

长江三角洲及毗连地区海平面上升 影响预测与防治对策*

施雅风^① 朱季文^① 谢志仁^② 季子修^① 蒋自巽^① 杨桂山^①

(^①中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; ^②南京师范大学地理学院, 南京 210024)

摘要 论述了研究地区 21 世纪前半期的相对海平面上升幅度. 研究结论是, 研究地区 2050 年相对海平面上升 25~50 cm, 其中长江三角洲上升幅度较大, 高出全球平均值的一倍. 海平面上升将产生以下影响: (1) 有些岸段侵蚀后退与潮滩下蚀的加剧, 侵蚀海岸范围扩大; (2) 潮滩与海岸湿地由于侵蚀与淹没而减少; (3) 风暴潮频率与强度增加, 威胁海岸防护工程的安全; (4) 里下河低地与太湖湖东低地排水能力下降, 洪涝灾害加剧; (5) 长江口盐水入侵加剧. 海平面上升影响的综合评估表明: 对长江三角洲与太湖湖东低地, 特别是上海市的影响最严重, 其次是杭州湾北岸, 第三是废黄河三角洲, 苏北滨海平原与里下河低地的影响最轻.

关键词 海平面上升 影响 防治 长江三角洲

研究区范围为长江口附近的上海市及毗连的江苏、浙江二省沿海, 北起灌河口(34° 27' N), 南抵钱塘江口(30° 20' N), 包括江南的太湖下游和江北的里下河两个地面高程在高潮位以下的洼地(图 1). 沿海全线建有挡潮海堤, 海岸类型均为淤泥质平原海岸, 发育有广阔而典型的潮滩. 潮汐类型为不正规半日潮, 潮差大多超过 2 m, 长江口两翼是中国沿岸潮流作用最强的海域. 本区也是台风风暴潮危害较大的地区. 本区人口密度平均 930 人/km², 人口稠密, 工农业发达, 经济实力雄厚. 作为中国最大城市和经济中心的上海市, 位于本区中心, GDP 总值约占全国的 4%, 港口吞吐量约占全国沿海港口的三分之一, 在全国经济发展中起着举足轻重的作用. 因此, 研究海平面上升对本区影响及防治对策, 具有重要意义.

1 2050 年前相对海平面上升量估算

过去 100 年来, 本区海平面上升虽显示出地区特征, 但总体变化趋势则与全球一致^[1~4]. 因此, 将未来全球平均海平面上升与本地区的地面沉降等局地因素相叠加, 可把握未来本区相对海平面上升的可能幅度. 未来全球海平面上升量的预测, 存在较多的不确定性. 本文采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)1995 年评估报告提出的全球海平面上升的最佳估计值, 即: 2050 年介于 18~21 cm 之间(平均上升速率为 3.0~3.5 mm/a)^[5]. 此预测方案与 IPCC90 年预测方案相差较小, 可信度较大.

