

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0018

陈阿萍,柳杨,刘国庆,等.常州市主城区暴雨内涝风险分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):160-170. CHEN A P,LIU Y,LIU G Q,et al. Analysis on the risk of rainstorm waterlogging in urban area of Changzhou City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):160-170. (in Chinese)

常州市主城区暴雨内涝风险分析

陈阿萍¹,柳杨²,刘国庆²,洪昕³,范子武²,杨阳¹,杨帆²

(1.常州市防汛防旱调度指挥中心,江苏 常州 213022;2.南京水利科学研究院,南京 210029;
3.常州市河道湖泊管理处,江苏 常州 213022)

摘要:为分析和预测常州市暴雨内涝风险,构建常州市主城区水文-水动力-河网-管网耦合的精细化数学模型,以 2017 年现场原型观测数据对数学模型进行率定和验证,并将 2015 年洪水模拟情况与实际淹没范围、淹没水深进行对比。验证结果表明:计算水位和实测水位最大绝对误差均小于 7 cm,计算水位曲线形状与实测水位序列匹配较好;城区 70%的暴雨积水点与实际相符,模型能较好地模拟洪水演进及淹没情况。采用常州市主城区精细化数学模型模拟分析 50 a、100 a、200 a 一遇最大 24 h 设计暴雨工况时的洪水淹没情况和管道运行负荷状况,统计各水深等级下的淹没面积并绘制洪水风险图,为常州市城市防洪管理、城市发展规划等提供决策依据和技术支持。

关键词:常州市主城区;河网-管网耦合数学模型;暴雨内涝;洪水风险分析

中图分类号:TV13 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



近年来,随着城市化进程的快速发展,下垫面剧烈变化、流域产汇流规律改变、城市排水设施布设密度不足以及部分设施因服役时间长出现堵塞、断裂、错口等一系列问题,洪涝风险的暴露度提高,城市的洪水灾害风险上升^[1-4]。

暴雨内涝问题受到国内外学者的广泛关注,而数学模型是计算分析城市暴雨内涝的主要手段。国外利用数学模型进行暴雨内涝风险分析技术已十分成熟^[5-8],其中,暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)、InfoWorks ICM 等模型能够精确模拟产汇流过程和洪水演进过程,在国内应用广泛^[9-14];乌景秀等^[15]采用水力学方法构建景德镇城区水力学模型,模拟计算了景德镇市城区超标洪水导致防洪墙溃决或城市暴雨可能发生的受淹和积水情况;陈靖等^[16]以福州市城区地表和

明渠河道为主要模拟对象,建立了福州城市暴雨内涝数学模型,该模型对长时间、雨强比较平均的降雨整体模拟效果较好;邓金运等^[17]采用 Mike Flood 耦合模型分析了武汉市光谷中心城区在不同降雨、不同土地利用类型情景下的受灾面积,得出随设计暴雨重现期增大,城市淹没水深、分布范围及相应的受灾损失不断增加,受灾面积增长率以交通用地、绿化用地最大,受灾损失增长率以交通用地、绿化用地、工业用地最为明显;余富强等^[18]通过耦合水文模型与二维水动力模型的方法,使得在模拟城市下垫面洪水淹没情况的同时,又能使模拟达到较快的运算速度。国内外已有研究成果表明,利用数学模型模拟分析暴雨内涝的相关研究比较常见,但构建的模型可靠度差异较大,如何提高模型的模拟精度值得进一步研究,且水文-水动力一、二

收稿日期:2021-03-29 修回日期:2021-09-16 网络出版时间:2021-09-28

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210927.2147.002.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407205);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(Y121003);江苏省水利科技项目(2017004;2020021;2017001ZB)

作者简介:陈阿萍(1981—),女,江苏常州人,高级工程师,主要从事水利工程防汛调度、数值模拟等研究。E-mail:360915739@qq.com

通信作者:范子武(1970—),男,山东费县人,正高级工程师,主要从事洪水风险分析、城市水力学等研究。E-mail:zwfan@nhri.cn

维河网-管网耦合的精细化模型构建也是今后的研究重点。常州市作为长三角地区重要平原城市,河网水系发达、城镇化率高,暴雨引发内涝问题突出,对当地居民的生产生活造成一定影响,为此,以常州市主城区为研究对象,构建水文-水动力一、二维河网-管网耦合的精细化模型,开展常州市主城区暴雨内涝分析,为预估常州市暴雨内涝风险、指导常州市防洪排涝决策提供依据,也为常州市城市发展与建设提供参考。

