



# 海平面上升对沿海工程顶面高程确定的影响

蔡永庆<sup>1,2</sup>, 文元桥<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 湖北省内河航运技术重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 随着海平面的上升, 沿海地区的年最高水位的极值及重现期已发生变化, 对沿海工程顶面高程的确定产生了重大影响。以吴淞为例, 以码头顶面高程为研究对象, 用纯经验曲线法计算重现期; 并根据 IPCC 第 5 次评估报告假定情景下的海平面上升情况, 计算各情景下港口码头顶面高程的变化。结果表明海平面上升对码头顶面高程确定的影响非常明显, 对顶面高程较低的码头的的影响尤为显著。

**关键词:** 海平面上升; 沿海工程; 顶面高程; 极端高水位

中图分类号: U 655.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0087-05

## Impact of sea level rise on determination of top elevation of coastal engineering

CAI Yong-qing<sup>1,2</sup>, WEN Yuan-qiao<sup>1,2</sup>

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Hubei Inland Shipping Technology Key Laboratory, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** With the rise in sea level, the extreme value and return period of the annual highest water level in coast areas are changed, which insert a significant influence on the determination of the top elevation of coastal engineering. Taking Wusong as a case, we research the top elevation of docks, calculate the return period by the pure experience curve method, and analyze changes of the dock's top elevation of under the scenario claimed by IPCC AR5. The results show that the sea level rise affects obviously on the determination of dock's top elevation, especially when the top elevation is not that high.

**Keywords:** sea level rise; coastal engineering; top elevation; extreme high water level

研究表明, 近百年来, 全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化。受气候变暖的影响, 海平面上升速率呈加快趋势。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告指出<sup>[1]</sup>: 19 世纪中叶以来的海平面上升速率比过去两千年来的平均速率高 (高信度)。1901—2010 年, 全球平均海平面上升了 0.19 [0.17~0.21] m。

海平面上升会对沿海工程 (海堤、码头等) 产生重要影响<sup>[2]</sup>。首先, 海平面上升会引起潮位升高、潮流与波浪作用加强, 使得风浪直接侵袭工程的机率大大增加, 影响工程及其附属设施的

安全和使用寿命; 其次, 海平面上升会大大减小出现同样高度风暴潮位所需增水值, 从而使得极值高潮位的重现周期明显缩短, 导致工程原有的设计标准大大降低。

沿海工程顶面高程对工程的正常使用、结构安全以及投资至关重要, 历来受到重视。随着全球变暖的趋势愈加明显, 平均海平面明显上升, 风暴潮灾害发生的频率和强度不断增加, 沿海地区高水位的极值和重现期已发生明显变化。目前国内外的有关研究大多是定性分析海平面上升对风暴潮的影响<sup>[3-6]</sup>, 量化分析的相关研究尚不多

收稿日期: 2014-11-18

作者简介: 蔡永庆 (1989—), 男, 硕士研究生, 从事气候变化对沿海工程影响的研究。

见。本文以上海吴淞为例，以码头顶面高程为研究对象，分析平均海平面上升对沿海工程顶面高程确定的影响，主要用极端水位校核的方法确定码头的顶面高程。

## 1 码头顶面高程的确定

### 1.1 码头顶面高程的确定方法

由 JTJ 295—2000《开敞式码头设计与施工技术规程》<sup>[7]</sup>可知，开敞式码头顶面高程的确定方法包括<sup>[8]</sup>：

- 1) 用设计高水位进行计算：

$$E = HWL + \eta_0 + h + \Delta \quad (1)$$

- 2) 用极端水位进行校核，其超高值可取 0 ~ 0.5 m。

### 1.2 数据来源

JTJ 213—1998《海港水文规范》<sup>[9]</sup> 3.2.8 规定：确定极端高水位和低水位，进行高潮和低潮的年频率分析，应有不少于连续 20 a 的年最高潮位和年最低潮位实测资料，并应调查历史上出现的特殊水位。从上海水资源公报选取吴淞 1994—2013 年连续 20 a 的年最高潮位（含风暴潮增水）。从文献 [10] 中选取 1905—1993 年出现的特殊水位（表 1），其中潮位 > 5.1 m 视为特高潮位（特殊水位）。

