, G., Eisenhauer, A., Botella, A., Milne, G.A., Vella, C., Samankassou, E., Pothin, V., Dussouillez, P., Fleury, J., Fietzke, J., 2018. Ice Volume and Climate Changes from a 6000 Year Sea-Level Record in French Polynesia. *Nature Communications* 9, 285, doi:10.1038/s41467-017-02695-7.
- Li, T., Wu, P., 2018. Laterally heterogeneous lithosphere, asthenosphere and sub-lithospheric properties under Laurentia and Fennoscandia from Glacial Isostatic Adjustment. *Geophysical Journal International* 216, 1633-1647, doi:10.1093/gji/ggy475.
- Li, T., Wu, P., Steffen, H., Wang, H., 2018. In search of laterally heterogeneous viscosity models of glacial isostatic adjustment with the ICE-6G_C global ice history model. *Geophysical Journal International* 214, 1191-1205, doi: 10.1093/gji/ggy181.

- Ma, Z.B., Xiao, J., Zhao, X., Peng, Z.C., Xia, M., Zhang, G.P., Wang, Z.R., An, Z.S., 2003. Precise U-series Dating of Coral Reefs from the South China Sea and the High Sea Level during the Holocene. *Journal of Coastal Research* 19, 296-303, <https://www.jstor.org/stable/4299171>.
- Meltzner, A.J., Switzer, A.D., Horton, B.P., Ashe, E., Qiu, Q., Hill, D.F., Bradley, S.L., Kopp, R.E., Hill, E.M., Majewski, J.M., Natawidjaja, D.H., Suwargadi, B.W., 2017. Half-Metre Sea-Level Fluctuations on Centennial Timescales from Mid-Holocene Corals of Southeast Asia. *Nature Communications* 8, 14387, doi:10.1038/ncomms14387.
- Morton, B., Blackmore, G., 2001. South China Sea. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1236-1263, doi: 10.1016/s0025-326x(01)00240-5.
- Natawidjaja, D.H., Sieh, K., Ward, S.N., Cheng, H., Edwards, R.L., Galetzka, J., Suwargadi, B.W., 2004. Paleogeodetic Records of Seismic and Aseismic Subduction from Central Sumatran Microatolls, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109, doi: 10.1029/2003JB002398.
- Parham, P.R., Saito, Y., Sapon, N., Suriadi, R., Mohtar, N.A., 2014. Evidence for ca. 7-ka Maximum Holocene Transgression on the Peninsular Malaysia East Coast. *Journal of Quaternary Science* 29, 414-422, doi:10.1002/jqs.2714.
- Peltier, W.R., Argus, D.F., Drummond, R., 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120, 450-487, doi:10.1002/2014JB011176.
- Pirazzoli, P.A., Montaggioni, L.F., Salvat, B., Faure, G., 1988. Late Holocene Sea Level Indicators from twelve Atolls in the Central and Eastern Tuamotus (Pacific Ocean). *Coral Reefs* 7, 57-68, doi:10.1007/BF00301642.
- Shennan, I., Horton, B., 2002. Holocene Land- and Sea-Level Changes in Great Britain. *Journal of Quaternary Science* 17, 511-526, doi:10.1002/jqs.710.
- Smithers, S., Woodroffe, C., 2000. Microatolls as Sea-Level Indicators on a Mid-Ocean Atoll. *Marine Geology* 168, 61-78, doi:10.1016/S0025-3227(00)00043-8.
- Stattegger, K., Tjallingii, R., Saito, Y., Michelli, M., Trung Thanh, N., Wetzel, A., 2013. Mid to Late Holocene Sea-Level Reconstruction of Southeast Vietnam using Beachrock and Beach-Ridge Deposits. *Global and Planetary Change* 110, 214-222, doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.08.014.
- Stirling, C.H., Esat, T.M., McCulloch, M.T., Lambeck, K., 1995. High-Precision U-series Dating of

Corals from Western Australia and Implications for the Timing and Duration of the Last Interglacial. *Earth and Planetary Science Letters* 135, 115-130.

Tanabe, S., 2003. Song Hong (Red River) Delta Evolution Related to Millennium-Scale Holocene Sea-Level Changes. *Quaternary Science Reviews* 22, 2345-2361, doi:10.1016/s0277-3791(03)00138-0.

