

文章编号: 1000-5641(2010)04-0016-10

波浪对台风风暴潮过程的影响分析

陈华伟, 葛建忠, 丁平兴

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 利用胡克林等建立的长江口及邻近海域的二维风暴潮数值计算模式, 对2007-2008年有较大影响的4次台风风暴潮进行加波浪和不加波浪的后报计算. 将计算结果与实测资料进行比较分析, 得出结论: 波浪对于风暴潮的影响程度取决于台风的路径、登陆地点和不同时刻. 在台风登陆前后一两天内, 加波浪计算比不加波浪计算出的风暴潮水位精度总体要高; 当台风传播到近岸时, 波浪破碎对近岸增水影响较大, 需要加波浪计算台风风暴潮; 对南登陆北上转成型台风风暴潮计算时需加波浪, 而对南登陆型可不必加波浪, 以提高计算效率.

关键词: 波浪; 风暴潮; 数值模拟

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A

Analysis of storm surge's process under the influence of waves

CHEN Hua-wei, GE Jian-zhong, DING Ping-xing

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Four typhoon storm surges which affected Changjiang Estuary and its adjacent seas seriously during 2007—2008 were computed by using a 2D storm surge prediction model set up by Hu et al., and the effects of waves on storm surges were discussed. It was found by comparison that the impact of waves on storm surges depends on typhoon's tracks, locations, and different times. The precision of predication of storm surges can be improved if the influence of waves on storm surges is considered in the days around typhoons' landing. When a typhoon was close to the shore, the waves broken and affected the storm surge, so it is more reasonable to take account of the influence of waves. It's necessary to compute waves for the south landing and northwards typhoons.

Key words: wave; storm surge; numerical simulation

0 引 言

中国拥有漫长的海岸线和辽阔的海域, 沿岸常受台风的袭击, 是一个风暴潮危害严重的

收稿日期: 2009-04

基金项目: 上海市科委“登山行动计划”项目(06DJ12014); 中荷战略联盟第二阶段合作项目(2008DFB90240)

第一作者: 陈华伟, 女, 硕士研究生. Email: chwjst@126.com.

通讯作者: 丁平兴, 男, 教授, 博导, 主要从事潮滩动力学与陆海相互作用的研究.

E-mail: pxding@sklec.ecnu.edu.cn.

国家.因此,及时、准确地预报台风风暴潮对于保护人民的生命财产安全有着重大的意义.

国际上对风暴潮数值预报的研究开始于20世纪50年代.美国在70年代建立了第一代SPLASH模式,于80年代发展了第二代SLOSH模式,可用于计算风暴潮期间计算区域的最大增水分布.20世纪70年代起,秦曾灏、冯士筳、孙文心和刘凤树等^[1-6]开创了国内数值风暴潮预报的先河,但早期的研究未涉及天文潮和风暴潮的相互作用.张延廷、王以娇^[7,8]、端义宏和秦曾灏^[9]等引入风暴潮与天文潮的相互作用,分别研究渤海、北黄海和浙江、上海、江苏沿岸的风暴潮数值预报.黄华和朱建荣等^[10]基于ECOM-si模式建立了长江口杭州湾地区的风暴潮三维数值模式,同时考虑了径流、天文潮与风暴潮的耦合作用.此后,还有很多学者对天文潮与风暴潮的非线性相互作用做了大量的研究.

当波浪传播到近岸地区时,会产生反射、折射和破碎等现象,从而使水体受到一种压力,迫使水体向岸堆积起来形成增水.特别在台风期间,波浪在近岸的增水现象较为显著.因而在计算风暴潮时,人们逐渐认识到除了考虑风暴潮和天文潮相互作用外,还应包含波浪对近岸水位过程的影响.国际上开展波浪和风暴潮相互作用的数值研究始于1988年.Wolf^[11]等就波浪和风暴潮的相互作用进行了数值模拟,后来Tolmann^[12],Masternbroen^[13]等也对波浪和天文潮、风暴潮相互作用的不同方面进行了研究,但这些研究大多仅考虑了相互作用的影响的一个方面.尹宝树等^[14-17]、丁平兴和胡克林^[18,19]等考虑波浪、天文潮、风暴潮联合相互作用,并分别应用于黄渤海和长江口杭州湾地区进行二维风暴潮的数值计算,尹宝树等还在此基础上对黄渤海区域进行了三维的风暴潮数值计算.刘永玲等^[20]利用第三代浅水波浪模式SWAN和三维海流模式POM,建立了考虑波浪影响的三维风暴潮模式,并应用于黄渤海区域.但由于一般波浪模式计算需要时间较长,特别是在三维风暴潮模式中引入波浪影响,不能满足风暴潮快速预报的需要,因此在预报时一般不考虑波浪因素.本研究试图利用胡克林和丁平兴等建立的包含波浪、天文潮和风暴潮相互作用的长江口及其邻近海域的二维风暴潮预报模式,计算2007—2008年影响长江口区域的4次风暴潮过程,并着重讨论波浪对风暴潮过程在不同台风路径,不同时刻,以及不同地点的影响.

