

# 洪季长江口径流量与近海海平面的响应关系

匡翠萍<sup>1</sup>, 陈 维<sup>1</sup>, 顾 杰<sup>2</sup>, 贺露露<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;

3. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 为了分析长江口洪季径流量对其近海海平面上升的影响权重, 基于 1950~2011 年大通站实测洪季月均径流量资料, 统计分析出大通站洪季发生频率为 25%, 50% 和 75% 时对应的径流量以及多年平均径流量, 并利用长江口杭州湾潮流数学模型, 计算分析长江洪季径流量对长江口口内平均潮位和近海海平面的影响。研究结果表明: 随着径流量的增加, 整个计算区域的平均潮位也随之增大, 且从上游到口外平均潮位增幅沿程减小, 近海南部平均潮位增长幅度比近海北部大。口内及近海平均潮位与径流量呈正相关关系, 在径流量增加  $20\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下, 杭州湾大部分区域平均潮位增加  $0.005 \sim 0.010\text{ m}$ 。

**关键词:** 长江口; 径流量; MIKE 21 软件; 海平面; 洪季

**中图分类号:** P753

**文献标志码:** A

## Response of Offshore Sea Level to River Discharge in Flood Season in Yangtze Estuary

KUANG Cuiping<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, GU Jie<sup>2</sup>, HE Lulu<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306 China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** To clarify the impacts of river discharge on offshore sea level in the Yangtze estuary. Based on the river discharge frequency of 25%, 50% and 75% as well as multi-year monthly discharge statistically calculated from measured runoff from 1950 to 2011 at Datong Station in the Yangtze River, the impacts of river discharge on offshore sea level were computed and analyzed using the tidal model of the Yangtze estuary and the Hangzhou Bay. The numerical results indicate that the mean tidal levels of the whole computational region rise as the river discharge increases, and the amplification decreases from upstream to the entrance. The

amplification of the southern part is greater than that of the northern part in the offshore area. The mean tidal level has a very good positive correlation with river discharge in the Yangtze estuary. When the river discharge increases by  $20\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , the area where the mean tidal levels increase by  $0.005 \sim 0.010\text{ m}$  covers most of the Hangzhou Bay.

**Key words:** Yangtze estuary; river discharge; MIKE 21; sea level; flood season

长江口是我国第一大河口, 其径流量仅次于亚马孙河和刚果河, 位居世界第三, 潮流亦强, 在这两股强劲动力的相互作用下构成了长江口有规律的分汊。长江口河段呈三级分汊和四口入海的河势格局, 有北支、北港、北槽和南槽 4 个人海通道。2012 年中国海平面公报<sup>[1]</sup>显示, 1980~2012 年东中国海的海平面上升速率为  $2.0 \sim 3.0\text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 而根据 2013 年的 IPCC(政府间气候变化专业委员会)气候变化评估报告, 1901~2010 年全球海平面上升速率为  $1.7\text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。东中国海平面上升速度高于全球平均水平, 其机理尚不清楚。海平面上升将引起一系列的自然环境灾害, 对沿海地区人们的日常生活和生命安全构成威胁, 其引起海平面上升的各种原因已经引起了全球的高度关注。

从大的范围讲, 全球平均海平面变化的机制可归纳为两个主要因素: 一个是海水质量的变化, 包括雪、冰的溶化和累积, 以及通过降水、蒸发、径流与大气和陆地之间水的质量交换; 另一个因素是由海水的密度变化(包括温度和盐度的变化)引起的体积变化, 称之为比容效应。陈立奇等<sup>[3]</sup>研究了热膨胀、冰川、冰帽、格陵兰冰盖以及南极冰盖对海平面变化的贡献量, 研究结果表明格陵兰冰盖全部融化估计会

收稿日期: 2014-05-27

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB957704); 浙江工业大学重中之重学科开放基金(20150305)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为河口海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈维(1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为港口、海岸及近海工程。E-mail: chenwei\_112233@163.com

使全球海平面上升 7 m;冯伟等<sup>[4]</sup>探讨了海水比容变化和海水质量变化对中国南海海平面变化的影响,研究结果表明海水质量的变化会引起南海平均海平面的变化.除此之外,还有其他因素也可能导致海平面的变化,如杨春辉等<sup>[5]</sup>研究菲律宾以东太平洋海区 Rossby(罗斯贝)波与海平面年际变化的关系,反映了海平面年际变化特征和低(高)异常信号由东侧产生并向西传播的过程;李艳芳等<sup>[6]</sup>研究了海面风的年际变化对海平面变化的影响,研究结果表明海平面的年际变化与赤道流相关系数达 0.6,风主要是通过 Ekman(艾克曼)作用影响海平面变化.

