

乐远福,唐立超.南海北部全新世以来海平面变化特征及未来趋势预测[J].海洋地质前沿,2023,39(2):1-16.

YUE Yuanfu, TANG Lichao. Characteristics of sea level changes in the northern South China Sea since the Holocene and prediction of the future trends[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(2): 1-16.

# 南海北部全新世以来海平面变化特征及未来趋势预测

乐远福,唐立超

(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)

**摘要:**南海北部是南海向陆地过渡的前锋关键地带和全球变化的敏感地区之一,受海平面变化的影响,该地区海平面标志物广泛发育,是开展过去海平面变化研究的理想区域。目前关于南海北部全新世海平面变化历史的认识依然存在一定分歧。基于此,通过新增 6 个珊瑚礁数据,并对南海北部已发表的海平面数据进行年代和高程校正,然后进行相互验证和可靠性分析。同时对监测记录较为连续的 12 个验潮站的现代海平面观测资料进行整理和进一步验证重建结果的可靠性。最后,根据汇编的 679 个校正和可靠性评估后的海平面数据,重建了南海北部全新世以来,尤其是最近 2 000 a 的海平面变化历史和变化特征。校正和评估后的数据显示:南海北部海平面从早全新世(8 211 ± 128) cal a BP 的 -16.16 m 快速上升到 6 000~7 000 cal a BP 的 1.5 ~ 2.5 m,之后波动下降到现今海平面高度。其中在中全新世海平面保持高位震荡约 2 600 a,而晚全新世南海北部过去 2 000 a 海平面整体呈现出阶段变化过程。首先,在公元 0—350 年呈下降趋势,然后在公元 350—850 年海平面快速上升,并在公元 880 年,海平面处于过去 2 000 a 的最高点(1.05 ± 0.35) m,随后海平面继续下降至公元 1850 年的(-0.18 ± 0.05) m。之后半个世纪保持水平窄幅波动,直到公元 1897 年(-0.19 ± 0.05) m 后,海平面持续震荡逐渐上升至公元 2020 年的 0.076 m。若以过去百年(公元 1925—2020 年)和 40 a(公元 1980—2020 年)上升速度(分别为 2.35 mm/a 和 3.55 mm/a)估算,公元 2100 年南海北部海平面将比现今海平面高 0.19~0.28 m。因此,在南海北部沿海低洼地区开展大型工程建设时,需要考虑未来海平面上升因素带来的不利影响。此外,分析发现,基于不同海平面标志物和采用不同重建方法是南海北部全新世以来海平面重建结果区域差异的主要原因。总体上,南海北部中全新世以来海平面呈现出波动下降的趋势。尽管不同地区海平面在时间与高度上存有差异,但是南海北部地区与周边海岸的海平面记录一致,这说明中全新世南海北部高海平面与南海周边地区基本同步,极可能具有全球背景。

**关键词:**南海北部;全新世;海平面变化;不确定性分析;未来预测

中图分类号:P731.23

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.193

## 0 前言

中国大陆南端,包括广东、广西、香港、澳门和海南等沿海经济发达地区,处于西太平洋最大的边

缘海-南海的北部。该地区是南海向陆地过渡的前锋关键地带,处于典型的东亚季风区,邻近印度-西太平洋暖池,频繁受到厄尔尼诺-南方涛动(El Nino-Southern Oscillation, ENSO)事件<sup>[1]</sup>和风暴潮的影响<sup>[2]</sup>,是全球变化的敏感地区,同时也是世界上最容易受海平面上升影响的地区之一。在当前全球变暖的背景下,海平面快速上升及其相关的灾害(例如,导致沿海低洼地区发生洪水的频率和严重程度增加以及严重的海岸侵蚀),将对南海北部乃至全国/全球沿海低洼地区的社会经济发展和生态环境

收稿日期:2022-06-27

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0603300);国家自然科学基金(41702182);广西省自然科学基金(2018GXNSFAA281293)

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方面的研究工作。E-mail: yuanfu.yue@gxu.edu.cn

构成严重威胁,特别是对经济发达的珠江三角洲低洼地区,因而引起了社会的广泛关注和政府的高度重视。然而,迄今为止,人类仍未完全了解过去海平面变化的历史 and 变化规律及其驱动机制,对未来海平面上升是否存在加速并达到中全新世的高海平面仍不能做出确定性结论,这严重影响了对未来海平面变化预估的准确性。基于此,拟通过对南海北部一“点”的海平面研究,研究中国南海北部全新世以来,尤其是过去 2 000 a 以来的海平面变化历史,深入到中国南海乃至东亚过去海平面变化历史的“面”的认识。这不仅对了解自然的海平面变化过程、减小未来预估结果不确定性的范围具有重要意义,而且对中国华南沿海地区乃至全国未来沿海基础建设和生态环境保护等方面都具有重要的现实意义和长远战略意义。

南海北部是全球变化的敏感地区和全球海平面研究的一个关键区域(图 1)。该地区位于南海北部沿海的低纬度地带,作为远场区域,全新世以来构造稳定,该地区海平面标志物广泛发育<sup>[3]</sup>。前人通过这些海平面标志物进行测年和高程研究,对南

海北部全新世的海平面展开了研究。然而,从海平面高度时空变化的角度来看,这些研究结果明显存在巨大差异。比如早全新世海平面重建结果介于 $-13.8\sim 22\text{ m}$ <sup>[4-6]</sup>,波动幅度达 35.8 m;中全新世海平面重建结果介于 $-3.2\sim 4\text{ m}$ <sup>[4,7-11]</sup>,波动幅度超过 7 m;晚全新世海平面重建结果在 0.82~3.8 m 波动<sup>[12,13]</sup>,最后下降到现在的高度。也有研究基于不同的珊瑚生长上限标准计算得到的南海北部中全新世海平面相差甚远<sup>[14]</sup>,还有研究基于大量不同海平面标志物的<sup>14</sup>C 测年结果和高程校正提出南海北部中全新世并没有高海平面<sup>[3]</sup>,甚至得出最近 3 000 a 海平面变化较小的结论<sup>[3,15]</sup>。这些研究表明目前关于南海北部过去海平面变化历史的认识依然存在一定分歧。归根结底,可能与海平面标志物选取和测年方法不同,是否考虑了构造运动因素并进行构造校正,海平面计算方法和定年或高程误差计算,及冰川均衡效应带来的不确定性有关。因此,有必要采用标准化的海平面重建方法对南海北部过去海平面历史进行梳理,同时寻找更多的记录来厘清存在的分歧。

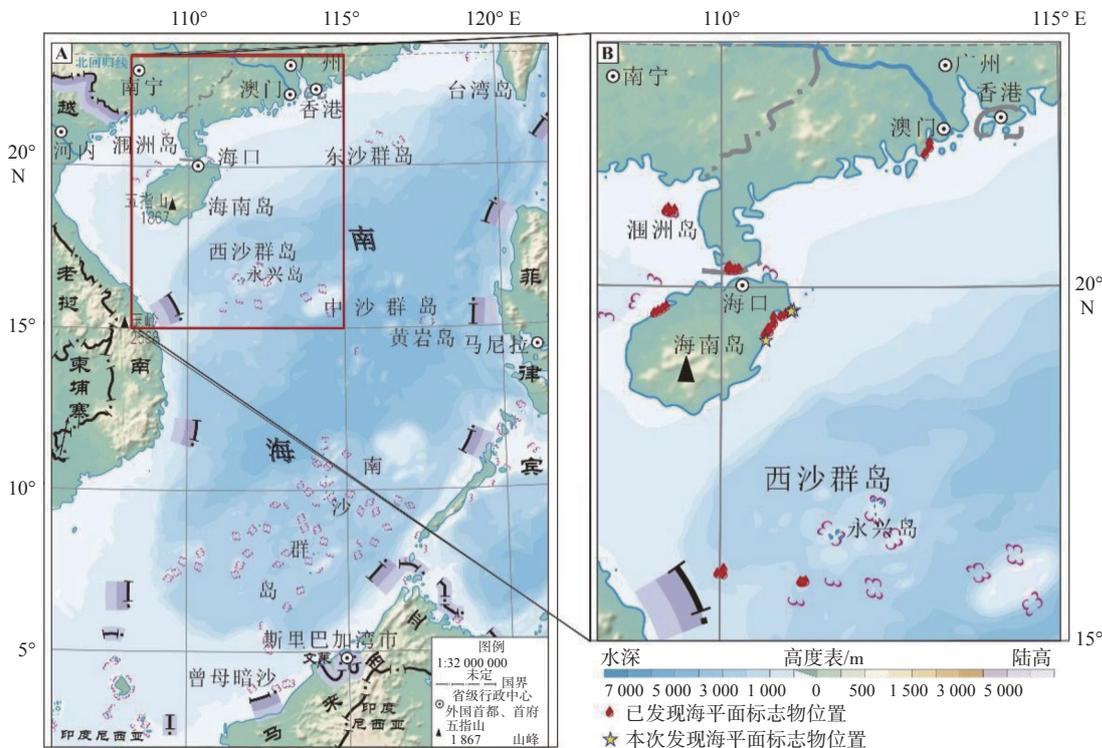


图 1 南海地理位置 (A) 和南海北部全新世海平面数据的空间分布 (B)

Fig.1 Location of (A) and spatial distribution of Holocene sea-level data in the northern South China Sea (B)

中全新世被认为是一个高温时期,与现代气候相似,这为理解当前和未来海平面变化提供了潜在的类比和背景。首先通过 3 块滨珊瑚(微环礁)顶

部高程进行高精度测量,开展高精度铀-钍(Uranium-thorium,简称 U-Th)年代测试,新增 6 个珊瑚高精度 U-Th 年代和高程数据<sup>[16]</sup>,然后对收集的已发

表的重新校正后的南海北部海平面数据加以比较和相互验证, 同时对监测记录较为连续的 416 个验潮站的现代海平面观测资料进行整理, 进一步验证重建结果的可靠性, 最后汇总了 679 个海平面数据, 重建南海北部地区全新世以来, 尤其是过去 2 000 a 的海平面变化历史。本研究探讨南海北部过去海平面重建结果差异性的原因, 重点讨论珊瑚为主的全新世以来海平面变化特征, 进而预测 2100 年该地区海平面可能上升的幅度, 以期为当前海平面变化研究以及未来海平面变化趋势预测提供重要的基础资料。

## 1 研究区域

南海位于太平洋和印度洋之间, 是中国近海中面积最大、水最深的海区(图 1A)。南海通过巴士海峡、苏禄海和马六甲海峡, 连接太平洋和印度洋。而汇入南海的河流主要有中国广东的珠江和韩江以及中南半岛上的红河、湄公河和湄南河等。南海北部是南海向陆地过渡的前锋关键地带和全球变化的敏感地区之一, 也是重要经济发达地区和大中城市集中地区(图 1B)。