1 模式与计算方法简介

风暴潮数值预报模式及可视化系统由华东师范大学河口海岸学国家重点实验室开发,该模式由台风场模型、波浪场模型以及复合流场模型组成.其中台风场模型采用考虑背景风场的对称风场模型;波浪模型采用适合于河口海岸地区的第三代海浪模式SWAN模型;复合流场模型包括风暴潮、天文潮、径流和波生流;其预报区域为长江口、杭州湾及其邻近区域.

模式的两个计算区域如图1和图2,大区为东中国海区域(ECS),小区为长江口、杭州湾区域(YE-HB).采用大小区嵌套的方式,大区向小区的边界提供余水位,在小区边界上输入6个天文分潮,M2,S2,N2,K2,K1,O1,再进行潮流场和余流场的叠加计算,提高小区的流场计算精度.具体的模式设置参看文献^[21].

对该模式而言,不同机型配置系统预报所需的运行时间不同.一般来说,不加波浪时利用台式PC机计算时间在30 min之内.利用该模式曾成功的预报了TC0509(麦莎),TC0515(卡努)等多次台风风暴潮过程,且精度基本在10%左右,可以用于长江口及其邻近海域的台风风暴潮的预报和后报.

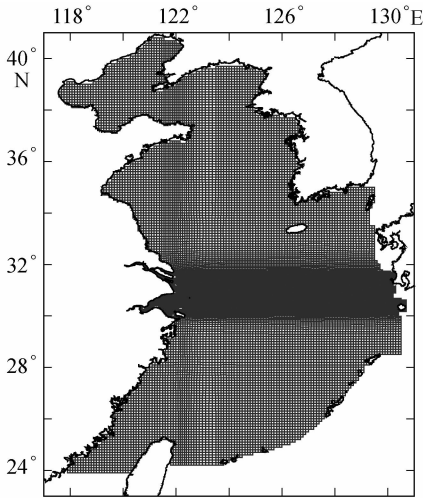


图1 东中国海区域计算网格

Fig. 1 Curvilinear model grid for the region of ECS

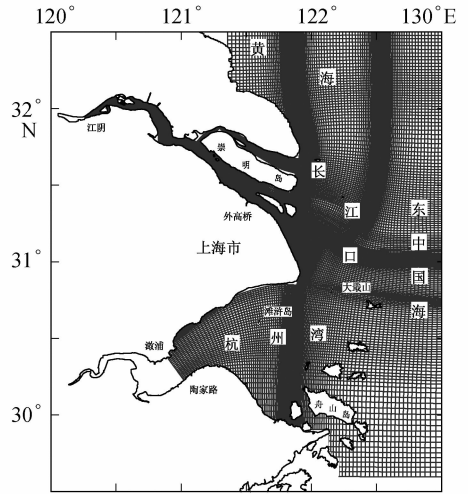


图2 长江口、杭州湾区域计算网格

Fig. 2 Curvilinear model grid for the region of YE-HB

2 2007—2008 年 4 次主要台风风暴潮的计算与检验

2007—2008 年对长江口及其邻近海域影响比较严重的台风主要有 0713 号“韦帕”台风, 0716 号“罗莎”台风, 0807 号“海鸥”台风以及 0808 号“凤凰”台风. 其中 0713 号和 0716 号台风对长江口杭州湾的影响比较大, 0807 号和 0808 号台风因登陆地点比较远, 对长江口杭州湾地区的影响相对小很多. 但这 4 次台风对所经之处都带来强风、暴雨甚至特大暴雨, 给部分沿海地区带来巨大的经济损失和人员伤亡. 本文即利用风暴潮数值预报模式对 TC0713, TC0716, TC0807 以及 TC0808 这 4 次台风风暴潮进行后报检验, 并讨论加入波浪和不加入波浪对计算区域的增水分布影响. 为节省篇幅, 该文仅以 TC0713“韦帕”台风为例, 给出具体计算流程和结果, 并进行讨论.

