

全球海平面变化研究新进展

吴涛¹, 康建成^{1,2}, 王芳^{2,1}, 郑琰明^{2,1}
(1. 上海师范大学城市生态与环境研究中心, 上海 200234;
2. 华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631)

摘要 综述了近10年来海平面变化研究的主要成果, 分析了影响海平面变化的主要因素, 探讨了海平面变化研究中存在的一些问题。结果表明: 近10年全球平均海平面上升幅度大约为2.5~3.84 mm/a, 热膨胀是引起海平面上升的主因; 海平面变化具有时空分布差异——西太平洋和东印度洋地区上升最快, 其值高出全球平均值的10倍以上; 大西洋与太平洋30°~40°N地区季节变化最明显; 将海平面季节高值时段与北半球热带气旋出现时间进行对比, 发现每年8~10月份, 在20°~50°N的西北太平洋与北大西洋沿岸地区出现海平面最高值与热带气旋相叠加的全球危险海岸带, 该地带包括中国大陆东部、日本沿海地区、美国东部海岸带、墨西哥湾地区和加勒比海地区。

关键词 海平面变化; 海岸带; 冰川冰盖物质平衡; 沿海城市安全

中图分类号: P73 文献标识码: A

1 前言

海平面上升严重地威胁着人类的生存环境。据联合国环境署统计, 全世界目前大约有近一半的人口(约30亿)居住在距海洋200 km的范围内, 百万以上人口的城市中2/5位于沿海地区^[1]。如果海平面上升1 m, 全球将会有500万 km²的土地被淹没, 会影响世界10多亿人口和1/3的耕地^[2]。2001年, 由于海平面上升, 太平洋岛国图鲁瓦举国移民新西兰, 成为世界上首个因为海平面上升而全民迁移的国家^[3]。海平面上升会导致海岸带侵蚀加剧, 盐水入侵增强, 并影响沿海地区红树林和珊瑚礁生态系统的正常生长^[4]。海平面上升还导致热带气旋频率和强度的增加^[5]。根据中国海洋灾害公报数据统计, 2000—2004年我国受风暴潮影响所造成的直接经济损失就高达483.43亿, 死亡391人^[6], 2005年在我国沿海地区直接登陆的强台风就达8次, 其

引起的风暴潮和特大暴雨对我国沿海地区造成了严重经济损失和人员伤亡; 在大西洋, 袭击美国的卡特里娜飓风几乎淹没了著名的新奥尔良市, 直接经济损失达1500多亿美元^[7]。海洋灾害越来越频繁, 危害程度越来越高, 沿海国家海洋环境安全的研究也越加急迫。而海平面变化研究是沿海城市环境安全的基础, 其研究成果对沿海地区城市基础设施建设和经济发展具有重大意义。本文通过对近10年全球海平面研究成果的综合分析与讨论, 希望能为我国东部沿海地区的海平面变化和城市环境安全研究提供科学依据。

2 海平面变化的研究成果

2.1 验潮站观测及研究成果

验潮站测量法是海平面数据收集的基本方法, 具有较长的历史。目前全球分布有2000多个验潮站^[8], 其数据采集的时间序列从几十年到几百年不

* 收稿日期: 2006-01-09, 修回日期: 2006-05-15。

* 基金项目: 教育部重点科研项目“上海近海海洋水文气候环境变化过程—及对全球气候变暖响应的评估”(编号: 206051); 上海市科委项目“上海区域海洋水文气候、环境的年季变化过程研究”(编号: 042512031); 上海市浦江人才计划“上海海域海洋温盐过程与化学物质传输过程的研究”(编号: 05R14080)资助。

作者简介: 吴涛(1979-), 男, 湖南吉首人, 硕士研究生, 主要从事全球变化与城市安全研究。E-mail: gdwutao@sina.com

等。全球海平面观测系统^[9] (GLOSS)的核心工作网(GCN, 也被称作GLOSS02)就是由分布在全球的290个验潮站组成。这些验潮站对全球海平面变化趋势和上升速率进行监测,并为长期气候变化研究提供帮助,如为国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供数据支持等。许多学者利用验潮站观测数据计算出20世纪海平面升高范围(表1)。由于选取的验潮站数量和时间序列不同,结论差异很大,即使选取相同的时间段和验潮站数量,由于使用不同的模型和计算方法,得出的结果也不一样。

表1 利用验潮站数据对海平面上升的估算^[10]

Table 1 Estimates of global sea level rise from tide gauge records

海平面升高 (mm/a)	误差 (mm/a)	数据时段	潮站 数量	研究者或研究小组
1.43	±0.14	1881—1980	152	Barnett(1984)
2.27	±0.23	1930—1980	152	Barnett(1984)
1.2	±0.3	1880—1982	130	Gornitz & Lebedeff(1987)
2.4	±0.9	1920—1970	40	Peltier & Tushingham(1989)
1.75	±0.13	1900—1979	84	Trupin & Wahr(1990)
1.7	±0.5	N/A	N/A	Nakiboglu & Lambeck(1991)
1.8	±0.1	1880—1980	21	Douglas(1991)
1.62	±0.38	1807—1988	213	Unal & Chiy(1995)