本区在构造变化、均衡下降、松散沉积物压实与人为抽取地下水等共同作用下, 近期地

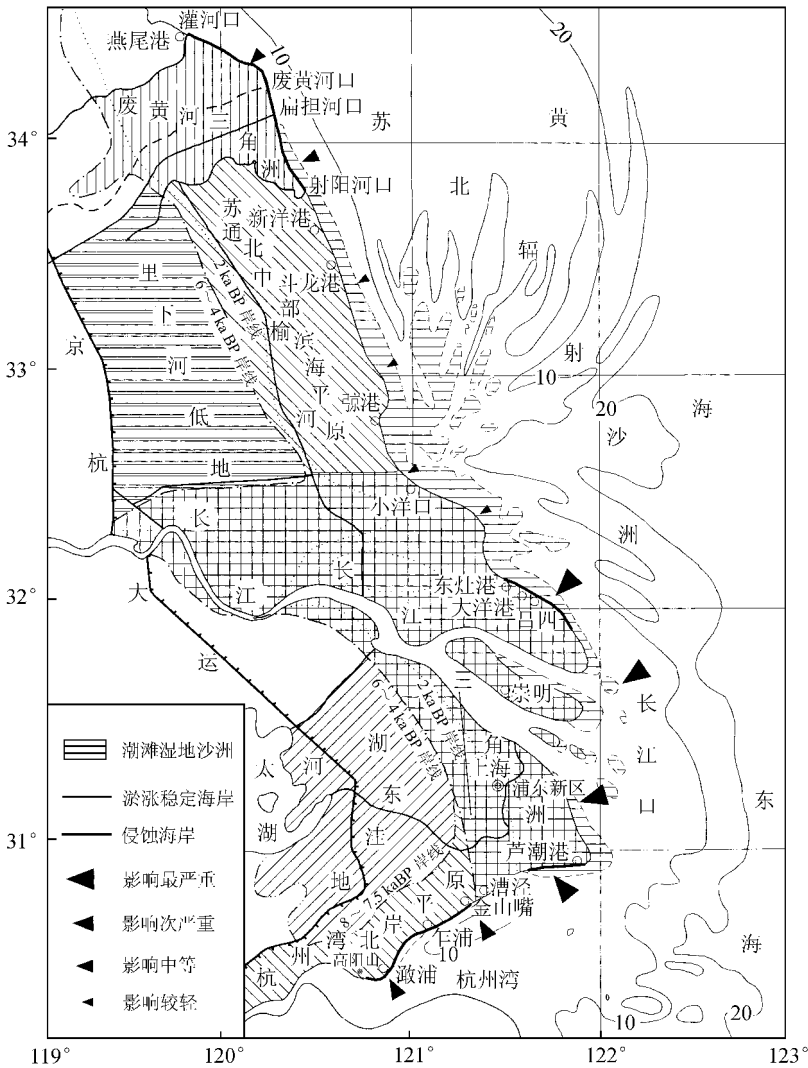


图 1 长江三角洲附近地区地貌及海平面上升影响分区

面沉降速率较大. 谢志仁^[3]提出了海面-地面系统概念及其数学模型, 运用模型拟合、理论估算和重复水准测量分析, 获得本区长期和近期地面沉降趋势的 7 组数据; 并根据自然沉降的延续性和人为沉降的可控性假定, 得出本区不同岸段 1990 ~ 2050 年地面沉降速率最佳预测值. 据此, 可估算本区不同岸段未来相对海平面上升幅度(表 1).

表 1 长江三角洲及毗邻地区未来海平面最可能上升幅度预测

岸段	全球平均海面上升 速率/ mm a^{-1}	地面沉降速率/ mm a^{-1}	2030 年最可能上升 幅度/ cm	2050 年最可能上升 幅度/ cm
苏北滨海平原	3.0 ~ 3.5	1.6	18 ~ 20	28 ~ 31
长江三角洲北部	3.0 ~ 3.5	4.1	28 ~ 30	43 ~ 46
上海市	3.0 ~ 3.5	5.0	32 ~ 34	48 ~ 51
杭州湾北岸 ^{a)}	3.0 ~ 3.5	1.1	16 ~ 18	25 ~ 28

a) 本文中的杭州湾北岸是漕泾以西部分

从表 1 中可见, 本区未来相对海平面上升幅度差异较大, 1990 ~ 2050 年前后上海市沿海上升幅度将达到 50 cm 左右, 长江三角洲北部沿海约 45 cm, 而苏北滨海平原和杭州湾北岸在 25 ~ 30 cm 之间, 后两地 50 cm 的上升量可能在 2100 年前后出现.

2 海平面上升的影响预测

2.1 风暴潮

风暴潮是长江三角洲地区的主要自然灾害之一. 由于三角洲两侧潮差及台风增水较大, 天文大潮与台风相遇, 成灾机率极高, 并有随海平面上升增高的趋势. 以 1951 ~ 1970 年和 1971 ~ 1990 年两个时段比较, 中国台风风暴潮在后一时段的出现次数和成灾次数均较前一时段增加 28%^[6]. 蒋自巽^[7]应用风暴潮数值预报模型计算出不同海平面上升幅度下的最大可能增水值以及采用 Pierson-III 型曲线对本区 1960 ~ 1986 年沿海各站实测潮位资料统计分析得出现状海平面下不同频率最高潮位值, 据此可估算不同海平面上升量下的不同频率可能最高潮位值(表 2). 结果表明, 海平面加速上升将导致风暴潮频率和强度增加, 潮差相对小的岸段的频率增大高于潮差相对较大的岸段. 潮差大的岸段如小洋口和澈浦站, 海平面上升 50 cm, 百年一遇最高潮位将变为 50 年一遇; 而在潮差相对较小的其他岸段, 海平面上升 20 cm, 百年一遇的最高潮位即变为 50 年一遇.

