

# 考虑排水管网的海甸岛城市淹没影响数值模拟研究

程广晨<sup>1,2</sup>, 江文胜<sup>3,4\*</sup>

(1. 海南省环境科学研究院, 海南海口 570100; 2. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572000; 3. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 4. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 为探究排水系统在极端天气条件下对海甸岛城市复合淹没的影响, 采用 ADCIRC-SWMM 耦合模型, 建立了风暴潮漫滩数值模型, 通过模拟极端天气事件下的城市淹没过程, 分析排水系统在极端事件下对海甸岛城市复合淹没的影响。模拟结果表明: 排水系统增加了海甸岛内部系统与海洋的连通性, 正常情况下可以起到防洪排涝作用, 降低城市的淹没风险; 而当极端天气事件发生时, 随着外海水位上升, 排水口可能会受到潮位顶托的影响, 导致排水效率降低。这表明, 排水系统对城市防洪排涝具有双重作用, 既有利于平时的防洪排涝, 但是在极端事件发生时, 也会增加城市的淹没风险。

**关键词:** 风暴潮漫滩; 城市淹没; 数值模拟; 耦合模型; 海甸岛

**中图分类号:** P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)02-0009-09

## 0 引言

风暴潮是一种来自海上的严重自然灾害, 是由于强烈的大气扰动(如强风和气压骤变)引起的海面异常升高或降低的现象<sup>[1]</sup>。目前, 按照其成因, 国际上通常将风暴潮分为两类, 由热带气旋引起和由温带气旋引起。2022年, 我国沿海地区共发生蓝色及以上预警级别的风暴潮过程13次, 其中5次造成重大经济损失<sup>[2]</sup>。近年来, 全球性的气候变化已经成为一个不可忽视的现象, 政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告中显示<sup>[3]</sup>, 人类活动引起的全球气候变暖已经成为一个不争的事实, 在此背景下, 未来风暴潮和极端降雨等自然灾害可能会更加频繁, 热带气旋的强度可能会继续增大。

目前国际上已经有不少学者开展了风暴潮漫滩的相关研究。Wang等<sup>[4]</sup>将海洋、海岸、河口环流模型 ADCIRC (Advanced Circulation Model for

Oceanic, Coastal and Estuarine Waters)应用于中国青岛周边海域, 用于估算气候变化在当前和未来情景下对8个典型台风引起的风暴潮和淹没情况的影响。该研究结果表明, 随着台风强度增加和海平面上升, 淹没区域扩大, 风暴潮强度也加剧。Vijayan等<sup>[5]</sup>基于 ADCIRC 和第三代浅海海浪数值模式 SWAN (Simulating WAVes Nearshore) 耦合模式, 采用多尺度嵌套的方法实现了风暴潮淹没的快速模拟, 大大缩短了风暴潮的预报时间, 为制定飓风减灾规划和开展及时有效的疏散行动提供支持。在以往的研究中, 尽管已经有学者针对不同地区和台风历史事件得出结论, 但是在归纳气旋特征与风暴潮的关系上仍然面临较大挑战。Qian等<sup>[6]</sup>基于 Delft3D-FM (Delft3D-Flexible Mesh) 的研究结果表明, 当热带气旋移动速度增加, 且其登陆角度与海岸线趋于垂直时, 风暴潮增水强度显著增大。

沿海城市在遭受风暴潮袭击的同时, 往往会伴随强降雨过程。当风暴潮和强降雨同时或相继发

收稿日期: 2024-04-01。

基金项目: 海南流域面源污染防治技术与应用联合研究(GHYF2025003)。

作者简介: 程广晨(1997-), 男, 硕士, 主要从事风暴潮漫滩方面的研究。E-mail: 995173939@qq.com

\*通信作者: 江文胜(1969-), 男, 教授, 博士, 主要从事浅海环流物质输运及风暴潮数值预报研究。E-mail: wsjiang@ouc.edu.cn

生时,会导致峰值流量更高、达峰时间更短,其造成的影响往往比单一事件更为严重,这一过程被称为复合淹没<sup>[7]</sup>。此外,波浪、潮汐以及城市排水系统等也是影响复合淹没的重要因素<sup>[8-9]</sup>。

目前针对海甸岛城市淹没的研究主要集中于单一因素影响下的城市淹没问题,尚未有研究综合考虑风暴潮与陆地水文因素共同作用下的城市复合淹没问题。但是,在模拟海甸岛城市内涝的过程中,综合考虑风暴潮-降雨-排水管网等因素的共同作用具有十分重要的意义。因此,本文在Shi等<sup>[10]</sup>的研究基础上,采用一维降雨-径流管理模型SWMM (Storm Water Management Model)与二维水动力模型ADCIRC的耦合模型,研究在排水管网-风暴潮-降雨等因素共同作用下的海甸岛城市复合淹没问题。

