

末次冰消期以来海平面变化研究进展

赵信文^{1,2}, 向 薇², 肖尚斌², 黄长生¹, 陈双喜¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2. 三峡大学土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 本文综述了末次冰消期特别是全新世以来全球海平面变化的研究成果。文章先介绍了海平面的变化成因, 阐述了海平面变化带来的影响, 总结了海平面变化的研究方法。分析总结了国内外学者研究所得的不同阶段的海平面变化数值及海平面变化曲线, 并简要总结了海平面变化研究中存在的问题。

关键词: 晚第四纪; 全新世; 海平面变化; 相对海平面

中图分类号: P66

文献标识码: A

海平面变化是指海平面的升降变化, 海平面变化“eustatic”一词是 E. Suess 在 1888 年提出的, 指全球性的海平面变化。一般将海平面变化划分为全球海平面变化和相对海平面变化两种类型, 全球海平面变化与局部因素无关, 相对海平面变化与局部因素(沉降或隆升)关系密切^[1]。

近年来, 全球温室效应加剧, 气温上升, 引起冰川融化及海洋上层水体受热膨胀, 使得海平面在不同地区有不同程度的上升。Nicholls 和 Mimura^[2]的研究表明, 在上个世纪, 世界平均海平面上升了 10 ~ 25 cm。海平面变化的成因比较复杂, 既与气候相关, 也与地壳活动有关。郭旭东^[3]认为, 许多代表海平面升降运动期间的气候记录同大陆冰川进退、生物演化存在时间上的一致性, 因此海面变化由气候成因引起比较合乎实际。杨怀仁等^[4]认为, 引起海面升降的主要原因为气候波动、地壳运动及大地水准面变形。杨瑞东等^[5]总结了海平面变化的原因, 包括冰川、板块构造、海水密度变化、气候、潮汐作用、局部构造运动等, 同时也指出, 冰川作用、海底扩张和地球在银河系中位置的变化是引起海平面升降的

最主要原因。有学者推测南极西部冰盖的消融在 12 万年前曾使得海平面比现在高出至少 6 m^[6], 因此冰川是海平面变化的重要影响因素。

海平面上升将带来一系列问题, 包括淹没湿地、低地、城镇、加剧海岸侵蚀、加剧洪水泛滥、抬升地下水位、增加河流(河口)、海湾及蓄水层的盐度^[7]。2009 年 3 月 10 号在哥本哈根举行的气候变化国际科学大会上关于气候变化的研究报告表明, 到 2100 年海平面可能会上升 0.5 ~ 1 m 或者更高。世界上有大约 10%(6 亿)的人口处于被淹没的危险地带, 三千多座城市位于海拔低于 10 m 的沿海地区, 如果不采取有效措施遏制世界海平面的继续上升, 沿海地区将受到毁灭性的灾害。因此, 加强对海平面变化的研究, 对全球沿海地区意义重大。研究末次冰消期以来的海平面变化, 对未来的海平面变化趋势作出预测从而及早作出预防措施具有重要的意义。

1 海平面变化方法学研究进展

1.1 研究海平面变化的标志物

研究历史时期海平面变化, 首先是要找到海平面变化的标志物。王绍鸿^[8]对海平面变化的标志物作了系统全面的总结, 他将海平面标志分为三大

收稿日期: 2011-12-20; 修回日期: 2012-03-22

基金项目: 中国地质调查局“珠江三角洲晚第四纪地质环境演化及现代过程研究”项目(编号: 1212011120174)。

作者简介: 赵信文(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事环境地质工作, E-mail: zhaixinwen0413@163.com。

类:古生物标志、沉积物标志和地貌标志。古生物标志一般有珊瑚礁、海生软体动物(牡蛎壳、贝壳、贝壳堤)、介形虫、硅藻、孢子花粉、藤壶、大型植物遗体等古生物化石类;沉积物标志一般有海滩岩、盐沼泥炭、障壁沙、碳酸盐类;地貌标志一般有海蚀槽穴、海蚀平台、古文化遗址等地貌形态。

1.1.1 古生物标志

古生物标志在海平面变化研究中已广泛应用,是该领域成熟的研究手段,受国内外学者青睐。到目前为止,学者在珊瑚礁、海生软体动物、介形虫、硅藻等古生物标志方面的研究成果丰硕,如珊瑚礁的发育是记录海平面变化过程的极好标志^[9]。Mayer^[10]发现,大型块状的滨珊瑚的虫体在经受 1 h 的暴露或是阳光的暴晒就会死亡,因此其实际生长上限只能达到大潮低潮面^[11]。余克服等^[9]以珊瑚礁及其生物地貌带作为高海平面的标志,通过测年研究指出全新世以来至少存在过 5 期相对高海平面。另外,Shen^[12]、Yu^[13]及 Kershaw^[14]也都利用珊瑚礁分别对菲律宾吕宋岛、雷州半岛、希腊科林斯湾南海岸的全新世海平面进行了研究。海生软体动物死亡后遗留的壳可以作为古海面指示物^[15]。郭旭东等^[3]利用古海面贝堤或贝丘遗迹对辽东半岛全新世古海平面进行了研究,认为黄海北岸大致在中全新世后期以来海平面曾有三次的明显的降低。Laborel 等^[16]利用生物标志物对热带和亚热带地区的岩石海岸进行了全新世海平面和气候变化的研究。

