

程和琴 陈吉余 编著

海平面上升 对长江河口的影响研究

HAIPINGMIAN SHANGSHENG
DUI CHANGJIANG HEKOU DE YINGXIANG YANJIU



科学出版社

海平面上升对长江 河口的影响研究

程和琴 陈吉余 编著

内 容 简 介

本书主要从地球系统科学入手,将海平面变化作为地球系统的基本要素,从流域—河口—海洋连续水动力系统角度,分析长江河口吴淞潮位记录(1912~2000年)中的理论海平面变化、构造沉降、三峡大坝导致的河口河槽冲刷、城市地面沉降、河口深水航道整治与促淤围垦工程导致雍水的复合效应;预测2030年长江河口地区海平面将上升10~16 cm;论述长江河口冲淤、水位及水面坡降、航道拦门沙、海岸侵蚀、生态系统对流域边界条件和海平面上升的响应特征;评估海平面上升将要导致的上海市近岸海域潮位上升、潮流流速增大、设计高潮位和设计波高抬升、海塘与除涝和供水安全标准降低等的幅度;探讨上海市长江口水源地供水安全风险,提出海平面上升背景下上海市海岸防护和除涝及长江口水源地供水安全对策;设计和研制中长期海平面上升背景下的上海市供水安全预警系统、上海市应对相对海平面上升的近期、中期和远期应对行动指南。

本书可供地球系统科学、气候变化、灾害防御与减灾的研究人员和管理人员,以及从事地学各分支领域和海岸带地区资源与环境的规划、开发、管理的政府行政人员和科研人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海平面上升对长江河口的影响研究/程和琴,陈吉余编著. —北京:科学出版社,2016.3
ISBN 978-7-03-047273-1

I. ①海… II. ①程… ②陈… III. ①海平面变化-影响-长江-河口-研究 IV. ①TV882.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第027176号

责任编辑:许 健
责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年2月第 一 版 开本:B5(169×239)
2016年2月第一次印刷 印张:26 1/2 插页6
字数:524 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

进入21世纪以来,全球气候变暖和海平面上升的应对策略与行动已成为各国科学界和政府的重要议程。大河三角洲地区遭受海平面上升威胁最为强烈,美国科罗拉多州立大学 Syvitski 教授曾于 2009 年 10 月写信给时任国务院副总理回良玉,指出我国长江、黄河和珠江三大河口是全球遭受海平面上升影响最严重的地区,其中,长江河口三角洲地区经济最发达,故海平面上升的灾害性影响更甚。回良玉副总理将此信批转水利部胡四一副部长,胡副部长批转水利部国科司,希望我负责此项研究工作。

由于“海平面上升对长江河口的影响研究”涉及时间跨度大,需要自然科学、技术科学和社会科学等多学科交叉综合研究,因此是个涉及面较大的研究课题,但又是众多国计民生重大基础亟待解决的问题。为此,我向华东师范大学河口海岸学国家重点实验室提出需要开展“长江河口三角洲地区海平面上升的影响和对策研究”(2008KYYW01)。与此同时,我又向上海市科委建议关注长江口海平面上升对上海市综合影响研究,上海市科委高度关注。2010 年 10 月,上海市科委正式启动了“长江口海平面上升对上海城市安全影响及其应对关键技术研究(总课题)”市级重大科研攻关项目(10dz1210600)。为有效应对海平面上升对上海城市影响,保障上海市防汛安全和长江口水源地供水安全,根据上海市科委统一部署,该总课题分设两个子课题,其中第一子课题为“海平面上升对长江口环境影响的关键技术研究”,由华东师范大学牵头承担;第二子课题为“长江口海平面上升对城市防汛和供水安全影响的关键技术研究”,由上海市水务局牵头承担。此外,程和琴教授除承担上述华东师范大学负责的任务外,还联合上海市水务规划设计研究院参加国家海洋信息中心主持开展的国家海洋公益性重大研究项目“中国海平面变化预测及海岸带脆弱性评估技术与应用”,并承担子课题“海岸带脆弱性评估与城市供水安全风险管理体系分析”(201005019—9),具体开展长江河口地区海平面上升背景下对上海市长江口水源地供水安全风险评估及预警系统的设计。