南海作为西太平洋最大的边缘海, 又邻近印度-西太平洋暖池, 处于典型的东亚季风区, 其表层大洋环流受到东亚季风的显著影响<sup>[17]</sup>。冬季受西伯利亚高压的影响, 东亚冬季风(East Asian Winter Monsoon, EAWM)携带冷气团从北向南移动, 越过中国大陆到达南海, 风向由陆地刮向海洋, 南海此时盛行低温干燥的东北季风。夏季时, 东亚夏季风(East Asian Summer Monsoon, EASM)携带暖湿的气团由海洋刮向陆地, 并给中国大陆带来降水, 此时南海盛行温暖湿润的西南季风。受此季节性东亚季风的影响, 南海海水的表层环流在冬季时逆时针方向流动, 来自台湾海峡的浙闽沿岸流与广东沿岸流, 沿南海西部大陆近海流向西南; 夏季时以东北流向为主, 海水主要从爪哇海经卡里马塔、卡斯帕海峡进入南海, 至南海北部, 大部分海水经巴士海峡及巴林塘海峡流出南海汇入黑潮主干, 小部分继续北上进入台湾海峡<sup>[18-19]</sup>。此外, 该地区频繁受到风暴潮的影响<sup>[2]</sup>, 导致南海北部海平面和海表温度产生变化<sup>[20]</sup>, 而东亚冬季风强度增加, ENSO 强度也随之增加, 使局部区域气候寒冷干燥, 反之东亚夏季风越强, ENSO 强度减弱<sup>[21]</sup>, 带来充沛的降雨, 使局部区域海平面升高。南海北部海域广阔,

进入全新世后, 该地区气候与环境构造相对稳定, 常见的海平面标志物(例如珊瑚礁和海滩岩)<sup>[12-13]</sup>在此区域广泛发育, 为开展过去海平面变化研究提供了理想的区域。

## 2 材料和方法

本文数据(附件: 南海北部海平面数据)主要来源于南海北部近年来已发表的 489 个海平面数据(包括 166 个珊瑚氧同位素记录的海平面数据)和 6 个新增海平面数据及其区域内 12 个验潮站的 416 个观测数据。

### 2.1 野外采样及数字 X 射线成像

为了对已发表的海平面数据进行验证和进一步获得新的全新世珊瑚海平面数据, 在 2020 年 7 月最低潮位时对海南文昌铜鼓岭和琼海青葛沿海采集了 3 个原位珊瑚礁样本(图 2)。首先采用实时动态测量方法(Real Time Kinematic, RTK), 使用 RTK 测量仪器对珊瑚礁上顶面进行了高精度高程测量, 并将高程转换为 1985 国家高程基准。回到实验室后, 对 3 个样品进行整体打磨至 7 mm 薄板, 然后进行数字 X 射线成像。如图 2 所示, 成像结果显示珊瑚生长纹清晰。根据成像结果从每个珊瑚薄板挑选 2 个不同深度的样品, 共 6 个样品, 送往澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室进行高精度的 U-Th 测年(表 1)。

### 2.2 U-Th 定年以及可靠性分析

高精度和准确的测年方法, 是研究全新世过去海平面变化的基础。有研究证明, 全新世珊瑚样品的 U-Th 年龄符合树木年代学校准, 并验证了应用于珊瑚的 U-Th 地质年代计的精度和准确性<sup>[10-11, 22-23]</sup>。同时, 为了减小差异和不确定性, 以及便于统计分析, 在本研究中, 首先考虑同类型的海平面标志物以及相同的测年方法, 以获取更连续的海平面变化曲线数据, 并且避免使用被污染的测年数据, 以保证测年数据结果的可靠性。

对新增珊瑚样品的 U-Th 进行定年分析参照 ZHAO 和 CLARK 的研究方法<sup>[24-25]</sup>。Th 和 U 同位素比值在 Daly 离子计数器上用测量,  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  和  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  活度比值用 CHENG<sup>[26]</sup> 的衰变常数计算。采用非放射性成因  $^{230}\text{Th}$  校正计算得到的  $^{230}\text{Th}$  年龄,

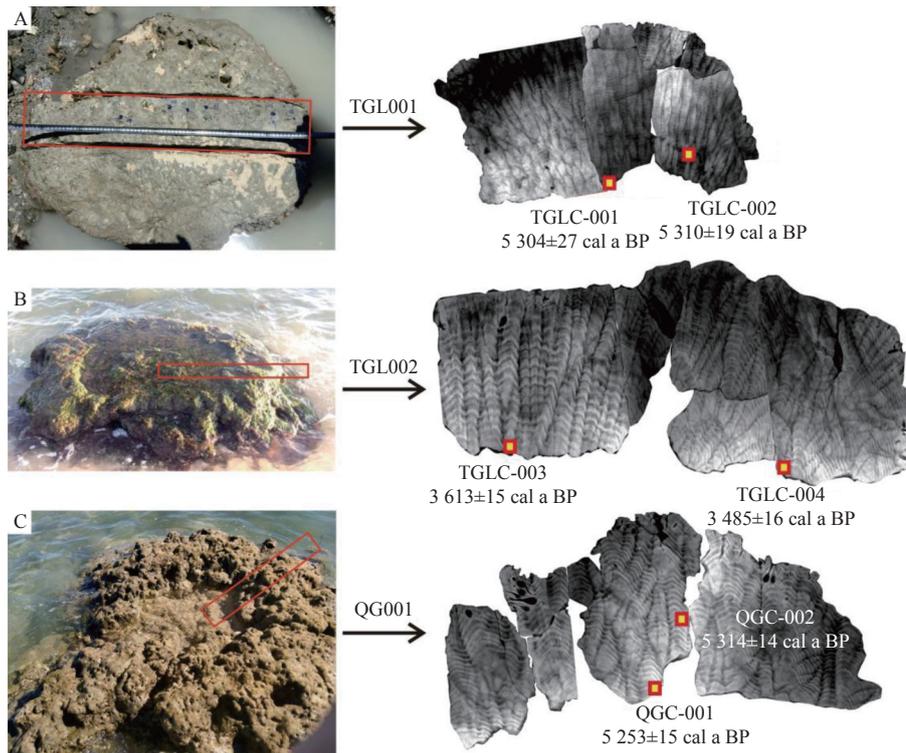


图2 2020年海南岛东部海岸野外踏勘发现的3块珊瑚礁及其横切面(左图红色框代表野外采样部位)室内数字X射线成像和U-Th测年部位<sup>[16]</sup>

Fig.2 Three coral reefs and their cross sections (red box in the left panel represents the field sampling position) in the field survey of the eastern coast of Hainan Island in 2020, photos of coral reef and its digital X-ray radiography and U-Th dating positions) <sup>[16]</sup>

表1 南海北部海南岛东部沿岸珊瑚样品的同位素数据和铀系年龄<sup>[16]</sup>

Table 1 The isotopic data and U-series ages for the coral samples from the eastern coast of Hainan Island, the northern South China Sea <sup>[16]</sup>

样本编号 Sample Name	U/( $\times 10^{-6}$ )	$^{232}\text{Th}/$ ( $\times 10^{-9}$ )	$\pm 2\sigma$	$^{230}\text{Th}/$ $^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$	$(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U})$	$\pm 2\sigma$	$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$	未校正 年龄/a	$\pm 2s$	校正后年龄 (距1950年的 年龄)/a	$\pm 2\sigma$	$\delta^{234}\text{U}$ /‰	$\pm 2\sigma$
TGLC-001	3.151 6	5.825 6	0.006 1	91.39	0.16	0.055 68	0.000 09	1.146 5	5 423	12	5 304	27	148.8	1.6
TGLC-002	3.167 7	3.12	0.004 1	170.77	0.44	0.055 43	0.000 13	1.144 9	5 406	14	5 310	19	147.2	1.1
TGLC-003	3.013	2.314 7	0.002 8	151.47	0.43	0.038 35	0.000 1	1.147 6	3 704	11	3 613	15	149.1	1.6
TGLC-004	2.921 8	3.154 5	0.003 5	104.53	0.23	0.037 19	0.000 08	1.149 7	3 584	9	3 485	16	151.2	1.3
QGC-001	2.912 6	2.150 5	0.002 3	225.62	0.46	0.054 9	0.000 1	1.147 1	5 343	11	5 253	15	149.3	1.1
QGC-002	2.820 7	1.022 1	0.001 3	464.19	1.05	0.055 43	0.000 11	1.147 5	5 394	13	5 314	14	149.8	1.3

假设非放射性成因 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th} = 0.825 \pm 50\%$ , 其中 $^{238}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{230}\text{Th}$ 处于长期平衡状态。 $\delta^{234}\text{U} = \delta^{234}\text{U} \times e^{\lambda T}$ , 其中 $\delta^{234}\text{U} = [(^{234}\text{U}/^{238}\text{U}) - 1] \times 1000$ 。

表1中校正后的年龄(a BP)是相对于2021年, 所有铀系年代数据误差均为 $2\sigma$ 标准差。而对于U-Th测年的数据, 为了便于和已发表的 $^{14}\text{C}$ 年代数据进行比较, 也换算成距今年代(cal a BP, 以公元1950年为起点)。

对新增的珊瑚样品的U-Th年代结果和收集到的本区已发表珊瑚为主的U-Th年代数据进行可靠性评估。首先, 对珊瑚样品进行打磨和数字化X射线成像以判断珊瑚样品的生长纹是否清晰, 并对部

分生长纹清晰的新增珊瑚样品进行重复的测试以验证U-Th测年方法和测试结果的准确性。数字化X射线成像显示生长纹清晰, 说明珊瑚样品适合开展U-Th测年, 可获得理想数据。其次, 对所有珊瑚样品的 $\delta^{234}\text{U}$ 与现代海水( $144\% \pm 2\%$ )<sup>[27]</sup>和现代珊瑚( $156\% \pm 6\%$ )<sup>[28]</sup>的 $\delta^{234}\text{U}$ 进行对比, 如果珊瑚样品保持封闭, 那么其 $\delta^{234}\text{U}$ 应该处于该范围, 相应的测年数据被认为是可信的, 反之则不可信。此外, 所有样品的U浓度( $\times 10^{-6}$ )也是进行可靠性分析的依据, 例如, 我们对南海北部校正后的291个全新世珊瑚样品U浓度进行统计, 其平均值为 $3.1135 \times 10^{-6}$ <sup>[16]</sup>。如果新增的珊瑚样品的U浓度异常低值,