## 1 模型简介及配置

### 1.1 ADCIRC模型

ADCIRC模型是由美国北卡罗来纳大学Luccich教授和圣母大学Westerink博士于1992年合作开发的一种基于有限元方法的海洋数值模型,其计算结果适用于多年一遇的水位推算、风暴潮预警和海岸灾害评估<sup>[11]</sup>。

本文关注的是风暴潮漫滩过程。使用球坐标系求解二维深度积分水动力方程,连续性方程和动量方程为:

式中:  $t$  为时间(单位:s);  $\lambda, \theta$  为经纬度;  $\zeta$  为从平均海平面起算的水位高度(单位:m);  $h$  为水深,即平均

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = - \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right]}{\partial \lambda} + \frac{\tau_{s\lambda} - \tau_{b\lambda}}{\rho_0 H} + D_\lambda \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = - \frac{1}{R} \frac{\partial \left[ \frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right]}{\partial \phi} + \frac{\tau_{s\phi} - \tau_{b\phi}}{\rho_0 H} + D_\phi \quad (3)$$

海平面到海底的距离(单位:m);  $H = \zeta + h$ ,  $H$  为海水水柱高度(单位:m);  $U, V$  为深度平均的海水水平流速(单位:m/s);  $R$  为地球半径(单位:m),取 6 378 135 m;  $\eta$  为引潮力造成的水位变化(单位:m);  $g$  为重力加速度(单位:kg·m/s<sup>2</sup>);  $f$  为科氏参数(单位:s<sup>-1</sup>),  $f = 2\Omega \sin \phi$ , 其中  $\Omega$  为地球自转角速度,  $\Omega = 7.292 12 \times 10^{-5}$  rad/s;  $P_s$  为海面大气压强(单位:N/m<sup>2</sup>);  $\rho_0$  为海水密度,取 1 025 kg/m<sup>3</sup>;  $D_\lambda, D_\phi$  为水平扩散系数;  $\tau_{s\lambda}, \tau_{s\phi}$  为海表应力的经向、纬向分量(单位:N);  $\tau_{b\lambda}, \tau_{b\phi}$  为海底摩擦力的经向、纬向分量(单位:N)。

在本研究中,考虑到近岸地区在风暴潮漫滩时复杂多变的水流条件,因此选择混合底摩擦方案来进行模拟。该方案可以灵活地适应从平静到剧烈变化的水动力环境,有效模拟近岸地区因风暴潮引起的水流变化及其对底摩擦的响应。方程为:

$$C_f = C_{fmin} \left[ 1 + \left( \frac{H_{break}}{H} \right)^\theta \right]^{\frac{\lambda}{\theta}} \quad (4)$$

式中:  $C_{fmin}$  为二次底摩擦系数;  $H_{break}$  为截断深度(单位:m);  $H$  为水深(单位:m); 在本文中,  $\lambda$  取值为 1/3;  $\theta$  为常数,取值为 10;  $C_{fmin}$  取值为 0.001 3;  $H_{break}$  取值为 1 m。

### 1.2 SWMM模型

SWMM模型是由美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)开发的动态降雨-径流管理模型,目前主要用于城市区域的径流量和水质的单一事件或者长期(连续)模拟<sup>[12]</sup>。在SWMM模型中,采用非线性水库法,通过求解连续性方程和曼宁方程来计算地表净流量。计算方程为:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dH}{dt} = Ai^* - Q \quad (5)$$

$$Q = W \frac{1.49}{n} (H - d_s)^{5/3} S^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $V$  为总蓄水量(单位:m<sup>3</sup>);  $H$  为水深(单位:m);

$t$ 为时间(单位:s); $i^*$ 为雨量(单位:m); $Q$ 为径流总量(单位: $\text{m}^3$ ); $W$ 为子汇水区特征宽度(单位:m); $n$ 为子汇水区的Manning系数; $S$ 为子汇水区坡度; $d_s$ 为最大洼地蓄水深度(单位:m)。

