

三亚市雨、洪、潮多元耦合精细化洪涝分析数值模型

戚蓝, 杨龙晏, 苑希民, 田福昌

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 三亚市作为典型的沿海城市, 频繁遭受台风扫掠, 暴雨和风暴潮常伴随而至, 与内陆城市洪涝相比三亚市洪涝成灾因素更复杂、影响更严重。基于高精度 DEM 数据建立三亚市主城区暴雨、洪水与风暴潮多元耦合精细化洪涝分析模型, 精细的还原计算区域内主要内边界, 采用分区糙率体现不同下垫面的影响, 利用干湿判别理论处理动边界, 计算获得三亚市主城区不同重现期洪涝灾害易涝点、积水深度及其影响情况, 研究成果对于科学指导三亚市洪涝风险分布特征及风险管理与规避具有重要的现实意义。

关键词: 雨洪潮多元耦合; 精细化数值模型; 洪涝; 风暴潮

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)05-0123-07

Numerical model of precise flood analysis of multiple couple of storm, flood and tide in Sanya

QI Lan, YANG Longyan, YUAN Ximin, TIAN Fuchang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As a typical coastal city, Sanya frequently suffers from typhoon, heavy rain and storm. Compared with the cities in inland area, the factors of flood disaster in Sanya are more complex and the influences are more serious. The paper built a storm, flood, tide multiple coupling numerical model based on high precision DEM data, precisely restored the main boundaries, and used partition roughness to reflect the impact of different down face, and used wet - dry theory to deal with variable boundary. This paper got the point of flood disaster, depth of water and influence factor in main suburb of Sanya. The result has important real significance for the scientific guidance, risk management of flood disaster in Sanya.

Key words: multiple couple of storm and flood; precise numerical model; waterlogging; storm surge

随着经济的快速发展, 自然灾害造成的损失越来越大。全球各种自然灾害造成的损失中, 洪涝灾害占比高达 40%^[1]。中国是世界上洪涝灾害发生最为频繁的国家之一, 灾害波及范围广, 损失严重, 约有 10% 的国土面积和 70% 的工农业总产值受到洪灾的威胁^[2]。沿海城市不仅遭受暴雨、洪水等风险因素, 风暴潮增水也是潜在威胁。我国风暴潮灾害十分严重, 是西北太平洋沿岸国家中风暴潮灾害发生次数最多、损失最严重的国家^[3]。如三亚市仅 21 世纪以来遭受较严重的台风暴雨灾害达 7 次之多, 造成了巨大的经济损失, 2013 年台风“海燕”给三亚造成的直接经济损失达 9.6 亿元。目前, 洪涝风险区洪水演进和内涝过程数值求解方法主要包括

有限差分法、有限元法和有限体积法^[4]。随着计算机和地理信息系统技术的快速发展, 基于有限体积法的平面二维水动力学模型, 可以灵活处理各类复杂地形及边界, 区域洪水风险模拟具有较高还原度。

利用二维水动力模型解决洪涝问题, 一直是国内外学者研究的热点。Larrea 等^[5]提出了二维洪水模型中干单元和湿单元的新型处理方法。Bates 等^[6]基于潜水动力学模型的改进理论, 研究了一种简单高效的二维水动力学模型。Fernandez - Nieton 等^[7]利用空间叠加原理对一维及二维水动力学模型进行了校准。国内学者对洪水模型的理论与应用也做了大量的研究。郑立松等^[8]把风暴潮、天文潮、波浪等模型进行了耦合, 并将耦合模型应用于洪

收稿日期: 2016-06-22; 修回日期: 2016-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209158); 高等学校学科创新引智计划资助(B14012)

作者简介: 戚蓝(1955-), 女, 山东威海人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事水工结构和流体分析方面的研究。

