

文章编号: 1000-2022(1999)04-0625-06

# 海平面上升对长江三角洲海堤、航运和水资源的影响

缪启龙 周锁铨

(南京气象学院环境科学系, 南京 210044)

**摘要:** 分析了 2050 年长江三角洲地区相对海平面上升 50 ~ 70 cm 时, 将对该地区沿海海堤、航运及海岸带水资源的影响, 并就相应的适应对策提出了建议。

**关键词:** 海平面上升; 海堤; 航运; 海岸带

**中图分类号:** P467, F062. 1      **文献标识码:** A

影响海平面上升的因素很多, 对海平面升降的事实和未来趋势, 很多学者进行了大量的研究和探索。结果表明各地点、各地区间差异明显, 有些地区海平面是上升的, 有些地区则是下降的; 有的变化幅度大, 有的变化幅度小<sup>[1,2]</sup>。

对人类生活和社会经济的影响更为明显, 更有实际意义的是相对海平面。根据我国科学家的预测, 在未来的 2050 年长江三角洲地区相对海平面将可能上升 50 ~ 70 cm<sup>[1,2]</sup>。本文即据此讨论海平面上升对长江三角洲沿海地区的影响。

## 1 对海堤(海塘)的影响

长江三角洲的沿海地区为冲积平原, 高程较低, 在海岸带一般仅海拔 3 m 左右。由表 1 可见沿海的高潮位远远高于地面高程。若无海堤保护, 高潮位时整个上海市、南通市地区沿海、太湖流域、浙江嘉兴沿海均可被海水淹没(见图 1)。事实上, 这些地区是完全依靠海堤和防汛墙保护起来的地区。人们在长期的实践斗争中, 要生存、发展, 要抗拒海潮、巨浪、风暴潮及暴雨洪水的侵袭, 必须修堤自救。

表 1 沿海实测最高潮位

Table 1 The highest actual coastal tidal stage m

	小洋口	川腰港	吕四港	高桥	吴淞口	金山咀	乍浦	澉浦
最高潮位	6.77	5.25	7.90	5.53	5.74	5.93	6.75	8.05

长江三角洲 1 000 多年来修筑各种不同形态、不同大小、不同标准的海堤共有 600 多公里。海堤保护着沿海地区经济建设和人民生命财产安全。1949 年以来, 在长江三角洲沿海, 国

收稿日期: 1999-03-14; 修订日期: 1999-05-18

基金项目: 国家环保总局科技发展项目(A-95031)、加拿大 GPIP、香港研究基金委员会

项目(RGC Grant 97/98 Code: 338/005/0007)资助

作者简介: 缪启龙, 男, 1944 年 1 月生, 教授

家先后投资 10 多亿元建设海堤。如上海市海岸带, 每公里海堤平均保护范围达 2 848 亩, 若一次受淹, 每公里海堤损失达 1 500 万元(以 1992 年标准计算), 在工业企业集中的地区每公里受损量可达几亿元。随着长江口南北经济发展, 特别是浦东开发区的迅速发展, 每公里海堤保护价值将迅速增大。因此, 建设好海堤是主要出路。显然, 海堤的建造标准和经济发展程度是相互影响的。经济发展了, 海堤建设更重要, 也有财力物力建设高标准的海堤<sup>[2]</sup>。

海堤建造必须考虑沿海历史最高潮位、风浪涌高、安全超高等因素。海平面上升不仅海堤基准线上升, 而且最高潮位也将提高。近 30 年来相对海平面上升率为 4.5 mm/a, 同期平均高潮位上升速率为 3.6 mm/a。若相对海平面上升 40 cm, 长江口最高潮位比现在高出 1~2 m; 若海平面上升 100 cm, 最高潮位将上升 2~3 m, 那时, 若无海堤, 整个南通地区、太湖流域、上海市、浙江东部沿海将全部被淹没<sup>[3]</sup>。

