

海平面上升对长江口波浪影响的预测与分析

匡翠萍¹, 汤俐¹, 陈维², 顾杰³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 浙江海洋大学 海运与港航建筑工程学院, 舟山 316000;
3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 基于 MIKE 21 SW 建立了长江口波浪数学模型, 采用实测资料对波浪模型进行了验证, 分别模拟当前海平面和海平面上升 0.5, 1.0, 1.5 m 情景下的不同风向下的波浪分布, 比较分析了波浪随海平面上升的变化特征, 长江口波浪随海平面上升的一般特征为: 波高和周期变化过程与潮位变化过程一致, 波高增量高水位时大于低水位; 口内波高增量明显小于口外, 滩地增量最大, 滩地迎风向的波高增量比背风向大; 波周期变化特征与有效波高相似, 但变幅明显小于波高变幅。

关键词: 长江口; 海平面上升; MIKE 21; 波高; 波周期
中图分类号: P753 **文献标志码:** A

Prediction and Analysis of the Impacts on Wave in the Yangtze River Estuary due to Potential Sea Level Rise

KUANG Cuiping¹, TANG Li¹, CHEN Wei², GU Jie³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Maritime and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A numerical wave model of the Yangtze River Estuary (YRE) was established based on MIKE 21 SW and validated with field wave measurements. After the validation, the model was applied to simulate three scenarios of different sea level rises (0.5, 1.0, 1.5 m). The general changing features of wave due to sea level rise in the YRE can be summarized: the time history of wave height and wave period agree with that of tidal level, and the increase of wave height at high water level is larger than that at low water level; wave height increase inside the entrance is less than that out of the entrance, and shoals are places with the biggest impact where increased wave height on the windward side is larger than that on the leeward side; the impact of sea level rise on

wave period is similar to that of wave height, but is less affected.

Key words: the Yangtze River Estuary; sea level rise; MIKE 21; wave height; wave period

海平面上升是一个缓慢而持续的过程, 其长期累积的结果将对沿岸地区构成严重威胁。自 20 世纪 90 年代以来, 众多学者对海平面上升可能给长江口地区带来的影响进行了研究并做出预测, 研究表明海平面上升不仅将对长江口地区自然环境及生态系统造成影响, 还会带来严重的经济损失、对人口和居住地的威胁以及对基础设施的破坏。全球变暖、海平面上升会引起一系列环境效应和灾害, 改变了地区潮汐、潮流^[1-2]、径流、波浪和泥沙运动^[3-4], 加剧了河口地区的风暴潮、海岸侵蚀、湿地损失^[5]、洪涝灾害和盐水入侵^[6], 对土地资源、海岸防护、水产资源和供水系统都产生了不利的影响^[7-8]。在众多动力因素中, 波浪是影响水工建筑物规划与设计的主要因素之一, 也是造成泥沙运动和海岸侵蚀季节性变化的主要动力之一^[9]。

本文重点研究海平面上升对纯波浪的影响, 基于 MIKE 21 建立长江口的波浪数学模型, 采用长江口实测波浪数据对模型进行验证, 再运用验证好的模型, 模拟不同海平面上升(0.5, 1.0, 1.5 m)后波高、波周期的变化, 分析长江口海平面上升对该区域波浪的影响。

1 数学模型建立与验证

1.1 控制方程

MIKE 21 SW(spectral wave model)是基于非

收稿日期: 2015-06-12

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB957704)

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

通讯作者: 顾杰(1961—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为海洋环境。E-mail: jgu@shou.edu.cn

结构网格的新一代波浪谱模型,主要适用于模拟河口海岸地区大范围的风浪和涌浪的成长、衰减及变形,可以求解准定常和非定常波浪作用平衡方程的全谱公式和方向解耦参数公式,并可与 2D/3D 水流模型完全耦合^[10].

MIKE 21 SW 基于波作用守恒方程,采用波作用谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪. 波作用密度与波能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系为

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

式中: σ 为相对频率, θ 为波向.

在笛卡尔坐标系下, MIKE 21 SW 的控制方程, 即波作用守恒方程可以表示为

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中: \mathbf{v} 为波群速度, $\mathbf{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$, c_x, c_y 分别表示波作用在地理空间 (x, y) 中的传播速度, c_σ 表示由于水深和水流变化造成的相对频率的变化, c_θ 表示由水深和水流引起的折射; S 为能量平衡方程中以谱密度表示的源函数.

源函数 S 描述了各种物理现象的源函数的叠加, 具体表达式为

$$S = S_m + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3)$$

式中: S_m 为风波相互作用项; S_{nl} 为非线性相互作用项; S_{ds} 为白帽耗散项; S_{bot} 为底部摩擦项; S_{surf} 为破波项.