表 1 1905—2013 年吴淞风暴潮位

年份	吴淞年最高潮位/m	年份	吴淞年最高潮位/m
1905	5.64	1999	4.83
1914	5.12	2000	5.87
1921	5.21	2001	5.09
1931	5.36	2002	5.53
1933	5.50	2003	4.83
1949	5.18	2004	5.15
1962	5.31	2005	5.04
1974	5.29	2006	4.79
1981	5.72	2007	4.70
1989	5.32	2008	4.62
1994	5.09	2009	4.66
1995	4.60	2010	4.84
1996	4.70	2011	4.79
1997	5.92	2012	4.97
1998	4.98	2013	5.15

### 1.3 极端高水位的确定

JTJ 213—1998《海港水文规范》<sup>[9]</sup> 3.2.11 规定：如在原有  $n$  年的验潮资料以外，根据调查发现在历史上出现过的特高潮位值或特低潮位值，应按以下公式计算不同重现期的高潮位值或低潮位值。

$$h_p = \bar{h} \pm \lambda_{pN} S \quad (2)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \left( h_N + \frac{N-1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \right) \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \left( h_N^2 + \frac{N-1}{n} \sum_{i=1}^n h_i^2 \right) - \bar{h}^2} \quad (4)$$

式中： $h_p$  为与年频率  $P$  对应的高潮位（m）； $\lambda_{pN}$  为与年频率  $P$  及资料年数  $n$  有关的系数，其取值查看《海港水文规范》附录 B； $\bar{h}$  为  $n$  年  $h_i$  的平均值（m）； $h_N$  为  $N$  年中出现过的特高潮位值或特低潮位值（m）； $S$  为  $n$  年  $h_i$  的均方差（m）； $h_i$  为第  $i$  年的年最高潮位值； $h_N$  为  $N$  年中出现过的特高潮位值。

经验频率的计算采用统一处理法<sup>[11]</sup>：假设在历史调查期  $N$  年中有特高潮位  $a$  项，其中有  $l$  项发生在  $n$  年实测系列之内， $M$  为特高潮位由大到小排列的序号， $N$  年中的  $a$  项特高潮位的经验频率用下式计算：

$$P_M = \frac{M}{N+1} \quad (5)$$

实测系列中其余的  $(n-1)$  项，则均值分布在  $1 - P_{Ma}$  频率范围内， $P_{Ma}$  为特高潮位第末项  $M = a$  的经验频率，即：

$$P_{Ma} = a / (N+1) \quad (6)$$

实测系列第  $m$  项的经验频率计算公式为：

$$P_m = P_{Ma} + (1 - P_{Ma}) \frac{m-l}{n-l+1} \quad (7)$$

式中： $1 - P_{Ma}$  为  $N$  年中一般年最高潮位的总频率； $(m-l) / (n-l+1)$  为实测期一般年最高潮位在  $n-l$  年（除去特高潮位）内排位的频率。

按照以上方法（即耿贝尔曲线法）对吴淞进行年频率分析（图 1）。

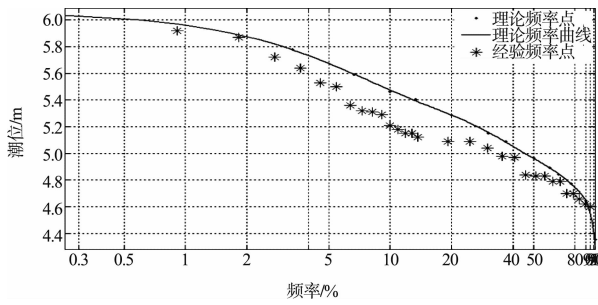


图1 吴淞潮位年频率分析 (20 a 实测及历史特高潮位资料)

由图1可以看出, 经验频率点与理论曲线配合不好, 经验频率点偏离理论频率曲线较远, 因此本文采取纯经验频率曲线法<sup>[12]</sup>对吴淞进行最高潮位年频率分析(图2)。

