

基于情景的上海台风风暴潮淹没模拟研究

殷 杰¹, 尹占娥², 于大鹏³, 许世远⁴

(1. 浙江工商大学旅游与城市管理学院, 浙江 杭州 310018; 2. 上海师范大学地理系, 上海 200234;
3. 拉夫堡大学地理系, 英国 莱斯特 LE11 3TU; 4. 华东师范大学地理系, 上海 200062)

摘要: 台风风暴潮是上海地区面临的主要自然灾害类型, 历史上对该区域造成了极为严重的灾害损失。通过上海沿海多站点水文频率分析结果发现, 由于高标准海塘的防护, 上海发生风暴潮漫堤淹没的几率较小。在此基础上, 构建了两处溃堤点6种重现期台风风暴潮溃堤情景, 采用高精度洪水数值模型(FloodMap)开展台风风暴潮淹没情景模拟。结果显示, 溃堤情景下, 风暴潮淹没仅发生在局部小范围区域内。因此, 可以认为在目前高标准海塘的保护下, 上海受台风风暴潮灾害影响有限。但是, 未来需重点关注全球气候变化可能导致的极端台风风暴潮事件。

关键词: 情景; 台风风暴潮; 淹没; 上海

中图分类号: X43 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)01-0110-06

20世纪以来, 随着全球变暖和海平面上升, 部分地区强热带气旋活动显著增加, 由极高海平面所引发的台风风暴潮灾害事件不断增多^[1]。中国东部沿海对于全球变化的响应则更为显著, 由于地处世界最大的热带风暴盆地——西北太平洋风暴盆地西北缘, 加之该区域人口、财富、资源等要素密集, 因此, 成为世界上受台风风暴潮灾害影响最为严重的地区之一, 在所有海洋灾害中台风风暴潮灾害造成的人员伤亡与经济损失是最为严重的^[2,3]。有效的减缓其灾害影响已经成为政府和研究者需要关注的重要议题。

上海地处海陆过渡带的长江三角洲河口地区, 地势低平, 每年不同程度地遭受台风、风暴潮、洪涝等自然灾害的侵袭, 属于典型的生态环境敏感区和台风风暴潮灾害高风险区^[4]。随着城市人口、经济快速发展, 过度开采地下水、大规模人工建筑和地下工程带来的地面沉降综合作用使得台风风暴潮灾害的“放大效应”更为显著。研究表明上海地区处于受海平面上升和地面沉降威胁最严重等级, 未来将面临极为严重的台风、风暴潮、洪涝等自然灾害威胁^[5]。

近一二十年来国际减灾经验表明, 在预防、应

对和救灾工作中, 灾害预防等是其核心内容, 以往的以救灾为主的灾害管理机制(灾后管理)已无法应对当前日益增加的灾害损失和风险。灾害风险管理(灾前管理)作为预防自然灾害、控制和降低灾害损失的重要基础性工作, 已成为当代国际减灾组织、灾害研究普遍关注的热点问题^[6]。基于情景的台风风暴潮淹没模拟可获得高精度和切合实际的研究结果, 从而为后续的风险管理提供坚实的基础和依据, 有较高的科学价值与实践意义。

1 研究区概况

上海地处长江三角洲前缘, 东濒东海, 南临杭州湾, 西接江、浙两省, 北界长江入海口。全市面积6 340.5 km², 地势低平, 平均海拔在4 m左右(吴淞高程)。上海是中国沿海地面沉降和海平面上升最快的区域之一, 1921~2007年, 平均沉降速率达22.94 mm/a^[7], 1978~2007年均海平面上升速率为3.8 mm/a^[8], 远高于全球和中国平均水平。此外, 上海也是中国人口最为密集, 经济最发达, 风暴潮设防水平最高的区域之一。2008年末, 上海市常住人口已经达到1 888万, 人口密度达到2 978人/km², 其工业总产值占全国的4%, 利税约占全国

收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-06-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41201550、41071324、40730526)、教育部人文社会科学研究项目(12YJCZH257)、上海市教委科研创新项目(13YZ061)、上海市教委重点学科项目(J50402)资助。

