乐远福, 唐立超, 余克服. 北大西洋沿岸过去 2000 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. YUE Yuanfu, TANG Lichao, YU Kefu. General characteristics of sea-level changes along the North Atlantic coast in the past 2000 years[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 1-15.

北大西洋沿岸过去 2000 年海平面变化的 若干重要特征

乐远福,唐立超,余克服*

(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:北大西洋沿岸是世界上最容易受海平面上升影响的地区之一。了解该区域过去海平 面变化历史和特征,对认识现代海平面变化过程、预估未来海平面变化趋势具有重要科学意 义,同时也有助于最大限度地减小预测结果的不确定性。基于此,我们以北大西洋沿岸1350 个验潮站观测记录和已发表的1604个海平面数据为基础,进行系统分析和集成研究,尝试建 立北大西洋沿岸过去 2000 年海平面的变化历史,并分析北大西洋沿岸过去 2000 年海平面变 化的主要过程与特征、区域差异和存在的问题。结果表明:①北大西洋沿岸过去 2000 年海平 面变化具有显著的时空差异性,海平面的变化幅度、变化时间、波动次数等均具有区域差异性。 ②北 大西洋沿岸过去 2000 年以来海平面总体上呈现出波动上升趋势,但不同地区海平面上升高 程相差较大,北大西洋西岸北美洲东部海平面上升超过2.5m,格陵兰岛-冰岛、欧洲和美国南 部和东南部海平面上升幅度约1.9m,北海和地中海海平面上升幅度约1m。 ③公元1900年 以来,北大西洋东西沿岸海平面上升速率普遍加快,并呈现出明显的纬度差异,即北大西洋东 岸从地中海到欧洲沿岸再到格陵兰岛-冰岛,随着纬度增加,海平面上升速率逐渐增加。类似 的,北大西洋西岸美国南部和东南部到美国东部再到加拿大东部,随着纬度的增加,海平面上 升速率也依次增加。④过去2000年北大西洋沿岸海平面变化及其时空差异性是多种因素综 合作用的结果,气候冷暖交替、冰川均衡调整、大气-海洋动力学、区域构造以及沿岸地形的变 化、沉积物压实和潮汐范围变化等可能是主要原因。

关键词:北大西洋;过去 2000 年;海平面变化;验潮站;区域差异 中图分类号:P731.23 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.279

0 引言

在当前全球变暖的背景下,全球海平面呈持续 上升趋势,已成为当前国际全球变化研究的热点问 题之一。而海平面上升之有关的危害,包括海滩淹

作者简介:乐远福(1982-),男,博士,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

役^[1-2],海岸侵蚀加速^[3-4]以及沿海地区极端性洪水 事件^[5-7]和破坏性风暴的增加^[8-14]等,这对世界各 国沿海低洼地区人类的生存,社会经济发展和生态 环境构成重大威胁和严重挑战,引起国际社会的广 泛关注和沿海国家政府的高度重视,尤其是北大西 洋沿岸各国低洼地区。北大西洋沿岸港湾密布,经 济工业较为发达,当今世界绝大部分发达国家处于 北大西洋沿岸,海平面变化对该地区影响极大。

北大西洋沿岸,是全球海平面研究的一个关键 区域,相应地其海平面数据也最为丰富。近些年来 不少学者通过多种海平面标志物,对北大西洋沿岸 地区海平面变化开展了大量的研究工作,由此获得 了大量关于过去 2000 年的海平面记录^[15-35]。这些

收稿日期: 2021-11-03

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)

^{*}通讯作者: 余克服(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事珊瑚 礁方面的研究工作. E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

研究结果和数据,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,基于这些海 平面数据,北大西洋沿岸的欧洲^[36]、波罗的海^[37]、 加拿大^[38]、美国^[39]、加勒比海^[18]等地区相继开展 了区域海平面数据库建设,这对未来海平面的预测 以及认识区域海平面变化提供了坚实基础。同时, 这也为本文对北大西洋沿岸过去 2000 年以来海平 面变化进行集成研究,以及建立大区域海平面数据 库提供了大量数据和参考依据。此外,通过验潮站 和基于 TOPEX/POSEIDON(简称 T/P)和/或 Jason-1/2 卫星高度计测高资料,可以获得工业革命以来 近两百年的海平面变化过程^[40-48],可以和地质记录 进行对比,进而有效的评估过去海平面重建结果的 可靠性。以上这些成果为建立北大西洋沿岸过去 2000年海平面数据库以及研究当前与未来海平面 变化和社会经济发展提供了重要的基础资料和科学 依据。

过去千年气候变化是当代与未来气候环境变 化的背景^[49]。应对全球变化,需要了解过去海平面 状况和变化规律,尤其是准确了解与我们生活环境 密切相关的全新世。特别是过去 2000 年以来的海 平面变化特征和相应的数据库,作为衡量 20 世纪 海平面变化的长期基线,对认识过去海平面变化过 程和本质,包括变化速率、规律和机制,进一步预估 未来海平面变化情景及其影响和最大限度地减小 预测结果的不确定性具有重要科学和现实意义,同 时为世界各国政府对海岸带保护与开发利用、海岸 工程建设以及科学应对沿海海平面上升风险和防 灾减灾提供重要的科学依据。

由此可见,过去 2000 年海平面变化集成重建, 对了解过去海平面变化的时间和幅度对于理解现 代和未来海平面变化至关重要。为科学应对沿海 海平面上升风险,有必要寻求更多高分辨率的海平 面记录,建立过去海平面数据库。鉴于此,本文通 过对北大西洋沿岸过去 2000 年海平面研究成果进 行总结,对验潮站观测的海平面数据和基于沉积物 岩芯重建的海平面数据进行汇编,对海平面数据加 以校正并评估不同区域不同类型的海平面曲线的 可靠性,然后尝试建立北大西洋沿岸过去 2000 年 海平面数据库,以及对区域海平面变化的差异性和 重建存在的问题等方面进行分析与讨论。希望本 文研究结果能为当前海平面变化研究提供科学依 据和借鉴。

1 研究区域

北大西洋(图1)主要包括大西洋在赤道以北、 北极圈以南的部分,大致位于温带,其面积占整个 大西洋面积的约 60%。大西洋及邻近地区的气候 受到表面水温、洋流及风影响。北大西洋受墨西哥 湾暖流的影响,致使西北欧的冬季与同纬度的其他 区域相比更加温暖。墨西哥湾流由南赤道流的北 分支与大西洋的北赤道流汇合而成,始于佛罗里达 海峡,平行于北美洲海岸移动到纽芬兰沿岸向高纬 度地区流动^[50]。同时,墨西哥湾暖流携带着由信风 驱入的大西洋表层暖水,受地转偏向力和纬度变化 效应等,向北移动形成北大西洋暖流,在高纬度海 域释放的热量导致海水冷却、下沉,向南移动形成 加那利寒流。此外,北大西洋与北冰洋接壤,该区 域的海平面变化自然受到北极冰盖的影响^[32, 51]。 北极冰盖形成于距今260~360万a,之后经历了多 次冰盖的扩张和收缩,末次盛冰期以后,地球进入 间冰期,尤其是在过去2000年期间,北极冰盖整体 在逐渐融化^[51-53]。现代记录的北极冰盖中部冰层 在逐渐增厚,东部在逐渐变薄,西部逐渐消融形成 冰川^[32,54]。挪威暖流和北角暖流作为北大西洋暖 流的延续,使北极冰盖下的洋底冷水流携带大量海 水涌入北大西洋。

从图 1 可以看出,北大西洋海岸蜿蜒曲折,包 括北海、波罗的海、地中海、黑海、里海、墨西哥湾、 加勒比海、哈德逊湾、几内亚湾等许多附属海和海 湾。北大西洋岛屿密布,较大的岛屿和群岛有大安 的列斯群岛、大不列颠岛、爱尔兰岛、冰岛、格陵兰 岛(北极圈之南)纽芬兰岛、古巴岛及伊斯帕尼奥拉 岛等。此外,北大西洋两岸都有多条河流注入,较 重要的如尼日尔河、莱茵河、密西西比河、圣劳伦 斯河、易北河、第聂伯河以及注入地中海的尼罗河 等,这些河流都直接或间接注入北大西洋,构成北 大西洋水系。

2 材料和方法

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^[55],并能测 定标志物的高程和年龄^[56],进而恢复海面变化的历 史过程^[57]。这就要求海平面标志物与潮汐高程之 间存在系统的、可量化的关系,比如,海平面标志物



图 1 北大西洋位置图以及北大西洋沿岸过去 2000 年海平面数据的空间分布 Fig.1 The position of North Atlantic Ocean in the world and the spatial distribution of sea-level data in the coastal regions of North Atlantic (red boxes) in the past 2000 years

