



Research
Climate Change—Article

河口三角洲系统海平面上升行为甄别研究——以上海海岸为例

程和琴^{a,*}, 陈吉余^a, 陈祖军^b, 阮仁良^c, 徐贵泉^b, 曾刚^d, 朱建荣^a, 戴志军^a, 陈小勇^e, 顾圣华^f, 张先林^g, 王寒梅^h

^a State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

^b Shanghai Water Planning Design and Research Institute, Shanghai 200232, China

^c Shanghai Water Authority, Shanghai 200050, China

^d School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

^e School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China

^f Shanghai Hydrological Station, Shanghai 200232, China

^g Shanghai Municipal Bureau of Urban Planning and Land Resources, Shanghai 200003, China

^h Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2017

Revised 10 December 2017

Accepted 26 December 2017

Available online 12 February 2018

关键词

海平面上升行为
人为地形变化
局域潮汐基准面
洪水管理
适应性

摘要

气候变化导致海平面上升是河口三角洲城市发展面临的主要威胁，位处长江河口三角洲的特大城市上海面临同样的问题。就气候变化适应性决策者而言，其困难在于海平面上升的原因、幅度和出现时间的不确定性。本文在年代际尺度上就海平面上升原因、幅度的甄别做了尝试。即在分析上海沿岸11个潮位站1921年以来潮位记录及其相邻水域水下地形基础上，发现该地区海平面上升除了众所周知的理论海平面上升、构造沉降和城市地面沉降外，还有三种新的、人为地形改变所致海平面上升行为。其一为围垦和深水航道整治导致的局域海平面上升；其二是流域沉积物源减少引起河槽冲刷导致的局域海平面下降；其三为局域深度基准面抬升。上海沿岸2011—2030年间海平面上升幅度预测值为10~16 cm。这一海平面上升行为的甄别结果为当地决策者制定河口三角洲系统适应气候变化和海平面上升的工程和非工程措施提供科学依据，以期减少日益加剧的洪灾损失。此项工作未来充满挑战。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

平均海平面是河口海岸及三角洲地区一切国计民生工程的最基本设计要素和安全参数[1–5]。自进入21世纪以来，全球变暖加速，海平面上升速度和幅度增加[6–11]。最近气候变化研究发现人类活动将导致气温上升1.5~2℃，海平面2100年将比现在高1.9 m，2300年比现在高4.8 m[12,13]。显然，河口三角洲地区直接遭受海平面上升威胁。因此，制定适应性行动计划和指南是

世界各国政府和科学界的重要议题[3,14–22]，这是因为世界上80%的百万人口以上的大城市都位于河口三角洲地区。而且，这些城市的大部分高程都在平均高潮位以下[3]，易受水患灾害侵袭，造成人民生命和经济巨大损失，并可能引发一系列社会问题，甚至全球供应链遭到中断和破坏，且在亚太、欧洲和大洋洲均有惨痛案例，所以，亟待开展河口海岸城市适应海平面上升措施和技术研究[23–26]。

但是，就政策制定者、海岸带管理和规划人员而言，

* Corresponding author.

E-mail address: hqch@sklec.ecnu.edu.cn (H.Q. Cheng).

制定气候变化和海平面上升适应行动计划和指南的困难在于海平面上升的原因、幅度和出现时间的不确定性,尤其是这些不确定性随着河口海岸系统中大气、海洋和陆地等的复杂性及其随不同时空尺度上的相互作用而增加。而且,由气候变化变化导致的海平面上升与人为地貌改变的叠加放大了这种复杂性和不确定性[24,27-32]。

有鉴于此,本文试图在年代际尺度上,对地处长江河口三角洲的上海沿岸,开展海平面上升行为这一较大不确定性的定量、半定量甄别和预测研究。这一新尝试的基础是长江河口区有14个密集潮位观测站,并有较长时间序列的潮位记录,而且这些潮位站邻近水域有着系统的长时间序列的水深测量记录、地面沉降监测记录和多年现场水文学测量记录(图1)。其中,海平面上升预测幅度的时间采用我国地方社会经济管理系统中常用的水利规划水平年,即2030年。海平面上升行为的甄别研究有助于地方决策者为减少日益加剧的洪灾损失制定必要的工程和非工程措施规划。

2. 上海沿岸海平面上升原因

上海市是地处长江河口的特大型城市,也是我国的经济、金融、贸易、航运中心,人口为2400万,有211 km的大陆岸线和577 km的岛屿岸线(图1)[33]。绝大部分地面高程在平均高潮位3.25 m(吴淞基准以上,下同)以下,最低高程在2.2 m[34]。另外,上海市70%

以上的淡水取自长江河口心滩水库[35]。因此,上海市极易遭受海平面上升引起的洪涝和淡水资源短缺风险[36-42],9711号台风、2005年麦莎台风和2016年尼伯特台风暴潮期间就曾发生了较为严重的洪涝灾害[23],这些事件证明开展海平面上升原因甄别研究的紧迫性。

事实上,海平面上升原因的甄别是一个较为困难的课题,需要开展跨学科的合作研究。政府间气候变化委员会(IPCC)的第一至第五次报告和中国应对气候变化的政策与行动年度报告,都将海平面上升归因于气候变暖、构造沉降和人工开采地下水导致的城市地面沉降[3-4]。

上海海岸海平面上升幅度的第一次预测值完成于1996年,其预测基准年为1991年,预测目标年为2010年、2030年、2050年,海平面上升幅度分别为10~25 cm、20~40 cm、50~70 cm[43]。该海平面上升预测值由三部分组成。首先是理论海平面上升值,其直接采用IPCC第一次评估报告中的 $2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ [44]。其次是全球尺度上的构造沉降幅度,采用中国科学院上海天文台的甚长基线干涉仪(VLBI)1988—1994年间国际联测数据分析结果 $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。再次是吴淞潮位站所在区域的地面沉降预测值 $6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ [43,45]。这一海平面上升预测值为上海市重大工程建设、城市规划与建设提供了重要依据[43,45]。