作者简介: 殷 杰(1983-), 男, 江苏姜堰人, 博士, 讲师, 主要从事城市自然地理与灾害风险管理研究。E-mail: rjay9@126.com

的11%。整个上海沿海建有一线海塘523.48 km, 设防标准基本达到和超过“防御100 a一遇潮位加11级风”。

历史上, 台风风暴潮对上海影响极为严重。据统计^[9], 751~1949年, 上海地区有142 a发生台风风暴潮灾害, 共计168次, 平均每7 a一次。其中出现“水高丈余, 死人及万”的特大台风风暴潮灾害10次以上^[10]。最为严重的是1696年强台风风暴潮造成上海地区死亡十万余众。1949年以后, 随着海塘的多次修建和加固, 台风风暴潮灾害造成的人员伤亡有所减少, 但是经济损失日益严重。如9711号台风期间, 适逢天文大潮, 潮灾影响极为严重, 造成经济损失约6.349亿元; 0509号台风风暴潮造成上海地区直接经济损失高达13.58亿元^[11]。

2 研究方法

上海沿海台风风暴潮位一频率分析依据上海沿海海塘设计参考标准, 即上海市水利工程设计研究院计算的沿海各潮位站点不同频率高潮位值^[12](表1)。目前, 上海沿海海塘可抵御100 a一遇潮位加11级以上风, 堤顶高程一般达到约9 m左右; 而上海陆地(区别于岛屿)沿海堤防则可在面临200 a一遇潮位加12级风的情况下不至于发生溃堤或漫堤, 其堤顶高程绝大部分已经达到甚至超过10 m(图1)。对比各站点高潮位频率分析结果可以看出, 即使出现千年一遇潮位, 现有堤防高度仍然超出其2 m以上。因此, 上海沿海区县目前甚至未来一段时间内, 发生由于风暴潮直接漫堤导致的潮灾几率极小, 重点需要预防可能产生的溃堤淹没情景。

台风风暴潮期间, 上海沿海海塘常发生溃堤决口, 溃堤的地点几乎遍布整个上海沿海区域。例

如, 9711台风风暴潮期间, 上海市共损坏海塘511处, 损坏长度69 km, 占第一线海塘总长的14%^①。而根据浦东新区2008年防台预案中公布的资料显示, 仅浦东沿海海塘至今还存在4处共2 207 m的未达标和存在安全隐患等的薄弱段。因此, 全面系统的研究整个沿海海塘溃堤的风险已经超出了本文的研究范畴, 这里仅从2008年浦东新区和2006年南汇区防汛防台应急预案中所列出的目前防御水平尚未达标的海堤中选取浦东合流污水竹园排放口(150 m长仅50 a一遇防御标准)和南汇小泖港(长3.8 km仅50 a一遇防御标准)两段海堤作为典型案例研究区。考虑到竹园排放口和小泖港分别位于外高桥和芦潮港潮位站附近, 以上述两个潮位站点的潮位一频率分析结果为基础, 将各重现期潮位与两处溃堤位置地面高程进行比较后发现, 20 a一遇以上重现期潮位高于溃堤口陆地高程, 从而可能造成淹没影响。因此, 分别设置20、50、100、200、500和1 000 a一遇6种重现期台风风暴潮溃堤情景, 结合水动力模型和GIS空间分析技术模拟其淹没过程、范围和深度等特征。

3 建模与数据处理

沿海海塘溃堤的情景模拟需要通过二维的洪泛演进来求取过程淹没范围和深度, FloodMap数值模型是由Yu和Lane开发的一种用于模拟洪水过程的水动力模型^[13,14], 具有与LISFLOOD-FP和JFLOW相似的模型结构。作为一种基于栅格的二维扩散波模型, 与传统有限元等水动力模型相比, 该类模型简化了水流的动能和惯性条件, 在水动力方面略为逊色, 但是根据前人的研究成果显示^[13~17], 其建模更为简单、运算效率更高、更易于校验、研究结果精度更高, 其优势就在于可以较好的预测风暴

表1 上海沿海各潮位站潮位一频率分析(m)

Table 1 Probability analysis for tide-frequency of coastal gauge stations of Shanghai (m)

潮位站	重现期(a)					
	20	50	100	200	500	1000
外高桥	5.69	5.98	6.21	6.43	6.73	6.95
芦潮港	5.37	5.62	5.80	5.99	6.23	6.42
金山咀	6.07	6.37	6.60	6.83	7.13	7.35
三甲港	5.54	5.83	6.07	6.30	6.60	6.82
马家港	5.67	5.94	6.15	6.36	6.63	6.84
堡镇	5.70	5.97	6.18	6.39	6.66	6.86

① 上海市人民政府交通办公室. 9711台风对长江口及杭州湾海岸影响调查记录. 1998.



