

唐立超, 乐远福. 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[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(3): 1-19.

TANG Lichao, YUE Yuanfu. Application and uncertainty analysis of beachrock to Mid-late Holocene sea-level reconstruction in the northern South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(3): 1-19.

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

唐立超, 乐远福*

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

摘要:过去海平面变化特征对认识现代海平面变化过程和预估未来情景具有重要科学和现实意义。海滩岩作为热带和亚热带地区海岸潮间带特有的沉积岩,是海岸变迁和古海平面高程的重要标志物。然而,由于存在海滩岩形成后动力条件发生变化、采用的测年方法不同以及海平面高程估算和分析误差等问题,基于海滩岩的过去海平面重建结果依然存在较大争议和不确定性。我们分析和总结了南海北部中晚全新世海滩岩重建海平面的进展,以及在海平面研究中存在的问题和潜在机遇,从海滩岩的形成年代与海滩岩形成后高程产生变化等方面进一步量化研究海滩岩重建海平面变化的不确定性。同时,通过对南海北部海南岛东部沿岸的 3 块原生珊瑚礁(1 块大型块状滨珊瑚和 2 块滨珊瑚微环礁)进行高精度高程测量和铀系测年,共获得 6 个海平面数据,结合冰川均衡调整模型(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)和 ICE-5G 模型结果,对基于海滩岩重建的南海北部中晚全新世海平面的可靠性进行比较和评估。以上不确定性分析和研究结果表明,通过年代与高程校正后,海平面重建结果准确性进一步提高。研究结果可为以其他海平面标志物重建的过去海平面的不确定性分析和可靠性分析提供参考和借鉴。

关键词:南海北部; 海滩岩; 中晚全新世; 海平面变化; 不确定性分析

中图分类号:P736; P731.23

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.049

0 引言

近年来,全球变暖趋势日益明显,与其相关的海平面及海岸环境变化成为当前全球变化研究的重要内容之一。有研究表明,全球变暖导致海平面上升^[1],可能导致全球沿海低洼的河口三角洲地区及小岛屿国家面临海水淹没的潜在风险^[2-6],直接影响当地社会经济的可持续发展。因此,国际社会和沿海国家政府高度关注和重视未来海平面的变化

趋势。深入了解和认识过去海平面的变化规律,利用可靠方法重建过去海平面变化,对预测未来海平面的发展有重要的科学和现实意义。例如,通过验潮站监测资料、TOPEX/POSEIDON(简称 T/P)和/或 Jason-1/2 卫星高度计测高资料,可以了解工业革命以来近 200 年的海平面变化过程^[7-11]。验潮站和卫星监测数据获得的海平面变化幅度在毫米级^[11],变化过程具有很好的同步性^[12-15],这对高精度和完整性地认识海平面变化有很大的帮助。然而上述器测资料时间太短,还不能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做出肯定性结论,严重制约了对未来海平面变化估算的准确性。且工业革命以前,并没有足够和连续的海平面变化监测记录,往往通过分析海平面标志物的高程和对应年代建立海平面变化曲线^[16-19]。因此,长时间尺度和高分辨率的海平面变化研究可以弥补器测资料时间序列过短带来的不足,监测记录和地质记录

收稿日期: 2022-02-21

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: 唐立超(1998—),男,在读硕士,主要从事过去海平面重建方面的研究工作. E-mail: tanglichao2020@163.com

* 通讯作者: 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. E-mail: yuanfu.yue@gxu.edu.cn

两者相结合,不仅可以验证重建的过去海平面序列的可靠性,进而提高对海平面变化历史和规律的整体认识^[18-19],还可以为预估未来海平面变化情景及其影响提供科学的依据和参考。

对过去海平面变化的研究和重建,最重要的是找到真正代表当时海平面位置的标志物^[19-20]。常见的海平面标志物可以分为生物标志物和沉积与地貌标志物^[20],其中海滩岩是重要的代表之一。海滩岩普遍形成于潮间带,易于保存,被认为是研究海岸变迁和过去海平面变化的重要标志物^[21-28]。据调查,海滩岩在中国东部沿海至南海诸岛广泛分布^[21-25],尤其是南海北部沿岸地区,珊瑚大面积分布和发育,为海滩岩的形成提供了物质基础。例如广西、广东、香港、海南岛和西沙群岛等沿海地区均分布大量的海滩岩。此外,随着测年与高程测量技术的不断发展和进步,为利用海滩岩重建过去海平面变化历史提供了更加丰富和连续的数据。

然而,利用海滩岩重建过去海平面需考虑其沉积时所处的地质条件、动力类型与作用方式、沉积物质供给情况、气候环境、高程测量、测年方法和当地潮汐差的不同等多个因素的影响。因而,所得的海平面数据可能产生较大的年代或/和高程误差,这导致学术界对基于海滩岩重建的南海北部过去海平面历史存在较大争议^[29-30]。其中争论最多的是关于中全新世是否存在高海平面、过去海平面是稳定的还是波动下降的等问题。此外,还存在海平面标志物自身记录不连续,数据缺失等情况,对正确认识过去海平面变化及预测未来海平面变化趋势带来了较大的不确定性。

基于此,本文通过回顾海滩岩在南海北部中晚全新世海平面重建中的研究进展,探讨海滩岩在海平面重建中的不确定性。首先,对已发表的海滩岩数据进行收集和整理,进行现代碳库与高程校正,量化分析尽可能地减少年代与高程误差,使海滩岩代表的过去海平面变化趋势与真实情况更接近。然后,引入南海北部3个原生珊瑚礁(1块大型块状大型块状滨珊瑚和2块滨珊瑚微环礁)的中全新世海平面数据^[31],检验海滩岩的可靠性。最后,将校正结果与其他地区及全球海平面变化曲线进行对比,对基于海滩岩重建的南海北部中晚全新世的海平面进行比较和可靠性评估,以进一步了解南海北部中全新世海平面变化规律及驱动机制,为未来海平面变化趋势的预测以及应对与之相关的海洋灾害提供科学依据,也为南海海平面重建研究提供一

些可靠的借鉴。

1 研究区域

南海是中国近海中面积最大、水域最深的海区,属于太平洋西部海域。南海通过巴士海峡、苏禄海和马六甲海峡与太平洋相连并与印度洋相通,是一个NE—SW走向的半封闭海。

南海北部是中国大陆南端向海洋过渡的前沿地带(图1),也是西太平洋暖池的重要延伸。该区域涵盖了北部湾、珠江三角洲、雷州半岛、海南岛和西沙群岛沿岸。南海北部受东亚季风和 ENSO 的影响^[32-34],热带海洋性气候显著,该区域东北季风盛行于10月中旬至次年3月中旬,冷空气入侵频繁,使南海北部天气前期干冷晴朗,后期低温阴雨^[35-36]。西南季风盛行于5月中旬至9月中旬,使南海北部温度高且湿度大,而且台风影响频繁^[36-37]。南海海流在东北季风盛行期,受季风驱动由东北向西南流动,由台湾海峡和巴士海峡流入,向西南方向的东沙、中沙、西沙、越南海岸和南沙西侧流动,最后向东南流动经卡里马塔海峡和加斯帕海峡流入爪哇海^[38-39]。在西南季风盛行期,南海海流自西南向东北流动,来自爪哇海的海流受东南信风驱动,经卡里马塔海峡和加斯帕海峡流入南海,随后海流向南海北部的东北方向流动,经西沙、中沙、东沙群岛,分为两支海流经巴士海峡和台湾海峡流入西太平洋和东海^[39]。黑潮暖流在南海东部菲律宾群岛沿岸的阻挡下,向东形成北太平洋暖流,向东北形成一股支流进入南海北部。当西南季风盛行时,这支黑潮暖流与西南季风表层流汇合向东北流动进入台湾海峡^[40]。

南海北部沿岸港湾密布,工业发达,珠江三角洲和粤港澳大湾区都位于南海北部沿岸。沿岸有丰富的淡水河流输入,主要河流有中国的珠江、韩江以及中南半岛的红河、湄公河和湄南河等。南海北部自然海域面积广阔,海岸线曲折蜿蜒,为海滩岩的发育提供了得天独厚的条件。

2 材料和方法

海滩岩的定义是海滩岩及其相关研究的基础。有学者认为在热带与亚热带地区潮间带中碳酸盐胶结形成的一种沉积岩为海滩岩^[29];也有学者认为海滩岩形成地区包括海浪飞溅带^[24];还有学者认为

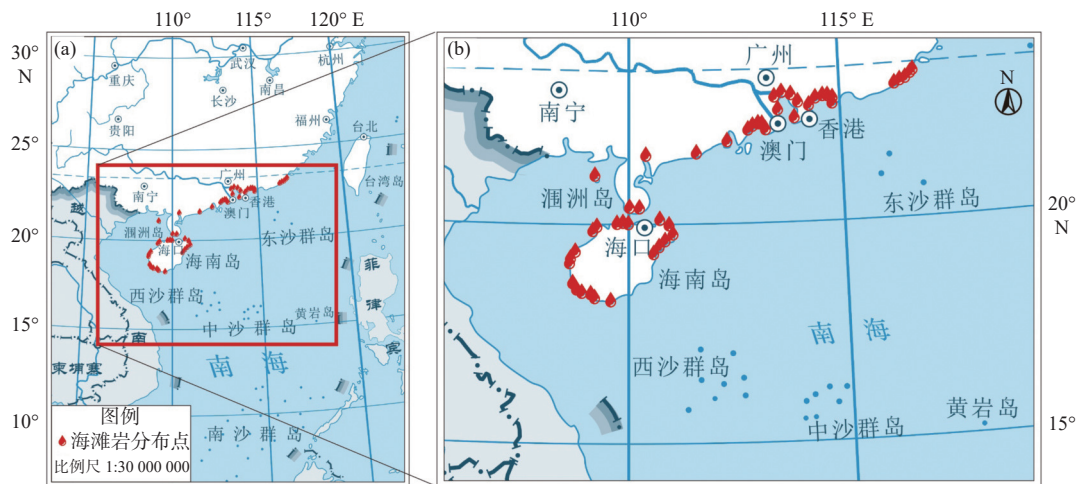


图 1 南海北部地理位置以及南海北部海滩岩的空间分布

Fig.1 The location and spatial distribution of beachrock in the northern South China Sea

海岸带内发育的各种碳酸盐胶结成岩都是海滩岩, 例如, 含有贝壳碎屑的贝壳堤也是海滩岩的一种^[41-42]。然而, 有学者认为上述观点扩大了海滩岩的定义范围, 应限定潮间带内胶结形成的胶结岩为海滩岩^[43]。由于海滩岩是在海表中胶结而成, 从组成成分来看, 其初始胶结物通常为文石或高镁方解石^[29]。从分布范围来看, 目前海滩岩在各个纬度都有发现。中国海滩岩的分布统计结果表明, 热带和亚热带地区的海滩岩大约占总数的 74%^[29]。由于处于大陆沿岸, 或多或少含有陆源沉积物, 也就是硅酸盐岩。基于上述分析, 我们认为海滩岩是热带和亚热带海岸潮间带特有的一种滨海相沉积岩, 由碳酸钙(文石与高镁方解石)为主要成分的含有硅酸盐岩成分的碳酸盐胶结海滩沉积物而形成。需要注意的是, 南海北部西沙群岛远离大陆, 珊瑚礁林立, 有环礁、台礁、暗礁海滩, 海底地形东西高、中间低, 最大水深 > 1 500 m, 属于大陆坡群岛^[44]。当地海滩岩的碎屑物主要为珊瑚砂砾、松散贝壳、珊瑚砂等^[21, 25, 45], 受潮汐和海浪等强水动力的影响, 当地海滩岩碎屑物颗粒粒径大(主要为生物颗粒碎屑如大块珊瑚、珊瑚枝和贝壳等)且胶结程度弱^[25, 46]。由此可见, 西沙群岛的海滩岩是以生物礁为基础形成的颗粒沉积物与碳酸盐胶结形成, 与南海北部及陆源沉积物与碳酸盐胶结形成的含硅质成分高的海滩岩有所不同。此外, 西沙群岛的海滩岩不如南海北部其他区域海滩岩胶结程度高, 不能准确指示当地过去海平面高程^[29]。因此, 本文对形成于西沙群岛的海滩岩只讨论其形成时间, 重点整理和分析南海北部区域基于海滩岩开展的过去海平面研究, 梳理该区域可以指示海平面高程的海滩岩分布(图 1b), 并展