但是,吴淞潮位站1991—2010年间实测平均海平面上升5.2 cm[5,45],其远小于1996年的实测值[43]。因此,

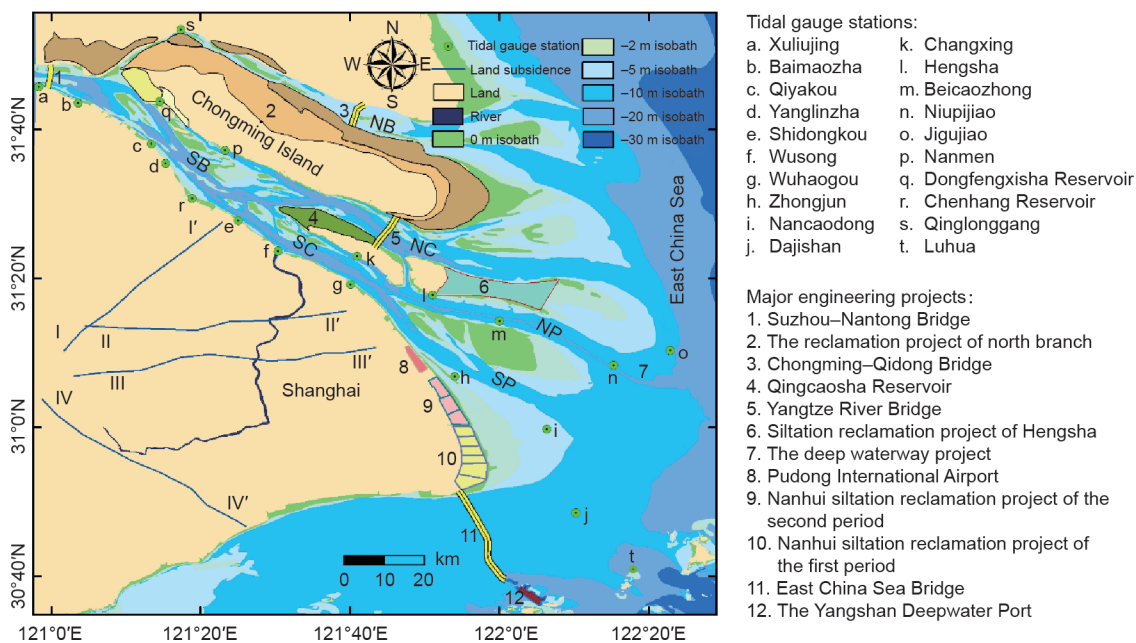


图1. 长江河口和杭州湾北岸潮位站、地面沉降分析剖面、主要工程分布图。

对于决策者和大众而言,有必要开展海平面上升原因的甄别研究。本文旨在阐明实测海平面上升值与1996年预测值之间存在显著差异的原因。第一个原因是气候变暖导致的理论海平面上升变化不大;第二个原因与大西洋两岸大陆边缘垂向运动幅度[46]相似,即上海地区岩石圈板块运动与地幔流导致的构造沉降变化也不大;第三个原因是城市地面沉降减小;第四个原因是由围垦与深水航道整治导致的局域相对海平面上升;第五个原因是流域大坝建设引起沉积物源减少导致河槽冲刷、局域相对海平面下降。最后两种海面变化原因前人从未讨论。下面将阐述上述海平面上升的主要原因及其2011—2030年间的幅度预测值。

3. 理论海平面上升

由于吴淞潮位站有着最长的1912—2000年间潮位记录,因此将其作为上海地区2030年海平面上升预测基准站。年均海平面和理论海平面上升采用吴淞潮位站吴淞基面的时均潮位记录计算(图1)。这些潮位数据都已经过当地地面沉降订正,并校准至吴淞基面。

吴淞潮位站海平面上升幅度的计算有两种方法:一是本文第一作者与学生提出的灰色线性回归与小波分析相结合[47,48];二是传统的最小二乘法与小波分析的结合[46];两者的确定性系数均需开展 F 显著性检验[45,48,49]。

年均海平面小波分析结果显示有六个周期:19年、10.8年、7.6年、5.2年、2.6年和1年(见文献[49]中的图2),这六个周期均通过了置信度为0.05的 F 显著性检验。这些周期分别与交点分潮(18.6年)、黄白交点运动(9.3年)和太阳黑子(11年)联合作用、厄尔尼诺和南方涛动(2~7年)、年际变化(31.1~42.2 cm)[50]等周期相关联。

将上述六种周期应用于吴淞潮位1921—2000年间年均海平面上升中理论海平面上升幅度的两种计算方法,分别获得3.6 cm和4.4 cm。这两种方法计算结果差别较小,表明预测结果不会因原始序列中含有确定性周期而遭受大的歪曲。而且,用最小二乘法建立的预测模型做

10年外推,获得2001—2010年海平面上升值为3.1 cm,该值略大于实测值2.6 cm[49]。这也预示最小二乘法高估了理论海平面上升值。因此,取两个预测方案的平均值4 cm作为上海沿岸2011—2030年海平面预测值的推荐方案(表1)[34]。

这一海平面上升趋势显然蕴含着气候变暖趋势,但其与2006年以来在巴伦支海观测到的变冷趋势[51]和中全新世斯堪的纳维亚曾出现过的大幅增温事件[52]不同。上海沿岸2011—2030年间 $2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的理论海平面上升幅度与20世纪90年代的评估值[35,53]和IPCC第一次评估报告值相近[54],略高于长期全球平均海平面上升值 $1.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (1901—2010年)[3],远低于短期全球平均海平面上升值 $3.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (1993—2010年)和潮位站与卫星测高数据综合观测值 $2.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ [55],略大于验潮站数据的简单加权平均估算的理论海平面上升值 $1.0 \sim 1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ [48,56]或由Topex/Poseidon卫星1993—1999年间测高数据计算的全球平均理论海平面上升速率 $(2 \pm 0.2) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ [55];但小于由全球变暖引起海水热膨胀理论计算的全球理论海平面上升速率 $(2.6 \pm 0.4) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (1950—1998年)和 $(3.2 \pm 0.2) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (1993—1998年)[57,58]。因此,与20世纪80年代和90年代国内研究结果[59—61]相比,本文2030年ESL上升值预测值偏低。其原因可能与短周期海平面振荡有关,即可能隐含了较为复杂的区域性气候变化因子和人为地形改变导致海平面变化因子的复合效应。