通讯作者: 杨龙晏(1989-), 男, 湖北十堰人, 在读硕士研究生, 研究方向: 水工结构动力分析, 水利工程仿真。

水风险分析。李大鸣等^[9]以二维水动力学模型为基础,研究了路基、涵洞等结构对洪水演进的影响。傅新忠等^[10]将 PCSWMM 模型应用于城市雨洪模拟中,对各种设计降雨情况下的城市暴雨积水情况进行了分析。权锦等^[11]利用 ROE 格式的 Riemann 格式求解了二维浅水动力学方程,并利用数值重构法获得了高精度的求解过程。苑希民等^[12]建立了溃堤洪水的二维水动力学模型,模拟了黄河内蒙段南岸灌区溃堤洪水演进情况。分析可知,现阶段城市洪涝研究多集中在暴雨与洪水的模拟,针对风暴潮也有一些独立的研究,但尚缺乏将多种因素综合考虑的耦合模型研究。

本文拟基于高分辨率地形数据建立城市洪涝风险数值计算模型,精确地体现研究区域内边界对洪涝发展的影响;合理划分糙率与径流分区,体现不同下垫面种类糙率值和径流能力;结合实际划定排水分区,充分考虑不同片区排水能力。计算获得可能的内涝与洪水淹没风险指标,如内涝点位置、积水深度、淹没面积、洪水到达时间等,提高洪涝灾害防灾减灾决策的科学性和合理性,增强公众的洪涝风险意识,将损失降到最低。

1 多元耦合水动力模型原理

1.1 基本理论

基于二维不可压缩流体雷诺平均应力方程的城市洪涝水动力计算模型,服从布辛涅斯克(Boussinesq)假设和静水压力假设^[13],控制方程如下:

流连续性方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial y}(hV) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial y} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2 h} \\ = \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), x \text{ 方向} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2 h} \\ = \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), y \text{ 方向} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $c = h^{1/6} n^{-1}$

式中: x 和 y 、 t 分别为空间、时间坐标; U 、 V 分别为 x 、 y 方向的流速; u 、 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向的分量; g 为重力加速度; h 为水深; c 为谢才系数; ν_t 为紊动黏性系数; n 为曼宁糙率系数。

模型采用单元中心显式有限体积法离散求解方程,保证水量和动量在计算域内守恒。

1.2 精细化措施

以高精度 DEM 数据为基础,三亚市计算区域的地形数据高程点分布间距为 2m,精细的地形数据可以确保模型计算最基本的地形文件无限接近于真实地形,为水流交换、水力计算提供真实的数字环境,确保模型的真实可靠度。本文在此基础上对模型进一步优化,相关处理措施包括:

(1) 区域复杂内边界优化处理: 三亚市计算区域涉及到的主要内边界有桥梁、涵洞、公路、铁路、河道等。模型主要采用非结构化三角形网格单元,更有利于拟合复杂边界线,局部地方为优化网格质量采用三角形、四边形嵌套网格。对于桥梁和涵洞等建筑,根据实际测量结果,通过处理高程点,还原其过水尺寸和面积;公路、铁路等线状建筑物具有明显的阻水效果,在精确的地形基础上进一步在线状建筑物中心线两边一定距离内加密网格;河道的精确程度将直接影响洪水演进以及近河区排水情况,必须确保其高度真实性,本文主要采用加密网格的处理办法,并且沿河道检查,确保其贯通和连续。

(2) 干湿网格动边界处理: 计算区域不可避免会出现干湿交替的网格,将造成计算不稳定性,因此本文采用干湿判别理论进行动边界处理。设定干水深(Drying depth)、淹没水深(Flooding depth)以及湿水深(Wetting depth),当某一网格单元水深小于干水深时,这些网格会被冻结而不参与计算,直至重新被淹没为止;当水深在干水深和湿水深之间时,这些单元上的方程会被调整,只计算连续方程,不计算动量方程;网格单元水深大于湿水深时将同时进行连续性方程计算和动量方程计算。

(3) 糙率分区优化多源水流运动: 水流在不同种类表面的运动是有差别的,因此下垫面种类将影响水流运动和交换效果。本文模型三类水源中,洪水主要作用于河道及近河淹没区,降雨作用于整个计算范围,而风暴潮直接作用于河道入海口及近海陆地。因此,根据下垫面种类不同,进行糙率分区,真实再现水流运动的环境,优化三类水源叠加后的流动效果,更为准确。