生活或者形成于狭窄的垂直分布范围、可重复测量 的高程、良好的地质保存和准确定年等特点^[58]。这 类标志物种类众多,通常可以分为生物标志和沉积 与地貌标志^[58]。

海平面总是持续波动,这可能是由潮汐作用、 气候波动与环境演变、冰川运动、地质构造活动与 海底沉积作用等因素综合影响产生的结果^[59]。海 平面的变化影响海岸沉积物的形成与海岸地貌发 育,这些海平面标志物的发育和消亡也可以代表所 在区域的海平面变化。通过对现代环境的详细测 量和调查,可以建立海平面标志物的潮位指示意义 或高程范围,通常用指示范围(indicative range)和参 考水位(reference water level, RWL)来表示。比如, 依据现代类似物(modern analogues),例如通过盐沼 硅藻或有孔虫等微体生物组合的深度分布,沉积物 等的认识,定量重建海平面^[25]。其次,通过海平面 标志物的潮位指示意义,可以对各海平面标志物进 行同化处理。例如,潮滩有孔虫通常形成于潮间带 中部,可以作为高精度海平面标志物,研究认为潮 滩有孔虫所在的盐沼高程再减去1m即为所在区 域过去海平面在对应时间的位置与高度^[60]。潮滩 硅藻作为欧美地区常见的海平面标志物,利用转换 函数法可以将潮滩硅藻高程转换为过去海平面高 程^[61]。经过上述同化处理,可以将各海平面标志物 转换指示的过去海平面高程结合讨论。当然,海平 面标志物多种多样,如表1所示,潮位指示意义或 范围因海平面标志物的类型而异,不同类型的海 面标志物对海平面的指示意义不同,甚至差别较 大^[37, 39, 57, 62]。因此,过去海平面重建结果的准确性, 很大程度上依赖于海平面标志物的高程测量和精 确定年,以及误差(error)分析,还有就是这些指标相 对于相应的平均海平面的正确解释。

此外,所有的海平面标志物指示的海平面高程 都与潮汐水平有系统和可量化的关系,这是由作者 在原始论文中报道的,因此用于估计以前的海平面。 相对海平面(relative sea-level, *RSL*)用以下公式进行 计算:

RSL = A - RWL

其中, *A* 为样品的海拔高度(altitude/elevation), *RWL* (reference water level)为样品的参考水位, 都是相对 于同一潮汐基准面(如 mean tidal level, MTL)来表 示的^[39,63]。*A* 通常是通过测量岩芯(或露头)中顶部 高度的样品深度来确定的, 代表海平面标志物高程。 对于现代(表面)样品, *A* 和 *RWL* 是相等的, 因此 *RSL* 为零。所有数据指示的海平面都用这个值表示, 例如, 负值表示 *RSL* 低于当前值(0 m)。

而各指标物表示古海平面的垂直高度不确定 性主要是依据海平面标志物的指示意义/范围来确

表 1 北大西洋沿岸常见的海平面标志物的 指示意义^[37, 39, 57, 62]

 Table 1
 The significance of common sea-level indicators in the coastal North Atlantic [37, 39, 57, 62]

序号	海平面标志物	潮位指示意义或范围
1	有机盐沼	介于平均潮位到最高高潮位
2	高盐沼	介于平均高潮位到最高高潮位
3	低盐沼	介于平均潮位到平均高潮位
4	泥炭、木炭或海洋生物 骨骼	介于平均最低潮位到最高高潮位 以上3 m
5	海滩沉积物	介于平均最低潮位到最高高潮位 以上3 m
6	潮滩贝壳	低于平均潮位
7	潮滩有孔虫	低于平均潮位
8	硅藻	高于平均潮位

定,也是来源于原始论文。当然,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^[39, 57, 62], 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计算:

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

式中:E为样品的误差;

 $e_1 \cdots e_n$ 为各种误差来源^[62]。

本文数据主要来源于北大西洋沿岸近年来已 发表的海平面数据及其所代表区域内的验潮站观 测数据(附件:北大西洋沿岸过去 2000 年海平面 数据)。

关于收集到的北大西洋沿岸过去 2000 年的海 平面数据,首先会使用最新的 CALIB8.0^[64] 对年代 数据进行校正(原始论文校正后的数据除外),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^[65] 和海洋校正曲线 Mar $ine20^{[66]}$,并考虑全球海洋和碳库效应年龄偏差 ΔR (http://calib.org/marine/)。例如,对样点附近最近 10个点位的年龄偏差进行平均值处理,可以获得格 陵兰岛-冰岛的年龄偏差 ΔR 为(66±49)a^[67-68], 欧 洲沿岸的年龄偏差 ΔR 为(161±56)a^[69], 北海地区 的年龄偏差 ΔR 为(161±52)a^[70], 地中海的年龄偏 差 ΔR 为(72±43) a^[71-72], 加拿大东部海岸的年龄偏 差 ΔR 为(161±47)a^[73],美国东部海岸的年龄偏差 ΔR 为(8±88) $a^{[74-75]}$,美国南部和东南部沿岸的年龄 偏差 ΔR 为(-32±23)a^[76-77]。最后统计 95.40% 概 率在所有校正区间的相对"可能性"。所有年代数 据均转化为公元年(Commen Era, CE)以方便进行 比较。

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^[78-79]。验潮站的选择主要 考虑 2个因素, 一是观测数据的连续性和时长(尽 可能选择>50 a 的连续观测记录), 二是处于开展 过去海平面重建的区域, 并尽可能靠近研究点位。 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。最终本文选择了北大西洋沿岸 19 个验潮站的1350个观测记录(附件: 北大西洋沿岸 过去 2000 年海平面数据之验潮站观测记录)。这 些验潮站的最早的观察记录始于公元 1807 年, 来 自法国的布雷斯特(Brest)验潮站。随着验潮站的 增多, 观测记录也逐渐增多, 并记录了工业革命以 来的海平面变化过程。

本文对已发表的过去 2000 年海平面数据的选 取主要根据以下2个原则,一是时间原则,主要考 虑数据的连续性和分辨率,优先选用时间序列较长, 且分辨率较高的海平面重建序列,例如,序列长度 处于过去 2000年,时间分辨率在 100 a 以内;二是 空间原则,主要考虑数据的来源要尽可能具有代表 性,指示较大区域的海平面变化。此外,通过研究 区域最近的验潮站观测记录进行对比,来验证重建 的海平面曲线的可靠性,并加以选择。例如,来自 美国的新泽西州(New Jersey)公元 1500 年以前重 建结果^[23] 和验潮站观测记录在 1993-2020 年期间 重叠,两者相对比,可以发现重建结果明显低于观 测结果,因此这些基于地质记录的海平面数据不予 采用。最后,对比区域内已有的海平面数据,分析 其差异性的,去掉异常值,选择差异性较小的数据。 例如,在加拿大东部新斯科舍(Nova Scotia),海平面 重建结果显示在公元 1021-1739 年期间[15], 明显 异常于同期周边地区海平面重建结果^[27,80],因此这 个时间段的海平面数据不予采用。对于那些局地 零散且不连续的记录,考虑到其时空代表性和可靠 性,本文并未采用。例如,地中海沿岸大多数地区 过去 2000 年海平面数据零散、差异性较大且分辨 率低,本文最后选择以色列凯撒利亚(Casesarea)地 区的连续考古记录^[34, 81]作为该地区海平面序列的 代表。

整理后被选择的过去 2000 年海平面数据一共 1 604 个(附件:北大西洋沿岸过去 2000 年海平面 数据之海平面重建数据),主要来自北大西洋岸的 9 个国家或地区,研究点位超过 40 个。根据不同研 究点位重建的海平面数据的可得性、所处地理位置 的构造背景和经纬度,可以进一步划分为以下 7 个 区域(图 1):北大西洋北部的格陵兰岛-冰岛,包括 格陵兰岛^[30]和冰岛(Iceland)^[16,82];北大西洋东岸 的欧洲沿海国家,例如法国布列塔尼(Brittany)^[83], 西班牙普伦齐亚河口(Plentzia River estuary)和乌尔 代白河口(Urdaibai Estuary)^[84-85];北海地区,例如, 英国怀特岛(Isle of Wight)^[31],丹麦瓦登海(Danish Wadden Sea)^[35]; 地中海, 例如以色列西部沿海^[34, 81]。 北大西洋西岸的加拿大东部海岸,例如,加拿大魁 北克(Quebec)^[86]、纽芬兰(Newfoundland)^[15]和新 斯科舍(Nova Scotia)^[59];北大西洋西岸的美国东部 海岸,包括马萨诸塞州(Massachusetts),康涅狄格州 (Connecticut)^[25, 87], 新泽西州(New Jersey)^[24], 北卡 罗莱纳州(North Carolina);北大西洋西岸的美国东南 部和东南部,包括东南部的佛罗里达州(Florida)^[88] 和南部墨西哥湾,例如路易斯安那州密西西比三角 洲(The Mississippi Delta, Louisiana)^[87]和佛罗里达 海湾沿岸(Gulf Coast of Florida)^[18]。