1.2 模型范围

模型计算范围西起长江口潮流界江阴, 东边界至东经 122.48°, 北边界至北纬 32.08°, 南边界包括南汇嘴向东延伸, 包括南北支、南北港和南北槽在内的整个长江口水域. 计算网格为非结构三角形网格, 网格节点数为 10 948, 单元数为 20 466, 空间步长 60 ~ 4 428 m (图 1).

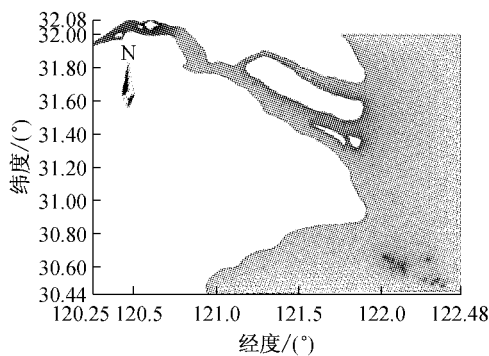


图 1 计算区域及网格

Fig.1 Computational domain and mesh

1.3 模型参数设置

由于长江口口门朝向为东南向, 主要受到东向

波浪的影响, 选取 NNE (北东北)、E (东) 和 SE (东南) 三个风向对河口区域的影响进行计算分析. 由于不同风向对长江口波浪的影响相似, 本文主要以常风向 NNE 向风下海平面上升对波浪的影响进行详细分析. 由长江口风速资料统计资料结果, 采用 NNE 向及此风向下的平均风速作为风场条件, 风速取值 $7.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向取值 22.6° ; 计算区域的东边界和北边界为开边界, 边界条件采用嵎山站 (位于模型东边界上) 累年 NNE 向波要素, 平均有效波高取值 1.02 m, 波峰周期取值 6.3 s, 平均波向取值 22.6° , 南边界为侧向边界, 上游边界为江阴, 采用径流条件; 考虑波浪破碎, 破波系数设为 0.8; 底摩擦选用尼古拉兹粗糙系数计算, 取值为 $0.00027 \sim 0.00145$; 考虑白浪耗散; 不考虑波浪绕射.

1.4 模型验证

采用长江口区域的实测波高和波周期资料^[11]对模型进行验证, 其中, 实测波高资料为显著波高 $H_{1/10}$, 通过不同特征波高的关系转化为有效波高 $H_{1/3}$ 进行验证, 验证点引水船和滩许位置见图 2, 验证结果见表 1. 图 2 中另有 17 个分析点, $n_{z1} \sim n_{z5}$ 、 $b_{z1} \sim b_{z2}$ 、 $n_{g1} \sim n_{g2}$ 、 $b_{g1} \sim b_{g3}$ 、 $n_{c1} \sim n_{c2}$ 和 $b_{c1} \sim b_{c3}$ 分别位于南支、北支、南港、北港、南槽和北槽.

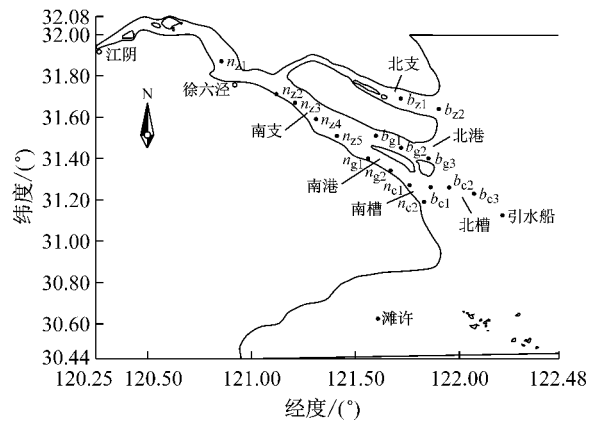


图 2 波浪验证测站及分析点位置分布

Fig.2 Locations of wave stations and selected points for analysis

表 1 NNE 风向下有效波高和平均波周期验证

Tab.1 Verification of significant wave height and average wave period under NNE wind

	有效波高			平均波周期		
	实测值/ m	计算值/ m	相对误差/ %	实测值/ s	计算值/ s	相对误差/ %
滩许	0.55	0.61	10.9	3.0	2.9	3.3
引水船	0.79	0.76	3.8	2.8	3.1	10.7

2 海平面上升对长江口波浪影响的模拟与分析

政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[12]于2013年发布的第五次报告中预测本世纪末海平面可能升高26~82 cm;中国海平面公报^[13]预测2050年的海平面将较常年(1975~1993年的平均海平面)升高14.5~20.0 cm;郑文振^[14]预测相较于2000年,2100年长江三角洲海平面可能上升113.7~165.6 cm;施雅风等^[6]预测相较于1990年的海平面,2050年长江三角洲可能的上升幅度为25~51 cm;刘杜娟和叶银灿^[15]预测相较于1990年的海平面,2050年最可能的上升幅度为37~61 cm.综合考虑各家对海平面上升预测的结果,选取0.5,1.0,1.5 m三种典型情景作为2100年海平面可能的上升值进行模拟和分析.