1.1.2 沉积物标志

海滩岩常被用作热带、亚热带海岸区的海平面指示物。杨建明等^[15]认为,砂堤型海滩岩相当于贝壳堤堆积,其底板相当于平均高潮位;海滩型海滩岩是真正的狭义海滩岩,其沉积顶板可认为相当于大潮平均高潮位;高位盐沼泥炭的形成部位相当于平均高潮位,低位盐沼泥炭的形成部位则相当于平均低潮位。詹文欢等^[17]从海滩岩的角度探讨了粤东沿海海平面变化,恢复了近 3500 a 以来海平面变化曲线。Hopley^[18]认为狭义海滩岩顶板的沉积位置相当于大潮平均高潮位,最高可接近最高天文潮位,真正海滩岩的最上层才是古潮位的可靠标志。王绍鸿^[8]认为海相碳酸盐岩才能作为海平面标志。

1.1.3 地貌标志

王绍鸿^[8]认为,运用海蚀槽穴和海蚀平台作为海平面标志物时,要和其他海蚀地貌一起考虑。另

外,海蚀形态不能用于直接的测年,要借助附近相关的可测年的海平面标志物。刘晓东等^[19]利用扫描电镜方法分析了南极法尔兹半岛上海蚀成因的古海蚀龛沉积物中石英砂表面结构特征组合,发现在所有的石英砂表面上均表现出冰川和水流共同作用的结构特征组合,龛中沉积物是冰水沉积环境下的产物,另外还得出,南极法尔兹半岛上的冰盖解体并退出长城站区的时间应早于 4600 a BP。Kershaw 等^[20]也利用海岸峭壁上海蚀刻槽对希腊 Pera-chora 半岛的相对海平面进行了研究。Tjia^[21]对马来西亚-泰国半岛海平面变化的研究中提到,海岸边石灰岩崖上的 U 型海蚀刻槽的最深处与古平均海平面一致。

1.2 研究海平面变化的定年方法

古海平面研究离不开高精度的测年方法,目前高精度的测年是第四纪研究一大瓶颈,国内外学者运用各种方法尝试着突破这一制约,如在全新世海平面变化方面主要运用 ^{14}C 定年法和 TIMS 铀系定年法进行研究。 ^{14}C 定年法,是利用自然存在的 ^{14}C 同位素的放射性定年法,用以确定原先存活的动物和植物年龄,可测定早至 5 万年前有机物质的年代。TIMS 铀系定年法,测定地质年龄范围在数百年到五十万年之间,其中未经蚀变的第四纪珊瑚和第四纪碳酸盐质沉积物等是最合适的研究对象^[22]。

在对中晚全新世海平面变化进行研究时,AMS ^{14}C 方法应用广泛^[23-25]。近年来,TIMS 定年法也得到了较好的发展。马志邦等^[26]、温孝胜等^[27]、Stirling 等^[28]都应用 TIMS 定年法对鹿回头、南沙群岛等地的珊瑚礁进行了古海平面变化的研究。在这两种方法中,TIMS 铀系定年法更精确、测年范围更宽,可以测试 500 ka 以来的样品^[29]。在提供古海平面变化的测年记录及横跨末次冰期的 13 万年的现存的大量观察记录上,铀系测年法被广泛地应用。

2 海平面变化曲线

2.1 全球海平面变化

国内外学者对末次冰消期以来全球的海平面变化做了大量的研究。Tanabe 等^[30]对日本中部的 Shinano River 末次冰消期的相对海平面变化进行了研究,认为早全新世海平面低于现今海平面;Glenn 等^[31]对加勒比海和美国南部的大西洋海岸全新世海平面变化进行了研究,发现海平面数据有明

显的空间差异;Suric 等^[32]采用 ^{14}C 方法对采集于亚得里亚东部海岸的水下洞穴堆积物作了测年研究,结果表明研究区域与邻近区域 Tyrrhenian 海岸和法国地中海海岸的海平面变化趋势一致;Gehrels 等^[33]重建了丹麦古环境变化及晚全新世相对海平面变化;Pedersen 等^[34]对丹麦 Wadden 海的 Varde A 流域进行了全新世地貌演变及相对海平面的重建,指出在中全新世海平面低于现今海平面;Camoin^[35]对印度洋西部的古海平面变化进行了研究,认为在 10 000~7 000 a BP,海平面以 6 mm/a 的速率上升,在 7 500 a BP 左右,海平面上升速率下降至 1.1 mm/a。