开进一步讨论。

海滩岩作为海陆交互作用的产物, 被广泛应用于热带和亚热带地区过去海平面的重建。目前, 广西、广东、香港、海南岛和西沙群岛等南海北部地区发育了大量的海滩岩(图 1), 所以该地区基于海滩岩的海平面数据也更为丰富。为了进一步分析基于海滩岩重建的过去海平面结果的差异, 本文将从海滩岩年代的不确定性(测年方法、碎屑物成分、碎屑物早于海滩岩形成)和高程的不确定性(构造作用与沉积作用、人为因素)2 个主要方面进行探讨。

在综合踏勘及参考前人研究的基础上, 我们认为南海北部海滩岩海平面指示意义在平均潮位到平均高潮位之间, 校正后的高程即代表着当时的海平面高程^[17]。而南海北部海滩岩的形成年代(即当地某海平面高程出现时间)可以通过海滩岩内部的生物碎屑测年获取^[29]。通常采用¹⁴C 和铀系测年技术进行定年。然而, 现阶段¹⁴C 测年本身固有的误差以及受当地碳库影响^[47], 年代校正结果的可靠性需要进一步分析和评估。而有研究表明, 铀系测年精度更高, 且不受碳库效应的限制^[48-49], 因而广泛应用于海滩岩的定年^[50-51]。

南海北部广泛发育珊瑚礁, 是近岸生物碎屑的主要物源区, 充足的生物碎屑也是南海北部海滩岩形成的基础^[29, 52]。有研究表明, 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, 既向上也向周边生长, 但是一旦暴露 > 1 h 或海平面保持稳定, 珊瑚的顶面部分便死亡或停止向上生长, 其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^[16, 53-55]。而现在高出于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。因此,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^[53-55]。

为了验证校正结果的可靠性,给南海北部海滩岩记录的去海平面变化信息提供参照,本文引入取自海南岛东部海岸的3块原位珊瑚礁进行对比验证(图2、表1)。通过南海北部珊瑚礁记录的海平面变化信息,可以进一步了解当地的海平面变化

历史。3块原位珊瑚礁分别为 TGL001(大块滨珊瑚,直径 96 cm, 19°63'N, 111°02'E)和 TGL002(滨珊瑚微环礁,直径 253 cm, 19°63'N, 111°02'E)以及 QG001(滨珊瑚微环礁,直径 191 cm, 19°31'N, 110°66'E),前2块采自于海南岛文昌市铜鼓岭,第3块采自于海南岛琼海市青葛^[31]。对3块原位珊瑚礁使用徕卡 RTK 测量仪进行了高精度高程测量,并在每块原位珊瑚礁上分别取2个样品送至澳大利亚昆士兰大学放射性同位素地球化学实验室开展高分辨率铀系测年。此外,为判断珊瑚是否受成岩和侵蚀

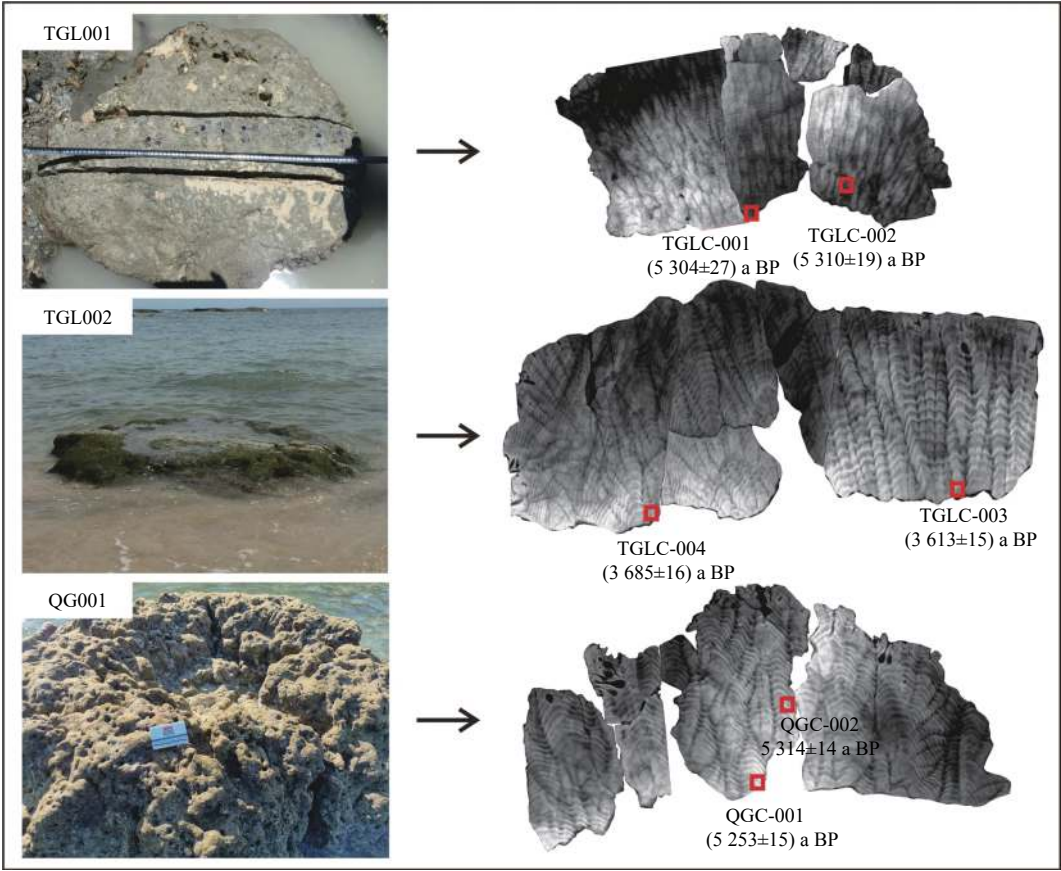


图2 珊瑚照片及数字化 X 射线成像

Fig.2 Photos of coral reef and its digital X-ray radiography

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^[31]

Table 1 The isotopic data and U-series ages of the coral samples from the eastern coast of Hainan Island, the northern South China Sea^[31]

样本编号	U / (μg/g)	±2σ	²³² Th / (ng/g)	±2σ	²³⁰ Th / ²³² Th	±2σ	²³⁰ Th/ ²³⁸ U	±2σ	²³⁴ U/ ²³⁸ U	±2σ	年龄/ a BP	±2σ	校正后 ²³⁴ U/ ²³⁸ U 值	±2σ	δ ²³⁴ U/‰	±2σ
TGLC-001	3.151 6	0.002 8	5.825 6	0.006 1	91.39	0.16	0.055 68	0.000 09	1.146 5	0.001 6	5 423	12	5 375	27	1.148 8	0.001 6
TGLC-002	3.167 7	0.002 3	3.12	0.004 1	170.77	0.44	0.055 43	0.000 13	1.144 9	0.001 1	5 406	14	5 381	19	1.147 2	0.001 1
TGLC-003	3.013	0.002 3	2.314 7	0.002 8	151.47	0.43	0.038 35	0.000 1	1.147 6	0.001 6	3 704	11	3 684	15	1.149 1	0.001 6
TGLC-004	2.921 8	0.002	3.154 5	0.003 5	104.53	0.23	0.037 19	0.000 08	1.149 7	0.001 3	3 584	9	3 556	16	1.151 2	0.001 3
QGC-001	2.912 6	0.001 3	2.150 5	0.002 3	225.62	0.46	0.054 9	0.000 1	1.147 1	0.001 1	5 343	11	5 324	15	1.149 3	0.001 1
QGC-002	2.820 7	0.002 2	1.022 1	0.001 3	464.19	1.05	0.055 43	0.000 11	1.147 5	0.001 3	5 394	13	5 385	14	1.149 8	0.001 3

注:表内数据源自文献^[31]。

作用的影响, 我们首先将大块的原位珊瑚礁进行横切, 然后在实验室切片打磨至 7 mm 厚的薄板, 最后进行数字化 X 射线成像。数字化 X 射线成像显示生长纹清晰(图 2), 表明没有发生明显的成岩作用或者矿物蚀变, 说明珊瑚样品是封闭体系, 适合开展铀系测年, 可获得理想数据。

海平面标志物记录的古海平面高程的不确定性依靠各海平面标志物的指示意义或范围来确定^[16, 56-57], 而海平面标志物代表的过去海平面位置与标志物垂直高度和测年方法相关^[16, 20, 57]。分析海

滩岩代表的古海平面高程时, 需要考虑测量时间的潮汐误差、海滩岩受构造作用等发生的高程变化和海滩岩对过去海平面变化的指示意义等因素的影响。基于此, 本文参考以下误差公式对海平面标志物指示过去海平面变化的不确定性进行分析和计算^[58]:

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

式中: E 为海滩岩代表的过去海平面位置总误差; $e_{1n} \cdots e_n$ 为要讨论的各种误差来源。

本文重新校正了表 2 与表 3 海滩岩的形成年

表 2 南海北部海滩岩记录的过去海平面变化信息 (¹⁴C 测年)^[22, 25, 59-68]

Table 2 The past sea-level change recorded by beachrock in the northern South China Sea (¹⁴C dating)^[22, 25, 59-68]