注:N/A表示数据缺失

尽管验潮站数据有时间序列较长的优势,但也有其自身不能克服的弱点:(1)站点分布具有局限性,验潮站只能分布在大陆边缘地区和岛屿附近,缺乏远海的潮高测量数据^[11-13];(2)分布在陆地上或是大陆架附近的站点,会随着局部地区陆地的垂直运动而发生变动,使测量数据受到干扰^[13]。

2.2 卫星高程监测及研究成果

卫星高程监测法是近10年来海平面数据的主要获取方式。精确的海洋卫星高程监测法始于1992年美国发射的TOPEX/POSEIDON(T/P)卫星和2002年发射的JASON卫星。从此卫星监测海平面技术成为研究海平面变化的一个重要的手段和数据来源。T/P以10天为周期沿着某一路径对地表进行监测^[14],在充分考虑数据的等面积的空间分布状态后,全球海平面高程可以通过取平均值的方法计算出来^[15]。卫星测量技术的出现彻底解决了验潮站分布的地域局限,扩大了数据采集的区域,使数据获取的时间序列更加规范和连续,并且能够收集到以前数据极度缺乏的南大洋地区资料。

分析1993—2003年间的卫星数据,得出海平面

的上升幅度为 $2.8 \pm 0.4 \text{ mm/a}$ ^[16-22]。海平面变化具有时空差异,西太平洋和东印度洋的上升幅度超过了全球平均值的10倍。在过去10年间,整个大西洋都有一个明显的上升过程,相反,有些区域海平面却在下降,如东太平洋和西印度洋^[16]。在一年内不同的时间和海区,海平面有着较大的变化,北半球海平面最高值和最低值分别出现在9月和3月,南半球恰恰相反^[22]。季节变化还存在着地域和纬度的差异,其中北太平洋和北大西洋的季节变化幅度最大^[22]。在20°~50°N是全世界季节变化最大的地区,海平面年内变化可达到5~6cm,最大季节差值达12cm^[22]。

2.3 气候模式预报的未来海平面变化

20世纪80年代后期,耦合的全球海洋/大气/海冰/陆地气候模式(全球大气—海洋环流模式AOGCMs)正式建成,其研究成果开始出现在1990年国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)的评估报告中^[23]。耦合的AOGCMs给出了气候系统的一个综合表述,并存在向化学和生物应用的复杂模式演变的趋势。在2001年IPCC第三次综合报告中,选取了11个AOGCMs模式试验小组的研究成果,综合分析得出1990—2090年100年间全球海平面的平均上升速率为0.11~0.77m,其中热膨胀使海平面上升0.09~0.37m,山岳冰川融化使海平面升高0.06~0.15m,格陵兰冰盖使海平面上升0.01~0.03m,南极冰盖使海平面上升-0.07~-0.01m^[24]。

3 影响海平面变化的因素

影响季节及10年际海平面变化的因素主要有海水温度、盐度、陆地水体、地球物理过程等。

3.1 海水温度升高对海平面变化的作用

海水热膨胀是海平面上升的主要影响因素。由于海洋热容量差异可以通过密度差异的积分获得,所以可通过热比容计算出全球由于海水热膨胀而导致的海平面上升的情况^[25]。

$$h_{\text{therm}}(\lambda, \varphi) = \int_{-H}^0 \frac{\rho(\lambda, \varphi, z) - \rho_0(\lambda, \varphi)}{\rho_0(\lambda, \varphi)} dz$$

式中 h 表示由于海水热膨胀海平面上升的高度, H 表示深度, $\rho(\lambda, \varphi)$ 表示海水密度参数,并与温度参数 T_0 、盐度参数 S_0 、深度参数 z 构成线性函数关系, $\rho_0(\lambda, \varphi)$ 是温度和盐度的非线性函数。

Cabanes^[26]发现在1993—1998年由于热膨胀使海平面上升了 $3.1 \pm 0.4 \text{ mm/a}$ 。但是全球的热膨胀变化并不一致,在长的时间尺度和大的空间尺度上

都有很大的差异^[27]。如印度洋自 20 世纪 60 年代就开始升温,而大西洋明显的升温过程却发生在 90 年代以后。这些差异的原因至今仍然无法给出合理解释^[16]。IPCC(2001)根据全球大气—海洋环流模式(AOGCMS)得出热膨胀使海平面上升了大约 0.3 ~ 0.7 mm/a。自 IPCC 的报告后,关于热膨胀的研究又取得了许多新的突破^[27-29]。其中 Antonov^[28]利用海洋历史观测资料^[30]算出海水热膨胀使海平面上升 0.5 ± 0.05 mm/a。Lombard 等^[27]最近利用 Levitus 等^[30]和 Ishii 等^[31]数据相结合分析发现,1990—