这些海平面数据的组成,主要来自盐沼的植被 记录^[59]、泥炭沉积^[88],硅藻^[30]、有孔虫^[25, 82, 89]、有 孔虫和碳同位素记录和有孔虫-植物联合记录^[24]等 海平面标志物。此外,还包括一些考古记录或证据^[81]。

3 结果

对收集到的北大西洋沿岸过去 2000 年海平面 数据进行校正和比较,并通过同区域的验潮站的观 测数据对这些数据进行检验和评估,最终可以获得 了1604个海平面数据以及1350个验潮站观察记 录(图 2, 附件: 北大西洋沿岸过去 2000 年海平面数 据)。本文用米(m)作为海平面高程的单位,便于讨 论海平面的波动幅度,以毫米每年(mm/a)为单位便 于直观反应海平面的波动速率。这些从验潮站和 文献中获得的北大西洋沿岸过去 2000 年海平面数 据(分别为1350和1604个),构成了北大西洋沿 岸过去 2000 年海平面数据库。图 2 记录了上述海 平面标志物和验潮站数据的年代、高程和误差。总 体上,北大西洋沿岸过去 2000 年相对海平面呈现 出波动上升趋势,但不同地区海平面上升高程相差 较大。根据不同研究点位重建的海平面数据的可 得性、所处地理位置的构造背景和经纬度,下面分 区域逐一介绍。

3.1 格陵兰岛-冰岛

盐沼在北大西洋北部格陵兰和冰岛很常见,并 为该地区全新世晚期相对海平面重建提供了宝贵 的研究材料。例如,冰岛西部沿海地区斯奈山 (Snæfellsnes) 维奥霍尔米(Vioarholmi) 基于盐沼沉 积物中的有孔虫重建了该地区过去 2000 年的海平 面历史^[16,82]。而对格陵兰沿海亚西亚特(Aasiaat), 西西缪特(Sisimiut)和纳诺塔利克(Nanortalik)的盐 沼研究表明^[30],从盐沼中收集现代硅藻并从沉积物 剖面提取化石硅藻,并通过基于硅藻的转换函数 (加权平均回归法和偏最小二乘加权平均回归法), 应用典型对应分析方法(CCA),讨论均方根差和相 关系数,定量重建了该地区过去700年相对海平面 的变化过程。综合这些研究,可以获得北大西洋北 部格陵兰岛-冰岛过去 2000 年海平面序列。该序列 一共包括 168 个地质数据和 60 个验潮站观测记 录。地质记录时间跨度为公元 3-2002 年,时间分 辦率约为16a,海平面变化幅度介于(-1.50±0.20)~ (0.08±0.18)m。数据主要来源于格陵兰沿海亚西 亚特(Aasiaat),西西缪特(Sisimiut)和纳诺塔利 克(Nanortalik)^[30]和冰岛西部沿海地区斯奈山 (Snæfellsnes) 维奥霍尔米(Vioarholmi)^[16,82]。验潮 站数据来源于冰岛雷克雅维克(Reykjavik)验潮站 公元 1957-2018 年的观测数据,其记录的海平面自 -0.07 m (公元 1958 年)到 0.16 m (公元 2018 年)。

北大西洋北部深水环流在当地形成,向北的北 大西洋暖水水团与北极的冷水水团在此区域强烈 交汇,形成北大西洋海洋极峰^[95]。此区域的海平面 变化非常敏感^[96]。如图 2B 所示,公元 3-1216 年 该地区海平面以(0.74±0.20)mm/a 的速率从(-1.50± 0.20)m 持续上升到(-0.60±0.20)m, 随后海平面出 现巨幅波动,并持续到公元1567年。最后,在过去 400年,相对海平面上升约 0.60 m,其中约 0.2 m 发 生在 20 世纪, 表现出低幅高频的海平面波动, 例如, 在公元 1620-1650 年, 公元 1780-1850 年以及公 元 1950-2000 年均以>(1.70±0.20)mm/a 的速率 上升,尤其是后两个阶段,其最大速率达到(3.20± 0.20)mm/a。根据近 5000 年格陵兰地区的气候变 化记录^[97],公元1-1000年时,格陵兰岛及附近区 域的温度波动下降,而且在公元1200-1600年时, 温度波动比以往更加频繁和剧烈。这与图 2B 的海 平面变化趋势符合。并且在公元1800-1950年,当 地温度陡然下降,这可能引起当地海平面以较大速 率上升。此外,冰岛雷克雅维克验潮站公元 1957-2018年的观测数据显示,以冰岛首都雷克雅维克为 代表的冰岛沿岸海平面在波动上升,平均上升速率 为(3.10±0.20)mm/a。将该时间段内的雷克雅维克





图 2 北大西洋沿岸 7 个区域过去 2000 年海平面变化[15-16, 18, 24-27, 30-31, 34-35, 81-94]

Fig.2 Sea-level changes in 7 regions of the North Atlantic coast in the past 2000 years^[15-16, 18, 24-27, 30-31, 34-35, 81-94]

验潮站观测数据与格陵兰岛-冰岛利用海平面标志 物重建的海平面变化曲线比较,如图 2B所示,两者 在过去 60年(公元 1957-2018年)的时间内,海平 面变化趋势基本重叠,具有很好的一致性和同步性。 因此,通过以上多个时期的比对与参考,可以说明 该地区过去 2000年基于有孔虫重建的海平面历史

是可靠的。

3.2 北海地区

北海是大西洋东北部边缘海,位于欧洲大陆的 西北,即大不列颠岛、斯堪的纳维亚半岛、日德兰半 岛和荷比低地之间(图1)。北海西以大不列颠岛和 奧克尼群岛为界,北为设得兰群岛,东邻挪威和丹 麦,南接德国、荷兰、比利时、法国,西南经多佛尔 海峡和英吉利海峡通大西洋(图1)。

北海过去 2000 年海平面序列包括地质记录 117个以及验潮站观测记录 245个。地质记录时间 跨度为公元 487-2009 年,时间分辨率约为 13 a,主 要来源于北海西部的丹麦最北端的瓦登海(Danish Wadden Sea)潮汐港湾^[16,35]和东部的英国苏格兰 (Scotland)西北部(the Loch Laxford 和 Kyle of Tongue)^[89]。验潮站观测记录分别来自丹麦埃斯比约 (Esbjerg)验潮站 1889-2017 年观测记录和英国苏 格兰德文波特(Devonport)验潮站公元 1962-2021 年观测记录以及阿伯丁(Aberdeen I)验潮站公元 1962-2021 年观测记录。如图 2C 所示, 北海过去 2000年海平面变化幅度介于公元 487 年的(-0.68± 0.25)m和公元1987年的(0.32±0.35)m,整体上保 持稳定,呈现出水平波动振荡变化。直到公元 1889年,海平面以(2.34±0.20)mm/a 的速率再次快 速上升到公元 2021 年的 0.19 m。总体上, 重建结 果和验潮站观测记录基本同步,观测记录处于重建 结果误差范围之内,表明重建结果可靠。

3.3 欧洲沿岸

北大西洋欧洲沿岸过去 2000 年海平面研究主 要集中在英国怀特岛(Isle of Wight)^[31]、法国布列 塔尼(Brittany)^[83],以及西班牙普伦齐亚河口(Plentzia Estuary)和乌尔代白河口(Urdaibai Estuary)^[85], 且多数是通过盐沼沉积物中的微体古生物进行海 平面重建,例如建立有孔虫转换函数,然后进行海 平面重建。本文关于北大西洋东岸沿海欧洲过去 2000 年海平面变化序列(图 2D)包括 61 个地质记 录以及 265 个观测数据。重建的海平面序列时间 跨度为公元 353-2011 年,时间分辨率约为 27 a,海 平面变化幅度介于(-0.97±0.20)m(公元 353 年) 到 0.15 m(公元 1987 年)。验潮站数据分别来自 英国怀特岛朴茨茅斯(Portsmouth)验潮站公元 1962-2020年观测记录(变化幅度介于公元 1963 年的-0.08 m 至公元 2020 年的 0.13 m)、法国布列 塔尼布雷斯特(Brest)验潮站公元 1807-2019 年观 测记录(变化幅度介于公元 1808 年的-0.13 m 至公 元 2014 年的 0.20 m)和西班牙毕尔巴鄂(Bilbao)验 潮站公元 1993-2018 年观测记录(变化幅度介于公 元 1993 年的-0.03 m 至公元 2014 年的 0.08 m)。 从图 2D 可以看出,该地区过去 2000 年海平面变化幅 度介于从公元 353 年的(-0.97±0.20)m 到公元 2019 年的 0.19 m。公元 353-1720 年海平面持续上升,速 率达到 0.66±0.20 mm/a,然后在公元 1720-1783 年 以(3.02 ±0.20) mm/a 的速率,出现短暂的下降, 最后以(1.20±0.20) mm/a 的速率波动上升了 0.40 m, 其中,最后百年以(2.05±0.20) mm/a 的速率快速上 升。重建的海平面序列和验潮站观测记录进行比 较,可以发现两者变化趋势基本一致,观测记录处 于重建结果误差范围之内,表明重建结果可靠。