表 2 不同海面上升量下的不同频率最高潮位值(吴淞基面)

频率 /%	海面上升 量/cm	最高潮位/cm							
		燕尾港	新洋港	小洋口	大洋港	芦潮港	金山嘴	乍浦	澈浦
2	0	531	516	827	667	515	583	691	793
	20	548	532	843	685	532	600	708	809
	50	574	556	868	711	557	625	732	831
1	0	546	539	873	688	531	596	716	824
	20	563	554	887	706	548	613	733	840
	50	589	579	914	732	573	639	757	862

海平面上升加剧风暴潮灾害, 将给海岸防护工程和海堤保护地区造成巨大损失. 目前, 全区海堤设计标准大多为百年一遇. 要保持这一安全标准, 海堤必须随风暴潮位增高而加高. 苏北滨海平原的相对海平面在 2030 年与 2050 年将要上升 20 与 30 cm 左右, 据现有标准与表 2 中的数据, 苏北滨海平原的海堤要提高 16 ~ 25 cm 左右; 上海市与长江三角洲在 2050 年相对海平面上升 50 cm, 海堤需加高 43 cm.

2.2 潮滩湿地损失

本区潮滩面积 5 224.8 km², 占全国潮滩总面积的 26%, 主要分布于长江口及其以北地区. 其中, 海岸湿地面积约 1 252 km², 位于潮滩的中上部, 具有较高的生产力和丰富的生物资源. 季子修等人^[8]据各岸段潮滩冲淤变化特点及资料的可利用情况, 分别采用高程法、平均速率法和引入递减率的速率法, 计算了海平面加速上升引起的潮滩湿地损失量(表 3). 计算结果表明, 不同岸段的损失率有较大差异. 侵蚀海岸由于侵蚀与淹没的共同作用而具有高的损失率. 例如, 废黄河三角洲海岸到 2050 年海平面上升 28 ~ 31 cm, 潮滩损失达 45.8% ~ 46.8%. 从全区来看, 到 2050 年, 侵蚀海岸、稳定海岸与轻微淤涨海岸的潮滩与湿地(包括辐射沙洲)分别减少 356.1 ~ 373.2 km²(损失率 13.7% ~ 14.4%)与 231 km² (44.3%). 海平面上升对淤涨海岸的影响是减少淤涨面积(表 3).

表 3 2050 年海平面上升的潮滩及湿地损失量^{a)}

地区	潮滩		湿地	
	面积/km ²	比率/%	面积/km ²	比率/%
废黄河三角洲	144.0 ~ 147.2	45.8 ~ 46.8	120	100
射阳河口至斗龙港	77.6 ~ 80.2	11.9 ~ 12.3	80	25
斗龙港至东灶港	(85.9 ~ 95.1)	23.4 ~ 25.9	0	0
岸外辐射沙洲	85.1 ~ 94.2	6.7 ~ 7.4	-	-
长江三角洲	47.5 ~ 49.5	15.0 ~ 15.6	30	37
长江口	(89.6 ~ 95.2)	61.6 ~ 65.4	0	0
杭州湾北岸	1.9 ~ 2.1	4.2 ~ 4.7	1	100

a) 括号内的数值是淤涨减少的面积

潮滩湿地具有重要的经济与生态价值, 可供围垦、养殖、捕捞与芦苇生产等多方面利用. 损失的面积包括淹没损失、侵蚀损失及减缓淤涨.

2.3 海岸侵蚀

本区侵蚀海岸主要有废黄河三角洲海岸、长江口以北的吕四海岸和长江口以南的南汇嘴南侧海岸以及杭州湾北部海岸. 目前, 本区虽有长江每年 4.8 亿吨泥沙入海、有巨大的苏北辐射沙洲掩护和废黄河水下三角洲侵蚀泥沙供给, 但海岸侵蚀范围仍不断扩大. 如灌河口至长江口之间的潮滩, 1954 ~ 1980 年间年平均侵蚀量 $775 \times 10^4 \text{ m}^3$, 1980 ~ 1988 年间增加为 $1\ 058 \times 10^4 \text{ m}^3$, 较 1980 年前增加 36%^[9]. 海平面上升增强了海洋动力作用, 是引起海岸和潮滩侵蚀加剧的重要因素.