另一方面, 相对海平面上升, 海堤原设计的高潮位出现频率将随之增加, 如小洋口闸 6.5 m 的设计潮位为 25 a 一遇, 若海平面上升 40 cm 则变为 8 a 一遇。上海市 200 多公里的防汛墙设计水位为 1 000 a 一遇, 若 2050 年相对海平面上升 50~70 cm, 则 1 000 a 一遇降为 100~70 a 一遇。大大加大了防汛墙遭受破坏的机率, 且这种增加是非线性的。

为了最大限度地确保安全, 随着气候变暖, 引起海平面上升, 加高、加固、提高海堤标准是必不可少的。海堤高程主要取决于设计潮位及风浪爬高两个因素。在高潮位频率  $P$  情况下, 计算公式为<sup>[4]</sup>

$$Z_P = H_P + R + \Delta H。 \quad (1)$$

式中,  $Z_P$  为海堤设计高程,  $H_P$  为设计潮位,  $R$  为风浪爬高,  $\Delta H$  为安全超高。

未来海平面上升后的海堤高程仍按上式设计, 其中  $\Delta H$  沿用目前标准, 潮位  $H_P$  和风浪爬高  $R$  按以下方法确定。

(1) 潮位 潮位包括天文潮和气象潮两部分。海平面上升情况下的最高设计潮位采用天文潮、气象潮(台风增水)及海平面上升值相加的方法确定。因为长江三角洲地区台风盛行期间, 高潮增水是最危险水位, 也是设计潮位的主要参数。因此, 天文潮采用历年 7~9 月天文高潮平均值( $H_{\text{天文}}$ )。从理论上说, 设计潮位( $H_P$ ) 表达式

$$H_P = H_{\text{天文}} + \zeta_5 + H_{\text{海面}}。 \quad (2)$$

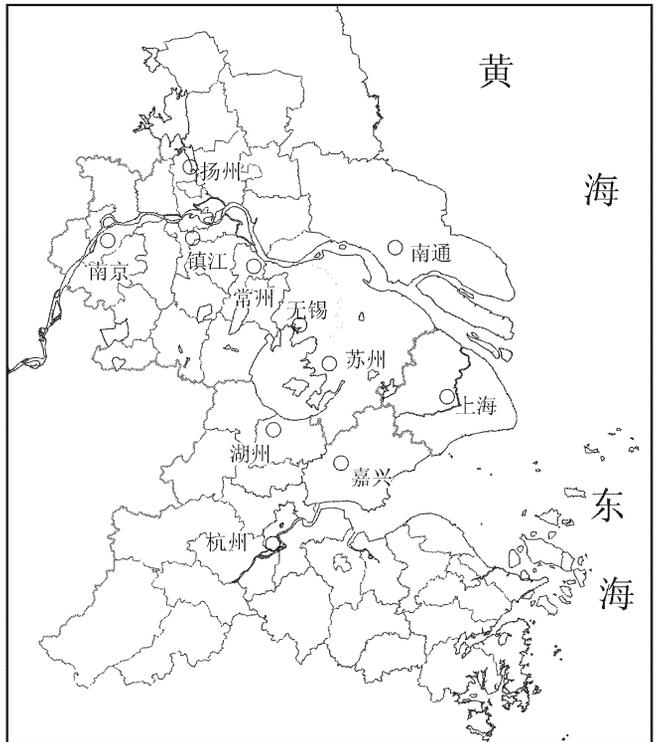


图 1 无海堤情况下历史最高潮位时长江三角洲淹没位置

Fig. 1 The submerged position of the Yangtze Delta in a state of the highest tidal stage in history without sea dikes

式中,  $\zeta$  为台风增水值, 通常  $\zeta = K \tau_a L / \rho G H$  用计算。其中,  $\tau_a$  为海面风应力, 与海面风速平方成正比;  $L$  为风暴潮发生海域的水平尺度;  $\rho$  为海水密度;  $K$  为经验常数;  $G$  为重力加速度;  $H$  为水深度。可见, 台风增水值与水深成反比, 因此, 随着海平面上升、堤外水深加大, 增水值略有减小。不过, 由于平均潮位的抬高, 相应高潮位的绝对值仍然要增大。