区域	点位	样品编号	纬度/(N)	经度/(E)	未校正 年龄/ a BP	±2σ 误差	海平面 高程/cm	校正后年龄 ^{a/} cal a BP			构造抬升 高程 ^{b/} cm	校正后的 海平面高 程 ^{c/} cm	数据 来源
								下限 年龄	上限 年龄	中值 年龄			
珠三角	深圳西冲	西冲砂堤	25°07'	104°06'	2 179	85	250	1 357	1 617	1 497	3.29	246.71	[64]
珠三角	惠州碧甲	亚妈庙沙堤	25°11'	119°16'	2 415	80	200	1 627	1 905	1 771	3.90	196.10	[64]
粤东	汕头大屿山	贝澳湾内沙堤	23°02'—23°38'	116°14'—117°19'	2 820	95	170	2 104	2 431	2 271	4.54	165.46	[64]
粤东	汕头大屿山	贝澳湾内沙堤	23°02'—23°38'	116°14'—117°19'	2 380	90	50	1 578	1 870	1 729	3.46	46.54	[64]
粤东	汕头大屿山	贝澳湾内沙堤	23°02'—23°38'	116°14'—117°19'	1 700	80	−4	889	1 136	1 004	2.01	−6.01	[64]
粤东	汕头大屿山	贝澳湾内沙堤	23°02'—23°38'	116°14'—117°19'	1 660	75	80	833	1 078	962	1.92	78.08	[64]
粤东	汕头大屿山	长沙湾海滩	23°02'—23°38'	116°14'—117°19'	1 300	60	0	524	693	617	1.23	−1.23	[64]
粤西	茂名电白	茂名电白	21°29'	110°53'	5 520	130	100	5 351	5 721	5 545	11.09	88.91	[60]
粤东	潮州饶平	潮州饶平	23°28'—24°14'	116°35'—117°11'	5 160	100	150	4 950	5 304	5 129	10.26	139.74	[60]
北部湾	广西涠洲岛	涠洲岛	21°02'	109°06'	6 000	100	600	5 909	6 216	6 064	12.13	587.87	[60]
海南岛	乐东莺歌海	莺歌海	19°11'	110°57'	5 995	95	0	5 908	6 207	6 059	21.21	−21.21	[60]
粤东	汕头河浦	KWG-310	23°26'	116°60'	3 320	100	500	2 734	3 033	2 889	5.78	494.22	[66]
粤东	汕头澄海	KWG-440	23°46'	116°75'	2 485	70	250	1 721	1 981	1 855	3.71	246.29	[66]
粤东	惠州惠东	平海岭头	22°98'	114°72'	2 415	85	200	1 623	1 910	1 771	3.54	196.46	[66]
珠三角	深圳西冲	KWG-209	25°07'	104°06'	2 170	85	150	1 350	1 607	1 488	3.27	146.73	[66]
粤东	汕头南澳	KWG-307	23°42'	117°02'	1 990	80	350	1 171	1 411	1 299	2.60	347.40	[66]
粤东	汕头南澳	2-①	23°42'	117°02'	3 230	100	251	2 631	2 946	2 781	5.56	245.44	[63]
粤东	汕头南澳	2-②	23°42'	117°02'	3 460	100	254	2 884	3 206	3 052	6.10	247.90	[63]
粤东	潮州饶平	1-⑤	23°28'—24°14'	116°35'—117°11'	3 050	100	88	2 407	2 711	2 555	5.11	82.89	[63]
粤东	潮州饶平	1-④	23°28'—24°14'	116°35'—117°11'	3 260	95	69	2 680	2 973	2 818	5.64	63.36	[63]
粤东	潮州饶平	1-③	23°28'—24°14'	116°35'—117°11'	3 500	100	15	2 935	3 259	3 100	6.20	8.80	[63]
粤东	潮州饶平	1-②	23°28'—24°14'	116°35'—117°11'	3 670	105	−28	3 144	3 466	3 306	6.61	−34.61	[63]
粤东	潮州饶平	1-①	23°28'—24°14'	116°35'—117°11'	3 880	120	−104	3 382	3 739	3 569	7.14	−111.14	[63]
珠三角	江门台山	海晏公角	22°15'	112°48'	3 910	110	127	3 434	3 774	3 605	7.93	119.07	[63]
珠三角	江门台山	海晏公角	22°15'	112°48'	3 600	100	52	3 063	3 378	3 221	7.09	44.91	[63]
珠三角	江门台山	海晏公角	22°15'	112°48'	2 560	95	360	1 793	2 105	1 949	4.29	355.71	[63]
珠三角	深圳西冲	深圳大鹏西冲	25°07'	104°06'	2 485	85	250	1 707	1 992	1 856	4.08	245.92	[63]
雷州半岛	雷州半岛南部	雷州半岛南部	20°91'	110°09'	1 040	65	100	306	492	398	1.39	98.61	[63]
海南岛	三亚大东海	三亚大东海	18°19'	109°28'	5 450	190	60	5 230	5 726	5 462	19.12	40.88	[22]
海南岛	乐东莺歌海	乐东莺歌海	19°11'	110°57'	4 365	85	100	4 051	4 368	4 197	14.69	85.31	[22]
海南岛	三亚鹿回头	鹿回头水尾岭	18°21'	109°49'	4 345	210	200	3 863	4 453	4 169	14.59	185.41	[22]
海南岛	三亚东瑁岛	东瑁岛东岸	18°09'—18°37'	108°56'—109°48'	3 865	85	230	3 398	3 685	3 548	12.42	217.58	[22]
海南岛	三亚东瑁岛	东瑁岛西岸	18°09'—18°37'	108°56'—109°48'	3 810	85	200	3 342	3 625	3 482	12.19	187.81	[22]
海南岛	三亚鹿回头	鹿回头水尾岭	18°21'	109°49'	3 630	190	400	2 989	3 499	3 257	11.40	388.60	[22]

续表 2

区域	点位	样品编号	纬度/(N)	经度/(E)	未校正 年龄/ a BP	$\pm 2\sigma$ 误差	海平面 高程/cm	校正后年龄 ^a / cal a BP			构造抬升 高程 ^b /cm	校正后的 海平面高 程 ^c /cm	数据 来源
								下限 年龄	上限 年龄	中值 年龄			
粤东	揭阳惠来	惠来龙江新开河	22°53'—23°46'	115°36'—116°37'	3 290	110	0	2 700	3 021	2 854	6.28	-6.28	[22]
海南岛	三亚马岭	三亚马岭	18°09'—18°37'	108°56'—109°48'	2 630	75	0	1 886	2 169	2 036	7.13	-7.13	[22]
海南岛	临高美夏	临高美夏	19°34'—20°20'	109°03'—109°53'	2 160	90	0	1 339	1 602	1 478	5.17	-5.17	[22]
海南岛	文昌烟墩	烟墩二公滩	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	1 890	90	300	1 062	1 309	1 192	4.17	295.83	[22]
粤西	阳江海陵	海陵劳元	21°28'—22°41'	111°16'—112°21'	1 650	70	220	826	1 063	951	2.09	217.91	[22]
海南岛	三亚小东海	三亚小东海	18°09'—18°37'	108°56'—109°48'	1 190	70	0	449	630	531	1.86	-1.86	[22]
海南岛	东方八所	东方八所	18°43'—19°38'	108°36'—109°07'	1 020	90	0	277	496	378	1.32	-1.32	[22]
海南岛	乐东九所	乐东九所	18°43'—19°38'	108°36'—109°07'	1 020	90	0	277	496	378	1.32	-1.32	[22]
海南岛	三亚鹿回头	31	18°21'	109°49'	3 750	190	300	3 154	3 673	3 409	11.93	288.07	[65]
海南岛	文昌烟墩	45	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	2 054	109	100	1 235	1 519	1 369	4.79	95.21	[65]
海南岛	文昌烟墩	58	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	1 020	80	400	284	489	380	1.33	398.67	[65]
海南岛	三亚海头	9	18°09'—18°37'	108°56'—109°48'	4 439	132	0	4 087	4 499	4 292	15.02	-15.02	[67]
海南岛	三亚天涯海角	13	18°29'	109°34'	4 170	140	60	3 715	4 146	3 940	13.79	46.21	[67]
海南岛	三亚天涯海角	17	18°29'	109°34'	3 844	109	200	3 358	3 687	3 525	12.34	187.66	[67]
海南岛	三亚天涯海角	29	18°29'	109°34'	3 333	114	0	2 736	3 063	2 906	10.17	-10.17	[67]
海南岛	三亚大东海	51	18°19'	109°28'	2 360	90	50	1 550	1 840	1 705	5.97	44.03	[67]
海南岛	三亚大东海	54	18°19'	109°28'	2 325	75	0	1 530	1 790	1 662	5.82	-5.82	[67]
海南岛	文昌烟墩	55	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	2 212	132	50	1 359	1 700	1 540	5.39	44.61	[67]
海南岛	临高龙豪	57	19°34'—20°20'	109°03'—109°53'	2 141	81	0	1 325	1 570	1 457	5.10	-5.10	[67]
海南岛	儋州排浦	67	19°63'	109°16'	1 087	86	0	321	535	438	1.53	-1.53	[67]
珠三角	香港贝澳	香港贝澳	22°32'	114°17'	1 700	80	150	889	1 136	1 004	2.21	147.79	[61]
海南岛	西沙东岛	西沙东岛	16°33'	112°02'	3 630	150	-	3 040	3 460	3 256	-	-	[22]
海南岛	西沙东岛	西沙东岛	16°33'	112°02'	3 250	120	-	2 637	2 994	2 806	-	-	[22]
海南岛	西沙群岛	永兴岛西北	16°50'	112°20'	2 760	90	-	2 040	2 338	2 195	-	-	[63]
粤东	汕头广澳	汕头广澳	23°22'	116°78'	1 725	125	-	881	1 192	1 028	-	-	[59]
粤东	汕头广澳	汕头广澳	23°22'	116°78'	2 725	125	-	1 966	2 334	2 154	-	-	[59]
粤东	汕头广澳	汕头广澳	23°22'	116°78'	3 225	125	-	2 590	2 965	2 773	-	-	[59]
粤东	潮州海山岛	潮州海山岛	23°41'	116°59'	1 725	125	-	881	1 192	1 028	-	-	[59]
粤东	潮州海山岛	潮州海山岛	23°41'	116°59'	2 725	125	-	1 966	2 334	2 154	-	-	[59]
粤东	潮州海山岛	潮州海山岛	23°41'	116°59'	3 225	125	-	2 590	2 965	2 773	-	-	[59]
粤东	潮州海山岛	潮州海山岛	23°41'	116°59'	3 725	125	-	3 192	3 560	3 376	-	-	[59]
珠三角	香港贝澳	香港贝澳	22°32'	114°17'	1 610	70	-	785	1 018	907	-	-	[61]
海南岛	西沙东岛	7	16°33'	112°02'	4 856	200	-	4 547	5 111	4 830	-	-	[67]
海南岛	西沙东岛	26	16°33'	112°02'	3 417	136	-	2 803	3 183	3 004	-	-	[67]
海南岛	西沙东岛	27	16°33'	112°02'	3 378	133	-	2 765	3 133	2 959	-	-	[67]
海南岛	海南抱虎港	碎屑上层	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	3 340	30	-	2 782	2 993	2 902	-	-	[62]
海南岛	海南抱虎港	粗砂层	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	3 400	30	-	2 855	3 080	2 975	-	-	[62]
海南岛	海南抱虎港	碎屑下层	19°20'—20°10'	108°21'—111°03'	3 510	30	-	2 997	3 225	3 114	-	-	[62]
海南岛	西沙群岛 广金岛	GJ	16°27'	111°42'	1 850	30	-	1 070	1 251	1 156	-	-	[25]
海南岛	西沙群岛 永兴岛	YX	16°50'	112°20'	1 250	30	-	509	646	578	-	-	[25]
海南岛	三亚鹿回头	LH	18°21'	109°49'	3 160	30	-	2 588	2 799	2 695	-	-	[25]
粤东	潮州海山岛	Bed-12	23°41'	116°59'	2 910	30	-	2 284	2 514	2 395	-	-	[68]
粤东	潮州海山岛	Bed-10	23°41'	116°59'	3 530	30	-	3 024	3 252	3 140	-	-	[68]
粤东	潮州海山岛	Bed-5	23°41'	116°59'	3 720	30	-	3 259	3 464	3 370	-	-	[68]

a: 对表2中的原始数据(即未校正的数据), 使用最新的CALIB 8.0重新校正。使用海洋校正曲线Marine 20, 并考虑北半球碳库效应与区域海洋碳库校正。5000 a BP之前的区域海洋碳库效应年龄偏差 δR 为(151±85) a, 之后的为(89±59) a。**b:** 考虑南海北部构造作用的影响, 本文以平均速率0.035 mm/a计算雷琼区域海平面受构造抬升运动的影响, 珠江三角洲的构造抬升速率为0.022 mm/a, 北部湾及其他地区的构造抬升速率为0.020 mm/a。**c:** RSL=A-TUE, A为原海平面高程, TUE为平均构造抬升高程, RSL为校正后海平面高程。