图1 上海沿海海塘与潮位站分布

Fig. 1 Locations of coastal seawalls and gauge stations in Shanghai

洪水的淹没范围,因此可以利用该模型对上海沿海地区台风风暴潮溃堤情景开展模拟与分析。

FloodMAP 二维水动力模型是基于曼宁方程离散化推导出来的,忽略水流的惯性和平流作用,模型的推导过程已在 Yu 的文章中进行了详细介绍^[13,14],这里仅列出简化方程,在规则的计算网格上可表示为:

$$Q = (wd^{5/3}S^{0.5})/n \quad (1)$$

式中, Q 为流量; w 为栅格分辨率; d 为水流深度; S 为能量坡度; n 为曼宁系数。

FloodMAP 模型的输入条件主要包括模型参数、地形模型和边界条件三类。本研究中所涉及到的模型参数主要为曼宁系数,参考本文的前期研究所获取的上海地区曼宁系数的经验值 0.06 作为模型陆地糙率参数^[18]。地形数据采用从上海市 0.5 m 等高线数据生成的上海市 50 m 分辨率 DEM。在此基础上,利用 GIS“Mosaic”工具将沿海地区海塘高程与 DEM 进行叠置,而将竹园排放口(150 m 长)和小泖港段(3.8 km 长)设置为海塘缺失。考虑到 9711 台风风暴潮事件是有详细记录以来影响上海最为严重也是最为典型的一次台风风暴潮灾害事件,且两处溃堤点在空间上分别与外高桥站和芦潮港站相邻。因此,潮位边界条件的设置主要利用外高桥站和芦潮港站不同重现期潮位与 9711 台风风暴潮最高潮位(约相当于 50 a 一

遇潮位)的差值来修正潮位过程线。例如,外高桥站 1 000 a 一遇潮位(6.95 m)与 9711 台风影响期间最高潮位(5.81 m)差值为 1.14 m,则将外高桥站 9711 潮位过程全部实测数据加上 1.14 m。任何两次台风风暴潮潮位过程均不相同,准确预测未来的潮位过程线基本不可行,而本研究主要为获取淹没范围和淹没深度,这二者主要与最高潮位相关,因此,虽然该方法与实际情况存在一定的误差,但是可以满足本文的研究需要。为了缩短模型运行时间,仅模拟最高潮位出现前后 20 h(包括两个高潮位和两个低潮位)的淹没过程情景,淹没过程模拟中每 5 min 输出一个结果。

4 淹没结果分析

各重现期风暴潮溃堤过程淹没范围和淹没深度如图 2 所示。结果显示随着时间的推移,两处溃堤点的潮水淹没过程表现出以下两个主要规律: ① 各重现期淹没深度随着时间变化出现先迅速增加后逐渐降低的趋势,竹园排放口和小泖港分别于溃堤后第 2 和第 3 个小时达到淹没最深,竹园排放口淹没深度变化幅度相对较大。② 由于从溃堤点涌入的潮水量不断增多,潮水不断向内陆演进,淹没范围不断扩大。竹园排放口处地形较为平坦,更易于潮水行洪,导致淹没范围随时间推移快速增大;小泖港处在第 5 h 后淹没面积增速变缓,主要由于受地形限制,潮水在此洼地不断蓄积难以溢出。