前人对地中海沿岸如法国、意大利、土耳其等地海平面变化的众多研究结果一致,全新世左右的古海平面要低于现今海平面^[36-41]。与此结果类似的还有 Spurgeon 对美国 Florida 的 Siesta Key 的海平面的研究,其研究发现在 2 000 a BP 左右,海平面上升至现今海平面高度^[42]。这些结果与 Clark 划分的全球海面预测区吻合。杨子赓^[43]在其著作中提到,Clark 等的文章中提出了粘弹性地球上洋面变化的数值模型,认为即便全球海面是不变的,由于冰盖区的地壳均衡回跳和大洋的负荷增加,世界各地的海平面变化过程也不会相同,因此 Clark 等将全球海面划分为 6 个预测区,而地中海及美国南部便位于其中的第Ⅲ区,此区的海平面变化特点是,从 6 000 a BP 开始海平面便一直处于上升阶段。

全球有很多地区出现了中晚全新世高海平面的证据。Corner 等^[44]构建了俄罗斯西北部科拉半岛上的 Polyamy 的全新世海平面变化曲线,10 000 a BP 时海平面在现今海平面以上 80 m;Baker 等^[45]利用生物指示物方法对澳大利亚东南部晚全新世海平面曲线的重建表明,晚全新世研究区域的海平面呈现波动下降的趋势,6 000 年前海平面与现今海平面高度接近,澳大利亚东海岸和南半球中高纬度地区如 Melanesia、Polynesia 和 Brazil 南部,都呈现出与研究区域类似的环境和海平面变化。Lambeck^[46]对构造稳定的澳大利亚边缘中全新世以来的海平面变化进行了研究,认为 7 000 ~ 6 000 a BP 时海平面为 0~3 m;Grossman 等^[47]对太平洋珊瑚礁的研究表明,在 1 500 ~ 2 000 a BP,海平面在现今海平面以上 1~1.5 m;Tjia 等^[21]对构造稳定的 Malay–Thai 半岛海平面进行了研究,认为海平面在 2 000 a BP 在现今海平面以上 0.7 ~ 1.2 m;在 1 500 a BP,海平面下降至现今海平面以上 0.2~0.4 m;Yu 等^[48]对来

自于中国南海北部 5 个中全新世小环状珊瑚岛的样品进行了测年研究,结果表明,在 7 050~6 600 a BP,海平面在现今海平面以上 1.71~2.19 m,且至少有四个波动周期;Liew 等^[49]对台湾地区晚全新世的海平面、河量及气候相互间的关系作了研究,表明在 2 000~1 500 a BP,海平面高出现今海平面 1.3~1.5 m;Yim^[50]利用 ^{14}C 方法对中国香港的海滩岩的测年研究结果表明,在 1 660±75 a BP,研究区域海平面高于现今海平面 2.03 m;沈明洁等^[51]对全新世以来中国东部海面变化的资料数据进行全面搜集,其中包括 12 条原始曲线和 600 多个标志物点的多项信息,初步建立起中国东部全新世以来海面随时间变化的波动序列,中国东部全新世以来海面变化从总体上来讲共经历了 9 个周期的波动变化,其中有 4 次高于现今海平面;Angulo 等^[52]对所收集的巴西岩石海岸最南端的贝壳作了测年研究,发现在(5 410±80)~(190±65) a BP 之间,古海平面呈现高出现今海平面 2.10 m ~ 0.20 m 的变化趋势;Ybert 等^[53]对巴西东南海岸全新世的环境和海平面变化的研究结果表明,4 900 ~ 3 470 a BP,研究区域海平面高于现今海平面;在日本,Omoto^[54]利用 ^{14}C 方法对日本西南部 Ryukyu 岛的海滩岩进行了测年研究,认为在(1 640±65)~(1 970±95) a BP,研究区域海平面在现今海平面以上 0.1~1.7 m;Hongo 等^[55]利用珊瑚礁对日本 Ishigaki 岛和 Ryukyu 岛的全新世海平面进行了研究,指出中全新世最高海平面出现于 5 000 aBP 左右,高出现今海平面 3±2.5 m;在 南极, Zwart^[56]等对南极洲 Vestfold 山脉附近以前与海洋相通的湖泊沉积物作了研究,指出在中全新世,存在高海平面;Hall^[57]对南极维多利亚地区 130 多个样品做了放射性碳测年研究,得出了新的相对海平面曲线,也得出中全新世存在高海平面的结果;Froede^[58]等利用 ^{14}C 方法对 Florida 海岸的研究表明,2 000~1 000 a BP,海平面高出现今海平面 0.5 m。

图 1 综合了近年来全球全新世相对海平面变化研究的部分成果,由图 1 可以看出全新世以来不同地区的相对海平面变化趋势不同。印度洋西部及丹麦相对海平面变化趋势基本相同,印度洋西部相对海平面高度从早全新世一直上升至现今海平面,丹麦的相对海平面变化曲线存在小的波动现象。与此大不相同的是俄罗斯北部科拉半岛 Polyamy 的相对海平面变化曲线,它显示该区域全新世相对海平面的变化趋势是一直下降至现今海平面高度,这