4. 城市地面沉降

上海市早于1932年就开始注意到地面标高的损失,亦即城市地面沉降或海平面上升,并展开监测。1956年上海市政工程局针对上海市区地面沉降、潮水经常上岸,提出“围起来,打出去”的防汛排水原则[62]。上海自1921年以来中心城区平均地面沉降已超过2 m(图2);最大累积沉降量为3 m。2004年以来,上海市政府采取加大地表水源建设速度、减少地下水开采、增加地下水回灌量,已将城市地面沉降速度控制在 $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下(图2)[62]。这一显著减少归功于上海市20世纪60年

表1 本研究与1996年预测值[34]

| Source | Prediction year | TS | ULS | ESLR | RSLR | RSLF | Total SLR |
|---------------|-----------------|------------------------------------|---|-------|---------|---------|-----------|
| Ref.[34] | 2010 | $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ | 12 cm | 5 cm | — | — | 19 cm |
| | 2030 | | 20 cm | 11 cm | | | 35 cm |
| Current study | 2030 | $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ | $3 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ | 4 cm | 8—10 cm | 2—10 cm | 10—16 cm |

代以来实行严格的地下水开采的地方立法和日渐增强的控制措施[62]。

地面沉降幅度和趋势分析采用上海市境内由西向东、由北向南4个断面(图1中I, II, III, IV)上18个分层标2000—2009年间累积地面沉降的变化幅度(参见文献[5]表1), 建立趋势面模型[47]。根据高斯-马尔科夫定理, 利用最小二乘法, 进行多项式系数的最佳线性无偏估计, 使残差平方和最小, 并进行趋势面模型的适度检

验[48]。根据以软黏土为主体的上海地面沉降泊松旋回模型, 预测2011—2030年吴淞潮位站地面沉降8 cm, 即 $4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ [47](表1)。