2 三亚市主城区概况

三亚市是海南省南部的政治、经济、文化中心,位于北纬 18°09'34"至 18°37'27"、东经 108°56'30"至 109°48'28"之间。台风频率为每年 3.72 次。三亚市

多年平均降雨量 1 475.5 mm,降雨量年内分配不均,全年约 80% 的降雨量集中在 6-10 月,降雨地区分布不均,东部地区雨水相对充沛,西部地区则干旱少雨。降雨多以暴雨形式发生,尤以台风暴雨最频繁,暴雨具有雨量集中、次数多、强度大等特点。

三亚市主城区洪涝分析计算范围西以大兵河为界,北以绕城高速(G98)为界,东以大茅水为界,南方面海,计算区域面积 225 km²。区域内主要河流有三亚东河、三亚西河和大茅水。其中三亚西河和三亚东河在上游河段分别分为汤他水、六罗水以及半岭水和草蓬水等河流。主要交通干线包括:G98、G223、G224、G225 和东环铁路。三亚市主城区研究区域范围如图 1 所示。

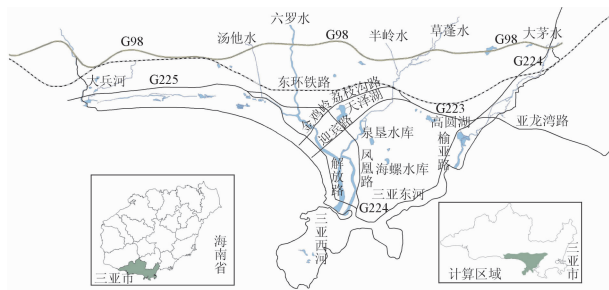


图 1 三亚市主城区计算范围

3 多元耦合洪涝分析模型建立

3.1 区域概化

三亚市主城区洪涝计算区域概化主要包括地形概化、建筑物概化和河网概化。(1)地形概化:基于三亚市 1:500 高精度 DEM 数据,提取计算范围外边界,得到闭合的水路边界线,对栅格数据合理剪裁得到研究范围内的高程散点数据;(2)建筑物概化:三亚市计算区的建筑物主要可以分为面状建筑物和线状建筑物。面状建筑物主要是房屋建筑,基于高精度地形数据,通过建筑物面图层提取建筑物线图层;线状建筑物主要包括公路、铁路等长宽比大且具有连续性的建筑物。线性建筑物具有明显的阻水作用,模型中需要精确还原,本文基于路图层高精度 DEM 数据,提取主要交通干线的中心线,作为加密网格的参考线;(3)河网概化:提取三亚市水系面图层数据,得到主要河流三亚东河、三亚西河、大茅水等河流的河道中心线以及河岸线。

基于以上数据基础生成网格,河流、线状建筑物及高程突变处的网格进行适当加密,网格生成后对网格进行平滑处理,并通过移动、合并等措施优化网格。导入高程散点,插值后生成地形文件。模型生

成网格数 11.31 万个,计算总面积 225 km²。三亚市主城区高精度 DEM 图如图 2 所示。

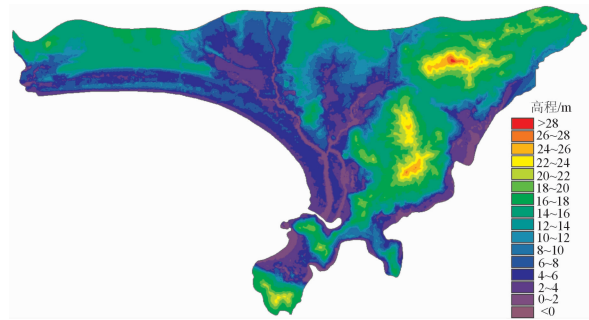


图 2 三亚市主城区高精度 DEM 图

3.2 内外边界

三亚市洪涝模型计算区域主要外边界可分为开边界和闭边界两种,闭边界为水陆交汇的地方,开边界为内外水流交汇的地方。模型中需要为多元水流设置接入口,通过这些接口将多元水流加载至计算区域进行后续水力计算。汤他水、六罗水、半岭水以及草蓬和大茅水等在上游与计算区域相交的 5 个断面为洪水入流断面,设置为开边界;三亚东河、三亚西河和大茅水在入海口处的 3 个断面为风暴潮进入研究区域的主要通道,设置为开边界;外边界其他部分为水陆交汇的地方,设置为闭边界。

