海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究

俞亮亮1,陈可锋2,陆培东2,张俊彪1

(1. 国家海洋局第二海洋研究所,浙江杭州 310012;2. 南京水利科学研究院,江苏南京 210029)

摘要:海平面上升将对沿海环境构成严重威胁,风暴潮灾害频发和加剧是其中一个重要方面。相关研究揭示 水深和潮波变化是引起风暴潮增水与海平面上升之间非线性关系的两大主要因素。在地形和潮波系统较为复 杂的苏北辐射沙脊海域这种非线性关系尤为明显。总结了该海域潮波、风暴潮特征和海平面变化趋势,利用 WRF模式和 Delft 3D 风暴潮模式相结合,建立了东中国海和南黄海二维天文潮-风暴潮耦合数学模型。分析研 究了海平面上升以后,相同路径和强度的两种典型台风作用下,辐射沙脊海域风暴增水极值和高潮位变化。分 析结果表明:海平面上升后,辐射沙脊海域增水作用普遍减弱,近岸较外海明显;而在辐射沙脊中、南部,海平面 上升对天文潮高潮位的增强作用要强于对风暴增水的减弱作用。

关 键 词:辐射沙脊;海平面上升;风暴增水;数值模拟
 中图分类号: P732
 文献标志码: A
 文章编号: 1009-640X(2014)06-0052-06

20世纪以来,海平面上升已是一个不争的事实。海平面上升引起的浅海物理海洋环境的变化对沿岸的 影响比海平面上升本身显著得多,风暴潮灾害频发和加剧是其中一个重要方面^[1]。国家海洋局的海平面公 报中指出:2012年的高海平面加剧了江苏、浙江和广东等沿海地区风暴潮的影响^[2]。相关研究显示,风暴潮 增水与海平面上升并非简单的线性关系,水深和潮波变化是产生非线性效应的两个主要原因^[3-5]。苏北辐 射沙脊群地处东海前进波与南黄海旋转驻波辐合区,又分布着槽-脊相间的大型复杂地貌系统,两者的非线 性关系尤为复杂。但在许多研究中,工程水位仍以过去的潮位和增水值来推算,或简单叠加海平面上升量为 依据,与客观实际不符^[6]。江苏沿海人口稠密,经济发达,但地势低洼,一旦风暴潮冲决海堤,影响将波及整 个江苏沿海平原。因此,研究海平面上升背景下,苏北辐射沙脊海域风暴潮增水的变化规律,具有重要的理 论和实际意义。

1 研究区域概况

江苏中部海岸内陆架上近 20 000 km² 的南黄海海域内,形成了一个巨大的辐射沙脊。1980 年以来,随 着江苏海岸带和海涂资源综合调查及辐射沙脊区建港条件的研究,这一特殊海岸地貌逐渐被人们所认识。 辐射沙脊北起射阳河口,南至长江口北岸,南北长约 200 km,东西宽约 90 km,总面积达 22 470 km²,大部分 沙洲在平均海平面以下。辐射沙脊以弶港外侧蒋家沙的沙脊线为界,把辐射沙脊群分为南北两不对称部分。

1.1 潮汐与风暴潮

辐射沙脊海域具有特殊的潮汐环境,从东南方向传来的东海前进波及其部分从西北方向由山东半岛传播来的反射潮波汇合后形成的旋转驻波在此辐合,两个潮波系统的辐合不仅使得辐射沙脊海域潮差增大,而且形成了辐射状的潮流流场^[7-8]。潮差呈现以弶港为中心向南、北潮差逐渐降低的分布特征。

江苏沿海属南北气候、中高纬度和海陆相3种过渡带的重叠区,风暴潮灾害频繁,以台风风暴潮为主,且

收稿日期: 2014-05-14

作者简介: 俞亮亮(1988-),男,浙江绍兴人,助理工程师,主要从事海岸工程数值模拟研究。

E-mail: yuliangliang_nju@126.com

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41006048);南京水利科学研究院院基金资助项目(Y211004)