5. 局域海平面上升

长兴、横沙、北槽中、南槽东和中浚等五个潮位站1996—2011年间年均海平面变化(图3)显示

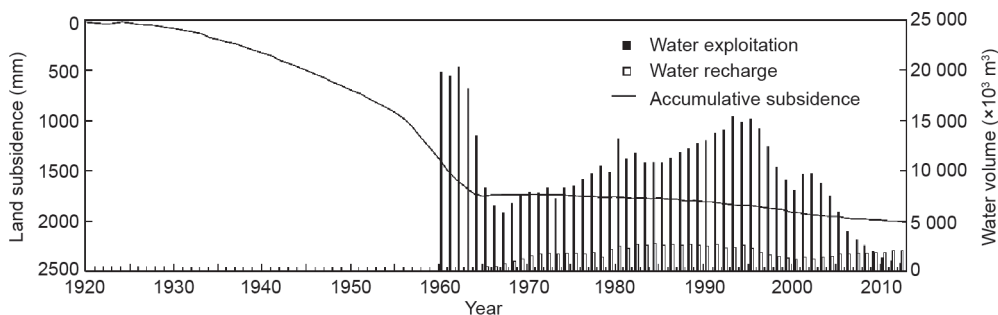


图2. 上海市1921—2013年累积沉降量、地下水开采和人工回灌量。

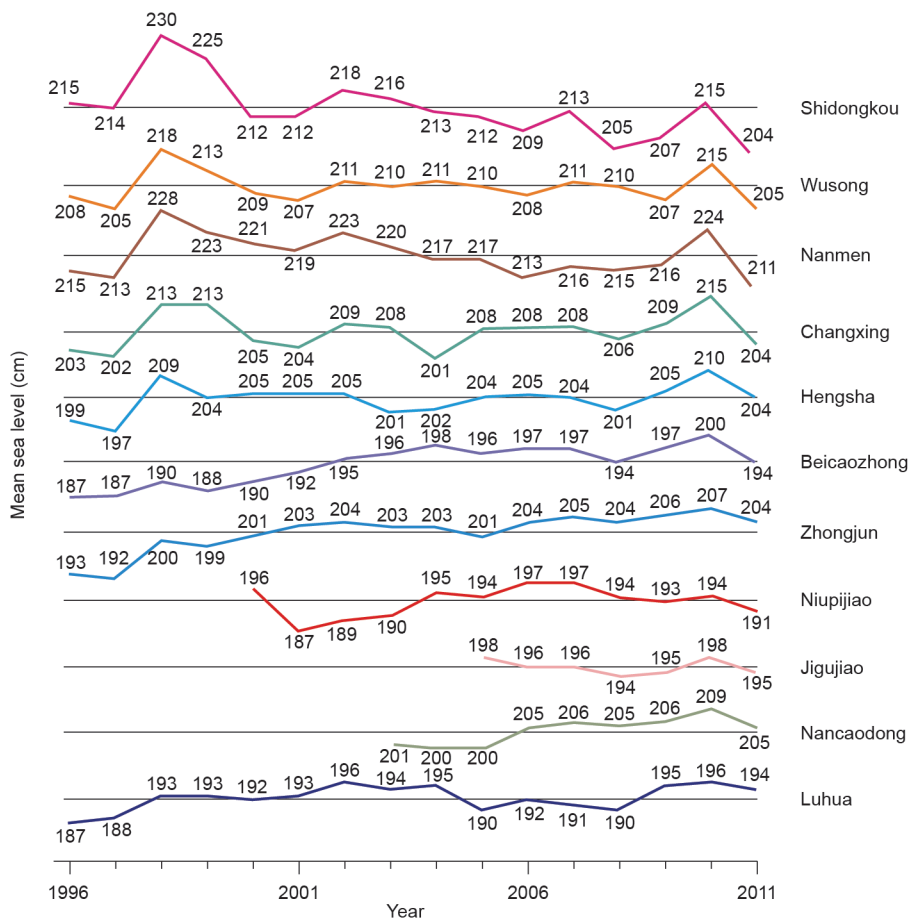


图3. 长江河口石洞口、吴淞、南门、长兴、横沙、北槽中、中浚、牛皮礁、鸡骨礁、南槽东和绿华等11个潮位站1996—2011年间年均海平面变化。

8~10 cm的海平面上升。同时, 1993—2011年间最低潮位上升了33~42 cm (图4)。因此, 这一局域海平面上升归因于1998—2011年间长江河口北槽深水航道整治及其配套横沙东滩吹填造陆工程导致的雍水(图5)[62], 其为长江河口北支青龙港潮位站涨潮潮差大于4 m的出现频率与北支两岸1956—2000年间围垦面积的正相关关系[图6(a)、(b)]以及平均高潮位抬升所佐证[图6(c)]。

为此, 大面积围垦对海平面上升有重要贡献。1996—2010年间一系列河口工程导致上海沿岸局域海平面上升幅度为8~10 cm。若长江河口北港、北槽、南槽两岸仍持续大面积围垦, 则该区域局域海平面上升幅度势必持续至2030(表1)。

6. 局域海平面下降

长江口南支石洞口、南门和吴淞三个潮位站1996—2011年间年均海平面有2~10 cm的下降(图3), 其出现于2003年三峡大坝截流之后、河槽冲刷加剧之时[63—65]。2003—2011年间的海平面下降幅度, 吴淞潮位站为2~10 cm, 吴淞潮位站上游的石洞口潮位站最大达10 cm, 且其相邻河槽冲刷更强(见文献[66]图3)。这种局域海平面下降幅度与南支2002—2009年间河槽冲刷幅度2~10 cm[63,65]一致, 但小于1991—2010年间吴淞潮位站年均海平面上升幅度5.2 cm(详见第2部分)。造成这种差异的原因是南支河槽1990—2001年间经历了16~18 cm的淤积至2~10 cm的冲刷[65], 因此, 河槽冲

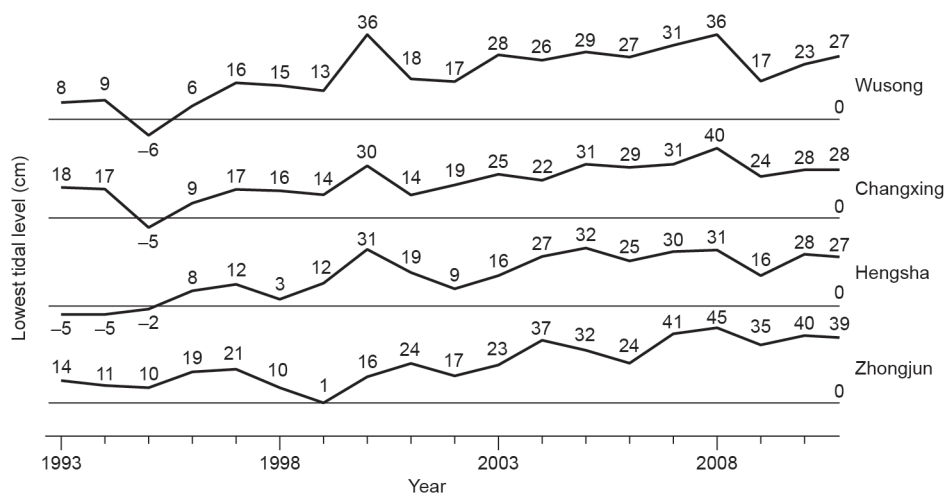


图4. 长江河口南支吴淞、长兴、横沙、中浚潮位站1993—2011年间年均最低潮位变化。

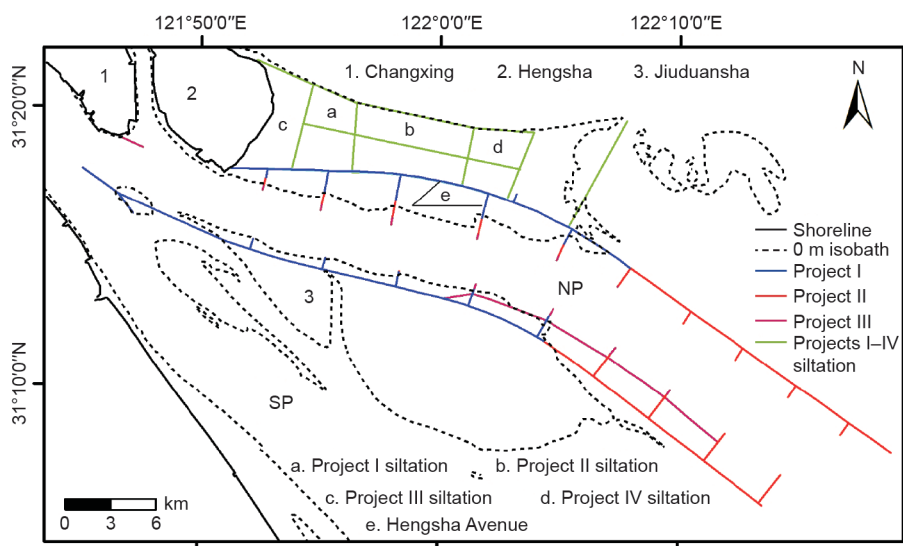


图5. 长江河口北槽深水航道整治工程I期(1998年1月至2002年4月)、II期(2002年9月至2005年11月)、III期(2006年9月至2011年5月)和IV期(2008年3月至2009年6月)围垦面积、导堤和丁坝分布。