模式的计算区域和 4 次台风路径如图 3 所示, 图中所示站点为大戢和滩浒两站. 从图中可以看出, 4 次台风路径中 TC0713 与 TC0807 的路径相似, 均为南登陆北上转成型, TC0716 和 TC0808 的路径均可视为南登陆型. 而这两种类型也是影响长江口杭州湾地区频率较高的两种, 在该区域研究这两种路径类型的台风风暴潮具有代表性.

(1) 依据大通站的流量, 长江径流取为 $40\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$;

(2) 背景风场采用 QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds from Colorado Research Associates 气象数值产品 (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds744.4>).

(3) 台风路径取自佛山气象 (<http://www.fs121.com/record/typhoon.html>). 实测站点风速、水位资料由国家海洋局东海预报中心提供.

2.1 台风“韦帕”风暴潮的计算与检验

TC0713 台风风暴潮的计算中台风系数取为 0.6, 大戢山和滩浒岛两站点风速比较如图 4 所示, 可看出在台风登陆前后计算风速与实测值误差较大, 而在台风尚未登陆以及登陆后风速与实测值比较吻合. 这主要是因为当台风离岸较近时, 其下垫面由海洋变为陆地, 气压场在此时已经不是圆对称气压场, 而本文所用计算模式中仍采用圆对称气压场, 导致风场的

计算存在较大误差.