### 1.3 耦合模型

在沿海城市,往往建有较为完备的排水系统并与海洋相连,起到防洪排涝的作用。为了探究排水管网在城市复合淹没中的作用,施劭瑜等<sup>[13]</sup>将SWMM与ADCIRC巧妙地利用并行环境MPI(Message Passing Interface)进行实时耦合,探究了排水管网-风暴潮-暴雨共同作用下的城市复合淹没问题,并在浙江象山取得了不错的效果。本文基于Shi等<sup>[10]</sup>的耦合模型研究海甸岛的城市淹没问题。具体而言,在ADCIRC模型中,计算单元是三角网格中的3个节点(node),而在SWMM模型中,计算单元是排水井(junction),因此,在耦合过程中,利用index索引文件将两个模型的计算节点建立空间联系以进行实时数据交换,交换频率为ADCIRC模拟时间步长的整数倍,即每经过NSWMM倍的ADCIRC模拟时间步长,就进行一次交换。NSWMM参数设定为2,即每隔1.0 s完成一次数据交换。

## 2 耦合模型的配置与验证

### 2.1 研究区域的选取

选取中国海南省海口市的海甸岛为研究区域。海南岛位于南海西北部,北临琼州海峡,东南临南海,西临北部湾,在地理上是一个相对独立的单元,同时也是一个易受台风影响的区域。海南岛每年遭遇的台风中,平均有3.8场引发的风暴增水超过30 cm,更有两场的风暴增水超过100 cm。海甸岛位于海口市的北部,年平均降雨量达到2 067 mm,属于典型的热带海洋季风气候区域。近年来,海南省经济发展迅速,城市化进程大大加快,地表不透水面积达到70%,但其下水道系统不足以满足城市目前的排水需求。吴海春等<sup>[15]</sup>对海甸岛的排水能力现状进行了评估,结果表明,84.8%的城市排水管网的排水能力未达到一年一遇标准。因此,海甸岛是研究城市复合淹没的理想区域。

### 2.2 模型建立与数据来源

#### 2.2.1 ADCIRC 模型

一般而言,风暴潮预报模型的精度与计算域的大小有关,计算域越大,模拟结果的准确性也就越大<sup>[16]</sup>,因此,本文的计算域包括以南海为主的大区以及海甸岛周边海域的小区。整个模型的计算域采用逐渐加密的非结构化三角网格。此外,根据方利剑<sup>[17]</sup>的研究,海甸岛周围建有堤防设施,标准为50年一遇,在ADCIRC中设置为不可被漫过的堤坝(weir)。网格分辨率从开边界的10 km逐渐加密到海甸岛周围的50 m。最终,模型计算域共包括290 897个网格单元和149 577个网格节点。

大区中使用ADCIRC模型单独计算风暴潮,小区则通过ADCIRC和SWMM的联合模拟,分析风暴潮、降雨和排水系统共同作用下的城市复合淹没过程。海甸岛周边海域水深采用海图数据,外海水深使用全球地形模型ETOPO1(网址:<https://ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/>)整合的数据,分辨率为1'。开边界使用潮汐预报软件OTPS(OSU Tidal Prediction Software)提供的 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 分潮的调和常数来驱动模型水位,台风数据使用中国气象局热带气旋资料中心(China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database)提供的最佳路径数据集<sup>[18-19]</sup>,该台风数据为开源下载(网址:[tcdata.typhoon.org.cn](http://tcdata.typhoon.org.cn))。模型风场采用Jelesnianski<sup>[20]</sup>的圆形台风模型提供大气强迫。

#### 2.2.2 SWMM 模型

在利用SWMM模型中进行排水系统的概化时,假设海甸岛排水系统沿着地势高低铺设的。在建模过程中,根据天地图数据将主干道和河道简化为参数各异的排水管段,并且剔除了管径小于300 mm的管段,经过概化后的排水系统共包括530个排水井、8个排放口和569根管段。概化后的排水系统见图1,模型中的降雨数据来自全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星计划,时间分辨率为30 min。

### 2.3 耦合模型验证

#### 2.3.1 天文潮与风暴潮验证

准确模拟天文潮是风暴潮分析的基础。为检



注：黄色虚线为海甸岛堤防示意图

图1 概化后的海甸岛排水系统

Fig.1 Drainage system of Haidian Island after generalization

验所构建模型的适用性,本文模拟了计算区域2021年6月1—30日的天文潮,并选取距海甸岛较近的秀英站、铺前站、洋浦站和马村港4个验潮站的潮位数据进行验证,验证时间为6月10日00时(世界时,下同)—16日00时,验证资料来自国家海洋科学数据中心(网址:<https://mds.nmdis.org.cn/>)发布的潮位资料,验证结果见图2。

为验证耦合模型模拟风暴潮的性能,本文选取近年对海南省影响较大的台风“威马逊”(1409)和台风“海鸥”(1415)引起的风暴潮过程进行模拟。

模拟分别于2014年7月10日00时、2014年9月10日00时开始,选取秀英站的风暴潮增水数据与模拟数据进行验证,增水验证结果见图3。考虑到模型原始数据的误差,认为该耦合模型能基本抓住天文潮和风暴潮增水的趋势,可以用来进行后续研究。