1 研究区域概况

常州市属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,无霜期长,全年平均气温 17.5℃,年平均降水量 1 149.7 mm。历史上地区灾害性降雨主要有梅雨型降雨与台风。常州市地形以平原为主,地势西南高、东北低,包括金坛、武进、新北、天宁、钟楼 5 个区及溧阳 1 个县级市,常州市主城区东临丁塘港,南到京杭运河,西靠德胜河,北至新龙河和沪宁高速公路,区域内水系发达,主要河道有京杭大运河、老运

河、南运河、丁塘港、德胜河、古运河、关河、横塘河、老澡港河、北塘河等。

在上游湖西区来水和下游无锡、苏州外排顶托的双重影响下,京杭大运河常州段水位屡超历史水位,常州城区管网排涝能力不足的区域极易形成内涝积水。中华人民共和国成立后,常州市从 1951 年到 2014 年的 64 a 中,经历特大水年 2 a(1954 年、1991 年)、大水年 6 a(1969 年、1974 年、1983 年、1987 年、1999 年、2003 年),2015 年、2016 年常州再次经受历史罕见洪涝灾害,造成大量经济损失。为减轻防洪压力,常州市主城区内建立了大包围控制(即运北大包围,以下简称大包围),节点枢纽工程包括澡港河南枢纽、老澡港河枢纽、永汇河枢纽、北塘河枢纽等,运北片大包围区域一级排涝泵站 13 座,装机流量 353.60 m³/s,二级排涝泵站 19 座,装机流量 95.64 m³/s,三级排涝泵站 37 座,装机流量 95.32 m³/s。城区防洪标准总体达到 100 a 一遇,城市中心达到 200 a 一遇,排涝标准为 20 a 一遇最大 24 h 降雨不漫溢。主城区水系及工程分布见图 1。