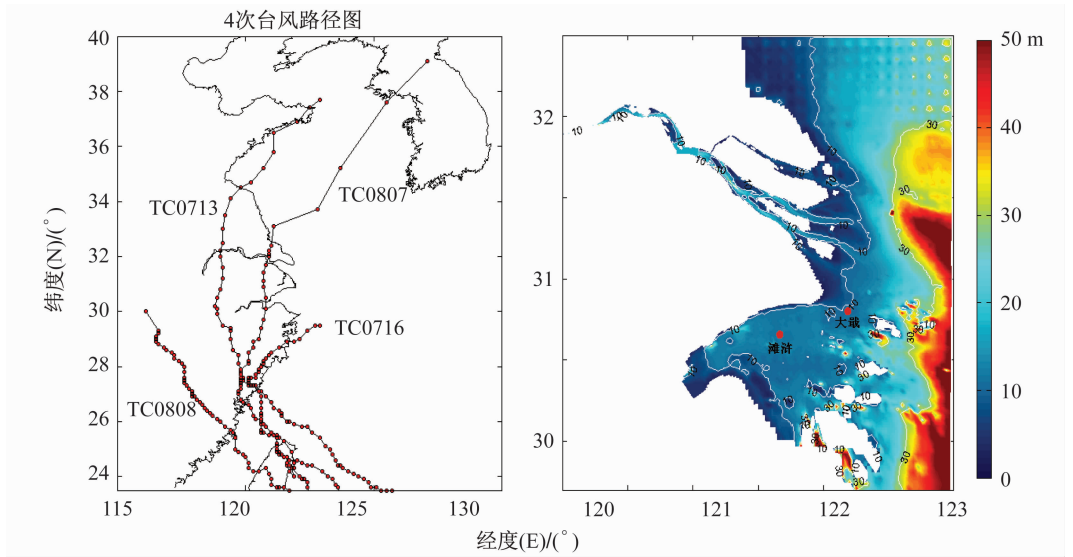


图 3 站点分布和四次台风路径图

Fig. 3 survey stations and typhoon tracks

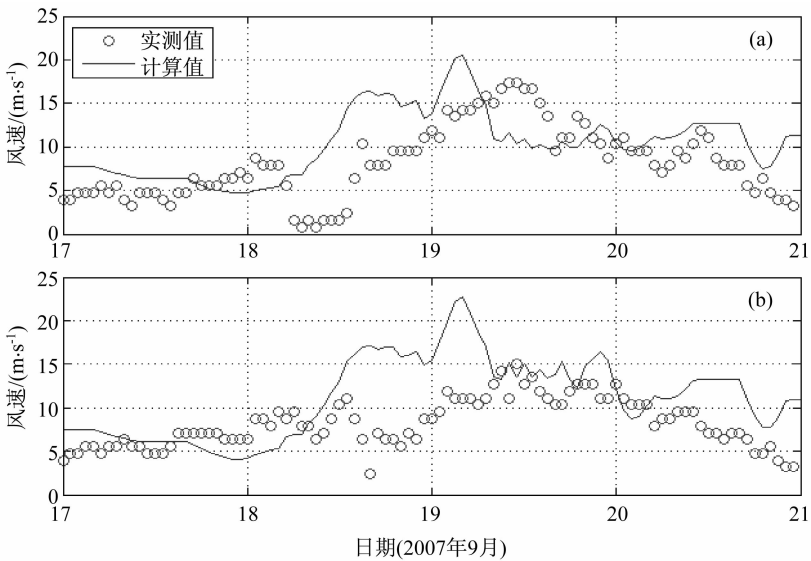


图 4 TC0713 台风风速比较图

Fig. 4 Comparison of observed winds with computed ones for Typhoon Wipha

注:图(a)为大戢;图(b)为滩浒

图 5(a)为 0713 号“韦帕”台风风暴潮计算中大戢山和滩浒岛两站的水位比较,(b)为加波浪和不加波浪两种情况下水位的差值.不加波浪时的水位与实测值的 17-20 日 4 d 平均误差分别是大戢山 9.89%,滩浒岛 10.01%,加波浪时的水位与实测值的 17-20 日 4 d 平均误差分别是大戢山 9.20%,滩浒岛 9.70%.但是在台风离长江口杭州湾地区比较近的 19 日 0:00 至 21 日 0:00 两天内,两站水位误差分别为:不加波浪时大戢山 10.40%,滩浒岛

10.25%，加波浪时的大戢山 9.15%，滩浒岛 9.68%。加波浪后在高潮位时与实测值符合更好，尤其是在台风登陆前后一段时间内。而从 5(b)图中也可看出波浪对风暴潮的主要影响时段，波浪对 0713 号台风风暴潮的影响就主要在 19-21 日两天内。

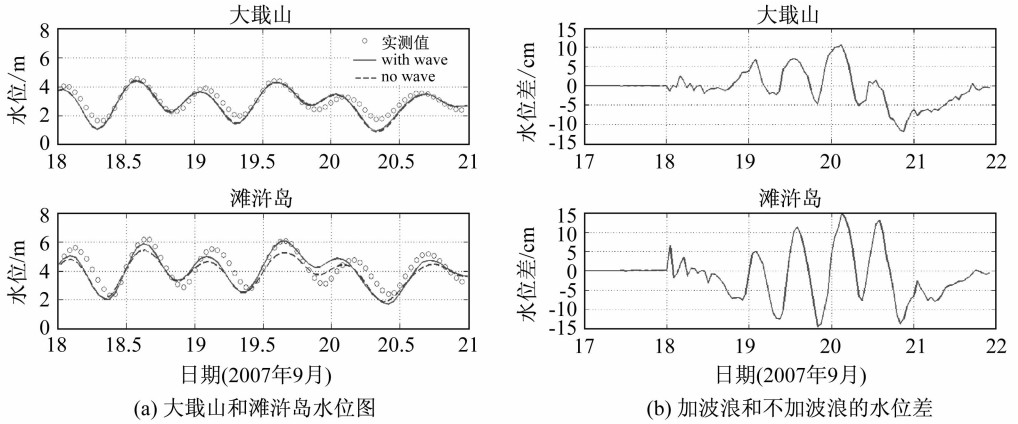


图 5 水位比较图

Fig. 5 Comparison of observed levels with computed ones for Typhoon Wipha

图 6 为不加波浪计算时台风登陆前 6 h, 台风登陆时(登录时间为 19 日 2:30)以及台风登陆后 6 h 的长江口及其邻近海域的增水分布情况。随着台风向长江口杭州湾地区的行进, 该区域的增水逐渐增加。

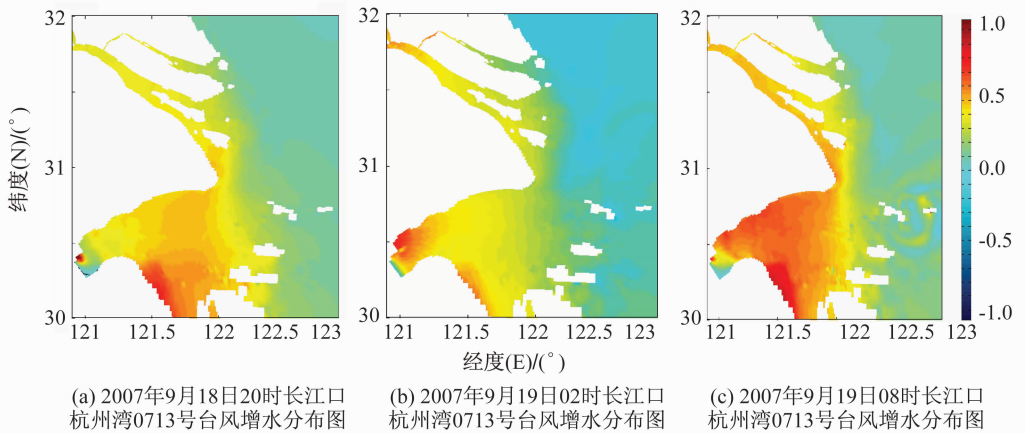


图 6 增水分布图(单位:m)