内边界主要包括公路、铁路等线状阻水建筑物,桥梁、涵洞等过水建筑物,楼房等面状建筑物以及河道等。提取公路、铁路等线状建筑物中心线,以此为基准进行网格加密,当洪水未达到阻水建筑物顶高程时,线状地物起阻水作用,区域不过水;当洪水超过线状地物顶部高程时,水流以漫溢的形式通过。桥梁、涵洞等主要过水建筑物,通过处理高程点,在桥梁、涵洞实际地形坐标处断开,断开宽度即为过水桥涵和下穿道路过水断面宽度。楼房等具有一定拔地高度的建筑,模型中概化为不过水面,不参与网格剖分。河道的处理主要也是对河道网格加密,以精确体现河道横断面和纵断面。

3.3 多元水流条件

根据计算方案需求,计算区内水文边界条件主要包括降雨、洪水、潮位。

(1)降雨:采用三亚市暴雨强度公式计算设计暴雨,选取海南岛雨型作为降雨时程分布的依据。三亚市设计暴雨强度公式如下:

$$q = 1085 \frac{(1 + 0.5751 \lg P)}{(t + 9)^{0.584}} \quad (4)$$

式中: q 为暴雨强度, L/(s · hm²); t 为设计降雨历

时,min; P 为设计暴雨重现期。

利用上述公式计算三亚市 20 年一遇 24 h 设计暴雨降雨量为 204.29 mm, 并采用海南岛雨型分配暴雨过程, 每 30 min 一个数据, 共 48 组数据, 具体设计暴雨过程如图 3 所示。

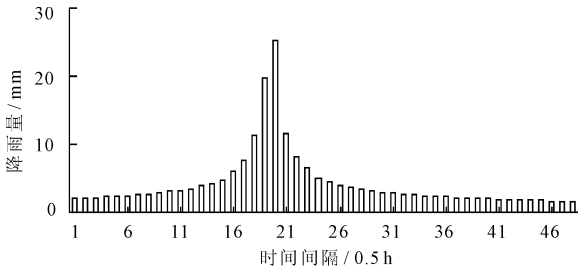


图 3 20 年一遇设计暴雨过程

(2) 潮位: 三亚市潮位站主要有三亚和榆林两站, 根据实测潮位值, 分别采用 P-III、耿贝尔曲线适线求得每站 20 年一遇潮位峰值, 取均值后用同倍比放大法获得 20 年一遇潮位变化过程, 潮位过程如图 4 所示。

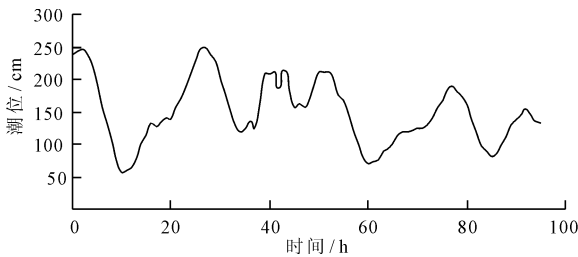


图 4 20 年一遇设计潮位过程

(3) 洪水: 由综合单位线法和推理公式法进行设计洪水计算。计算范围内三大河流与计算区域边界相交共 5 个计算节点, 从左至右依次编号节点 1、节点 2、节点 3、节点 4、节点 5 (计算节点位置如图 5 所示)。5 个计算节点 20 年一遇设计洪水洪峰流量依次为 447.98、732.76、123.6、358.12、489.58 m^3/s 。设计洪水过程为计算区域上边界条件, 具体洪水过程如图 6 所示。