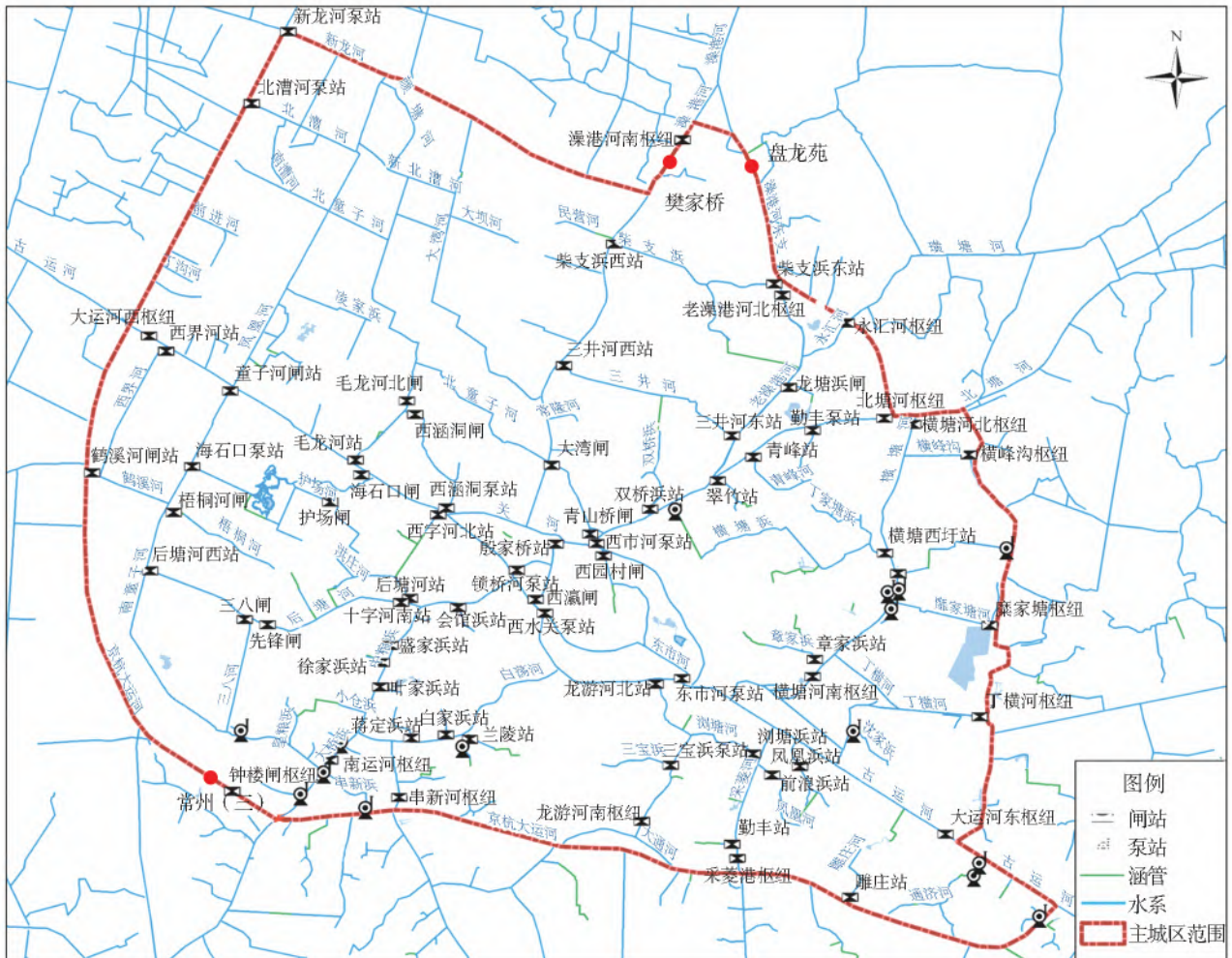


图 1 常州市主城区水系及工程分布

Fig. 1 Water system and engineering distribution in the main urban area of Changzhou City

2 精细化数学模型构建

2.1 构建思路及范围

为能够准确模拟常州市主城区暴雨内涝风险情况,本文按照离散化建模规则,基于具有模拟城市地下管网、城市河网、降雨产汇流、堤防溃决等功能一体化数值模拟系统软件 InfoWorks ICM,根据常州市主城区地形、河道水系、地下管道、水利工程、工程调度规则,构建常州市主城区水文-水动力一、二维河网-管网耦合模型,本文构建的模型范围覆盖常州市主城区 179.2 km²。

模型模拟过程主要由 3 个部分构成,即降雨过程模拟、地面径流过程模拟和管网汇流过程模拟。降雨过程模拟降雨事件发生时的降雨过程线,地面径流过程模拟降雨事件发生后汇水区发生的洼地蓄水、入渗和蒸发等径流损失的地面产汇流过程,管网汇流过程模拟雨水汇流进入排水管渠输运到受纳水体(河道、湖库等)的过程。

2.2 城市河网-管网一体化模型

2.2.1 模型原理

水文模型。用于城市/流域汇水区的地表降雨径流计算,InfoWorks ICM 提供固定径流系数, Horton, Green-Ampt, SCS 等径流模型,以及 Wallingford, Large Catch, SWMM, Unit 等汇流模型。另外,ICM 中还可考虑将降雨直接作用在地面上,根据地面模型考虑土地性质、下渗、蒸发等因素的影响,形成径流,并排入到排水管网系统中。

管流模型。采用完全求解的 St. Venant 方程模拟管道和明渠流,对于超负荷的模拟采用 Preissmann Slot 方法,能够仿真各种复杂的水力状况。利用贮存容量合理补偿反映管网储量,避免对管道超负荷、洪灾错误预计。各水力设施真实反映水泵、孔口、堰流、闸门、调蓄池等排水构筑物的水力状况。

水动力模型。一维河道(河网)的洪水运动用 St. Venant 方程组描述,其上、下游边界的控制条件一般采用水位过程控制、流量过程控制、流量-水位关系控制等形式。由 St. Venant 方程、边界条件和初始条件同组成一维洪水运动的定解问题。一维河道(河网)非恒定流的基本方程是一组拟线性偏微分方程组。本次采用水动力学有限差分法直接求解 St. Venant 方程组的数值解。二维模型是一个更快、更准、更详细的地面洪水演算模型。根据地面高程模型,并考虑道路、建筑物等对水流的引导和阻挡作用;考虑地面上不同类型地块的糙率对流速的

影响,如道路、草地等;考虑地面的下渗作用(Horton 模型);考虑根据关注程度设定不同精度的网格;考虑湖泊、河道等水位边界,模拟出洪水在地面上行进的过程。本次采用守恒型式的浅水波方程作为二维洪水运动的控制方程,采用水力学方法二维有限体积法求解浅水流方程。一、二维耦合模型中一维河网模型与二维地面模型是通过河道堤防设置的“溢流单元”上的连接条件来实现模型耦合的,选定侧堰流公式来实现水流信息的交互。一维模型为二维模型提供流量值 Q 作为二维模型的边界条件,将 Q 值分布到二维计算单元的各节点上,在连接处二维计算网格的水位值并不相等,因此取各个计算网格的平均水位值 Z 返回给一维模型,以进行下一时段的计算。管道模型和地面模型的衔接通过管道在地面上的检查井进行水流交换。地面降雨通过集水区汇流进入地面上的检查井,再流入管网,管网排口与河道连接,进入管网的水流又通过排口进入河道。

2.2.2 河网-管网精细化模型构建

常州市主城区河网-管网精细化模型构建主要分为:一维模型构建,包括创建断面、创建河道连接、添加水工构筑物、管网模型构建、创建河岸;二维模型构建,包括线状地物处理、地面模型构建、区域降雨处理、糙率设置、网格划分、调度规则及边界条件添加^[19]。