本区海岸侵蚀包括岸线后退和滩面下蚀两种方式. 岸线后退主要发生在废黄河三角洲地区海堤与岸线之间尚有一定距离的岸段. 自 1855 年黄河北归渤海以来, 废黄河口已经后退约 17 km, 目前三角洲海岸仍以 10 ~ 40 m/a 的速度侵蚀后退. 按 Bruun 定律计算, 海平面每上升 1 cm, 海岸将侵蚀后退 2.8 m. 在严重侵蚀的废黄河口, 目前海平面上升速率为 0.15 cm/a, 按 Bruun 定律海岸平均每年后退 0.4 m, 与实际海岸后退速率相比, 海平面上升因素在海岸侵蚀中所占比重仅 1%. 这一地区 2030 年与 2050 年海平面上升量为 20 与 30 cm, 海岸后退速率据近 130 年的递减率计算将从 40 m/a 减少为 21 与 16 m/a, 海平面上升因素可增至 6.6% ~ 8.6%. 长江口两侧的海岸侵蚀主要表现为潮滩下蚀. 结合多年水准测量资料分析, 海平面上升因素在海岸侵蚀中所占比重为 10% 左右. 海平面上升 50 cm 时, 该因素所占比重在长江口以北海岸将提高到 15% ~ 35%, 而在以南海岸则高达 17% ~ 39%.

随着海平面上升因素所占比重的增加, 海岸侵蚀范围将不断扩大. 预计当海平面上升 50 cm 时, 本区侵蚀岸线占总岸线的比例将由目前的 36% 提高到 50% 左右, 若干目前相对稳定的岸段, 岸线长度 160 km, 将陆续发展成侵蚀海岸. 届时, 防护海岸和海堤的费用将成倍增加.

2.4 洪涝灾害

本区绝大部分地区的地面高程(黄海基面)仅 2 ~ 3 m, 仅里下河地区与太湖下游两个洼地 2 m 以下的面积就达 $10 \times 10^3 \text{ km}^2$. 据朱季文等人^[10]对太湖下游地区的研究, 长江口和黄浦江潮流的数值模拟结果是, 海平面上升使感潮河道的高低潮位相应抬高. 潮流顶托作用加强, 导致低洼地向外排水能力下降, 加剧洪涝灾害. 海平面上升 40 cm, 全区低洼地区自然排水能力将下降 20%. 在里下河地区, 许朋柱^[11]完成了海平面上升对射阳河感潮河网区排水影响的数值模拟. 海平面上升 40 cm, 里下河地区排水能力下降 15%. 海平面上升 40 cm, 在现有水利

工程状况下, 里下河地区遇 1991 年型特大洪水、太湖地区遇 1954 年型特大洪水, 两地区累计受淹面积约 4 860 km², 这一情况在太湖湖东洼地将出现于 2050 年前, 在里下河低地出现于 2050 年后。

上海市区防洪墙目前的设计标准是按黄浦公园站千年一遇水位 5.86 m 加高加固的。海平面上升 50 cm, 黄浦公园站 0.1%频率的高潮位将达 6.36 m, 不但防洪墙会出现危险, 而且削弱市区排水能力 20%, 对上海市威胁很大。

2.5 盐水入侵

除长江口外, 本区其他入海口都建有挡潮闸, 因此长江口是本区唯一遭受盐水入侵危害的河口。杨桂山等人^[12]通过建立长江大通站流量、吴淞口潮位、河口地形参数与吴淞口水体含氯度之间的非线性复合定量关系模型, 估算出作为上海城市用水主要取水口之一的吴淞口枯季(12月~次年3月)氯度大于 200×10⁻⁶(宝山钢铁总厂等工业用水氯度上限)与 250×10⁻⁶(居民生活用水标准)的持续时间。随海平面升高和长江入海流量减少, 持续时间呈指数增加(表 4)。南支河段作为长江入海的主要通道, 盐水入侵强度变化对该地区社会经济和人民生活影响很大, 还引起河口生态环境的变化。相关分析结果表明, 海面上升 50 cm 时, 长江口枯季落憩 1‰和 5‰等盐度线入侵距离分别比现在增加 6.5 和 5.3 km, 将对上海城市和周围地区生产和生活带来严重危害, 对河口泥沙沉积和航道演变也有不利影响。