Fig. 6 Distribution of the surge setup during Typhoon Wipha (Unit: m)

图 7 为对应图 6 中 3 个时刻的计算区域波要素分布图。可看出长江口及其邻近海域的波高逐渐变大。当波浪传播到近岸地区时,受地形的影响产生明显的梯度变化,从外海到近岸波高逐渐变小。

当考虑波浪时,这两站的水位精度均有提高,特别是在台风登陆前后 9 月 19 日至 9 月 21 日期间(登录时间为 19 日 2:30),在高潮位时加波浪比不加波浪与实测值吻合更好,这对实际应用有着重要意义。从图 8 中可看出,大戢和滩浒两站在台风登陆前后 9 月 19 日到 21 日这两天内的波高值比较大,从而导致对增水的影响比较大。

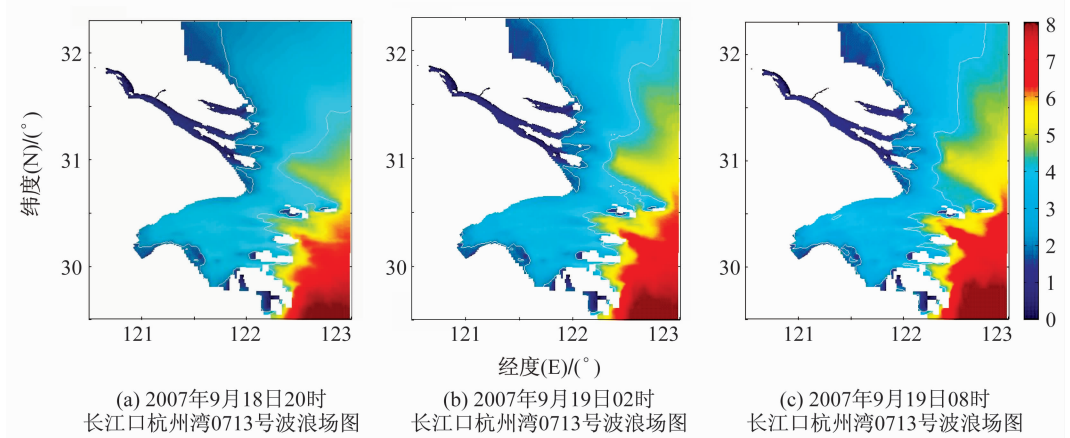


图 7 波高分布图(单位:m)

Fig. 7 Distribution of the wave heights during Typhoon Wipha(Unit:m)

2.2 波浪对 4 次台风风暴潮单站水位的影响分析

以同样的方法对 TC0716, TC0807 和 TC0808 这 3 次台风风暴潮进行计算分析. 图 9 为水位随时间变化过程与加波浪和不加波浪两种情况的水位差.

因实测资料只有大戢和滩浒两站, 现仅将这两站的比较结果总结为表 1.