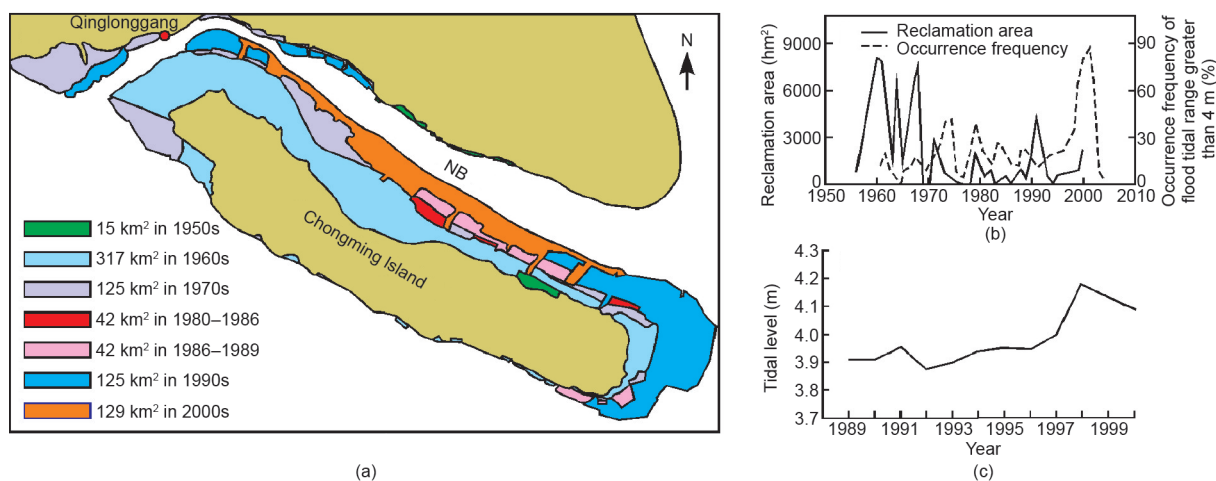


图6. (a) 长江河口北支两岸1950s~2000s围垦面积 (hm²); (b) 1960—2005年间青龙港潮位站涨潮潮差大于4 m的出现频率 (%); (c) 1989—2000年间青龙港潮位站平均高潮位变化。

刷对长江河口局域海平面下降有着显著贡献。

但是, 由于河槽冲淤过程与平均海平面之间的反馈机制非常复杂[66–72], 因此对局域海平面下降的评估较为困难, 目前仍在研究中。而且, 潮位与河槽冲淤过程、由三峡大坝和水土保持及人工采砂导致的流域来沙减少(从1950—1985年间的 $4.5 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 减少至2003—2016年的 $1.5 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)三者之间的反馈机制更为复杂, 故迄今极少见到长江河口局域海平面下降的评估报道[73]。甚而, 2014年10月29日利用浅地层剖面仪EdgeTech 3100对北港上段主槽的探测, 2015年8月利用SeaBat 7125多波束测深系统对南支主槽的探测, 均发现有着较为强烈的河槽冲刷[图7 (a)、(b)]。为此, 本文采用南支2003—2011年间局域海平面下降的半定量范围2~10 cm作为2011—2030年间上海沿岸局域海平面下降值(表1)。

7. 海平面上升预测值

上海沿岸2011—2030年间海平面上升预测值为上述理论海平面上升、构造沉降、城市地面沉降、局域

海平面上升、局域海平面下降等五种海平面上升幅度之和, 介于10~16 cm之间, 由理论海平面上升4 cm、构造沉降2 cm、城市地面沉降8 cm、局域海平面上升8~10 cm和局域海平面下降2~10 cm(表1)累加而成。尽管这是一个粗略的估计值, 但我们的预测值已经对不确定的海平面上升值, 尤其是由人为地形改变导致的海平面上升值这一难题进行了尝试性的定量、半定量估算[69–74]。

8. 地区深度基准抬升

利用平均潮位19年间隔计算上海沿岸深度基准(理论最低潮面)和大地测量基准的变化, 并定期进行检验和订正, 具体针对徐六泾、白茆闸、七丫口、杨林闸、石洞口、吴淞、长兴、五号沟、横沙、中浚、北槽中、南槽东、牛皮礁、大戢山等14个潮位站1974—2013年间年均海平面数据, 采用弗拉基米尔算法, 计算Sa、Ssa、M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、M4、Ms4和M6等13个主要分潮。计算结果表明, 近40年来, 深度基准显著抬升了15~43 cm(图8)。这与相同潮位站

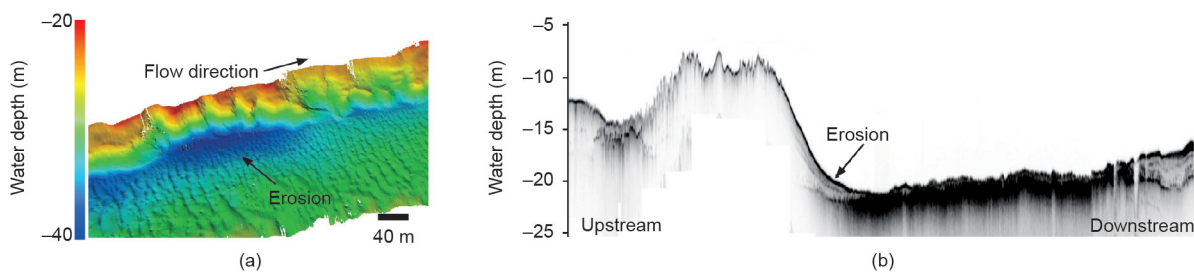


图7. (a) 2015年8月8日由多波束系统Reson SeaBat 7125在长江潮区界河槽探测到的床面冲刷; (b) 2014年10月29日青草沙水库竣工5年后由浅地层剖面仪探测到的北港河槽床面冲刷。