1998 年间热膨胀使海平面上升了 2.6 ± 0.4 mm/a,两组数据的热膨胀曲线在 1950—1990 年间值都是十分吻合的,但是在 1990—1998 年之间,计算得出的 Ishii 的数据曲线值要比 Levitus 曲线值偏低,并且证实了 Cabanes 等^[26]所说的全球海平面变化具有区域性的特征。同样海水热膨胀曲线呈现出 10 年变化周期,这一变化周期的真实性一直是讨论的焦点,因为从气候模型无法显示这种周期变化,所以还“不清楚它是否揭示了模型的不足”^[16]。

表 2 热膨胀对海平面的影响——最新研究成果

Table 2 Thermal expansion contribution to sea level raise

海平面上升(mm/a)	误差(mm/a)	资料来源	研究者或研究小组
1.6	±0.3	基于卫星和水文数据(1993—2003)	Willis 等(2004)
2.6	±0.4	基于 Ishii 等 2003 年数据(1993—1998) 但不包括 30°~60°S 地区	Lombard 等(2004)
0.5	±0.05	基于 Levitus 等 2000 年数据	Antonov(2002)
2.4	±0.2	基于卫星数据(1993—1998) 不包括 30°~60°S 地区	T/P 研究小组(2000)

3.2 盐度对海平面变化的影响

大洋盐度变化对局部海域海水密度和海平面变化有着重要的意义,但对全球平均海平面变化的影响却很微弱^[21]。近年来有研究者指出,过去 50 年盐度的变化对海平面上升的影响大约为 0.05 mm/a^[16]。这比热膨胀的影响明显要小得多。由于大洋盐度的变化可以反映注入海洋的淡水量的变化,因此通过模型可以把盐度的变化与注入海洋的淡水进行转化。Antonov^[28]对盐度变化与注入海洋的淡水按比例作了换算,发现海洋淡化过程相当于使海平面上升了 1.35 ± 0.5 mm/a。需要指出的是,海冰和冰山的融化会使盐度降低,但并不会使海平面增高,在计算时要考虑它们的影响,并且它们最近的融化速度在加快^[32]。

3.3 陆地水体对海平面变化的影响

3.3.1 山岳冰川对海平面变化的影响

20 世纪以来由于全球变暖,山岳冰川在后退,尤其是近 10 年后退的速度在加快。最近 Dyurgerov^[33]通过对 260 个冰川的研究推算过去 40 年冰川物质平衡的变化,提出冰川融化对全球海平面的影响是 0.27 mm/a。然而他忽视了阿拉斯加、巴塔哥尼亚和中亚等地区,致使其数据偏小^[16]。1999 年 Arendt^[34]利用激光测量算出阿拉斯加的 67 个冰川的容积和变化,提出从 50 年代中期到 90 年

代中期阿拉斯加的大多数冰川都在融化,其数量相当于使海平面上升 0.14 ± 0.04 mm/a。2002 年 Arendt 对阿拉斯加冰川物质平衡重新做了估算,发现进入 21 世纪阿拉斯加冰川在加速融化,物质净损失量达到了 96 ± 35 km³/a,可使海平面上升 0.27 ± 0.10 mm/a,是格陵兰的 2 倍多^[34,35]。Rignot^[36]对巴塔哥尼亚冰原做了研究,估算出在 1995—2000 年由于该冰原的消融使海平面上升了 0.10 ± 0.01 mm/a。综合 Dyurgerov、Arendt 和 Rignot 的数据可知,山岳冰川目前对海平面的影响值约为 0.66 mm/a。由此可得,山岳冰川虽只占陆地冰川很小的一部分,但其对海平面变化的作用程度仅次于海水的热膨胀^[16]。

3.3.2 极地冰盖对海平面变化的影响

南极冰盖和格陵兰冰盖固结着地球表面大约 99% 的淡水资源,如果全部融化将使全球的海平面上升约 70 m。即使是一小部分融化也会对海平面带来巨大的影响。由于格陵兰岛和南极大陆具有不同的海陆分布状况和地形特征,冰盖的消融特征也不相同:在南极大陆上冰盖的消融主要通过冰架底部融化和冰山的脱离,冰盖表面的融化十分微弱,而格陵兰岛冰盖物质的损失则主要是通过表层融化和冰山崩解^[37-40]。

对格陵兰冰盖研究发现,在 2 km 的高海拔地区

冰盖物质的积累和消融几乎是平衡的,但冰盖的南部、东部地区在变薄,而西部地区在增厚^[38,39]。西部增厚是长期冰川动力活动而不是冰雪积累率的变化造成的^[40],冰盖的整体仍是在消融。最近观测到沿海地区特别是沿冰川出海的通道地区冰层在变薄,其消融体积大约是 $51 \text{ km}^3/\text{a}$,可使海平面升高 $0.13 \text{ mm}/\text{a}$ ^[38-41]。