基于已验证的长江口波浪模型,计算长江口区域在各海平面高度下的波浪.计算考虑潮汐的影响,利用MIKE 21 Flow模型,将外海开边界处的平均潮位分别增加0.5,1.0,1.5 m,计算得到不同海平面上升下长江口区域的潮位变化.其余参数的设置及边界条件与验证时相同.

在长江口区域内共选择17个分析点(见图2),对它们的有效波高和平均波周期进行观察和对比分

析.

2.1 海平面上升对长江口波高影响的分析

在海平面上升的影响下,有效波高体现出与潮位过程一致的周期性变化.以点 b_{c3} 为例,图3a和3b分别为其在不同海平面下潮位和有效波高的变化过程图.对应于长江口半日潮的特性,有效波高在一日内出现两涨两落,形成两组极大、极小值,极大值出现在9:00~10:00和21:00~22:00时间段,此时水深最大,底部摩擦消耗和浅水变形小,从而波高大;反之,极小值出现在4:00~6:00和16:00~18:00时间段,此时水深最小,底部摩擦消耗和浅水变形大,从而波高小.

总体上有效波高随海平面上升而增大,而且当海平面上升相同时,高水位时的波高增量高于低水位时的波高增量,如图3b.徐六泾附近水域点 n_{z1} 表现出了不同的趋势,从图3d可以看出,随着海平面的上升,该点的有效波高反而略有减小(小于2%).长江口海域沙滩众多,水动力环境较为复杂,使得长江口外的波浪在向口内传播过程中,波要素的变化相当复杂.文献[16]以长江三角洲海岸为例,对潮滩上波高的时空变化及其影响因素进行研究,其观测表明:波高和水深之间的显著正相关关系并不是潮滩上的普遍现象,只有在潮滩坡度较小(例如<1‰),风速、风向较为稳定时,波高和水深之间的显著正相关关系才存在.随着海平面上升,潮位抬升而

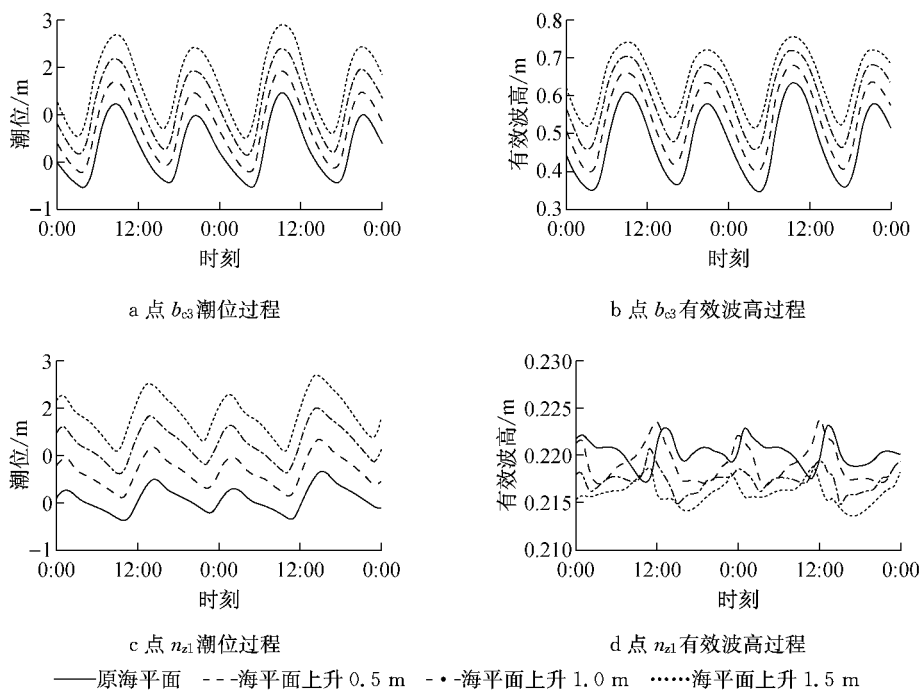


图 3 不同海平面上升下潮位和有效波高的变化过程

Fig.3 Time history of tidal level and significant wave height under different sea level rises at selected points