然而, 若将不同海平面上升下的最大可能增水值再叠加多年平均 7~9 月天文高潮位求得的海堤设计潮位的现状值, 相当于 0.1%~0.01% 的频率, 这是一个有可能出现但很难超过的潮位值。即为千年一遇到万年一遇的高潮位值。这对一些重大工程如秦山核电站是必须考虑的, 但在一般情况下海堤设计中若采用这一高潮位, 则要求的标准过高、投资太大。因此, 季子修等<sup>[4]</sup> 用 1% 频率并考虑海平面上升时的高潮位作为相应情况下的海堤设计潮位。

(2) 风浪爬高 按《港口工程技术规范》中的公式<sup>[4]</sup>

$$R = K_{\Delta} K_v R_o H. \quad (3)$$

式中,  $R$  为风浪爬高值,  $K_{\Delta}$  为海堤护面糙渗系数, 与海堤护面结构有关;  $K_v$  为与风速及堤前滩面水深有关的经验系数;  $R_o$  为不透水光滑墙的相对爬高, 即  $K_{\Delta} = 1$ 、波高  $H = 1$  m 时的爬高值, 它与斜坡的坡度与波陡 ( $H/L$ ) 有关,  $L$  为近岸波长,  $H$  为近岸波高。

按上述计算方法, 其结果如表 2。由表可见, 若 2050 年长江口外相对海平面上升 50 cm, 海堤至少要在目前海堤上加高 1~1.5 m, 对长江三角洲 600 km 左右的海堤, 国家要投资 25 亿元 (1995 年标准)。

表 2 长江三角洲地区在海平面上升 50 cm 时的海堤设计高程

Table 2 The designed height of sea dikes in the Yangtze

Delta when sea level rises 50 cm

m

省市	站点	波浪爬高	安全超高	设计潮位	设计堤顶高程
江苏	燕尾港	2.20(1.97)	0.50	4.26(3.83)	6.96(6.30)[6.40]
	新洋港	1.77(1.57)	0.50	4.16(3.76)	6.43(5.83)[6.40]
	小洋口闸	1.64(1.48)	0.50	7.51(7.10)	9.65(9.08)[8.40]
	大洋港闸	2.15(1.98)	1.00	5.69(5.25)	8.84(8.23)[8.00]
上海	芦潮港	2.14(1.88)	0.50	4.10(3.68)	6.7496.06[6.20]
	金汇港	1.51(1.25)	0.50	4.76(4.33)	6.77(6.08)[6.30]
	金山咀	4.16(3.83)	0.50	4.76(4.33)	9.42(8.66)[9.40]
浙江	乍浦	3.45(3.09)	0.50	5.94(5.53)	9.89(9.12)[8.70]
	秦山电厂	1.35(1.30)	0.50	6.99(6.61)	8.84(8.41)[9.00]

注: 表中()内为现状海平面下的计算设计值; 表中[]内为目前实际堤顶高程

## 2 对长江口通航的影响

长江口是一个三级分叉四口入海的分叉式河口, 在长江径流和海潮的作用下, 河口段河床冲、淤多变, 主河槽摆动, 致使航道亦随之变化。1842 年南港为上海港的通海航道, 1870 年因南港淤浅, 辟北港为航道, 1927 年北港上口淤浅, 又被迫走南港。长期以来, 南港南槽为主要的入海航道, 1975 年南槽开辟水下 7 m 的人工航槽, 长 27.3 km, 1983 年由于泥沙南压和 10 号台风的影响, 槽中悬沙大量淤落, 无法恢复水下 7 m 通航水深, 因此又改在北槽挖水下 7 m、15 km 长的人工航槽, 1984 年 3 月完成, 维持了长江口万吨轮必须的-7 m 通航槽。