考虑到过程动态模拟结果各时间点淹没范围和淹没深度均不同,利用 ArcGIS9.3 的栅格运算工具提取出各重现期台风风暴潮最大淹没范围和最大淹没深度(图 3、表 2),主要表现为以下两点特征: ① 随着潮位重现期增大,最大淹没范围和最大淹没深度不断增加。外高桥附近溃堤各重现期淹没范围增大较为明显;芦潮港附近溃堤处各重现期淹没范围变化则较小。这主要是由于外高桥附近潮位高出陆地地表高程较多,但由于溢出水量较少,淹没深度相对较浅,绝大部分水深低于 0.5 m。而芦潮港附近陆地高程大都超过 7 m,较各重现期高潮位亦高出许多,仅在局部洼地低于高潮位,潮水聚集于此,因此该处淹没较深,大部分淹没区水深超过 1 m。② 空间上,淹没区均位于溃堤口附近,淹没面积较小。两处溃堤点各情景淹没范围均在溃堤口周边 1 km 以内区域,且最

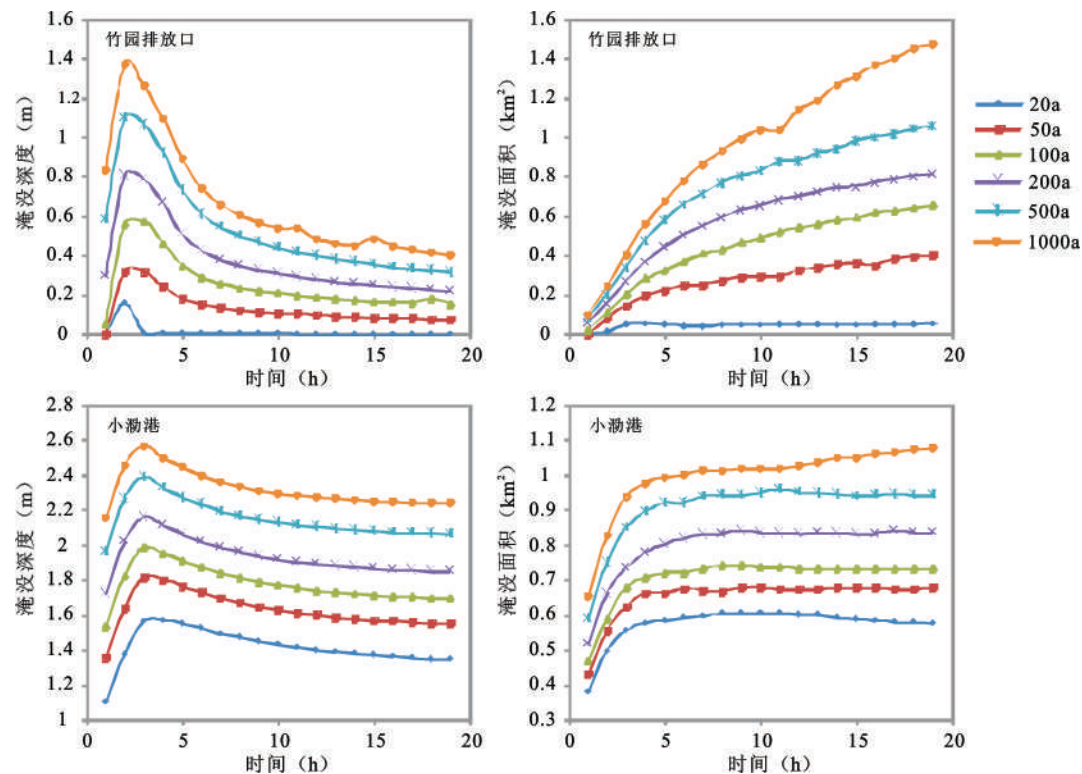


图2 各重现期最大淹没深度和淹没面积时间序列

Fig.2 Time series of maximum inundated areas and depth obtained from simulations for different scenarios

表2 各重现期台风风暴潮溃堤最大淹没面积和深度				
Table 2 Maximum inundation areas and depths of typhoon storm tide for different scenarios				
重现期 (a)	竹园污水排放口		小泖港	
	最大淹没 面积(km ²)	最大淹没 深度(m)	最大淹没 面积(km ²)	最大淹没 深度(m)
20	0.10	0.01	0.65	1.58
50	0.44	0.32	0.74	1.82
100	0.70	0.58	0.79	1.99
200	0.88	0.81	0.92	2.17
500	1.13	1.10	1.04	2.39
1000	1.55	1.37	1.18	2.57