波高减小的区域位于徐六泾附近的通洲沙处,该段滩槽交错且岸线发生转折,因此波高随海平面上升而减小是受到岸线走向和岸滩坡度的综合影响。

表 2 为分析点在不同海平面上升下有效波高的日均值及其变化幅度。随着海平面上升,除 n_{z1} 以外的分析点的有效波高表现出升高的趋势,增幅与海平面上升高度呈正相关关系;海平面上升 0.5, 1.0, 1.5 m, NNE 向有效波高增幅分别在 1.0% ~ 72.9%、2.4% ~ 128.8% 和 4.7% ~ 186.0% 之间;相应地, E 向有效波高增幅分别在 0.5% ~ 94.9%、1.0% ~ 206.0% 和 1.2% ~ 303.0% 之间; SE 向有效波高增幅分别在 1.8% ~ 21.8%、3.9% ~ 38.1% 和 5.8% ~ 52.2% 之间。

表 2 海平面上升对有效波高的影响

Tab.2 Impacts of sea level rises on significant wave height at selected points

分析点	当前海平面	上升 0.5 m	上升 1.0 m	上升 1.5 m	
n_{z1}	有效波高/m	0.220	0.219	0.217	0.216
	变化幅度/%		-0.5	-1.4	-2.0
n_{z2}	有效波高/m	0.141	0.147	0.151	0.162
	变化幅度/%		4.2	7.7	15.2
n_{z3}	有效波高/m	0.084	0.091	0.096	0.104
	变化幅度/%		8.1	15.0	23.5
n_{z4}	有效波高/m	0.101	0.112	0.123	0.132
	变化幅度/%		11.0	21.3	30.7
n_{z5}	有效波高/m	0.196	0.203	0.207	0.208
	变化幅度/%		3.6	5.1	6.1
b_{z1}	有效波高/m	0.078	0.089	0.101	0.111
	变化幅度/%		14.8	29.4	42.2
b_{z2}	有效波高/m	0.302	0.341	0.383	0.423
	变化幅度/%		13.2	26.9	40.3
n_{g1}	有效波高/m	0.072	0.085	0.112	0.134
	变化幅度/%		18.6	55.1	85.7
n_{g2}	有效波高/m	0.053	0.055	0.057	0.061
	变化幅度/%		4.6	8.1	14.7
b_{g1}	有效波高/m	0.018	0.025	0.034	0.041
	变化幅度/%		39.0	87.9	123.0
b_{g2}	有效波高/m	0.042	0.054	0.069	0.088
	变化幅度/%		28.0	65.1	108.8
b_{g3}	有效波高/m	0.110	0.150	0.207	0.277
	变化幅度/%		37.3	88.7	152.8
n_{c1}	有效波高/m	0.243	0.246	0.249	0.255
	变化幅度/%		1.0	2.4	4.7
n_{c2}	有效波高/m	0.258	0.292	0.326	0.358
	变化幅度/%		13.4	26.5	38.8
b_{c1}	有效波高/m	0.142	0.200	0.226	0.251
	变化幅度/%		40.7	58.8	76.6
b_{c2}	有效波高/m	0.132	0.227	0.301	0.376
	变化幅度/%		72.9	128.8	186.0
b_{c3}	有效波高/m	0.477	0.537	0.594	0.645
	变化幅度/%		12.5	24.4	35.1

图 4 为当前海平面上涨急时刻(10:00)长江口

有效波高分布。图中,横轴刻度最大值为 122.60(以下图 5—6,图 8—9 同)在口门各浅滩的摩阻作用和口门内岸线的约束作用下,长江口内的有效波高明显小于口外。长江口各分汊中北港内传入的有效波高最小,在 NNE 向风的作用下,岸滩迎风面的有效波高要大于背风面。图 5a ~ 5c 分别为涨急时刻(10:00)海平面上升 0.5, 1.0, 1.5 m 时有效波高变化分布图。除徐六泾附近小部分区域的有效波高随海平面上升而减小外,大部分地区随着海平面上升有效波高增量逐渐增大,口内的增量小于口外。滩地随着海平面上升被逐渐淹没,这些地区的有效波高增量也最大,而且滩地迎风向波高增量高于背风向。图 6a ~ 6c 比较了 NNE、E 和 SE 三种风向下海平面上升 1.5m 时有效波高变化的分布,显示了 E 向和 SE 向风对波浪的影响规律与 NNE 向一致;即有效波高增量口内小于口外,滩地迎风向大于背风向。