3.4 地中海

地中海是大西洋的附属海,它由北面的欧洲大 陆,南面的非洲大陆和东面的亚洲大陆包围着,西 面通过直布罗陀海峡与大西洋相连,东西共长约 4 000 km, 南北最宽处约为 1 800 km, 面积约为 251.2 万 km², 是世界上最大的陆间海。位于地中海 沿岸的国家,包括西班牙、法国、意大利、希腊、以 色列、巴勒斯坦、埃及等亚非欧 22 个国家。考虑到 数据的连续性兼顾空间代表性,地中海过去2000 年海平面序列的构成主要是来自以色列凯撒利亚 (Casesarea)地区的考古记录 98 个以及特拉维夫市 (Tel Aviv) 验潮站 1996-2009 年的观测记录 12 个 (介于-0.06~0.01 m)。以色列凯撒利亚(Casesarea) 地区的考古记录重建的海平面序列,时间跨度为公 元 50-1900 年,时间分辨率约为 20 a,记录的海平 面变化幅度介于-0.49 m(公元 1254 年的最小值)至 0.32 m(公元 450 年的最大值)^[34, 81](图 2E)。该地 区海平面序列显示该地区海平面以(0.50±0.20)mm/a 的速率从公元 50 年(Iron Age)的(-0.03±0.35)m 上升 到公元450年(0.11±0.35)m,然后以(0.69±0.20)mm/a 的速率开始下降到公元 1133 年的(-0.36±0.35)mm, 最后以(0.64±0.20)mm/a的速率缓慢上升到公元 2009年的 0.02 m。总体上, 重建结果和验潮站观测 记录重叠,观测记录处于重建结果误差范围之内, 两者变化趋势基本同步,表明重建结果可靠。

3.5 加拿大东部海岸

北大西洋西岸的北美加拿大东部海岸过去 2000 年海平面序列包括地质记录 369 个以及验潮 站观测记录 194 个。前者时间跨度为公元 17-2014 年,时间分辨率约为 5 a,主要来自加拿大新斯 科舍(Nova Scotia)^[15]、纽芬兰(Newfoundland)^[27]、 马格达伦群岛(Magdalen Islands)^[91]和魁北克(Quebec)^[86]。验潮站观测记录分别来自新斯科舍哈里 法克斯(Halifax)公元 1896-2012 年的观测记录、 组芬兰圣约翰(St John's Newfoundland)公元 1947-2020 年的观测记录和奥巴斯克斯港(Port Aux Basques)公元 1959-2020 年的观测记录。如图 2F 所示, 该地区海平面从公元 38 年开始以(1.76±0.20)mm/a 的速率持续上升到公元 601 年的-1.26 m, 然后以 (2.60±0.20)mm/a 的速率继续上升了约 300 a, 直 到公元 1400 年, 开始出现了约 100 a 的短暂下降, 之后再次上升, 直到公元 1950 年, 海平面以(6.22± 0.20)mm/a 的速率开始快速上升到现在的 0.11 m。 而验潮站观测记录也记录了公元 1955 年以后的海 平面快速上升, 但是速率为(4.00±0.20)mm/a, 略低 于重建记录。但是, 总体上, 重建结果和验潮站观 测记录基本同步而且重叠, 观测记录处于重建结果 误差范围之内, 表明重建结果是可靠的。

3.6 美国东部海岸

北大西洋西岸的美国东部海岸过去 2000 年海 平面序列包括地质数据 667 个以及验潮站数据 331个。地质记录重建的海平面曲线,时间跨度为 公元 11-2010 年,时间分辨率约为 4 a,主要来自美 国东部海岸缅因州(Maine)^[92]、康涅狄格州(Connecticut)^[25,94]、纽约(New York)^[26]、新泽西州(New Jersey)^[94]和北卡罗来纳州(North Carolina)^[59,93]。 观测数据分别来自缅因州伊斯波特(Eastport)验潮 站公元 1930-2020 年的观测数据、康涅狄格州新 伦敦(New London)公元 1939-2017 年的观测数据、 新泽西州桑迪岬(Sandy Hook)验潮站公元 1933-2020年的观测数据和北卡罗来纳州鸭码头(Duck Pier Outside) 验潮站公元 1985-2020 年和蒲福(Beaufort) 验潮站公元 1973-2020 年的数据。如图 2G 所示,该地区海平面在公元1865年之前以(0.95± 0.20)mm/a的速率上升,之后以(3.10±0.20)mm/a 的速率快速上升。验潮站观测数据显示在公元 1939-2017 年期间,海平面也是以(3.10 ±0.20)mm/a 的速率快速上升,且所有观测记录处于重建结果误 差范围之内,表明重建结果是可靠的。

3.7 美国南部和东南部沿岸

北大西洋西岸的北美美国南部和东南部海岸 过去 2000 年海平面序列包括地质数据 124 个以及 验潮站数据 243 个。前者时间跨度为公元 24-2002 年,时间分辨率约为 16 a,主要来自美国南部 墨西哥海岸的路易斯安那州(Louisiana)^[88],佛罗里 达州(Florida)^[18,24]。验潮站数据 243 个,分别来易 斯安娜州格兰德岛(Grand Isle)公元 1947-2020 年 的观测数据,圣彼得斯堡(St. Petersburg)验潮站公 元 1947-2020 年的观测数据和佛罗里达州费南迪 纳比奇(Fernandina Beach)验潮站公元 1898-2020 年的观测数据。如图 2H 所示,在公元 1866 年之前, 该地区海平面以(0.40±0.20)mm/a 的速率缓慢上 升,之后,以(2.24±0.20)mm/a 的速率快速上升。 验潮站观测数据显示在公元 1898-2020 年期间,海 平面也是以(2.55±0.20)mm/a 的速率快速上升,且 观测记录处于重建结果误差范围之内,表明重建结 果是可靠的。

4 讨论

4.1 北大西洋过去 2000 年海平面变化历史和特征

北大西洋沿岸不同地区过去 2000 年海平面重 建结果和就近的验潮站观测到的海平面在重叠时 间区间,幅度以及趋势和上升速率相当。这种一致, 支持了海平面重建结果的可靠性。如图2所示,北 大西洋沿岸过去 2000 年海平面变化幅度在 2.80 m 左右,其中最低点出现在美国东部的(-2.47±0.07)m (17CE±67a), 最高点出现在地中海的(0.32±0.35)m (1987CE±3 a)。总体而言,北大西洋沿岸不同地 区过去 2000 年海平面变化基本上都呈现出上升趋 势。即便是不同区域,不同代用资料所重建的海平 面变化序列也存在一定的相似度。例如,北大西洋 沿岸格陵兰岛-冰岛、欧洲沿岸和美国南部东南部 过去 2000 年海平面变化幅度和趋势相似(图 3A), 北海和地中海过去 2000 年海平面变化趋势相似 (图 3B),加拿大东部和美国东部海岸过去 2000 年海 平面变化趋势相似(图 3C)。而且,图 3 在公元 700-1000年与公元 1400-1800年期间, 当地海平面都 有短暂下降或海平面上升速率减弱的趋势,这与晚 全新世黑暗时期(Dark Age)和小冰期时期(Little Ice Age)的两次快速变冷事件相对应。同时,根据 冰岛北部 HM107-03 孔^[96] 所记录的古温度信息,北 大西洋北部大约在公元 800 年夏季表层水温开始 下降,与黑暗时期相对应。而在公元1000-1150年 时,北大西洋北部表层海水温度明显提升,图3的 海平面曲线在对应时期高程逐渐升高,这一段相对 温暖湿润的时期可能与中世纪暖期(Warm Medieval Period)有关。随后,自公元 1000-1300 年开