### 2.3.2 淹没验证

2011年10月,受副热带高压影响,海口市遭遇了特大暴雨,总降雨量达到427.8 mm。本文以该场降雨为背景,验证耦合模型在模拟城市淹没过程中的性能。根据模拟结果,提取模型溢流节点,得到该场暴雨易涝点验证图(见图4),模拟结果基本与张灵敏<sup>[21]</sup>的调研资料对应。因此,本文所构建的ADCIRC-SWMM耦合模型性能较好,可以用于后续研究。

## 3 风暴潮-暴雨淹没实验

通常情况下,海滨城市建有复杂的排水系统并与海洋相连,以达到防洪排涝的目的。海甸岛平均地势较低,在极端天气事件发生时,更容易受到城市淹没的影响。为了探究不同情境下排水管网对

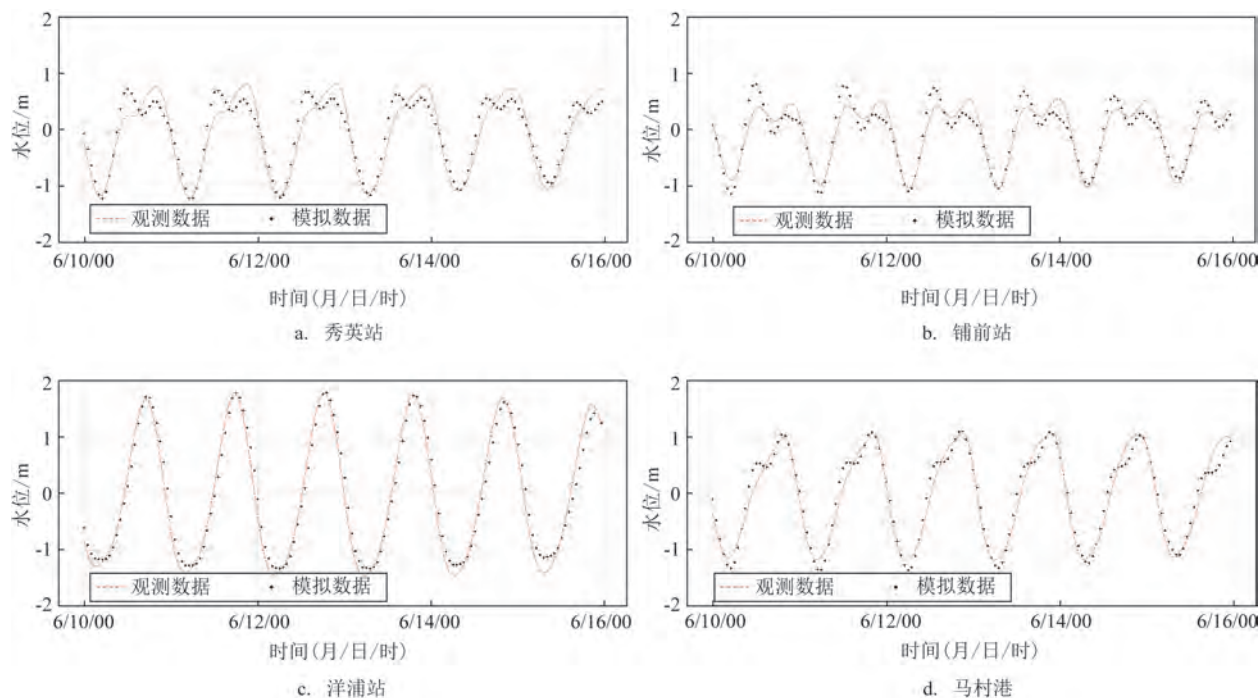


图2 2021年6月10日00时—16日00时南海4个站点的天文潮验证

Fig.2 South China Sea astronomical tide from 00:00 (UTC), June 10 to 00:00, June 16, 2021 at four Stations