表 4 海面上升 50 cm 时吴淞口枯季不同氯度值的出现时间(h)

水文年	氯度>200×10 ⁻⁶ 出现的时间	氯度>250×10 ⁻⁶ 出现的时间
枯水年	2 027	2 021
平水年	750	639
丰水年	203	146

3 海平面上升影响分区及防治对策

研究区内的自然和社会经济条件均存在地域分异, 不同岸段的相对海面上升幅度及海面上升的影响类型等也有显著差别。根据海平面上升幅度及其影响的相对一致性进行影响分区, 是因地制宜制定防治海面上升对策的基础。分区方法采用海面上升影响指数这一综合指标。本项研究选择相对海面上升量、地面高度、沿海平均潮差、潮滩淤蚀速率、潮滩损失率、海堤需要加高的高度及人口密度与产值密度 8 项评价因子。各评价因子在前述影响预测研究的基础上分为 5 级。例如相对海面上升量的 1~5 级为<30, 31~35, 36~40, 41~45 与≥45 cm。

参考 Gornitz^[13]关于海岸易损性指数的计算公式, 本项研究应用下式计算海平面上升影响指数(SRI):

$$SRI = [(X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_n) / n]^{1/2},$$

式中 X 为评价因子, n 为评价因子总数。

据海平面上升影响指数值, 研究区内可十分明显地划分 4 个海平面上升影响区(图 1)^[14]。SRI>40 为影响最严重(东灶港以南的长江三角洲与太湖湖东低地区), SRI 26~40 为次严重(杭州湾北岸区), SRI 11~25 为影响中等(废黄河三角洲区), SRI<10 为影响较轻(苏北中部滨海平原与里下河低地区)。

3.1 废黄河三角洲

位于灌河口至射阳河口之间, 海岸线长 126 km, 均为侵蚀海岸. 未来相对海平面上升幅度与苏北中部滨海平原和杭州湾北岸两区相似. 海平面上升影响主要是加剧海岸侵蚀和风暴潮灾害, 引起潮滩湿地的侵蚀淹没损失, 影响海岸防护工程的安全. 对严重侵蚀海岸来说, 无论是现状治理还是预防未来影响, 仅靠海堤加高加固是难以确保安全的. 本区海平面上升影响对策, 应采取“预防未来与现状防护相结合, 海堤防护与保滩促淤相结合”的综合预防措施. 治理重点是废黄河口两侧长 26 km 的严重侵蚀岸段. 由于这一岸段潮流与波浪均起重要作用, 在提高海堤标准的同时, 要在近岸滩面建设丁坝、顺坝、潜坝相结合的固滩促淤工程, 保堤又保滩.

3.2 苏北中部滨海平原与里下河低地

位于射阳河口至东灶港之间, 岸线长 571 km, 以淤涨海岸为主, 潮滩宽阔, 但自 80 年代以来, 海岸侵蚀自射阳河口向南逐渐延伸. 滨海平原地面南高北低, 斗龙港以北地势低平, 里下河地区排水由此入海, 河口皆建闸控制, 用于挡潮排水. 本区海平面上升影响的主要类型是地势低洼的里下河地区与沿海垦区的洪涝灾害. 如海平面上升 40 cm, 里下河遇 1991 年型洪水, 受淹农田面积将比 1991 年增加 1/10 左右. 本区由于海岸外有沙洲掩护, 海平面上升对潮滩损失的影响相对较小. 到 2050 年, 斗龙港以北潮滩损失只有 12%, 斗龙港以南潮滩不会淹没损失, 但淤涨面积减少 24% 左右. 本区防治海平面上升的重点是减轻对低洼地洪涝灾害的影响, 要采取整治河道与闸下清淤等措施, 提高排水能力.