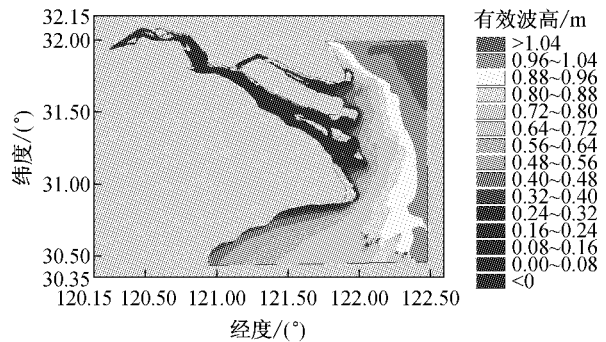


图 4 涨急时刻当前海平面下有效波高的分布

Fig.4 Distribution of significant wave height at present sea level at the maximum flood

2.2 海平面上升对长江口波周期影响的分析

海平面上升后平均波周期过程体现出与潮位过程一致的周期性变化,平均波周期随海平面上升而增大,如图 7 点 b_{c3} 的平均波周期变化过程所示。

随着海平面的上升,除南支和北港小部分区域的平均波周期变化幅度很小或略有减小(小于 2%)外,北支、南港、南槽和北槽的平均波周期表现出升高的趋势,增幅与海平面上升高度呈正相关关系;海平面上升 0.5, 1.0, 1.5 m, NNE 向平均波周期增幅分别在 0.4% ~ 20.0%、0.6% ~ 40.2% 和 0.8% ~ 53.2% 之间;相应地, E 向平均波周期增幅分别在 1.3% ~ 16.3%、2.9% ~ 31.1% 和 4.8% ~ 44.5% 之间; SE 向平均波周期增幅分别在 1.0% ~ 11.3%、2.0% ~ 23.4% 和 2.7% ~ 34.1% 之间。波周期随海平面上升的变幅远小于波高的变幅。

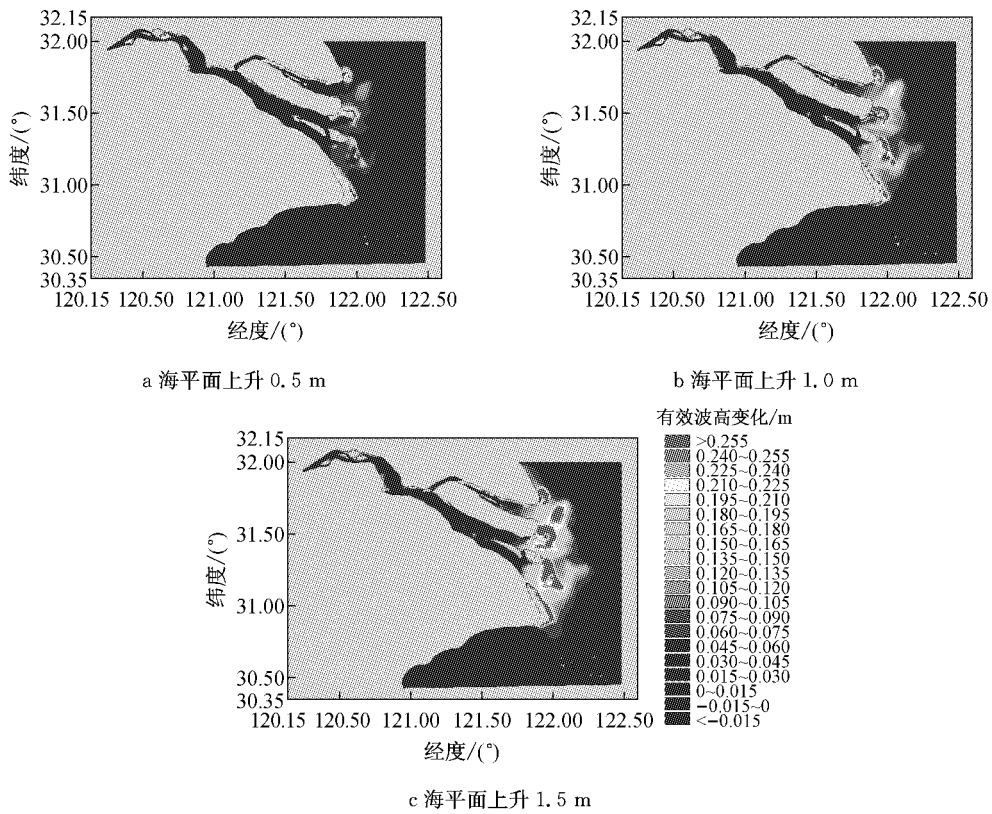


图 5 海平面上升引起的有效波高变化的分布

Fig. 5 Distribution of significant wave height change by different sea level rises

