

台州沿海地区台风风暴潮淹没风险分析

吴玮¹, 刘秋兴², 于福江², 傅赐福², 董剑希²

(1. 浙江省海洋监测预报中心, 浙江 杭州 310007; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要:台州市是我国遭受台风风暴潮灾害最为严重的地区之一,对台州地区进行风暴潮淹没风险分析对于该区域的海洋防灾减灾工作有着十分重要的意义。找出对整个评估区域各控制点均能产生较大增水的台风路径作为淹没风险分析的基础路径,同时为保守起见,保证每次台风过程的最大增水均叠加在当地天文高潮上,根据台风强度不同分为6个等级对应风暴潮的不同强度,评估分析六个不同等级的台风风暴潮叠加到台州当地天文高潮所产生的风暴潮灾害。评估中还充分考虑了实际一维海堤等对评估结果的影响,评估结果更加合理。从分析的结果来看,由于台州市区高程普遍偏低,一旦出现海水漫堤的情况,将会在评估区域内造成大面积的淹没,受灾程度视淹没深度和范围不同而不同。

关键词:台风风暴潮;天文潮;淹没风险

中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2012)02-0025-07

1 引言

风暴潮灾害是当今世界上最严重的海洋灾害之一,一次严重的风暴潮灾害在科技高度发达的今天仍然会造成成千上万甚至数万人的死亡。我国位于西北太平洋沿岸,是风暴潮灾害的多发区,而地处我国东南沿海的浙江省更是风暴潮灾害的重灾区^[1]。

近年来,随着风暴潮预报技术的不断提高,政府和沿岸居民对风暴潮防灾减灾意识的不断加强,风暴潮灾害对我国造成的人员伤亡已经大大降低,但风暴潮给沿岸居民生产生活造成的严重潜在威胁仍然不容忽视。国际上新发展起来的风暴潮灾害风险评估技术是通过科学合理的风暴潮淹没风险分析,区别出不同地区的淹没风险等级,进而更加科学合理地规划沿海地区的产业发展及人口布局,尤其是将对风暴潮敏感的目标物置于安全性较高的区域,也可以有效的减少灾害

损失。目前美国和日本等一些发达国家已经开展了风暴潮灾害风险评估方面的工作^[2,8]。

台州市是我国浙江沿海遭受风暴潮灾害最为严重的地区之一,统计表明:建国以来在台州海门站出现了超警戒潮位80 cm(达到红色预警级别)的风暴潮过程共5次,分别为8923号台风风暴潮、9417号台风风暴潮、9711号台风风暴潮、0414号台风风暴潮、0515号台风风暴潮。每次严重的风暴潮过程均给台州带来了人员伤亡和重大的经济损失,特别是著名的9711号台风影响期间,海门站于1997年8月18日21时30分出现了750 cm的高潮位,超过当地警戒潮位达190 cm,是建国以来海门站出现的最高潮位记录。台州市作为重灾区,椒江两岸一片汪洋,全市有190个乡的4800个行政村受灾,受灾人口470多万,损失极其惨重。因此开展风暴潮淹没风险分析工作对于台州未来的城市布局和防灾减灾工作有着十分重要的意义。

收稿日期:2011-01-06

基金项目:海洋局公益性项目“浙江省沿海重点区域海洋灾害风险评估与应急技术响应研究”(200705004)

作者简介:吴玮(1978-),男,助理研究员,主要从事海洋灾害的预报和研究工作。E-mail: wuwei@nmefc.gov.com

2 基础资料收集和分析

包括历史风暴潮灾害情况统计、水深、地形、海堤及潮位等数据在内的基础数据的准确性对于台州沿海的风暴潮淹没风险分析有着十分重要的作用。

2.1 水深、高程、岸线数据

水深数据采用国家海洋环境预报中心业务化预报所用的分辨率为2'的水深数据插值到网格节点；台州近海部分水深数据采用实际调查所得，基本能反映台州沿海最新的水深变化情况；台州地区的岸线数据为“908”调查的最新成果；陆地高程数据采用浙江省测绘局提供的台州地区1:10000的高程数据，实际应用中选用反距离加权插值法插值到网格节点，能够较为真实的反映地形信息（见图1）；本文中采用的海门站平均海平面位于当地吴淞基面之上223 cm。