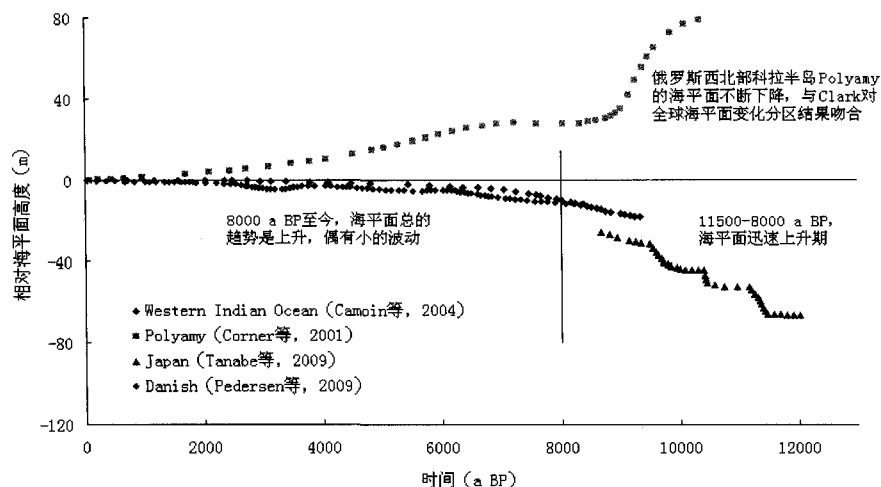


图1 全球相对海平面变化曲线

Fig. 1 Global relative sea level change curve

(图中曲线数据来自文献[30, 34-35, 44])

可以用前文提到的 Clark 等人的全球海平面变化分区结果来解释^[43]:俄罗斯北部科拉半岛位于冰川覆盖区,冰后期地壳均衡抬升,海平面迅速下降。

从前人研究成果来看,除俄罗斯北部科拉半岛的相对海平面变化曲线外,其他曲线和海平面数值都表现出以下规律:11 500 ~ 8 000 a BP,海平面迅速上升;8 000 a BP 至今,海平面总的趋势是上升,但是太平洋沿岸如澳大利亚^[45-46]、中国南海^[48]、日本^[54-55]、菲律宾^[59]等地区的海平面高于现今海平面,与此类似区域还有巴西^[53]、南极^[57]及美国东南沿海^[58];而地中海沿岸如以色列^[36]、土耳其^[40]等国家及丹麦^[33-34]的海平面低于现今海平面。

总的来说,这种海平面不断上升、不断下降和存在中全新世高海平面的现象与全球海平面变化的分区结果吻合^[60]。

2.2 我国东南部海平面变化

陈欣树等^[61]根据珠江口外陆架海洋地质调查获得的地质-地球物理调查及钻井资料,从沉积相、地貌、微体古生物、¹⁴C 测年等多方面研究,以充分的证据,阐明了该区末次冰期结束时为距今 13 700±600 a BP。当时海面低于现今海面 131 m。方国祥等^[62]对 9 类古海面标志物的 107 个样品年代数据进行沉积深度校正、构造升降幅度校正后,绘出了珠江三角洲 8 000 年来海平面变化曲线。徐明广等^[63]对珠江三角洲地区进行了野外调查,研究表明,第四纪以来,珠江三角洲地区规模较大的海面升降各有两次,分别形成下部和上部两个陆相层

和两个海相层及顶部海陆交互层。李平日等^[64]根据对广东东部地区的大量钻孔岩心和地表露头的沉积相综合分析资料及 ¹⁴C 测年数据,讨论了晚更新世以来的海平面变化。研究表明,全新世海进在距今 12 000 ~ 10 000 年已开始。中全新世早期海面迅速上升,晚期转为缓慢上升甚至相对停顿。晚全新世早期海平面上升到最大高度,近 2 000 年来稍有下降并渐趋稳定。未必存在中全新世高海面。李平日等^[65]也对珠江三角洲全新世环境演变进行了研究,利用 107 个已测年的古海面标志物绘制了珠江三角洲全新世海平面变化曲线。方国祥等^[66]利用 7 类古海面标志物的 137 个样品年龄数据绘出了闽南、粤东全新世以来海平面变化曲线。杨建明等^[15]通过 35 个 ¹⁴C 测年数据进行评价,建立了一条福建省沿岸过去 6 000 年海平面变化曲线,该曲线表明海平面在现代位置上下呈振荡性变化。朱永其等^[67]通过东海陆架沉积物样品实验室分析和地貌发育的研究,从恢复古地理环境入手,论证了东海陆架晚更新世以来的海面变化过程。聂宝符^[11]对南沙群岛、西沙群岛、海南岛、雷州半岛和台湾恒春半岛珊瑚礁进行了考察,进一步证实了南海同它的周边情况一样,确实出现过至少比现今高 2 ~ 3 m 的高海面。赵希涛等^[68]根据对我国东部沿海与近海陆架的调查研究,在综合与分析地层层序、标高、年代及与古海面关系确切可靠的丰富资料的基础上,初步建立了我国东部 20 000 年来海平面变化的模式。

