

厦门风暴潮淹没风险预警系统研究

袁方超¹, 张文舟², 叶雨颖¹, 张世民¹

(1. 国家海洋局厦门海洋预报台 厦门 361008; 2. 厦门大学海洋与地球学院 厦门 361102)

摘要:为提高厦门防御台风风暴潮灾害风险的能力,辅助政府部门开展海洋防灾减灾工作,文章基于风暴潮数值模型开发厦门风暴潮淹没风险预警系统,并以1521号台风为例模拟其淹没风险。研究表明:风暴潮数值模型能较好地刻画影响厦门的台风风暴潮过程,满足风暴潮淹没风险分析需求;厦门风暴潮淹没风险预警系统采用按警戒潮位预警和按高程预警2种方法分析风暴潮淹没风险,可对影响程度不同的岸段采取不同的预警和防御措施;基于数值模型的风暴潮淹没范围与实地调查区域的淹没范围基本一致,可对未开展实地调查区域的淹没范围进行补充;今后须进一步完善厦门风暴潮淹没风险预警系统,同时建立厦门风暴潮风险评价体系。

关键词:台风风暴潮;警戒潮位;风险预警;海洋灾害;防灾减灾

中图分类号:X43; P714+.2

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2022)04-0102-05

The Storm Surge Inundation Risk Warning System for Xiamen

YUAN Fangchao¹, ZHANG Wenzhou², YE Yuying¹, ZHANG Shimin¹

(1. Marine Forecast Station of Xiamen, SOA, Xiamen 361008, China;

2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: In order to improve the capability to defend against typhoon storm surge disaster risk and assist government departments in marine disaster prevention and mitigation in Xiamen City, this paper developed a storm surge inundation risk warning system based on a numerical model of storm surge, and simulated the inundation risk during Typhoon 1521 (Dujuan) as an example. The results showed that the numerical model could well describe the process of typhoon storm surge affecting Xiamen, and meet the needs of storm surge inundation risk analysis. 2 methods were adopted to analyze the storm surge inundation risk in the warning system by warning level and sea wall elevation, which could take different early warning and defense measures for different coastal segments with different influence degrees. The submergence range of storm surge based on the numerical model was basically consistent with that of the field survey area, and the submergence range of the area without field survey could be supplemented. In the future, the storm surge inundation risk warning system in Xiamen should be further improved and a storm surge risk evaluation system should be established.

收稿日期:2021-06-25; 修订日期:2022-03-28

基金项目:自然资源部东海局青年科技基金项目(201908).

作者简介:袁方超,工程师,硕士,研究方向为海洋观测预报

通信作者:张文舟,教授,博士,研究方向为物理海洋学和海岸带防灾减灾

Keywords: Typhoon storm surge, Warning tide level, Risk warning, Marine disaster, Disaster prevention and mitigation

0 引言

我国是西北太平洋沿岸少数遭受风暴潮灾害影响最为严重的国家之一,平均每年发生约9次台风风暴潮,不仅发生次数较多,而且造成严重的损失^[1-3]。根据《2020年中国海洋灾害公报》,在全球气候变化和海平面上升的背景下,2011—2020年我国因海洋灾害造成的直接经济损失平均值为88亿元,死亡(含失踪)人口平均值约为50人,其中2020年风暴潮灾害造成的经济损失占总直接经济损失的比重高达97%。福建是受风暴潮灾害损失较严重的沿海地区之一,日益严重的海洋灾害问题引起政府和学术界的广泛关注,尤其是政府对风暴潮等海洋灾害的科学防灾减灾需求进一步扩大——不仅希望了解风暴潮的特征及其风险评价和区划,为制定生产计划、安排防灾减灾以及合理布局海洋产业提供决策依据^[4-9];而且希望获取精准的海洋灾害预警报服务信息,科学开展海洋防灾减灾工作。