南极地区地域范围大,纬度高,气候条件恶劣,对其物质平衡的估算十分困难,只能在有限的几个区域进行。高度变化的测量也只在冰盖边缘开展。Rignot等^[42]对33个南极冰川,其中包括了25~30个较大冰川的物质平衡进行了估计,得出在西南极

大陆物质损失大约为 $48 \pm 14 \text{ km}^3/\text{a}$,而在东南极大陆物质净增 $22 \pm 23 \text{ km}^3/\text{a}$,相应使海平面变化 $0.16 \pm 0.05 \text{ mm}/\text{a}$ 和 $0.06 \pm 0.06 \text{ mm}/\text{a}$ 。西南极地区的物质损失主要是由于在阿蒙森海湾的几个扇形冰架底部的融化^[43]。Rignot认为西南极冰盖的融化速度在过去几年加快了,冰架的厚度在变薄。最近的观察指出在过去10年里冰盖物质收支差额导致海平面上升了 $0.3 \pm 0.1 \text{ mm}/\text{a}$ ^[44]。在2005年,Davis等^[45]利用卫星雷达测量,认为在 81.6°S 以北的东南极冰盖每年物质净增 $(45 \pm 7) \times 10^{10} \text{ t}$,相应使海平面下降 $0.12 \pm 0.02 \text{ mm}/\text{a}$ 。

表3 目前冰雪圈融化对海平面的影响
Table 3 Contribution from the Melting of Glaciers and Polar Ice

类型	分布地区	海平面变化 (mm/a)	误差 (mm/a)	备注
山岳 冰川	阿拉斯加	0.27	± 0.1	对阿拉斯加冰川的重新估算 ^[34]
	北半球冰川	0.27	N/A	从260个冰川研究中推算出(40年冰川融化的数据) ^[33]
	巴塔哥尼亚	0.1	± 0.01	对巴塔哥尼亚近30年的研究分析 ^[36]
冰盖	格陵兰	0.13	N/A	冰盖边缘地区物质平衡分析得出
	南极	0.3	± 0.1	南极冰盖物质平衡分析得出
		-0.12	± 0.02	东南极冰盖物质平衡分析 ^[45]

注:N/A表示数据缺失,负值代表使海平面下降,正值表示使海平面上升

3.3.3 人类行为引起的陆地水体变化对海平面变化的影响

人类活动通过改变陆地水体的循环周期和循环路线,对海平面变化产生影响。

1997年Gornitz等^[46]给出了一个计算公式:

$$\text{SLC} = (G + U + \text{CD} + D + \text{WE}) - (\text{RE} + I) \quad [46]$$

SLC表示海平面变化,G表示地下水开采,U表示城市化,CD表示燃烧化石燃料和生物分解,D表示砍伐森林,WE表示湿地排水,RE表示水库蓄水,I表示灌溉。

Gornitz通过计算得出了各个因素的作用值:地下水的开采对海平面的影响大约是 $0.2 \pm 0.1 \text{ mm}/\text{a}$;城市化过程的影响是 $0.34 \pm 0.04 \text{ mm}/\text{a}$;化石燃料燃烧和生物分解导致海平面升高 $0.01 \pm 0.06 \text{ mm}/\text{a}$;森林砍伐使海平面上升大约 $0.09 \text{ mm}/\text{a}$;水库和人造湖中滞留的水体对应的使海平面下降了大约 $1 \pm 0.2 \text{ mm}/\text{a}$;灌溉使海平面下降了 $0.56 \pm 0.1 \text{ mm}/\text{a}$ 。综合人类行为对海平面的影响,范围大约是 $-1.1 \sim 0.4 \text{ mm}/\text{a}$ 之间,其中间值大约是 $-0.35 \text{ mm}/\text{a}$ ^[46]。

3.4 地球物理过程对海平面变化的影响

地球是一个可塑球体,冰期和非冰期的地球形状变化会造成海平面的升降。在过去20年里有关冰后期陆地反弹的模型逐渐被完善^[47-50]。这些模型描述了冰期与间冰期的地球形状变化、冰盖的变化,大洋的几何状况与容积数据。目前陆地回弹对海平面的影响值大约为 $0.3 \text{ mm}/\text{a}$ ^[47-49]。

4 海平面变化研究中存在的问题

目前海平面变化研究中存在的主要问题有:

(1) 山岳冰川对海平面变化的贡献量仍很难完全统计。虽然综合了Dyurgerov、Arendt和Rignot三人的数据得出山岳冰川对目前海平面影响值约为 $0.66 \text{ mm}/\text{a}$,但是由于观测区域有限,这个值可能偏小。

(2) 目前从格陵兰和南极大陆的物质平衡预测模型很难判断南极和格陵兰冰盖对海平面变化的作用大小。而从部分观测地区得出的格陵兰冰盖对海平面 $0.13 \text{ mm}/\text{a}$ 的贡献量明显偏小。南极冰盖对海平面变化的作用意义有多大?目前仍不明确。根