Wang, C., Jia, L., Hu, D., Bai, S., Hu, Z., Sun, D., Yang, X., Zhang, L., Ma, X., 2024. Seismogenic Structure of the 1605 Qiongsan M7½ Earthquake and Its Holocene Activity History in Northern Hainan Island, China: Evidence from Cross-Section Drilling and Shallow Seismic Profile. *Journal of Earth Science* 35, 905-917, doi:10.1007/s12583-021-1585-x.

Wei, G., Deng, W., Yu, K., Li, X.-h., Sun, W., Zhao, J.-x., 2007. Sea Surface Temperature Records in the Northern South China Sea from Mid-Holocene Coral Sr/Ca Ratios. *Paleoceanography* 22, PA3206, doi:10.1029/2006pa001270.

Woodroffe, C.D., McLean, R.F., Smithers, S.G., Lawson, E.M., 1999. Atoll Reef-Island Formation and Response to Sea-Level Change: West Island, Cocos Keeling/ Islands. *Marine Geology* 160, 85-104, doi: 10.1016/S0025-3227(99)00009-2.

Wu, P., 2004. Using commercial finite element packages for the study of earth deformations, sea levels and the state of stress. *Geophysical Journal International* 158, 401-408, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02338.x.

Yan, T., Yu, K., Jiang, L., Li, Y., Zhao, N., 2024. Significant Sea-Level Fluctuations in the Western Tropical Pacific During the Mid-Holocene. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 39, e2023PA004783, doi:10.1029/2023PA004783.

Yao, Y., Zhan, W., Sun, J., Sun, J., 2013. Emerged Fossil Corals on the Coast of Northwestern Hainan Island, China: Implications for mid-Holocene Sea Level Change and Tectonic Uplift. *Chinese Science Bulletin* 58, 2869-2876, doi: 10.1007/s11434-013-5692-7.

Yu, K.F., Zhao, J.X., Done, T., Chen, T.G., 2009. Microatoll Record for Large Century-Scale Sea-Level Fluctuations in the Mid-Holocene. *Quaternary Research* 71, 354-360, doi:10.1016/j.yqres.2009.02.003.

Yue, Y., Tang, L., Yu, K., Huang, R., 2024. Coral Records of Mid-Holocene Sea-Level Highstands and Climate Responses in the Northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* 43, 43-57, doi: 10.1007/s13131-023-2264-9.

- Yue, Y., Yu, K., Tao, S., Zhang, H., Liu, G., Wang, N., Jiang, W., Fan, T., Lin, W., Wang, Y., 2019. 3500-year Western Pacific Storm Record Warns of Additional Storm Activity in a Warming Warm Pool. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 521, 57-71, doi:10.1016/j.palaeo.2019.02.009.
- Zhang, Y., Zong, Y., Xiong, H., Li, T., Fu, S., Huang, G., Zheng, Z., 2021. The Middle-to-Late Holocene Relative Sea-Level History, Highstand and Levering Effect on the East Coast of Malay Peninsula. *Global and Planetary Change* 196,103369, doi:10.1016/j.gloplacha.2020.103369.
- Zhao, J., Yu, K., 2002. Timing of Holocene Sea-Level Highstands by Mass Spectrometric U-series Ages of a Coral Reef from Leizhou Peninsula, South China Sea. *Chinese Science Bulletin* 47, 348-352, doi:10.1007/BF02901194.
- Zong, Y., 2004. Mid-Holocene Sea-Level Highstand along the Southeast Coast of China. *Quaternary International* 117, 55-67, doi:10.1016/s1040-6182(03)00116-2.
- 陈康林, 姜涛, 胡亦潘, 周从艳, 梁晨, 宋霖, 2024. 晚更新世以来海南岛西部河流阶地演化及其成因机制. *地球科学* 49(8), 3043-3055.
- Chen, K. L., Jiang, T., Hu, Y. P., et al., 2024. The Origin and Evolution of Late Pleistocene River Terraces in Western Hainan Island, *Earth Science*, 49(8): 3043-3055 (in Chinese with English abstract).
- 郭鑫伟, 郭春喜, 聂建亮, 王海涛, 田婕, 2022. 一等水准成果构建的中国大陆垂直运动模型研究. *武汉大学学报·信息科学版* 47, 3, 361-368.
- Guo, X. W., Guo, C. X., Nie, J. L., et al., 2022. Vertical Movement Model in Chinese Mainland Based on First Order Leveling Results. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47(3): 361-368 (in Chinese with English abstract).
- 乐远福, 唐立超, 2023. 南海北部全新世以来海平面变化特征及未来趋势预测. *海洋地质前沿* 39, 1-16.
- Yue, Y. F., Tang, L. C., 2023. Characteristics of sea level changes in the northern South China Sea since the Holocene and prediction of the future trends. *Marine Geology Letters*, 39(2): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- 乐远福, 唐立超, 余克服, 2022. 北大西洋沿岸过去 2000 年海平面变化的若干重要特征. *海洋地质前沿* 38, 1-15.
- Yue, Y. F., Tang, L. C., Yu, K. F., 2022. General characteristics of sea-level changes along the North Atlantic coast in the past 2000 years. *Marine Geology Letters*, 38(6): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- 聂宝符, 1996. 五千年来南海海平面变化的研究. *第四纪研究* 1, 80-87.