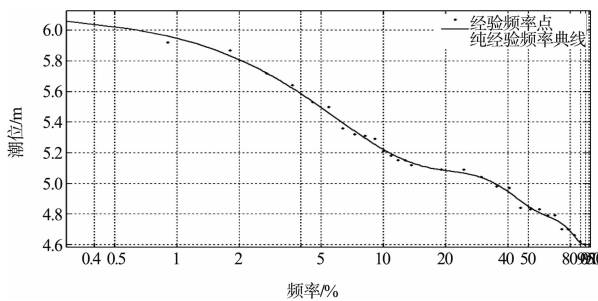


图2 吴淞潮位年频率分析-纯经验频率曲线法

用纯经验频率曲线法计算的不同重现期最高潮位见表2。

表2 吴淞不同重现期的最高潮位

重现期/a	5	10	20	50	100	200	500
最高潮位/m	5.08	5.21	5.57	5.79	5.89	5.94	6.07

### 1.4 码头顶面高程的计算

根据JTJ 295—2000《开敞式码头设计与施工技术规程》<sup>[7]</sup>3.5.1规定, 计算得出吴淞码头顶面高程见表3。

表3 吴淞码头顶面高程

极端水位	超高值	码头顶面高程
5.79	0.0~0.5	5.79~6.29

## 2 海平面上升对极端高水位的影响

全球气候变暖带来两个直接后果, 一是使陆地冰川、永久积雪融化; 二是使海水发生热膨胀、体积增大, 从而使海平面上升。海平面上升会不断抬高风暴潮过程的基面, 导致风暴潮的频率和

强度加大, 改变不同重现期的最高潮位, 从而影响码头顶面高程的确定。

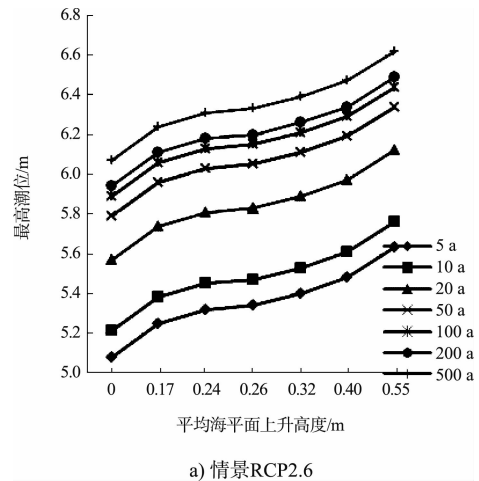
### 2.1 气候情景下的不同重现期的最高水位

IPCC在第5次气候评估报告<sup>[1]</sup>(AR5)使用新的典型浓度路径(RCP)情景, 对未来海平面上升情况作出如表4的假设。

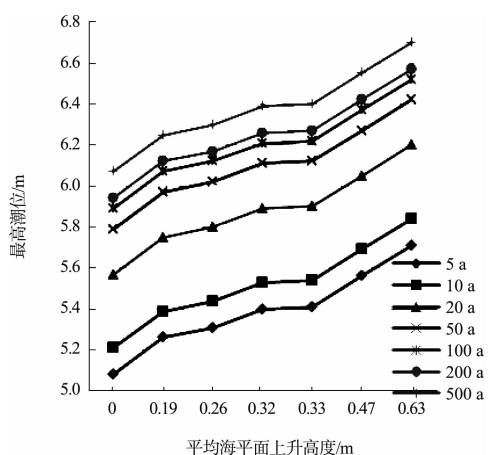
表4 21世纪和后期全球平均海平面上升预估变化

时间	情景	平均/m	可能性区间/m
2046—2065年	RCP2.6	0.24	0.17~0.32
	RCP4.5	0.26	0.19~0.33
	RCP6.0	0.25	0.18~0.32
	RCP8.5	0.30	0.22~0.38
2081—2100年	RCP2.6	0.40	0.26~0.55
	RCP4.5	0.47	0.32~0.63
	RCP6.0	0.48	0.33~0.63
	RCP8.5	0.63	0.45~0.82

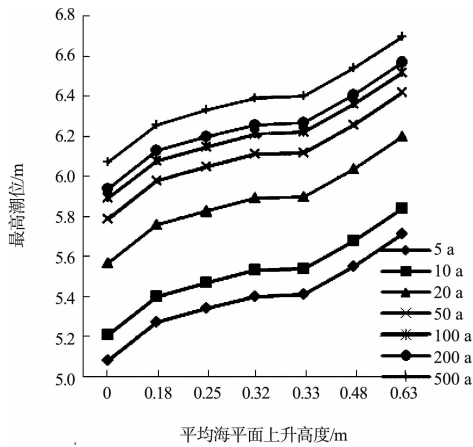
根据以上情景假设, 以吴淞港为例分别计算各情景下的不同重现期的最高水位(图3)。