据 David^[45] 的研究成果, Vaughan^[51] 认为由于南极大陆不同地区复杂的物质平衡变化类型, 南极冰川不再是今后海平面变化的一个重大影响因素。但仍有很多专家认为, 从长远作用过程看, 格陵兰冰盖与南极大陆冰盖消融是海平面上升的重要影响因素^[46]。因此, 加强冰盖物质平衡观测研究、确定极地冰盖变化对海平面影响的作用模型是将来海平面变化研究的重要内容。

(3) 大洋中物质的重新分配与组合对局域海平面的影响不容忽视。2004 年 Miller^[29] 提出, 20 世纪海平面变化过程中, 温度和盐度使海平面上升的作用还是比较微弱的, 而海洋本身物质的转移和重新分配是海平面变化的主要影响因素。由于海洋环境复杂多变, 行星风带、洋流、涡流、潮汐系统等因素的变化仍然不能精确地量化, 目前对海洋物质转移对海平面变化贡献的估算还十分困难。

(4) 陆地回弹对海平面变化的作用研究仍待深入。由于地幔是由流态的粘性物质组成, 所以地幔粘性物质的黏度系数与界面深度的确定异常关键^[49]。地幔粘性物质的分层、密度、界面深度等的确定也都存在着疑问^[45-48]。

伴随着世界气候研究计划(WCRP)以及气候与冰冻圈(CIC)^[52] 研究的继续和卫星激光高度计(ICESAT)技术的使用, 势必将在极地冰盖物质平衡与海平面相互作用研究中取得更大的进展。高精度的全球定位系统(GPS)、卫星激光高度计(ICESAT)和卫星重力监测(GRACE)^[54] 等多种空间监测技术全球观测网计划的开展, 可以得到面积范围更广、精度更高的山岳冰川变化数据。同时, 国际地圈与生物圈计划(IGBP)第二阶段研究计划的开展, 将会为海洋物质转移研究提供更多的科学依据。另外, 天文地球动力学国际科学研究计划^[53]。在未来 5~10 年内, 能够初步建立起包含弹性地幔、液态外核和固体内核的地球各圈层非线性相互作用动力学基本方程和相应的动力学边界条件, 将对陆地回弹研究提供支持。

5 海平面变化对北半球沿海地区安全的潜在威胁

世界的大部分国家和地区集中在北半球, 海平面变化对北半球沿海地区的环境安全有很大的影响。由上述综述可得, 北半球大洋西部海区年内海平面高值时段出现在 8~10 月^[21, 55], 而西太平洋热带气旋开始于每年 5 月, 结束于 11 月, 7~9 月为频

发期^[56]。这使北半球年内海平面最高值出现时间与其台风出现时段部分相吻, 尤其是每年 8~9 月份。由此区域特征可以推断, 每年 8~9 月在 20~50°N 的大陆东岸沿海地区, 存在一个海平面变化的高危险区(图 1)。

6 结 论

在分析海平面变化的影响因素和近 10 年来卫星观测资料研究成果的基础上, 可知全球海平面变化具有以下几个特征:

(1) 热膨胀是引起海平面上升的主导因素, 其影响范围大约是 2.6 ± 0.4 mm/a。其次为山岳冰川, 其值为 0.66 mm/a。由于观测范围的限制, 这个值可能偏小。南极与格陵兰冰盖的贡献目前仍然很难精确估算, 其中格陵兰冰盖大约使海平面上升 0.13 mm/a, 南极冰盖对海平面的贡献范围大约在 -0.14~0.4 mm/a 之间。而各种人类行为直接使海平面下降了 0.35 mm/a。综合各种因子可以得出, 近 10 年来海平面变化值大约在 2.5~3.84 mm/a 之间。

(2) 自 20 世纪 90 年代以来, 海平面的上升呈加速趋势, 其中西北太平洋与东印度洋海面的上升幅度最大, 是全球平均水平的 1.0 倍。

(3) 海平面具有明显的季节变化, 每年 9 月北半球海平面达到一年中的最高值, 3 月是其最低值; 而南半球恰恰相反。海平面的季节变化具有明显的地区差异, 总的来说, 北半球的季节变化幅度要高于南半球, 30~40°N 海区要高于其他海区(差值可高达 12 cm); 太平洋与大西洋的季节变化幅度要高于其他大洋。

(4) 北半球年内海平面最高值出现时间与其台风和飓风的出现时段^[55] 相吻合, 特别是在 20~50°N 的大陆东部地区。而这一纬度范围内的太平洋和大西洋沿海地带是城市密集、人口稠密、经济发达的地区。当高海平面再叠加台风、飓风带来的风暴潮时, 对当地沿海城市安全是严峻的威胁, 是世界危险海岸带, 这一地带包括中国东部沿海地区、加勒比海地区、日本沿海地区、美国东海岸带和墨西哥湾地区等。