大淹没面积也均在1 km²左右。原因在于,潮位高度仅在高潮位的几个小时内会超过地表高程而导致潮水淹没,因此从溃堤口溢出的水量有限,不会造成大面积淹没区。

5 结论与讨论

本文以上海为例开展了台风风暴潮淹没情景模拟分析,获得的研究成果主要包括以下几个方面:① 通过对比现有沿海海堤高程与各重现期台风风暴潮位发现,海堤高度远高于各重现期潮位,

因此目前甚至未来一段时间,在堤防完备的常规条件下上海发生风暴潮漫堤和大范围淹没的几率较小。② 重点针对台风风暴潮可能导致的溃堤情景,选择浦东竹园污水排放口和南汇小泖港两处堤防薄弱段,利用二维水动力模型对6种重现期台风风暴潮开展淹没情景模拟,结果显示仅在溃堤口附近局部小范围区域内发生淹没,因此可以认为溃堤淹没危险性较小。针对上述结论,首先应重点加固现有海堤薄弱环节,使其全部达到设计标准。其次,完善现有应急预案,一旦发生溃堤,应利用低潮位时段对溃堤段进行临时补修,并转移疏散受影响区域内的人员和财产。

研究中还存在较多的不确定性因素。首先,由于历史相似情景的台风风暴潮缺乏实测淹没范围资料,所以难以对上述结果进行对比验证。其次,考虑到任意两次台风风暴潮过程潮位均不相同,因此潮位边界条件建模过程中也存在较大的不确定性。最后,需要指出的是未来随着气候变化和海平面上升的影响,以及上海地区的快速地面沉降问题,极有可能出现极端台风风暴潮事件,按照常规的水文频率分析其重现期可能达到数万年乃至几十万年,虽无法证明其不可超越性或最

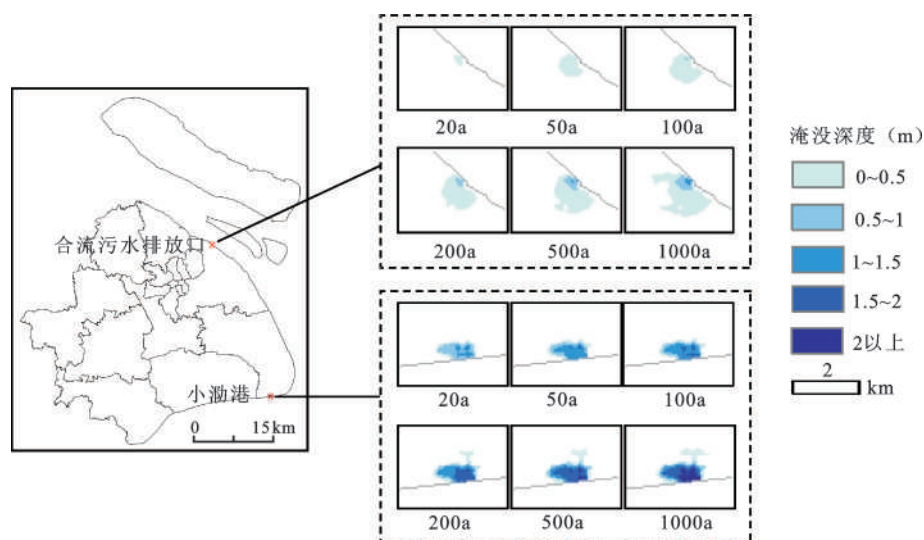


图3 各重现期台风风暴潮溃堤淹没情况

Fig. 3 Maximum inundation extents and depths of typhoon storm tide for different scenarios