珠江三角洲及邻近地区闽南、粤东、台湾的全

新世海平面变化曲线图(图 2)是对前人研究结果的汇总,该图显示珠江三角洲及邻近地区全新世的海平面变化具有波动性的特征。

由图 2 可以看出海平面上升的基本趋势,在不同时期海平面变化存在着差异。约 9 000 ~ 6 000 a BP,海平面急剧上升,粤东和台湾的海平面变化存在比较大的波动,尤其是粤东,波动比较频繁,但它们都

体现出波动中上升的特点;约 6 000 a BP,海平面达到最高,高出现今海平面约 5 m,与毕福志、丁锡祉研究结果类似^[70-71];在 6 000 a BP 后,海平面多呈现出振荡性变化,在现今海平面 ± 5 m 范围内波动。郭旭东^[3]对南海及东南沿海、陈伟光^[72]、张虎男^[72-73]对华南沿海海平面变化的研究也表现出中全新世时海平面有一定幅度的振荡。

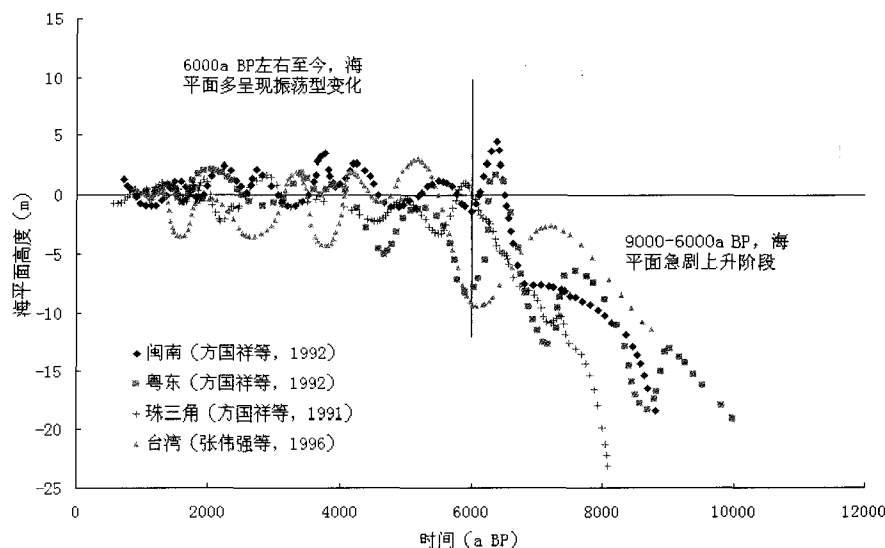


图2 珠江三角洲及邻近地区全新世海平面变化曲线

Fig. 2 Holocene sea-level change curve of Pearl River Delta and adjacent areas

(图中数据来自文献[62, 66, 69])

2.3 古海平面变化研究存在的问题

古海平面变化的研究离不开两个条件,一是海平面变化标志物,二是高精度的测年方法。

测年方法的精度不同将导致研究结果大不一样,Eisenhauer 等^[74]曾对 ^{14}C 和铀系测年进行过比较,发现珊瑚礁钻心的 ^{14}C 年龄要比相应的铀系年龄年轻 1 000 a。因此,对于同一地区海平面的变化,采用不同测年手段将导致研究结果不一样。

此外,相对海平面的变化要考虑到构造活动作用,区域沉降或隆升将导致古海平面标志物的移动,以致其不能精确代表古海平面的高程。有研究表明,海进强并不一定反映海平面绝对高度大,而可能是这个时段构造沉降幅度大所造成的假象^[64],因此,推算研究区域器测时期以前的构造沉降或抬升速率便显得尤为重要。不同研究者对晚第四纪珠江三角洲的构造运动速率的估算结果不同^[75]:魏柏林等所估算的构造沉降速率为 $+2\sim+3$ mm/a,抬升速率为 $+0.3\sim+1$ mm;陈伟光等估算的速率为 $-0.5\sim-1.8$ mm/a与 $+0.4\sim+0.7$ mm/a;张虎男等人估算东南沿海断块构

造速率为 $-2.6\sim-8$ mm/a 与 $+1.2\sim+2.5$ mm/a。构造速率估算结果不同,也将导致海平面高度的不同。由此可以看出,即使是针对相同区域的海平面变化研究,不同研究者得出的结论也有可能不一样,因此,在对海平面变化进行的研究中,如何得到更精确的定年及海平面高度是每个研究者都应该重视的问题,需要在今后的研究中进行改进。