卫星观测技术和全球定位系统(GPS)的使用为海平面研究提供了更好的技术手段, 伴随着 GRACE 和 ICESAT^[54] 项目的开展, 将得到更多精确的数据, 特别是目前比较缺乏的南大洋的海洋水文数据。ICESAT 卫星的投入使用将能提供更精确的南极和格陵兰大陆冰盖的监测数据, 这将为极地与海平面

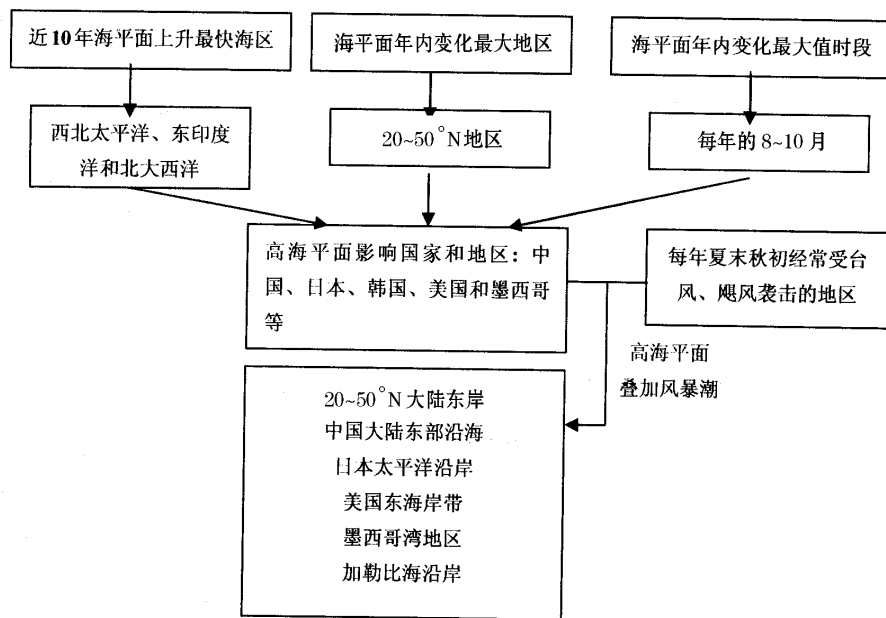


图1 北半球危险海岸带

Fig.1 The northern hemisphere dangerous coastal areas

的长期作用过程研究、极地物质平衡研究提供更有效的数据支持。这些新技术和手段将会给海平面变化研究带来更多的突破。

参考文献(References)：

[1] Assessing impact and vulnerability [EB/OL]. <http://www.unep.org/geo/yearbook/yb2004/07-2.htm>, 2005-12-22.

[2] Wang Ying, ed. China Ocean Geography [M]. Beijing: Science Press, 1996. [王颖主编. 中国海洋地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.]

[3] Liu Zhongmin, Zhang Demin. Ocean domain unconventional safety intimidate and the present international connection influence [J]. Journal of Ocean University of China, 2004, (4): 60-64. [刘中民 张德民. 海洋领域的非传统安全威胁及其对当代国际关系的影响 [J]. 中国海洋大学学报, 2004, (4): 60-64.]

[4] Fan Daidu, Li Congxian. Complexities of Chinese coast in response to climate change [J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(3): 111-114. [范代读, 李从先. 中国沿海响应气候变化的复杂性 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 111-114.]

[5] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment [J]. Science, 2005, 16(309): 844-846.

[6] Chinese Ocean Bureau. Chinese Ocean Disaster Report in 2004 [R]. 2005. [国家海洋局. 中国海洋灾害公报 2004 [R]. 2005.]

[7] Hurricane attack America [EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/>

[z/jfxjmg/index.shtml](http://news.sina.com.cn/z/jfxjmg/index.shtml), 2005-12-22. [飓风卡特里娜袭击美国 [EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/z/jfxjmg/index.shtml>, 2005-12-22.]

[8] Description of pmsl RLR and metric datasets [EB/OL]. <http://www.pol.ac.uk/pmsl/data-info/pmsl.html>, 2005-12-22.

[9] The Global Sea Level Observing System (GLOSS) [EB/OL]. <http://www.pol.ac.uk/pmsl/programmes/gloss.info.html>, 2005-12-22.

[10] Tide gauge estimates of global sea level rise [EB/OL]. <http://sealevel.colorado.edu/tidegauge-es.html>, 2005-12-22.

[11] Chambers D P, Ries J C, Shum C K, et al. On the use of tide gauges to determine altimeter drift [J]. Geophysical Research, 1998, 103(C6): 12 885-12 890.

[12] Douglas B C. Sea level change in the era of the recording tide gauge [C]. Douglas B C, Keamey M S, Leaherman S P. Sea Level Rise, History and Consequences. San Diego, California: Academic, 2001: 37-64.