大性,但也无法排除其可能性,这些都有待后续研究进一步完善和深化。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The scientific basis[M].Cambridge: Cambridge University Press,2007.
- [2] 牛海燕,刘 敏,陆 敏,等.中国沿海地区近20年台风灾害风险评价[J].地理科学, 2011,31(6):764~768.
- [3] 谭丽荣,陈 珂,王 军,等.近20年来沿海地区风暴潮灾害脆弱性评价[J].地理科学,2011,31(9):1111~1117.
- [4] 殷 杰,尹占娥,许世远.上海市灾害综合风险定量评价研究[J].地理科学,2009,29(3):450~454.
- [5] James P M, Albert J Kettner, Irina Overeem, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. Nature Geoscience, 2009, DOI: 10.1038/ngeo629.
- [6] 许世远,王 军,石 纯,等.沿海地区自然灾害风险研究[J].地理学报,2006, 61(2):127~138.
- [7] 龚士良,杨世伦.地面沉降对上海黄浦江防汛工程的影响分析[J].地理科学,2008,28(4):543~547.
- [8] 国家海洋局.中国海平面公报2007[R].2008.
- [9] 火恩杰,刘昌森.上海地区自然灾害史料汇编(公元751~1949年)[M].北京:地震出版社,2002.
- [10] 徐其华.上海水利志[M].上海:上海社会科学院出版社,1997.
- [11] 刘晓涛.上海市防汛工作手册[M].上海:上海科学普及出版社, 2008.
- [12] 卢永金.上海风暴潮防御的形势与对策[J].上海水务,2008,23(4):6~10.
- [13] Yu D,Lane S N. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion wave treatment, part 1:mesh resolution effects[J]. Hydrological Processes,2006,20(7):1541-1565.
- [14] Yu D,Lane S N.Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion wave treatment, part 2: development of a sub grid-scale treatment[J]. Hydrological Processes,2006,20(7): 1567-1583.
- [15] Horritt M S,Bates P D.Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow[J].Journal of Hydrology, 2001,253(1-4):239-249.
- [16] Horritt M S,Bates P D.Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach[J].Hydrological Processes,2001,15(5):825-842.
- [17] Bates P D,De Roo A P J.A simple raster-based model for flood inundation simulation[J].Hydrological Processes,2000,236(1-2): 54-77.
- [18] 殷 杰.中国沿海台风风暴潮灾害风险评估研究[D].上海:华东师范大学博士论文,2011.

Flood Simulation Study of Typhoon Storm Surge Based on Scenarios in Shanghai

YIN Jie¹, YIN Zhan-e², YU Da-peng³, XU Shi-yuan⁴

(1. School of Tourism and City Management, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 3. Department of

Geography, Loughborough University, Leicestershire LE11 3TU, U K; 4. Department of Geography,

East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Storm surges from tropical cyclones, as one of the most devastating natural hazards in Shanghai, have caused considerable personal injury and property damage in the history. A scenario-based study that investigated the storm induced flood potentials in Shanghai coastal area was conducted. Based on the probability analysis for several gauge stations, the findings show that due to the high standard seawall, it is less likely to occur overtopping inundation in the short term. Therefore, two vulnerable sections of seawall and six kinds of storm surge barrier bursts scenarios were built. Comparing the local land elevation with the flood levels of different return periods, flood scenarios with return periods of 20, 50, 100, 200, 500 and 1000 years were designed to cover the probable situations. The shape of the flow hydrographs at the boundary gauging stations for various return periods was derived based on 9711 typhoon induced flood event where hourly flow boundary conditions were available. To reduce the computational costs of the simulation, the design flood scenarios were represented with 20 hours tidal hydrographs, which include two rising phases and two falling limbs. The topographic contours (0.5 m intervals) of Shanghai were interpolated to generate a DEM with a grid cell resolution of 50 m. These provided the flow and topographic boundary conditions for the model simulations. A well-established 2D flood numerical model (FloodMap) was used to predict the flood dynamics and inundation process. Subsequent analysis using Geographical Information Systems (GIS) was employed to illustrate the spatial and temporal distribution of flood-prone areas under different scenarios. The results indicated that, 1) maximum inundation depths were reached in all simulations at approximately the second to third hour, decreasing afterwards as the stage recedes. 2) Inundation area for each scenario increased throughout the simulation, even during the receding limb of the hydrograph. 3) The maximum inundation extents and depths increased with the increasing return periods. 4) Flooding from levee breach only caused local inundation. It can be concluded that the impact of storm flooding was not particularly high in Shanghai at present situation with the protection of high standard dike systems. However, extreme events caused by global climate change should be considered in future studies.

Key words: scenario; typhoon storm surge; inundation; Shanghai