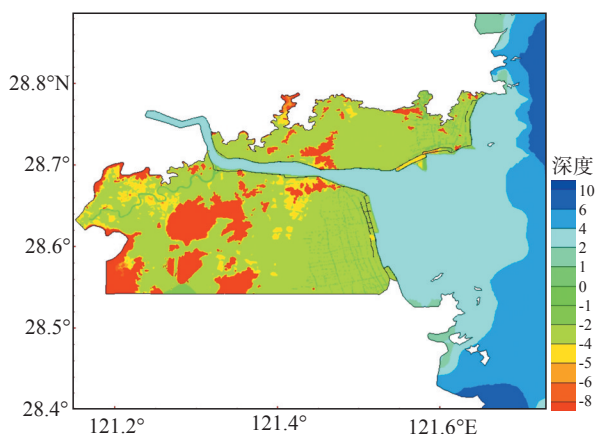


图1 台州地区最新的水深及地形分布情况

为了色彩对比明显，整个评估区域内的水深地形及海堤等数据的分布情况，高程大于8 m处高程设为8 m。可以清楚地看到台州地区河流、山地、平原的分布情况。

2.3 海堤数据

海堤分布及高程信息对于风暴潮淹没风险分析的影响较大，特别是在不考虑海浪作用时，陆地部分是否淹没直接取决于周围的海堤的防护情况，只有当海水高过海堤高程时才会发生海水淹没情况。浙江全省海堤修筑标准较高^[3]，台州目前

建成海堤总长45.457 km，分布在南北两岸，城区地段建设标准为百年一遇，其余为50年一遇标准。高标准海塘的建成，极大地提高了台州沿海防潮能力，成为椒江两岸乃至整个台州的防洪、防潮屏障。总体来看，由于台州两岸海堤修建标准较高，基本都达到了海堤堤顶高程普遍在8.4 m（吴淞基面）以上。海堤比较坚固，并且建有较好的挡浪墙（见图2）。

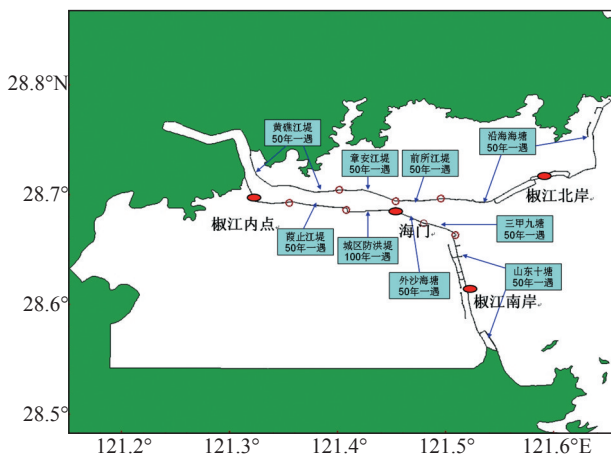


图2 台州沿岸海堤及控制点分布情况

2.4 背景天文潮的情况

台州地处浙江南部，天文潮波进入浅海后，由于水深、地形不断变化，再加之径流作用，浅水分潮具有由东向西、从江口到江顶逐渐增大的趋势。海门站的潮汐性质属于非正规半日浅水潮，此海域潮差较大^[5-6]。纵观5次严重的风暴潮过程，它们均发生在当年的8或9月份，此时浙江沿海天文高潮普遍较高，而风暴潮灾害的发生及严重程度在很大程度上需要较高天文潮的配合。由于影响浙江台州沿岸的台风都集中于每年6—10月，为了保守起见，同时考虑长周期天文潮的影响，本文选取了台州海门站2001—2019年19年间以上五个月月最高潮位的平均值为背景潮汐的最高天文潮潮位值，通过对潮汐计算模块中调和常数的调整，保证了潮汐曲线中峰值达到540.5 cm（基于吴淞基面），即潮汐曲线的峰值为317.5 cm（基于平均海平面）值，将其作为保守计算的潮汐边界条件。为方便起见，本文均以平均海平面作为计算基面^[4]。