有历时短、来势凶猛,时空分布不均匀、不连续,南部多于北部的特点。综合考虑台风影响频率和强度,认为 近海活动型和登陆北上型最为重要[9],因此分别以1109"梅花"台风和0509"麦莎"台风为典型代表,对辐射 沙脊海域风暴潮增水与海平面上升之间的关系作进一步研究。

1.2 海平面变化

江苏辐射沙脊海域位于南黄海,在过去的几十年中,黄海平均海平面呈现出上升趋势。部分学者利用 TP 卫星数据,得到了江苏沿海绝对海平面上升量;但考虑到江苏中部沿海属于扬子准地台范围,地处新构造 运动下沉区,再加上巨厚的泥沙沉积层的压实沉降,除了绝对海平面,局地因素也不可忽略,因此也有学者综 合验潮站和卫星数据得到了江苏沿海相对海平面上升量(表1)。李加林等^[10]还考虑到近几十年来海平面 上升速率的增大,预测了未来100年江苏相对海平面变化。此外,根据张建云等的研究结果,当东太平洋海 平面上升 0.45 m 和 0.90 m 后,南黄海的外海开边界处相对变化均在 5 mm 以内^[11],故可将绝对海平面变化 和地形沉降因素统一体现在南黄海模型外海开边界潮位过程上。本文重点研究海平面上升可能带来的灾害 效应、考虑到极端情况、采用的诸多成果中的最大值、即李加林等推荐的1.37 m,作为南黄海未来100 年相 对海平面上升量。

	作者	统计年份	资料来源	发表年份	海平面变化/ (mm・a ⁻¹)
绝对海平面变化	王海瑛	1992—1998	T/P 卫星和 ERS-1 卫星	2000	3.44 ± 0.61
	钟鹤翔	1993—2001	T/P 卫星	2006	5.00 ~ 8.60
	詹金刚	1992—2006	T/P卫星	2008	4.01±0.49
相对海平面变化	张锦文,等	20~40年不等	20 个验潮站	1997	2.10
	李加林,等	1968—2000	6个验潮站	2006	2.70~9.30
	崔树红	1993—2001	T/P卫星和6个验潮站	2005	5.21

表1 江苏沿海海平面变化部分结果^[12] Tab. 1 Some results of sea level rise along coast in Jiangsu Province

模型的建立及验证 2

本文风暴潮模式采用荷兰 Delft 3D 模型。其基本方程为静压力假定下、黏性无压缩浅水方程,即 Navier-Stokes 方程,数值计算方法为 ADI 法,采用垂向平均的二维潮波方程。计算域内的台风作用通过静压假设和 自由表面条件来实现。但 Delft 3D 系统本身并没有提供台风计算模块,目前风压场获取一般有理论模型、经 验模型和区域气象模式3种方法。相关研究显示,区域气象模式在对风压场的还原中更接近实际[13]。本项 研究选择了 WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式中的 ARW(The Advanced Research WRF)框 架,气象资料为每隔6h的NECP(1°×1°)的全球再分析资料,大气物理过程参数化方案与文献[9]一致。

为精细化模拟辐射沙脊海域近岸增水过程,风暴潮数学模型采用双重嵌套网格(图1),东中国海模型范

围为117°~131°E,24°~41°N,包括了台湾海峡、东海、黄海 和渤海,网格尺度2'×2',网格数324×480,时间步长为60s, 黄海模型范围119.2°~127.1°E, 28.2°~38.2°N,北至山东 青海角,南到钱塘江湾以南,网格尺度200~2000 m,网格数 889×786.时间步长 30 s。与之相应的 WRF 模型嵌套粗网格 D1 范围为 115°~135°E,22°~42°N,格点数 100×100,格距 6′,时间步长 60 s;细网格 D2 范围为 118°~128°E,28°~ 38°N,格点数150×150,格距2′,时间步长20s。风暴潮模型 开边界采用复合潮波过程线控制,给定8个主要分潮(M,, S₂, N₂, K₂, K₁, O₁, Q₁, P₁)的调和常数, 为使风暴潮模型计算 Fig. 1 Calculated domain and typhoon track calibration