本书汇集了上述三个项目的综合研究成果,是华东师范大学的河口海岸学国家重点实验室、城市与区域科学学院、生态与环境科学学院,上海市水务局及其所属的上海市水务规划设计研究院、上海市水文总站、上海市供水管理处,上海市规划和国土资源管理局及其所属上海市地质调查研究院,以及国家海洋局东海预报台等 10 个科研和监测机构有效、通力协作的结晶。

应该说,本书从流域—河口—海洋连续水动力系统角度,分析长江河口吴淞潮位记录(1912~2000 年)中的理论海平面变化、构造沉降、三峡大坝导致的河口河槽冲刷、城市地面沉降、河口深水航道整治与促淤围垦工程导致雍水的复合效应,预测 2030 年长江河口地区海平面将上升 10~16 cm。海平面上升将导致近岸海域潮位上升、潮流流速增大,设计高潮位和设计波高抬升,海塘防潮和供水安全标准降低。为此,提出上海市应对相对海平面上升的近期、中期和远期应对行动指南。

上述成果为上海市人民政府颁发《上海市海塘规划(2011—2020 年)》(沪府【2013】88 号文件)提供了重要的技术支撑。值得欣慰的是该项规定已进入工程实施阶段。而且,上述成果也为上海市长江口水源地供水安全标准和 2030 年水资源规划提供了重要技术支持。

但是,随着全球气候变化发生了新的变化形势和新一轮的长江经济带建设,需要进一步研究长江河口海平面变化趋势,尤其是最新探测和研究显示长江河口可能面临着三峡大坝截流 12 年后发生全面冲刷的严峻局面和形势,更需尽快加强海平面变化影响众多因子的监测网建设,为保长江三角洲地区人民生命财产安全提供最基本保障。

总之,有关海平面变化对长江口的影响监测和研究任重道远,决不可懈怠!

在本书编写过程中得到了陈祖军、阮仁良、徐贵泉、曾刚、朱建荣、戴志军、陈小勇、顾圣华、沈于田、赵敏华、费岳军、陈国光、高程程、张先林、王寒梅等的指导和帮助,同时也得到了众多博士生、硕士生们的帮助。此外,还得到了华东师范大学河口海岸学国家重点实验室学术著作出版基金的资助,在此一并表示感谢!

中国工程院院士

FOREWORD | 前 言

本书是笔者自2009年以来在陈吉余院士的领导和指导下,开展海平面变化研究与实践的阶段性总结。书中内容凝聚了华东师范大学河口海岸学国家重点实验室课题“长江河口三角洲地区海平面上升的影响和对策研究”(2008KYYW01)、上海市科委重大科研攻关项目(10dz1210600)“长江口海平面上升对上海城市安全影响及其应对关键技术研究”和国家海洋公益性重大研究项目“中国海平面变化预测及海岸带脆弱性评估技术与应用”的子课题“海岸带脆弱性评估与城市供水安全风险管分析”(201005019-9)等三个项目的参研教师、工程师和众多硕博研究生们的智慧。他们来自华东师范大学的河口海岸学国家重点实验室、城市与区域科学学院、生态与环境科学学院,上海市水务局及其所属上海市水务规划设计研究院,上海市水文总站,上海市供水管理处,上海市规划和国土资源管理局及其所属上海市地质调查研究院,以及国家海洋局东海预报台等10余家机构。在此表示衷心地感谢!

特别需要提到的是笔者在从事海平面研究过程中,亲身感受到真正开创了我国河口海岸学事业的陈吉余老先生的学识和海人不倦的风范。记得在我赴启东参加长江口北支航道开发论证会那天,年已87岁的陈老先生早上8点便从家里赶到办公室,一字一句地教我如何发言、表达学术见解。更加使我难以忘怀的是2011年酷暑期间,年已90岁高龄的陈老先生亲临南汇东滩测量现场将我和我的学生们接回上海休整、指导。这些经历将是我未来战胜更多困难的勇气和动力。

海平面上升是海岸波浪条件、风暴强度和海洋环流模式变化中占主导地位的驱动力,将持久和长期危害全球。而且,海平面上升正在加速,预计将持续几个世纪,沿海风暴和洪水将增强。因此,迫切需要海平面上升的适应性规划、建议与可靠的、经过验证的模型预测。我将坚持不懈,持续开展海平面变化研究为国计民生服务。