表 3 南海北部海滩岩和新增珊瑚样品记录的过去海平面变化信息 (铀系测年) [31, 51]

Table 3 The past sea-level change recorded by beachrock and the newly added coral samples in the northern South China Sea (U-series dating) [31, 51]

区域	点位	样品编号	标志物	纬度/ (°N)	经度/ (°E)	校正后 ²³⁴ U/ ²³⁸ U 值	±2σ	δ ²³⁴ U/ ‰	±2σ	未校正 年龄/ a BP	±2σ	校正后 年龄/ cal a BP	±2σ	日历年龄 (距1950 年年龄)/ cal a BP	±2σ	海平 面高 程/cm	误差	数据 来源
北部湾涠洲岛		The 7th layer of BG	海滩岩	21°04'	109°06'	1.147 2	0.6	147.2	0.6	928	10	913	12	845	12	100.3	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 6th layer of BG	海滩岩	21°04'	109°06'	1.147 1	0.6	147.1	0.6	866	13	836	20	768	20	100.6	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 4th layer of BG	海滩岩	21°04'	109°06'	1.148 4	1.5	148.4	1.5	1457	22	1342	62	1274	62	98.8	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 1th layer of BG	海滩岩	21°04'	109°06'	1.144	1.5	144.0	1.5	1844	26	1780	42	1712	42	97.3	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 4th layer of GSB	海滩岩	21°03'	109°08'	1.146 8	1.6	146.8	1.6	1880	26	1834	35	1766	35	103.1	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 2th layer of GSB	海滩岩	21°03'	109°08'	1.146 5	1.7	146.5	1.7	1771	25	1760	26	1692	26	103.3	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 1th layer of GSB	海滩岩	21°03'	109°08'	1.145 6	1.3	145.6	1.3	1358	19	1337	21	1269	21	104.8	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 2th layer of HL-I	海滩岩	21°02'	109°08'	1.146 1	0.8	146.1	0.8	1490	15	1443	28	1375	28	94.4	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 1th layer of HL-I	海滩岩	21°02'	109°08'	1.146	0.7	146.0	0.7	1572	13	1561	14	1493	14	94.0	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 4th layer of HL-II	海滩岩	21°02'	109°08'	1.147 3	0.8	147.3	0.8	706	13	701	13	633	13	97.0	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 3th layer of HL-II	海滩岩	21°02'	109°08'	1.146	0.7	146.0	0.7	1468	14	1441	19	1373	19	94.4	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 2th layer of HL-II	海滩岩	21°02'	109°08'	1.146	0.7	146.0	0.7	1411	19	1405	19	1337	19	94.6	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 4th layer of HL-III	海滩岩	21°02'	109°08'	1.147 2	0.8	147.2	0.8	774	12	694	41	626	41	97.1	35	[51]
北部湾涠洲岛		The 3th layer of HL-III	海滩岩	21°02'	109°08'	1.147 6	0.7	147.6	0.7	683	8	672	10	604	10	97.1	35	[51]
海南岛铜鼓岭		TGLC-001	珊瑚	19°63'	111°02'	1.148 8	1.6	148.8	1.6	5423	12	5375	27	5304	27	200.2	9.8	[31]
海南岛铜鼓岭		TGLC-002	珊瑚	19°63'	111°02'	1.147 2	1.1	147.2	1.1	5406	14	5381	19	5310	19	198.5	9.8	[31]
海南岛铜鼓岭		TGLC-003	珊瑚	19°64'	111°01'	1.149 1	1.6	149.1	1.6	3704	11	3684	15	3613	15	183.4	9.8	[31]
海南岛铜鼓岭		TGLC-004	珊瑚	19°64'	111°01'	1.151 2	1.3	151.2	1.3	3584	19	3556	16	3485	16	162.5	9.8	[31]
海南岛青葛		QGC-001	珊瑚	19°31'	110°66'	1.149 3	1.1	149.3	1.1	5343	11	5324	15	5253	15	208.4	9.8	[31]
海南岛青葛		QGC-002	珊瑚	19°31'	110°66'	1.149 8	1.3	149.8	1.3	5394	13	5385	14	5314	14	209.5	9.8	[31]

代和高程的关系。首先,将所有年代数据统一校正为距 1950 年的年代(cal a BP)。对¹⁴C 测年的海平面数据,采用最新的 CALIB 8.2^[69] 并使用海洋校正曲线 Marine 20 对年代数据进行重新校正^[70];考虑北半球碳库效应与区域海洋碳库校正值^[47],即 5000 cal a BP 之前的区域海洋碳库效应年龄偏差 δR 为(151±85)a,之后的为(89±59)a,对所有使用¹⁴C 测年确定海滩岩形成年代的数据进行校正(如表 2 中本文校正年龄^a)。其次,考虑南海北部构造和沉积作用的影响。虽然南海北部例如雷琼区域在中晚全新世处于构造相对稳定的区域,但进行高分辨率海平面重建时应考虑构造作用的影响^[71]。例如,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抬升速率为 0.02~0.05 mm/a^[15],珠江三角洲的构造抬升速率为 0.022 mm/a^[17],北部湾及其他地区的构造抬升速率为 0.020 mm/a^[72-73](如表 2、表 3 中构造抬升高程^b,校正海平面高程^c)。所以,本文以平均速率 0.035 mm/a 计算雷琼区域海平面受构造抬升运动的影响。

3 结果

新增珊瑚样品的铀系测年结果如表 1 所示^[31]。6 个新增样品形成于 5 314~3 485 cal a BP,校正后年代误差为 14~27 a。6 个新增样品的 δ²³⁴U 介于 147.2‰±1.1‰~151.2‰±1.3‰(表 1),均处于现代海水(144‰±2‰)^[74]和现代珊瑚(156‰±6‰)^[75]之间,而且其 U 浓度平均值为 2.997 9 μg/g,与南海北部校正后的 291 个全新世珊瑚样品 U 浓度(3.113 5 μg/g)^[31]十分接近,可见新增的 6 个铀系年代数据是可信的。此外,根据其高程和铀系测年数据,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 208.4~209.5 cm。在 3 613~3 485 cal a BP 时,当地的海平面在 162.5~183.4 cm 波动。即使考虑构造抬升对海滩岩高程的影响,海南岛 5 500~3 300 cal a BP 期间也是存在高海平面的。重要的是,通过与时小军等^[54]和余克服等^[16]的雷琼区域珊瑚海平面标志物记录数

据相比较发现,新增6个样品铀系测年结果和指示的高海平面都表现出高度的一致性,进一步印证了这6个新增海平面数据的可靠性。

本文汇编了南海北部已发表的海滩岩数据,其中,使用 ^{14}C 测年的共有78组^[22, 25, 59-68](表2),统一校正为距1950年的年代数据。另外采用铀系测年的数据共有15组^[31, 50-51](表3)。本文引入新增的6组珊瑚礁记录的海平面数据汇总于表3。值得注意的是,铀系测年得到的数据是距测试时间的年代数据,为便于2种测年方法数据的分析比较,将表3的铀系年代数据全部转换为距1950年的年代数据。

从数据来源的地理位置来看,中国海滩岩的分布主要集中在广西、广东和海南岛(如图1所示)。从测年方法和年代数据来看,这些海滩岩使用 ^{14}C 测年和铀系测年(分别见表2和表3)。其中,大多数海滩岩使用 ^{14}C 测年,也有部分是利用海滩岩碎屑物中的珊瑚碎屑开展铀系测年来确定其形成年代的。这些海滩岩形成于6059~378 cal a BP期间(未校正,下同,见表2和表3),为南海北部中晚全新世以来的沉积。对其年代数据进行统计发现,南海北部早全新世和最近600年的海滩岩鲜有报道,但是中晚全新世的海滩岩广泛发育(图3)。其中,在6000~4439 cal a BP期间,海滩岩形成记录有较多中断,形成的海滩岩较少,而在4439~604 cal a BP期间,海滩岩基本连续发育。关于早全新世和最近600年的海滩岩鲜有报道,究其原因,可能与自然和人为因素相关。例如,形成于早全新世的海滩岩可能受自然因素(如火山运动、地震、风暴潮等)遭到破坏^[29],而近代形成的海滩岩可能因工业革命后频繁的人类活动等人为因素导致海滩岩沉积环境产生变化或遭受破坏。

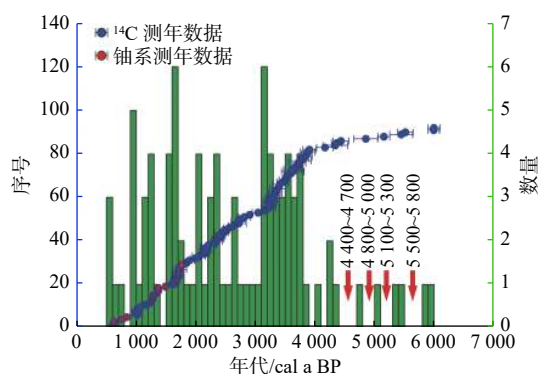


图3 海滩岩发育时间分布

Fig.3 The time distribution of the beachrocks

从海平面高程来看,可以指示海平面高程的数据共有76组,所代表的海平面高程介于-104~

600 cm(表2和表3中未校正的海平面高程),南海北部形成于中晚全新世的海滩岩保存了丰富的过去海平面变化信息。对数据进一步分析,发现在3844~3810 cal a BP期间,南海北部的海平面高达2 m。在3844~2170 cal a BP期间,南海北部持续保持高海平面。此外,如表2和表3所示,香港贝澳湾的海滩岩发现,当地海平面在2800~1500 cal a BP期间波动下降,仅略高于现代海平面^[61]。而粤东地区基于9个海滩岩露头重建的过去海平面变化曲线与全球综合海平面变化曲线对比可以发现,两者的晚全新世海平面变化趋势基本相同,均为多次波动下降至现代海平面^[63]。此外,邻近的雷州半岛海滩沉积表明,在1200 cal a BP时,当地的海平面比现在至少高128 cm^[15]。最近广西涠洲岛北部海滩岩的研究也有类似的发现,该研究推测当地海滩岩主要形成于晚全新世时期,并在1780~836 cal a BP期间的海平面高于现今海平面约100 cm^[50]。

最后,从碎屑物分选性来看,大部分海滩岩露头破碎,其中有部分海滩岩发生位移或破坏。与现有文献的数据相比,表2中有一部分海滩岩指示的海平面变化极端,形成前后的沉积环境不稳定,可能不能准确客观的反映当时的海平面。综合上述多个角度的分析,经过比较和可靠性评估后,本文最终选择的海平面数据共有31组(表4和图4)。

此外,海滩岩指示的过去海平面变化结果与其他海平面标志物重建的过去海平面变化结果相比具有较好的一致性,表明海滩岩指示的过去海平面变化结果是可信的。例如,前人对南海北部及其周围地区过去海平面变化趋势开展了广泛研究,普遍认为南海北部中全新世海平面约高于现代海平面150~220 cm^[15, 53, 72]。与此对应的是,广东饶平5160 cal a BP的海滩岩指示的海平面高程为150 cm^[60]。随着中全新世大暖期的到来,全球海平面逐渐上升,同时期广东饶平的海滩岩指示的海平面高程也升高了43~68 cm^[60, 63]。在3000 cal a BP时,南海气候温凉,海平面波动幅度较小^[76],平均海平面最高可能只有150 cm^[77]。在3000 cal a BP时,广东大屿山和海南临高的海滩岩指示的过去海平面高程也都未超过150 cm^[64-65]。此外,研究3270~866 cal a BP期间广西涠洲岛、广东东南部和海南文昌等地的海滩岩可以发现,各地区此时期的海平面变化波动升降,波动幅度较小,最大波动范围分别为35、70、33 cm^[50, 53, 72],当地中晚全新世海平面