然而,大多数研究者对海平面贡献的研究集中在冰盖方面,忽略了河流径流量对近海海平面上升的影响因素.河流径流量对河口地区及近海将产生重要的影响,除了能引起河口及近海海平面的变化外,河流径流量还对河口地区的盐度<sup>[7-9]</sup>、浑浊带<sup>[10]</sup>、环流<sup>[11]</sup>以及潮波传播<sup>[12]</sup>等产生重要的影响.本文重点研究河流径流量对近海海平面上升的影响,利用软件 MIKE 21 建立长江口杭州湾二维潮流数学模型,分析长江洪季径流量对长江口河口及近海海平面的响应关系(本文的海平面值指典型年 5~10 月的平均潮位).

## 1 二维潮流数学模型

### 1.1 模型简介

MIKE 21 是丹麦水力学研究所(DHI)<sup>[13]</sup>研发的通用数学模拟系统,主要模拟河流、湖泊、河口、海洋及海岸的水流、波浪、泥沙及环境变化,为工程应用、海岸管理及规划提供了完备、有效的设计环境. Mike 21 Flow Model (FM) 子模块属二维潮流模型,根据 Boussinesq 假设、静水压力假设、浅水条件和适定边界条件,通过控制体积法求解由不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 概化的浅水方程.

### 1.2 模型计算范围及网格

模型计算范围北到江苏泰州以北(北纬 32.5°),南至浙江健跳以南(北纬 29°),西至长江口江阴和杭州湾仓前,东至东经 124°.模型采用无结构三角形网格(见图 1),网格节点数为 29 424,网格单元数为 55 325,空间步长在 0.008°~0.160°的范围内.

### 1.3 模型参数设置

模型糙率采用曼宁系数,数值范围为 0.012~0.014,时间步长由模型自动调节,为 0.000 1~30 s,模型计算采用冷启动,科朗数限值为 0.8,上边界河

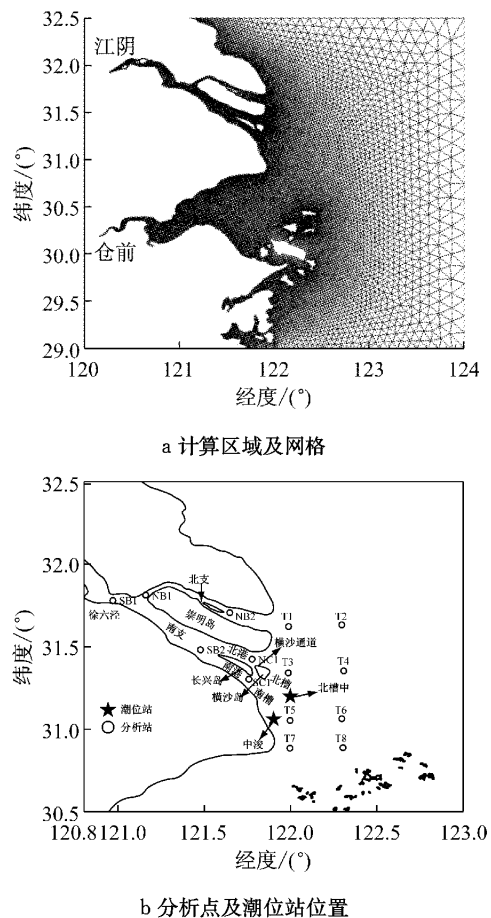


图 1 模型计算网格、分析点以及潮位站位置

Fig.1 Computational mesh, locations of tidal level survey and representing stations

流边界采用流量控制,下边界外海边界条件采用东中国海大模型<sup>[14]</sup>计算得到的潮位时间序列控制.模型采用动边界处理技术,模型中干点临界水深取 0.005 m,湿点临界水深取 0.05 m,干、湿点临界水深之间保留 0.1 m 的差值有利于提高模型的稳定性.