3 风暴潮淹没风险分析

3.1 风暴潮模式介绍

本文采用的是当今国际上先进的 ADCIRC 模型 (A (PARALLEL) ADVANCED CIRCULATION MODEL FOR OCEANIC, COASTAL AND ESTUARINE WATERS), 该模型基于有限元方法, 采用三角网格技术, 可以应用于海洋、河口海岸区域的水动力计算, 实现了对水深地形的精细刻画。模型采用广义波动连续性方程 (GWCE) 与动量方程结合基于伽辽金有限元方法求解方程, 提高了计算的精确性和稳定性。同时该模式也是目前为数不多的可以有效处理一维海堤的风暴潮模式。此模式在美国风暴潮风险评估工作中得到了广泛的应用^[9-10], 王培涛等^[7]对该模式在中国沿海的应用做了验证工作, 效果良好。

在球坐标系下海水的连续方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \quad (1)$$

在球坐标系下海水原始动量方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) \quad (2)$$

$$V = -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{sl} - \tau_{bl}}{\rho_0 H} + D_\lambda$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) \quad (3)$$

风暴潮漫滩模式对台州陆地的网格分辨率为 70—80 m, 在椒江水域的分辨为 100 m 左右, 椒江水域外分辨率依次降低。计算区域的高分辨率非结构网格包括了 604787 个三角形单元, 308186 个节点。其中 80 % 以上的节点分布在潮水可能淹没

的陆域部分。网格分辨率由外及内依次提高, 模式计算范围较大, 这样既消除了边界对计算结果的影响, 同时又大大缩短了计算时间。模式运行在神威 3000 大型计算机上, 采用 32 核并行计算。

3.2 最危险台风路径的选取

历史上影响台州沿海的台风路径主要包括由南往北的如 9216 号台风; 路径由东往西的如 8923 号台风; 近海转向的如 7910 号台风。从对沿岸地区的实际影响来看, 台州历史上五次大的灾害性风暴潮过程均为由东向西类型。为了找出对台州沿海地区影响最大的台风路径, 本文在台州沿岸布置了 4 个控制点, 见图 2, 选取的这些点基本上能

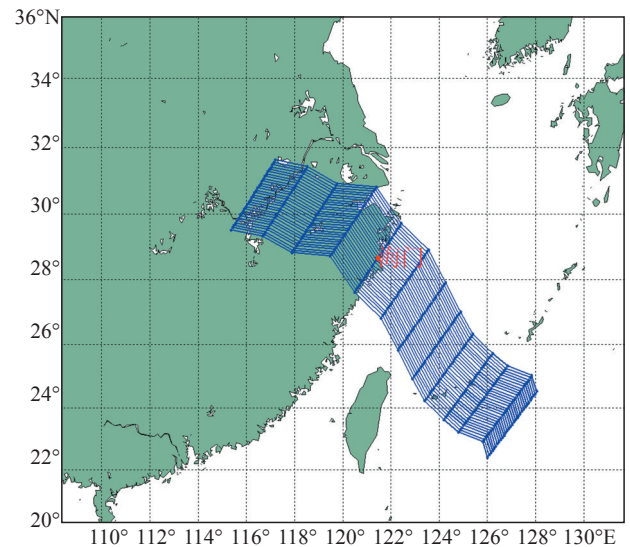


图3 派生出的台风路径

反应出台州沿岸的风暴潮的变化情况。台风路径以台州历史上引起最大增水的 0414 号台风路径为基础路径, 以 7.5 km 为间隔派生出 31 条台风路径 (见图 3)。在 31 条路径中筛选出可能对台州地区引起较大增水的 9 条路径, 由表 1 可以大致看出每次不同的台风路径在台州沿海各布点造成的水位变化情况。

表1 相同强度、不同路径台风对各站点增水表 (单位/cm)