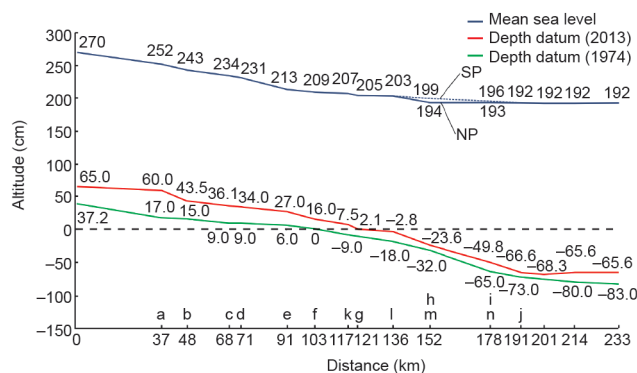


图8. 长江口徐六泾(a)、白茆闸(b)、七丫口(c)、杨林闸(d)、石洞口(e)、吴淞(f)、长兴(k)、五号沟(g)、横沙(l)、中浚(h)、北槽中(m)、南槽东(i)、牛皮礁(n)、大戙山(j)等14个潮位站1974—2013年潮汐基准面变化。

同期海平面上升的变化范围(图3)一致,其可能由同期的长江河口人为地形改变所致。这一深度基准抬升的事实不仅较好地说明了近年来该地区涝灾日益加剧的原因,而且也标示了尽快开展地区高程基准与海平面上升预测值适应性匹配研究的紧迫性[1,22]。

9. 结论

虽然河口三角洲系统海平面上升幅度和出现时间具有很大大不确定性,但本研究还是对上海沿岸开展了近60年来六种海平面上升行为的甄别研究。这种异乎寻常的尝试是因为上海海岸带位于长江河口地区,有着较为密集多个潮位站长期潮位观测数据和城市地面观测数据以及水下地形测量数据基础。尤其是关于局域海平面的上升和下降以及地区深度基准抬升等三种新的海平面上升行为的认识,可为决策者、海岸规划和流域管理人员制定流域系统洪灾风险管控的非工程措施提供重要的科学依据。

致谢

本研究获得中国国家自然科学基金委员会(NSFC)-荷兰科学研究机构(NWO)-英国科学与工程研究委员会(RCUK)(51761135023)、上海科学技术委员会(10DZ1210600)、国家海洋公益性行业科研专项经费(201005019-09)、国家自然科学基金(41476075)、中国地质调查局(DD20160246)的资助。我们要特别感谢第二作者,已故中国工程院院士、我国河口海岸学奠基者和创始人陈吉余教授曾给予的众多指导和建议。

Compliance with ethics guidelines

H. Q. Cheng, J. Y. Chen, Z. J. Chen, R. L. Ruan, G. Q. Xu, G. Zeng, J. R. Zhu, Z. J. Dai, X. Y. Chen, S. H. Gu, X. L. Zhang, and H. M. Wang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Flick RE, Knuuti K, Gill SK. Matching mean sea level rise projections to local elevation datums. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 2013;139(2):142–6.
- [2] Houston JR. Methodology for combining coastal design-flood levels and sea-level rise projections. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 2013;139(5):341–5.
- [3] Pachauri RK. The IPCC Fifth Assessment Report and its implications for human health and urban areas. In: Marolla C, editor *Climate health risks in megacities: Sustainable management and strategic planning*. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 7–12.
- [4] Wu S, Luo Y, Wang H, Gao J, Li C. Climate change impacts and adaptation in China: Current situation and future prospect. *Chin Sci Bull* 2016;61(10):1042–54. Chinese.
- [5] Cheng H, Chen Z, Ruan R, Xu G, Zeng G, Zhu J, et al. Sea level change and city safety—The Shanghai as an example. *Quat Sci* 2015;35(2):363–73. Chinese.
- [6] Hay CC, Morrow E, Kopp RE, Mitrovica JX. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature* 2015;517(7535):481–4.
- [7] Haigh ID, Wahl T, Rohling EJ, Price RM, Pattiaratchi CB, Calafat FM, et al. Timescales for detecting a significant acceleration in sea level rise. *Nat Commun* 2014;5:3635.
- [8] Rye CD, Garabato ACN, Holland PR, Meredith MP, Nurser AJG, Hughes CW, et al. Rapid sea-level rise along the antarctic margins in response to increased glacial discharge. *Nat Geosci* 2014;7(10):732–5.
- [9] Wahl T, Calafat FM, Luther ME. Rapid changes in the seasonal sea level cycle along the US gulf coast from the late 20th century. *Geophys Res Lett* 2014;41(2):491–8.
- [10] Meehl GA, Washington WM, Collins WD, Arblaster JM, Hu A, Buja LE, et al. How much more global warming and sea level rise? *Science* 2005;307(5716):1769–72.
- [11] Church JA, White NJ. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys Res Lett* 2006;33(1):L01602.
- [12] Levermann A, Clark PU, Marzeion B, Milne GA, Pollard D, Radic V, et al. The multimillennial sea-level commitment of global warming. *Proc Natl Acad Sci USA* 2013;110(34):13745–50.
- [13] Shaffer M, Hare W, Rahmstorf S, Vermeer M. Long-term sea-level rise implied by 1.5 C and 2 C warming levels. *Nat Clim Change* 2012;2(12):867–70.
- [14] Nicholls RJ, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* 2010;328(5985):1517–20.
- [15] Roos PC, Velema JJ, Hulscher SJMH, Stolk A. An idealized model of tidal dynamics in the North Sea: Resonance properties and response to large-scale changes. *Ocean Dynam* 2011;61(12):2019–35.
- [16] Woodruff JD, Irish JL, Camargo SJ. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature* 2013;504(7478):44–52.
- [17] Syvitski JPM, Kettner AJ, Overeem I, Hutton EWH, Hannon MT, Brakenridge GR, et al. Sinking deltas due to human activities. *Nat Geosci* 2009;2(10):681–6.
- [18] Smajgl A, Toan TQ, Nhan DK, Ward J, Trung NH, Tri LQ, et al. Responding to rising sea levels in the Mekong Delta. *Nat Clim Change* 2015;5(2):167–74.
- [19] Kabat P, Fresco LO, Stive MJF, Veerman CP, van Alphen JSLJ, Parmet BWAH, et al. Dutch coasts in transition. *Nat Geosci* 2009;2(7):450–2.
- [20] Katsman CA, Sterl A, Beersma JJ, van den Brink HW, Church JA, Hazeleger W, et al. Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta—The Netherlands as an example. *Clim Change* 2011;109(3–4):617–45.
- [21] Klijn F, Kreibich H, de Moel H, Penning-Rowsell E. Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualization. *Mitig Adapt Strat G* 2015;20(6):845–64.
- [22] Cheng HQ, Chen JY. Adapting cities to sea level rise: A perspective from Chinese deltas. *Adv Clim Chang Res* 2017;8(2):130–6.
- [23] Xia J, Zhang Y, Xiong L, He S, Wang L, Yu Z. Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China. *Sci China: Earth Sci* 2017;60(4):652–8.
- [24] Stevens HR, Kiem AS. Developing hazard lines in response to coastal flooding and sea level change. *Urban Policy Res* 2014;32(3):341–60.
- [25] McInnes KL, White CJ, Haigh ID, Hemer MA, Hoeke RK, Holbrook NJ, et al. Natural hazards in Australia: Sea level and coastal extremes. *Clim Change* 2016;139(1):69–83.
- [26] Johnson F, White CJ, van Dijk A, Ekstrom M, Evans JP, Jakob D, et al. Natural hazards in Australia: Floods. *Clim Change* 2016;139(1):21–35.
- [27] Leonard M, Westra S, Phatak A, Lambert M, van den Hurk B, McInnes K, et al.