3 结语

对于全球海平面变化而言,不同地区全新世海平面高度相差很大,且同时存在不断上升和不断下降至现今海平面高程的变化曲线,这说明海平面变化具有区域性的特征。

在珠江三角洲及其邻近地区,6 000 a BP 后,海平面多呈现出振荡性变化,在现今海平面 ± 5 m 范围内波动。闽南、粤东、台湾和珠江三角洲的全新世海平面变化曲线存在差别,可能是由于地质构造升降的影响,同时,定年技术及海平面标志物的精确

度对海平面变化曲线的重建也有一定影响。因此,在进行古海平面变化的研究时,应选择地质构造相对稳定的地区,另外也应选择高精度的定年技术及合适的海平面标志物。

参考文献:

- [1] 李祥辉, 张洁. 海平面及海平面变化综述[J]. 岩相古地理, 1999,19(4): 61-72.
- [2] Feenstra J, Programme UNE, Milieuvraagstukken VU tA Iv. Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies [M]. United Nations Environment Programme, 1998.
- [3] 郭旭东. 晚更新世以来中国海平面的变化 [J]. 地质科学, 1979,4: 330-341.
- [4] 杨怀仁, 谢志仁. 中国东部近 20,000 年来的气候波动与海面升降运动[J]. 海洋与湖沼, 1984,15(1): 1-13.
- [5] 杨瑞东, 傅 锐. 古海平面变化研究的过去与现状[J]. 地质科技情报, 1990,9(2): 59-63.
- [6] 黄长江, 董巧香, 林俊达. 全球温暖化与海平面上升[J]. 自然杂志, 2000,22(4): 225-232.
- [7] Barth M, Titus J. Greenhouse effect and sea level rise: A challenge for this generation [J]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984.
- [8] 王绍鸿. 海平面标志物识别的一些问题 [J]. 台湾海峡, 1989,8(4): 299-237.
- [9] 余克服, 赵建新. 雷州半岛珊瑚礁生物地貌带与全新世多期相对高海平面[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002,22(2): 27-33.
- [10] Mayer A. Ecology of the Murray Island coral reef [J]. PNAS, 1915,1(4): 211-214.
- [11] 聂宝符. 五千年来南海海平面变化的研究[J]. 第四纪研究, 1996,(1): 80-87.
- [12] Shen C, Siringan F, Lin K, et al. Sea-Level Rise and Coral-Reef Development of Northwestern Luzon Since 9.9 ka [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 292: 465-473.
- [13] Yu K, Chen T. Beach Sediments from Northern South China Sea Suggest High and Oscillating Sea Levels During the Late Holocene [J]. Earth Science Frontiers, 2009,16 (6): 138-145.
- [14] Kershaw S, Guo L, Braga J. A Holocene coral-algal reef at Mavra Litharia, Gulf of Corinth, Greece: Structure, history, and applications in relative sea-level change[J]. Marine Geology, 2005,215: 171-192.
- [15] 杨建明, 郑晓云. 福建沿岸 6000 年来的海平面波动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990,10(4): 67-75.
- [16] Laborel J, Laborel-Deguen F. Biological indicators of Holocene sea-level and climatic variations on rocky coasts of tropical and subtropical regions [J]. Quaternary International, 1996,31: 53-60.
- [17] 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, 1998,17(2): 24-31.
- [18] Hopley D. Beachrock as a sea-level indicator[M]. // Plassche O v d. (Ed.), Sea Level Research: A Manual for Collection and Evaluation of Data, Geo Books, Norwich, 1986, 157-173.
- [19] 刘晓东, 赵俊琳. 南极无冰区古海蚀龛石英颗粒表面结构特征及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002,22(1): 37-42.
- [20] Kershaw S, Guo L. Marine notches in coastal cliffs: indicators of relative sea-level change, Perachora Peninsula, central Greece [J]. Marine Geology, 2001,179 (3-4): 213-228.
- [21] Tjia H. Sea-level changes in the tectonically stable Malay-Thai Peninsula [J]. Quaternary International, 1996,31: 95-101.
- [22] 王兆荣, 马志邦. 高精度热电离质谱定年及其对第四纪环境研究的意义 [J]. 地质地球化学, 1999,27(4): 118-122.
- [23] Gehrels W R. Middle and late Holocene sea-level changes in eastern Maine reconstructed from foraminiferal saltmarsh stratigraphy and AMS ^{14}C dates on basal peat[J]. Quaternary Research, 1999,52(3): 350-359.
- [24] McCabe A, Clark P, Clark J. AMS ^{14}C dating of deglacial events in the Irish Sea Basin and other sectors of the British-Irish ice sheet [J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24(14-15): 1673-1690.
- [25] Schimanski A, Stattegger K. Deglacial and Holocene evolution of the Vietnam shelf: stratigraphy, sediments and sea-level change [J]. Marine Geology, 2005, 214 (4): 365-387.
- [26] 马志邦, 彭子成. 南海全新世珊瑚礁的高精度热电离质谱 (TIMS) 铀系年龄研究 [J]. 科学通报, 1998,43(20): 2225-2229.
- [27] 温孝胜, 彭子成. 南沙群岛永暑礁泻湖岩心的高精度 TIMS 铀系年龄[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001,21(2): 59-61.
- [28] 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 and Planetary Science Letters, 2002,22(1): 37-42.