路径站点	-6/4R	-5/4R	-4/4R	-3/4R	-2/4R	-1/4R	0R	1/4R	2/4R
椒江口北岸点	184	285	312	320	308	274	232	194	168
椒江口南岸点	210	325	351	350	319	283	254	202	196
椒江内点	340	486	510	479	398	333	283	231	199
海门	246	360	387	387	362	316	266	215	180

注: 0R 为穿过海门站的台风路径; -1/4R 为穿过海门点台风路径左方 1/4 最大风速半径, 1/4R 为穿过海门点台风路径右方 1/4 最大风速半径处。

通过各条不同台风路径风暴潮模拟的情况来看,我们对最有可能在台州地区引起较大增水的9条台风路径进行了筛选,得到了位于基础路径左方1倍最大风速半径距离处路径为对沿岸各站点均能产生很大增水的台风路径,结合实际预报经验,我们有理由相信此台风路径为影响台州沿岸的最危险的台风路径,并将此路径在不同台风强

度下产生的淹没风险作为我们对该区域淹没风险分析的标准。

3.3 台风强度分级

在风暴潮灾害风险分析中,我们根据台州地区的实际情况并且结合最新制定的风暴潮风险评估导则的规定,把台风等级分为5类,同时增加了强热带风暴一级(见表2)。

表2 不同等级台风强度分级

等级 强度	强热带风暴 (一级)	台风 (二级)	强台风 (三级)	超强台风 (四级)	超强台风 (五级)	超强台风 (六级)
中心气压 (hPa)	985	965	945	935	925	915
参考风速 (级)	10—11	12—13	14—15	16	17	>17

表3 不同等级台风影响下台州附近控制点最高潮位分布 (单位/cm)

台风强度 / 控制点	海门站	椒江内点	椒江口外南岸	椒江口外北岸
一级, 985 hPa	458	463	462	448
二级, 965 hPa	514	580	528	499
三级, 945 hPa	599	645	620	579
四级, 935 hPa	652	665	676	629
五级, 925 hPa	689	704	718	664
六级, 915 hPa	712	725	750	683