始,海水温度骤然下降,与小冰期事件相对应,图 3 的海平面曲线在对应时期高程也有降低。从晚全 新世气候事件发生的角度来看,这些重建的海平面 变化序列也是可靠的。

然而,因为北大西洋沿岸不同区域海平面序列 使用的重建方法和重建结果时间分辨率不同,不同 区域海平面变化也存在巨大差异。具体体现在海 平面变化幅度、波动次数以及时间具有区域差异性。 整体上,除了前文提到的3组相似的情况,其他两两 对比,都存在明细差异。这些变化既非全球性,也非 同时性,即海平面变化曲线在不同时期和不同地区 具有差异性,例如,在海平面变化幅度和速率方面, 整体上,北大西洋西岸加拿大东部和美国东部海岸 过去 2000 年海平面变化幅度最大,介于(-2.42± 0.06)m(17 CE±67 a)和 0.14 m(2010 CE,观测资



A 为格陵兰岛-冰岛、欧洲沿岸和美国南部及东南部海岸过去 2000 年海平面变化对比。橙红色代表欧洲沿岸海平面序列,紫红色代表 美国南部及东南部海岸海平面序列。红色圆点代表最近的验潮站记 录的海平面。B 为北海和地中海过去 2000 年海平面变化对比。蓝 色代表地中海海平面序列,藏蓝色代表北海海平面序列,红色圆点代 表最近的验潮站记录的海平面。C 为加拿大东部和美国东部海岸过 去 2000 年海平面对比。蓝色代表加拿大东部海岸海平面序列,红褐 色代表美国东部海岸海平面系列,红色圆点代表最近的验潮站记录 的海平面

图 3 北大西洋沿岸过去 2000 年海平面对比

Fig.3 Comparison of sea-level in the North Atlantic coast in the past 2000 years

料),海平面上升超过 2.50 m,区域海平面上升平均 速率为(1.31±0.20)mm/a;其次是北大西洋沿岸格 陵兰岛-冰岛、欧洲沿岸和美国南部东南部地区,波 动幅度介于(-1.50±0.20)m(3 CE±55 a)和 0.42 m (2020 CE,观测资料),海平面上升幅度在 1.9 m 左 右,区域海平面上升平均速率为(0.95±0.20)mm/a; 而北海和地中海过去 2000 年海平面基本保持水平 波动振荡变化,变化幅度仅介于(-0.76±0.23)m (578 CE±72 a)和(0.32±0.35)m(1987 CE±3 a), 海平面上升幅度约 1 m,区域海平面上升平均速率 为(0.77±0.20)mm/a。

此外,虽然北大西洋沿岸过去 2000 年相对海 平面总体上是上升趋势,但是期间并非持续性上升。 从图 2 可以看出,本文对北大西洋划分的 7 个区域 的海平面序列在在年代际上的变化特征不尽相同, 但是百年际尺度的波动特征却较为相似。例如,在 大约公元 1700 年以前,差异较大,而最近 300 年以 来海平面高度变化逐渐重叠在一起,区域间波动逐 渐减小,一致性较高,并在工业革命以来海平面存 在一个快速上升趋势,特别是在公元 1900 年左右 开始呈现出普遍的加速上升。因此我们认为这几 个典型海区数据可作为过去 2000 年以来北半球海 平面变化重建序列的校准依据之一。

当然,具体到北大西洋沿岸7个地区,基于海 平面标志物重建结果和验潮站观测记录,对北大西 洋沿岸公元 1900 年以来海平面变化进一步分析, 有如下发现:在北大西洋北部和东部海岸,格陵兰 岛-冰岛在公元 1890-2018 年以(2.66±0.20)mm/a 的平均速率上升;北海在公元1889-2020年,海平 面以(2.34±0.20)mm/a 的速率快速上升;欧洲沿岸 最近百年以(2.05±0.20)mm/a 的速率快速上升: 地 中海以(0.64±0.20)mm/a的速率缓慢上升。在北 大西洋西部海岸,加拿大东部在公元 1920-2012 年 以(3.42±0.20)mm/a 的速率开始快速上升,美国东 部在公元 1865 年之后, 以(3.10±0.20) mm/a 的速 率快速上升;美国南部和东南部在公元1866年 后以(2.24±0.20)mm/a的速率快速上升。通过以 上分析,可以看出北大西洋过去2000年海平面并 非均衡上升,这与当前(公元 1993-2018 年)全球海 平面上升速率的平均值((3.20±0.20)mm/a, data source: satellite sea level observations)相比,存在显 著差异。此外,通过比较还可以进一步发现,在纬 度上,海平面上升速率,也存在明显的差异。例如, 依据上述的上升速率,可以发现北大西洋东岸从地

中海到格陵兰岛-冰岛,随着纬度增加,海平面上升 速率逐渐增加。类似的,北大西洋西岸北美洲东部 及南部,随着纬度的增加,海平面上升速率也是依 次增加。

本文汇编北大西洋沿岸过去 2000 年海平面数 据,对了解过去海平面变化的时间和幅度对于理解 现代和未来海平面变化至关重要。结合上述提到 海平面上升速率,我们可以粗略估算21世纪末,即 公元 2100 年北大西洋沿岸海平面上涨的幅度:在 未来 80 年,格陵兰岛-冰岛地区海平面可能上升 0.21 m;北海地区海平面可能上升 0.19 m;欧洲沿岸 地区海平面可能上升 0.16 m; 地中海地区海平面可 能上升 0.05 m。在北大西洋西部海岸,加拿大东部 沿海地区海平面可能上升 0.27 m,美国东部沿海地 区海平面可能上升 0.25 m; 美国南部和东南部沿海 地区海平面可能上升 0.21 m。在当今气候变暖背 景下,海平面的快速上升已经成为不争的事实,未 来海平面持续快速上升,将可能会对北大西洋沿海 低洼地区人类生存环境构成重大威胁,并对沿海生 境造成破坏性影响,所以,我们必须要敲响警钟。

4.2 导致北大西洋海平面重建结果区域差异性的 原因分析

有研究表明,过去千年海平面变化与温度变化 呈正相关^[98-99],温度驱动着全球海平面变化^[99],并 把海平面上升归因于气候变化导致的陆地冰的融 化和海水的热膨胀^[100-101]。因此,可以用全球气候 变化来解释北大西洋沿岸海平面总体趋势是上升。 然而,进一步分析可以发现北大西洋沿岸过去 2000年相对海平面时空上的变化存在极大的差异 性,不同地区以不同速率上升。导致区域差异性的 原因很多,其中一个重要的原因可能是受到冰川均 衡调整(Glacial isostatic adjustment, GIA)的影响^[59]。 根据冰川均衡调整的理论,不同地区(比如远场和 近场)受到冰川均衡调整的影响有差异,例如,在气 候回暖的冰退期,会导致在一个地方海平面可能比 另一地方有更大的变化幅度,因为冰融水和其他质 量如残留冰盖、海水和地幔岩石质量之间的吸引随 地域而变化[102-103]。由于北大西洋沿岸过去 2000 年的相对海平面重建区域来自或者靠近近场区域, 例如格陵兰岛-冰岛,北美,受冰川作用-均衡的陆地 移动的影响(因为它们接近于以前的冰盖),所以导 致海平面上升速率比远场区域(例如美国南部和东 南部,地中海地区)更高。因此,可以解释北大西洋 东部和西部沿岸公元 1900 年以来海平面上升速率的差异性。

然而,北大西洋沿岸不同地区海平面变化序列 之间的差异,例如,在公元1700年以前,以时间的 非线性方式减少,这是冰川均衡调整无法解释的。 当然,这可能是冰川均衡调整模型的不确定性本身 的原因,例如,地球模型参数的选择(特别是岩石圈 厚度和地幔黏度结构)和芬诺斯堪底亚(Fennoscandian)冰盖的消冰历史^[36, 104]。此外,有研究提出沉 积物压实是导致海平面重建结果差异的原因之 一[18,105]。然而,经过经验压实模型进行校正,证实 压实作用在美国东部海岸海平面重建结果中的作 用是极小的^[26]。类似的,还包括古今潮差的差 异^[94,101]。于是,结合沉积物动力学和潮差分析,有 研究认为不能用沉积物压实、沉积物动力学或潮 汐范围的变化来解释,还应考虑大气-海洋动力学的 变化的作用^[26]。例如,受到美洲陆地轮廓的影响, 南赤道暖流会与北赤道暖流汇合进入墨西哥湾和 加勒比海域,进而形成强大的墨西哥湾暖流,然后 向东延续形成北大西洋暖流。但受北美大陆的阻 挡,墨西哥湾暖流的作用会减弱,这可能引起当地 的海平面与临近区域相比偏高。而欧洲西部的海 岸线总体上与北大西洋暖流相平行,并不会对北大 西洋暖流起到很大的阻挡作用,所以沿岸的海平面 高程也不会产生较大变化,因此北大西洋东部的海 平面上升速率略低于北大西洋西部的海平面上升 速率。