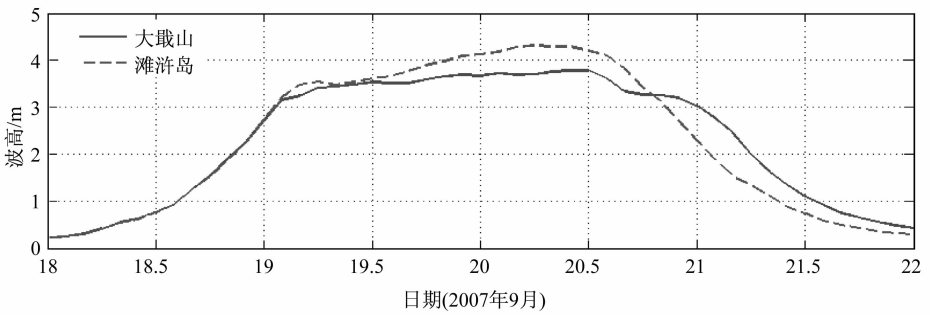
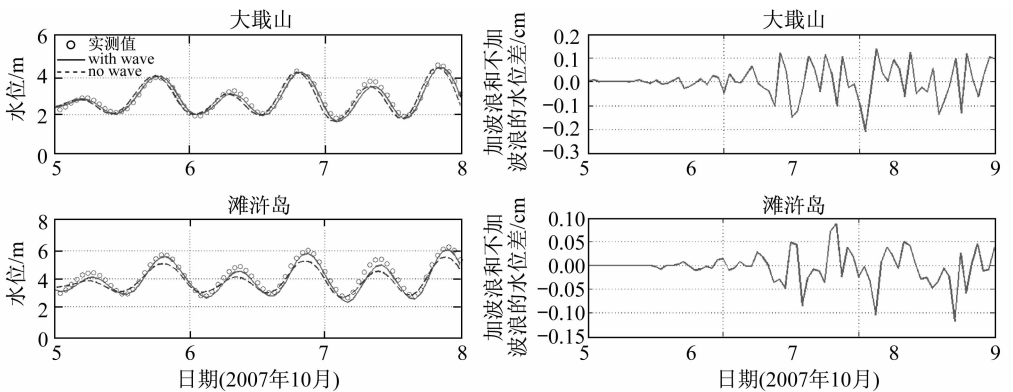
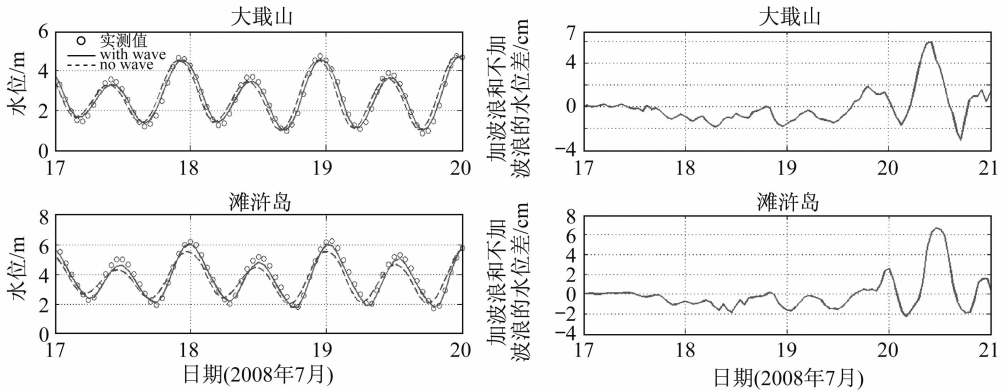


图 8 波高随时间变化图

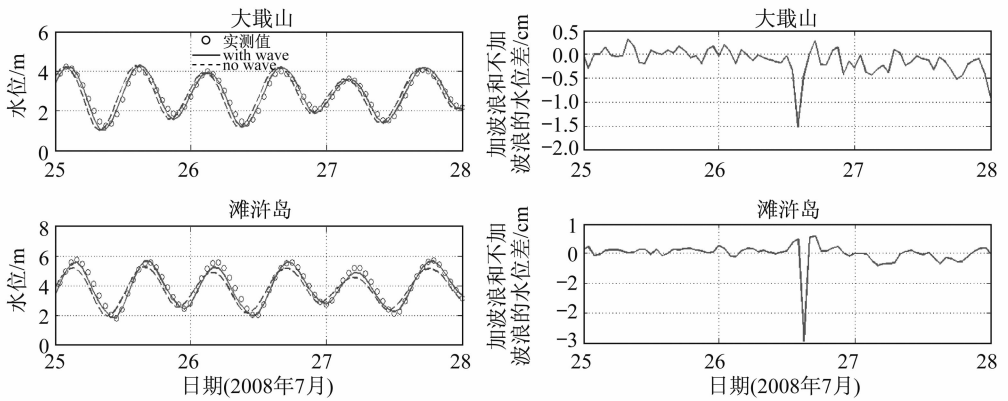
Fig. 8 The waveheights of DaJi and TanXu during Typhoon Wipha



(a) 0716号台风水位过程比较(2007年10月)



(b) 0807号台风水位过程比较(2008年7月)



(c) 0808号台风水位过程比较(2008年7月)

图9 其他3次台风过程的水位比较图

Fig. 9 Comparison of observed levels and computed ones for other three typhoons

表1 各台风计算情况表

Tab.1 The comparisons of three typhoons

台风编号	计算时间段 (北京时间)	台风系数	整个水位计算时段的平均误差/ 台风登陆前后时的平均误差(%/%)			
			加波浪		不加波浪	
			大戢山	滩浒岛	大戢山	滩浒岛
TC0716	20071002.00—20071008.23 登录时间:2007年10月7日15:30	0.7	5.2/5.4	6.1/8.0	6.0/7.5	6.9/9.7
TC0807	20080715.00—20080721.23 登录时间:2008年7月18日18:10	0.45	6.77/7.2	5.26/5.6	6.8/7.2	5.3/5.8
TC0808	20080725.00—20080730.23 登录时间:2008年7月28日22:00	0.85	5.8/7.7	7.2/10.5	5.9/7.9	7.3/10.7