表 4 选取的指示南海北部过去海平面的海滩岩和珊瑚礁数据 (校正前)

Table 4 Selected beachrocks and corals indicating the ancient sea-level in the northern South China Sea(before correction)

序号	区域	点位	样品编号	测年方法	未校正年龄/a BP	±2σ 误差	海平面高程 /cm	误差
1	珠三角	惠州碧甲	亚妈庙沙堤	¹⁴ C测年	2 415	80	196.10	10.0
2	粤东	汕头大屿山	贝澳湾内沙堤	¹⁴ C测年	1 660	75	78.08	10.0
3	粤东	潮州饶平	潮州饶平	¹⁴ C测年	5 160	100	139.74	10.0
4	粤东	惠州惠东	平海岭头	¹⁴ C测年	2 415	85	196.46	12.0
5	珠三角	深圳西冲	KWG-209	¹⁴ C测年	2 170	85	146.73	12.0
6	珠三角	江门台山	海晏公角	¹⁴ C测年	3 910	110	119.07	10.0
7	雷州半岛	雷州半岛南部	雷州半岛南部	¹⁴ C测年	1 040	65	98.61	10.0
8	海南岛	三亚东瑁岛	东瑁岛西岸	¹⁴ C测年	3 810	85	187.81	10.0
9	海南岛	三亚天涯海角	17	¹⁴ C测年	3 844	109	187.66	10.0
10	珠三角	香港贝澳	香港贝澳	¹⁴ C测年	1 700	80	147.79	10.0
11	北部湾	涠洲岛	The 7th layer of BG	铀系测年	845	12	100.3	35.0
12	北部湾	涠洲岛	The 6th layer of BG	铀系测年	768	20	100.6	35.0
13	北部湾	涠洲岛	The 4th layer of BG	铀系测年	1 274	62	98.8	35.0
14	北部湾	涠洲岛	The 1th layer of BG	铀系测年	1 712	42	97.3	35.0
15	北部湾	涠洲岛	The 4th layer of GSB	铀系测年	1 766	35	103.1	35.0
17	北部湾	涠洲岛	The 2th layer of GSB	铀系测年	1 692	26	103.3	35.0
18	北部湾	涠洲岛	The 1th layer of GSB	铀系测年	1 269	21	104.8	35.0
19	北部湾	涠洲岛	The 2th layer of HL-I	铀系测年	1 375	28	94.4	35.0
20	北部湾	涠洲岛	The 1th layer of HL-I	铀系测年	1 493	14	94.0	35.0
21	北部湾	涠洲岛	The 4th layer of HL-II	铀系测年	633	13	97.0	35.0
22	北部湾	涠洲岛	The 3th layer of HL-II	铀系测年	1 373	19	94.4	35.0
23	北部湾	涠洲岛	The 2th layer of HL-II	铀系测年	1 337	19	94.6	35.0
24	北部湾	涠洲岛	The 4th layer of HL-III	铀系测年	626	41	97.1	35.0
25	北部湾	涠洲岛	The 3th layer of HL-III	铀系测年	604	10	97.1	35.0
26	海南岛	铜鼓岭	TGLC-001	铀系测年	5 304	27	200.2	9.8
27	海南岛	铜鼓岭	TGLC-002	铀系测年	5 310	19	198.5	9.8
28	海南岛	铜鼓岭	TGLC-003	铀系测年	3 613	15	183.4	9.8
29	海南岛	铜鼓岭	TGLC-004	铀系测年	3 485	16	162.5	9.8
30	海南岛	青葛	QGC-001	铀系测年	5 253	15	208.4	9.8
31	海南岛	青葛	QGC-002	铀系测年	5 314	14	209.5	9.8

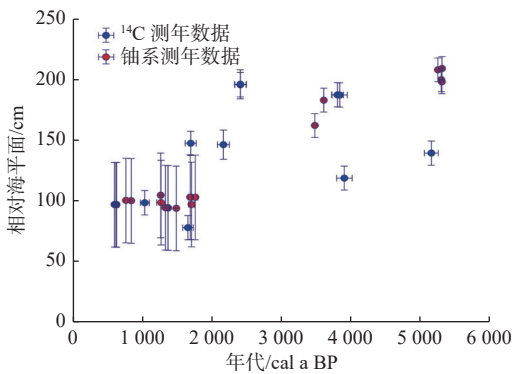


图 4 南海北部基于海滩岩和新增珊瑚礁的相对海平面数据 (校正前)

Fig.4 Sea-level index points based on beachrock and coral samples obtained from literatures for the northern South China Sea (before correction)

在到达现代海平面之前也经历过数次波动。

综上所述, 海滩岩记录的南海北部中晚全新世过去海平面变化趋势与现有结论基本相同, 说明海滩岩作为热带、亚热带地区常见的海平面标志物, 记录了丰富的过去海平面变化信息, 可以给各地区海平面重建提供依据。

4 讨论

4.1 海滩岩重建过去海平面变化曲线的不确定性

有观点认为, 全新世以来全球气温逐步升高, 北半球大陆冰川消融^[48, 78]。海表逐渐膨胀, 全球海

平面大幅上升,南海海平面也受全球海平面升高的影响,早全新世海平面以超过 10 mm/a 的速率快速上升^[79-80]。南海北部全新世至少存在 4 期高海平面阶段,分别在 7 300~6 000、4 800~4 700、4 300~4 200、3 100~2 900 cal a BP,其中,7 300~6 000 cal a BP 是整个全新世最高海平面时期^[81]。冰川均衡理论认为,全球海平面在中全新世是经过几次振荡波动才到现在海平面位置的^[82],在远离冰均衡效应影响的区域(例如南海),水均衡效应增加引起洋盆滞后缓慢下沉,可以解释海平面变化曲线的平滑模式。但是,学术界对基于海滩岩重建的中晚全新世海平面是否存在高海平面的认识仍存有争议。

例如,在广东沿岸,有学者利用 19 个海滩岩露头重新构建了南海北部过去 6 000 年的海平面变化曲线,认为南海北部中晚全新世的海平面持续波动,波动幅度较大^[83]。但是,也有学者指出粤东当地过去 5 000 年的海平面相对稳定并没有大幅波动^[22]。此外,有研究推断广东南澳在 3 000 cal a BP 的海平面高程为 254 cm^[30, 63]。该结论与前文提到的在 3 000 cal a BP 时南海海平面高程最高只有 150 cm 左右的观点^[64-65] 相差甚远。这些研究结果表明,学术界对利用海滩岩重建的过去海平面变化结果存在争议。

海滩岩作为热带、亚热带地区常见的海平面标志物,为进一步了解南海北部海平面变化历史提供大量的数据。需要注意的是,海滩岩沉积时所受动力发生改变、沉积物质供给情况变化、海滩岩碎屑物早于海滩岩形成、测年方法的误差和当地潮汐差的不同都会使利用海滩岩重建的过去海平面曲线结果存在不确定性^[84]。例如,目前使用精度较高的¹⁴C 测年技术对海滩岩进行定年,但是测试结果的误差基本在百年左右(表 2)。有研究表明,在冰消期后气候变暖,海平面快速上升,海平面波动幅度可达数米以上^[15, 30, 63-65]。由于误差范围太大,测年结果无法准确记录这些海平面波动。其次,如表 2 中所示,有部分海滩岩受自然因素和人为因素影响,高程已经产生较大变化,如果在重建过程中不能进行高度校正,可能导致重建结果存在争议。由此可见,在南海北部利用海滩岩这一海平面标志物开展中晚全新世海平面重建时,数据的可靠性仍需探讨。

4.2 海滩岩测年结果的不确定性与校正

南海北部的海滩岩碎屑物中常见有孔虫、贝壳碎屑和珊瑚碎屑,通过¹⁴C 测年可以确定海滩岩的

形成年代^[22, 29, 85]。当然也可以挑选碎屑物中的珊瑚碎屑,使用铀系测年确定海滩岩的形成年代^[15, 50]。通过对南海北部已发表的中晚全新世海滩岩年代数据(表 2、3)进行分析,发现多数海滩岩使用¹⁴C 测年技术确定海滩岩的形成年代,然而,大部分结果都未经过校正。考虑到海洋碳库效应以及当地碳库校正(Delta±R)的影响,其年代结果的准确性仍需要讨论。

¹⁴C 测年技术在古环境重建上广泛应用,对于大多数有机物而言,基本上都可以进行¹⁴C 定年。此外,一些无机物质,例如珊瑚或贝壳等的文石(主要为碳酸钙)成分也可以通过¹⁴C 测年确定形成年代^[49]。需要注意的是,影响¹⁴C 测年精度最主要的因素来自碳库效应^[47, 86-89],例如,受海洋碳库效应的影响,陆地生物的放射性碳含量和海洋生物的放射性碳含量并不相同^[89],而且年龄等同的陆地和海洋生物的放射性碳测年在放射性碳年龄上存在一个约 400 年的差异。此外,碳库效应在不同时间段的影响也不相同。例如,南海海洋碳库 7 500~5 600 cal a BP 和 3 500~2 500 cal a BP 分别为(151±59) a 和(89±59) a^[47]。更为重要的是,受海洋环流的影响,¹⁴C 测年的校正也随位置的变化而变化。例如,在同一年中,南北半球的碳值含量也不相同^[90]。因此,对¹⁴C 测年校正时,需要注意使用最新的海洋碳库校正值。

本文收集到的已发表的海滩岩¹⁴C 测年校正前和校正后的年代存在较大的差异(图 5)。中晚全新世以来,年龄越小,校正前后的年龄差异越明显。例如,表 2 中海滩岩¹⁴C 测年结果校正前 5 995 和 6 000 cal a BP 的 2 组数据^[60] 经过校正后,分别为 6 064 和 6 059 cal a BP,校正前后年代差异分别为 59 和 69 a。而校正前 4 365 和 4 345 cal a BP 的海滩岩^[22] 经过校正后,分别为 4 197 和 4 169 cal a BP,校正前后年代差异分布为 168 a 和 176 a。再者,校正前为 1 040、1 190 cal a BP 的海滩岩年代数据^[22, 63],校正后分别为 398、531 cal a BP,校正前后年代差异分别为 642 和 659 a。通过对比表 2 中校正前和校正后的¹⁴C 年龄可以发现,校正后年龄平均年轻了 478 a。例如,未校正年龄在 1 020~2 560 cal a BP 范围内的,校正后年轻了 629~703 a。未校正年龄在 3 880~2 630 cal a BP 范围内的,校正后年轻了 305~594 a。未校正年龄在 2 560~1 020 cal a BP 范围内,校正后年轻了 629~703 a。未校正年龄在 6 000~4 345 cal a BP 范围内的,校正后年轻了-25~230 a。