此外,北大西洋沿岸不同区域过去 2000 年海 平面变化序列,是基于不同数据的汇编,数据来源 于不同的替代指标(指示意义不同),还有测年和高 程方面的误差,以及时间分辨率不同,综合起来,可 能也会导致不同区域即便相同时期的相对海平面 变化具有显著的区域性差异。

4.3 北大西洋沿岸过去 2000 年海平面变化研究中存在的问题

本文汇编了北大西洋沿岸过去 2000 年海平面 数据集,包括1604个海平面数据以及1350个验 潮站观察记录,主要分布在北大西洋沿岸的9个国 家或地区。然而,从空间分辨率上,开展海平面研 究的点位,相比漫长的北大西洋海岸线,也只是星 零的分布(图1)。其次,在时间分辨率上,北大西洋 沿岸不同地区海平面序列存在着明显的差异。例 如,如图2所示,北美东部海岸(加拿大和美国)等 典型地区代用资料所重建的过去 2000 年海平面变 化的时间序列数据相对较为连续完整,分辨率较高 (10~100 a),而个别地区,例如北大西洋欧洲沿岸 诸国或格陵兰岛-冰岛等,某些时间段的记录并不 完整,甚至缺失,因而这些时间段的记录分辨率较 低。对于上述时空分辨率方面的问题,可以通过收 集覆盖区域更加广泛和更多来源的资料和高分辨 率的重建结果进行补充而加以解决。此外,由于古 海面标志物的估算受测年误差、构造抬升和海面标 志物沉积地貌部位影响,一些海面标志物所指示的 海平面估计可能有较大偏差,这有赖于以后更精确 的测年方法和更准确的新构造运动资料来进一步 改进。

5 结论

北大西洋沿岸不同地区过去 2000 年海平面重 建结果和就近的验潮站观测到的海平面在重叠时 间区间,幅度以及趋势和上升速率相当。这种一致, 支持了海平面重建结果的可靠性。总体而言,北大 西洋沿岸不同地区过去 2000 年海平面变化基本上 都呈现出上升趋势。即便是不同区域,不同代用资 料所重建的海平面变化序列也存在一定的相似度。 例如,北大西洋沿岸格陵兰岛-冰岛、欧洲沿岸和美 国南部东南部过去 2000 年海平面变化幅度和趋势 相似(图 3A),北海和地中海过去 2000 年海平面变 化趋势相似(图 3B),加拿大东部和美国东部海岸过 去 2000 年海平面变化趋势相似(图 3C)。而且,图 3 在公元 700-1000 年与公元 1400-1800 年期间, 当 地海平面都有短暂下降或海平面上升速率减弱的 趋势,这与晚全新世黑暗时期和小冰期时期的两次 快速变冷事件相对应。而在公元 1000-1150 年时, 北大西洋北部表层海水温度明显提升,图3的海平 面曲线在对应时期高程逐渐升高,这一段相对温暖 湿润的时期可能与中世纪暖期有关。随后,自公元 1000-1300年开始,海水温度骤然下降,与小冰期 事件相对应,图3的海平面曲线在对应时期高程也 有降低。从晚全新世气候事件发生的角度来看,这 些重建的海平面变化序列也是可靠的。

北大西洋沿岸过去 2000 年以来海面变化研究 以具有较为准确高程和年代的标志物为依据。通 过对年代数据及高程的校正、误差分析和验潮站观 测记录进行评估,本文对北大西洋沿岸地区已有的 过去 2000 年高分辨率的海平面数据进行了汇编和 集成研究,进而建立北大西洋沿岸地区海平面数据 库(包括1604个海平面数据以及1350个验潮站 观察记录)。本文划分的7个区域的海平面序列在 公元1700年以前,差异较大,之后海平面高度变化 逐渐重叠在一起,并在公元1900年左右开始加速 上升,且在纬度上呈现明显的差异。在公元700-1000年,各区域海平面都有短暂下降或海平面上升 速率减弱的趋势,而在公元1000-1150年时,各区 域海平面高程逐渐升高,具有较好的一致性。此外, 以最近百年的上升速率可以估算北大西洋沿岸 2100年海平面上幅度介于0.05~0.27m。在当前 全球变暖背景下,海平面呈加速上升趋势,北大西 洋沿岸低洼地区可能面临的海平面上升风险进一 步加大,因而有必要强化海平面的监测评估和提高 预警水平。

造成北大西洋沿岸不同地区过去 2000 年海平 面差异性,可能是多种因素综合作用的结果,例如, 可能受气候冷暖交替、冰川均衡调整、大气-海洋动 力学、研究区域的构造以及沿岸地形的变化、钻孔 沉积物压实和潮汐范围变化等局部过程等的影响, 加上采用不同的海平面标志物(指示意义不同)和 测年误差以及时间分辨率不同,综合起来,可能导 致不同区域即便相同时期的相对海平面变化具有 显著的区域性差异,但仍需进一步研究。

参考文献:

- ZHANG Y, XIE J, LIU L. Investigating sea-level change and its impact on Hong Kong's coastal environment[J]. Geographic Information Sciences, 2011, 17(2): 105-112.
- [2] WEBSTER J M, GEORGE N, BEAMAN R J, et al. Submarine 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, 2016, 371(1): 120-129.
- ZHANG K, DOUGLAS B C, LEATHERMAN S P. Global warming and coastal erosion[J]. Climatic Change, 2004, 64(1/2): 41-58.
- [4] ANDERSON T R, FLETCHER C H, BARB EE M M, et al. Doubling of coastal erosion under rising sea level by mid-century in Hawaii [J]. Natural Hazards, 2015, 78(1): 75-103.
- [5] KRIEBEL D L, GEIMAN J D, HENDERSON G R. Future flood frequency under sea-level rise scenarios[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(5): 1078-1083.
- [6] VITOUSEK S, BARNARD P L, FLETCHER C H, et al. Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sealevel rise[J]. Scientific Reports, 2017, 7(6): 1399.
- [7] TAHERKHANI M, VITOUSEK S, BARNARD P L, et al. Sealevel rise exponentially increases coastal flood frequency[J].
 Scientific Reports, 2020, 10(1): 6466.

- [8] LANDSEA C W. Hurricanes and global warming[J]. Nature, 2005, 438(11): 11-12.
- [9] WEBSTER P, HOLLAND G, CURRY J, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. Science, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [10] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. Nature, 2006, 436(7501): 686-688.
- [11] KLOTZBACH P J. Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986-2005) [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(331): 3477-3495.
- [12] KNUTSON T R, MCBRIDE J L, CHAN J, et al. Tropical cyclones and climate change[J]. Nature Geoscience, 2010, 7(1): 157-163.
- [13] CHENG L, ABRAHAM J, HAUSFATHER Z, et al. How fast are the oceans warming?[J]. Science, 2019, 363(6423): 128-129.
- [14] YUE Y, YU K, TAO S, et al. 3500-year western Pacific storm record warns of additional storm activity in a warming warm pool[J]. Palaeogeography, 2019, 521(1): 57-71.
- [15] GEHRELS W R, KIRBY J R, PROKOPH A, et al. Onset of recent rapid sea-level rise in the western Atlantic Ocean[J].
 Quaternary Science Reviews, 2005, 24(18/19): 2083-2100.
- [16] GEHRELS W R, MARSHALL W A, GEHRELS M J, et al. Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century[J]. Holocene, 2006, 16(7): 949-965.
- [17] GEHRELS W R, DAWSON D A, SHAW J, et al. Using Holocene relative sea-level data to inform future sea-level predictions: an example from southwest England[J]. Global Planetary Change, 2011, 78(3/4): 116-126.
- [18] GERLACH, M J, ENGELHART, S E, KEMP, A C, et al. Reconstructing Common Era relative sea-level change on the Gulf Coast of Florida[J]. Marine Geology, 2017, 390(1): 254-269.
- [19] HAWKES A D, KEMP A C, DONNELLY J P, et al. Relative sea-level change in northeastern Florida (USA) during the last 8.0 ka[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 142(15): 90-101.
- [20] KEMP A C, HORTON B P, CULVER S J, et al. Timing and magnitude of recent accelerated sea-level rise (North Carolina, United States) [J]. Geology, 2009, 37(11): 1035-1038.
- [21] KEMP A C, HORTON B P, VANN D R, et al. Quantitative vertical zonation of salt-marsh foraminifera for reconstructing former sea level: an example from New Jersey, USA[J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 54(9): 26-39.
- [22] KEMP A C, TELFORD R J, HORTON B P, et al. Reconstructing Holocene sea level using salt-marsh foraminifera and transfer functions: lessons from New Jersey, USA[J]. Journal of Quaternary Science, 2013, 28(6): 617-629.
- [23] KEMP A C, HORTON B P, Vane C H, et al. Sea-level change during the last 2500 years in New Jersey, USA[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 81(1): 90-104.