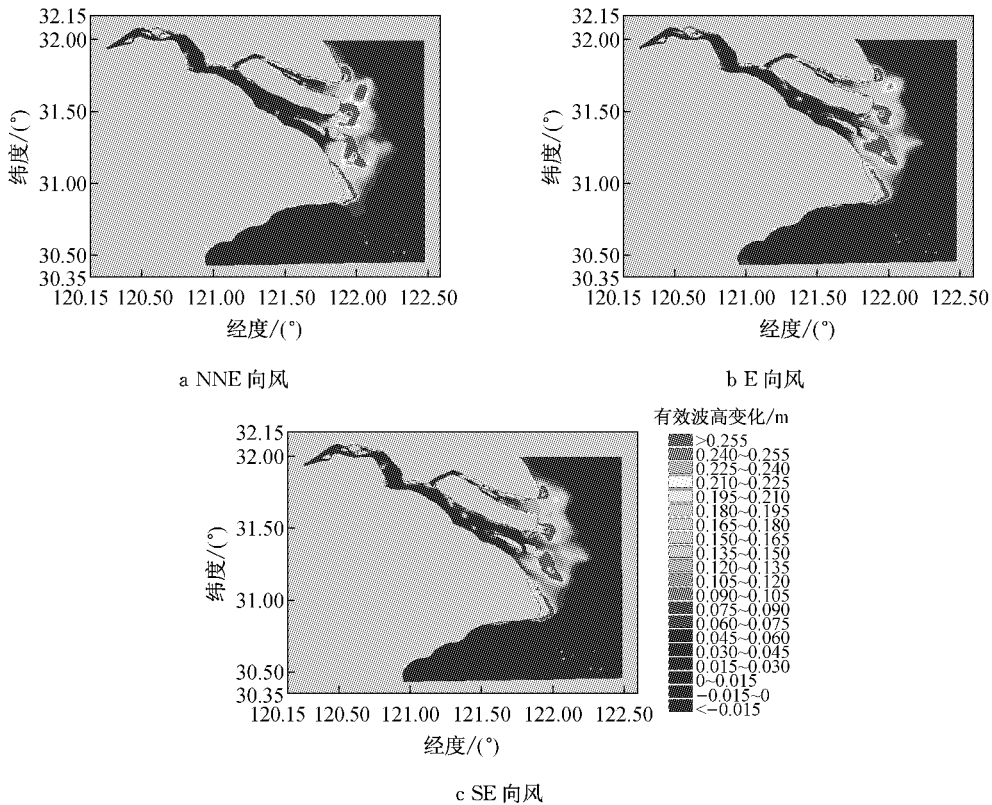


图 6 不同风向下海平面上升 1.5 m 有效波高变化的分布

Fig. 6 Distribution of significant wave height change by 1.5 m sea level rise under different wind directions

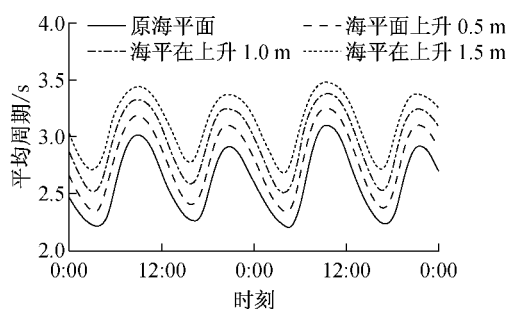


图 7 不同海平面上升下平均波周期的变化过程
Fig. 7 Time history of average wave period under different sea levels at selected point

图 8 为当前海平面下涨急时刻(10:00)长江口平均波周期分布. 长江口内的平均波周期远小于口外, 在 NNE 向风的作用下, 岸滩迎风面的平均波周期大于背风面. 图 9a ~ 9c 分别为涨急时刻(10:00)海平面上升 0.5, 1.0, 1.5 m 时平均波周期变化分布图. 随着海平面上升, 平均波周期增量逐渐增大, 口内的增量小于口外, 各滩地随着海平面上升被逐渐淹没, 这些地区的平均波周期增量最大.

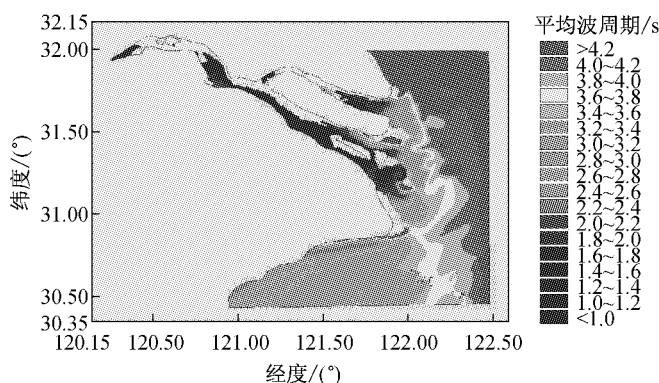


图 8 涨急时刻当前海平面高度下平均波周期的分布
Fig. 8 Distribution of average wave period at present sea level at the maximum flood