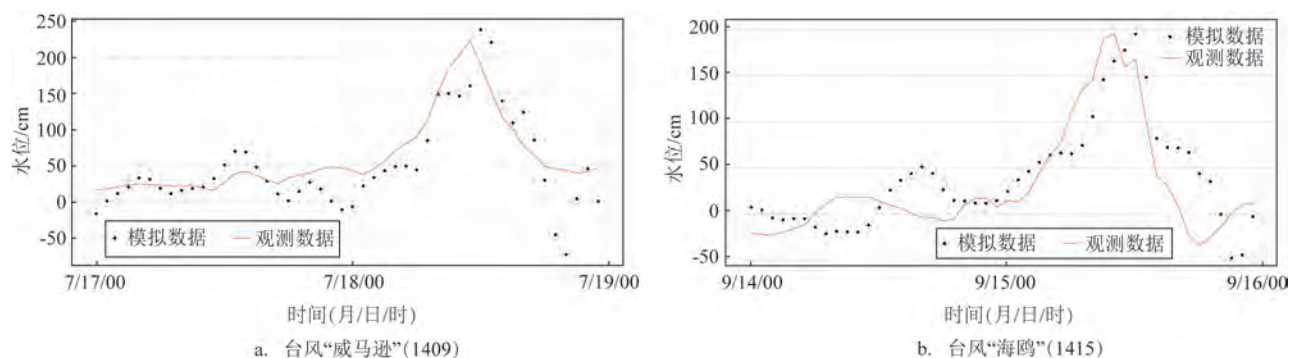
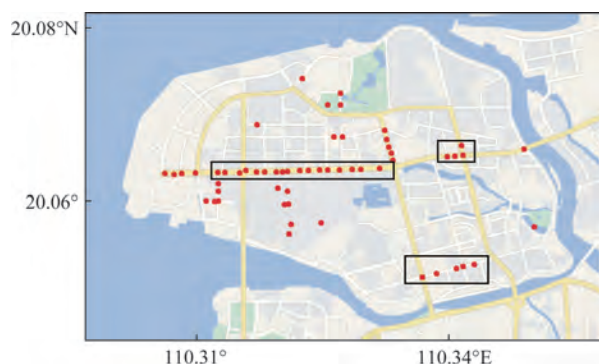


图3 两个台风期间秀英站风暴潮增水的模拟和观测结果

Fig.3 Simulated and observed values of storm surge augmentation at Xiuying station during two typhoon periods



注:黑色方框为验证资料涝点,红色圆点代表模型溢出点

图4 易涝点验证图

Fig.4 Validation map of flood prone points

沿海城市淹没的影响,本文将排水管网作为敏感因子设计两组不同情景下的模拟实验,分别研究在台风“威马逊”(1409)和2011年10月海口特大暴雨期间海甸岛的城市淹没过程。

### 3.1 台风“威马逊”期间的复合淹没过程

在本节中,设置3个不同的实验来研究台风“威马逊”(1409)过境期间对海甸岛城市复合淹没的影响。具体地,实验a为不考虑排水管网,即单独使用ADCIRC模型模拟风暴潮期间的漫滩过程;实验b为不考虑降雨,由风暴潮和排水管网共同影响下的城市淹没过程;实验c则是在风暴潮-排水管网-降雨联合作用下的城市复合淹没过程。降雨数据来自台风期间GPM卫星反演数据。各实验考虑的模拟因素见表1,模拟过程中的最大淹没深度和最长淹没时间分布见图5。

表1 台风实验中考虑的模拟因素

Tab. 1 Factors considered in the simulation of each scenario in typhoon experiment

实验	排水系统	降雨	风暴潮
a	×	×	√
b	√	×	√
c	√	√	√

模拟结果显示,在不考虑排水管网的情况下,实验a的最大淹没深度为2.3 m,最长淹没比例为85%,最长淹没时间为16.8 h,平均淹没时间为6.2 h;而在考虑排水管网的前提下,实验b的最大淹没深度为2.1 m,最大淹没比例为65%,最长淹没时间为189.3 h,平均淹没时间为14.0 h;在考虑风暴潮、降雨和排水管网共同作用的城市复合淹没过程的实验c中,最大淹没深度为2.0 m,淹没比例为69%,最长淹没时间为188.5 h,平均淹没时间为15.1 h。

从淹没深度和淹没比例上看,在不考虑排水管网的情况下,当风暴潮来临时,由于台风“威马逊”给海甸岛周围海域带来了巨大增水,海水漫过堤防侵入陆地,造成了大范围的城市淹没。而在考虑了排水管网对城市淹没的影响时,实验b中的最大淹没深度比实验a降低了0.2 m,最大淹没比例降低了20%,实验c的最大淹没深度和最大淹没比例分别比实验a减少了0.3 m和16%。最大淹没深度出现在西部美丽沙以及海甸岛主要的排洪河沟附近,这是因为排水管网增加了陆地同海洋的连通性,加快了淹没与排水的速度。