图 5 计算节点编号及位置图

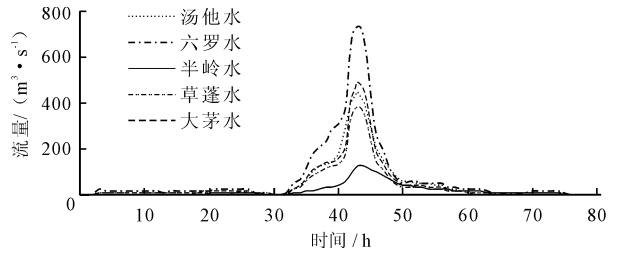


图 6 20 年一遇设计洪水过程

3.4 计算参数

二维水动力学模型, 主要计算参数有地面糙率、计算时间和步长、干湿边界等。为保证二维模型计算精度, 优化不同水源叠加后运动效果, 需要根据各种地物特征选择不同糙率, 按计算区土地利用情况进行糙率分区, 确定道路、楼房居民区等建设用地糙率系数取值 0.035, 农田绿地糙率值选取为 0.04, 河道糙率选取为 0.023。计算时间和步长、干湿边界设置如下: 最大时间步长设定为 2 s, 最小时间步长为 0.01 s, 湿边界 0.003 m, 干边界 0.001 m。

结合三亚市排涝现状, 将计算范围内河东片区、河西片区、新城片区、月川-荔枝沟-抱坡岭片区、榆林-红沙-吉阳片区、鹿回头片区等六个主要片区细化分为 33 个排水分区, 各排水分区排水能力根据管径、坡降等因素综合考虑。

4 洪涝计算结果与分析

4.1 分析方案设定

考虑风险最大化、方案适用性、重现期代表性作为方案设定主要原则, 重点研究潮位顶托、海水倒灌造成的洪涝风险, 本文设定暴雨、洪水同频遭遇计算方案, 计算方案如表 1 所示 (a 表示暴雨、洪水、潮位重现期, 单位: a)。

表 1 暴雨、洪水同频遭遇计算方案表 a

方案	设计暴雨	设计洪水	设计潮位
1	20		20
2	20	20	20

4.2 计算结果分析

4.2.1 方案 1 结果分析 为了研究风暴潮对三亚市主城区洪涝风险的影响, 方案 1 和方案 2 在入海口处的边界条件设置为 20 年一遇设计潮位过程 (考虑风暴潮增水影响)。方案 1 研究暴雨为主三亚市城区内涝风险, 水流条件设为设计暴雨和风暴潮遭遇, 方案计算结果显示区域最大积水深度分布如图 7 所示。

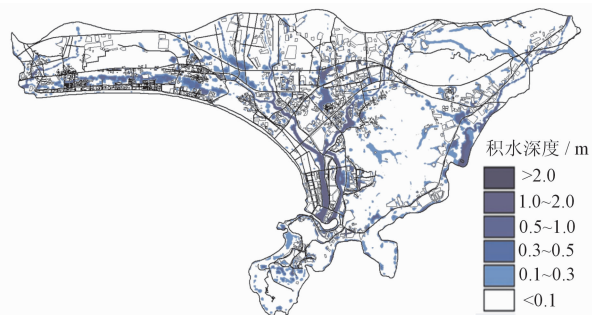


图 7 方案 1 最大水深分布

(1) 积水点分析:在主要小区,主要道路的范围
内统计方案 1 的主要积水点。方案 1 共 37 个积水
点,积水点位置分布如图 8 所示,各积水点最大积水
深度分布如图 9 所示。



图 8 积水点位置分布图

从计算结果最大水深分布图可以看出,三亚东
河、三亚西河和大茅水在入海口处一段河道水位明
显高于上游河段,局部地方出现河水漫溢上岸的现
象,这主要是风暴潮带来的影响,海水倒灌沿河道逆
流而上,当河道水位高于河岸高程时,便向两岸漫溢
形成淹没。风暴潮带来的影响不仅限于海水倒灌和

河水漫溢淹没,河东、河西片区主要排水途径是直接
排入河道,所以河道水位抬高将会削弱河东片区、河
西片区的排水能力,导致涝点数量和水深同步增加,
增大洪涝风险。在所统计的 37 个积水点中积水深
度小于 0.5m 的有 5 处,大于 0.5 m 的有 32 处,最大
积水深度 1.78 m。