根据大通径流量和江阴径流量的相关性分析<sup>[15]</sup>,江阴径流量和大通径流量基本相等,故本模型的江阴边界流量条件采用大通径流量,钱塘江仓前边界径流量取  $1\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2 模型的验证

模型验证采用长江口长时间序列的实测潮位资料,江阴边界采用大通水文站实测流量过程控制.模型计算时间从 2005 年 8 月 1 日 1:00 开始,到 2005 年 8 月 19 日 23:00 结束,计算 19 d.模型验证时间为 2005 年 8 月 15 日 0:00 到 8 月 19 日 9:00<sup>[15]</sup>.潮位站位置如图 1 所示.验证结果见图 2.

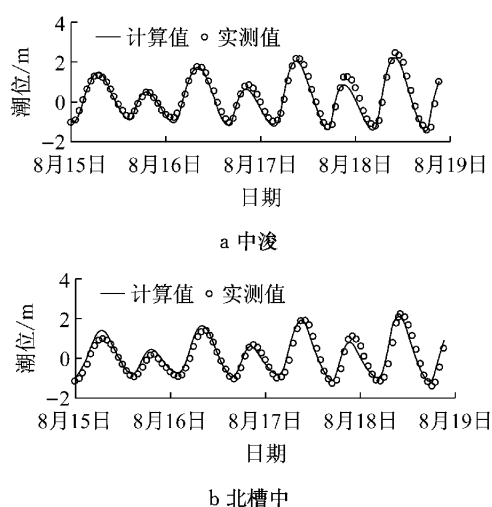


图2 潮位验证

Fig.2 Verification of tidal level

为了定量评价潮流模型模拟结果的优劣,需要寻求一个评价标准来进行衡量. Allen 等<sup>[16]</sup>提出了一个评估模型好坏的方法,定义如下式:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}} - X_{\text{mod}})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}})^2}$$

式中: $E$ 是模型效率系数; $X_{\text{mod}}$ 是模型计算值; $X_{\text{obs}}$ 是实测值; $\bar{X}_{\text{obs}}$ 是实测值的均值; $N$ 为实测值的个数.根据 $E$ 的大小,确定模型的优劣: $E > 0.65$ 时,模型效率极好; $0.50 < E \leq 0.65$ 时,模型效率较好; $0.20 < E \leq 0.50$ ,模型效率好; $E \leq 0.20$ 时,模型效率较差.应用该式计算本模型的 $E$ 值,得到中浚和北槽中潮位验证点的 $E$ 值分别为0.92和0.87,因此本模型的模型效率是极好的.河口近岸区域的潮位受很多因素的影响,如潮汐、径流量、风、河口形状以及人类活动等,而潮流模型模拟结果不可能完全能与实测值吻合,经评估模型的评价,模型的误差是在可接受的范围内,可以用于计算分析长江口径流量对长江口河口及近海海平面上升的贡献.

### 3 海平面变化分析

#### 3.1 径流量变化引起的潮位过程变化分析

基于1950~2011年大通站月均径流量资料,洪季考虑5~10月,分别统计多年平均径流量以及洪季频率为25%,50%和75%的径流量.经统计计算分析,洪季频率为25%,50%和75%的径流量分别为43 800,39 600和35 400  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,多年平均流量为23 800  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

分别采用径流量23 800,35 400,39 600和43 800  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 作为模型的江阴边界条件,通过计算得到SB1,SB2,NB1,NB2,NC1,SC1以及T1~T8共14个分析点的潮位变化过程;其中,SB1位于南北支分流口以上,SB2位于南支下段,NB1和NB2分别位于北支上段和下段,NC1位于北港中段,SC1位于南港下段,T1~T8均匀分布在近海(见图1).图3为不同径流量下部分分析点的潮位变化过程.由图可知,南北支上段潮位上升非常明显,其他位置潮位增长相对较小.