通过对以上4次台风风暴潮的计算可知:

(1) 在强台风中,尤其是台风登陆时刻,大戢和滩浒两站加波浪比不加波浪的计算结果精度提高,因此在台风登陆时刻,尤其是登陆前后两天内计算风暴潮应考虑波浪的作用;当台风登陆点离计算区域较远时,在该地区产生的波浪较小,因此对增水的影响不是很大,在

计算时可不考虑波浪,提高计算效率;波浪向岸传播到近岸缓坡地带时会受地形、底摩擦等影响而产生破碎,迫使水体向岸堆积起来形成增水,波浪可在一个很小的范围内发生巨大的变化.所以在计算近岸地区的风暴潮时也需要考虑波浪的作用.

(2) 分析原因可知,对 TC0713 和 TC0807 这两个南登陆北上转成型台风,登陆地点离计算区域较近,对该区域的风场、波浪场作用较强,在台风登陆前后几小时内加波浪和不加波浪时水位差较大;而对 TC0716 和 TC0808 这两个南登陆型台风,登陆地点离计算区域较远,对该区域的风场、波浪场作用较弱,在台风登陆前后几小时内加波浪和不加波浪的水位差较小.

3 结 语

文章计算了 2007 - 2008 年期间影响长江口及其邻近海域的 4 次台风风暴潮,以 0713 号台风风暴潮为例分析了台风过程的风速,水位和增水变化并与实测资料比较,精度基本控制在 10% 左右,并对加波浪计算和不加波浪计算进行了比较.当波浪传播到近岸缓坡地带,受地形等影响,波浪产生破碎,计算风暴潮时应考虑波浪的作用.在台风登陆前后一段时间内,加波浪比不加波浪计算精度提高,在实际计算时应考虑波浪的作用.而对登陆地点离计算区域较远的台风,加波浪与不加波浪相比差别不大,而且不加波浪计算的精度已经满足实际要求,可不加波浪计算,提高效率.对不同路径类型的台风,波浪的作用强度不同,对南登陆北上型台风计算时需考虑波浪的作用,而对南登陆型可不必考虑.本文分析了波浪对不同路径,不同时刻,不同地点的增水影响,可提高计算效率,并提高台风风暴潮的预报精度.

致谢 本文得到了国家海洋局东海预报中心领导和数值预报室同仁们的热情帮助,在此表示衷心的感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 秦曾灏,冯士筭. 浅海风暴潮动力学机制的初步研究[J]. 中国科学, 1975, 18(1): 64-79.
QIN Z H, FENG S Z. The mechanism study of shallow water storm surge[J]. Science in China, 1975, 18(1): 64-79.
- [2] 孙文心,冯士筭,秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟(I):零阶模型对渤海风潮的初步应用[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 1-11.
SUN W X, FENG S Z, QIN Z H. Numerical modeling of an ultra-shallow water storm surge(I)[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 1979, 1(2): 1-11.
- [3] 孙文心,冯士筭,秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟(I):渤海风潮的一阶模型[J]. 山东海洋学院学报, 1980, 10(2): 7-19.
SUN W X, FENG S Z, QIN Z H. Numerical modeling of an ultra-shallow water storm surge(I): The first-order model of the behai sea wind-surges[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1980, 10(2): 7-19.
- [4] 刘凤树. 台风风暴潮某些特性的分析[J]. 海洋学报, 1980, 2(3): 12-23.
LIU F S. An analysis of the characteristics of storm surges by typhoon[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 1980, 2(3): 12-23.
- [5] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京:科学出版社, 1982: 148-187.