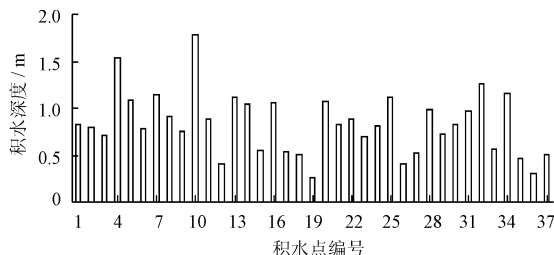


图 9 方案 1 积水深度

(2) 积水路段及其影响分析:将道路图层和计
算结果图层综合分析得到方案 1 主要积水路段有
13 处,积水路段名称及位置分布如图 10 所示。各
路段积水长度如表 2 所示,表中以编号表示路段名,
编号与图 10 路段编号一致。



图 10 积水路段名称及位置

表 2 各路段积水长度统计表

编 号													m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
488	486	374	385	497	1271	405	650	577	244	414	278	427	

一般积水路段积水超过 0.3 m 时,将直接影响
交通,本文以 0.3 m 为基准,统计积水路段水深变化
过程。统计榆亚路红沙路段、鹿岭路与榆亚路交口
附近路段、胜利路与新凤路交口南段等三处积水路
段 24 h 内积水深度变化过程,如图 11 所示。由图
中结果可看出榆亚路红沙路段从大约第 9.5 h 开始
积水深度大于 0.3 m,影响历时 14.5 h。鹿回头路
靠近榆亚路交口处的路段在第 16.7 h 以后积水深
度大于 0.3 m,

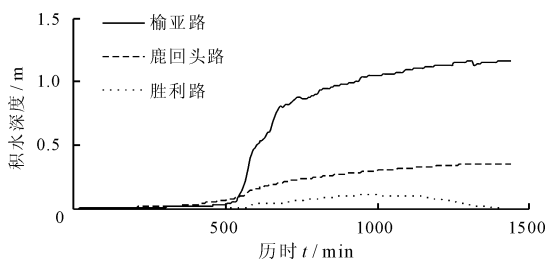


图 11 积水路段积水深度变化过程

影响历时 7.3 h。胜利路第 9.7 h 时才开始积水,积

水深度最大为 0.15 m,可见胜利路排水条件较好,最大积水深度仅为 0.15 m 且积水历时较短,不会影响交通。

4.2.2 方案 2 结果分析 方案 2 为雨、洪、潮多元耦合计算方案,将复杂的成灾因素同时考虑,内外边界条件复杂,经优化后得到方案 2 最大淹没水深及淹没范围图如图 12 所示。根据计算结果,将三亚市社会经济指标、各类地物分布图层与 20 年一遇雨、洪、潮多元耦合模型淹没水深图层进行叠加综合分析,可以得到淹没区内人口分布情况、各方案淹没水深对应的淹没面积、以及区域内的淹没耕地及居民地等受影响情况。方案 2 淹没面积 24.62 km²,其中淹没房屋面积 1.72 km²,淹没耕地 8.03 km²,影响人口 2.36 万人,影响村落和社区 30 多个。将淹没图层和三亚市主城区道路图层进行叠加分析,得到淹没道路的淹没水深和淹没长度分布情况,见表 3。

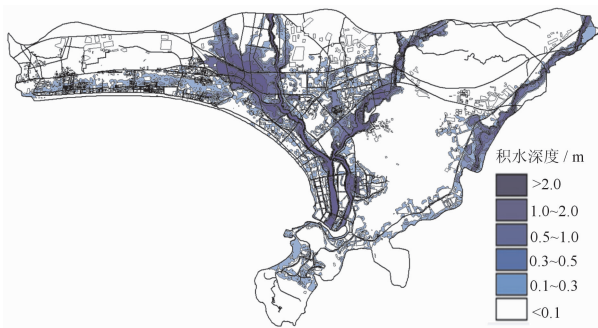


图 12 方案 2 计算结果图示

表 3 方案 2 淹没道路情况统计 km

淹没水深/km	淹没长度
小于 0.3 m	145.40
0.3 ~ 0.5 m	44.40
0.5 m 以上	51.46

方案 2 暴雨、洪水和风暴潮遭遇洪涝灾害结果更加严重,形成大面积淹没片区和积水点。为了方便对比,仍统计相同位置的 37 个积水点,积水点编号保持不变,得到方案 2 主要积水点的最大积水深度如图 13 所示。对比可知,方案 2 编号 3、6、12、15、18、27、30 的积水点积水深度比方案 1 有明显增大。这是因为从分布特点来看,这些积水点都位于河东、河西片区,在洪水和风暴潮共同作用下,河道水位被进一步抬高,局部地地方向两岸漫溢,此时河东、河西片区的排水作用被极大削弱。