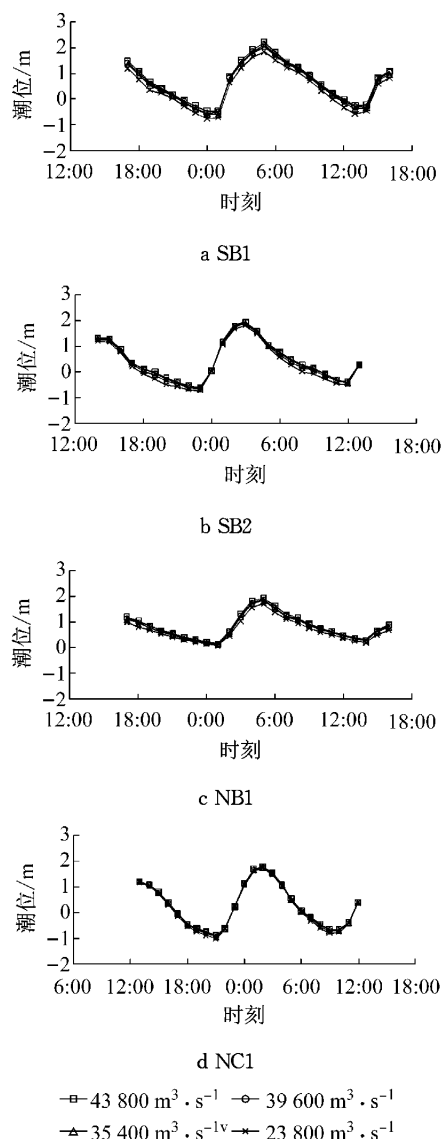


图3 不同径流量下部分分析点的潮位变化过程

Fig.3 Variation of tidal level at different discharges

表1为不同径流量下长江口北支分析点的计算平均潮位.从表中可以看出,从北支上段到北支下段及近海,随着径流量的增加,其平均潮位都有一定幅度的增加,且北支上段的增幅大于北支下段及近海

的增幅. 特别地, 近海 T1 分析点的潮位增幅大于北支下段 NB2 分析点的潮位增幅, 这是由于 NB2 主要受北支径流的影响, 而北支分流比较小( $<1\%$ <sup>[17]</sup>), 而 T1 潮位的增幅除了受北支径流影响外, 还受到南支径流的影响.

表 2 为不同径流量下长江口南支分析点的平均潮位及增幅. 从表中可以看出, 随着径流量的增加, 南支各分析点的平均潮位都有较大幅度的增长, 且

潮位增幅大于北支的平均潮位的增幅. 从南支上游分析点 SB1 和 SB2 至北港 NC1 及南港 SC1 分析点, 平均潮位增幅沿程减小. 根据长江口近岸流场图<sup>[18]</sup>可知, T3 受北港径流影响较明显, 而 T5 和 T7 受南槽径流的影响较为明显. 此外, 近海 T3, T5 和 T7 平均潮位增幅分别大于较远的 T4, T6 和 T8 的平均潮位增幅, 说明各分析点平均潮位增幅跟径流作用存在很好的响应关系.

表 1 不同径流量下北支分析点的平均潮位

Tab.1 Mean tidal level of North Branch at different discharges

站位	多年平均 流量下的 平均潮位/m	平均潮位及增幅					
		设计流量为 75%		设计流量为 50%		设计流量为 25%	
		平均潮位/m	增幅/%	平均潮位/m	增幅/%	平均潮位/m	增幅/%
NB1	1.605 4	1.707 6	6.36	1.745 3	8.71	1.783 3	11.08
NB2	0.879 5	0.880 3	0.09	0.880 7	0.14	0.881 2	0.19
T1	0.450 5	0.451 4	0.19	0.451 7	0.27	0.452 1	0.35
T2	0.342 3	0.342 5	0.05	0.342 5	0.06	0.342 6	0.08

表 2 不同径流量下南支分析点的平均潮位

Tab.2 Mean tidal level of South Branch at different discharges

站位	多年平均 流量下的 平均潮位/m	平均潮位及增幅					
		设计流量为 75%		设计流量为 50%		设计流量为 25%	
		平均潮位/m	增幅/%	平均潮位/m	增幅/%	平均潮位/m	增幅/%
SB1	1.124 9	1.318 5	17.21	1.386 6	23.27	1.453 6	29.22
SB2	0.949 7	1.069 3	12.59	1.112 3	17.12	1.155 0	21.62
NC1	0.804 0	0.871 8	8.43	0.896 4	11.48	0.921 0	14.55
SC1	0.780 7	0.845 7	8.33	0.869 3	11.35	0.893 0	14.39
T3	0.653 2	0.686 1	5.04	0.697 9	6.84	0.709 6	8.64
T4	0.346 2	0.348 4	0.63	0.349 1	0.85	0.349 9	1.07
T5	0.467 2	0.485 7	3.95	0.492 4	5.38	0.499 1	6.81
T6	0.320 6	0.324 4	1.17	0.325 7	1.59	0.327 1	2.01
T7	0.342 8	0.347 1	1.26	0.348 7	1.71	0.350 2	2.17
T8	0.284 6	0.287 4	0.98	0.288 4	1.33	0.289 4	1.69