本书各章编著人员如下：第一章 长江口相对海平面变化预测分析，程和琴、王冬梅、陈吉余；第二章 河口冲淤和水位变化对流域边界条件和海平面上升的响应特征，戴志军、宋泽坤、程和琴；第三章 长江口海平面上升对盐水入侵和淡水资源影响，朱建荣；第四章 长江河口航道拦门沙对海平面上升的响应，和玉芳、程和琴、陈吉余；第五章 海岸侵蚀对海平面上升的响应，计娜、程和琴、戴志军；第六章 长江口海平面上升与河口水下人工生态工程构建，陈小勇；第七章 海平面上升对城市防汛和供水安全综合影响评估，陈祖军、朱建荣、毛兴华、高程程；第八章 海平面上升对城市防潮标准和供水安全标准影响研究，陈祖军、徐健、李世阳、肖文军；第九章 海平面上升背景下上海市长江口水源地供水安全风险评估及对策，塔娜、程和琴、朱建荣、阮仁良、陈吉余；第十章 海平面上升背景下上海市水源地供水安全预警系统研究与设计，周莹、程和琴、塔娜、江红、阮仁良、赵敏华；第十一章 应对海平面上升上海市城市安全和发展的战略选择，曾刚。

感谢河口海岸科学研究院和河口海岸学国家重点实验室前任党委书记王平、陈吉余院士秘书金文华、河口海岸学国家重点实验室江红以及其他多位老师的鼎力协助！

本书还得到了国家自然科学基金(41340044、41476075)与河口海岸学国家重点实验室学术著作出版基金的资助，在此表示衷心的感谢！

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 程和琴

序

前言

绪言	1
第一章 长江口相对海平面变化预测分析	4
1.1 引言	4
1.2 数据和方法	5
1.3 2030 年 ESL 上升预测值	9
1.4 ESL 上升原因讨论	11
1.5 上海市 2030 年 RSL 上升预测及其风险分区	12
1.6 结论	14
第二章 河口冲淤和水位变化对流域边界条件和海平面上升的响应特征	15
2.1 流域边界条件	15
2.2 长江河口的悬浮泥沙及其河槽冲淤特征	19
2.3 海平面上升对河口水面比降影响及其模拟分析	28
2.4 结论	34
第三章 长江口海平面上升对盐水入侵和淡水资源影响	35
3.1 引言	35
3.2 长江河口盐水入侵三维数值模式的建立和验证	39
3.3 一至三月保证率 90% 径流量、海平面未上升和上升 5 和 10 cm 情况下 盐水入侵及其变化	68
3.4 总结	87

第四章	长江河口航道拦门沙对海平面上升的响应	89
4.1	引言	89
4.2	近百年来长江河口航道拦门沙的形态演变特征	90
4.3	长江河口航道拦门沙对海平面上升响应	97
第五章	海岸侵蚀对海平面上升的响应	103
5.1	引言	103
5.2	国内外研究现状	104
5.3	长江河口岸滩演变特征	106
5.4	海岸冲刷与淤积趋势分析	129
第六章	长江口海平面上升与河口水下人工生态工程构建	135
6.1	上海市滩涂盐沼植被	135
6.2	河口水下人工生态工程构建	137
6.3	河口水下生态工程	144
6.4	应对海平面上升的水下生态工程	147
第七章	海平面上升对城市防汛和供水安全综合影响评估	151
7.1	沿江沿海潮型响应海平面上升关系研究	151
7.2	海平面上升对海岸防护影响评估	169
7.3	海平面上升对区域防洪排涝影响评估	230
7.4	海平面上升对盐水入侵、供水安全影响评估	241
第八章	海平面上升对城市防潮标准和供水安全标准影响研究	250
8.1	海平面上升对上海市沿江沿海不同重现期设计高潮位影响研究	250
8.2	海平面上升对城市防潮安全标准影响研究	257
8.3	海平面上升对城市供水安全标准影响研究	259
第九章	海平面上升背景下上海市长江口水源地供水安全风险评估及对策	274
9.1	引言	274
9.2	上海市水资源及其利用现状分析	280
9.3	海平面上升背景下上海市水源地供水安全模型	283
9.4	上海市水资源供需量预测	289
9.5	上海市主要水源地供水安全风险评估	305
9.6	结果与建议	309