可能意味着发生成岩作用, 文石转化为方解石会导致部分铀的损失, 那么数据被认为不可信。

### 2.3 已发表的海平面数据及准确性评估

收集到南海北部沿岸发表的原始海平面数据共 323 个(图 3, 附件: 南海北部海平面数据之海平面标志物数据)。根据测年方式的不同可以分为  $^{14}\text{C}$  测年和 U-Th 测年。对  $^{14}\text{C}$  测年的海平面数据, 通过最新的 CALIB8.0 软件<sup>[29]</sup> 对其原始  $^{14}\text{C}$  年代数据进行重新校正, 对陆地样本和海洋样本分别使用最新的校正曲线, 即北半球的大气曲线 IntCal20<sup>[30]</sup> 和海洋校正曲线 Marine20<sup>[31]</sup>, 并考虑全球海洋和当地碳库效应的影响, 最后统计 95.4% 概率在所有校正区间的相对“可能性”。当地碳库效应年龄偏差  $\Delta R$  值参考 YU<sup>[32]</sup>, 例如, 7 500~5 600 cal a BP 和 3 500~2 500 cal a BP 期间  $\Delta R$  值分别为  $(151 \pm 85)\text{a}$  和  $(89 \pm 59)\text{a}$ 。南海北部沿岸发表的 U-Th 测年的海平面数据, 测年结果都是相对测年时间的。年代数据的可靠性参照“2.2 U-Th 定年以及可靠性分析”进行可靠性评估。为了便于对海平面高程数据进行比较, 所有年代数据均转化为距今年代(cal a BP, 以公元 1950 年为起点)。

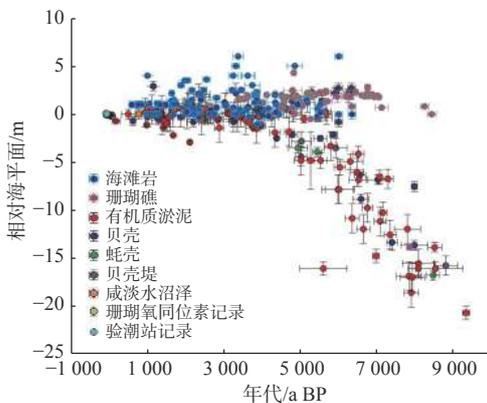


图 3 南海北部全新世海平面序列(校正前)<sup>[3, 6-7, 10-16, 33-51]</sup>

Fig.3 Holocene sea-level sequence in the northern South China Sea (before correction)<sup>[3, 6-7, 10-16, 33-51]</sup>

对这些海平面数据进行分析, 发现通过铀系测年得到的海平面标志物年代误差为 3~158 a, 形成年代越近误差越小, 通过  $^{14}\text{C}$  测年得到的年代误差为 61~508 a, 误差的影响因素却更多。这说明对珊瑚进行铀系测年获取的过去海平面变化信息更准确, 而较大的年代误差, 无疑导致海平面重建结果的不确定性, 并受到质疑。所以, 基于测年技术和精度的考虑, 海平面标志物是选择有机物 AMS $^{14}\text{C}$  和常规  $^{14}\text{C}$  测年的数据, 优先选择 AMS $^{14}\text{C}$  测年的

数据, 对于碳酸盐样品, 有 U-Th 测年的数据、AMS $^{14}\text{C}$  和常规  $^{14}\text{C}$  测年的数据, 优先选择 U-Th 测年的数据。

此外, 还采纳了新近发表的珊瑚氧同位素记录的海平面数据<sup>[32]</sup>。通过原文提供的珊瑚氧同位素记录和海平面计算公式, 可以获得公元 1850—2015 年期间的 166 个数据构成的海平面序列(附件: 南海北部海平面数据之珊瑚氧同位素记录)。

### 2.4 验潮站观测数据的收集和整理

验潮站观测数据来自 PSMSL (the Permanent Service for Mean Sea Level, <https://www.psmsl.org/>) 提供的年均海平面数据<sup>[50]</sup>。南海北部的验潮站主要分布在中国的汕尾、香港(尖鼻咀、北角、鲗鱼涌、闸坡)、澳门、北海、海口、东方、西沙以及越南 Hondau、Danang 等地(图 1)。理论上, 验潮站观测的海平面数据的选择主要考虑观测数据的连续性和时长以及验潮站处于开展过去海平面重建的区域并尽可能靠近研究点位<sup>[52]</sup>。本文选择了上述 12 个验潮站的 416 个海平面观测记录(附件: 南海北部海平面数据之验潮站记录)。这些验潮站的最早的观察记录始于公元 1925 年, 来自中国澳门验潮站; 而香港及西沙的验潮站一直更新到 2020 年。根据乐远福等<sup>[52]</sup> 的处理方法, 各验潮站潮位数据均以年均值进行比较, 以线性回归求出上升率。通过研究区域最近的验潮站观测记录进行对比, 可以验证地质记录的海平面曲线的可靠性<sup>[53]</sup>。

### 2.5 构造校正和误差分析

海平面重建的可靠性不仅取决于标准化方法的应用, 还充分考虑了所有年龄和垂直误差<sup>[54]</sup>。作为远场区域, 虽然有研究认为南海北部海岸构造稳定<sup>[3, 55]</sup>, 但在进行高分辨率海平面重建时应考虑垂直构造<sup>[14]</sup>。据报道, 除了在过去几十年记录到轻微的沉降外<sup>[56]</sup>, 南海北部雷州半岛的珊瑚礁区自全新世以来的构造隆升速率为  $0.02 \sim 0.05 \text{ mm/a}$ <sup>[57-58]</sup>, 北部湾及其他地区的构造抬升速率为  $0.020 \text{ mm/a}$ <sup>[59-60]</sup>。由此可见, 在稳定的大构造背景下, 即使构造作用变化速率很小, 在全新世几千年的过程中, 局部地区的高程也会发生变化。因此, 本文以上述速率的平均值  $0.035 \text{ mm/a}$  计算雷琼区域海平面受构造抬升运动的影响。对所有高程数据进行构造校正和数据的相互验证, 然后进行过去海平面重建, 所得结论将为过去海平面变化状况提供更为客观的认识。

一般而言,古海平面的垂直高度误差主要是依据海平面标志物的指示意义/范围来确定。误差还包括海平面研究样品的采集和处理过程中固有的各种因素,比如,测量本身的误差、样品的厚度、分样误差等。可以利用以下误差公式<sup>[61]</sup>计算:

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

式中: $E$ 为海平面标志物所代表的相对海平面(Relative Sea Level, RSL)的总误差;

$e_1 \dots e_n$ 分别为各种误差来源。

需要强调的是,对于南海北部沿岸不同海平面标志物反映的海平面高程数据,分析它偏离所有海平面高程平均值( $R$ )的程度。如果偏离程度低并使 $R^2$ 更趋近于1,可能说明该组数据真实,予以保留,反之去除。此外,对海平面标志物数据进行比较,我们还发现不同海平面标志物的高程误差存在较大差异。例如珊瑚指示的海平面高程误差为0.08~0.1 m,其他海平面标志物指示的海平面误差则介于0.1~0.7 m,有些甚至超过1 m达到3 m。倘若海平面标志物本身指示的海平面高程都不到1~3 m,如此之大的误差,其重建结果无疑是存在很大不确定性的,其可靠性也让人质疑。由此可见,选用不同的海平面标志物和采用不同的重建方法(包括高程测量、测年方法、构造校正、潮汐差和相应的误差等)可能是导致关于南海北部全新世海平面重建结果存在差异的重要原因。因此,对于那些重建结果差异较大和误差较大的数据(比如年代误差>200 a和高程误差>0.7 m),本文不做考虑。

## 2.6 全新世海平面重建

本文以发育于礁坪的已经死亡的大型块状原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁的年代和高程为依据,开展南海北部全新世海平面变化的研究。大型块状原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁指示的真实古海平面是根据现代活滨珊瑚和滨珊瑚微环礁顶面高度相对于现代海平面的高差( $H_{modern}$ )、大型块状原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁顶面相对于现代活滨珊瑚和滨珊瑚微环礁顶面的高度( $H_{fossil}$ ),和构造抬升校正的高度( $H_{tectonic}$ )来计算的。

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

式中: $H_{modern}$ 、 $H_{fossil}$ 和 $H_{tectonic}$ 分别为相对于同一潮汐基准表示(例如,1985年国家高程基准)。如果海平面值为正,则表明当时海平面高于当前(0 m)。由于大型块状原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁的侵蚀

高度无法准确估算,因此,本文计算的海平面代表当时最低的古海平面高程。

## 3 结果

经过可靠性分析并进行年代数据和高程数据的校正后,汇编了包括监测记录较为连续的北海、海口、东方和西沙等12个验潮站的416个现代海平面记录和新增的6个海平面数据以及263个已发表的海平面数据(包括166个珊瑚氧同位素记录的海平面数据),共计679个(附件:南海北部海平面数据之校正和评估后的数据)。

新增珊瑚样品的6个U-Th测年结果显示3块滨珊瑚(微环礁)顶部年龄处于(5 385 ± 14)~(3 556 ± 16) cal a BP之间(校正后,相对于公元1950年)。对新增样品 $\delta^{234}\text{U}$ 结果进行分析,发现其 $\delta^{234}\text{U}$ 介于(147.2‰ ± 1.1‰)~(151.2‰ ± 1.3‰),均处于现代海水(144‰ ± 2‰)和现代珊瑚(156‰ ± 6‰)之间,而且其U浓度( $\times 10^{-6}$ )平均值为 $2.9979 \times 10^{-6}$ ,与南海北部校正后的291个全新世珊瑚样品U浓度( $3.1135 \times 10^{-6}$ )十分接近。可见珊瑚样品保持封闭,并未发生成岩作用,新增的6个U-Th年代数据是可信的。

此外,根据其高程和U-Th测年数据,可以推测南海北部海南铜鼓岭在5 314~5 253 cal a BP期间海平面高程为2.08~2.09 m。在3 613~3 485 cal a BP时,当地的海平面在1.62~1.83 m波动。此外,和相邻区域珊瑚记录的海平面高程进行对比,相同时代的海平面基本上和时小军<sup>[9]</sup>和YU<sup>[11]</sup>一致,进一步说明新增U-Th测年数据和重建的海平面是可信的。

通过误差计算公式,可以计算获得新增珊瑚样品记录的海平面总误差。例如,新增加的珊瑚样品本身具有0.08 m的高程误差(由代表指示范围的27个现代活珊瑚),而RTK测量仪器误差为0.05 m,采样厚度0.01 m,因此6个新增加的海平面数据的总误差为±0.10 m。

对校正后的海平面数据进行统计(附件:南海北部海平面数据之校正和评估后的数据),如图4所示,有如下发现:各海平面标志物在南海北部都有发育,但更多的是珊瑚礁和海滩岩。此外,这些海平面标志物主要形成于6 500~1 750 cal a BP,然而南海北部早全新世和最近1 000 a的海平面标志物寥寥无几。究其原因,可能是受自然因素和人为

因素所影响。例如, 南海北部早全新世的火山运动和风暴潮较为频繁<sup>[36, 62]</sup>, 可能使已形成的海平面标志物遭受撞击或发生位移。而近代形成的海平面标志物可能因频繁的人类活动, 发生变化不适合发育或形成新的海平面标志物或海平面标志物遭受破坏(如海滩岩)<sup>[53]</sup>。还可能包括野外采样时遗漏了该时期的海平面标志物的采集。