- 2009, 284(3-4): 269-283.
- [29] 王兆荣, 张兆峰. 热电离质谱轴系法测定珊瑚及对古环境研究[J]. 核技术, 2002, 25(2): 132-136.
- [30] Tanabe S, Tateishi M, Shibata Y. The sea-level record of the last deglacial in the Shinano River incised-valley fill, Echigo Plain, central Japan [J]. Marine Geology, 2009, 266(1-4): 223-231.
- [31] Milne G A, Long A J, Bassett S E. Modelling Holocene relative sea-level observations from the Caribbean and South America[J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24(10-11): 1183-1202.
- [32] Suric M, Juracic M, Horvaticic N, et al. Late Pleistocene-Holocene sea-level rise and the pattern of coastal karst inundation: records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic Coast (Croatia) [J]. Marine Geology, 2005, 214(1-3): 163-175.
- [33] Gehrels W R, Sz Kornik K, Bartholdy J, et al. Late Holocene sea-level changes and isostasy in western Denmark [J]. Quaternary Research, 2006, 66(2): 288-302.
- [34] Pedersen JBT, Svinth S, Bartholdy J. Holocene evolution of a drowned melt-water valley in the Danish Wadden Sea[J]. Quaternary Research, 2009, 72(1): 68-79.
- [35] Camoin G, Montaggioni L, Braithwaite C. Late glacial to post glacial sea levels in the Western Indian Ocean[J]. Marine Geology, 2004, 206(1-4): 119-146.
- [36] Sivan D, Wdowinski S, Lambeck K, et al. Holocene sea-level changes along the Mediterranean coast of Israel, based on archaeological observations and numerical model [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 167(1-2): 101-117.
- [37] Périssoratis C, Conispoliatis N. The impacts of sea-level changes during latest Pleistocene and Holocene times on the morphology of the Ionian and Aegean seas (SE Alpine Europe)[J]. Marine Geology, 2003, 196(3-4): 145-156.
- [38] Morhange C, Laborel J, Hesnard A. Changes of relative sea level during the past 5000 years in the ancient harbor of Marseilles, Southern France [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 166(3-4): 319-329.
- [39] Antonioli F, Kershaw S, Rust D, et al. Holocene sea-level change in Sicily and its implications for tectonic models: new data from the Taormina area, northeast Sicily [J]. Marine Geology, 2003, 196(1-2): 53-71.
- [40] Desruelles S, Fouache é, Ciner A, et al. Beachrocks and sea level changes since Middle Holocene: Comparison between the insular group of Mykonos-Delos-Rhenia (Cyclades, Greece) and the southern coast of Turkey[J]. Global and Planetary Change, 2009, 66(1-2): 19-33.
- [41] Boski T, Moura D, Veiga-Pires C, et al. Postglacial sea-level rise and sedimentary response in the Guadiana Estuary, Portugal/Spain border [J]. Sedimentary geology, 2002, 150(1-2): 103-122.
- [42] Spurgeon D, Davis R A. Formation of 'Beach Rock' at Siesta Key, Florida and its influence on barrier island development[J]. Marine Geology, 2003, 200(1-4): 19-29.
- [43] 杨子庚. 海洋地质学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004.
- [44] Corner G D, Kolka V V, Yevzerov V Y, et al. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia [J]. Global and Planetary Change, 2001, 31(1-4): 155-177.
- [45] Baker R, Haworth R. Smooth or oscillating late Holocene sea-level curve? Evidence from the palaeo-zoology of fixed biological indicators in east Australia and beyond [J]. Marine Geology, 2000, 163(1-4): 367-386.
- [46] Lambeck K. Sea-level change from mid-Holocene to recent time: An Australian example with global implications [J]. Ice sheets, sea level and the dynamic earth, 2002, 29: 33-50.
- [47] Grossman E, Fletcher III C, Richmond B. The Holocene sea-level highstand in the equatorial Pacific: analysis of the insular paleosea-level database[J]. Coral Reefs, 1998, 17(3): 309-327.
- [48] Yu K F, Zhao J X, Done T, et al. Microatoll record for large century-scale sea-level fluctuations in the mid-Holocene [J]. Quaternary Research, 2009, 71(3): 354-360.
- [49] Liew P. Late Holocene (2 ka) sea level, river discharge and climate interrelationship in the Taiwan region[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(4): 499-505.
- [50] Yim WWS, Huang G. Middle Holocene higher sea-level indicators from the south China coast [J]. Marine Geology, 2002, 182(3-4): 225-230.
- [51] 沈明洁, 谢志仁. 中国东部全新世以来海面波动特征探讨[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 886-894.
- [52] Angulo R J, Giannini P C F, Suguio K, et al. Relative sea-level changes in the last 5500 years in southern Brazil (Laguna-Imbituba region, Santa Catarina State) based on vermetid 14C ages [J]. Marine Geology, 1999, 159(1-4): 323-339.
- [53] Ybert J P, Bissa W M, Catharino E L M, et al. Environmental and sea-level variations on the southeastern Brazilian coast during the Late Holocene with comments on pre-