近年来,随着海洋经济的发展以及政府对海洋防灾减灾工作的逐步重视,国内学者开始对风暴潮灾害风险评价进行研究,将经济、社会和基础地理数据相结合开展风暴潮灾害风险评价的研究越来越多,这在国内的风暴潮研究中是崭新的领域。风暴潮灾害风险量化评价既是风暴潮灾害风险管理的理论基础,又是风暴潮灾害风险区划和灾前损失预估的理论基础^[9-13]。在风暴潮淹没风险研究方面,国内外学者根据风暴潮淹没情形(淹没范围和淹没水深)等指标,分别从社会学、经济学和灾害学等角度建立基于不同场景的评价指标体系和风险评价模型;根据风暴潮淹没情形和经济损失等指标,建立不同的数学模型初步评价风暴潮灾情,并将防灾减灾工作前置。已有研究成果为开展厦门风暴潮淹没风险分析和灾情预评价工作提供基础和方向^[14-24],即通过建立精细化的风暴潮漫堤数值模型,开展风暴潮淹没风险分析,结合受淹区域承灾体的情况,开展厦门风暴潮灾情预评价工作,从而在风暴潮灾害发生前及时为政府提供精准的防灾减灾建议。

本研究在已有研究的基础上,搜集厦门潮汐、风暴潮和风暴潮灾情等历史资料^[25-26],利用精细化的水深地形和岸线高程数据,建立适用于厦门海域的高分辨率风暴潮数值模型,并基于该模型建立厦门风暴潮淹没风险预警系统;利用该系统模拟1521号台风“杜鹃”风暴潮的淹没范围,取得较好的模拟效果,系统分析结果与实际调查结果基本相符。

1 风暴潮数值模型

1.1 数值模型

厦门风暴潮漫堤数值模型选择非结构网格的ADCIRC模型,该模型是基于无结构化网格的水动力学模型,利用并行技术实现模型高效计算,在复杂地形环境下的海洋水动力环境模拟方面具有很好的表现。模型计算区域设为 $114^{\circ}\text{E} - 130^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}\text{N} - 30^{\circ}\text{N}$,基本覆盖台湾海峡及其周边海域,重点关注区域为厦门海域。在球坐标系下建立模型,网格设置兼顾模型计算效率和计算精度,同时保证模型计算稳定。设置网格的基本原则是:水深越深的区域网格越粗,水深越浅的区域网格越细;重点关注区域的网格较细,非重点关注区域的网格较粗;岸线到模型闭边界之间的区域分辨率均较高。在上述原则基础上对模型网格进行优化,使模型模拟达到较好的效果^[27-28]。

采用圆对称的分析模型来描述静止台风风场和气压场,并叠加台风移动风场,从而获得理想情形下的台风风场。考虑到台湾海峡和台湾岛地形对台风的影响,在理想情形的基础上添加地形对台风的影响效应,基于卫星遥感风场分析结果来确定风向和风速的修正参数,根据经验对理想台风风场分别修正风向和风速。其中,台风风向修正反映“阻挡”效应和“分流”效应等地形作用对台风风向的影响,而台风风速修正体现中央山脉“阻挡”效应和海峡“狭管”效应等地形作用导致的风速加强现象。将修正风向和风速后的台风风场作为台湾海峡周边海域附加风场,将附加风场叠加到理想台风风场上得到最终的台风风场^[29],作为风暴潮模型的驱动风场。

1.2 数据和网格

根据现有的计算机处理能力和模型需求,融合多套水深地形数据作为模型水深地形数据。其中,模型水深数据将 ETOPO 1 的 $-100\sim 0$ m 数据(分辨率为 1 m,约 1.85 km)、“908 专项”数据与 ETOPO 2 数据相融合;厦门附近区域地形数据将 ETOPO 1 的 $0\sim 200$ m 数据和 DEM 30 数据(分辨率为 30 m)相融合;厦门陆地岸线和高程数据选取厦门国土管理部门提供的高程数据(分辨率为 5 m)融合代替 ETOPO 2 数据。

根据“远海分辨率较粗,沿岸分辨率较细”的原则划分模型网格,模型大区域采用高分辨率全球 GSHHS 岸线数据。通过对比分析,发现厦门海域 GSHHS、“908 专项”和海洋功能区划的 3 套岸线数据基本吻合,但海洋功能区划的数据更合理且分辨率更高,因此本项目在厦门海域采用海洋功能区划数据代替 GSHHS 数据。考虑漫堤淹没过程,模型的实际闭边界选择在上述岸线外围;考虑厦门海域潮差、风暴潮和海浪的影响,潮水淹没高度基本在海平面上 10 m 以内,因此以 12 m 等高线设置模型闭边界。

2 风暴潮模型检验

利用厦门海洋站 2014 年 8 月(该月无台风影响厦门海域)的潮位观测数据和调和预报数据检验模型的潮汐模拟能力,经对比发现模型模拟结果与实际观测结果和调和计算结果均较吻合,平均逐时绝对误差均不超过 20 cm,标准误差为 25 cm。