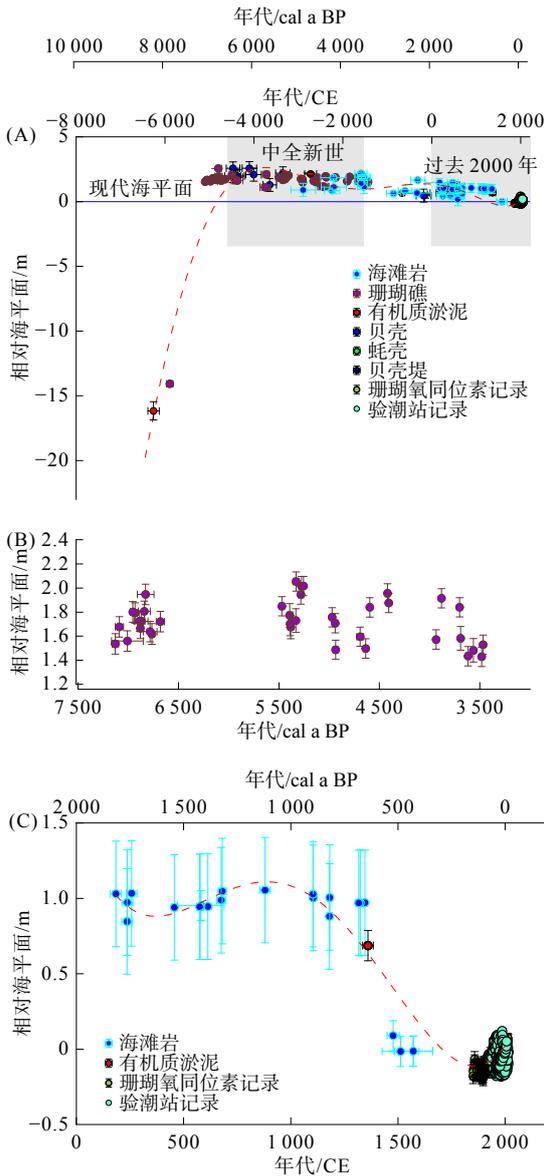


图 4 南海北部全新世海平面序列  
(校正后)<sup>[3, 6, 10-16, 33-35, 37-43, 46, 50]</sup>

Fig. 4 Holocene sea-level sequence in the northern South China Sea (after correction)<sup>[3, 6, 10-16, 33-35, 37-43, 46, 50]</sup>

如图 4A 所示, 校正和评估后保留的数据(附件: 南海北部海平面数据之校正和评估后的数据)显示在全新世早期, 南海北部的相对海平面从(8 211 ± 128) cal a BP 就已经处于快速上升阶段了。并在 6 000~7 000 cal a BP 期间上升到了 1.5 ~ 2.5 m 的

高度, 随后, 中全新世至今总体上呈现出波动下降的趋势。值得注意的是, 其中珊瑚记录的南海北部相对海平面(附件: 南海北部海平面数据之珊瑚礁记录的南海北部中全新世海平面, 图 4B)由(7 846 ± 67) cal a BP 的(-14.08 ± 0.2) m 迅速上升至(7 050 ± 32) cal a BP 的(1.54 ± 0.09) m, 平均速度约为 19.6 mm/a。这表明南海北部海侵的开始时间至少为(7 846 ± 67) cal a BP, 可能记录了全新世早期南海北部可能出现的最低海平面。而珊瑚记录的全新世早期记录的海平面快速上升速度也可以从一些其他海平面标志物的研究中得到验证(例如 ZONG<sup>[3, 60]</sup> 和 XIONG<sup>[15]</sup>)。此后, 在(7 050 ± 32)~(3 390 ± 12) cal a BP, 珊瑚记录的南海北部相对海平面在(1.43 ± 0.08)~(2.05 ± 0.08) m 波动(附件: 南海北部海平面数据之珊瑚礁记录的南海北部中全新世海平面, 图 4B)。可以说中全新世高海平面维持了近 2 660 年。在这一高位之后, 海平面逐渐下降, 从大约(3 390 ± 12) cal a BP 的(1.53 ± 0.08) m 开始波动下降至(1 766 ± 35) cal a BP 的(1.03 ± 0.35) m (图 4B)。

校正和评估后保留的数据显示在全新世晚期过去 2 000 a 的海平面(附件: 南海北部海平面数据之过去 2 000 a 海平面数据)呈现出阶段性变化。如图 4C 所示, 约 1 713~533 cal a BP, 海平面有所下降, 但仍比现在的高 0.95 m。之后, 海平面迅速下降, 并在公元 1512—1572 年下降到现在的高度。近现代以来, 验潮站观察记录与珊瑚氧同位素记录显示在公元 1897 年下降到-0.19 m, 然后海平面快速上升, 直到公元 2020 年的 0.076 m(图 4C)。

总的来说, 校正和可靠性评估后的 263 个地质记录(包括 166 个珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  海平面数据, 附件: 南海北部海平面数据之校正和评估后的数据)反映的南海北部全新世以来的海平面呈现出(早全新世)先升(中晚全新世)后波动下降然后(近现代)再升的阶梯式变化过程。尤其是过去 2 000 a 的海平面变化趋势(附件: 南海北部海平面数据之过去 2 000 a 海平面数据)。

过去 2 000 a 的海平面整体呈现出阶段变化。首先呈现出短暂下降的趋势, 然后是约 500 a 的上升过程, 接着是长达千年的下降过程, 之后验潮站记录显示为海平面的快速上升过程。从海平面记录的时间分布来看, 28 个地质记录处于公元 184—1793 年, 平均分辨率为 58 a。在公元 1346 年之前, 南海北部海平面比现今高约 0.95 m, 并在(0.84 ~

1.05)m $\pm$ 0.35 m 波动。在公元 880 年,海平面处于过去 2 000 a 的最高点(1.05  $\pm$  0.35 )m,之后海平面快速下降。海平面以 5.92 mm/a 的速率从公元 1346 年的(0.97  $\pm$  0.35) m 下降到公元 1572 年的(-0.01  $\pm$  0.1)m,然后海平面继续下降到公元 1850 年的(-0.18  $\pm$  0.05)m。之后半个世纪基本保持水平窄幅波动,直到公元 1897 年(-0.19  $\pm$  0.05)m。这也是珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录的过去 2 000 a 海平面的最低记录。自此以后,海平面总体上呈现波动上升的趋势。需要注意的是,在 1925 年以后有了器测记录,我们发现同时期的珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录的海平面和验潮站记录的海平面波动幅度和变化趋势和基本上基本一致,可以进一步说明珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录的海平面是可信的。

如图 5 所示,集成的海平面序列显示在公元 1897–2020 年,南海北部海平面波动上升,最低点出现于公元 1963 年,为-0.144 m,最高值在 0.157~0.173 m 波动变化。自 1925 年以后有了器测记录,我们对这些数据进行集成分析,结果显示在公元 1925–2020 年的海平面总体上呈现波动上升的趋势,总体上升了约 0.27 m,上升速率为 2.35 mm/a。如若以此速率估算公元 2100 年南海北部的海平面,意味着海平面还将上升约 0.19 m。进一步分析,我们还发现在公元 1975–1998 年,南海北部海平面波动比较规律,10 年间的震荡幅度为 0.008~0.012 m。进入 21 世纪后,海平面迅速上升,尤其是公元 1980–2020 年期间,珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录重建的海平面序列基本处于验潮站观察的海平面高度范围,总体上重叠,而且两者均呈现出快速上升的趋势,上升速率分别达到 3.44 mm/a 和 3.66 mm/a,若取两者平均值,意

味着南海北部过去 40 a 海平面上升速率达到 3.55 mm/a。如若以上述速率 3.55 mm/a 估算公元 2100 年南海北部的海平面,意味着 80 a 后南海北部海平面还将继续上升约 0.28 m。

## 4 讨论

### 4.1 海平面高程差异的原因分析

从图 3、4 可以明显的发现目前关于南海北部全新世海平面的重建结果是存在极大的差异。20 世纪 80 年代有学者对海南岛南岸 9 块珊瑚样品(其中 7 块为滨珊瑚)进行  $^{14}\text{C}$  测年和高度测量,结果显示该地区早在(8 235  $\pm$  105) a BP(未校正)古海平面就已经到达比现今海平面高 22 m 的位置,并在(5 025  $\pm$  85) a BP(未校正)下降到-3.2 m,同时,年代结果认为早全新世珊瑚礁形成年代为(8 420  $\pm$  115) a BP<sup>[4]</sup>。但最近西沙群岛琛航岛珊瑚礁钻孔高精度铀-钍 U-Th 测年结果指示该地区早全新世(7 914  $\pm$  67) a BP(相对于公元 2018 年)海平面比现代海平面低约 13.8 m(图 3),并进一步推测这才是南海珊瑚礁的起始发育时间<sup>[5-6]</sup>。虽然上述研究提到的珊瑚礁发育起始年代与全球范围内全新世礁体起始发育时间相吻合<sup>[5,59]</sup>,为理解早全新世南海珊瑚礁的发育历史提供了背景资料,然而海平面重建结果却存在较大分歧,因此还需要进一步深入研究。

基于雷琼地区 4 个珊瑚礁  $^{14}\text{C}$  测年和高程,有研究指出在(7 120  $\pm$  165)~(4 010  $\pm$  110) a BP(未校正)期间该地区中全新世海平面在 2~2.5 m 波动<sup>[63]</sup>。还有学者通过对雷州半岛南部沿海的古珊瑚礁的礁顶面高程测量和  $^{14}\text{C}$  测年,推算中全新世(6 550  $\pm$  130)~(5 300  $\pm$  80) a BP(未校正)期间的海平面比现今海平面高约 3~4 m<sup>[7]</sup>。在不考虑中全新世以来地壳升降幅度的情况下,以上高海平面得到了该地区 7 块滨珊瑚的 16 个 U-Th 年龄结果的认同,并进一步推测南海北部(7 240  $\pm$  319)~(5 009  $\pm$  54) a BP(相对于公元 2001 年)高出现代海平面至少 2.9~3.8 m<sup>[8]</sup>。在此基础上,有学者根据 13 个表层珊瑚礁样品的 U-Th 年代开展进一步研究,指出中全新世距今 7 000~6 700 cal a BP 是整个全新世最高海平面,并基本形成了现代珊瑚礁的地貌格局<sup>[64]</sup>。类似的情况在更低纬度的鹿回头半岛也有记录,例如,礁坪上 16 块原生珊瑚礁的  $^{14}\text{C}$  测年