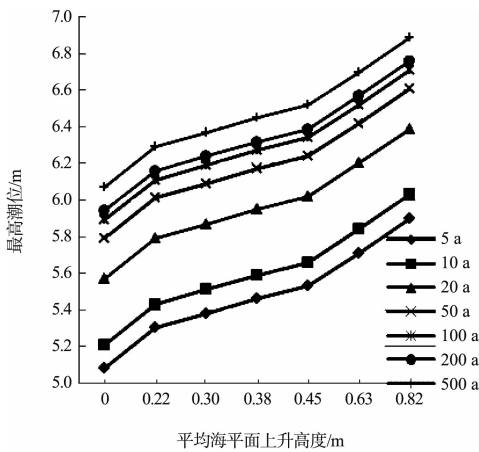
a) 情景RCP2.6



b) 情景RCP4.5



c) 情景RCP6.0



d) 情景RCP8.5

图3 不同情景下最高潮位的变化趋势

由图3可以看出：在各个情景下，随着平均海平面的上升，最高潮位都呈上升趋势，并且大大缩短了最高潮位的重现期。

现以情景 RCP8.5 为例，分析重现期的变化情况（图4）。

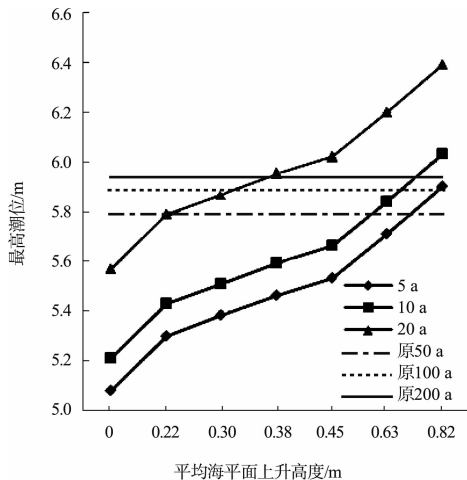
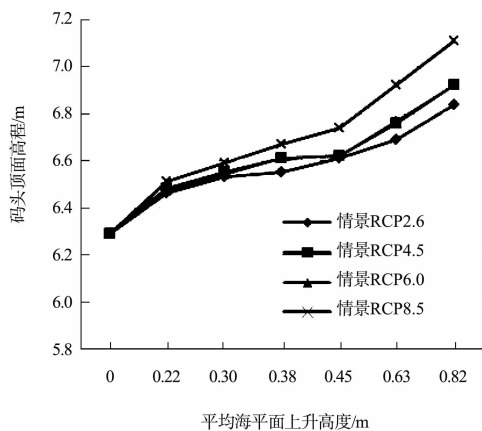


图4 情景 RCP8.5 下重现期变化

从图4可以看出，在情景 RCP8.5 下，原 50 a 一遇的最高潮位在海平面上升 0.22 m 后变为约 20 a 一遇，海平面上升 0.8 m 变为 5 a 一遇；原 100 a 一遇的最高潮位海平面上升 0.3 m 后变为约 20 a 一遇，海平面上升 0.65 m 后变为 10 a 一遇。最高潮位重现期的缩短大大降低了工程的原有设计标准，严重影响沿海工程的安全。

### 2.2 不同气候情景下的码头顶面高程

根据不同气候情景下全球平均海平面上升情况，按照《开敞式码头设计与施工技术规程》<sup>[7]</sup> 规定得到码头顶面高程（超高值取 0.5 m）在不同情景下变化趋势见图5，不同情景对码头顶面高程影响情况见表5。



注：情景 RCP4.5 与 RCP6.0 重合。

图5 不同情景下码头的顶面高程

表5 不同情景下顶面高程的增长率

情景	海平面上升/m	增长率/%	情景	海平面上升/m	增长率/%
RCP2.6	0.17	2.70	RCP6.0	0.18	2.86
	0.24	3.82		0.25	3.97
	0.26	4.13		0.32	5.09
	0.32	5.09		0.33	5.25
	0.40	6.36		0.48	7.63
	0.55	8.74		0.63	10.02
RCP4.5	0.19	3.02	RCP8.5	0.22	3.50
	0.26	4.13		0.30	4.77
	0.32	5.09		0.38	6.04
	0.33	5.25		0.45	7.15
	0.47	7.47		0.63	10.02
	0.63	10.02		0.82	13.04