- Nie, B. F., 1996. Sea-level Changes of the South China Sea in the past 5000 years. *Quaternary Sciences*, 1: 80-87 (in Chinese with English abstract).
- 时小军, 余克服, 陈特固, 张江勇, 赵建新, 2008. 中-晚全新世高海平面的琼海珊瑚礁记录. *海洋地质与第四纪地质* 28, 1-9.
- Shi, X. J., Yu, K. F., Chen, T. G., et al., 2008. Mid- to Late-Holocene Sea Level Hightands: Evidence from Fringing Coral Reefs at Qionghai, Hainan Island. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(5): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- 唐立超, 乐远福, 2023. 海滩岩在南海北部中晚全新世海平面重建中的应用和不确定性分析. *海洋地质前沿* 39, 1-19.
- Tang, L. C., Yue, Y. F., 2023. Application and uncertainty analysis of beachrock to Mid-late Holocene sea-level reconstruction in the northern South China Sea. *Marine Geology Letters*, 39(3): 1-19 (in Chinese with English abstract).
- 王绍鸿, 1989. 海平面标志物识别的一些问题. *台湾海峡* 8, 329-337.
- Wang, S. H., 1989. Some Problem on Recognition of Sea Level Indicators. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 4(8): 329-337 (in Chinese with English abstract).
- 颜廷礼, 2022. 海南潭门镇珊瑚岸礁的铀系年代及其对中全新世海平面变化的记录. 广西大学, pp. 1-58.
- Yan, T. L., 2022. Records of Sea Level Changes over The Mid-Holocene from U-Series Ages of Shore Reefs in Tanmen, Hainan Island. Nanning: Guangxi University, 1-58 (in Chinese with English abstract).
- 余克服, 钟晋梁, 赵建新, 沈承德, 陈特固, 刘东生, 2002. 雷州半岛珊瑚礁生物地貌带与全新世多期相对高海平面. *海洋地质与第四纪地质* 22, 27-33.
- Yu, K. F., Zhong, J. L., Zhao, J. X. et al., 2002a. Biological-geomorphological zones in a coral reef area at Southwest Leizhou Peninsula Unveil multiple sea level high-stands in the holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(2): 27-33 (in Chinese with English abstract).
- 俞慕耕, 刘金芳, 1993. 南海海流系统与环流形势. *海洋预报*, 13-17.
- Yu, M. G., Liu, J. F., 1993. The ocean current system and circulation pattern of the South China Sea. *Marine Forecasts*, 2(10): 13-17 (in Chinese).
- 詹文欢, 朱照宇, 姚衍桃, 孙宗勋, 孙龙涛, 2006. 南海西北部珊瑚礁记录所反映的新构造运动. *第四纪研究* 26(1), 77-84.
- Zhan, W. H., Zhu, Z. Y., Yao, Y. T., et al., 2006. Neotectonic Movement Recorded in Coral Reefs in the Northwestern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 26(1): 77-84 (in Chinese with English abstract).

张健, 石耀霖, 2003. 东亚陆缘带构造扩张的深部热力学机制. 大地构造与成矿学, 27(3), 222-227.

Zhang, J., Shi, Y. L., 2003. Thermodynamics mechanism of the marginal extensional belt of east asia. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(3): 222-227 (in Chinese with English abstract).

中国人民解放军海军司令部航海保证部编制, 2022. 中国港口指南 C105(南海海区). 中国航海图书出版社, 1-339.

China Nave Hydrographic Office. 2022. Guide to China Ports South China Sea. Tianjin: China Navigation Publications Press, 1-339