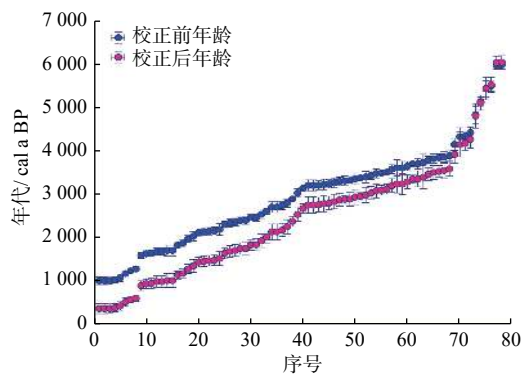
图 5 ^{14}C 测年结果校正前和校正后的对比

Fig.5 Comparison of ^{14}C dating results before and after correction

此外,我们利用 CALIB 8.2^[69]、CLAM^[86], 还有 BACON^[91] 对表 2 中 ^{14}C 测年数据分别进行校正, 同样都考虑了碳库效应, 但是发现它们校正后的结果各不一样, 校正后的年代数据存在 10~1 300 a 的差异, 而 CALIB 8.2 软件校正后的结果相对来说偏差最小。因此, 考虑到碳库效应和外部误差^[69-70, 91], 有学者提醒对 ^{14}C 测年结果的环境解释需要格外小心^[92], 同时建议选择适合的校正软件重新对数据进行统一校正^[93]。

有研究认为, 海滩岩形成后仍受沉积环境影响, 碎屑物中可能混入老的或更年轻的有机碳^[85], 是导致海滩岩 ^{14}C 年龄差异和不确定性的主要原因。例如, 有学者研究澳大利亚昆士兰州海岸的钙结核时发现, 随着年龄的增加, 样品白云石含量也相应增加, 白云石含量高的样品都明显偏年轻, 白云石化作用中可能发生了阴阳离子的交换, 将较年轻的碳结合到了碎屑物中^[94]。与此类似的是, 海滩岩碎屑物中不同种属有孔虫壳壁构造在沉积环境中会发生同位素交换, 吸收的碳元素不同, 得到的测年结果与真实情况有差异^[95-96]。此外, 有观点认为浅海及砂质海滩的贝壳也广泛存在于海滩岩碎屑物中, 可以用来重建各岩石的沉积环境^[95, 97]。但文石是贝壳主要成分, 在岩石沉积过程中会继续重结晶使贝壳被污染, 也会增加 ^{14}C 测年结果的不确定性。

南海北部珊瑚礁广泛发育^[15, 53], 珊瑚骨骼生长时与环境相互交融, 一旦珊瑚骨骼形成, 内部物质将被封存, 经过几千年都不会被破坏^[53], 海滩岩中的珊瑚碎屑物受到污染的可能性极小。

与 ^{14}C 测年相比较, 铀系测年或许更适合南海北部的海滩岩测年。铀系测年主要基于放射性核素 ^{238}U 与其衰变子体 ^{234}U 、 ^{230}Th 之间的不平衡关系^[98], 铀元素的子体从母体中分离, 由各自的半衰期速率

进行衰变, 利用辐射探测器测定核素的放射性比值, 以此推算沉积物的年代^[99]。有研究表明, 珊瑚样品的 ^{14}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^[93, 100-101], 甚至超过 3 000~3 500 a 的差异^[100], 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^[101], 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^[93, 100-101]。此外, 相较于 ^{14}C 测年, 海滩岩中的珊瑚碎屑物利用铀系测年范围更宽泛, 百年至千年尺度的误差仅为 1%~3%^[89, 98]。考虑上述因素的影响, 我们认为南海北部海滩岩的珊瑚碎屑可能是更加理想的测年样品, 其测年结果也能更准确地反映海滩岩形成的年代。

即便如此, 还是需要对铀系年代数据进行可靠性评估。通过比较珊瑚碎屑与现代海表和珊瑚的 $\delta^{234}\text{U}$ (T), 讨论南海北部中晚全新世海滩岩铀系测年数据的可靠性。汇编的数据中, 如果样品的 $\delta^{234}\text{U}$ (T) 处于现代海水 $\delta^{234}\text{U}$ (T) (平均值为 $144\text{‰} \pm 2\text{‰}$ (2 σ , 下同))^[74] 和现代珊瑚的 $\delta^{234}\text{U}$ (T) ($156\text{‰} \pm 6\text{‰}$) 区间^[75], 被认为是可靠的。样品中如果有明显异常低的 $\delta^{234}\text{U}$ 和 U ($\mu\text{g/g}$) 值, 可能反映出某种程度上受成岩、侵蚀作用或输入的碎屑物靠近陆地使样品中 U 的流动性和 U-Th 同位素受到干扰^[102-104]。因此, 异常的数据则不在挑选和讨论范围内。从表 3 校正后的 U-Th 年龄结果来看, 南海北部中晚全新世海滩岩校正后的年龄与校正前相比, 平均年轻了 69 a。而且, 与表 2 中利用 ^{14}C 测年得到的结果相比, 铀系测年的误差显然更小。

综上所述, 通过海滩岩中的珊瑚碎屑进行铀系测年, 可能更加客观地反映海滩岩的形成时间。海滩岩中的生物碎屑需要一个水动力搬运、沉积到胶结成岩的过程, 所以生物碎屑物形成的年代早于海滩岩形成年代。不同生物碎屑形成时期不同, 碎屑物中存在新旧碎屑物都存在的可能^[29, 43]。生物碎屑年代与海滩岩实际年龄有复杂关系, 没有具体结论表示生物碎屑年代和海滩岩真实年龄的具体差异。但是, 对于判断海滩岩指示的过去海平面位置最早出现时间具有一定的参考意义。

4.3 海滩岩高程的不确定性与校正

作为远场区域, 南海北部中晚全新世期间构造相对稳定^[105-107], 但局部区域仍有火山活动和海侵事件的记录等^[20, 29, 108]。事实上, 除了过去几十年记录的轻微沉降外^[109], 南海北部全新世以来一直处

海平面重建^[109]。近年来,人类活动对海滩岩的破坏更为严重,致使野外寻找完整的海滩岩非常困难。例如,我们曾于 2016—2021 年多次对广西涠洲岛海滩岩进行调研,发现五彩滩沿岸的海滩岩被岛民当作建筑石料或者用于外墙装饰。大量的人为破坏和开采,导致涠洲岛环岛多处海滩岩都不完整。当然,无论是自然因素还是人为因素,海滩岩形成后露头一直都处于动态变化。为了更加客观地反映过去海平面变化历史,减少海滩岩指示的过去海平面高程的不确定性,有必要尽可能的寻找原生、沉积环境更为稳定且未遭破坏的海滩岩作为研究对象。

4.5 校正结果及其可靠性分析

为能更准确反映南海北部中晚全新世海滩岩指示的过去海平面变化趋势,结合上述因素影响,本文对 28 组可以指示过去海平面变化的海滩岩形成年代和高程数据进行校正和量化分析,重新绘制南海北部中晚全新世相对海平面变化曲线(拟合曲线相关系数 $R^2=0.97$, 如图 7 所示)。经过校正后的南海北部中全新世至晚全新世的海平面序列更为连续和有规律,而且大致呈阶梯下降趋势。例如,在 5 314~4 169 cal a BP 期间,南海北部记录的海平面比现今海平面高 185.41~209.5 cm。在 4 169~3 482 cal a BP 期间长达 700 年的时间内,南海北部海平面保持相对稳定的状态,海平面高程在 185 cm 左右窄幅波动。虽然在 3 482~1 766 cal a BP 期间的海平面数据相对较少甚至缺失,但是有记录显示海平面从 2 271 cal a BP 时的 165.46 cm 下降到 1 766 cal a BP 时的 103.1 cm,在这 500 年中,南海北部的海平面下降了 62.3 cm。在 1 766~398 cal a BP 期间,南海北部海平面趋近稳定,海平面高程为

78.08~104.8 cm,波动幅度为 26 cm。

值得注意的是,校正后的海滩岩相对海平面和南海周边其他海平面标志物记录的时期海平面高程是一致的^[118-119],表明上述校正后的海平面序列具有较高的可靠性。例如,有学者对雷州半岛的原生滨珊瑚开展研究,认为当地在 5 415±25 至 3 448±12 cal a BP 期间的海平面为 155~224 cm^[54]。而据新近研究报道,马来半岛在 6 500~4 500 cal a BP 期间的海平面在 150~200 cm 波动^[120]。这与本文校正后的海滩岩记录的海平面变化曲线显示在 5 314~3 482 cal a BP 期间,南海北部的海平面为 162.5~200.2 cm(图 7)基本一致。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,至少在南海是一致的^[19],并进一步证明我们对海滩岩进行不确定性分析可以真实地还原海滩岩记录的海平面位置。

基于校正后的海滩岩数据重建的海平面变化曲线与使用其他方法重建的海平面变化曲线相比,可以引出一些有意义的讨论。例如,全球水动力型海平面变化曲线在全新世的结果显示^[121],在 800~300 cal a BP 期间,全球海平面高度在 100 cm 左右,南海北部晚全新世海平面高程介于 95~105 cm。地介参数 RF3L15 讨论冰川均衡调整模型(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)认为,2 000~1 800 cal a BP 期间东亚海平面持续波动升降,但波动幅度明显小于中全新世^[122]。南海北部中晚全新世海平面变化曲线在 3 500 cal a BP 附近的海平面波动幅度也小于 5 314~4 169 cal a BP 的海平面波动幅度。如图 8 所示,经过校正后的南海北部中晚全新世相对海平面变化曲线与基于 GIA 与地壳运动的英国相对海平面变化曲线^[123]、基于 GIA 的英国相对海平面变化曲线^[124]和基于 ICE-5G 的全球海平面变化^[125]相比高程偏高。这可能因为南海北部远离冰盖,部分海水由靠近冰盖的区域即近场区域向远场区域迁移,以此补充远离冰盖地区因地壳沉降造成的空间损失^[126]。而且全球海洋水量也是不均匀分布的,不同地区海洋水量的变化引起地表压力不平衡使陆地地壳垂直升降与地幔流流动,表现为当某一区域海平面下降时(海水容量减少),靠近大陆架地区的地壳会微小抬升^[127],南海北部地壳在中晚全新世整体恰好表现为相对抬升趋势^[71, 128]。受到地幔流的分布具有滞后性的影响^[129],不同地区的海平面也不相同。

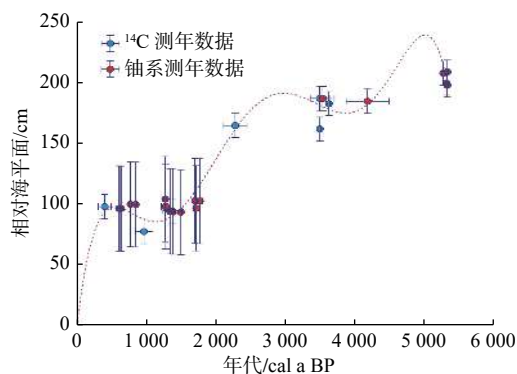


图 7 重建的南海北部中晚全新世相对海平面曲线(校正后)

Fig.7 Reconstructed Mid-late Holocene relative sea-level changes in the northern South China Sea (after correction)