- A compound event framework for understanding extreme impacts. *Wires Clim Change* 2014;5(1):113–28.
- [28] Slangen ABA, Church JA, Zhang X, Monselesan D. Detection and attribution of global mean thermosteric sea level change. *Geophys Res Lett* 2014;41(16):5951–9.
- [29] Slangen ABA, Church JA, Agosta C, Fettweis X, Marzeion B, Richter K. Anthropogenic forcing dominates global mean sea-level rise since 1970. *Nat Clim Change* 2016;6(7):701–5.
- [30] Hamlington BD, Strassburg MW, Leben RR, Han W, Nerem RS, Kim KY. Uncovering an anthropogenic sea-level rise signal in the Pacific Ocean. *Nat Clim Change* 2014;4(9):782–5.
- [31] Jevrejeva S, Grinsted A, Moore JC. Anthropogenic forcing dominates sea level rise since 1850. *Geophys Res Lett* 2009;36(20):L20707.
- [32] Bentley SJ, Blum MD, Maloney J, Pond L, Paulsell R. The Mississippi River source-to-sink system: Perspectives on tectonic, climatic, and anthropogenic influences, Miocene to Anthropocene. *Earth Sci Rev* 2016;153:139–74.
- [33] Shanghai Municipal Statistics Bureau. Statistical bulletin of the national economic and social development in Shanghai for 2015. *Zhejiang Stat* 2016;3:19–28. Chinese.
- [34] Shanghai Urban Planning and Land Resources Bureau. Shanghai geological environmental bulletin 2015. Shanghai: Shanghai Urban Planning and Land Resources Bureau; 2016. Chinese.
- [35] Shanghai 2012 water resource bulletin [Internet]. Shanghai: Shanghai Water Authority; [cited 2015 Sep 20]. Available from: <http://bmxx.shanghaiwater.gov.cn/BMXX/default.htm>. Chinese.
- [36] Gong Z, Zhang CK, Wan LM, Zuo JC. Tidal level response to sea-level rise in the Yangtze Estuary. *China Ocean Eng* 2012;26(1):109–22.
- [37] Hu T, Gu J, Wang XL, Ma DQ, Yang JZ, Wang Y. Numerical analysis of the influence of sea level rise on flood and tidal stage in the Yangtze River estuary. *Adv Mater Res* 2013;807–809:1608–11.
- [38] Wang J, Liu Y, Ye M, Xu S. Potential impact of sea level rise on the tidal wetlands of the Yangtze River estuary, China. *Disaster Adv* 2012;5(4):1076–81.
- [39] Chen WB, Liu WC, Hsu MH. Modeling assessment of a saltwater intrusion and a transport time scale response to sea-level rise in a tidal estuary. *Environ Fluid Mech* 2015;15(3):491–514.
- [40] Xi X, Wang L, Tang Y, Fu X, Le Y. Response of soil microbial respiration of tidal wetlands in the Yangtze River estuary to increasing temperature and sea level: A simulative study. *Ecol Eng* 2012;49:104–11.
- [41] Zhou X, Zheng J, Doong DJ, Demirbilek Z. Sea level rise along the East Asia and Chinese coasts and its role on the morphodynamic response of the Yangtze River estuary. *Ocean Eng* 2013;71(10):40–50.
- [42] Wang H, Ge Z, Yuan L, Zhang L. Evaluation of the combined threat from sea-level rise and sedimentation reduction to the coastal wetlands in the Yangtze estuary, China. *Ecol Eng* 2014;71346–54.
- [43] Shanghai City Water Conservancy Bureau. Sea level rise in Shanghai influence and countermeasure research series report. Shanghai: Shanghai City Water Conservancy Bureau; 1996. Chinese.
- [44] Goodwin J. The authority of the IPCC First Assessment Report and the manufacture of consensus. In: *Proceedings of the National Communication Association Conference*; 2009 Nov 12–15; Chicago, IL, USA; 2009.
- [45] Cheng H, Chen J. Study on the influence of sea level rise on Yangtze River estuary. Beijing: Science Press; 2016. Chinese.
- [46] Yang Z, Shu F. Monitoring radial tectonic motions of continental borders around the Atlantic Ocean and regional sea level changes by space geodetic observations. In: Chuvieco E, Li J, Yang X, editors *Advances in earth observation of global change*. Dordrecht: Springer; 2010. p. 145–57.
- [47] Qin Z, Li Y. Study on the law of Shanghai sea level changes and its long-term prediction method. *Acta Oceanol Sin* 1997;19(1):1–7. Chinese.
- [48] Wang D, Cheng H, Zhang X, Ruan R. Impact of multifactors and prediction technique of relative sea level in Shanghai. *Shanghai Land Resour* 2011;32(3):35–40. Chinese.
- [49] Cheng H, Wang D, Chen J. Study and prediction of the relative sea level rise in 2030 in Shanghai area. *Adv Climat Chang Res* 2015;11(4):231–8. Chinese.
- [50] Hou C, Zhu J. Study on the quantitative relationship of the location of the tidal current limit and the river discharge in the Changjiang estuary. *J East China Norm Univ (Nat Sci)* 2013;28(5):18–26. Chinese.