一维模型构建。为保证模型的精细化水平和模型模拟精度,本文构建的模型包括区域内所有 113 条河道,河道断面均为实测断面。测量时:河宽 30 m 以上河道,断面测量间距为 500 m;河宽 10~30 m 河道,测量间距为 200 m;河宽 10 m 以下河道,测量间距为 100 m。另外,每条河道的首尾、束窄处、拐弯处均进行测量,按上述原则,共测得主城区河道断面 1 154 个。河道断面创建后,对照主城区范围内的遥感影像,建立河道中心线,并根据区域水系特点和水流方向进行河网的连接,然后在对应位置添加水工建筑物,并输入建筑物对应的几何尺寸信息、设置运行规则。

在管网模型构建时,将城建部门收集的常州市主城区雨水、雨污合流管网的数据信息导入数学模型。数据信息包括排水管道的类型(含雨水管道和合流管道)、断面形式、管径、管材、管长、管底标高及相应检查井类型、编号、路面高程等。对数据信息检查、修正并对缺失的数据进行合理化推断。本文构建的管网模型覆盖了整个常州市主城区的编制范围,包含检查井 14 551 个、出水口 491 个、管段数 14 628 个,

总长度达 458.5 km,满足了精细化建模的要求。管网模型构建后,即可创建河岸,再利用实测的河道堤防高程数据整合到河段中,从而保证河道的完整,本次构建的模型共创建河段 399 个,总长 281.24 km。河网管网模型构建完成后,进行拓扑关系检查,包括管道连接(管径、连接方向、高程、位置)以及管网与河网连接(管道出水口与河网交汇)的拓扑关系检查,提高模型的计算准确性和精度。

二维模型构建。常州市主城区二维模型构建过程,关键步骤包括:线状构筑物的处理、地形处理、区域降雨处理、网格剖分等。常州市主城区内线状地物处理主要为道路的处理,鉴于原始道路图层缺少高程值,本次模型构建对研究区内的道路高程进行了加密测量,点间距根据高程变化情况控制在 100~300 m。另外,由于原始道路节点间距不规则,划分网格时容易产生小网格,对模型计算不利,为此,采用抽稀处理方法^[20]对道路的节点进行均匀化,并利用测量的道路高程值对其进行赋值,本区域共构建道路 1 571 段。

地形数据是二维模型网格剖分的基础,对暴雨内涝分析结果影响较大。本文基于收集的常州市主城区 1:500 高精度 DEM 数据构建地面模型,并导入河网-管网耦合模型。降雨模型构建时,根据常州

(三堡街)、钟楼闸雨量站分布,采用泰森多边形进行雨量的空间分配和集水区划分。当发生不同强度的暴雨时,根据不同雨量站的实测数据,输入降雨边界过程。降雨首先降到集水区,采用水文模型计算汇流过程,并由地面上的检查井进入地下管网,再由地下管网进入河道,河道水位等计算结果也会反作用于管网和地面模型,管网、河网与淹没区域按照上述过程产生水量交换,相互嵌套、实时互馈,以此实现河网和管网一、二维耦合的模拟计算。

根据常州市主城区下垫面信息,将下垫面数据导入模型,确定不同区域的糙率值,创建糙率分区,并设置不同的糙率。本模型与 GIS 无缝对接,根据 GIS 分析成果对下垫面进行精确划分,共分居民地、耕地、道路、城市绿地、水系、其他 6 类。常州市主城区模型构建完成后,根据水利工程实际的调度规则进行逻辑控制,包括闸门的调度、水泵的启闭等。在常州市主城区二维模型网格划分时,以计算域外边界、区域内堤防、阻水建筑物、较大河渠、主要公路、铁路作为依据,采用无结构不规则网格,参照文献^[22]对于城市洪水风险图分析模型网格划分要求,网格面积控制为 0.000 5~0.005 0 km²,共生成计算网格 82 995 个、计算单元 71 289 个。常州市主城区河网-管网精细化模型见图 2。