- FENG S Z. Introduction to Storm Surge[M]. Beijing: Science Press, 1982: 148-187.
- [6] 陈长胜, 秦曾灏. 江浙沿海模型台风暴潮的数值模拟[J]. 山东海洋学院学报, 1985, 15(1): 11-18.
CHEN C S, QIN Z H. Numerical simulation of surges caused by the model typhoons along the east coast of Zhejiang and Jinagsu provinces[J]. Journal of Shangdong College of Oceanology, 1985, 15(1): 11-18.
- [7] 张延廷, 王以娇. 渤海风暴潮与天文潮耦合作用的数值模拟[J]. 海洋学报, 1990, 12(4): 426-431.
ZHANG Y T, WANG Y J. Numerical study of the interaction between storm surge and tide in Bohai Sea[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 1990, 12(4): 426-431.
- [8] 王以娇, 张延廷, 赵永良. 北黄海天文潮与风暴潮耦合水位的数值预报方法[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(4): 1-8.
WANG Y J, ZHANG Y T, ZHAO Y L. A Numerical prediction method of the sea level under the coupling action between storm surge and astronomical tide in the Northern Yellow Sea [J]. Journal of Oceanography of Huanghai&Bohai Seas, 1993, 11(4): 1-8.
- [9] 端义宏, 秦曾灏. 上海沿岸天文潮与风暴潮非线性相互作用的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(1): 82-87.
DUAN Y H, QIN Z H. Numerical study of nonlinear interaction between storm surge and tide in Shanghai coast [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(1): 82-87.
- [10] 黄华, 朱建荣, 吴辉. 长江口与杭州湾风暴潮三维数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2007(4): 9-19.
HUANG H, ZHU J R, WU H. 3-D numerical simulation of storm surge in the Changjiang Estuary and the Hangzhou Bay[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2007(4): 9-19.
- [11] WOLF J, HUBBERT K P, FLATHER R A. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model[J]. Proudman Pceanographic Laboratory Rep, 1988(1): 1-109.
- [12] TOLMANN H L. Effects of tides and storm surges on North Sea wind waves[J]. J Phys Oceangr, 1991(6): 766-781.
- [13] MASTENBROEK C, BURGERS G, JANSSEN P A E M. The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer[J]. J Phys Oceangr, 1993(6): 1856-1866.
- [14] 金正华, 王涛, 尹宝树. 浪、潮、风暴潮联合作用下的底应力效应[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 604-610.
JIN Z H, WANG T, YIN B S. The effect of bottom friction in the process of wave-tide-surge interaction[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 604-61.
- [15] 尹宝树, 王涛. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 109-116.
YIN B S, WANG T. Nuumerical study of the influence of waves and tide-surge interaction of waves in Bohai Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 109-116.
- [16] 林祥, 尹宝树, 侯一筠. 辐射应力在黄河三角洲近岸波浪和潮汐风暴潮相互作用中的影响[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 615-621.
LIN X, YIN B S, HOU Y J. Effects of radiation stress in the interaction of coupled wave-tide-surge in the coastal area of Huanghe delta[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 615-621.
- [17] BAOSHU Y N, RINA S H A. Numerical study of wave-tide-surge coupling processes[J]. Bulletin of Marine Science, 2006(47): 1-15.
- [18] 丁平兴. 太湖流域风暴潮及潮汐特性分析与预报模型研究报告[R]. 上海: 华东师范大学, 2005: 45-84.
DING P X. Research report for the surges-tide analysis and prediction model in Taihu Lake [R]. Shanghai: East China Normal University, 2005: 45-84.
- [19] HU K L, DING P X, GE J Z. Modeling of storm surge in the coastal waters of Yangtze Estuary and Hangzhou Bay, China[J]. Journal of Coastal Research, SI50(proceedings of the 9th International Coastal Symposium), 2007: 527-533.
- [20] 刘永玲, 王秀芹, 王淑娟. 波浪对风暴潮影响的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, B12: 1-7.

LIU Y L, WANG X Q, WANG S J. A numerical study of the influence of waves on storm surges[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2007, B12: 1-7

[21] 葛建忠. 风暴潮集成预报及可视化[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 20-25.

GE J Z. Numerical forecasting and visualization of storm surge[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 20-25.

(上接第 6 页)

[12] 朱建荣, 胡松, 傅德健, 等. 河口环流和盐水入侵 I: 模式及控制数值试验[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(2): 180-184.

ZHU J R, HU S, FU L H, et al. Estuarine circulation and saltwater intrusion I: Model and control numerical experiment[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(2): 180-184.

[13] WU H, ZHU J R, CHEN B R, et al. Quantitative relationship of runoff and tide to saltwater spilling over from the North Branch in the Changjiang Estuary: A numerical study estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2006, 69: 25-132.

华东师范大学学报(自然科学版) 2010 年编委会会议召开

华东师范大学学报(自然科学版)2010 年编委会会议于 2010 年 6 月 29 日,在校档案馆会议室召开。会议由编委会主任俞立中校长主持,共有 20 位编委出席了会议。会议主题主要围绕坚持办刊特色、发展网络化和国际化、加强编辑部建设等方面展开。编委们踊跃发言,他们肯定了学报近几年来取得的各项进步,并就提高英文摘要质量、加快生物类专业稿件的处理以及学报网络整合系统建设等,提出了很好的建议。