为检验模型的风暴潮模拟能力,收集 1975—2015 年对厦门影响较严重的 30 次台风的历史资料以及厦门海洋站的风暴潮观测资料,基本涵盖影响厦门的各类台风(表 1)。

表 1 1975—2015 年对厦门影响较严重的台风次数

类型	强热带风暴	台风	强台风	超强台风	合计
穿岛型台风	2	3	3	9	17
北部台风	0	2	1	1	4
南部台风	3	2	2	1	8
转向型台风	0	0	1	0	1
合计	5	7	7	11	30

注:划分标准为 2006 年中国气象局公布的《热带气旋等级》。

从台风路径看,影响厦门最多的台风是穿台湾岛型台风,其次是从台湾岛南部经过的台风,而从台湾岛北部经过的台风和转向型台风对厦门影响较少。

与厦门海洋站实际观测结果对比,风暴潮模拟结果的平均绝对误差仅为 18.1 cm,平均误差仅为 0.6 cm,标准误差和均方根误差均为 23.2 cm,总体模拟效果较理想。

综上所述,风暴潮数值模型能很好地刻画影响厦门的台风风暴潮特征,完全能满足风暴潮漫堤风险分析的实际业务工作要求。

3 系统功能

基于厦门海域风暴潮数值模型开发厦门风暴潮淹没风险预警系统,在台风影响期间利用该系统预判厦门可能出现的超过蓝色警戒潮位的高潮位,可尽早开展风暴潮淹没风险分析,并及时向政府提供精准的风暴潮防灾减灾辅助决策产品。

该系统实现的主要功能包括:①根据预先设置的参数,自动调用风暴潮数值模型进行风暴潮模拟计算,并在计算过程中实时显示工作进度;②自动提取模拟计算结果并转换成潮位和风暴潮等预报信息,根据需求在选定区域快速绘制潮位和增水分布图;③在模型计算的基础上参考经验预报成果,通过整体修正或个别修正的方式对风暴潮预报结果进行人工修正和审核(含批量修正);④以当前最新台风位置为起点,以中央气象台 24 h 预报台风位置(标准预报路径)为中心,采用标准预报路径以及在标准预报路径基础上偏左、偏右、偏快和偏慢 5 条台风预报路径用于风暴潮集合数值预报,并输出 5 条路径下的风暴潮预报信息;⑤选择按高程预警和按警戒潮位预警 2 种方法分析风暴潮淹没风险;⑥根据预先选定的分析方法快速计算并绘制各岸段的漫堤风险分布图,并在高潮位超过一定潮位后加密显示,目前暂设置为超过厦门蓝色警戒潮位后每 5 min 计算并绘制 1 次;⑦展示风暴潮淹没区域,并制作相应的预警产品;⑧根据预先设置的模板填入相应的分析内容并自动生成预警报单,快速提供精准的防灾减灾决策服务;⑨可选择冷启动和热启动 2 种方式计算潮位,建议在首次计算时选择冷启

动方式,而后选择热启动方式,以节省计算时间。

其中,按警戒潮位预警的方法是指对比分析预报结果中的最高潮位与厦门四色警戒潮位(如预报高潮位达到厦门蓝色警戒潮位,则岸段预警颜色也为蓝色),此种方法将岸段漫堤风险与现行的四色警戒潮位预警方法相对应。按高程预警的方法则先根据沿海区域高程和海岸线走向等特征将岸线划分为不同的岸段,然后对比堤防代表点高程与岸段附近模型网格输出点潮位。高程预警影响程度的分级标准为:预测高潮位超过堤防代表点高程的最大高度大于120 cm(含)时,等级为漫堤风险高,预警颜色为红色;预测高潮位超过堤防代表点高程的最大高度在50 cm(含)至120 cm(不含)之间时,等级为漫堤风险较高,预警颜色为橙色;预测高潮位超过堤防代表点高程的最大高度小于50 cm(不含)时,等级为漫堤风险较低,预警颜色为黄色;预测高潮位低于堤防代表点高程的最大高度小于50 cm(含)时,等级为漫堤风险低,预警颜色为蓝色。

在台风影响期间,预报员可利用厦门风暴潮淹没风险预警系统显示的沿岸漫堤风险分布图,结合历史风暴潮灾害的实地调查成果和基础地理信息,制作风暴潮淹没风险预警图,按照不同的岸段采取不同的预警和防御措施,提供精细化的风暴潮预警服务,为政府部门指导和开展有针对性的风暴潮防灾减灾工作提供技术支撑。