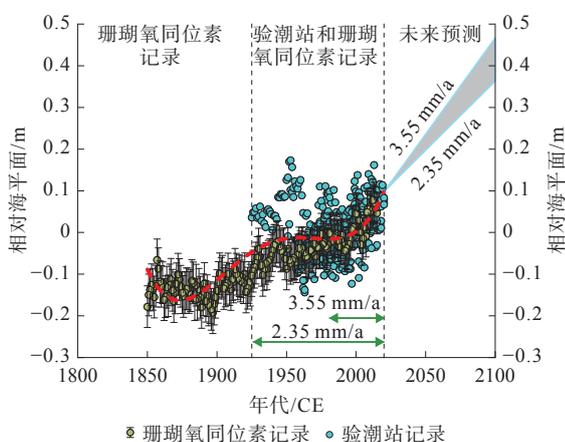


图 5 南海北部工业革命后海平面序列<sup>[41,50]</sup>

Fig.5 Post-industrial sea-level sequence in the northern South China Sea<sup>[41,50]</sup>

结果显示约 81% 的样品年龄分布在 7 300~6 000 cal a BP 的高海平面<sup>[65]</sup>。此外, 进一步分析可以发现这一时期珊瑚礁的发育至少可分为 9 个阶段以及 9 次突发性短时间尺度大幅度的低温事件, 这为全新世气候适宜期的高频气候不稳定性演化模式提供了新的证据, 也进一步说明了珊瑚礁是高分辨率气候变化的良好载体<sup>[58]</sup>。

然而, 与上述 3~4 m 高海平面观点不一致的是, YU<sup>[11]</sup> 结合不同时期大型滨珊瑚微环礁相对现代微环礁的顶面高程和 5 个微环礁的 18 个 U-Th 年龄和微地貌结构, 指出南海北部雷州半岛在 (7 050±32)~(6 603±41) cal a BP 海平面比现今高 (1.71±0.08)~(2.19±0.08)m (图 3), 并清楚地展示了至少 4 次百年尺度的周期性波动。还有研究基于海南岛琼海青葛沿岸 19 块原生大型滨珊瑚 U-Th 定年和高精度高程测量, 认为在 (5 451±25)~(3 448±12) a BP (相对于公元 2008 年), 海平面比现在高 (1.55±0.08)~(2.24±0.08)m<sup>[10]</sup>。同时, 时小军<sup>[9]</sup> 基于不同海平面标志物的高度和出现时间, 也确认了南海周边中全新世 (约 7 000~5 500 cal a BP) 存在最高可能比现在高 2~3 m 的高海平面。这与新近马来西亚半岛 6 500~4 500 cal a BP 海平面在 1.5~2 m 波动的观点<sup>[66]</sup> 相吻合。这说明南海北部中全新世高海平面的形成和出现与南海周边区域基本同步, 极有可能具有全球背景。

关于晚全新世的海平面变化历史, 有学者通过雷州半岛珊瑚礁区 7 块滨珊瑚的 16 个 U-Th 年龄与其他研究类比后推断南海北部 (2 539±24)~(1 511±23) a BP (相对于公元 2001 年) 高出现代海平面至少 2.9~3.8 m<sup>[8]</sup>。还有研究基于雷州半岛徐闻珊瑚礁区海滩沉积 4 个不同层位<sup>14</sup>C 测年推断距今 1 710~1 235 a 前<sup>14</sup>C 年龄: (2 135±65)~(1 665±70) a BP 海平面持续上升, 距今约 1 200 年时比现在高约 1.28 m, 之后海平面开始下降, 至今海岸线后退了约 2.1 m, 并认为珊瑚礁和海滩地貌发育的雷州半岛具有进一步揭示全新世海平面变化规律的潜力<sup>[67]</sup>。本区原生滨珊瑚的 U-Th 年代也表明 (1 511±23) a BP (相对于公元 2001 年) 是本区珊瑚礁发育和海平面比现在高的时期<sup>[8]</sup>。此外, 新近涠洲岛不同层位的 14 个海滩岩样品 (珊瑚碎屑) 的高精度 U-Th 测年和高程研究显示, 距今 (1 766±35)~(604±10) cal a BP 前, 南海北部海平面依然比现在高 (0.82±0.35)~(1.17±0.35) m<sup>[12-13]</sup> (图 2), 这为南海北部提供了晚全新世高海平面及其波动的新

证据。

以上关于全新世不同时期海平面变化的研究成果, 为了更好地理解空间变量的海平面变化历史提供了大量的依据, 同时也对南海北部过去海平面变化历史和规律有了更深刻的认识。从测年材料来看, 主要是珊瑚礁、滨珊瑚、滨珊瑚微环礁、枝状珊瑚和珊瑚碎屑。大型块状原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁反映的海平面范围非常小<sup>[11]</sup>, 且具有快速的生长率、清晰的年生长纹层和持续的生长时间的特点, 无疑是开展海平面变化研究的最佳选择。然而, 从年代数据的分布特征来看, 早全新世至今的珊瑚 U-Th 年代数据都有报道, 但是全新世早中晚不同时期的海平面记录并不连续或依然存在缺失。其中海平面年代大多落在中全新世, 早全新世和晚全新世记录并不多或分布不均。

从海平面高度时空变化的角度来看, 上述研究关于南海北部全新世海平面的重建结果存在巨大的差异。究其原因, 可能与海平面重建方法有关。其中最关键的包括海平面标志物的高程估算以及采用的测年方法。在海平面高程估算方法上, 以珊瑚为例, 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进行海平面重建<sup>[7]</sup>, 也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<sup>[11]</sup>, 还有研究以平均低潮作为滨珊瑚的生长上限进行海平面重建<sup>[14]</sup>。因为采用的方法不同, 导致海平面重建结果相差甚远。所以有学者对出露的死亡滨珊瑚是否揭示中全新世高海平面提出了质疑<sup>[13]</sup>。这说明目前对作为海平面标志物的滨珊瑚或滨珊瑚微环礁顶面高程与现代海平面之间的关系以及潮位指示范围还不明确。因此, 对南海北部地区进一步补充珊瑚样品并开展一系列 U-Th 年代测试和顶面高程测量, 明确其顶面高程与现代海平面之间的关系以及潮位指示范围。无论选用哪种海平面标志物进行海平面重建, 首先要明确选用的海平面标志物的指示意义, 其次提高定年精度和分辨率以及减少误差和结果的不确定性, 增加重建结果的可靠性。还有构造校正、数据的相互对比和可靠性验证, 同时补充更多的记录来理清存在的分歧, 进而对存在争议的海平面历史进行梳理。

在测年方法方面, 有研究表明珊瑚样品的<sup>14</sup>C 测年结果系统性的比其相应的 U-Th 测年结果年轻约 200~1 000 a<sup>[8, 11, 32, 58, 68-69]</sup>, 甚至超过 3 000~3 500 a 的差异<sup>[70]</sup>, 其影响程度随着时间的变化而有所不同, 即便校正后仍然会存在 80~600 a 的差别<sup>[23, 69]</sup>, 这

可能受海洋碳库效应的时空变化或周围环境改变以及晚期成岩作用的影响<sup>[23, 32, 68-69]</sup>。因此,有学者提醒对珊瑚<sup>14</sup>C年代的环境解释需要格外小心<sup>[71]</sup>。此外,不同软件或不同版本软件对全新世<sup>14</sup>C年龄进行校正,校正的年代数据也存在10~1300 a的差异<sup>[53, 72]</sup>。进一步对全新世珊瑚样品年代学分析比较,发现U-Th年龄符合树木年代学校准,它表明珊瑚的U-Th年龄是准确的,并证实应用于珊瑚的U-Th地质年代计的精度和准确性<sup>[23]</sup>。这表明珊瑚U-Th测年方法的历史时期海平面重建结果要比<sup>14</sup>C测年方法的海平面更为可信。这也为开展海平面重建时选用U-Th测年技术建立时间标尺提供了理论依据。

#### 4.2 珊瑚礁记录的中全新世海平面波动与区域对比

珊瑚礁主要分布在温度 $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的赤道及其附近的热带、亚热带地区。随着全新世海平面的迅速上升,珊瑚礁以岸边基岩为附着基底开始大面积发育,代表南海北缘和世界珊瑚礁重要的分布带<sup>[24, 73-74]</sup>形成。因为珊瑚礁的发育严格受海平面制约,而造礁珊瑚(例如滨珊瑚)具有清晰的年生长纹层和持续的生长时间,其骨骼(成分为文石)的地球化学组成对气候环境的变化敏感<sup>[75-76]</sup>,因此在高分辨率海平面和热带海洋气候环境演变研究方面具有得天独厚的条件<sup>[74, 76-77]</sup>。例如,出露的礁坪面基本上代表了整个礁体的顶面,被认为是过去古海平面的珊瑚生长上限或大潮低潮面的标志<sup>[7]</sup>,这就为开展过去海平面变化研究以及珊瑚礁发育历史提供了理想的研究材料。此外,还可以利用珊瑚骨骼开展同位素精确定年和地球化学研究,不仅可以为气候环境演变研究提供良好的时间标尺,还能高分辨率揭示热带海洋气候环境演变过程,进而与其他古气候记录相对比,探讨相关气候系统的变化特征和响应机制<sup>[76-78]</sup>。

尤其是滨珊瑚和滨珊瑚微环礁(microatoll,其顶面的珊瑚已经死亡,四周被呈环带状的活珊瑚围绕,通常是由顶面已死亡但仍保持侧向生长呈环带状的大型块状滨珊瑚或其他珊瑚发育而成)等大型块状珊瑚构成的礁顶面能够随着海平面的变化而变化。这种珊瑚的礁顶面能够随着海平面的变化而变化,海平面保持稳定便停止向上生长,一旦暴露超过1 h,尤其是阳光的暴晒,会导致珊瑚的顶面死亡。有调查研究表明,这种珊瑚生长上限充其量只能达到大潮低潮面,普遍在大潮低潮面以下1 m<sup>[7, 64]</sup>,

一旦海平面保持稳定,珊瑚会转为横向发育并形成平坦的礁顶面,并记录了当时的海平面高度。特别是微环礁的形成严格受海平面控制的结果<sup>[79-80]</sup>。当海平面保持稳定的时候,大型块状滨珊瑚生长至或接近生长上限时(例如在大潮低潮面1 m的位置),会转为横向发育并形成平坦的礁顶面。当海平面下降时,珊瑚生长上限也会随之降低,顶部则因为暴露在空气中死亡,珊瑚会在一个相对较低的位置上横向生长,于是围绕早先已死亡的珊瑚顶面形成环带状结构的新的礁顶面。当海平面上升时,珊瑚沿着原来礁体外围边缘向上生长,在原来的礁顶面上发育突起的环带状结构,形成新的礁顶面。其中同一微环礁不同方位的顶面高程变化于2~3 cm,而同一珊瑚礁区不同微环礁个体的顶面变化为 $\pm 5\sim 8.35\text{ cm}(2\sigma)$ ,误差最低可 $<3\text{ cm}$ ,就像潮汐记录站一样,被认为是热带区域最有用和最精确的海平面高程标志物<sup>[11, 80-81]</sup>。可以见大型块状滨珊瑚是较为精确的海平面标志物。由这些珊瑚礁顶面构成的礁坪面是古海平面的极好证据。