- [51] Solheim JE. Climate change: The variation of the ice-edge in the Barents Sea—Related to the moon, sun and planets [presentation]. In: *The 4th World Conference on Climate Change*; 2017 Oct 19–21; Rome, Italy; 2017.
- [52] Mörrner NA. Climate change: Evidence of Holocene high-amplitude events [presentation]. In: *The 4th World Conference on Climate Change*; 2017 Oct 19–21; Rome, Italy; 2017.
- [53] Chen X. Sea-level changes from 1922 to 1987 in the Yangtze estuary and its significance. *Acta Geogr Sin* 1990;45(4):387–98. Chinese.
- [54] Gornitz V. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 1991;89(4):379–98.
- [55] Dong X, Huang C. Monitoring global mean sea level variation with TOPEX/Poseidon altimetry. *Acta Geod Cartogr Sin* 2000;29(3):266–72. Chinese.
- [56] Church JA, White NJ, Konikow LF, Domingues CM, Graham Cogley J, Rignot E, et al. Correction to “Revisiting the Earth’s sea-level and energy budgets from 1961 to 2008”. *Geophys Res Lett* 2013;40(15):4066.
- [57] Cabanes C, Cazenave A, Le Provost C. Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. *Science* 2001;294(5543):840–2.
- [58] Ishii M, Kimoto M, Kachi M. Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates. *Mon Weather Rev* 2003;131(1):51–73.
- [59] Ren M. Relative sea level rise in Huanghe, Changjiang and Zhujiang (Yellow, Yangtze and Pearl River) delta over the last 30 years and prediction for the next 40 years (2030). *Acta Geogr Sin* 1993;60(5):385–93. Chinese.
- [60] Shi Y, Zhu J, Xie Z, Ji Z, Jiang Z, Yang G. Impact prediction and prevention countermeasures of sea level rise in the Changjiang (Yangtze River) delta and adjacent area. *Sci China (Ser D)* 2000;30(3):225–32. Chinese.
- [61] Wu Q, Zheng X, Ying Y, Hou Y, Xie X. Relative sea level rise in coastal areas of China in 21st century and its prediction and prevention countermeasures. *Sci China (Ser D)* 2002;32(9):760–6. Chinese.
- [62] Wang H, Jiao X. Control strategy of land subsidence in Shanghai under sealevel rise. *Adv Clim Chang Res* 2015;11(4):256–62. Chinese.
- [63] Fu G. Recent change of tidal characteristics in the Yangtze estuary. *Port Waterw Eng* 2013;11:61–9. Chinese.
- [64] Xu H. Channel in the Yangtze River estuary. In: Chen J, editor *Yangtze River estuary in the 21st Century*. Beijing: China Ocean Press; 2009. p. 19–41. Chinese.
- [65] Ji N, Cheng H, Yang Z, Hu H, Chen Z. Sedimentary and morphological evolution of nearshore coast of Yangtze estuary in the last 30 years. *Acta Geogr Sin* 2013;68(7):945–54. Chinese.
- [66] Zhang X, Li J, Zhu W, Cheng H, Chen W. The self-regulation process and its mechanism of channels’ bed changes in the Changjiang (Yangtze) estuary in China. *Acta Oceanol Sin* 2015;34(7):123–30.
- [67] Yang Z, Cheng H, Li J. Nonlinear advection, Coriolis force, and frictional influence in the South Channel of the Yangtze estuary, China. *Sci China Earth Sci* 2015;58(3):429–35.
- [68] Yang Z, de Swart HE, Cheng H, Jiang C, Valle-Levinson A. Modelling lateral entrainment of suspended sediment in estuaries: The role of spatial lags in settling and M4 tidal flow. *Cont Shelf Res* 2014;85:126–42.
- [69] Yang Z, Cheng H, Cao Z, Guo X, Shi X. Effect of riverbed morphology on lateral sediment distribution in estuaries. *J Coast Res* 2018;34(1):202–14.
- [70] Ensing E, de Swart HE, Schuttelaars HM. Sensitivity of tidal motion in well-mixed estuaries to cross-sectional shape, deepening, and sea level rise. *Ocean Dyn* 2015;65(7):933–50.
- [71] Alebregtse NC, de Swart HE. Effect of river discharge and geometry on tides and net water transport in an estuarine network, an idealized model applied to the Yangtze estuary. *Cont Shelf Res* 2016;123:29–49.
- [72] Alebregtse NC, de Swart HE, Schuttelaars HM. Resonance characteristics of tides in branching channels. *J Fluid Mech* 2013;728:R3.
- [73] Alebregtse NC, de Swart HE. Effect of a secondary channel on the linear tidal dynamics in a semi-enclosed channel: A simple model. *Ocean Dyn* 2014;64(4):573–85.
- [74] Shi S, Cheng H, Zheng S, Xu W, Lu X, Jiang Y, et al. Erosional topography of the tidal limit in the Yangtze River in flood seasons after the river closure at Three Gorges. *Acta Oceanol Sin* 2017;39(3):85–95. Chinese.