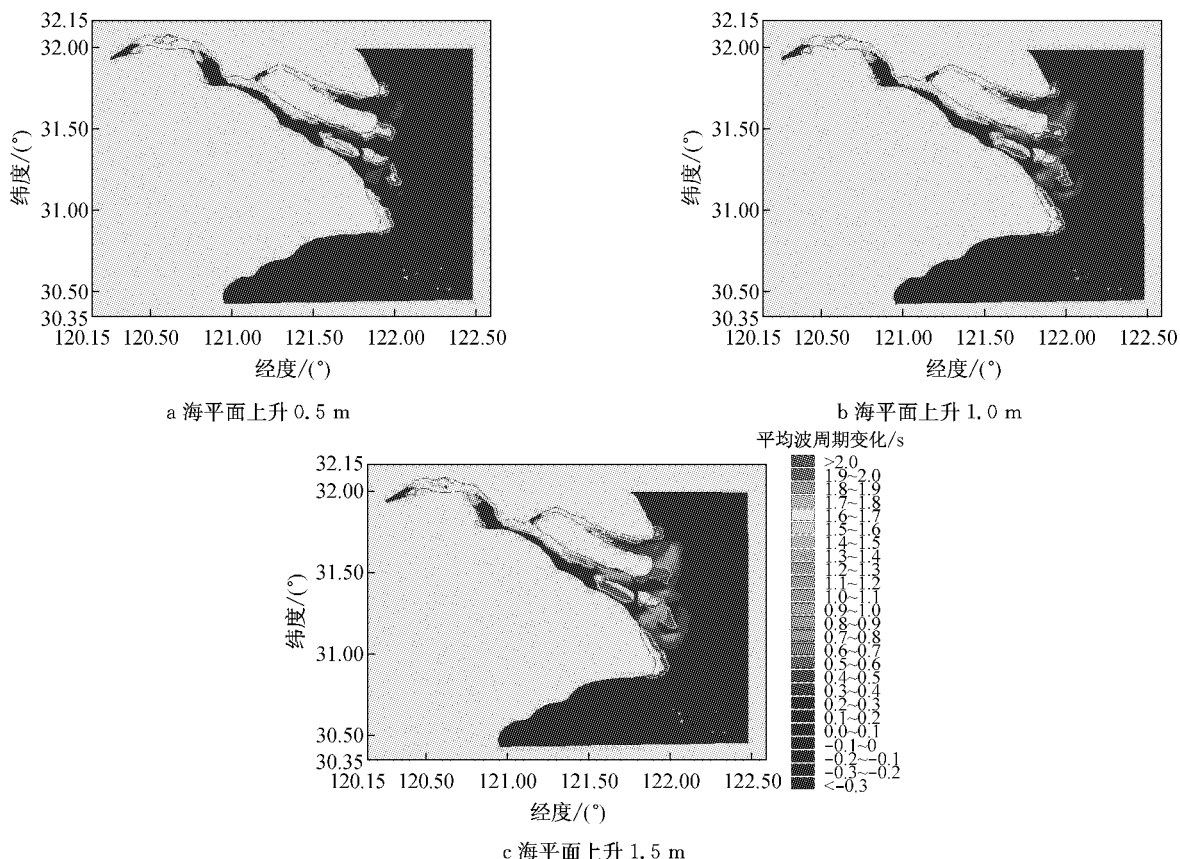


图 9 海平面上升引起的平均波周期变化分布
Fig. 9 Distribution of average wave period change by different sea level rises

3 结论

本文基于 MIKE 21 SW 建立了长江口波浪数学模型,分别模拟在 NNE、E 和 SE 三种风向作用下,当前海平面和海平面上升 0.5, 1.0, 1.5 m 情景下的波浪场,比较得到长江口不同方向波浪随海平面上升而变化的一般特征如下:

(1)不同方向的海向来风对波浪的影响规律一致。波高体现出与潮位过程一致的周期性变化,波高在 1 d 内两涨两落,极大值和极小值分别出现在高水位和低水位。

(2)长江口大部分地区有效波高随海平面上升而增大,且当海平面上升相同时,高水位时的波高增量大于低水位时的波高增量。

(3)长江口内的波高增量明显小于口外,滩地随着海平面上升被逐渐淹没,波高增量最大;滩地迎风向波高增量比背风向大。

(4)海平面上升对平均波周期的影响的分布规律总体上与对有效波高的影响相似,但变幅远小于波高变幅。波周期体现出与潮位过程一致的周期性变化。北支、南港、南槽和北槽的平均波周期随海平面上升而增大,口内的波周期增量明显小于口外,滩地的波周期增量最大,且迎风向大于背风向。