4 案例应用

2015年第21号台风“杜鹃”影响厦门期间,恰逢农历八月十五天文大潮期,厦门海洋站出现1949年以来排名第二位的极值高潮位。在此次台风风暴潮过程中,厦门沿岸低洼地带出现海水漫堤和海水倒灌等现象。厦门海洋预报台及早发布精细化的风暴潮预警报告和有针对性的防御措施,为政府部门开展海洋防灾减灾工作提供决策支撑服务,大大减少极值高潮位造成的海洋灾害损失^[30]。

在此次风暴潮预警期间,厦门风暴潮淹没风险预警系统调用风暴潮数值模型进行计算并分析预报结果,采用按警戒潮位预警(统一以厦门海洋站潮位值为标准)和按高程预警2种方法分析风暴潮漫堤风险。根据按警戒潮位预警方法的模拟结果,

由于厦门海洋站的潮位预报值超过红色警戒潮位,厦门所有岸段的预警级别应全部为红色;但根据本次风暴潮灾害的实际调查结果,由于岸段高程较高,厦门岛东部和岛外大部分区域并没有出现海水漫堤等淹没现象,由此可见按警戒潮位预警方法仍存在一定的局限性,不能很好地体现不同区域的淹没情形。因此,根据沿海区域高程和海岸线走向等特征将厦门岸线划分为不同的岸段,按高程预警方法展示风暴潮淹没风险情况。根据模拟结果,厦门低洼地带的漫堤风险等级较高(红色和橙色),而高程较高地带的漫堤风险等级较低(黄色和蓝色),可采取分段预警和防御措施,从而提供精准的风暴潮防灾减灾决策服务。

本次台风风暴潮过程的最高潮位为1949年以来厦门排名第二位的高潮位,超过厦门红色警戒潮位,并在风暴潮严重影响的厦门岛西南部出现不同程度的海水淹没灾情。将实地调查分析得到的淹没范围与数值模拟得到的淹没范围在地图上叠加后进行对比验证,发现在9月29日凌晨潮位达到最高值前后,第一码头、中山路、沙坡尾、厦门大学医院路口和鼓浪屿钢琴码头区域均出现淹没情形,采用2种方法模拟的淹没范围大体一致,数值模拟的淹没范围较大且基本涵盖实地调查分析得到的淹没范围。根据对比分析结果,本系统对于厦门风暴潮淹没范围的模拟具有较高的准确度,基于数值模拟计算的淹没范围经人工修正后能制作出精细化的风暴潮淹没风险预警产品,可及时为相关政府部门提供决策服务。

值得说明的是,本系统采用堤防代表点高程代表整个岸段的高程,而该代表点是否能真正代表整个岸段还有待进一步确认,同时还须根据后续的实际情况修正预警标准,以便更好地开展精细化预警工作。在今后的工作中须进一步开展岸线调查以获取更加精确的岸线数据,改进系统模型和模拟方法,同时完善风暴潮风险评价体系。

5 结语

本研究利用厦门潮位和风暴潮资料,结合高精度的地形数据,开发高分辨率的风暴潮数值模型以模拟厦门风暴潮漫堤淹没情形,并在此基础上建立

厦门风暴潮淹没风险预警系统,主要得到4点结论。①风暴潮数值模型能较好地刻画影响厦门的台风风暴潮过程,在风暴潮增水和总潮位方面的模拟效果较好,能满足厦门风暴潮淹没风险分析需求;②基于数值模型的风暴潮淹没范围与实地调查区域的淹没范围基本一致,可对未开展实地调查区域的淹没范围进行补充,从而较为全面地了解厦门风暴潮淹没信息;③基于数值模型建立的厦门风暴潮淹没风险预警系统可快速调用数值模型进行计算,并采用按警戒潮位预警和按高程预警2种方法分析风暴潮淹没风险,对影响程度不同的岸段采取不同的预警和防御措施,向政府部门提供精细化的风暴潮预警服务,为政府部门指导和开展有针对性的风暴潮防灾减灾工作提供决策参考;④今后须进一步完善厦门风暴潮淹没风险预警系统,同时建立厦门风暴潮风险评价体系。