从淹没时间上来看,在考虑排水管网的两个实

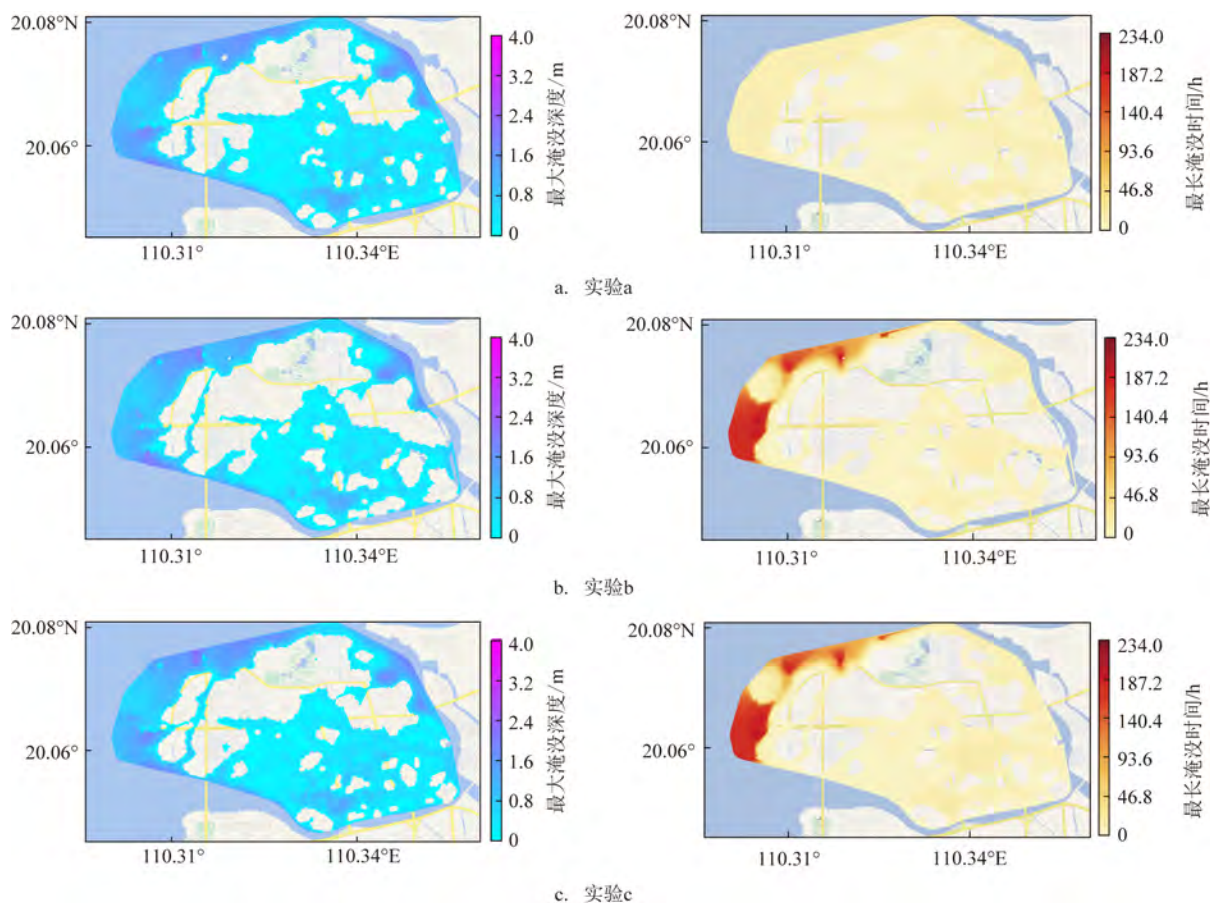


图5 不同情境下最大淹没深度和最长淹没时间分布

Fig.5 Distribution of maximum submergence depth and maximum duration in different scenarios

验中,最长淹没时间和平均淹没时间均显著高于不考虑排水管网的实验a,这是因为排水管网增加了陆地与外海的连通性,加快了陆地淹没和排水的速度,但是排水系统的效率易受到外海水位的影响,部分海水沿着排水系统进入城市内部,增加了沿海地势低洼区域的淹没风险。实验c中加入强降雨因素后最大淹没面积比例和平均淹没时间分别比实验b增加了4%和1.1 h,说明降雨会加剧淹没风险。

### 3.2 极端降雨下的淹没过程

通常情况下,风暴潮通过影响排水系统出水口处的水位来间接影响排水系统内部水位,而城市内部的淹没主要是由于降雨和排水系统溢流所致。2011年10月5—6日,受副热带高压影响,海口市经历了强降雨过程,最大24 h降雨量达到了441.0 mm,海甸溪、鸭尾溪、五西路明渠等主要排洪河沟都发生了溢流现象,人民大道、和平大道、海甸二东路等路