第十章 海平面上升背景下上海市水源地供水安全预警系统研究与设计	312
10.1 引言	312
10.2 海平面上升背景下上海市水源地供水安全预警研究	320
10.3 海平面上升背景下上海市水源地供水安全预警系统的设计	338
10.4 海平面上升背景下上海市水源地供水安全预警系统的实现	343
10.5 海平面上升背景下上海市水源地供水安全预警系统的使用说明 ..	349
10.6 上海市水源地供水安全预警的对策、建议和措施	374
10.7 结论	376
10.8 展望	378
第十一章 应对海平面上升上海市城市安全和发展的战略选择	379
11.1 引言	379
11.2 国外滨海城市应对海平面上升的经验借鉴	380
11.3 上海应对海平面上升的社会经济形势	384
11.4 上海应对海平面上升的行动	390
参考文献	396

绪 言

海平面是地球系统的基本要素,海平面变化是地球系统科学研究的基本内容。进入 21 世纪以来,全球气候变暖引起全球海平面持续上升,沿海地区尤其是河口三角洲地区遭受海平面上升威胁最为强烈(Milliman et al., 1989; Syvitski et al., 2009; Torbjorn et al., 2008; Meyssignac et al., 2012; Gornitz, 2001; Kabat et al., 2009; 任美镠等, 1993; 刘岳峰等, 1999; 肖笃宁等, 2003; 谢志仁等, 2003), 海平面上升的应对策略与行动已成为各国科学界和政府的重要议程(Cazenave et al., 2013; Brown et al., 2013; Katsman et al., 2011; Nicholls et al., 2010)。但是, 自 20 世纪 90 年代以来, 海平面上升对河口三角洲地区影响的研究热点逐渐从全球理论海平面上升转向区域相对海平面上升, 主要原因是相对海平面上升速率可能为前者的数十甚至上百倍(Milliman et al., 1989; 任美镠等, 1993), 对该地区城市发展的危害更为严重。而且, 全球 32 条大河流域强烈人类活动导致入海泥沙通量快速减少, 其与海平面上升、地面沉降叠加, 可能导致河口拦门沙等地貌单元消失(Mikhailova et al., 2010; Reeve et al., 2009), 使大河河口三角洲地区城市环境、生态及众多国计民生工程处于危险境地, 我国的长江、黄河和珠江河口三角洲地区亦在最危险之列(Syvitski et al., 2009)。

世界上 80% 的百万人口以上的城市分布在河口海岸地区(图 0-1), 许多国际大城市就处于河口三角洲, 这些城市中心城区的地面高程低于高潮位, 风暴潮、洪水等灾害随着气候变暖、海平面上升不断叠加并放大, 使河口城市海岸防护、排涝和供水安全风险增大。如 1953 年北海风暴潮给莱茵河口地区带来严重灾难, 死亡近 2 000 人, 淹没土地 20 万 hm^2 (Smith, 2006); 2005 年卡特里娜飓风导致位于美国密西西比河口的新奥尔良市损毁严重(Miguel et al., 2007); 2011 年泰国湄南河口三角洲地区洪灾导致国家经济遭到重创, 全球供应链遭到破坏和中断(World Bank, 2011); 2012 年 10 月 30 日“桑迪”飓风袭击美国带来狂风暴雨, 美国部分地区积水达 2 m, 造成至少 500 亿美元的损失, 美国首都华盛顿特区和纽约等 5 个州均宣布进入紧急状态(Gordon, 2013); 2014 年 1~2 月英国遭遇了 250 年来最严重的洪灾, 成千上万房屋被淹没(National Climate Information Center, 2014); 1997 年“9711”号超强台风导致长江河口三角洲地区灾情严重(上海市人民政府交通办公室, 1997); 2013 年 10 月 7 日, 台风“菲特”使得浙江余姚遭遇新中国成立以来最严重水灾, 70% 以上城区受淹, 损失严重(王建平, 2014); 2015 年 8 月 24 日, 超强台