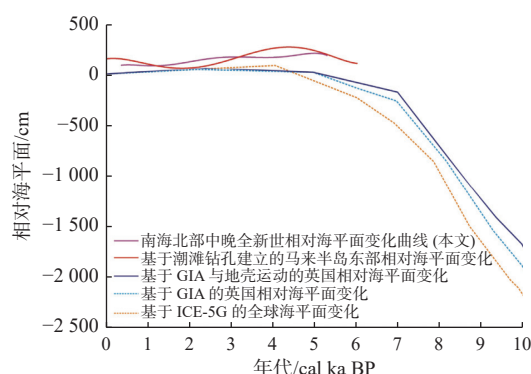


图8 其他地区相对海平面曲线对比

Fig.8 Comparison of the relative sea-level changes in other areas

此外,远场区域中晚全新世海平面高于近场区域的海平面。例如,将马来半岛东部相对海平面变化曲线^[120]与其他地区相对海平面变化曲线对比,马来半岛东部的中晚全新世海平面高程要高于高纬度的英国和全球海平面高程。南海北部和马来半岛东部都位于远离冰盖的区域,自中全新世冰盖融化减缓后,海水由近场流入远场使南海北部及其周边地区海平面高于近场区域的海平面。但是从总体来看,不论是近场还是远场区域,各地的海平面自中全新世至晚全新世都呈下降趋势。马来半岛的过去海平面变化趋势与南海北部的过去海平面变化趋势不同,这可能是东亚季风与海洋环流对不同地区的影响所导致的。当然,由于采用的海平面标志物不同,不同地区的海平面更会存有差异性,即使是相同的区域,过去海平面重建结果也会存有不同,其中包含标志物的差异、测量方法与海平面波动变化的影响^[17-18]。例如北大西洋沿岸过去2000年的海平面变化具有显著的时空差异性,受海平面自身波动幅度与波动时间变化的影响,北大西洋沿岸过去2000年的海平面高程整体虽然呈上升趋势,但不同地区过去海平面上升高程相差大^[18]。

综上所述,虽然校正后的海平面高程偏高,但不同地区的海平面变化趋势不相同,基本都会与全球海平面变化有差异,此前也有研究证明南海全新世海平面高程高于同期全球平均值^[130-131]。但是,经过上述校正和分析后,海滩岩指示的过去海平面高程应该更加接近真实情况,数据也更加可信。因此,为利用其他海平面标志物(例如滨珊瑚微环礁、红树林、盐沼等)重建过去海平面时提供参考和借鉴。

5 结论

海滩岩是热带和亚热带海岸潮间带特有的一

种滨海相沉积岩,由碳酸钙(文石与高镁方解石)为主要成分的含有硅酸盐岩成分的碳酸盐胶结海滩沉积物而形成,记录了丰富的海平面信息,为我们认识过去海平面变化特征提供了大量依据。基于南海北部海滩岩原始的海平面高程和年代信息,以及3个原生珊瑚礁(1块大型块状滨珊瑚和2块滨珊瑚微环礁)的6个新珊瑚礁样品的参照对比,我们对南海北部海滩岩进行了年代和高程的校正和不确定性分析,并重建了该区域中晚全新世以来的相对海平面序列。结合GIA和ICE-5G模型结果,对基于海滩岩重建的南海北部中晚全新世海平面的可靠性进行比较和评估。研究结果表明:

(1)经过量化分析,可以进一步提高南海北部海滩岩年代和海平面高程的可靠性。例如,¹⁴C测年校正前后的年代存在-64~703 a的差异,形成年龄越小,差异越明显。海滩岩指示的过去海平面高程经过构造校正后平均抬升了6 cm。选择海滩岩内不易受污染的碎屑物(例如,珊瑚碎屑)铀系测年并考虑研究区域的平均构造抬升速率,可以更加客观地反映真实的海平面高程,同时减少重建结果的不确定性。

(2)基于上述校正和新增的珊瑚礁海平面标志物数据,对南海北部中晚全新世海平面变化趋势有了更准确的认识。如图7或图8a所示,南海北部中晚全新世以来海平面呈现出波动下降的过程,在5314~4169 cal a BP期间存在高海平面,比现今海平面高185.41~209.5 cm。直到3482 cal a BP,海平面依然在185 cm左右窄幅波动。在2271~1766 cal a BP期间,南海北部海平面从165.46 cm下降到103.1 cm。在1766~398 cal a BP期间,海平面在78.08~104.8 cm波动。此后,南海北部海平面趋于稳定,逐渐下降至现代海平面。

(3)本文对于海平面重建结果的校正和不确定性讨论,不仅适用于海滩岩,利用其他海平面标志物(例如滨珊瑚微环礁、红树林、盐沼等)进行过去海平面重建工作时,也可以参考借鉴。此外,对于南海北部海滩岩发育与海表温度的关系,还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] KOPP R E, KEMP A C, BITTERMANN K, et al. Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era[J]. PNAS, 2016, 113(11): E1434.
- [2] WEBSTER J M, GEORGE N P J, BEAMAN R J, et al. Submar-

- ine landslides on the Great Barrier Reef shelf edge and upper slope: a mechanism for generating tsunamis on the north-east Australian coast?[J]. *Marine Geology*, 2015, 371(1): 120-129.
- [3] ZHANG Y Z, XIE J Z, LIU L. Investigating sea-level change and its impact on Hong Kong's coastal environment[J]. *Geographic Information Sciences*, 2011, 17(2): 105-112.
- [4] FREDERIKSE T, LANDERER F, CARON L, et al. The causes of sea-level rise since 1900[J]. *Nature*, 2020, 584(7821): 393-397.
- [5] LIU W C, HUANG W C. Influences of sea level rise on tides and storm surges around the Taiwan coast[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 173: 9-13.
- [6] WILES E, GREEN A N, COOPER J A G. Rapid beachrock cementation on a South African beach: linking morphodynamics and cement style[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 378(10): 13-18.
- [7] BONADUCE A, PINARDI N, ODDO P, et al. Sea-level variability in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauges[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(9/10): 1-16.
- [8] CHEN X Y, ZHANG X B, CHURCH J A, et al. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 492-495.
- [9] 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.
- [10] DEAN R G, HOUSTON J R. Recent sea level trends and accelerations: comparison of tide gauge and satellite results[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 75(5): 4-9.
- [11] 刘振夏. 中国现代海平面变化及影响[J]. *海洋开发与管理*, 1991, 8(3): 17-20.
- [12] 胡志博, 郭金运, 谭争光, 等. 由TOPEX/Poseidon和验潮站监测香港海平面变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(4): 56-59.
- [13] 李大伟, 李建成, 团文征. 利用卫星测高与验潮站数据监测越南近海海平面变化[J]. *测绘通报*, 2017, 1(6): 1-4.
- [14] 陆青, 左军成, 吴灵君. 热带太平洋海平面低频变化[J]. *海洋学报*, 2017, 39(7): 43-52.
- [15] 汤超莲, 游大伟, 陈特固, 等. 1986—2008年广东沿海海平面变化趋势[J]. *热带地理*, 2009, 29(5): 423-428.
- [16] 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]. *地质学前沿*, 2009, 16(6): 138-145.
- [17] ZONG Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China[J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 55-67.
- [18] XIONG H X, ZONG Y Q, PENG Q. Holocene sea-level history of the northern coast of South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 194(15): 12-26.
- [19] 乐远福, 唐立超, 余克服. 北大西洋沿岸过去2 000年海平面变化的若干重要特征[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(6): 1-15.
- [20] 乐远福. 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.
- [21] 黄金森, 朱袁智, 沙庆安. 西沙群岛现代海滩岩岩石学初
- 见[J]. *地质科学*, 1978, 13(4): 358-364.
- [22] 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.
- [23] 王绍鸿. 福建全新世海滩岩及其地质意义[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 1(4): 106-112.
- [24] 赵希涛, 沙庆安, 冯文科. 海南岛全新世海滩岩[J]. *地质科学*, 1978, 1(2): 67-77, 98, 103-105.
- [25] 朱长歧, 周斌, 刘海峰. 南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 683-693.
- [26] DARYONO L R, NAKASHIMA K, KAWASAKI S, et al. Sediment characteristics of beachrock: a baseline investigation based on microbial induced carbonate precipitation at Krakal-Sadranan Beach, Yogyakarta, Indonesia[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 520.
- [27] FALKENROTH M, SCHNEIDER B, HOFFMANN G. Beachrock as sea-level indicator: a case study at the coastline of Oman (Indian Ocean)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 206(15): 81-98.
- [28] GASSE F, FONTES J C, CAMPO E V, et al. Holocene environmental changes in Bangong Co Basin (Western Tibet). Part 4: Discussion and conclusions[J]. *Palaeogeography*, 1996, 120(1/2): 79-92.
- [29] 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.
- [30] 詹文欢, 刘以宣. 粤东沿海全新世海滩岩的特征及其所反映的海平面变化[J]. *热带海洋学报*, 1998, 17(2): 24-31.
- [31] 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.
- [32] 张乔民, 隋淑珍. 中国红树林湿地资源及其保护[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 28-36.
- [33] 曾丽丽, 施平, 王东晓, 等. 南海蒸发和净淡水通量的季节和年际变化[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(4): 929-938.
- [34] WANG Y J, CHENG H, Edwards R L. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2007, 308(5723): 854-857.
- [35] 刘秦玉, 李薇, 徐启春. 东北季风与南海海洋环流的相互作用[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(5): 493-502.
- [36] XIAN L Z, FAN Q Y, ZENG G, et al. The variation of the low-level cross-equatorial flow over the South China Sea and its association with the East Asian summer monsoon in midsummer[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 34(3): 339-346.
- [37] 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*, 2019, 521: 57-71.
- [38] 杨庆轩, 梁鑫峰, 田纪伟, 等. 南海北部海流观测结果及其谱分析[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(6): 561-568.
- [39] QI H E, WEI Z, WANG Y. Study on the sea currents in the northern shelf and slope of the South China Sea based on the observation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 17-28.

- [40] 郭忠信, 杨天鸿, 仇德忠. 冬季南海暖流及其右侧的西南向海流[J]. 热带海洋学报, 1985, 1(1): 3-11.
- [41] 毕福志, 袁义申, 尹云鹏. 广东海山岛晚全新世“海滩岩田”的沉积相及其海岸升降特征的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 2(2): 47-59.
- [42] 毕福志, 袁义申. 山东乳山海滩岩及其重要科学意义[J]. 现代地质, 1991, 1(2): 85-91.
- [43] 张明书. 关于海滩岩几个问题的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 1(2): 107-114.
- [44] 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 1-336.
- [45] 王雪木, 陈万利, 薛玉龙, 等. 西沙群岛宣德环礁晚第四纪灰砂岛沉积地层[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(6): 37-45.
- [46] 孙志鹏, 许红, 王振峰, 等. 西沙群岛海滩岩类型及其油气地质意义[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(7): 1-6.
- [47] 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(2): 25-40.
- [48] FANG X Q, HOU G L. Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(4): 385-393.
- [49] STOULOS S, SAMARTZIDOU E, MANIATIS Y, et al. U-series geochronology using the spectrometry method cooperated with C-14 dating results[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018, 318(3): 1837-1843.
- [50] 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.
- [51] 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]. *Holocene*, 2021, 11/12(31): 1745-1760.
- [52] 梁文, 黎广钊. 涠洲岛珊瑚礁分布特征与环境保护的初步研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(6): 5-17.
- [53] 杨红强, 余克服. 微环礁的高分辨率海平面指示意义[J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 354-362.
- [54] 时小军, 余克服, 陈特固, 等. 中一晚全新世高海平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.
- [55] 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.
- [56] ENGELHART S E, HORTON B P, KEMP A C. Holocene sea-level changes along the United States' Atlantic Coast[J]. *Oceanography*, 2011, 24(2): 70-79.
- [57] FRANCA A. Encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process[J]. *Reference reviews*, 2011, 25(8): 39-40.
- [58] 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(1-3): 397-408.
- [59] 毕福志, 林耀光. 中国全新世海平面变化周期与世界未来海平面变化规律[J]. 第四纪研究, 1991, 11(1): 43-54, 99-100.
- [60] 孙桂华, 朱本铎. 南海及其周缘地区全新世海平面遗迹的构造含义[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 58-68.
- [61] 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.
- [62] 徐笑梅, 高抒, 周亮, 等. 海南岛东北部海岸极端波浪事件沉积记录[J]. 海洋学报, 2019, 41(6): 52-67.
- [63] 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, 1(4): 30-25.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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(1): 111-122.
- [68] SHEN J W, LONG J P, PEDOJA K, et al. Holocene coquina beachrock from Haishan Island, east coast of Guangdong Province, China[J]. *Quaternary International*, 2013, 310(15): 199-212.
- [69] STUIVIER M, REIMER P J. CALIB rev. 8. Radiocarbon, 1993, 35, 215-230.
- [70] HEATON T J, KHLER P, BUTZIN M, et al. Marine20—the marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP) [J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 779-820.
- [71] YAO Y T, ZHAN W H, SUN J L, et al. 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.
- [72] 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(1/2): 35-45.
- [73] ZONG Y Q, INNES J B, WANG Z, 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.
- [74] CHEN J H, EDWARDS R L, WASSERBURG G J. ^{238}U , ^{234}U and ^{232}Th in seawater[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1986, 80(3/4): 241-251.
- [75] 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(1/4): 115-130.
- [76] 朱照宇, 邱燕, 周厚云, 等. 南海全球变化研究进展[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 315-322, 324.
- [77] CHEN Y G, LIU T K. Sea Level Changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait[J]. *Quaternary Research*, 1996, 45(3): 254-262.
- [78] BAKER J L, LACHNIET M S, CHERVYATSOVA O, et al. Holocene warming in western continental Eurasia driven by glacial retreat and greenhouse forcing[J]. *Nature Geoscience*,