在长江口各个入海通道上都有拦门沙,这是世界各大河口都存在的现象。长江口拦门沙水下深度不断变小。1942年《扬子江通航航道图》上,目前的铜沙滩、九段沙处,当时水深大于6.2 m,而现在多年平均为5.8 m,最浅处为5.2 m,可见近50年来拦门沙淤积了40~100 cm,平均每年淤积0.5~2.0 cm。拦门沙的长度在100多年演变中,上部淤长明显,平均增长长达100 m/a(表略)。航道淤浅和拦门沙的存在,严重地影响长江口的通航能力。在目前万吨轮也必须乘潮进长江,在枯水期曾有外轮在长江口外候潮274 h之多的记录。

从实际资料分析,拦门沙的位置、长度及平均高程与长江大通站的输沙量有关。据南京水利科学研究院计算,假定长江洪季平均流量由45 500 t/s降低10%,为40 000 t/s,则铜沙滩的位置将上溯3 km左右,反之则位置将下移。因此未来长江流域降水变化对长江口航道的影响是明显的。

气候变暖使海平面上升,潮流顶托作用加强,长江口泥沙滞留位置将上溯,河流纵向比降发生变化,必然影响河口泥沙沉积和运动规律,更多的泥沙淤落在长江口内,航道淤塞加快,拦门沙位置上移。据计算在海平面上升50 cm时,严重影响港口航道的拦门沙将上移1 000 m左右<sup>[3]</sup>。同时考虑在今后50 a内海平面上升,拦门沙平均高程也上升,则在未来相对海平面上升50 cm时,预计拦门沙也将可能上升50~100 cm。

也由于上述原因,北槽人工航道(15.7 km、7.0 m深)上的回淤率必将增大,事实上人工航道已在不断淤浅。1985年淤积 $956 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,1990年已达到 $1 541 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。为了保证通航,由此需要增加航道上的疏浚能力,增加挖泥船。每年要增加挖泥量 $100 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,费用增加近亿元<sup>[3]</sup>。

### 3 对水资源的影响

海平面上升对水资源的影响主要表现在对海岸带水资源的影响上,尤其是对沿海滩涂水资源的影响。主要表现在以下方面

(1) 海岸带潜水、地下水咸化 由于人口密集,地下淡水已被陆续开采,并已开始出现海水倒渗现象。如江苏省南通市沿海,出现了区域性地下水下降漏斗,中心水位已下降10 m以上,影响半径达10~20 km,改变了深层地下水的流向,出现了自东向西的倒流现象,这种状况在本地区海岸带均有表现,并在继续发展。很显然,由于海平面上升,海水从地下潜渗和地面浸渍进一步加剧,对海岸带淡水资源是严重的威胁。

(2) 咸水入侵 长江口咸水入侵现象是长江枯水期径流减少,涨潮时咸水上溯长江口内引起的,它可进入黄浦江,甚至还会沿长江上溯,是一种不可忽视的自然灾害。每年冬春枯水季节咸潮从江口上溯,其含氯度严重超标,给人类健康和工农业生产带来危害。如1978年冬天到1979年春,因咸水严重入侵长江口内,在黄浦江、吴淞至闵行段持续142~72 d,仅上海市直接经济损失在1 440万元以上,间接损失在2亿元以上(当年标准)。