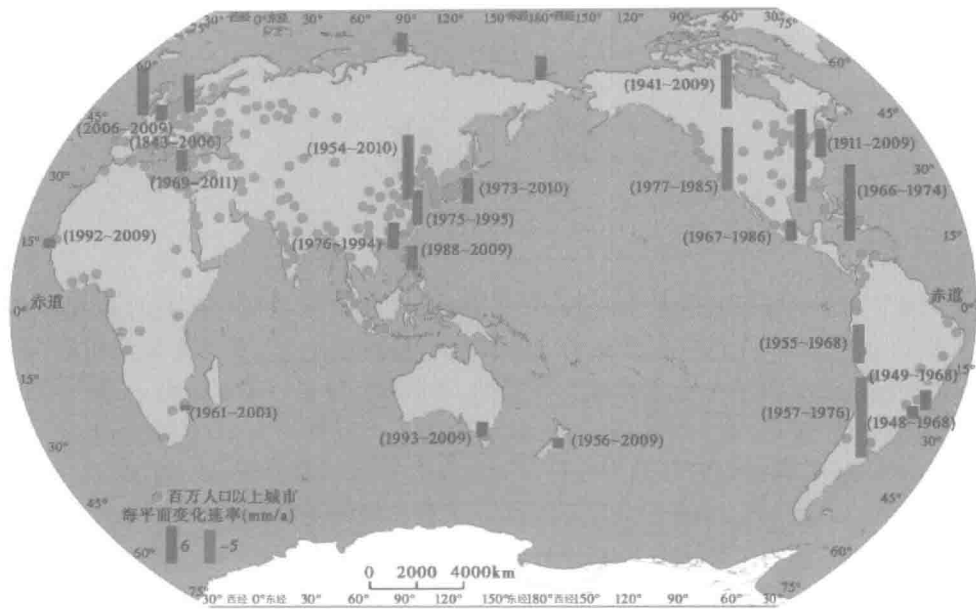


图 0-1 世界百万人以上城市及主要河口城市海平面变化

注：图中蓝色正值表示上升，绿色负值表示下降；数据来源于 PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level)，即英国利物浦平均海平面常设办事处

风“天鹅”使得上海虹桥机场积水严重、地铁营运受搅。

同样，海平面下降也会对河口三角洲地区社会经济带来灾害性影响，如长江三角洲地区大约 3.8 kaB. P. 时气候向冷干突变转型，海平面下降，导致新石器文化最高阶段的良渚文化突然消失(黎兵等, 2011)。

上海市位处长江河口，是我国的经济、金融、航运和贸易中心，大部分地面高程在高潮位以下，中心城区地面高程普遍小于 3.5 m(吴淞基面，下同)，最低处为 2.2 m，受相对海平面上升威胁显著(陈西庆, 1990)。因此，长期以来上海市一直重视相对海平面对城市环境、社会、经济安全的危害性影响评估。1931 年上海工务局已开始注意到地面标高的损失(即地面沉降)，并开展监测；1956 年上海市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；1994 年上海市政府开始组织研究和评估海平面上升的影响，其以吴淞潮位站为基准站；1996 年针对 IPCC AR1 报告提出理论海平面上升速率 1~2 mm/a(上海市水利局, 1996)，并叠加当时地面沉降和构造沉降的研究成果，预计到 2010 年、2030 年和 2050 年上海海平面分别上升 10~25 cm、20~40 cm 和 50~70 cm，即相对海平面上升速率为 7.5~12.5 mm/a(陈西庆, 1990)，为当时的上海市重大工程建设、城市规划与建设提供了重要依据。