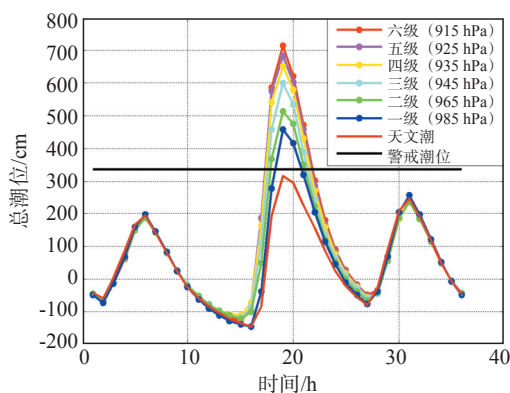


图4 台风影响下海门站的计算潮位

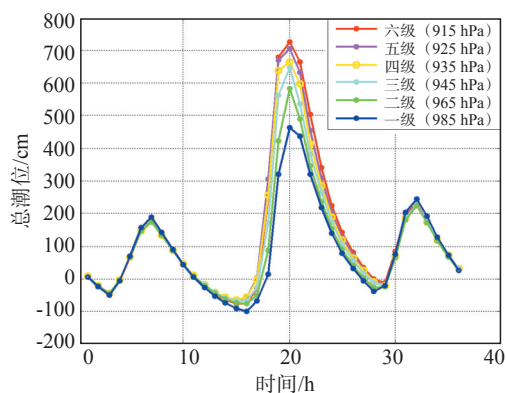


图5 台风影响下椒江内点的计算潮位

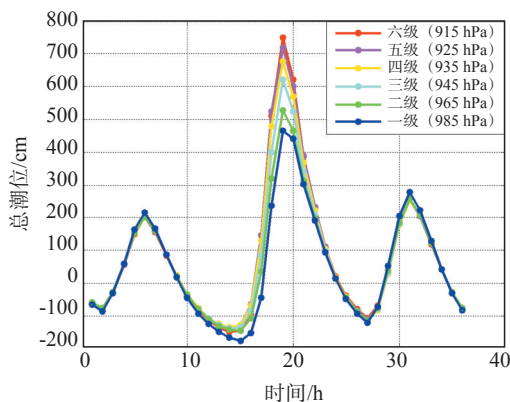


图6 台风影响下椒江口南岸点的计算潮位

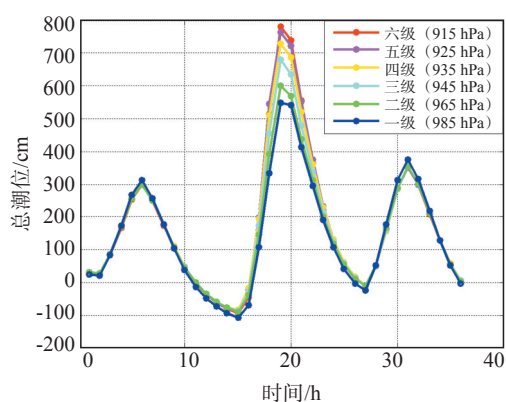


图7 台风影响下椒江口北岸点的计算潮位

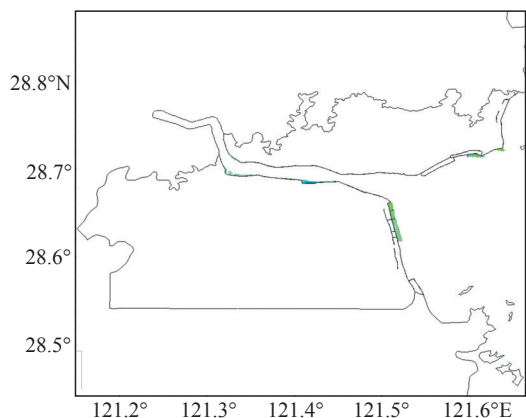


图8 985 hPa台风登陆时最不利淹没情况

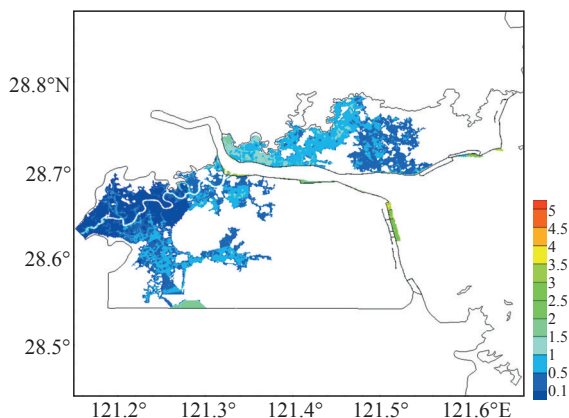


图9 965 hPa台风登陆时最不利淹没情况

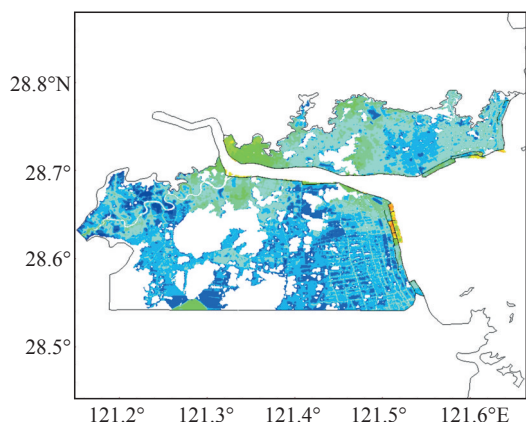


图10 945 hPa台风登陆时最不利淹没情况

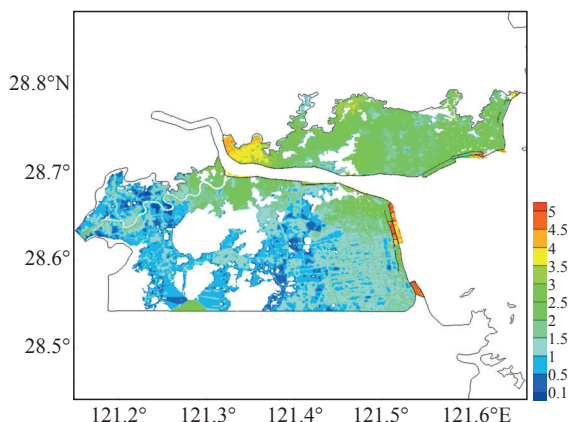


图11 935 hPa台风登陆时最不利淹没情况

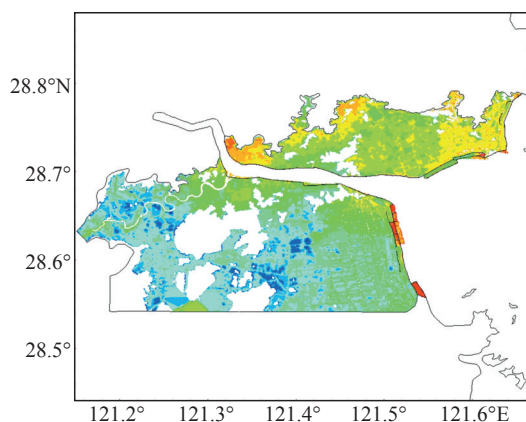


图12 925 hPa台风登陆时最不利淹没情况

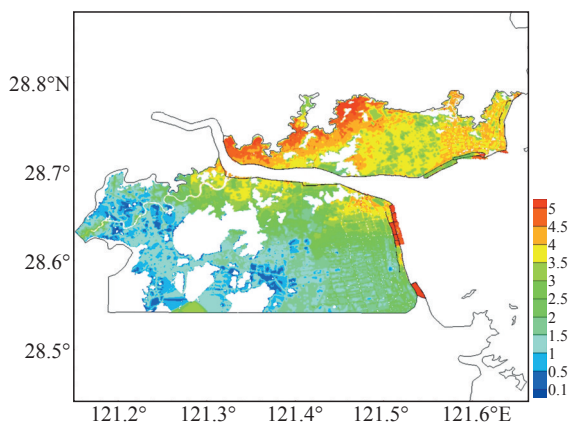


图13 915 hPa台风登陆时最不利淹没情况

3.4 不同强度台风在沿岸各点引起的增水值

台州历史上5次严重的风暴潮灾害中8923号台风风暴潮、0414号台风风暴潮、9711号台风风

暴潮、0515号台风风暴潮四次非常严重的风暴潮灾害最高水位均发生在当地的天文高潮阶段。因此确定了最有利的台风路径后,根据不同的台风强度标准,为保守起见,我们以海门站为例,将