段均出现了严重的积水现象。为了探究极端降雨对海甸岛排水系统的影响,我们模拟了上述特大暴雨的城市淹没过程。整个模拟过程中,设置3种不同实验:实验a为不考虑排水管网,即单独使用ADCIRC模型模拟强降雨期间海甸岛的潮位过程;实验b为排水管网与潮位对城市淹没的共同影响过程;实验c中加入了降雨过程,为降雨、排水管网和外海潮位共同影响下的城市淹没过程。具体实验设定见表2。

分析结果表明,在排除降水因素的前提下,实验a与实验b均未展现出任何淹没或海水逆流的迹象(图略),这一模拟结果与实际情况相符,即在正常潮位水平下,不会发生海水倒灌现象。然而,当模拟进行到第4天,在降雨开始影响的实验c中,观察到海甸岛西北部的美丽沙区域发生了显著的淹没现象(见图6)。这主要是由于强烈降雨事件和海洋潮汐水位上涨的共同作用,部分海水进入排水系

表2 极端降雨实验模拟中考虑的因素

Tab. 2 Factors considered in the simulation of each scenario in extremely heavy rainstorm experiment

实验	排水系统	降雨	潮汐
a	×	×	√
b	√	×	√
c	√	√	√

统导致其排水能力下降,超出最大处理能力,降水未能及时通过排水系统引导至开放海域。在整个

模拟期间,计算得出实验c的最大淹没面积和淹没体积分别达到了 $0.8 \text{ km}^2$ 和 $82\,528 \text{ m}^3$ ,淹没比例为44%,从淹没时间来看,最大淹没时间达到了145.5 h(见图6),而整体平均淹没时间则为4.8 h。最大淹没深度和最大淹没时间均发生在美丽沙和海甸五西路附近,这是由于海甸岛主要水体的承受能力有限,正常情况下可以承受城市内部部分水体的排放,而当遭遇极端强降雨叠加天文大潮时,其纳受能力显著降低,从而引起排水井溢流甚至河水外溢,强降雨的发生加剧了淹没风险。

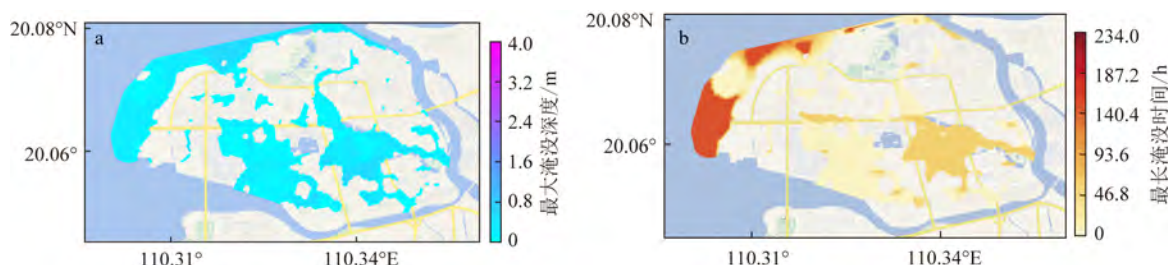


图6 2011年10月海口特大暴雨期间情景c最大淹没深度(a)和最长淹没时间(b)分布图

Fig.6 Distribution of maximum depth (a) and duration of maximum inundation (b) for Scenario c during the Haikou extremely heavy rainstorm in October 2011

## 4 结语

本文通过使用ADCIRC和SWMM耦合的水文水动力模型,以海甸岛为研究区域,模拟了在台风“威马逊”(1409)和极端降雨下的城市淹没过程,以探究排水管网在极端情景下对城市淹没的影响。

研究结果表明,对于沿海城市,排水系统增强了陆地与海洋部分的连通性,加快了城市淹没过程与排水过程,但是不同区域的淹没程度则取决于地形条件。模拟表明,风暴潮期间,排水管网最大可减少20%的淹没面积,而降雨则会增加1.1 h的平均淹没时间,加剧淹没风险;从2011年10月的极端降雨事件模拟中可以发现,淹没区域主要集中在美丽沙以及海甸五西路等地势低洼路段,这说明排水系统可以降低地势较高区域的淹没风险而加剧地势低洼路段的淹没风险,因此把美丽沙以及海甸五西路等路段划分为高风险路段。