但是，上海吴淞潮位站 1990~2010 年实测平均海平面上升 5.2 cm，即

2.6 mm/a(华东师范大学等,2013),远小于 1996 年的预测值 24 cm(陈西庆,1990),也与 20 世纪 90 年代以来全球理论海平面升速加快至 1.80~5.95 mm/a(IPCC,2013)不符。究其原因,可能是长江河口地区海平面变化的区域主控因子出现了新的情况,即虽然浦东大力开发,高层建筑和密集建筑群、城市轨道交通系统形成的点状、线状工程建设导致地面沉降,但地面沉降控制措施有效(王寒梅,2010)。而且,流域内三峡大坝、南水北调等一系列拦、蓄、引、调水利工程和水土保持及大规模河道采砂等人为干扰活动增强,导致长江口来水来沙逐年减少,特别是 2003 年三峡水库蓄水以来,大通站输沙率已降至 1.5×10^8 t/a(2003~2008 年平均值),仅相当于过去的 1/3,2010 年更是下降到水下三角洲、河口河槽和水下岸滩侵蚀不断加剧及水位下降(Dai et al.,2012; Dai et al.,2014; He Yufang et al.,2013; 计娜等,2013)。同时,河口海岸大规模滩涂围垦、深水航道、边滩和心滩水库、跨江和跨海大桥建设导致水位抬高(程和琴等,2009; 杨正东等,2012)和深度基准面抬升(上海海事局海测大队,2013),南汇嘴至芦潮港岸段水下岸坡闭合水深近 10 年来刷深约 1 m(计娜等,2013)。

鉴于 IPCC 第五次评估报告(IPCC,2013)和中国应对气候变化的政策与行动 2013 年度报告均未考虑上述流域与河口工程对河口相对海平面上升幅度的影响,而长江流域拦、蓄、引、调水持续增强以及来沙持续减少与河口大型工程建设持续增多,河口相对海平面变化的不确定性增大,而且自 1996 年至 2013 年上海市人口增加 58%,国民生产总值增长了 5.8 倍,还有临港新城、漕河泾化工区等重要新城区开发,海平面上升导致的城市海岸防护、防洪排涝、供水风险增大(华东师范大学等,2013;程和琴,2013;程和琴,2012;程和琴,2015a;程和琴,2015b)。

为此,需要重新评估开展新形势下的长江河口海平面上升幅度及其对防汛和供水安全的影响。

第一章 长江口相对海平面变化预测分析

从全球气候变化区域响应角度,依据 1912~2000 年吴淞验潮站年平均潮位资料,构建灰色线性回归组合模型,并将其与最小二乘法和小波变换相结合,分析以吴淞为代表的上海绝对海平面长期变化趋势和周期变化规律。由此预测 2030 年上海绝对海平面相对 2011 年的上升值为 4 cm,结合已公布的构造沉降和城市地面沉降、流域水土保持和大型水利工程及人工挖沙导致的河口河槽冲刷、河口围海造地和深水航道及跨江跨海大桥导致水位抬升等叠加效应及其变化趋势,预测 2030 年上海市相对海平面上升 10~16 cm,陆地海平面上升有 7 个风险分区。

1.1 引言

海平面是地球系统的基本要素,也是大地水准面和流域侵蚀基准面,更是一切国计民生工程的最基本工程设计和安全参数,也与江、河、湖、海及平原地区的环境容量直接相关。因此,海平面变化不仅是地球系统科学研究的基本内容(程和琴等,2015),更是流域与沿海地区生态文明建设和沿江沿海人民生命财产安全研究的基本内容。

对海平面变化的长期预测是个跨学科、难度较大的研究课题,目前国际上大多依据对海平面上升的主要因子——地球大气温室效应气体排放的估算、动力学计算和数值模拟等方法进行海平面变化的长期预测(秦曾灏等,1997;IPCC, 2013)。据 IPCC AR5 2013 年公布的结果(IPCC, 2013),全球海平面最低、最高上升量预测的变动幅度为 2046~2065 年 17~32 cm(RCP2. 6)、19~33 cm(RCP4. 5)、18~32 cm(RCP6. 0)、22~38 cm(RCP8. 5),预测全球气候变暖导致海平面上升速率加快,严重威胁沿海地区特别是河口三角洲地区的安全。我国的京津冀、长三角、珠三角、环渤海等沿海主要经济发达地区的环境、生态、经济和社会将受到显著影响(Syvitski et al., 2009;施雅风,2000)。

但是,区域海平面变化主要影响因素中,全球变暖的贡献一般小于构造沉降、城市地下水抽取、人工挖沙和河口工程等其他因素的贡献,但其本身的物理意义与其他因素不同,如工程因素可以通过人工手段防治,而全球变暖的作用是长时间尺度的、缓慢的变化,并且是叠加在其他因素之上的另一种作用,有着特殊性。所以,