### 3.2 平均潮位与径流量的响应关系

图 4 为长江口及近海分析点径流量与平均潮位的相关性. 从图上可以看出, 径流量与平均潮位呈线性正相关关系, 且相关性良好, 相关系数在 0.987 8~1.000 0 的范围内. 此外, 斜率的大小反映了径流量对平均潮位影响程度的大小. 在南支上口处, SB1 分析点的斜率是  $2 \times 10^{-5}$ , 斜率最大, 说明径流量对 SB1 平均潮位影响最大. 北支上口处 NB1 和南支下口处 SB2 分析点的斜率分别是  $9 \times 10^{-6}$  和  $1 \times 10^{-5}$ , 比较接近, 这两点相距较远, 说明径流对平均潮位的影响与分流比的大小及与近海的距离都有关系. 北港 NC1 点和南港 SC1 点几乎处在同一条垂直线上, 北港 NC1 点和南港 SC1 点的斜率都是  $6 \times 10^{-6}$ , 这说明径流量对北港和南港平均潮位的影响差不多. 北支下口 NB2 点斜率最小, 为  $8 \times 10^{-8}$ , 与北支分流

比较小( $<1\%$ <sup>[17]</sup>)及北支主要为落潮通道是一致的. 在近海区域, T3 点的斜率最大, 为  $3 \times 10^{-6}$ . T3 点在北港下面, 受北港径流影响较大. T2 点的斜率最小, 为  $1 \times 10^{-8}$ , T2 点在北支口以下, 北支较小的分流比对北支口外近海区域的平均潮位的影响就很小.

### 3.3 长江口杭州湾海平面空间分布变化

图 5 为洪季不同流量下平均潮位与多年平均流量( $23\,800\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )下平均潮位的差值. 流量越大, 河口内的平均潮位增加越明显, 口外的影响相对较小. 在流量增加的情况下, 各增幅线(0.3, 0.2, 0.1, 0.05 m)均有不同程度的向外扩张. 由于长江口与杭州湾水体交换比较剧烈, 受长江径流增加的影响, 杭州湾平均潮位也有一定幅度的增长, 尤其当径流量增加  $20\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时, 杭州湾湾内平均潮位增加