目前珊瑚礁记录的海平面变化研究多以发育于礁坪的大型块状原生滨珊瑚或滨珊瑚微环礁<sup>[7, 8, 58, 79, 82-88]</sup>。如上所述,滨珊瑚和滨珊瑚微环礁等大型块状珊瑚构成的礁顶面能够随着海平面的变化而变化。因而现在高出大潮低潮面的礁坪上常常可以见到许多已经死亡的大型块状原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁,表明其发育时的海平面高于其现在的高程位置。准确测定其顶面年代和相对活珊瑚的生长上限或现今大潮低潮面的相对高程就可以推测其发育时期的海平面高程<sup>[7, 89]</sup>。南海北部地区远离板块边界,虽然有报道指出南海北部雷州半岛的珊瑚礁区自全新世以来的构造隆升速率为 $0.02\sim 0.05\text{ mm/a}$ <sup>[57-58]</sup>,但是,其速率远小于该区珊瑚礁自身的生长速率,因而珊瑚礁的抬升/生长主要受海平面变化的影响为主<sup>[58]</sup>。

对汇编的39组珊瑚海平面数据进行年代和构造校正后(附件:南海北部海平面数据之珊瑚礁记录的南海北部中全新世海平面),在全新世中期( $7\ 050\pm 32$ )~( $3\ 390\pm 12$ )cal a BP的相对海平面在 $(1.42\pm 0.08)$ ~ $(2.05\pm 0.08)\text{ m}$ 波动,这近2660 a期间南海北部的相对海平面波动幅度约为0.63 m,但是至少出现了3个高海平面时期,分别是 $(7\ 050\pm 32)$ ~ $(6\ 603\pm 41)$ cal a BP、 $(5\ 393\pm 25)$ ~ $(4\ 328\pm 19)$ cal a BP和 $(3\ 856\pm 12)$ ~ $(3\ 390\pm 12)$ cal a BP。尽管不同地区的海平面在时间和高度上存在一定

的差异,但是期间南海北部地区大体上与南海周边海岸的海平面记录相一致<sup>[66, 90-95]</sup>,这说明中全新世南海北部高海平面的形成和出现与南海周边地区基本同步,极有可能具有全球背景。例如,泰国和越南在 8 000~7 000 cal a BP 记录了全新世海侵的证据,并在约 6 000 a 达到接近 1.5 m 的峰值<sup>[92, 94]</sup>。类似的,马来西亚半岛东海岸在约 7 000 cal a BP 海平面在 1.4~3 m 波动<sup>[95]</sup>,然后在 6 500 cal a BP 达到 1.5 m,并在约 4 500 cal a BP 上升到 2 m<sup>[66]</sup>。此外,在印度尼西亚勿里洞岛记录了中全新世 6 800~6 600 cal a BP 海平面高达 1.8 m,然后下降到 6 300 cal a BP 的 1.6 m<sup>[93]</sup>。值得注意的是,印度尼西亚的海平面记录同样揭示全新世中期海平面的振幅也是 0.6 m<sup>[96]</sup>,其波动的幅度和时间与南海北部相似。

第四纪以来全球气候频繁变化,冰消期和间冰期交替循环,南海北部沿岸甚至世界范围内都发生了相应的海平面波动和海岸线变化<sup>[97]</sup>。末次冰期冰盛期,南海北部沿岸完全显现为大陆<sup>[98-101]</sup>。此后,两极冰盖的衰减消融导致全球平均海平面在这段变暖期间上升了约 80 m<sup>[102]</sup>。以此推测,在全新世早期由于海平面上升,南海北部尤其是雷琼区域在中全新世开始形成边缘礁<sup>[3, 15]</sup>和适宜珊瑚等海平面标志物生长发育的环境。南海北部珊瑚礁在(7 062±100)~(3 390±12) cal a BP 广泛发育,可能表明温暖的气候有利于该地区珊瑚的繁荣。在此期间,太阳辐射增强,东亚夏季风较强<sup>[103]</sup>。受地球轨道变化的影响,北半球太阳辐射增强引起的季风环流在 9 000~6 000 cal a BP 达到最强阶段<sup>[104]</sup>。这几个关键机制引起的气候变化(例如全球海温上升和风暴增加等<sup>[105]</sup>)对南海北部珊瑚礁发育产生潜在影响,同时引起区域海平面发生升降变化。

### 4.3 未来海平面变化趋势预测

气候变化引起全球环境系统更迭,而全球变暖加速全球海平面上升<sup>[106]</sup>。根据南海北部珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  和验潮站记录集成重建的海平面结果,在公元 1925—2015 年,南海北部海平面平均上升速率为 2.35 mm/a。与采用卫星数据和沿海岛屿海平面测量数据并进行冰川均衡调整后得到的公元 1936—2009 年全球海平面平均上升速率(1.8±0.3)mm/a<sup>[107]</sup>相比,略微偏高。但是,通过计算图 5 中珊瑚氧同位素和验潮站记录的海平面数据显示,南海北部海平面在公元 1980—2020 年平均上升速率为 3.55 mm/a。有资料显示公元 1980—2021 年,中国沿海海平面上

升速率为 3.4 mm/a,尤其是过去 10 年(公元 2012—2021 年)中国沿海海平面均处于过去 40 年高位<sup>[108]</sup>。可见,我们估算的海平面上升速率与中国沿海海平面上升速率相比基本一致是可信的。

随着监测技术与算法的发展与进步,预测中国沿海未来海平面变化趋势的方法更加丰富,得出的海平面变化速率存在较大差异。例如,基于 MK (Mann-Kendall)方法对南海海平面变化进行显著性检验时,南海在 1970—2013 年和 1993—2013 年海平面平均上升速率为 2.4 和 3.9 mm/a<sup>[109]</sup>。也有研究基于 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)模式耦合强度 RCP (Representative Concentration Pathways)为 2.6 时对南海未来 80 年海平面进行估算,届时将上升 0.29 m<sup>[110]</sup>。此外,还有学者直接利用多代卫星公元 1993—2015 年测高数据,采用经验模态分解算法计算的现代南海海平面平均上升速率为 2.4 mm/a<sup>[111]</sup>。以上速率的估算,基本上与本文基于南海北部珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录与验潮站记录计算得到的公元 1925—2015 年南海北部海平面平均上升速率(2.35 mm/a)一致,也和公元 1936—2009 年全球海平面平均上升速率<sup>[107]</sup>接近。当然,新近国家海洋局发布的公元 1980—2021 年中国沿海海平面上升速率为 3.4 mm/a<sup>[108]</sup>,若以此计算中国沿海未来 80 年的海平面,届时将上升 0.27 m。通过汇编南海北部珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录与验潮站记录,分别以南海北部公元 1925—2015 年的海平面平均上升速率(2.35 mm/a)和公元 1980—2015 年海平面平均上升速率(3.55 mm/a)估算,南海北部未来 80 年海平面将继续上升 0.19 m~0.28 m。这不仅和 CMIP5 模式耦合强度 RCP 2.6 时估算的未来海平面高度范围一致,也与我们对北大西洋沿岸未来海平面上升高度的估算大致相同,更与国家海洋局发布的海平面平均上升速率计算未来 80 年海平面上升高程结果接近。在当今气候变暖背景下,目前(公元 1980—2020 年)海平面上升处于加速状态,并将在未来持续快速上升,很可能呈现不可逆的趋势,这势必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巨大威胁。尤其是在南海北部沿海低洼地区开展大型工程建设时,需要考虑未来海平面上升带来的不利影响。

## 5 结论和展望

本研究通过 3 块滨珊瑚(微环礁)顶部高程进

行高精度测量,开展高精度 U-Th 年代测试,新增 6 个珊瑚高精度 U-Th 年代和高程数据,并对收集的已发表且重新校正后的南海北部珊瑚为主的海平面数据加以比较和相互验证。同时对监测记录较为连续的 12 个验潮站的现代海平面观测资料,进行整理和进一步验证重建结果的可靠性。根据汇编的 679 个校正和可靠性评估后的海平面数据,重建了南海北部地区全新世以来,尤其是过去 2 000 a 的海平面变化历史。探讨导致海平面重建结果出现较大差异的原因,进而预测公元 2100 年该地区海平面可能上升的幅度。得出如下结论:

(1) 尽管不同地区的海平面数据在时间和高度上存在一定程度的差异,但是期间南海北部地区大体上与南海周边海岸的海平面记录相一致,这说明中全新世南海北部高海平面的形成和出现与南海周边地区基本同步,极有可能具有全球背景。

(2) 在早全新世期间,珊瑚礁记录的南海北部相对海平面从  $(7\ 846 \pm 67)$  cal a BP 的  $(-14.08 \pm 0.2)$  m 迅速上升至  $(7\ 050 \pm 32)$  cal a BP 的  $(1.54 \pm 0.08)$  m, 平均速度约为 19.6 mm/a。此后,在中全新世大约  $(7\ 050 \pm 32) \sim (3\ 390 \pm 12)$  cal a BP, 南海北部相对海平面在  $(1.42 \pm 0.08) \sim (2.05 \pm 0.08)$  m 内波动。可以说中全新世高海平面维持了近 2 660 a。晚全新世期间,从大约  $(3\ 390 \pm 12)$  cal a BP 的  $(1.52 \pm 0.08)$  m 开始降至  $(1\ 766 \pm 35)$  cal a BP 的  $(1.03 \pm 0.35)$  m。之后,海平面迅速下降,并在公元 1512—1572 年下降到现在的高度。验潮站观察记录与珊瑚氧同位素记录显示在公元 1897 年下降到  $-0.19$  m, 然后海平面快速上升,直到现在的  $0.076$  m。

(3) 南海北部过去 2 000 a 海平面整体呈现出阶段变化。首先,在公元 0—350 年海平面波动下降,在公元 350—850 年海平面快速上升。在公元 880 年,海平面处于过去 2 000 a 的最高点  $(1.05 \pm 0.35)$  m, 随后海平面继续下降至公元 1850 年的  $(-0.18 \pm 0.05)$  m。之后这半个世纪基本保持水平窄幅波动,直到公元 1897 年  $(-0.19 \pm 0.05)$  m 后,海平面波动上升持续至公元 2020 年的  $0.076$  m。值得注意的是,在公元 1925—2015 年,南海北部海平面平均上升速率为 2.35 mm/a, 1980—2020 年海平面平均上升速率为 3.55 mm/a, 与中国沿海海平面上升速率基本相同,若以此速率估算公元 2100 年南海北部海平面将比现今海平面高  $0.19 \sim 0.28$  m。因此,在南海北部沿海低洼地区开展大型工程建设时,需要考虑未来海平面上升带来的不利影响。