参考文献

- [1] 杨桂山.中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J].自然灾害学报,2000,9(3):23-30.
- [2] 张振克,丁海燕.近十年来中国大陆沿海地区重大海洋灾害分析[J].海洋地质动态,2004,20(7):25-27.
- [3] 叶涛,郭卫平,史培军.1990年以来中国海洋灾害系统风险特征分析及其综合风险管理[J].自然灾害学报,2005,14(6):65-70.
- [4] 陆人骥.中国历代灾害性海潮史料[M].北京:海洋出版社,1984.
- [5] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等.气候变化国家评估报告(II):气候变化的影响与适应[J].气候变化研究进展,2006,2(2):51-56.
- [6] 左书华,李蓓.近20年中国海洋灾害特征、危害及防治对策[J].气象与减灾研究,2008,31(4):28-33.
- [7] 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,2011.
- [8] 邓辉,王洪波.1368-1911年苏沪浙地区风暴潮分布的时空特征[J].地理研究,2015,34(12):2343-2354.
- [9] 李阔,李国胜.风暴潮风险研究进展[J].自然灾害学报,2011,20(6):104-111.
- [10] 郑君.风暴潮灾害风险评估方法及应用研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [11] 冯伟忠,张娟,游大伟,等.被高估的“海平面上升对珠江口风暴潮灾害评估影响”的原因探析[J].热带地理,2013,33(5):640-645.
- [12] 邱蓓莉.海平面上升及风暴潮灾害情景下城市社会经济脆弱性评估[D].上海:华东师范大学,2015.
- [13] GREVE C A, COWELL P J, THOM B G. Application of a geographical information system for risk assessment on open ocean beaches: Collaroy/Narrabeen Beach, Sydney, Australia: an example [J]. Environmental Geosciences, 2000, 7(3): 149-161.
- [14] RAO A D, CHITTIBABU P, MURTY T S, et al. Vulnerability from storm surges and cyclone wind fields on the coast of Andhra Pradesh, India [J]. Natural Hazards, 2007, 41(3): 515-529.
- [15] KARIM M F, MIMURA N. Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh [J]. Global Environmental Change, 2008, 18(3): 490-500.
- [16] 崔红艳.基于GIS的辽河三角洲潜在海平面上升风险评估[J].辽宁师范大学学报(自然科学版),2005,28(1):107-111.
- [17] 储金龙,高抒,徐建刚.海岸带脆弱性评估方法研究进展[J].海洋通报,2005,24(3):80-87.
- [18] 纪燕新,熊艺媛,麻荣永.风暴潮灾害损失评估的模糊综合方法[J].广西水利水电,2007,22(2):16-19.
- [19] 林琛琛.不同海平面上升情景模拟下海岸带灾害损失评估:以长三角地区为例[D].厦门:厦门大学,2014.
- [20] 王康发生,尹占娥,殷杰.海平面上升背景下中国沿海台风风暴潮脆弱性分析[J].热带海洋学报,2011,30(6):31-36.
- [21] 吴少华,王喜年,宋珊,等.天津沿海风暴潮灾害概述及统计分析[J].海洋预报,2002,19(1):29-35.
- [22] 许启望,谭树东.风暴潮灾害经济损失评估方法研究[J].海洋通报,1998,17(1):1-12.
- [23] 叶雯,刘美南,陈晓宏.基于模式识别的台风风暴潮灾情等级评估模型研究[J].海洋通报,2004,23(4):65-70.
- [24] 梁海燕,邹欣庆.海口湾沿岸风暴潮风险评估[J].海洋学报(中文版),2005,27(5):22-29.
- [25] 江毓武,吴培水,许金殿.厦门港潮汐、风暴潮耦合模型[J].海洋学报(中文版),2000,22(3):1-6.
- [26] 袁方超,吴向荣,卢君峰.福建中南部沿海风暴潮统计特征分析[J].海洋预报,2018,35(3):68-75.
- [27] 张文舟.台湾海峡对台风部分动力响应的研究[R].厦门:厦门大学,2010.
- [28] 张文舟.台湾海峡台风风暴潮及其数值预报模式研究[D].厦门:厦门大学,2006.
- [29] 陈德文.台湾岛周边海域台风海面风场及其模型化研究[D].厦门:厦门大学,2006.
- [30] 袁方超,吴向荣,张世民.海洋预警报工作探讨:以厦门海洋预报台“杜鹃”台风预警报工作为例[J].海洋开发与管理,2016,33(4):87-89.