由图5和表5可知:在不同情景下,码头顶面高程随着海平面的上升都呈增加趋势。其中情景RCP8.5下增长幅度最大,情景RCP2.6增长幅度最小,情景RCP4.5和情景RCP6.0的增长幅度很相近。

不同的港口、同一港口不同码头的顶面高程都是不一样的,海平面上升对其的影响也不同。现从中国沿海任选6个港口,从每个港口中任选一个半掩护式码头,分析情景RCP8.5下海平面上升对其顶面高程(均换算至85高程基准面)的影响(图6、7)。

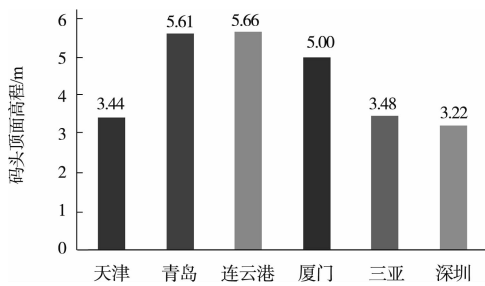


图6 不同港口的码头顶面高程

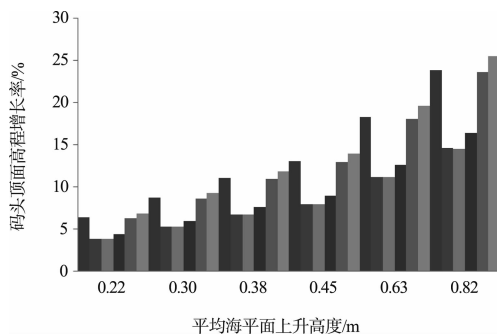


图7 情景RCP8.5下不同港口码头顶面高程的增长率

由图7可知,海平面上升对各个港口码头的顶面高程的影响是不同的。对于码头顶面高程较低的港口(天津、三亚、深圳等),海平面上升的影响是非常明显的,最高增长率可达25%,对工程的使用和安全造成了较大潜在危险。

### 3 结论

1) 海平面上升不仅使极端高水位上升,而且缩短了极端高水位的重现期,从而提高了沿海工程的顶面高程,增加了工程的造价。

2) 不同情景下,由于平均海平面上升的幅度不一样,对沿海工程顶面高程的影响程度也不同。其中情景RCP8.5对沿海工程顶面高程的影响最大,情景RCP2.6的影响最小。

3) 对于不同港口的工程,海平面上升对其顶面高程的影响程度也不同。顶面高程越低,海平面上升的影响越大;顶面高程越高,海平面上升的影响越小。

### 参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. England: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 李加林, 张殿发, 杨晓平, 等. 海平面上升的灾害效应及其研究现状[J]. 2005(2): 49-53.
- [3] 武强, 郑铎鑫. 21世纪中国沿海地区相对海平面上升及其防治策略[J]. 中国科学: D辑, 2002, 32(9): 760-766.
- [4] PIANC EnviCom Task Group3. Climate change and navigation [EB/OL]. (2009-04-01) [2014-07-02] <http://www.pianc.org/downloads/envicom/envicom-free-tg3.pdf>.
- [5] Morris J T, Sundareshwar P V, Nietch C T, et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level[J]. Ecology, 2002, 83(10): 2 869-2 877.
- [6] 刘杜娟. 相对海平面上升对中国沿海地区的可能影响[J]. 海洋预报, 2004, 21(2): 21-28.
- [7] JTJ 295—2000 开敞式码头设计与施工技术规程[S].
- [8] 张定军. 开敞式码头顶面高程的确定[J]. 水运工程, 2005(3): 37-39.
- [9] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [10] 胡昌新, 金云. 上海台风风暴潮的60年周期性探讨[C]. 第5届长三角气象科技创新论坛论文集, 2008.
- [11] 靳月灿, 蔡森, 乔蒙. 特大值处理对频率计算结果影响分析[J]. 吉林水利, 2010(8): 39-42.
- [12] 罗宗业. 海港工程校核水位的另一个分析方法——纯经验频率曲线法[J]. 海岸工程, 1990(1): 19-29.

(本文编辑 武亚庆)