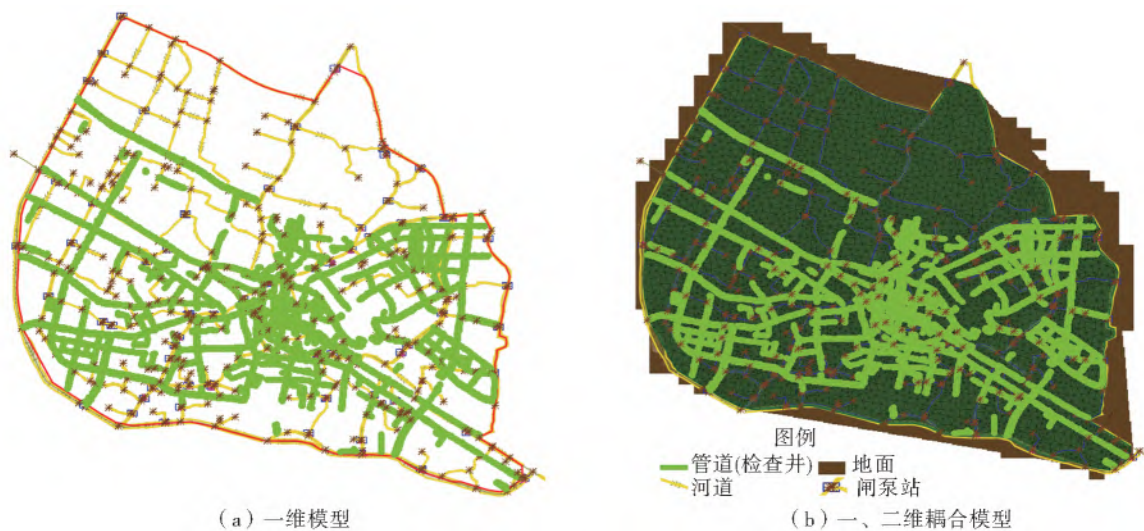


图 2 常州市主城区河网-管网精细化模型

Fig. 2 Refined model of river network-pipe network in the main urban area of Changzhou City

需要说明的是,常州市主城区作为常州的老城区,管网系统错综复杂,管道资料收集较为困难。本文在构建管网模型时,向城建部门收集到的是主干道路上的管网,而内部支管的信息在水文模型参数中体现,以集水区为单元通过水文模型进行道路周边汇流计算,地面水流汇入主干道路的检查井,再进入管网,流入河道。本方法符合暴雨发生后的实际

水流过程,能够真实反映区域的暴雨内涝状况。

2.3 模型参数率定

2.3.1 水文学模型参数选取与率定

下垫面分析。不同下垫面情况的产汇流机制存在一定的差异,根据常州市用地类型解译资料和实地调研,常州市的主要用地类型有 59 种。参照文献^[21]有关不同地面种类的径流系数的规定,借助

GIS 统计并核实常州市的不同地面种类的组成和比例,以加权平均法计算常州市各用地类型的径流系数,即道路取 0.85、居民地取 0.70、耕地为 0.20、城市绿地取 0.20、水系为 1.00、其他用地取 0.80。

综合径流系数确定。根据《常州市城市排水与

防涝综合规划》,结合常州市地形特点和水系分布,利用 GIS 将研究区域分成 14 个集水区,见图 3。其中:城西南童子河运河片、龙江路西自排片为高地自排区,直接就近排入外河;澡港河东支老澡港片、澡港河西片涝水直排入一级内河;其余 10 个分片为抽排区。