稳定、合理,先在无风条件下预算 2 d,待潮波充分传播至近 岸后再加入风压场。其中,风力拖拽系数采用王秀芹^[14]推 荐的 $C_d = (0.61+0.063U_{10}) \times 10^{-3} (6 < U_{10} < 22)$ 。针对天文潮 的结果,以《英国潮汐表》对本区域内 91 个验潮站的 M_2, S_2 , K_1, O_1 4 个分潮的调和常数作为验证,振幅和迟角最大误差 分别为9.4 cm和 9.4°,验证的详细结果参见文献[15]。台 风期间实测风速、潮位站分布见图 2。

对台风模拟结果,图1中计算的台风路径和卫星实测结 果显示:两者走势基本一致,最大误差出现在登陆后,受陆域 地形、下垫面和建筑物等因素影响所致;从台风期间5个近 岸风速测站的验证结果来看(图3,图4),WRF模式较好地





重现了理论模型无法模拟的台风过后海面上维持的大风速过程。通过搜集到的台风期间 3 个测站的潮位验证结果可见(图4):计算潮位与实测值相位基本一致,高潮位误差均在 30 cm 以内,低潮位误差相对较大,总体来看,该模型较好地模拟出了两个台风期间辐射沙脊海域的增水及高潮位变化过程。





Fig. 4 Water level calibration during typhoon

3 结果分析

3.1 增水极值变化

风暴增水一般可以分为初振、主振和余振3个阶段。当风暴潮波到达近岸时,由于水深变浅,再加上强风的直接作用和地形缓坡作用等因素的影响,能量迅速集中,水位急剧升高,即为风暴潮的主振阶段。形成这个增水过程的机理较为复杂,主要取决于气压、风速、风向及地形条件。计算中采用控制变量法,将海平面变化作为唯一变量,因此产生这种差异的一个原因为水深地形变化导致风暴增水浅水作用减弱。

图 5 为海平面上升 1.37 m 后,两个典型台风作用下的增水极值变化。可见,对于"梅花"台风而言,海 平面上升后,整个江苏外海的增水极值都呈减小趋势,且近岸大于外海,尤其在东沙周围及洋口港至吕四近 岸,增水极值减小了约 20~30 cm;局部高滩出现增大是由于海平面上升后,这些地方由露滩变成上水区域。 对于"麦莎"台风,这种趋势相对较弱,除了路径因素以外,与这两个台风本身强度也有关系,"麦莎"台风登 陆后,地表摩擦增大,风力有所减弱。近岸的增水极值同样以减小为主,弶港至长江口沿岸尤为明显。可见, 对于两个典型台风风暴潮增水效应,海平面上升后主要受水深增大的影响,使得风暴潮传播至近岸时的浅水 作用减弱,增水极值普遍有所减小,这在近岸浅滩尤为明显。



Fig. 5 Maximum water level set-up after sea level rise under the typhoon effect of "Muifa" (left) and "Matsa" (right)

3.2 高潮位变化

风暴增水极值往往发生在低潮位过程^[16],而在实际工程设计中,风暴潮引起的极端高潮位是工程设计 水位重要计算依据,因此探索海平面上升以后的高潮位变化对于近岸港口、航道工程实际具有更为直接的意 义。计算结果显示:海平面上升后,剔除其本身上升量后的高潮位绝对增量呈现南增北减,即对于辐射沙脊 中、南部而言,高潮位的增量要大于海平面本身上升量(图 6)。



Fig. 6 High level variation after sea level rise under the typhoon effect of "Muifa" (left) and "Matsa" (right)

海平面上升后,之所以会出现增水作用减弱,而高潮位增量却大于海平面本身上升量的现象,是由于地 形和岸线的改变使得天文潮各分潮振幅和迟角也发生了变化,虽然诸多学者^[3-5,14,17-18]在具体量值上不尽相 同,但在趋势上仍然是一致的,认为海平面上升后辐射沙脊海域主要分潮振幅均有所增大,在中、南部尤为明 显,这也就意味着天文潮高潮位的增量要大于海平面本身上升量。虽然海平面上升后,风暴潮增水作用有所 减弱,但当它非线性叠加在增强的天文潮之上后,最终的表现结果取决于两者强弱。从图中可见,对于辐射 沙脊中、南部而言,海平面上升对天文潮的增强作用要大于对风暴潮的减弱作用。因此,在该海域一些重大 港口、航道等涉海项目的工程设计水位计算中,考虑海平面变化时,不应简单地将两者线性相加,尤其在中、 南部,应适当提高标准。