3.3 长江三角洲与太湖湖东低地

位于东灶港与漕泾之间, 地貌分区上属长江三角洲的中部和南部. 长江口以北岸线长 77.6 km, 以南岸线长 48.4 km. 本区相对海面上升幅度最大, 海面上升影响最为严重; 海平面上升影响的类型及经济损失有地区差异. (1) 长江三角洲是风暴潮灾严重的地区之一, 风暴潮位有上升的趋势. 本区经济地位重要, 海堤标准较高, 每公里海堤加高加固的费用是其他岸段的 4 倍以上. (2) 加剧海岸侵蚀, 海面上升 50 cm 时该因素在潮滩侵蚀中的比重自 10% 上升至 15%~40%, 潮滩损失率 15% 左右, 一些稳定海岸向侵蚀海岸发展. (3) 太湖湖东低地地面在高潮位以下, 易致洪涝灾害, 海平面上升加剧低地洪涝灾害, 入江河道排水能力下降. (4) 长江口盐水入侵强度随潮位上升而增加, 海平面上升导致长江口盐水入侵距离加长, 氯度增加.

防治海平面上升影响, 不同地区应采取不同的对策. (1) 长江口: 综合开发整治规划的实施, 要考虑海面上升因素; (2) 三角洲两翼海岸: 据海岸动态采取相应的防护工程结构, 侵蚀海岸要重视保滩促淤植物消浪的综合防治; (3) 太湖湖东低地: 要扩大入江河道的排水能力, 加强水闸管理与河道清淤; (4) 上海市区与浦东新区: 上海市区(包括浦东新区)经济发达, 海平面上升的危害严重, 预防海平面上升的影响是极为重要的. 海平面上升的各种影响类型相互作用或迭加, 因此预防措施必须建立在综合分析的基础上(图 2).

3.4 杭州湾北岸

位于漕泾与高阳山之间, 岸线长 102 km, 沿岸动力作用强, 历史上海岸长期侵蚀后退, 全线陆续筑有坚固海堤防护, 已成为人工稳定海岸. 海平面上升将导致风暴潮频率增加, 海岸侵蚀加剧与潮滩淹没. 本区 2050 年海平面上升 25~28 cm, 海堤需加高 20~23 cm. 本区受海面上升影响的程度仅次于长江三角洲. 防治海平面上升影响的重点是提高防御风暴潮灾害的能

力. 本区工业区与农业区相间分布, 要注意对海堤的全面加高加固, 以及对老化海堤的改造. 对重要地段围堤封闭也是必要的.