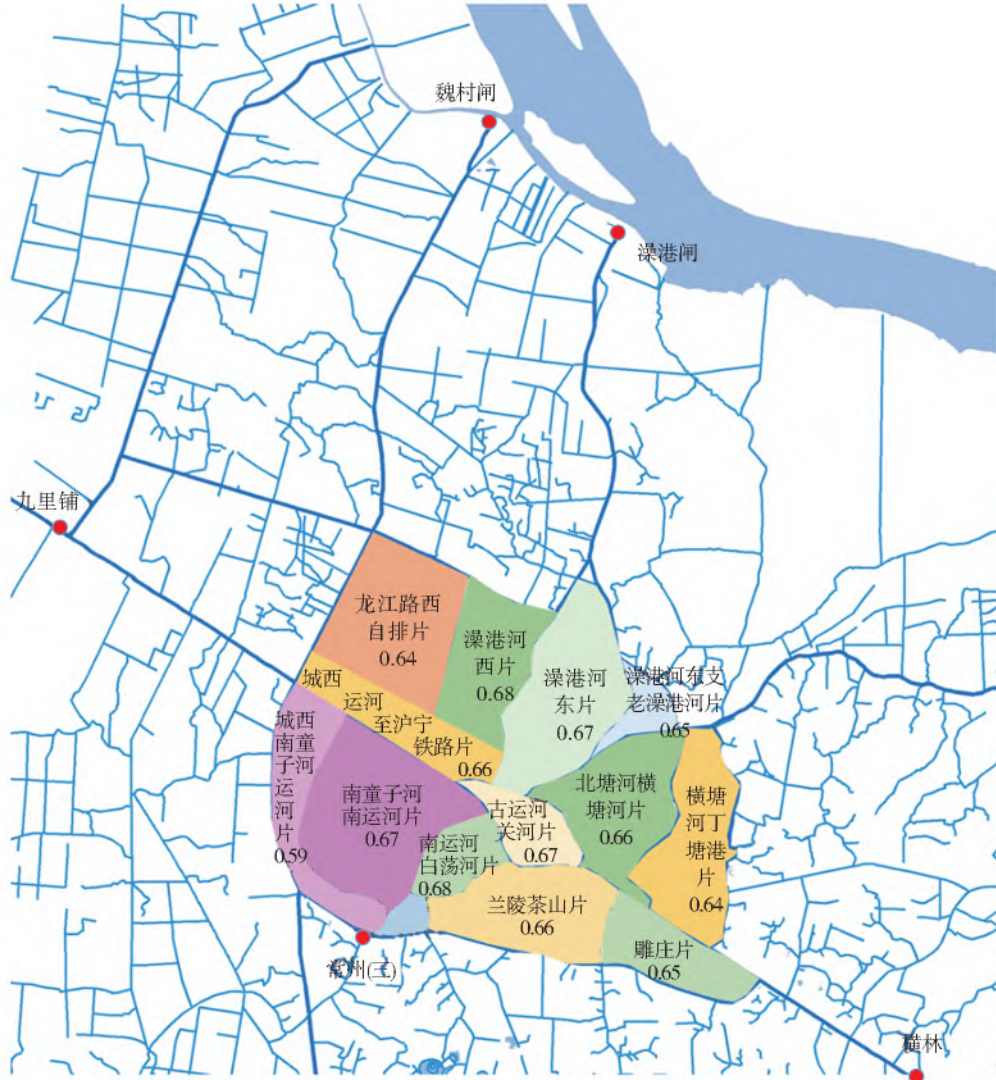


图 3 常州市主城区排涝分片及其综合径流系数

Fig. 3 Waterlogging drainage segment and its comprehensive runoff coefficient in the main urban area of Changzhou City

按照集水区的划分方式,通过 GIS 对常州市主城区计算范围内 14 个集水片内的下垫面进行分析,根据各用地类型径流系数及其面积所占比例加权平均计算出常州市不同集水区的综合径流系数,即常州市城西南童子河运河片和串新河南运河片综合径流系数较低,分别为 0.59 和 0.61,其他片区综合径流系数均在 0.64~0.68,见图 3。

产汇流模型参数率定。常州市主城区范围内的雨量站仅为常州(三),为保证计算结果的准确性,采用常州市主城区内及周边常州(三)、魏村闸、澡港闸、九里铺、横林 5 个雨量站(图 3)的数据进行产汇流模型参数率定,通过上述 5 个雨量站划分的泰森多边形区域在不同集水区中的占比,计算各集水区中不同雨量

站的权重,率定产汇流模型的参数,详见表 1。

表 1 模型参数取值

Tab. 1 Model parameter values

参数名称	取值	说明
f_c	1	降雨因数
τ_d	0.042	延时
C_{min}	1.5	最小蓄水能力
C_{max}	300	最大蓄水能力
b	2.5	控制蓄水能力空间变化的排列分布指数
k_g	1 000	地下水补充时间常数
b_g	1	补充函数的指数
S_i	1.5	土壤张力蓄水能力
k_1, k_2	4	两个线性水库的喷流时间常数
q_c	1	恒定流表现回水/取水

2.3.2 水动力学模型参数选取与率定方法

参数选取。参考《常州市城市防洪规划修编报告》,选取各排水分区的常水位作为整体模型中各河道的初始水位,进而确定不同排水分区的初始水位,模型根据断面资料采用不等间距的节点布置,实测河道断面间距约为 100~500 m,模型计算步长为 100 m 左右,为使模拟计算过程保持较好的稳定状态和满足模型计算精度,模型时间步长采用 60 s。河道糙率值主要根据《水力学手册》《常州市城市防洪规划》《常州市城市排水与防涝综合规划》有关人工渠道以及天然河道的经验值初步拟定为 0.020~0.040。

模型率定方法。模型的率定主要用于调整模型中的相关参数以提高模拟结果的精确度。一维模型中的主要影响因子为空间步长、时间步长以及河道糙率。参照文献[22],验证结果与实际洪水的最大水位误差(实测水位与计算水位之差绝对值的最大值)不大于 20 cm。率定验证中采用 Nash-Sutcliffe 系数 NSE 和决定系数 R^2 对模型有效性进行评定,NSE 用于表示计算值系列与实测系列数量级近似程度, R^2 用来表示计算值系列与实测系列形状吻合程度。

2.3.3 模型率定

根据 2017 年 5 月 9 日、5 月 13 日两次现场原型观测试验结果,采用常州(三)、樊家桥、盘龙苑站点实测水位过程进行模型率定。由表 2 可知,两次率定中选取的 3 个验证点位计算水位序列和实测水位序列最大绝对水位误差均小于 5 cm,计算水位曲线形状与实测水位序列匹配较好。经过率定,最终确定京杭大运河、德胜河、澡港河糙率为 0.020,古运河、关河糙率为 0.025,其他河道糙率为 0.030~0.035。