近 30 年来全球变暖导致海平面上升受到世界各国政府、科学家的普遍关注和持续监测研究。

上海地处长江河口三角洲,是国际超大型城市和国际经济、金融、航运、贸易中心。20 世纪 90 年代曾参考 IPCC(1990)(IPCC, 1990)报告中绝对海平面(ESL)上升速率为 $1\sim 2\text{ mm/a}$,根据 1912~1993 年吴淞验潮站年平均潮位资料,采用多变量逐步回归和最大熵谱分析方法,分析和预测了 2010 年和 2030 年上海绝对海平面相对 1990 年的上升值分别为 5 cm 和 11 cm,即 $2.0\sim 2.5\text{ mm/a}$ (程和琴等,2015;陈西庆,1990;上海市水利局,1996)。本书依据经过地面沉降订正后的吴淞、高桥、芦潮港、堡镇和金山嘴历史实测潮位资料,分析以吴淞潮位站为代表的上海 ESL 历史变化规律,并依此规律建立预测模型,对未来上海 ESL 的长期变化做尝试性预测。在此基础上,结合上海地区自 20 世纪 90 年代以来构造沉降和工程因素的综合影响,对 2030 年上海地区相对海平面变化(RSL)进行中长期预测(华东师范大学等,2013)。

1.2 数据和方法

1.2.1 数据

本书 ESL 分析采用经过地面沉降订正和水尺基点校正后的吴淞(1912~2000 年)、高桥(1965~2011 年)、芦潮港(1977~2011 年)、堡镇(1965~2011 年)实测潮位资料(图 1-1)。因需要预测的是年平均海平面,即年平均半潮面,鉴于年平均潮

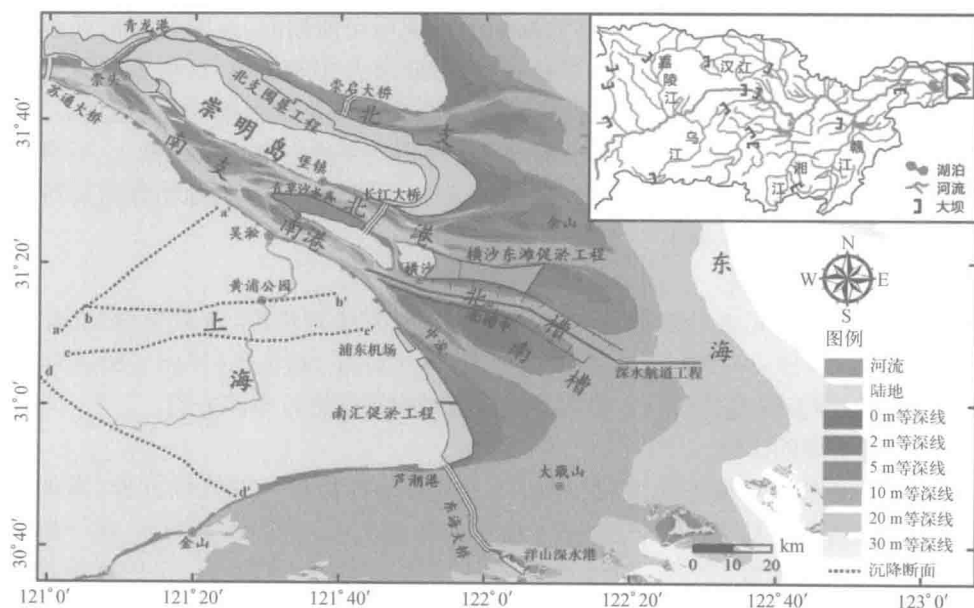


图 1-1 长江河口、杭州湾北岸潮位站和长江流域主要水库大坝及河口主要工程

位与年平均半潮面的显著线性正相关关系(0.99)(华东师范大学等,2013;毛兴华等,2013),本书将年平均潮位作为年平均海平面。考虑到地处长江河口的上海地区自20世纪90年代中后期以来,承受着长江流域一系列拦、蓄、引、调水利工程,水土保持和人工采砂引起的入海水沙减少、河槽冲刷(程和琴等,2015;张晓鹤等,2015)、水位下降(He et al., 2013),以及河口一系列围海造地、深水航道、水库、大桥等工程(图1-1)导致的河槽缩窄、纳潮量减少、水位抬升即工程雍水等(程和琴等,2009;上海海事局海测大队,2013;杜景龙等,2007;刘新成等,1999)复合影响(华东师范大学等,2013;王冬梅等,2011),本书根据吴淞、高桥、芦潮港、堡镇4个潮位站年平均海平面和年平均半潮面差值(上海海事局海测大队,2013),对这4个潮位站的潮位记录分别进行了工程因素影响水位订正。