长江四条入海口中北支咸水入侵最为严重,其水质基本上已不能引用灌溉。在潮差大时,还会向南支倒灌咸水。南支咸水入侵程度不及北支,但沿岸重大工业多,咸水入侵造成的损失更为严重。南支南港咸水入侵强度与大通站流量具有指数关系,长江口引水船站月平均盐度与大通站月平均流量的相关系数为-0.96,相关模型为

$$S = 29.826 \exp(-3.06 \times 10^{-5} \times Q) \quad (4)$$

式中, $S$ 为引水船站7月平均盐度, $Q$ 为大通站7月的平均流量(见表3)。

由表3可见,气候变化引起降水变化时,将导致长江流量变化,则长江口的盐水入侵强度

也相应发生变化。咸水入侵强度的变化还可以盐水入侵长度来表述。顾伟浩曾根据有关资料分析研究得出盐水楔长度的经验公式为<sup>[5]</sup>

$$L = -33.0112 + 13.2085H - 11.7110Q - 6.3533A。 \quad (5)$$

式中,  $L$  为盐水楔长度, 离九段沙的距离(km);  $H$  为理论基准面下的水深(m);  $Q$  为大通流量(万  $m^3/s$ );  $A$  为中浚站潮差(m)。海平面上升将使  $H$  增大, 若现状  $H$ 、 $Q$ 、 $A$  分别为 7.0 m、29 300  $m^3$ 、2.67 m, 则当海平面上升 30、50、100 cm 时, 则盐水楔长度分别增大 3.3、5.5、12.0 km<sup>[2]</sup>。

长江流域降水的变化, 也对咸水入侵距离产生影响。若大通站流量在平均年以下时, 分别减少 2 000、4 000、6 000、7 000、10 000  $m^3/s$ , 则 0.5‰ 的等盐度线相应向内陆增加的上溯距离分别为 2~4、3~7、5~12、7~14、10~20 km。若大通站流量小于 15 000  $m^3/s$  时, 流量增加 1 000~1 500  $m^3/s$ , 则 0.5‰ 的等盐度线将向下游下移 1~7 km, 当流量大于 15 000  $m^3/s$  时, 增加 1 000~2 000  $m^3/s$ , 则 0.5‰ 等盐度线将向下游移 0~3 km。由此, 长江流域未来增加降水有利于减轻咸水入侵程度, 流域降水减少则加重咸水入侵<sup>[2]</sup>。

(3) 阻碍污水排放和洪水下泄 海平面上升, 闸下水位抬高, 潮流顶托作用加强, 导致河道排水不畅, 从而妨碍污水的排放和洪水的下泄。据朱季文<sup>[6]</sup>估计, 若海平面上升 40 cm, 长江三角洲地区自然排水能力下降 20%~25%。目前上海市每天排放的 1 000 多立方米的污水有一半直接排入了黄浦江, 受潮流顶托, 常使污水回流倒灌, 江水黑臭现象日益严重。黑臭期(污染指标大于 5) 已达 138~229 d, 1992 年黑臭期累计长达 318 d<sup>[11]</sup>。海平面上升必将加剧污水排放的困难。

## 4 对海平面上升的适应对策

(1) 提高防护标准 长江三角洲地区地势低平, 经济发达, 人口密集。如无海堤(海塘)保护, 则本地区 3/5 的地区都将在高潮位的控制之下, 尤其是社会经济最发达的上海、太湖地区、江苏南通地区、浙江嘉兴地区都将成为高盐碱化荒漠地带。因此, 海堤是本地区一切活动所要依赖的生命线。而确保人民生命财产的安全及正常的社会经济活动又是各级政府的首要任务。所以在全球气候变暖的情况下, 海平面上升, 灾害频次增加, 强度增大, 各级政府必须从全局出发, 针对海平面上升, 应逐年分期地增加对海堤、江堤建设的投资, 海岸带、江岸带的新居民点、新企业, 均应有防护安全基建资金, 切实做好海堤、江堤的建设, 才能避免一朝倾覆的悲剧。这在目前的财力、人力条件下是可以做到的, 在经济上其短期和长期的效益都是显著的。在海岸带, 要加强海岸的保护和管理, 加强防护林建设。尤其是冲蚀海岸段要切实提高海堤建造标准。