表 2 率定结果分析
Tab. 2 Calibration result analysis

率定场次	日期	验证点	最大水位误差/m	NSE	R^2
1	2017 年 5 月 9 日	常州(三)	0.028	0.713	0.814
		樊家桥	0.047	-0.403	0.428
		盘龙苑	0.015	0.797	0.808
2	2017 年 5 月 13 日	常州(三)	0.043	-1.284	0.422
		樊家桥	0.043	0.002	0.626
		盘龙苑	0.042	-6.652	0.852

2.4 模型验证

2.4.1 一维模型验证

利用 2017 年 5 月 14 日和 2017 年 5 月 15 日两场现场原型观测试验数据,选择常州(三)、樊家桥、盘龙苑 3 个站点实测水位进行常州市主城区一维模型验证。由表 3 可知,两次验证中选取的 3 个验证点位计算水位序列和实测水位序列最大绝对水位误差为

6.2 cm,计算水位曲线形状与实测水位序列匹配较好。因此,可以认为一维模型模拟精度符合规范要求。

表 3 验证结果分析
Tab. 3 Analysis of verification results

验证场次	日期	验证点	最大水位误差/m	NSE	R^2
1	2017 年 5 月 14 日	常州(三)	0.041	-0.110	0.682
		樊家桥	0.062	-1.613	0.753
		盘龙苑	0.059	-4.660	0.798
2	2017 年 5 月 15 日	常州(三)	0.043	-2.462	0.561
		樊家桥	0.018	0.154	0.704
		盘龙苑	0.039	-8.731	0.801

2.4.2 二维水动力学模型验证

采用 2015 年 6 月 25 日—6 月 29 日实况暴雨对常州市主城区二维水动力学模型进行验证。2015 年 6 月 25 日—6 月 29 日降雨过后,常州市主城区实际积水点主要集中在中吴大道、龙江路高架、龙城大道及大明路围成的区域,且积水点深度均在 30 cm 以上,其他区域亦有部分不同程度的积水点。利用构建的常州市主城区精细化的数学模型计算该场次实况暴雨的积水点分布情况,从对比结果(表 4)可以看出,城区 70% 的暴雨积水点与实际相符,而由于在计算中采用的管网资料部分缺失,与实际工情有出入,因此,计算结果中出现部分实际积水区未积水的情况,但总体结果符合实际,满足文献[22]中“城区 70% 的暴雨积水点的最高水位的误差应控制在 20 cm 以下”的验证要求,由此说明本文构建的二维水动力模型也是合理准确的。

3 常州市主城区暴雨内涝风险预测

3.1 计算工况与边界设置

采用率定后的数学模型进行常州市主城区暴雨内涝计算与分析,计算方案共设置 3 组,分别为主城区遭遇 50 a、100 a、200 a 一遇设计暴雨时的淹没方案。方案计算时,分别采用区域 50 a、100 a、200 a 一遇设计洪水与城区 50 a、100 a、200 a 一遇 24 h 设计暴雨组合,城区不同重现期最大 24 h 设计暴雨对应面雨量分别为 198.1、216.9、235.6 mm,通过历年资料分析,选用 1991 年 7 月 1 日 6 时至 2 日 6 时的实况降雨过程为典型过程,采用 20 a 一遇最大 1、6、24 h 同频率控制获得暴雨过程。京杭大运河段上游采用大运河西枢纽对应频率设计水位过程(最高 5.56 m),下游采用洛社对应频率设计水位过程(最高 5.11 m),大包围北侧采用澡港河南枢纽外部设计水位(最高 5.01 m)控制,内部河道初始水位按照《常州市水利工程调度方案(试行)》(2010 年)执行,大包围按照现状防汛调度,计算时段 3 d。