(4) 基于不同海平面标志物和采用不同重建方法是南海北部全新世以来海平面重建结果区域差异的主要原因。其中关键的是海平面标志物的高程估算以及采用的测年方法。以珊瑚礁开展海平面重建为例,从测年的精度和可靠性角度来看,U-Th 测年优于  $^{14}\text{C}$  测年。从年代数据的分布特征来看,早全新世至今的珊瑚 U-Th 年代数据都有报道,但是全新世早中晚不同时期的海平面记录并不连续或依然存在缺失。其中海平面年代大多落在中全新世,早全新世和晚全新世记录并不多或分布不均。因此,有必要同时寻找更多的记录来理清存在的分歧。若能开展更多原生滨珊瑚和滨珊瑚微环礁年代测定和高程测量,明确其海平面指示意义,采用标准化的海平面重建方法对南海北部过去海平面历史进行梳理,必将进一步补充和完善南海北部高分辨率海平面变化资料库。

(文中所标注的“附件”因数据量过大而不便排版,可到本刊官网查询。)

#### 参考文献:

- [1] YAN H, SUN L G, WANG Y H, et al. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2, 000 years from precipitation proxies[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(9): 611-614.
- [2] YUE Y F, YU K F, TAO S C, et al. 3500-year western Pacific storm record warns of additional storm activity in a warming warm pool[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 521: 57-71.
- [3] ZONG Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China[J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 55-67.
- [4] 赵希涛, 张景文, 李桂英. 海南岛南岸全新世珊瑚礁的发育[J]. *地质科学*, 1983, 2(1): 51-60, 111.
- [5] MA Y F, QIN Y M, YU K F, et al. Holocene coral reef development in Chenhang Island, Northern South China Sea, and its record of sea level changes[J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106593.
- [6] 覃业曼, 余克服, 王瑞, 等. 西沙群岛琛航岛全新世珊瑚礁的起始发育时间及其海平面指示意义[J]. *热带地理*, 2019, 39(3): 319-328.
- [7] 聂宝符, 陈特固. 雷州半岛珊瑚礁与全新世高海面[J]. *科学通报*, 1997, 42(5): 511-514.
- [8] 赵建新, 余克服. 南海雷州半岛造礁珊瑚的质谱铀系年代及全新世高海面[J]. *科学通报*, 2001, 46(20): 1734-1738.
- [9] 时小军, 余克服, 陈特固. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5): 121-132.
- [10] 时小军, 余克服, 陈特固, 等. 中—晚全新世高海面的琼海珊瑚礁记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(5): 1-9.
- [11] YU K F, ZHAO J X, DONE T, et al. Microatoll record for

- large century-scale sea-level fluctuations in the Mid-Holocene[J]. *Quaternary Research*, 2009, 71(3): 354-360.
- [12] YAN T L, YU K F, WANG R, et al. Records of sea-level highstand over the Meghalayan age/late Holocene from uranium-series ages of beachrock in Weizhou Island, northern South China Sea[J]. *The Holocene*, 2022, 11-12(31): 1745-1760.
- [13] 刘文会, 余克服, 王瑞, 等. 涠洲岛北港海滩岩的铀系年代及其海平面指示意义[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(3): 764-774.
- [14] YAO Y T, ZHAN W H, SUN J L. Emerged fossil corals on the coast of northwestern Hainan Island, China: Implications for mid-Holocene sea level change and tectonic uplift[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(23): 2869-2876.
- [15] XIONG H X, ZONG Y Q, QIAN P. Holocene sea-level history of the northern coast of South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 194(15): 12-26.
- [16] YUE Y F, TANG L C, YU K F, et al. Coral reef records of sea-level highstand and climate events in northern South China Sea during the Mid-Holocene [J]. Unpublished.
- [17] AN Z. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(15): 171-187.
- [18] MORTON B, BLACKMORE G. South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42: 1236-1263.
- [19] 俞慕耕, 刘金芳. 南海海流系统与环流形势[J]. *海洋预报*, 1993, 2: 13-17.
- [20] WANG C Z, WANG W Q, WANG D X, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Nino[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C3): C03023.
- [21] LIU J B, CHEN F H, CHEN J H, et al. Humid medieval warm period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China[J]. *科学通报(英文版)*, 2011, 56(23): 2464-2474.
- [22] YU K F, ZHAO J X. U-series dates of Great Barrier Reef corals suggest at least +0.7 m sea level ~7 000 years ago[J]. *The Holocene*, 2010, 20(2): 161-168.
- [23] BARD E, ARNOLD M, FAIRBANKS R G, et al.  $^{230}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages obtained by mass spectrometry on corals[J]. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 191-199.
- [24] ZHAO J X, HU K. Thermal ionization mass spectrometry U-series dating of a hominid site near Nanjing, China[J]. *Geology*, 2001, 29(1): 27-30.
- [25] CLARK T R, ROFF G, ZHAO J, 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.
- [26] CHENG H, EDWARDS R L, HOFF J, et al. The half-lives of uranium-234 and thorium-230[J]. *Chemical Geology*, 2000, 169(12): 17-33.
- [27] CHEN H J, EDWARDS R L, WASSERBURG G J.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  in seawater[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1986, 80(34): 241-251.
- [28] STIRLING C H, ESAT T M, MCCULLOCH M T, et al. High-precision U-series dating of corals from Western Australia and implications for the timing and duration of the Last Interglacial[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1995, 135(14): 115-130.
- [29] STUIVER M, REIMER P J, REIMER R W. Calib 8.20. WWW program [EB/OL]. [2022-06-17]. <http://calib.org/calib/>.
- [30] PAULA J R, WILLIAM E N A, EDOUARD B, et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 kcal BP) [J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 725-757.
- [31] TIMOTHY J H, PETER K, MARTIN B, et al. Marine20—The marine radiocarbon age calibration curve (0-55, 000 cal BP) [J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 779-820.
- [32] YU K F, HUA Q, ZHAO J X, et al. Holocene marine C-14 reservoir age variability: Evidence from Th-230-dated corals in the South China Sea[J]. *Paleoceanography*, 2010, 25: PA3205.
- [33] 詹文欢, 刘以宣. 从广东沿海海滩岩探讨历史时期海平面变化[J]. *南海研究与开发*, 1996, 4: 30-35.
- [34] 张崧, 孙现领, 王为, 等. 广东深圳大鹏半岛海岸地貌特征[J]. *热带地理*, 2013, 33(6): 647-658.
- [35] 宗永强, 李平日. 粤东全新世海滩岩形成条件初步分析[J]. *热带地理*, 1984, 4: 15-22.
- [36] 孙桂华, 邱燕, 朱本铎. 南海及其周围地区全新世海平面遗迹的构造含义[J]. *海洋学报*, 2009, 35(5): 58-68.
- [37] 李平日. 华南全新世海滩岩及其古地理意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1988, 1(4): 25-33.
- [38] 王建华. 华南沿海全新世海滩岩的特征及其意义[J]. *中山大学学报论丛*, 1992, 1: 111-122.
- [39] 张仲英, 刘瑞华. 海南岛沿海的全新世[J]. *地理科学*, 1987, 2: 129-138, 197.
- [40] MA Z B, XIAO J, ZHAO X T, et al. Precise U-series dating of coral reefs from the South China Sea and the high sea level during the Holocene[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(2): 296-303.
- [41] TAO S C, YU K F, YAN H, et al. Annual resolution records of sea-level change since 1850 CE reconstructed from coral  $\delta^{18}\text{O}$  from the South China Sea[J]. *Palaeogeography*, 2022, 592(15): 110897.
- [42] PENG X, MENG X W, LI Z, et al. Late Holocene mangrove development and response to sea level change in the northwestern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(11): 111-120.
- [43] 曹小月, 殷勇, 贾培宏, 等. 海南陵水LDB01钻孔沉积记录与环境演化[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(1): 31-43.
- [44] 陈慧娴, 王建华, 董玮琛, 等. 晚全新世淇澳岛红树林有孔虫记录与古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 74-86.
- [45] 赵希涛, 彭贵, 张景文. 海南岛沿岸全新世地层与海面变化的初步研究[J]. *地质科学*, 1979, 4: 350-358.
- [46] 周良, 王洋, 杜学斌, 等. 珠江三角洲西缘晚第四纪沉积演化和最大海侵古岸线的重建[J]. *沉积学报*, 2022, 40(1): 119-135.
- [47] 彭杰, 杨小强, 黄文姬, 等. 珠江三角洲全新世海平面升降及