[13] Cazenave A, Dominh K, Ponchaut F, et al. Sea level changes from TOPEX/Poseidon altimetry and tide gauge, and vertical crustal motions from DORIS [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(14): 2 077-2 080.

[14] Chelton D B, Ries J C, Haines B J, et al. Satellite altimetry [C]. Fu L L, Cazenave A. Satellite Altimetry and Earth Sciences. San Diego Calif: Academic, 2001: 1-131.

[15] Nerem R S, Hendricks B J, Minster J F, et al. Improved determination of global mean sea level variations using TOPEX/POSEIDON altimeter data [J]. Geophysical Research Letters, 1997,

- 24(11) : 331-334.
- [16] Cazenave A, Nerem R S. Present-day sea level change: Observation and causes [J]. *Reviews of Geophysics* 2004, 42 : RG3001 : 1-20.
- [17] Minster J-F, Brossier C, Rogel P. Variation of the mean sea level from TOPEX / POSEIDON data [J]. *Geophysical Research* 1995, 100(C12) : 25 153-25 162.
- [18] Cabanes C, Cazenave A, Provost C L. Sea level change from TOPEX-Poseidon altimetry for 1993-1999 and possible warming of the southern oceans [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(1) : 9-12.
- [19] Cazenave A, Dominik K, Gennero M C, et al. Global mean sea level changes observed by TOPEX-Poseidon and ERS-1 [J]. *Physical Chemical Earth* 1998, 23(9-10) : 1069-1075.
- [20] Ivica Vilibi. Global sea level rise? New techniques for the absolute sea level measurement [J]. *Geofizika* 1997, 14 : 119-131.
- [21] Andrey P, Vladimir P, Robert H B. Sea level rise in the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(11) : 2 237-2 240.
- [22] Chen J L, Wilson C R, Chambers D P, et al. Seasonal global water mass budget and mean sea level variations [J]. *Geophysical Research Letters* 1998, 25(19) : 5553-5558.
- [23] Cubasch U, Meehl G A, Boer G J, et al. Projections of future climate change [C]. Houghton J T, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York : Cambridge University Press, 2001 : 525-582.
- [24] Church J, Gregory J M, Huybrechts P, et al. Changes in sea level [C]. Houghton J T, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York : Cambridge University Press, 2001 : 639-693.
- [25] Gilla E. *Atmosphere-Ocean Dynamics* [M]. San Diego, California : Academic, 1982.
- [26] Cabanes C, Cazenave A, Provost C L. Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations [J]. *Science* 2001, 294 : 840-842.
- [27] Lombardi A, Cazenave A, Traou P Y L, et al. Contribution of thermal expansion to present-day sea-level change revisited [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47 : 1-16.
- [28] Antonov J I, Levitus S, Boyer T P. Steric sea level variations during 1957-1994 : Importance of salinity [J]. *Geophysical Research*, 2002, 107(12) : 8 013.
- [29] Miller L, Douglas B C. Mass and volume contributions to 20th century global sea level rise [J]. *Nature* 2004, 428 : 406-409.
- [30] Levitus S, Stephens C, Antonov J I, et al. Yearly and year-sea-son upper ocean temperature anomaly fields, 1948-1998, NOAA Atlas NESDIS 40, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Md. 2000 [EB/OL]. <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/PDF/ATLAS/nedis40.pdf> 2005-12-22.
- [31] Ishii M, Kimoto M, Kachi M. Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates [J]. *Monthly Weather Review* 2003, 131 : 51-73.
- [32] Jacobs S S, Giulivi C F, Mele P A. Freshening of the Ross Sea during the late 20th century [J]. *Science*, 2002, 297 : 386-389.
- [33] Dyurgerov. Glacier mass balance and regime [R]. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, 2002.
- [34] Arendt A A, Echelmeyer K A, Harrison W D, et al. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level [J]. *Science*, 2002, 297 : 382-386.
- [35] Meier M F, Dyurgerov M. How Alaska affects the world [J]. *Science* 2002, 297 : 350-351.
- [36] Rignot E, Rivera A, Casassa G. Contribution of the Patagonia ice fields of South America to sea level rise [J]. *Science* 2003, 302 : 434-437.
- [37] Abdalati W, Krabill W, Frederick E, et al. Outlet glacier and margin elevation change : Near-coastal thinning of the Greenland ice sheet [J]. *Geophysical Research*, 2001, 106(D24) : 33 729-33 742.
- [38] Davis C H, Kluever C A, Haines B J, et al. Improved elevation change measurement of the southern Greenland ice sheet from satellite radar altimetry [J]. *IEEE Transaction on Geoscience Remote Sensing* 2000, 38(4) : 1 367-1 378.
- [39] Thomas R, Akins T, Csatho B, et al. Mass balance of the Greenland ice sheet at high elevations [J]. *Science*, 2000, 289 : 426-428.
- [40] Zwally H J, Abdalati W, Herring T, et al. Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow [J]. *Science* 2002, 297 : 218-222.
- [41] Krabill W, Abdalati W, Frederick E, et al. Greenland ice sheet : High-elevation balance and peripheral thinning [J]. *Science*, 2000, 289 : 428-430.
- [42] Rignot E, Thomas R. Mass balance of polar ice sheets [J]. *Science* 2002, 297 : 1 502-1 506.
- [43] Gille S T. Warming of the Southern Ocean since the 1950s [J]. *Science*, 2002, 295 : 1 275-1 277.
- [44] Mitrovica J X, Tamisiea M E, Davis J L, et al. Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea level change [J]. *Nature* 2001, 409 : 1 026-1 029.
- [45] Davis C H, Li Y H, McConnell J R, et al. Snowfall-driven growth in east Antarctic ice sheet mitigates recent sea-level rise [J]. *Science* 2005, 308 : 1 898-1 901.
- [46] Gornitz V, Rosenzweig C, Hillel D. Effects of anthropogenic intervention in the land hydrological cycles on global sea level rise [J]. *Global Planet Change* 1997, 14 : 97-116.
- [47] Mitrovica J X, Forte A. A new inference of mantle viscosity based upon joint inversion of convection and glacial isostatic adjustment data [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2004, 225 : 177-189.
- [48] Peltier W R, Jiang X H. Glacial isostatic adjustment and Earth rotation : Refined constraints on the viscosity of the deepest mantle [J]. *Geophysical Research* 1996, 101(B2) : 3 269-3 290.