由模拟结果看来,三亚市同时遭遇暴雨、洪水和风暴潮等致灾因素时,风暴潮引发海水倒灌逆流而

上,对近河区排水带来影响,加大了洪水风险;洪水沿河漫溢形成大面积淹没,给经济和生态带来巨大的损失。

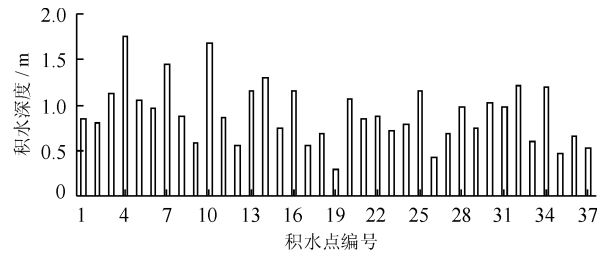


图 13 方案 2 积水深度

综上所述,方案 1 研究了以暴雨和风暴潮为主要风险来源的三亚市主城区洪涝风险,计算获得了主要积水点和淹没路段等风险分布情况;方案 2 综合考虑暴雨、洪水、风暴潮等多致灾因素影响下的城市洪涝风险,分析比较了与方案 1 的积水点分布差别,并得到该计算方案下主要的淹没范围、淹没道路等风险指标。本文所研究的模型适用于三亚等沿海城市洪涝风险分析计算,满足防洪减灾、防汛应急管理的需要。

4.3 合理性分析验证

本文主要从洪涝点特征值和流场合理性对模型进行分析验证。

(1)历史洪涝点分析:根据三亚市历史易涝点位置和易涝点积水深度统计,三亚市主城区共有 11 处易涝点。模型结果显示该 11 处易涝点均有积水,且积水深度与范围基本相符;

(2)流场分析:选取特征建筑物的局部流场分析模型合理性。以汤他水先后经过东环铁路和 G225 为例,流场分布及演进效果见图 14。

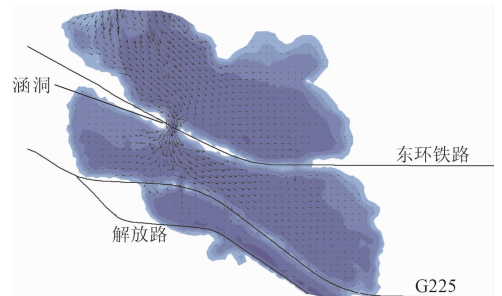


图 14 局部流场分布图

汤他水以涵洞的方式贯穿东环铁路,河道行洪能力不足,洪水不能及时通过涵洞向下游演进,致使其以铁路为界分别向东、西两侧漫溢。查询 DEM 图知,汤他水附近东环铁路高出地面 1.2 ~ 2 m,铁路

附近水深不超过 1 m,所以洪水主要从涵洞向下游推进,铁路阻水效果明显。结合淹没范围,流场分布以及 DEM 综合分析,本文所建多元耦合精细化模型计算结果基本合理。

5 结 论

洪水风险分析是防洪减灾的一项重要非工程措施,通过建立城市洪涝风险模型获得可能的风险指标,对于科学指导防灾救灾、提高人们的风险意识和降低洪涝损失具有重要的意义。

(1) 本文建立三亚市雨、洪、潮多元耦合模型,得到了在 20 年一遇的暴雨、洪水、风暴潮等多致灾因素影响下,洪涝淹没面积 24.62 km²,其中淹没房屋面积 1.72 km²,淹没耕地 8.03 km²,影响人口 2.36 万人,影响村落和社区 30 多个;同时研究了暴雨为主的洪涝风险,统计了三亚市主城区的 37 个主要积水点和 13 处积水路段等风险指标。计算成果对三亚市洪涝风险科学指导、有效管理、风险规避具有指导作用。