- 其对全球变化的响应[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2014, 56(6): 63-72.
- [48] ZHAO X T. Ages of formation of the luhuitou coral-reefs, hainan island, and their effects on shoreline changes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1979, 24(21): 995-998.
- [49] ZHAO X T. Development of holocene coral reefs in china and their reflection on sea level changes and tectonic movement[J]. *Science in China, SerB*, 1983, 26(4): 413-423.
- [50] Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). Tide Gauge Data[EB/OL]. [2022-06-17]. <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.
- [51] 王为. 香港贝澳湾全新世海滩岩的发现及意义[J]. 科学通报, 1993, 38(3): 258-260.
- [52] 乐远福, 唐立超, 余克服. 北大西洋沿岸过去2 000 a海平面变化的若干重要特征[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 1-15.
- [53] 唐立超, 乐远福. 海滩岩在南海北部海平面重建中的应用和不确定性分析[J]. 海洋地质前沿, 已录用.
- [54] SIMON E E, BENJAMIN P H, ANDREW C K. Holocene sea-level changes along the United States Atlantic Coast[J]. *Oceanography*, 2011, 24(2): 70-79.
- [55] WANG L, SARNTHEIN M, ERLLENKEUSER H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(14): 245-284.
- [56] 卢汝圻. 广东沿海地区现代地壳垂直运动研究[J]. 华南地震, 1997, 17(1): 25-33.
- [57] 詹文欢, 张志强, 孙杰, 等. 南海西北部珊瑚礁区地壳升降速率分析[C]//中国地球物理学会第二十三届年会, 青岛, 2007.
- [58] 余克服, 陈特固, 钟晋梁, 等. 雷州半岛全新世高温期珊瑚生长所揭示的环境突变事件[J]. 中国科学: 地球科学, 2002, 32(2): 149-156, 177.
- [59] ZONG Y Q, YIM W S, YU F, et al. Late Quaternary environmental changes in the Pearl River mouth region, China[J]. *Quaternary International*, 2009, 206(12): 35-45.
- [60] ZONG Y Q, INNES J B, WANG Z H, et al. Mid-Holocene coastal hydrology and salinity changes in the east Taihu area of the lower Yangtze wetlands, China[J]. *Quaternary Research*, 2011, 76(1): 69-82.
- [61] SHENNAN I, PELTIER W R, DRUMMOND R, et al. Global to local scale parameters determining relative sea-level changes and the post-glacial isostatic adjustment of Great Britain[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(13): 397-408.
- [62] 孙金龙, 徐辉龙. 中国的海滩岩研究与进展[J]. 热带海洋学报, 2009, 1(2): 103-108.
- [63] 李建生. 广东与海南岛沿海地区新构造运动特征[J]. 自然杂志, 1992, 8: 602-606.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] ZHANG Y Z, ZONG Y Q, XIONG H X, et al. The middle-to-late Holocene relative sea-level history, highstand and levering effect on the east coast of Malay Peninsula[J]. *Global Planetary Change*, 2020, 196: 103369.
- [67] 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.
- [68] INGRAM B L, SOUTHON J R. Reservoir ages in Eastern Pacific coastal and estuarine waters[J]. *Radiocarbon*, 1996, 38(3): 573-582.
- [69] EISENHAUER A, WASSERBURG G J, CHEN J H, et al. Holocene sea-level determination relative to the Australian continent; U/Th (TIMS) and  $^{14}\text{C}$  (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1993, 114(4): 529-547.
- [70] BARD E, HAMELIN B, FAIRBANKS R G, et al. Calibration of the  $^{14}\text{C}$  timescale over the past 30 000 years using mass spectrometric U/Th ages from Barbados corals[J]. *Nature*, 1990, 345(6274): 405-410.
- [71] 余克服, 赵建新, 施祺, 等. 永暑礁西南礁缘生物地貌与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 1-7.
- [72] 刘志杰, 余佳, 孙晓燕, 等. 海洋沉积物 $^{14}\text{C}$ 测年数据整合与校正问题探讨[J]. 第四纪研究, 2016, 36(2): 492-502.
- [73] 余克服. 雷琼海区近40年海温变化趋势[J]. 热带地理, 2000, 20(2): 111-115.
- [74] 余克服, 黄耀生, 陈特固, 等. 雷州半岛造礁珊瑚Porites lutea月分辨率的 $\delta^{18}\text{O}$ 温度计研究[J]. 第四纪研究, 1999, 1: 67-72.
- [75] 余克服, 陈特固, 黄鼎成, 等. 中国南沙群岛滨珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的高分辨率气候记录[J]. 科学通报, 2001, 46(14): 1199-1204.
- [76] 邓文峰, 韦刚健, 陈雪霏, 等. 全新世南海气候环境变化的珊瑚地球化学记录[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(6): 10578-11072.
- [77] 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, 42(8): 1160-1172.
- [78] WEI G J, DENG W F, YU K F, et al. Sea surface temperature records in the northern South China Sea from mid-Holocene coral Sr/Ca ratios[J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(3): 1-13.
- [79] STODDART D, SCOFFIN P. Microatolls: Review of Form, Origin and Terminology[J]. *Atoll Research Bulletin*, 1979, 224: 1-17.
- [80] WOODROFFE C, ROGER M. Microatolls and recent sea level change on coral atolls[J]. *Nature*, 1990, 344: 531-534.
- [81] SMITHERS S G, WOODROFFE C D. Microatolls as sea-level indicators on a mid-ocean atoll[J]. *Marine Geology*, 2000, 186(1): 43-48.
- [82] 聂宝符. 五千年来南海海平面变化的研究[J]. 第四纪研究, 1996, 1: 80-87.
- [83] SMITHERS S. Sea-level Indicators[C]//: Hopley, D. (Ed. ), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process*. Springer Netherlands, 2011, Dordrecht: 978-991.
- [84] MELTZNER A J, WOODROFFE C D. Coral microatolls[C]//Shennan I, Long, AJ., Horton, BP( Eds. ), *Handbook of Sea - Level Research*, 2015: 125-145.
- [85] VAN W R, GOLBUU Y, ROFF G. Keep up or drown: adjust-

- ment of western Pacific coral reefs to sea-level rise in the 21st century[J]. *Royal Society Open Science*, 2015, 2: 150181.
- [86] HALLMANN N, CAMOIN G, EISENHAEUER A, et al. Reconstructing Mid to Late Holocene sea-level change from coral microatolls, French Polynesia[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2017: 1519-1539.
- [87] HALLMANN N, CAMOIN G, EISENHAEUER A, et al. Ice volume and climate changes from a 6 000 year sea-level record in French Polynesia[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(285): 1-12.
- [88] WEIL - ACCARDO J, FEUILLET N, SATAKE K, et al. Relative sea - Level changes over the past centuries in the central ryukyu arc Inferred from coral microatolls[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125: e2019JB018466.
- [89] 余克服, 赵建新. 南沙永暑礁表层珊瑚年代结构及其环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 25-28.
- [90] TJIA H D. Sea-level changes in the tectonically stable Malay-Thai Peninsula[J]. *Quaternary International*, 1996, 31(1): 95-101.
- [91] DAVIS A M, AITCHISON J C, FLOOD P G, et al. Late Holocene higher sea-level indicators from the South China coast[J]. *Marine Geology*, 2000, 171(1-4): 1-5.
- [92] TANABE S, HORI K, SAITO Y, et al. Song Hong (Red River) delta evolution related to millennium-scale Holocene sea-level changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(21-22): 2345-2361.
- [93] MELTZNER A J, HORTON B P, SWITZER A D, et al. Precise Timing and Elevation of the Mid-Holocene Highstand at Belitung Island, Indonesia, on the Sunda Shelf, from Coral Microatolls[J]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2011: 965.
- [94] STATTEGGER K, TJALLINGII R, SAITO Y, et al. Mid to late Holocene sea-level reconstruction of Southeast Vietnam using beachrock and beach-ridge deposits[J]. *Global Planetary Change*, 2013, 110: 214-222.
- [95] PARHAM P R, SAITO Y, SAPON N, et al. Evidence for ca. 7-ka maximum Holocene transgression on the Peninsular Malaysia east coast[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(5): 414-422.
- [96] MELTZNER A J, HORTON B P, SWITZER A D, et al. Precise Timing and elevation of the Mid-Holocene highstand at Belitung Island, Indonesia, on the Sunda Shelf, from Coral Microatolls[J]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2011, 11: 2011AGUFMGC43D0965M.
- [97] LAMBECK K. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 679-686.
- [98] FAIRBANKS R G. A 17, 000-year glacio-eustatic sea level record; influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation[J]. *Nature*, 1989, 342(6250): 637-642.
- [99] CUTLER K B, EDWARDS R L, TAYLOR F W, et al. Rapid sea-level fall and deep-ocean temperature change since the last interglacial period[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2003, 206(3-4): 253-271.
- [100] PELTIER A W R, FAIRBANKS B R G. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23-24): 3322-3337.
- [101] CLARK P U, DYKE A S, SHAKUN J D, et al. The Last Glacial Maximum[J]. *Science*, 2009, 325(5941): 710-714.
- [102] CLARK P U, SHAKUN J D, BAKER P A, et al. Global climate evolution during the last deglaciation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7140-7141.
- [103] BERGER A L. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(12): 2362-2367.
- [104] SIROCKO F, SARNTHEIN M, ERLLENKEUSER H, et al. Century-scale events in monsoonal climate over the past 24 000 years[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 322-324.
- [105] LETCHER, TM. Climate Change [M]// FOSTER N L, ATTRILL M J. Third Edition, Amsterdam: Elsevier, 2021: 427-443.
- [106] MENDELSON R, EMANUEL K, SHUN C. The impact of climate change on global tropical cyclone damage[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 205-209.
- [107] CHURCH J A, WHITE N J. Sea-Level rise from the late 19th to the early 21st century[J]. *Surveys in Geophysics*, 2011, 32(4): 585-602.
- [108] 国家海洋局. 2021年中国海平面公报 [R]. [http://gi.mnr.gov.cn/202205/t0220507\\_2735509.html](http://gi.mnr.gov.cn/202205/t0220507_2735509.html). 2021.
- [109] 刘睿, 刘晓东, 刘恒. 基于CMIP5多模式集合预估东海和南海 21世纪海平面高度变化[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(4): 412-428.
- [110] 盛芳, 智海, 刘海龙, 等. 中国近海海平面变化趋势的对比分析[J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(3): 346-356.
- [111] 潘轶, 岳建平, 宋亚宏, 等. 1993~2015年中国南海海平面变化的初步研究[J]. *地理空间信息*, 2017, 15(10): 9-12.

## Characteristics of sea level changes in the northern South China Sea since the Holocene and prediction of the future trends

YUE Yuanfu, TANG Lichao

(Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Coral Reef Research Center of China, School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The northern South China Sea is one of the key front zones for the transition from the South China Sea to land and one of the sensitive areas of global climate change. Affected by sea level changes, sea-level indicators are widely developed in this area, and offers an ideal area for the study of past sea-level changes. However, there are still some differences in the understanding of the Holocene sea-level change history in the northern South China Sea. Therefore, we first added 6 new and high-quality sea-level index points and reviewed and re-corrected the age and elevation of the published sea-level data obtained from the northern South China Sea, followed by mutual verification and reliability analysis. At the same time, the modern sea level observation data from 12 tide-gauge stations with relatively continuous monitoring records are collated, and the reliability of the reconstructed results are further verified. Finally, based on 679 sea level data compiled after correction and reliability assessment, we reconstructed the history and characteristics of sea level changes in the northern South China Sea since the Holocene, especially in the last 2 000 years. The results show that during the early Holocene, the sea level in the northern South China Sea rose rapidly from  $-16.16$  m at  $(8\ 211 \pm 128)$  cal a BP to  $1.5\sim 2.5$  m during  $6\ 000\sim 7\ 000$  cal a BP, and maintained a high sea-level oscillation of 2 600 years in the Mid-Holocene, and at last began to fluctuate and drop to the current sea level in the late Holocene. The sea level in the northern South China Sea showed a phased change process in the past 2 000 years. First, it showed a downward trend from 0 to 350 CE, and then followed by a rapid sea level rise in 350-850 CE. In 880 CE, the sea level was at its highest point in the past 2 000 years ( $1.05 \pm 0.35$ ) m, and the sea-level continued to decline to  $(-0.18 \pm 0.35)$  m in 1850 CE, then the sea level basically kept a narrow horizontal fluctuation until 1897 CE ( $-0.19 \pm 0.05$ ) m. Since then, the sea level kept continuous oscillation and gradually rises to  $0.076$  m in 2 020 CE. If the sea-level in the northern South China Sea in 2100 A.D. is estimated based on the rising rate in the past 100 years, it would be  $0.19\sim 0.28$  m higher than the current sea level. Therefore, when carrying out large-scale engineering construction in the coastal low-lying areas in this area, it is necessary to consider the adverse effects of future sea-level rise. In addition, it is further found that different sea-level indicators and different reconstruction methods are the main reason for the regional differences of sea-level reconstruction results in the northern South China Sea since the Holocene. On the whole, the sea-level in northern South China Sea has shown a fluctuating downward trend since the Mid-Holocene. Despite the differences in the time and height of sea-level in different regions, the sea-level records in the northern South China Sea are consistent with those in the surrounding coast, suggesting the high sea-level during the Mid-Holocene in the South China Sea, and it is likely to have a global background.

**Key words:** northern South China Sea; Holocene; sea-level change; uncertainty analysis; future sea-level prediction