1.2.2 研究方法

为了与20世纪90年代研究结果相比,本书采用秦曾灏等的研究思路(秦曾灏等,1997),即将年均海平面的时变特征 $Y(t)$ 描述如下:

$$Y(t) = T(t) + R(t) + N(t) \quad (1-1)$$

分析式(1-1)中确定性的周期项 $R(t)$ 和趋势项 $T(t)$,不考虑可能由于误差的积累而无意义的随机噪声项 $N(t)$ 。采用小波分析方法确定 $R(t)$ 。采用灰色线性回归组合模型(侯成程等,2013)和最小二乘法(秦曾灏等,1997)两种方案计算确定 $T(t)$ 。

事实上, $T(t)$ 的精确确定要将数据中的周期尽可能消除,这要求出数据的真实周期;而周期分析要求数据是平稳的,它又要求去掉趋势项,这两者互为前提的特性使得我们尽可能地将原始数据系列处理成含有某些周期的平稳过程。因此,对吴淞、高桥、芦潮港、堡镇、金山嘴等5个潮位站年平均潮位资料做19年滑动平均以基本消除各种周期震荡(秦曾灏等,1997),获得相对平稳的原始数据系列。

1.2.2.1 计算方案 I

(1) 周期项的确定

综合考虑上海市潮位站的地理位置及数据时间序列情况,选取吴淞(1912~2000年)、高桥(1965~2011年)、芦潮港(1977~2011年)和堡镇(1965~2011年)4个潮位站的年均潮位值资料,对年均半潮面值时间序列进行小波分析。

(2) 趋势项的确定

迄今为止的绝对海平面变化预测方法,主要是利用单一的线性方程(秦曾灏等,1997)或者灰色GM(1,1)模型表示海平面变化率(王冬梅等,2011)。由于单一预测模型有信息涵盖不全面、预测精度不高的缺陷,而两种或两种以上的无偏预测模型可以组合出优于任一个单一无偏预测模型的组合模型,能够解决单一预测模型的这一缺陷。因此,本书采用上述两种无偏模型的拟合,即灰色GM(1,1)模型

叠加线性回归组合——灰色线性回归组合,用于上海市绝对海平面上升趋势的预测。具体表达海平面的变化速率为

$$\frac{dx^{(0)}(t)}{dt} = \frac{d^2 x^{(1)}(t)}{dt^2} = a^2 \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-at} \quad (1-2)$$

其中 a 和 u 为灰参数,由下式获得

$$\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (1-3)$$

$$\text{其中, } B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)) & 1 \end{bmatrix};$$

$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(N)]^T$ 。

预测公式按下述方法进行精度检验:

$$\bar{x}^{(0)} = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M x^{(0)}(t) \quad (1-4)$$

$$s_1^2 = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M [x^{(0)}(t) - \bar{x}^{(0)}]^2 \quad (1-5)$$

$$\bar{\epsilon}^{(0)} = \frac{1}{M-1} \sum_{t=1}^M \epsilon^{(0)}(t) \quad (1-6)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{t=2}^M [\epsilon^{(0)}(t) - \bar{\epsilon}^{(0)}]^2 \quad (1-7)$$

然后,计算方差比 $c = s_2/s_1$ 以及小误差概率

$$p\{|\epsilon^{(0)}(t) - \bar{\epsilon}^{(0)}| < 0.6745s_1\} \quad (1-8)$$

表 1-1 灰色预测精度检验等级标准

精度等级 \ 检验指标	p	c
好	>0.95	<0.35
合格	>0.80	<0.50
勉强	>0.70	<0.65
不及格	≥ 0.70	≤ 0.65