- historic human occupation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003,189(1-2): 11-24.
- [54] Omoto K. Radiocarbon ages of beach rocks and Late Holocene sea-level changes in the southern part of the Nansei Islands, southwest of Japan [J]. *Radiocarbon*, 2001,43(2B): 887-898.
- [55] Hongo C, Kayanne H. Holocene sea-level record from corals: Reliability of paleodepth indicators at Ishigaki Island, Ryukyu Islands, Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010,287(1-4): 143-151.
- [56] Zwart D, Bird M, Stone J, et al. Holocene sea-level change and ice-sheet history in the Vestfold Hills, East Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998,155(1-2): 131-145.
- [57] Hall B L, Baroni C, Denton GH. Holocene relative sea-level history of the Southern Victoria Land Coast, Antarctica[J]. *Global and Planetary Change*, 2004,42(1-4): 241-263.
- [58] Froede CR. Rhizolith evidence in support of a late Holocene sea-level highstand at least 0.5 m higher than present at Key Biscayne, Florida [J]. *Geology*, 2002,30(3): 203.
- [59] Berdin R D, Siringan F P, Maeda Y. Holocene sea-level highstand and its implications for the vertical stability of Panglao Island, southwest Bohol, Philippines[J]. *Quaternary International*, 2004,115: 27-37.
- [60] 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.
- [61] 陈欣树, 陈俊仁. 珠江口外陆架晚第四纪最低海面的发现[J]. *热带海洋*, 1990,9(004): 73-77.
- [62] 方国祥, 李平日. 珠江三角洲 8000 年来海平面变化[J]. *地理研究*, 1991,10(4): 1-11.
- [63] 徐明广, 马道修, 周青伟. 珠江三角洲地区第四纪海平面变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986,6(3): 93-102.
- [64] 李平日, 黄镇国, 张仲英, 等. 广东东部晚更新世以来的海平面变化[J]. *海洋学报*, 1987,9(2): 216-222.
- [65] 李平日, 方国祥. 珠江三角洲全新世环境演变 [J]. *第四纪研究*, 1991,(2): 130-139.
- [66] 方国祥, 李平日, 黄光庆. 闽南, 粤东全新世海平面变化 [J]. *第四纪研究*, 1992,12(3): 233-240.
- [67] 朱永其, 曾成开, 金长茂. 东海大陆架晚更新世以来海面变化[J]. *科学通报*, 1981,26(19): 1195-1198.
- [68] 赵希涛, 耿秀山, 张景文. 中国东部 20 000 年来的海平面变化[J]. *海洋学报 (中文版)*, 1979,1(2): 269-281.
- [69] 张伟强, 黄镇国. 台湾沿岸全新世海平面波动 [J]. *热带地理*, 1996,16(3): 226-235.
- [70] 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,(1): 43-54.
- [71] 丁锡祉. 中国全新世的环境演化[J]. *四川师范大学学报 (自然科学版)*, 1994,17(3): 46-52.
- [72] 陈伟光. 华南沿海全新世海平面变动的几个问题[J]. *台湾海峡*, 1987,6(3): 207-213.
- [73] 张虎男, 赵红梅. 华南沿海晚更新世晚期-全新世海平面变化的初步探讨[J]. *海洋学报*, 1990,12(5): 620-630.
- [74] Eisenhauer A, Wasserburg G, Chen J, 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(4): 529-547.
- [75] 陈伟光, 赵红梅, 常郁, 等. 珠江三角洲晚第四纪垂直构造运动速率[J]. *地震地质*, 2001,23(4): 527-536.

Research Progress in Sea-Level Changes Since the Last Deglaciation

ZHAO Xin-Wen^{1,2}, XIANG Wei², XIAO Shang-Bin², HUANG Chang-Sheng¹, CHEN Shuang-Xi¹

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China;

2. College of Civil and Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: This paper presents an overview of research status in global sea-level changes since the last deglaciation, its changes in Holocene is a key topic. The causes responsible for sea-level variations are given at first, and then the paper describes the impacts caused by sea-level changes, and summarizes the methods for analyzing sea-level variations. Sea-level elevation as well as eustatic sea-level curves reconstructed by different scholars are given, and the problems in the study of sea-level change are briefly summarized.

Key Words: Late Quaternary; Holocene; sea-level changes; relative sea-level.