(2) 风暴潮引起近海岸区海水倒灌和漫溢淹没,同时河道水位的升高将影响河道直排片区排水能力,这是沿海城市洪涝灾害的显著特点,也是沿海城市洪涝风险分析必须要考虑的因素之一。作为沿海城市代表,三亚市的研究成果对于其他受暴雨、洪水、风暴潮影响的沿海城市洪涝风险分析具有参考意义。

参考文献:

[1] 张继权,李 宁. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化

方法及其应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2007.

[2] 路明浩,程先富. 洪水灾害风险评价研究综述[J]. 四川环境,2010,29(6):127-132.

[3] 赵庆良,许世远,王 军,等. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展[J]. 地理科学进展,2007,26(5):32-40.

[4] 童汉毅,赵明登,槐文信,等. 洪潮遭遇情况的水动力学计算[J]. 武汉大学水利电力大学学报,2000,33(5):11-15.

[5] Larmaei M M, Mahdi T F. A new method for the treatment of wetting - drying fronts[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36: 2286 - 2302.

[6] Bates P D, Horritt M S, Fewtrell T J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two - dimensional flood inundation modelling[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387: 33 - 45.

[7] Fernandez - Nieto E D, Marin J, Monnier J, et al. Coupling superposed 1D and 2D shallow - water models: Source terms in finite volume schemes[J]. Computers & Fluids, 2010, 39: 1070 - 1082.

[8] 郑立松. 风暴潮 - 天文潮 - 波浪耦合模型及其在杭州湾的应用[D]. 北京:清华大学,2010.

[9] 李大鸣,管永宽,李玲玲,等. 蓄滞洪区洪水演进数学模型研究及应用[J],水利水运工程学报,2011(9):27-34.

[10] 傅新忠. SWMM 在城市雨洪模拟中的应用研究——以金华市城北某区块为例[D]. 金华:浙江师范大学,2012.

[11] 权 锦,张大伟,蒋云钟. 应用二维数值方法模拟蓄滞洪区洪水运动[J]. 水利水电技术,2012,43(4):107-111.

[12] 苑希民,田福昌,冯国娜,等. 溃堤洪水的二维水动力模型及其应用[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):225-230.

[13] 衣秀勇,关春曼,果有娜,等. DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014:8-15.

(上接第 117 页)

[4] 张 弛,仵彦卿,覃荣高. 渗透系数升尺度对非均质含水层溶质迁移影响研究[J]. 水文地质工程地质,2014,41(5):19-25+31.

[5] 张 丰,王 箭,赵燕飞,等. 基于马氏链的信任预测算法[J]. 计算机科学,2014,41(4):155-158+183.

[6] 潘少伟,罗海宁,郭 智. 序贯指示模拟法夹层模型建立[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(5):59-66.

[7] 刘艳丽,余贻鑫. 大系统马尔可夫模型状态转移概率矩阵的快速形成方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(9):791-798.

[8] 李 军,杨晓娟,张晓龙,等. 基于三维马尔可夫链模型的岩性随机模拟[J]. 石油学报,2012,33(5):846-853.

[9] 聂笃忠,陈 桦,米承继,等. 马尔科夫链状态概率转移矩阵修正算法[J]. 统计与决策,2013(3):14-17.

[10] 靳 萍,邵景力,李长青,等. 基于 T - PROGS 的地下水三维数值模拟及应用[J]. 水文地质工程地质,2009,36(4):21-26.

[11] 何陇萍,牛 梅. GMS 在水文地质结构可视化方面的应用[J]. 资源节约与环保,2015(1):166.

[12] 张 浩,王福林,索瑞霞,等. 基于马尔可夫模型的我国东、中、西部的产业结构预测[J]. 数学的实践与认识,2010,40(14):39-44.

[13] 文士发,徐 梅,王福林,等. 一种估算马尔柯夫状态转移概率矩阵的新方法[J]. 数学的实践与认识,2014,44(8):164-169.