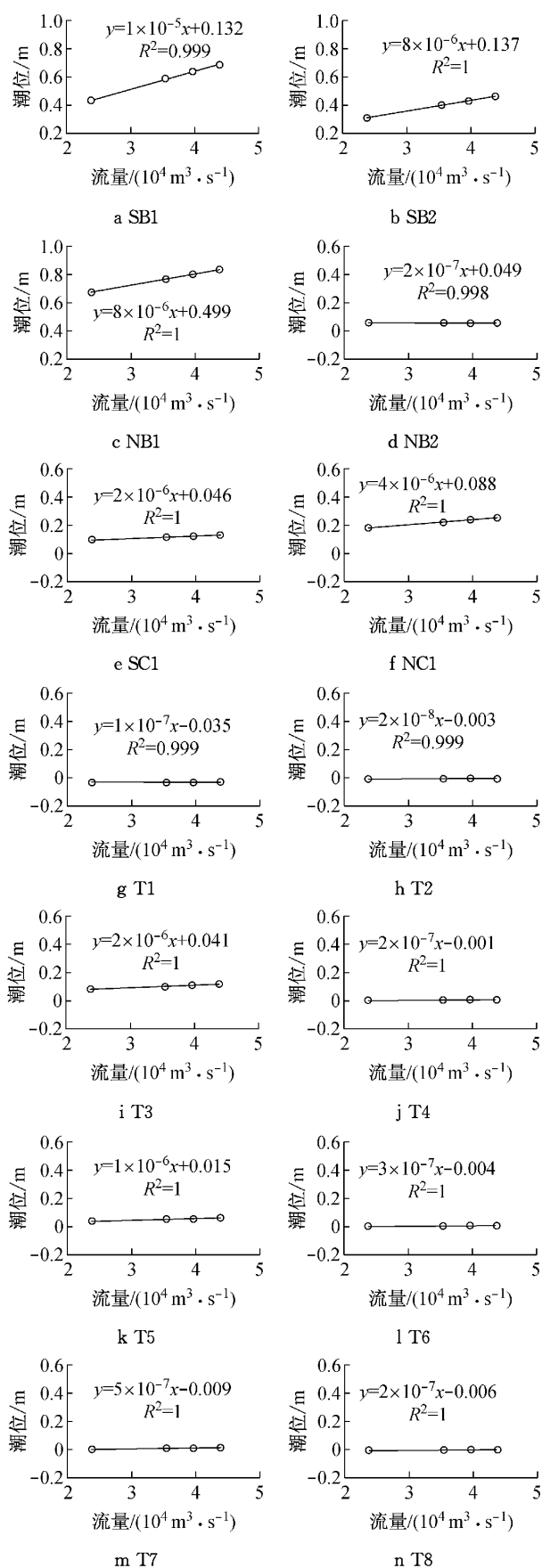


图4 长江口及近海分析点径流量与海平面的相关性

Fig.4 Correlation between discharges and sea levels in the Yangtze estuary and offshore

0.005~0.010 m(即 43 800 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>流量与 23 800 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>流量下平均潮位之差).

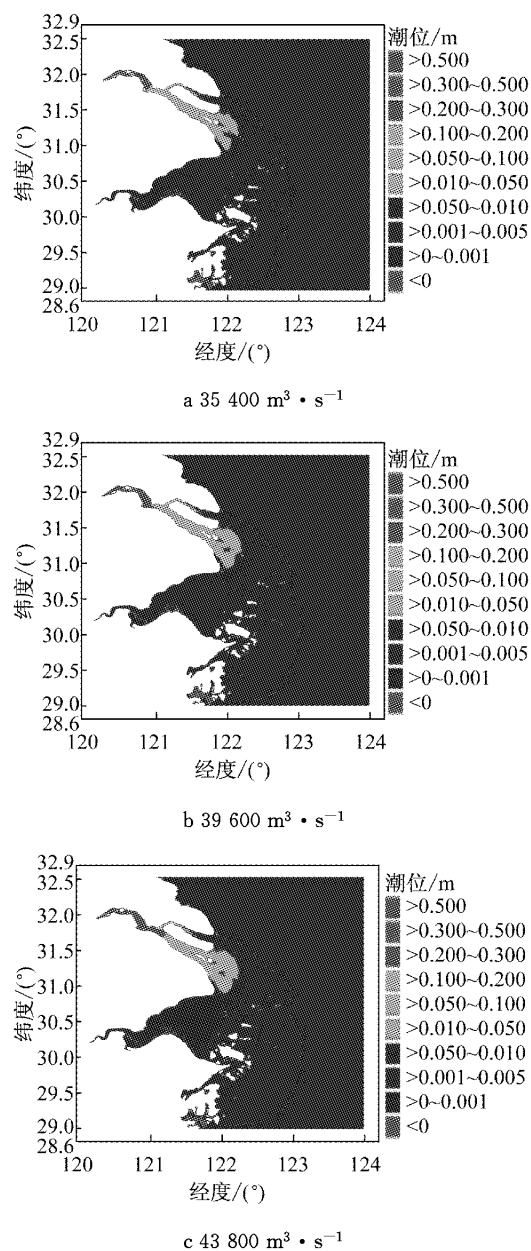
图5 洪季不同流量与多年平均流量(23 800 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>)下长江口海平面的差值

Fig.5 Difference of sea level between different discharges and multi-year discharge in flood season

表3为洪季不同流量与多年平均流量 23 800 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>进行比较得到的平均潮位增幅线位置(将各增幅线中间位置经纬度坐标转换为西安 80 大地坐标,并以横坐标衡量).随着径流量的增加,增加 0.3 m 的平均潮位线由徐六泾附近逐渐向徐六泾以下移动,至南支扁担沙以上河段内,移动距离约为 29.56 km;增加 0.2 m 的平均潮位线在扁担沙至青草沙之

间的河段内移动,移动距离约为 33.08 km;增加 0.1 m 的平均潮位线在青草沙至横沙东滩之间的河段内移动,移动距离约为 22.40 km;而增加 0.05 m 的平均潮位线在横沙东滩以下近海区域内移动,移动距离约为 7.78 km.

图 6 是长江口河势.从图上可以看出,南支河势特别是浅滩和沙岛的阻水作用对平均潮位增幅线的移动起了很重要的作用.首先,由南支而下的径流,在徐六泾下面遇到白茆沙和扁担沙等几个沙体的阻水作用,水流不够顺畅,这个区间内平均潮位增幅最大,为 0.3 m;水流继续向下,再遇中央沙、青草沙等沙体的阻挡作用,平均潮位增幅次之,为 0.2 m,且这段河段内沙体较多,水流形势复杂,横向移动距离最大;水流由中央沙体及长兴岛分两支水流分别进入南港北港,而南港北港河势较顺畅,从青草沙至横沙东滩平均潮位增幅较小,为 0.1 m;横沙东滩以下因是宽阔的近海,水面面积更大,水流更加顺畅,平

均潮位的增幅更小,为 0.05 m,横向移动范围也最小.因此,径流量对长江口及其近海平均潮位的影响与河势存在着一定的关系.