各不同等级的台风引起的最大风暴增水叠加到该站的天文高潮上,得出该等级台风对台州地区造成的最大可能淹没风险。图4—7为沿岸各站不同等级台风与当地天文高潮叠加时的过程曲线,以下高程均以当地平均海平面为基准。

3.5 不同强度台风的淹没范围及淹没水深

从不同等级台风登陆台州沿海计算的淹没情况图来看(见图8—13),在现有海堤及防护条件下,当台风以中心气压为985 hPa的强度登陆台州时,除岸滩处会有些许淹没及滩涂养殖损失外,无明显的风暴潮灾害发生;当台风以中心气压为965 hPa的台风登陆台州地区恰遇当地天文高潮时,在沿岸没有溃堤的条件下,如果台风移动速度较快,加上弯顶的黄礁等地海堤较为薄弱,会在弯顶处产生一定的漫堤现象,但淹没水深普遍不深,大的淹没范围在很大程度上是因为水在风的强迫下在陆上的自由流动造成的;当台风以945 hPa的强度登陆恰遇当地天文高潮时,会出现一定的潮水漫堤现象,但漫堤持续时间较短,一般在1 h左右,椒江北岸黄礁、前所、章安及椒江南岸大部分平原地带等地淹没水深一般在1 m以下,此种强度台风登陆时通常会对局部脆弱海堤造成威胁,产生局部越浪甚至溃堤,但总体来看,由于台州市区海堤防御标准较高,潮水不会在市区处产生漫堤现象。图中市区处出现淹水主要是由于周围水体的自由流动造成的,当台风以935 hPa及以下的强度登陆恰遇当地天文高潮时,如此的台风强度海水足可以大面积漫过海堤,由于堤内高程除山包外基本不超过5 m,地势低洼区域容易出现海水漫堤现象,而且此时产生漫堤将会持续1 h以上,往往造成大面积的淹没现象,此时产生的海浪对椒江两岸的海堤也会产生较大的威胁,因此台风以此强度甚至更强登陆,并且最大增水赶在天文高潮时,将会产生大面积的漫堤和越浪现象,台州市区进水,水深较深,受灾严重。