而在现实情景中,城市中的建筑物也会对洪水的演进过程产生重要影响,受到地形分辨率和计算

算力的影响,本研究并未考虑城市地表建筑物对风暴潮过程的影响,在未来可以加入更精细化的模拟。

## 参考文献:

- [1] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 44-46.  
FENG S Z. Introduction to storm surge[M]. Beijing: Science Press, 1982: 44-46.
- [2] 自然资源部. 2023年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2024-05-13). <https://www.nmdis.org.cn/hygb/zghyzhgb/2023nzghyzhgb/>  
Ministry of Natural Resources. China marine disaster bulletin[EB/OL]. (2024-05-13). <https://www.nmdis.org.cn/hygb/zghyzhgb/2023nzghyzhgb/>
- [3] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis: working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [4] WANG Q, ZHANG R J, LI H Y, et al. Analysis of mechanism and optimal value of urban built environment resilience in response to stormwater flooding[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111625.
- [5] VIJAYAN L, HUANG W R, MA M D, et al. Rapid simulation of storm surge inundation for hurricane evacuation in Florida by multi-scale nested modeling approach[J]. International Journal of

- Disaster Risk Reduction, 2023, 99: 104134.
- [6] QIAN X J, HWANG S, SON S. A study on key determinants in enhancing storm surges along the coast: interplay between tropical cyclone motion and coastal geometry[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2024, 129(2): e2023JC020400.
- [7] IKEUCHI H, HIRABAYASHI Y, YAMAZAKI D, et al. Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2017, 9(4): 1847-1862.
- [8] OLBERT A I, COMER J, NASH S, et al. High-resolution multi-scale modelling of coastal flooding due to tides, storm surges and rivers inflows. A Cork City example[J]. Coastal Engineering, 2017, 121: 278-296.
- [9] BUSCHMAN F A, HOITINK A J F, VAN DER VEGT M, et al. Subtidal water level variation controlled by river flow and tides[J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): W10420.
- [10] SHI S Y, YANG B, JIANG W S. Numerical simulations of compound flooding caused by storm surge and heavy rain with the presence of urban drainage system, coastal dam and tide gates: a case study of Xiangshan, China[J]. Coastal Engineering, 2022, 172: 104064.
- [11] LUETTICH JR R A, WESTERINK J J, SCHEFFNER N W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1. Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL[R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 1992.
- [12] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual version 5.1[M]. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 2015.
- [13] 施劭瑜, 杨波, 江文胜, 等. 土地利用类型对滨海城市复合淹没的影响——以象山县为例[J]. 中国海洋大学学报, 2023, 53(2): 83-93.
- SHI S Y, YANG B, JIANG W S, et al. Impact of land use types on compound flooding in coastal cities: a case study of Xiangshan, China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(2): 83-93.
- [14] 梁海燕. 海南岛风暴潮灾害承灾体初步分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(1): 9-15.
- LIANG H Y. Analyze estates loss that cause by storm surge disaster of Hainan Island[J]. Marine Forecasts, 2007, 24(1): 9-15.
- [15] 吴海春, 黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 11-16.
- WU H C, HUANG G R. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 11-16.
- [16] 严云杰, 周维, 龚裕院, 等. 温州市三江河口风暴潮预报模型的建立与验证[J]. 浙江水利科技, 2015, 43(5): 60-63.
- YAN Y J, ZHOU W, GONG Y Y, et al. Establishment and verification of storm surge forecast model about Three River estuaries in Wenzhou[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2015, 43(5): 60-63.
- [17] 方利剑. 海口市海甸岛、盐灶片区内涝问题防治措施的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- FANG L J. Research on prevention and control measures of Haidian island, Yanzao area waterlogging problems in Haikou City[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [18] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [19] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western north Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [20] JELESNIANSKI C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Monthly Weather Review, 1965, 93(6): 343-358.
- [21] 张灵敏. 排水管网水力计算及暴雨积水模拟方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- ZHANG L M. Hydraulic calculation of drainage network and simulation method of storm waterlogging study[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

## Numerical simulation study on the impact of urban flooding on Haidian Island considering the drainage pipe network

CHENG Guangchen<sup>1,2</sup>, JIANG Wensheng<sup>3,4\*</sup>

(1. Hainan Academy of Environmental Sciences, Haikou 570100, China; 2. Sanya Institute of Oceanology, Ocean University of China, Sanya 572000, China; 3. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of drainage system on urban compound inundation of Haidian Island under extreme weather conditions, a numerical model of storm surge flooding is established using the ADCIRC-SWMM coupled model. The simulation results show that the drainage system increases the connectivity between the internal system of Haidian Island and the ocean, which plays a positive role in flood prevention and drainage and reduces the urban inundation risk under normal conditions. When an extreme weather event occurs, especially the water level in the outer sea rises, the drainage inlet may be affected by the high tidal level, which leads to the reduction of the drainage efficiency. This suggests that the drainage system has a dual feature for urban flood control and drainage, which is conducive to flood control and drainage in normal conditions, but also increases the risk of urban inundation when extreme events occur.

**Key words:** storm surge floodplain; urban inundation; numerical simulation; coupled model; Haidian island