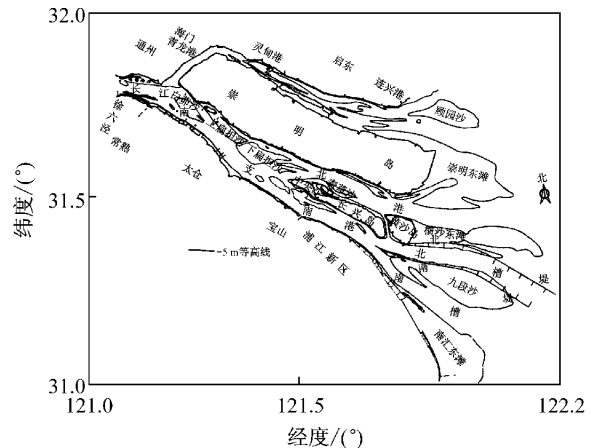


图 6 长江口河势

Fig.6 River regime of the Yangtze estuary

表 3 洪季不同流量时相对于  $23\,800\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  流量下各个增幅线的位置

Tab.3 Location of different amplification line at different discharges compared to the discharge of  $23\,800\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	增加 0.05 m 线位置		增加 0.1 m 线位置		增加 0.2 m 线位置		增加 0.3 m 线位置	
	图上横坐标值/km	地理位置	图上横坐标值/km	地理位置	图上横坐标值/km	地理位置	图上横坐标值/km	地理位置
35 400	419.15	横沙东滩附近	380.24	青草沙附近	337.66	上扁担沙附近	300.78	徐六泾下附近
39 600	423.47	近海	388.80	青草沙与横沙东滩之间	359.94	扁担沙与青草沙之间	307.61	徐六泾与扁担沙之间
43 800	426.93	近海	402.64	横沙东滩附近	370.74	青草沙附近	330.37	上扁担沙附近

## 4 结论

利用 1950~2011 年大通站实测径流量资料,统计分析出大通站洪季频率为 25%,50% 及 75% 时对应的径流量,结合长江口杭州湾二维潮流数学模型,分析了径流量变化对长江口及近海海平面的影响,结果表明:

(1) 在长江口河口及近海区域,随着径流量的增加,其平均潮位将呈线性增长.河口内,径流量对平均潮位的影响是由上游到下游沿程逐渐减小的;在近海区域,径流量对海平面的影响是南部大于北部.

(2) 长江口口内及近海分析点的平均潮位与径流量呈线性关系,相关系数在 0.987 8~1.000 0 的范围内.河口内,SB1 点的斜率系数最大,为  $2 \times 10^{-5}$ ;北支下口 NB2 点斜率最小,为  $8 \times 10^{-8}$ ;与北支分流比较小及北支主要为落潮通道有关.在近海

区域,受北港径流的影响,T3 点的斜率最大,为  $3 \times 10^{-6}$ ;受北支分流比较小的影响,T2 点的斜率最小,为  $1 \times 10^{-8}$ .

(3) 随着径流量的增加,海平面增幅线均不同程度地向外扩张,且增幅线与长江口河势存在一定的关系.在径流量为  $43\,800\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下,杭州湾湾内大部分区域海平面增加 0.005~0.010 m.

## 参考文献:

- [1] 国家海洋局. 2012 年中国海平面公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2013.  
State Oceanic Administration. China sea level bulletin in 2012 [R]. Beijing: State Oceanic Administration, 2013.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: Synthesis report [R]. Cambridge: Cambridge University, 2013.
- [3] 陈立奇,高众勇,詹力扬,等. 极区海洋对全球气候变化的快速响应和反馈作用[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(1): 138.  
CHEN Liqi, GAO Zhongyong, ZHAN Liyang, et al. Rapid