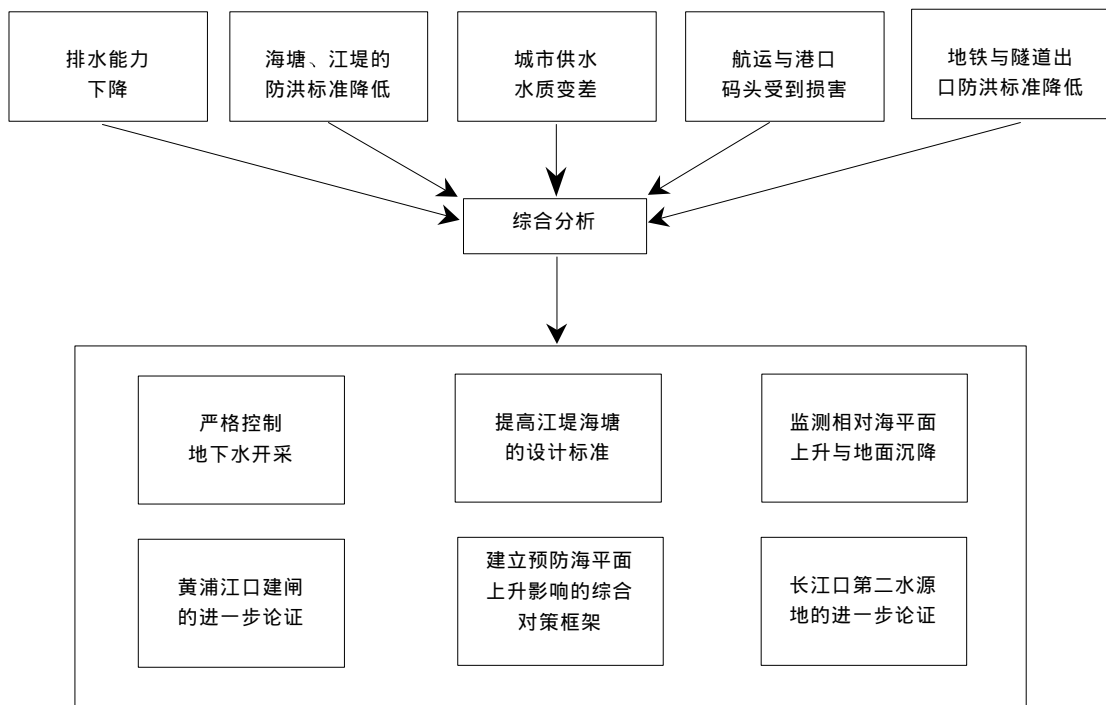


图2 海平面上升对上海市区的影响与预防措施

4 结论

本区地势低平, 地面沉降速率较大, 在全球海平面上升背景下, 1990~2050年间相对海平面上升的最佳估计值是: 上海市在50 cm左右, 长江三角洲北部沿海约45 cm, 苏北滨海平原和杭州湾北岸在25~30 cm之间. 当海平面上升50 cm时, 1%频率风暴潮位将增加38~44 cm, 侵蚀岸线比重由36%提高至50%左右, 长江口枯季落憩时盐水入侵距离增加约6 km. 海平面上升40 cm, 里下河低地和太湖湖东低地排水能力下降15%~20%. 到2050年, 侵蚀海岸、稳定海岸与轻微淤涨海岸的潮滩与湿地面积分别减少13.7%~14.4%与44.3%, 淤涨海岸淤涨面积减少34%~37%. 利用海岸易损性指数计算评价, 区内海平面上升综合影响以长江三角洲与太湖湖东低地最为严重, 杭州湾北岸次之, 废黄河三角洲中等, 苏北滨海平原与里下河低地较轻. 本区人口稠密, 经济发达, 海平面上升影响广泛, 危害很大. 各地在编制社会经济发展规划时要考虑这一因素, 并要根据具体影响类型和影响程度研究制定相应的防治对策, 尽量减轻危害.

致谢 在研究和成文过程中, 得到赵希涛教授以及陈宗镛、黄立人教授等的帮助, 谨此致谢.

参 考 文 献

- 1 陈宗镛, 黄蕴和, 周天华, 等. 长江口平均海面的初步研究. 海洋与湖沼, 1991, 22(4): 315 ~ 320
- 2 陈西庆. 近 70 年长江口海面变化研究及其意义. 地理学报, 1990, 45(4): 387 ~ 398
- 3 谢志仁. 海面变化的未来趋势. 见: 赵希涛, 主编. 中国海面变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 312 ~ 358
- 4 施雅风, 杨桂山. 中国海平面上升及其影响评估. 见: 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. 163 ~ 172
- 5 IPCC Working Group I. Climate Change 1995—the Second Assessment Report of the Intergovernmental Plan on Climate Change. London: Cambridge University Press, 1996. 363 ~ 405
- 6 施雅风. 全球变暖影响下中国自然灾害的发展趋势. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 106
- 7 蒋自巽. 海平面上升对长江三角洲附近地区海堤工程的影响. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 1994, 11 号: 28 ~ 35
- 8 季子修, 蒋自巽, 朱季文, 等. 海平面上升对长江三角洲附近沿海海滩和湿地的影响. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 582 ~ 590
- 9 季子修, 蒋自巽, 朱季文, 等. 海平面上升对长江三角洲和苏北滨海平原海岸侵蚀的可能影响. 地理学报, 1993, 48(6): 516 ~ 526
- 10 朱季文, 毛 锐. 海平面上升对太湖下游地区洪涝灾害的影响. 见: 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 ~ 208
- 11 许朋柱. 海平面上升对里下河地区洪涝灾害的影响. 地理科学, 1994, 14(4): 315 ~ 323
- 12 杨桂山, 朱季文. 全球海平面上升对长江口盐水入侵的影响研究. 中国科学, B 辑, 1993, 23(1): 69 ~ 76
- 13 Gornitz V. Global coastal hazards from future sea level rise. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section), 1991, 3(4): 379 ~ 398
- 14 朱季文, 季子修, 蒋自巽, 等. 海平面上升对长江三角洲及邻近地区的影响. 地理科学, 1994, 14(2): 109 ~ 117