4 结 语

本文利用 WRF 和 Delft 3D 软件建立了东中国海和南黄海二维天文潮-风暴潮耦合数学模型,计算了海 平面上升后,相同路径和强度的典型台风经过时,辐射沙脊海域风暴增水变化。认为海平面上升后,潮波和 地形发生变化,辐射沙脊海域风暴潮增水与海平面上升的非线性关系明显,但在不同岸段有所差异。主要得 到以下两点结论:①海平面上升后,辐射沙脊海域增水作用普遍减弱,近岸较外海明显;②在辐射沙脊中、南 部,海平面上升对天文潮高潮位的增强作用要强于对风暴增水的减弱作用,在计算该海域考虑海平面变化的 工程设计水位时应予以注意。

参考文献:

- [1] 宗虎成,章卫胜,张金善.中国近海海平面上升研究进展及对策[J].水利水运工程学报,2010(4):43-50. (ZONG Hucheng, ZHANG Wei-sheng, ZHANG Jin-shan. Advances in research on sea level rise of China offshore and some countermeasures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4):43-50. (in Chinese))
- [2] 国家海洋局. 2012 年中国海平面公报[EB/OL]. [2013-3-6]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/201303/ t20130306_24217.html (State Oceanic Administration. People's Republic of China. Bulletin of sea level in China 2012[EB/ OL]. [2013-3-6]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/201303/t20130306_24217.html (in Chinese))
- [3] 李杰. 海平面变化及其对东中国海风暴潮的影响[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011. (LI Jie. Sea level variation and its effect on storm surge in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese))
- [4] 高志刚. 海平面上升对东中国海潮汐、风暴潮影响的数值模拟研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008. (GAO Zhi-gang. Numerical simulation of the effect of mean sea level rise on tide and storm surge in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese))
- [5] 陈满春.海平面变化及其对东中国海潮波和工程水位的影响[D].青岛:中国海洋大学, 2009. (CHEN Man-chun. Sea level variation and its effect on tidal wave and engineering water level in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [6] 于宜法, 刘兰, 郭明克, 等. 海平面变化和调和常数不稳定性对一些工程设计参数的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(6): 27-35. (YU Yi-fa, LIU Lan, GUO Ming-ke, et al. Influence of the mean-sea-level variation and harmonics instability on some design parameters of engineering[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(6): 27-35. (in Chinese))
- [7] 诸裕良, 严以新, 薛鸿超. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究— I. 潮流运动平面特征[J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(5): 403-410. (ZHU Yu-liang, YAN Yi-xin, XUE Hong-chao. Hydrodynamics mechanism of formation of the southern Yellow Sea sandbank radiation development[J]. Science in China(SerD), 1998, 28(5): 403-410. (in Chinese))
- [8] 朱玉荣,常瑞芳. 南黄海辐射沙洲成因的数值模拟解释[J]. 青岛海洋大学学报,1997,27(2):218-224. (ZHU Yu-rong, CHANG Rui-fang. Explanation of the origin of radial sand ridges in the southern Yellow Sea with numerical simulation results of tidal currents[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1997, 27(2):218-224. (in Chinese))
- [9] 俞亮亮,陆培东,陈可锋. "梅花"台风期间江苏辐射沙洲海域风暴潮增水研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(3): 63-69. (YU Liang-liang, LU Pei-dong, CHEN Ke-feng. Research on storm surge during typhoon "Muifa" in radial sand ridges off Jiangsu coast[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(3): 63-69. (in Chinese))
- [10] 李加林,王艳红,张忍顺,等. 海平面上升的灾害效应研究-以江苏沿海低地为例[J]. 地理科学,2006,26(1):87-93.
 (LI Jia-lin, WANG Yan-hong, ZHANG Ren-shun, et al. Disaster effects of sea level rise-A case of Jiangsu coastal lowland
 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1):87-93. (in Chinese))
- [11] 张建云,刘九夫,张金善,等. 气候变化对我国水安全影响及对策研究课题三:我国海平面和风暴潮的变化规律及其影响[R]. 南京:南京水利科学研究院,2011. (ZHANG Jian-yun, LIU Jiu-fu, ZHANG Jin-shan, et al. The possible