(2) 综合治理长江口水道 长江口治理应以保证航道为主的综合治理。疏浚航道、整治海岸、围垦江海滩相结合, 这样可得到大片土地, 又可以束狭河槽, 增加水流冲沙力, 改善航道。这需要江苏省、上海市共同协调、投资、共同收益。

长江口的航道淤塞、多变, 应引起沿江各地区的注意, 沿江各地区不宜建造特大型港口, 沿江港口的建设应与长江口航道的通航能力相适应。国家应将特大型港口规划在水深较大、海岸稳定的沿海, 如金山咀等地, 这样可以减轻长江口航道的治理工程, 而长江口航道的治理是一

表 3 大通站流量变化与引水船站盐度变化

Table 3 Flow change in Datong station and salinity change of diversion harbor

大通站流量变化( $m^3/s$ )	引水船站盐度变化值(‰)
- 2 000	0.78 ~ 1.11
- 4 000	1.59 ~ 2.30
- 6 000	2.47 ~ 3.57
- 7 000	2.93 ~ 4.23
- 9 000	3.89 ~ 5.62
1 000	- 0.42 ~ - 0.72
1 500	- 0.63 ~ - 1.07
2 000	- 0.83 ~ - 1.40
2 500	- 1.02 ~ - 1.70

个长期的复杂的工程,减轻上海港压力,有利于长江黄金水道运输能力的外延。这在时间上费时短、经济上耗费少,对加速本地区经济发展已是刻不容缓。

(3) 增加海岸带淡水流量 长江三角洲海岸带淡水资源有明显的季节变化,在冬半年,应增加海岸带河流的淡水流量,这对改善海岸带土壤盐碱状况、企业用水,尤其是人民群众生活用水极其重要的,也是改善投资环境的必要措施。在乡镇企业集中、工业、农业污染日益明显的今天,增加海岸带河川流量就显得尤为迫切。

(4) 加强长江流域的环境保护 长江的径流、输沙与长江中、上游的植被有密切关系。保护中、上游的植被面积对稳定长江径流、输沙有重要意义。稳定的长江流量、含沙量与长江三角洲经济稳定是息息相关的。长江中、下游湖泊很多,应减少围湖造田,保证一定的蓄洪、蓄水能力,对减少本地区的旱涝和损失是极为重要的。

## 参考文献:

- [1] 任美镔. 黄河、长江和珠江三角洲海平面上升趋势及 2050 年海平面上升的预测[C]. 见: 中国科学院地学部主编. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策. 北京: 科学出版社, 1994. 18 ~ 28
- [2] 陈宗镛, 周天华, 于宣法, 等. 中国沿海平均海平面变化[C]. 见: 中国科学院地学部主编. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策. 北京: 科学出版社, 1994. 40 ~ 44
- [3] Miao Qilong. Possible effect of climate changes on the coastal zone of the Yangtze River Delta[J]. The Journal of Chinese Geography, 1998, 8(1): 41 ~ 50
- [4] 季子修, 蒋自巽. 海平面上升与三角洲海堤建设[C]. 见: 中国科学院地学部主编. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策. 北京: 科学出版社, 1994. 291 ~ 298
- [5] 徐海根, 朱慧芳. 海平面上升对长江口盐水入侵的影响[C]. 见: 中国科学院地学部主编. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策. 北京: 科学出版社, 1994. 234 ~ 240
- [6] 朱季文, 毛 锐. 海平面上升对太湖下游地区洪涝灾害的影响[C]. 见: 中国科学院地学部主编. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策. 北京: 科学出版社, 1994. 202 ~ 209

# IMPACT OF RISING SEA LEVEL ON SEA DIKES, SHIPPING AND WATER RESOURCE IN THE YANGTZE DELTA

MIAO Qi-long, ZHOU Suo-quan  
(Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044)

**Abstract:** This paper analyzes the impact of rising sea level in the future on sea dikes, shipping and coast zone water resource in the Yangtze Delta and presents proposals for corresponding countermeasures.

**Keywords:** rising sea level; sea dikes; shipping; coast zone