- 2017, 10(6): 430-435.
- [79] XIONG H X, ZONG Y Q, HUANG G Q, et al. Sedimentary responses to Holocene sea-level change in a shallow marine environment of southern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 166(10): 95-106.
- [80] XIONG H X, ZONG Y Q, LI T, et al. Coastal GIA processes revealed by the early to middle Holocene sea-level history of East China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 233(1): 106249.
- [81] 陈俊仁, 陈欣树. 全新世海南省鹿回头海平面变化之研究[J]. *南海地质研究*, 1991, 3: 77-86.
- [82] BAKER R G V, HAWORTH R J. Smooth or oscillating late Holocene sea-level curve? Evidence from cross-regional statistical regressions of fixed biological indicators[J]. *Marine Geology*, 2000, 163(1): 353-365.
- [83] 刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 第四纪的主要气候事件[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(3): 239-248.
- [84] RAJSHEKHAR C, REDDY P P. Late Quaternary beach rock formations of Andaman-Nicobar Islands, Bay of Bengal[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2003, 62(5): 595-604.
- [85] CALDAS L, STATTEGGER K, VITAL H. Holocene sea-level history: evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil[J]. *Marine Geology*, 2006, 228(1/4): 39-53.
- [86] BLAAUM M. Methods and code for "classical" age-modeling of radiocarbon sequences[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(5): 512-518.
- [87] CRAIG H. Carbon 13 in Plants and the relationships between carbon 13 and carbon 14 variations in nature[J]. *Journal of Geology*, 1954, 62(2): 115-149.
- [88] MARTIN C W. Radiocarbon dating: recent applications and future potential[J]. *Geoarchaeology-an International Journal*, 2010, 14(4): 371-373.
- [89] HALL B L, HENDERSON G M. Use of uranium-thorium dating to determine past ^{14}C reservoir effects in lakes: examples from Antarctica[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(3/4): 565-577.
- [90] 姜帆, 刘俊文, 黄志炯, 等. 黑碳气溶胶的稳定和放射性碳同位素研究进展[J]. *科学通报*, 2020, 65(35): 109-120.
- [91] BLAAUW M, CHRISTEN J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process[J]. *Bayesian Analysis*, 2011, 6(3): 657-674.
- [92] 刘志杰, 余佳, 孙晓燕, 等. 海洋沉积物 ^{14}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.
- [93] 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.
- [94] 陈以健, POLACH H. 沉积物中碳酸盐 ^{14}C 年龄的可靠性[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 2: 133-141.
- [95] 邓文峰, 韦刚健, 李献华. 有孔虫的高精度Mg/Ca比值的ICP-AES分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 147-151.
- [96] 樊耘畅, 丁旋, 樊加恩, 等. 东海陆架浙闽沿岸泥质区不同属种底栖有孔虫对 ^{14}C 测年的影响及其原因初探[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(3): 792-798.
- [97] 李建芬, 苏盛伟, 商志文, 等. 渤海湾巨葛庄贝壳堤与下伏泥层有孔虫组合的海面变化意义[J]. *地质通报*, 2016, 35(10): 1584-1589.
- [98] STIRLING C H, ANDERSEN M B. Uranium-series dating of fossil coral reefs: extending the sea-level record beyond the Last Glacial cycle[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2009, 284(3/4): 269-283.
- [99] ZHAO J X, YU K F, FENG Y X. High-precision ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th disequilibrium dating of the recent past: a review[J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(5): 423-433.
- [100] BARD E, ARNOLD M, FAIRBANKS R G, et al. ^{230}Th - ^{234}U and ^{14}C ages obtained by mass spectrometry on corals[J]. *Radiocarbon*, 1993, 35: 191-199.
- [101] EISENHAEUER A, WASSERBURG G J, CHEN J H, et al. Holocene sea-level determination relative to the Australian continent: U/Th (TIMS) and ^{14}C (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 114: 529-547.
- [102] INGRAM B L, SOUTHERN J R. Reservoir ages in eastern Pacific coastal and estuarine waters[J]. *Radiocarbon*, 1996, 38: 573-582.
- [103] HUA Q, ULW S, YU K F, et al. Temporal variability in the Holocene marine radiocarbon reservoir effect for the Tropical and South Pacific[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 249: 106613.
- [104] ZHAO J X, YU K F. Timing of Holocene sea-level highstands by mass spectrometric U-series ages of a coral reef from Leizhou Peninsula, South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(4): 348-352.
- [105] 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J]. *地学前缘*, 2022, 9(2): 12.
- [106] ZHANG P, XIA H, XIA L. Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS)-U-Series ages of corals from the South China Sea and Holocene high sea level[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, 22(2): 133-139.
- [107] 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.
- [108] HO K S, CHEN J C, JUANG W. Geochronology and geochemistry of late Cenozoic basalts from the Leiqiong area, southern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 307-324.
- [109] LU R. Study on the modern crustal vertical movement in Guangdong coast[J]. *South China Journal of Seismology*, 1997, 17(1): 25-33.
- [110] 滕建彬, 沈建伟, PEDOJA K. 深圳西冲湾的海蚀地貌与海滩沉积研究[J]. *现代地质*, 2007, 21(3): 511-517.
- [111] YU K F, LIU D S. High-frequency climatic oscillations recorded in a Holocene coral reef at Leizhou Peninsula, South China

- Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(12): 1057-1067.
- [112] 詹文欢, 朱照宇, 姚衍桃, 等. 南海西北部珊瑚礁记录所反映的新构造运动[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 77-84.
- [113] GISCHLER E, LOMANDO A J. Holocene cemented beach deposits in Belize[J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 110(3): 277-297.
- [114] KINDLER P, BAIN R J. Submerged upper Holocene beachrock on San Salvador Island, Bahamas: implications for recent sea-level history[J]. *Geologische Rundschau*, 1993, 82(2): 241-247.
- [115] BOEYINGA J, DUSSELJEE D W, POOL A D G. The effect of beach rock formation on the morphological evolution of a beach. the case study of an eastern Mediterranean Beach: Ammoudara, Greece[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 69(1): 65-69.
- [116] 何耀堂. 福建泉州湾全新世海滩岩特征及物源环境分析[J]. 福建地质, 2014, 33(2): 112-118.
- [117] 马克俭, 冯应俊. 浙江沿海全新世海滩岩的沉积相及其意义[J]. 地震地质, 1993, 15(3): 269-276.
- [118] 孙奕映, WU P, 黄光庆, 等. 广东全新世海平面重建与冰川均衡调整模型结果的比较[J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 281-290.
- [119] 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): 1-7.
- [120] ZHANG Y, ZONG Y, XIONG H, et al. The middle-to-late Holocene relative sea-level history, highstand and levering effect on the east coast of Malay Peninsula[J]. *Global and Planetary Change* 2021, 196, 1033; 69.
- [121] LAMBECK K, ROUBY H, PURCELL A, et al. Inaugural article by a recently elected academy member: sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(43): 211-216.
- [122] 汪汉胜, 贾路路, PATRICK W, 等. 末次冰期冰盖消融对东亚历史相对海平面的影响及意义[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1144-1153.
- [123] BRADLEY S L, MILNE G A, TEFERLE F N, et al. Glacial isostatic adjustment of the British Isles: new constraints from GPS measurements of crustal motion[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 178: 14-22.
- [124] BRADLEY S L, MILNE G A, SHENNAN I, et al. An improved glacial isostatic adjustment model for the British Isles[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(5): 541-552.
- [125] PELTIER W R. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ice-5g (vm2) model and grace[J]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 2004, 20(32): 111-149.
- [126] TURCOTTE D L, BURKE K. Global sea-level changes and the thermal structure of the earth[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1978, 41(3): 341-346.
- [127] 杨学祥. 地壳均衡与海平面变化[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 22-30.
- [128] WANG L. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1/4): 245-284.
- [129] PELTIER W R, WU P, YUEN D. The Viscosities of the Earth's Mantle[J]. *American Geophysical Union*, 2013, 4: 1-16.
- [130] ZONG Y, YANG Z, XIONG H, 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.
- [131] 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.

Application and uncertainty analysis of beachrock to Mid-late Holocene sea-level reconstruction in the northern South China Sea

TANG Lichao, YUE Yuanfu *

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

Abstract: The characteristics of the past sea-level change have important scientific and practical significance for understanding the process of the modern sea-level change, and predicting future scenarios. Beachrock, as a unique sedimentary rock in coastal intertidal zones in tropical and subtropical regions, is an important indicator of coastal change and the past sea-level elevation. However, due to the change of dynamic conditions after the formation of beachrock, the different dating methods, the estimation of indicative range represented by beachrock and error analysis, the results of past sea-level reconstruction based on beachrock are still controversial and uncertain. Therefore, we analyze and summarize the progress of sea-level reconstruction of Mid-late Holocene based on beachrocks in the northern South China Sea, as well as the existing problems and potential opportunities in sea-level research. The uncertainty of sea-level reconstruction based on beachrock is further quantitatively studied from the aspects of the formation age of beachrock and the elevation change after the formation of beachrock. At the same time, the high-precision elevation measurement and U-Th dating of three *in-situ* coral reefs (one large massive *Porites* and two *Porites* microatolls) along the east coast of Hainan Island in the northern South China Sea were conducted, and six new sea-level data are obtained. In conjunction with Glacial Isostatic Adjustment (GIA) and ICE-5G model results, they were applied to the reliability analysis and comparison of the reconstructed Mid-late Holocene sea level in the north of the South China Sea based on beachrocks. The uncertainty analysis and results indicate that the accuracy of sea-level reconstruction result is further improved after the correction of age and elevation, which can provide reference for the uncertainty and reliability analysis of the reconstructed sea-level based on other sea-level indicators.

Key words: northern South China Sea; beachrock; Mid-late Holocene; sea-level change; uncertainty analysis