风作用下形成的波浪是长江口波浪的主要形式,海平面上升和潮位变化改变了水深的时空分布,直接影响了波浪的时空分布。潮流也是河口区重要的动力因素,进一步应研究潮流对波浪的影响以及波流耦合的响应关系。

参考文献:

- [1] 章卫胜,张金善,林瑞栋,等. 中国近海潮汐变化对外海海平面上升的响应[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 243.
ZHANG Weisheng, ZHANG Jinshan, LIN Ruidong, *et al.* Tidal response of sea level rise in marginal seas near China[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(2): 243.
- [2] Kuang Cuiping, Chen Wei, Gu Jie, *et al.* Numerical assessment of the impacts of potential future sea-level rise on hydrodynamics of the Yangtze River Estuary, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(3): 586.
- [3] 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*, 2014, 26(2): 299.
- [4] Zhou Xiaoyan, Zheng Jinhai, Doong Dongjiing, *et al.* Sea level rise along the East Asia and Chinese coasts and its role on the morphodynamic response of the Yangtze River Estuary[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 71: 40.
- [5] 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滩地和湿地的影响[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 582.
- JI Zixiu, JIANG Zixun, ZHU Jiwen, *et al.* Impacts of sea level rise on tidal flat and coastal wetland in the Changjiang River Delta and its adjacent area [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1994, 25(6): 582.
- [6] 施雅风,朱季文,谢志仁,等. 长江三角洲及毗连地区海平面上升影响预测与防治对策[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2000, 30(3): 225.
SHI Yafeng, ZHU Jiwen, XIE Zhiren, *et al.* Prediction and preventions of sea level rise on Changjiang Delta and marginal areas. *Science in China(Series D)*, 2000, 30(3): 225.
- [7] 孙清,张玉淑,胡恩和,等. 海平面上升对长江三角洲地区的影响评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 1997, 6(1): 59.
SUN Qing, ZHANG Yushu, HU Enhe, *et al.* Potential impacts of sea level rise on the economy and environment in the Yangtze River Delta and the countermeasures thereof [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 1997, 6(1): 59.
- [8] 孔兰,陈晓宏. 海平面上升的研究现状及其影响对策研究[J]. 人民珠江, 2012(5): 35.
KONG Lan, CHEN Xiaohong. Status quo and impact of sea level rise and its countermeasures[J]. *Pearl River*, 2012(5): 35.
- [9] 刘海成,刘海源,杨会利. 近岸波浪变形数值模型的比较研究[J]. 水道港口, 2009, 30(3): 153.
LIU Haicheng, LIU Haiyuan, YANG Huili. Comparison of numerical models of nearshore wave transformation [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2009, 30(3): 153.
- [10] DHI. MIKE 21 Spectral wave module scientific documentation [M]. Horsholm: DHI Water & Environment, 2011.
- [11] 隋洪波. 长江口区波浪分布及其双峰谱型波浪的统计特征[D]. 青岛:中国海洋大学, 2003.
SUI Hongbo. Wave distribution and statistical characteristics of double peak spectrum type waves of Yangtze River Estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: synthesis report[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [13] 国家海洋局. 2013 年中国海平面公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2014.
State Oceanic Administration. China sea level bulletin in 2013 [R]. Beijing: State Oceanic Administration, 2014.
- [14] 郑文振. 全球和我国近海验潮站及任意地点(区)的 21 世纪海平面预测[J]. 海洋通报, 1996, 15(6): 1.
ZHENG Wenzhen. Forecasting of sea levels at coast tide gauge stations and places in China and the world in the twenty first century[J]. *Marine Science Bulletin*, 1996, 15(6): 1.
- [15] 刘杜娟,叶银灿. 长江三角洲地区的相对海平面上升与地面沉降[J]. 地质灾害与环境, 2005, 16(4): 400.
LIU Dujuan, Ye Yincan. Relative sea surface rise and land subsidence in Changjiang Delta area[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2005, 16(4): 400.
- [16] 陈燕萍,杨世伦,史本伟,等. 滩涂上波高的时空变化及其影响因素——以长江三角洲海岸为例[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(3): 317.
CHEN Yanping, Yang Shilun, Shi Benwei, *et al.* Temporal and spatial variations in wave height over intertidal mudflats and the influencing factors: a case study from the Yangtze River Delta[J]. *Advances in Marine Science*, 2012, 30(3): 317.