4 结论

本文选用目前国际上先进的风暴潮漫滩模式对台州区域进行风暴潮灾害的淹没风险分析,模式中充分考虑了一维海堤等情况,精细地刻画了

评估区域水陆地形的变化,同时对不同等级台风影响下的台州淹没区域给出了细致的划分。潮水淹没范围均出于保守计算考虑,最有利路径的最大台风增水叠加到当地天文高潮位上,实际上相同强度台风登陆时造成的危害均小于或等于文中所示的淹没范围和水深。对台州区域进行细致的淹没风险分析,对于该区域的防潮减灾和产业布局有着重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 欧进萍,段忠东,常亮.中国东南沿海重点城市台风危险性分析[J].自然灾害学报.2002,11(4):9-17.
- [2] 王喜年.SLOSH模式的进一步应用—西南佛罗里达风暴潮图集[J].海洋预报.1987,(S):30-47.
- [3] 黄世昌,周骥,谢亚力,等.浙江省海塘塘顶高程的确定[J].海洋工程.2008,27(3):58-64.
- [4] 黄世昌,李玉成,谢亚力,等.杭州湾内天文潮与风暴潮耦合模式建立和应用[J].大连理工大学学报.2010,50(5):735-741.
- [5] 陈倩,黄大吉,章本照.浙江近海潮汐潮流的数值模拟[J].海洋学报.2003,25(5):9-19.
- [6] 王凯,方国洪,冯士筴.渤海、黄海、东海M2潮汐潮流的三维数值模拟[J].海洋学报.1999,21(4):1-13.
- [7] 王培涛,于福江,刘秋兴,等.福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J].海洋预报.2010,27(5):7-15.
- [8] Kumar V S. Assessment of storm surge disaster potential for the Andaman island[J]. Journal of Coastal Research.2008,24(2S): 171-177.
- [9] Lin N,Emanuel K A,Smith,JA, et al.Risk assessment of hurricane storm surge for New York City[J].Journal of Geophysical Research.2010, 115, D18121.
- [10] Niedoroda A W,Resio D T, Toro G R, et al.Analysis of the coastal Mississippi storm surge hazard[J].Ocean Engineering.2010,37: 82-90.

Inundation risk assessment of typhoon storm surge along Taizhou coastal areas

WU Wei¹, LIU Qiu-xing², YU Fu-jiang², FU Ci-fu², DONG Jian-xi²

(1. Marine Monitoring and Forecasting Center Of Zhejiang, Hangzhou 310007 China; 2. National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: Taizhou city is one of the areas that are most vulnerable to typhoon storm surge in China. Inundation risk analysis is important to Taizhou's marine disaster prevention and mitigation. A typhoon track is selected as a reference, which could cause the maximum storm surge over the entire region. For the sake of safety, the maximum storm surge should be superimposed on the high astronomical tide. According to the intensity of typhoon, storm surge's intensity is divided into six categories. Inundation risk should be evaluated through the different flooding areas caused by storm surge for various intensity. It should be more reasonable to take the effect of barrier into consideration. Inundation risk assessment indicate that Taizhou city will be largely flooded due to the low elevation of Taizhou City. Furthermore, the severity of disaster depends on the inundation depth and extent.

Key words: typhoon storm surge; astronomical tide; inundation risk assessment