impacts and countermeasures of climate change on water security in China (subject 3): The variation of sea level and storm surge in China and its impacts[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))

- [12] 俞亮亮. 海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究[D]. 南京:南京水利科研研究院, 2013. (YU Liang-liang. A study of storm surge in radial sand ridges under sea level rise[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2013. (in Chinese))
- [13] 蒋小平, 钟中, 张金善, 等. 台风浪模拟预报中的风场比较研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(2): 11-19. (JIANG Xiao-ping, ZHONG zhong, ZHANG Jin-shan, et al. Comparison study on the surface wind over ocean in typhoon waves simulation
 [J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(2): 11-19. (in Chinese))
- [14] 王秀芹, 钱成春, 王伟. 风应力拖曳系数选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 31(5): 640-646. (WANG Xiu-qin, QIAN Chen-chun, WANG Wei. Test of influence of wind drag coefficient on typhoon storm surge simulations[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2000, 31(5): 640-646. (in Chinese))
- [15] 陈可锋. 黄河北归后江苏海岸带陆海相互作用过程研究[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2008. (CHEN Ke-feng. Research of land and ocean interactions process of the coastal zone in Jiangsu Province since the Yellow River flows northward [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [16] 黄世昌,李玉成,谢亚力,等. 杭州湾湾内天文潮与风暴潮耦合模式建立与应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50 (5):735-741. (HUANG Shi-chang, LI Yu-cheng, XIE Ya-li, et al. Construction of mode coupling astronomical tide with storm surge and its application in Hangzhou bay[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(5):735-741. (in Chinese))
- [17] 张锦文,杜碧兰. 中国黄海沿岸潮差的显著增大趋势[J]. 海洋通报, 2000, 19(1): 1-9. (ZHANG Jin-wen, DU Bi-lan. The trend of tidal range enlarging along the coast of the Yellow Sea of China[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(1): 1-9. (in Chinese))
- [18] 颜云峰, 左军成, 陈美香. 海平面长期变化对东中国海潮波的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(11): 19-28.
 (YAN Yun-feng, ZUO Jun-cheng, CHEN Mei-xiang. Influence of the long-term sea level variation on tidal waves in the Eastern China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(11): 19-28. (in Chinese))

A study of storm surge in radial sand ridges under sea level rising

YU Liang-liang¹, CHEN Ke-feng², LU Pei-dong², ZHANG Jun-biao¹

(1. The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Sea level rise would result in a serious threat to the coastal environment, and an important factor is the intensifying and increasing frequency of the storm surge. The relationship between storm surge and sea level rise is not linear according to related studies. The variations of tidal waves and water depth are found to be the two main causes. Radial sand ridges off the north Jiangsu are a particularly interesting area for studying this nonlinear interaction, as there exist a complex large geomorphic system and an astronomic tidal system. The paper summarizes the tide and storm surge characteristics in radial sand ridges, as well as the trend of sea level change. Then a two-dimensional coupled model of astronomic tide and storm surge is established for the East China Sea and the South Yellow Sea, by use of WRF model and Delft 3D storm surge model. The distributions of the maximum water level set-up and the high level change when sea level rises are analyzed, under the effects of two typical typhoons which have the same path and intensity. The analysis results show that the water level set-up decreases universally in the radial sand ridges when the sea level rises, and it is more significant at near shore than the open sea. While in the middle and south radial sand ridges, the enhancement of the astronomical high tide level caused by the sea level rising is stronger than the attenuation of sea level rising by the storm surge.

Key words: radial sand ridges; sea level rising; storm surge; numerical simulation