- [24] KEMP A C, BERNHARDT C E, HORTON B P, et al. Late Holocene sea- and land-level change on the U. S. southeastern Atlantic coast[J]. Marine Geology, 2014, 357(1): 90-100.
- [25] KEMP A C, HAWKES A D, DONNELLY J P, et al. Relative sea-level change in Connecticut (USA) during the last 2200 yrs[J]. Earth Planetary Science Letters, 2015, 428(15): 217-229.
- [26] KEMP A C, KEGEL J J, CULVER S J, et al. Extended late Holocene relative sea-level histories for North Carolina, USA[J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 160(15): 13-30.
- [27] KEMP A C, WRIGHT A J, EDWARDS R J, et al. Relative sealevel change in Newfoundland, Canada during the past ~3000 years[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 201(1): 89-110.
- [28] LEORRI E, FATELA F, DRAGO T, et al. Lateglacial and Holocene coastal evolution in the Minho Estuary (N Portugal): implications for understanding sea-level changes in Atlantic Iberia[J]. Holocene, 2013, 23(3): 353-63.
- [29] LEORRI E, CEARRETA A, JESÚS M, et al. Anthropogenic disruptions of the sedimentary record in coastal marshes: examples from the southern Bay of Biscay (N. Spain) [J]. Continental Shelf Research, 2014, 86(1): 132-140.
- [30] LONG A J, WOODROFFE S A, MILNE G A, et al. Relative sea-level change in Greenland during the last 700yrs and ice sheet response to the Little Ice Age[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 315/316(1): 76-85.
- [31] LONG A J, BARLOW N, GEHRELS W R, et al. Contrasting records of sea-level change in the eastern and western North Atlantic during the last 300 years[J]. Earth Planetary Science Letters, 2014, 388(15): 110-122.
- [32] LONG A J, BARLOW N L M, BUSSCHERS F S, et al. Nearfield sea-level variability in northwest Europe and ice sheet stability during the last interglacial[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 126(15): 26-40.
- [33] PIECUCH C G, HUYBERS P, HAY C C, et al. Origin of spatial variation in US East Coast sea-level trends during 1900–2017[J]. Nature, 2018, 564(7736): 400-404.
- [34] SIVAN D, LAMBECK K, TOUEG R, et al. Ancient coastal wells of Caesarea Maritima, Israel, an indicator for relative sea level changes during the last 2000 years[J]. Earth Planetary Science Letters, 2004, 222(1): 315-330.
- [35] SZKORNIK K, GEHRELS W R, MURRAY A S. Aeolian sand movement and relative sea-level rise in Ho Bugt, western Denmark, during the 'Little Ice Age'.[J]. Holocene, 2008, 18(16): 951-965.
- [36] GARCÍA-ARTOLA A, STÉPHAN P, CEARRETA A, et al. Holocene sea-level database from the Atlantic coast of Europe[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 196(15): 177-192.
- [37] ROSENTAU A, KLEMANN V, BENNIKE O, et al. A Holocene relative sea-level database for the Baltic Sea[J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 266(15): 107071.
- [38] VACCHI M, ENGELHART S, E, NIKITINA D, et al. Postgla-

- [39] ENGELHART S E, HORTON B P. Holocene sea level database for the Atlantic coast of the United States [J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 54(26): 12-25.
- [40] 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): 2851-2866.
- [41] CHEN X, ZHANG X, 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.
- [42] CHURCH J A, WHITE N J. A 20th century acceleration in global sea-level rise[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(1): 33.
- [43] 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.
- [44] DEAN R G, HOUSTON J R. Recent sea level trends and accelerations: comparison of tide gauge and satellite results[J].
 Coastal Engineering, 2013, 75(May); 4-9.
- [45] FENOGLIO-MARC L, BRAITENBERG C, TUNINI L. Sea level variability and trends in the Adriatic Sea in 1993–2008 from tide gauges and satellite altimetry[J]. Physics Chemistry of the Earth, 2012, 40-41; 47-58.
- [46] THOMSON R E, CANDELLA R N, RABINOVICH A B. Energy decay of the 2004 Sumatra Tsunami in the world ocean[J]. Pure and Applied Geophysics, 2011, 168(11): 1919-1950.
- [47] GUO J, WANG J, HU Z, et al. Vertical land movement over China coasts determined by tide gauge and satellite altimetric data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3): 168.
- [48] PFEFFER J, ALLEMAND P. The key role of vertical land motions in coastal sea level variations: a global synthesis of multisatellite altimetry, tide gauge data and GPS measurements[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 439(1): 39-47.
- [49] 郑景云, 邵雪梅, 郝志新, 等. 北半球千年尺度气候高分辨率数 据集研制及可靠性研究[J]. 中国基础科学, 2017, 19(6): 1-8.
- [50] MARSHALL J, SPEER K. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean Upwelling[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(3): 171-180.
- [51] ZACHOS J S, PAGANI M, SLOAN L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science 2001, 292(5517): 686-693.
- [52] 陆钧,陈木宏.新生代主要全球气候事件研究进展[J].热带 海洋学报,2006,25(6):72-79.
- [53] CARTER R M, GAMMON P. New Zealand maritime glaciation: millennial-scale southern climate change since 3.9 Ma[J]. Science, 2004, 304(5677): 1659-1662.
- [54] 李娟, 左军成, 谭伟, 等. 21世纪格陵兰冰川融化速率对海平 面变化的影响[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 22-32.

[55] 王绍鸿. 海平面标志物识别的一些问题[J]. 台湾海峡, 1989, 8(4): 45-53.

乐远福,等:北大西洋沿岸过去 2000 年海平面变化的若干重要特征

- [56] 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): 4.
- [57] 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.
- [58] SMITHERS S. Sea-level Indicators, in: Hopley, D. (Ed.), encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process[J]. Springer Netherlands, 2011, Dordrecht; 978-991.
- [59] KEMP, A C, HORTON, B P, DONNELLY, J P, et al. Climate related sea-level variations over the past two millennia[J].
 Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108; 11017-11022.
- [60] CORTIJO E, DUPLESSY J C, LABEYRIE L, et al. Eemian cooling in the Norwegian Sea and North Atlantic Ocean preceding continental ice-sheet growth[J]. Nature, 1994, 372(6505): 446-449.
- [61] JINNA H E, SHA L, LIU Y, et al. Diatom assemblages from surface sediments, west of Greenland [J]. Marine Geology amd Quaternary Geology, 2011, 31(4): 125-130.
- [62] ALISA V B A, NICOLE S K B, FEDOR A R A, et al. A postglacial relative sea-level database for the Russian Arctic coast[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 199(1): 188-205.
- [63] SHENNAN I, HORTON B. Holocene land- and sea-level changes in Great Britain[J]. Journal of Quaternary Science, 2002, 17(5/6): 511-526.
- [64] STUIVER M, REIMER P J, REIMER R W. Calib 8.2[EB/OL]. [2021-12-04]. http://calib.org, 2021.
- [65] REIMER P J, AUSTIN W E N, BARD E, et al. The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 kcal BP)[J]. Radiocarbon, 2020, 62(4): 725-757.
- [66] 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.
- [67] SCOURSE J D, WANAMAKER A D, WEIDMAN C, et al. The marine radiocarbon bomb pulse across the temperate North Atlantic: a compilation of Δ14C time histories from arctica islandica growth increments [J]. Radiocarbon, 2012, 54(2): 165-186.
- [68] WANAMAKER A D, BUTLER P G, SCOURSE J D, et al. Surface changes in the North Atlantic meridional overturning circulation during the last millennium[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 899.
- [69] TISNÉRAT-LABORDE N, PATERNE M, MÉTIVIER B, et al. Variability of the northeast Atlantic sea surface D14C and marine reservoir age and the North Atlantic Oscillation (NAO)
 [J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(1): 2633-2646.
- [70] LOUGHEED B C, FILIPSSON H L, SNOWBALL I. Large spatial variations in coastal 14C reservoir age - a case study from the Baltic Sea[J]. Climate of the Past, 2013, 9(3): 1015-1028.

[71] REIMER P J, MCCORMAC F G. Marine radiocarbon reser-

voir corrections for the Mediterranean and Aegean Seas[J]. Radiocarbon, 2002, 44(1): 159.