- [49] Richards M A , Bunge H P , Ricard Y , et al. Polar wandering in mantle convection models [J] . *Geophysical Research Letters* , 1999 , 26(12) : 1 777-1 780 .
- [50] Mitrovica J X , Peltier W R . Pleistocene deglaciation and the global gravity field [J] . *Geophysical Research* , 1989 , 94(B10) : 13 651-13 671 .
- [51] Vaughan D G . How does the Antarctic ice sheet affect sea level rise? [J] . *Science* , 2005 , 308(5 730) : 1 877-1 878 .
- [52] The First Clic International Science Conference [EB / OL] . http://www.cma.gov.cn/netcenter_news/qhbh/20050411_67656.phtml , 2005-12-22 .
- [53] International development trend and foreground analysis [EB / OL] . <http://center.shao.ac.cn/shcar/tzdt.htm> , 2005-12-22 .
- [54] Wahr J , Wingham D , Bentley C . A method of combining ICESAT and GRACE satellite data to constrain Antarctic mass balance [J] . *Geophysical Research* , 2000 , 105(B7) : 16 279-16 294 .
- [55] Cui Shuhong , Xie Zhiren , Zhong Hexiang , et al . The primary researches that T / P sea height data is used for revised ground rise or fall at the tide gauge station [J] . *Advances in Earth Science* , 2005 , 20(6) : 643-648 . [崔树红 , 谢志仁 , 钟鹤翔 , 等 . 利用 T / P 海面高度数据校验验潮站地面升降的初步研究 [J] . *地球科学进展* , 2005 , 20(6) : 643-648 .]
- [56] Liu Jinfang , Hao Peizhang , Yu Mugeng , et al . Feature and varied rule of typhoon storm surge along the coast of south east China sea [J] . *Journal of Ocean Forecasts* , 2002 , 19(1) : 81-88 . [刘金芳 , 赫培章 , 俞慕耕 , 等 . 东南沿海台风风暴潮特点 [J] . *海洋预报* , 2002 , 19(1) : 81-88 .]

The New Progresses on Global Sea Level Change

W U Tao¹ , KANG Jian-cheng^{1 2} , W ANG Fang^{2 1} , ZHENG Yan-ming^{2 1}

(1 . Research Center of Urban Ecology and Environment , Shanghai Normal University , Shanghai 200234 , China ;
2 . College of Geographical Science , South China Normal University , Guangzhou 510631 , China)

Abstract : The research of global sea level change of the last 10 years has been comprehensively reviewed and the main results of it have been obtained : (1) the global sea level rising ratios was around 2.5 mm / a to 3.84 mm / a , and the main contribution is from the thermal expansion of sea water ; (2) there were some space differences for sea level rise , and the value in the West Pacific Ocean and the East Indian Ocean was especially more 10 times higher than the global average ; (3) the seasonal fluctuation of sea level was obvious in areas of the Pacific Ocean and the Atlantic Ocean with north latitude 30-40 degree . When the season of the highest sea level was compared with the term of the typhoon and hurricane occurring annually , it could be found that there were global dangerous seacoasts , which were vulnerable by sea level rise , located in the regions of the Northwest Pacific Ocean and the North Atlantic Ocean with north latitude 20-50 degree during the seasons of Typhoon in August and October . The region includes coast areas as Chinese Mainland East Seacoast , Japanese Seacoast , American East Seacoast , Mexico Bay Seacoast and Caribbean Seacoast .

Key words : Sea level change ; Seacoast ; Mass balance of glacier and polar ice sheets ; Coastal city safety .