- change in arctic and antarctic oceans and their feedbacks to global climate change[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(1):138.
- [4] 冯伟,钟敏,许厚泽. 联合卫星重力、卫星测高和海洋资料研究中国南海海平面变化[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(3): 313.  
FENG Wei, ZHONG Min, XU Houze. Sea level variations in the South China Sea inferred from satellite gravity, altimetry, and oceanographic data[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(3): 313.
- [5] 杨春辉,顾小丽,李培良,等. Rossby波对菲律宾以东太平洋海平面年际变化的影响研究[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(1): 23.  
YANG Chunhui, GU Xiaoli, LI Peiliang, *et al.* Impact of rossby waves on interannual sea level variability in the pacific ocean east of the Philippines[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(1): 23.
- [6] 李艳芳,左军成,李娟,等. 热带太平洋海面风的年际变化对海平面变化的影响[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2012, 42(12):1.  
LI Yanfang, ZUO Juncheng, LI Juan, *et al.* The influence of inter annual wind in the tropical pacific on sea level variation during El Nino [J]. *Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences*, 2012, 42(12):1.
- [7] 罗锋,李瑞杰,廖光洪,等. 水文气象条件变化对长江口盐水入侵影响研究[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(3):8.  
LUO Feng, LI Ruijie, LIAO Guanghong, *et al.* Influence of hydrometeorological variation on saltwater intrusion in Changjiang River estuary [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(3):8.
- [8] 朱建荣,肖成猷,沈焕庭. 夏季长江冲淡水扩展的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1998, 20(5):13.  
ZHU Jianrong, XIAO Chengyou, SHEN Huanling. Numerical model simulation of expansion of Changjiang diluted water in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(5):13.
- [9] 孙波,刘曙光,顾杰,等. 三峡与南水北调工程对长江口水源地的影响[J]. *人民长江*, 2008, 39(16):4.  
SUN Bo, LIU Shuguang, GU Jie, *et al.* Numerical study on impact of water regulation of TGP and South-to-North Water Diversion Project on water source area of the Yangtze estuary [J]. *Yangtze River*, 2008, 38(16):4.
- [10] 朱建荣,戚定满,肖成猷,等. 径流量和海平面变化对河口最大浑浊带的影响[J]. *海洋学报*, 2004, 26(5):12.  
ZHU Jianrong, QI Dingman, XIAO Chengyou, *et al.* Impacts of change of river discharge and sea level on estuarine turbidity maximum zone[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(5):12.
- [11] 胡松,朱建荣,傅得健,等. 河口环流和盐水入侵Ⅱ: 径流量和海平面上升的影响[J]. *青岛海洋大学学报:自然科学版*, 2003, 33(3):337.  
HU Song, ZHU Jianrong, FU Dejian, *et al.* Estuarine circulation and saltwater intrusion Ⅱ: Impacts of river discharge and rise of sea level[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao: Natural Sciences*, 2003, 33(3):337.
- [12] 路川藤,罗小峰,陈志昌. 长江口不同径流量对潮波传播的影响[J]. *人民长江*, 2010, 41(12):45.  
LU Chuanteng, LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Influence of different runoffs on tidal wave propagation at Yangtze River estuary[J]. *Yangtze River*, 2010, 41(12):45.
- [13] DHI. Mike 21 & Mike 3 flow model hydrodynamic and transport module scientific documentation[M]. Horsholm: DHI Water & Environment, 2009.
- [14] 黄洪城. 海平面上升对珠江口水位及咸潮入侵影响的数值研究[D]. 上海:同济大学, 2013.  
HUANG Hongcheng. Numerical simulation of the impacts on water level and saltwater intrusion in Pearl River estuary due to potential future sea level rise [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [15] 孙波. 三峡与南水北调工程对长江口盐水楔影响的数值研究[D]. 上海:同济大学, 2009.  
SUN Bo. Numerical study on impact of Three Gorges and South-to-North Water Transfer Projects on salting wedge of the Yangtze River estuary[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [16] Allen J I, Somerfield P J, Gilbert F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1/2/3/4):3.
- [17] 陈维,顾杰,李雯婷,等. 基于BP神经网络的长江口北支河槽容积分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35(1):70.  
CHEN Wei, GU Jie, LI Wenting, *et al.* Analysis of the channel cubage of the North Branch of the Yangtze River estuary with BP neural network [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(1):70.
- [18] KUANG Cuiping, CHEN Wei, GU Jie, *et al.* Comprehensive analysis on the sediment siltation in the upper reach of the deepwater navigation channel in the Yangtze estuary [J]. *Journal of Hydrodynamics: Ser B*, 2014, 26(2):299.