- [72] FAIVRE, BAKRAN-PETRICIOLI S, BAREŠIĆ T, et al. Marine radiocarbon reservoir age of the coralline intertidal alga Lithophyllum byssoides in the Mediterranean[J]. Quaternary geochronology, 2019, 51: 15-23.
- [73] FORMAN S L, POLYAK L. Radiocarbon content of pre-bomb marine mollusks and variations in the 14C Reservoir age for coastal areas of the Barents and Kara Seas, Russia[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(8): 885-888.
- [74] KUZMIN Y V, NEVESSKAYA L A, Krivonogov S K, et al. Apparent 14C ages of the 'pre-bomb' shells and correction values (R, Δ R) for Caspian and Aral Seas (Central Asia) [J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research B, 2007, 259(1): 463-466.
- [75] DUTTA K, BHUSHAN R, SOMAYAJULU B. ΔR correction values for the northern Indian Ocean[J]. Radiocarbon, 2016, 43(2A): 483-488.
- [76] HADDEN C, CHERKINSKY A. 14C variations in pre-bomb nearshore habitats of the Florida Panhandle, USA[J]. Radiocarbon, 2015, 57(3): 1-9.
- [77] Hadden C S, Cherkinsky A. Carbon reservoir effects in eastern Oyster from Apalachicola Bay, USA[J]. Radiocarbon, 2017, 59(5): 1-10.
- [78] Permanent service for mean sea level (PSMSL). tide gauge data, retrieved 01 Nov 2021. [EB/OL]. [2021-12-04]. http://www.psmsl.org/data/obtaining/.
- [79] SIMON J, HOLGATE A M P L, WOODWORTH L J, et al. New data systems and products at the permanent service for mean sea level[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 3(29): 493-504.
- [80] VAREKAMP J C, THOMAS E, PLASSCHE O. Relative sealevel rise and climate change over the last 1500years (Clinton, CT, USA)[J]. Terra Nova, 1992, 4(3): 29-304.
- [81] DEAN S, HORTON B P, EVELPIDOU N, et al. Can we detect centennial sea-level variations over the last three thousand years in Israeli archaeological records?[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 210(15): 125-135.
- [82] SAHER M H, GEHRELS W R, BARLOW N, et al. Sea-level changes in Iceland and the influence of the North Atlantic Oscillation during the last half millennium[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 108(15): 23-36.
- [83] STÉPHAN P, GOSLIN J M, PAILLER Y, et al. Holocene saltmarsh sedimentary infilling and relative sea-level changes in West Brittany (France) using foraminifera-based transfer functions [J]. Boreas, 2015, 44(1): 153-177.
- [84] GARCIA-ARTOLA A, CEARRETA A, LEORRI E, et al. Coastal salt-marshes as geological archives of recent sea-level changes[J]. Geogaceta, 2009, 47: 109-112.
- [85] LEORRI E, HORTON B P, CEARRETA A. Development of a foraminifera-based transfer function in the Basque marshes, N. Spain: implications for sea-level studies in the Bay of

Biscay[J]. Marine Geology, 2008, 251(1/2): 60-74.

- [86] BARNETT R L, BERNATCHEZ P, GARNEAU M, et al. Late Holocene sea-level changes in eastern Québec and potential drivers[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 203(1): 151-169.
- [87] DONNELLY J P, CLAERY P, NEWBY P, et al. Coupling instrumental and geological records of sea-level change: Evidence from southern New England of an increase in the rate of sea-level rise in the late 19th century[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L05203.
- [88] GONZÁLEZ J E. A new Late Holocene sea-level record from the Mississippi Delta: evidence for a climate/sea level connection?[J]. Quaternary ence Reviews, 2009, 28(17/18): 1737-1749.
- [89] BARLOW N L M, LONG A J, SAHER M H, et al. Salt-marsh reconstructions of relative sea-level change in the North Atlantic during the last 2000 years[J]. Quaternary Science Reviews 2014, 99(1): 1-16.
- [90] GEHRELS W R, SZKORNIK K, BA RTHOLDY J, et al. Late Holocene sea-level changes and isostasy in western Denmark[J]. Quaternary Research, 2006, 66(2): 288-302.
- [91] BARNETT R L, BERNATCHEZ P, GARNEAU M, et al. Reconstructing late Holocene relative sea-level changes at the Magdalen Islands (Gulf of St. Lawrence, Canada) using multiproxy analyses[J]. Journal of Quaternary Science, 2017, 32(3): 380-395.
- [92] GEHRELS W R, DANGENDORF S, BARLOW N L M, et al. A Preindustrial sea-level rise hotspot along the Atlantic coast of North America[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(4): e2019GL085814.
- [93] KEMP A C, HILL T D, VANE C H, et al. Relative sea-level trends in New York City during the past 1500 years[J]. The Holocene, 2017, 27(8): 1169-1186.
- [94] WALKER J S, KOPP R E, SHAW T A, et al. Common Era sealevel budgets along the U. S. Atlantic coast[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1841.
- [95] HANSEN B, ØSTERHUS S. North Atlantic-Nordic Seas exchanges[J]. Progress in Oceanography, 2000, 45(2): 109-208.
- [96] HUI J, MARIT-SOLVEIG S, KNUDSEN LUISE K, et al. Late-Holocene summer sea-surface temperatures based on a diatom record from the north Icelandic shelf[J]. Holocene, 2002, 12(2): 137-147.
- [97] STUIVER M, GROOTES P M, BRAZIUNAS T F. The GISP2 δ^{18} O climate record of the past 16, 500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes[J]. Quaternary Research, 1995, 44(3): 341-354.
- [98] FREDERIKSE T, LANDERER F, CARON L, et al. The causes of sea-level rise since 1900[J]. Nature, 2020, 584(7821): 393-397.
- [99] KOPP R E, KEMP A C, BITTERMANN K, et al. Temperaturedriven global sea-level variability in the Common Era[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113(11): 1434-1441.

- [100] PLASSCHE O, BORG K, JONG A M. Sea level-climate correlation during the past 1400 yr[J]. Geology, 1998, 26(4): 319-322.
- [101] MILNE G A, GEHRELS W R, HUGHES C W, et al. Identifying the causes of sea-level change[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(7): 471-478.
- [102] PELTIER, W R. Postglacial variations in the level of the sea: implications for climate dynamics and solid-Earth geophysics[J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 603-689.
- [103] 汪汉胜, Patrick W U, 许厚泽. 冰川均衡调整(GIA)的研

究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 1958-1967.

- [104] JÉRME G A, BRIGITTE V V L B, GIORGIO S C, et al. A new Holocene relative sea-level curve for western Brittany (France): insights on isostatic dynamics along the Atlantic coasts of north-western Europe[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 129(1): 341-365.
- [105] MATTHEW J, BRAIN A J, LONG S A, et al. Modelling the effects of sediment compaction on salt marsh reconstructions of recent sea-level rise[J]. Earth Planetary Science Letters, 2012, 345/348(1): 180-193.

General characteristics of sea-level changes along the North Atlantic coast in the past 2000 years

YUE Yuanfu, TANG Lichao, YU Kefu*

(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 North Atlantic coast is one of the most vulnerable regions to sea-level rise in the world. The history and characteristics of the past sea-level changes in the region is of great scientific significance for understanding the course of modern sea-level changes and for predicting the trend of future sea-level changes, and also helps minimize the uncertainty of prediction results. Therefore, it is necessary to systematically analyze and integrate the published sea-level data as well as the tidal observation records along the North Atlantic coast. Using the available 1 350 tidal observation records and 1 604 calibrated data, the history of sea-level changes along the North Atlantic coast in the past 2000 years was established, and the main processes and characteristics, regional differences, and existing issues of sea-level changes along the North Atlantic coast in the past 2000 years were analyzed. Results show that: (1) the sea-level changes in the North Atlantic coast in the past 2000 years are remarked by significant spatial and temporal differences, as well as the regional differences in amplitude and frequency. (2) The sea-level along the North Atlantic coast shows a fluctuating upward trend in the past 2000 years, but the elevations of sea-level rising in different regions are quite different in different coastal regions. The sea-level rise in the eastern coast of North America is more than 2.5 m. The sea-level rise in Greenland-Iceland, Europe, and the southern and southeastern parts of the United States is about 1.9 m. The sea level rise in the North Sea and the Mediterranean is about 1 m. (3) Since 1900 AD, the rate of sea-level rise along the east and west coast of the North Atlantic has generally accelerated, showing a significant difference in latitude, namely, from the Mediterranean to the European coast to Greenland-Iceland on the east coast of the North Atlantic, the sea-level rise rate gradually increases with the increase of latitude. Similarly, from the south and southeast of the United States on the west coast of the North Atlantic to the east of the United States and then to the east of Canada, with the increase of latitude, the sea-level rise rate also increases in turn. (4) The sea-level change and its temporal and spatial differences in the North Atlantic coast during the past 2000 years are likely the combined effects of various factors. The alternation of cold and warm climate, glacial isostatic adjustment, atmospheric-ocean dynamics, regional tectonic movement, coastal terrain changes, sediment compaction, and tidal range changes may be the main reasons. Key words: North Atlantic; the past 2000 years; sea-level change; tidal observation record; regional difference