表 4 计算积水分布与实际积水分布对比

Tab. 4 Comparison of calculated and actual water distribution

行政区划	所处位置	积水类型	与实际积水区相符性	积水深度/cm(模型计算)
薛家镇	河海西路段	其他积水点	是	15~30
新桥镇	江汉西路以南	其他积水区	是	25~40
龙虎塘街道	常州航空齿轮有限公司	其他积水区	否	0
	浦江路段	其他积水区	否	0
河海街道	富都小区	其他积水区	否	0
三井街道	华山中路	其他积水区	是	15~30
新闻街道	常州市市政商品混凝土分公司	漫堤积水区	是	0~15
	新冶路段	其他积水区	否	0
	飞龙西路段	其他积水区	是	10~35
	想园	排涝能力不足积水区	否	0
北港街道	茶花路段	其他积水区	否	0
五星街道	建行党校常州分校	其他积水区	是	10~30
	星园路以南	排涝能力不足积水区	是	20~35
	新岗路段	其他积水区	是	10~30
	常州恒成称重设备公司	其他积水点	是	10~25
荷花池街道	芦墅公园	其他积水区	是	>20
南大街街道	方家坝	其他积水区	是	5~40
永红街道	宣塘路段	漫堤积水区	是	>30
	荆川路段	其他积水区	是	0~15
	学花路段	排涝能力不足积水区	是	10~25
	广成路段	排涝能力不足积水区	是	>30
	会馆滨公寓	排涝能力不足积水区	否	0
西林街道	宣陈路以东	漫堤积水区	是	>30
	大冯家村	漫堤积水点	否	0
	常州美康纸塑制品公司	漫堤积水点	否	0
红梅街道	章家村	其他积水区	是	0~15
	红梅科技园	其他积水点	是	0~15
青龙街道	三丰路	排涝能力不足积水区	是	10~35
	青龙苑	排涝能力不足积水区	是	10~20
	桐家工业园	排涝能力不足积水区	否	0
	高阳路	排涝能力不足积水区	是	0~10
	常州市市政建设工程有限公司	排涝能力不足积水区	是	0~20
	常州三毛纺织染整有限公司	其他积水区	是	10~30
	三里南路	其他积水区	是	10~30
新城香溢俊园	其他积水区	是	10~30	
天宁街道	天宁竞园	其他积水片	是	>30
	怡康社区	其他积水片	是	10~60
	博爱花苑	其他积水点	是	10~30
	焦家村	其他积水点	是	30~60
兰宁街道	陶家村	其他积水点	是	>30
	红庙头	其他积水点	是	>30
	张家村	其他积水点	是	>30
	恽家村	其他积水点	否	0
茶山街道	徐瑶诊所	其他积水区	是	>20
	银河湾明苑	其他积水点	否	0
	富强新村	漫堤积水点	是	10~15
雕庄街道	采菱公寓	其他积水区	是	>30
	劳动东路段	漫堤积水区	是	>30
丁堰街道	丁庄村	漫堤积水区	是	>30
	小王村	排涝能力不足积水区	是	>30
湖塘镇	夏凉路段	漫堤积水区	是	>30
牛塘镇	绿园爱舍南区	漫堤积水点	是	>50

3.2 计算结果与分析

常州市主城区遭遇 50 a、100 a、200 a 一遇最大 24 h 设计暴雨洪水要素统计见表 5,可以看出,遭遇不同重现期设计暴雨时,主城区淹没区域集中在薛家镇、新桥镇、三井街道、新闸街道、西林街道、雕庄街道、丁堰街道、青龙街道、红梅街道等地,50 a、100 a、

200 a 一遇最大 24 h 设计暴雨内涝风险面积分别为 29.04、31.48、34.70 km²,大部分区域积水水深均在 0.05~0.30 m,占比分别为 72.66%、71.06%和 69.14%。3 种不同频率设计暴雨的淹没范围情况对比发现,区域日最高降雨量在积水过程中起主导作用,表现为暴雨内涝积水范围大、淹没水深较小的特点。

表 5 暴雨内涝风险要素统计
Tab.5 Statistical table of results of storm flood risk simulation

设计暴雨方案	内涝风险面积/km ²	各水深等级内涝风险面积/km ²					水深 0.05~<0.30 m 等级内涝风险面积占比/%
		0.05~<0.30 m	≥0.30~<0.50 m	≥0.50~<1.00 m	≥1.00~<2.00 m	≥2.00 m	
50 a 一遇	29.04	21.10	4.45	2.72	0.61	0.16	72.66
100 a 一遇	31.48	22.37	5.01	3.16	0.76	0.18	71.06
200 a 一遇	34.70	23.99	5.72	3.96	0.84	0.19	69.14

为分析积水成因,选取大包围内典型河道断面常州(三堡街)及典型积水点常州市青龙街道北部积水点水位变化过程,见图 4。由图 4 可知,水位达到大包围启用水位 4.30 m,大包围沿线澡港河南枢纽、老澡港河枢纽、永汇河枢纽、北塘河枢纽、横塘河北枢纽、大运河东枢纽、采菱港枢纽、串新河枢纽、南运河枢纽、大运河西枢纽等开启:降雨初期,由于降

雨量较小,大包围外排能力强,常州(三堡街)水位略微有所下降;随着降雨量的增大,大包围外排能力有限,水位迅速上升,200 a 一遇最大 24 h 的计算工况下最高水位达到 5.28 m;降雨停止后,大包围水位逐渐下降。由此可见,城区大包围外排能力与是否产生内涝积水有直接的关系。

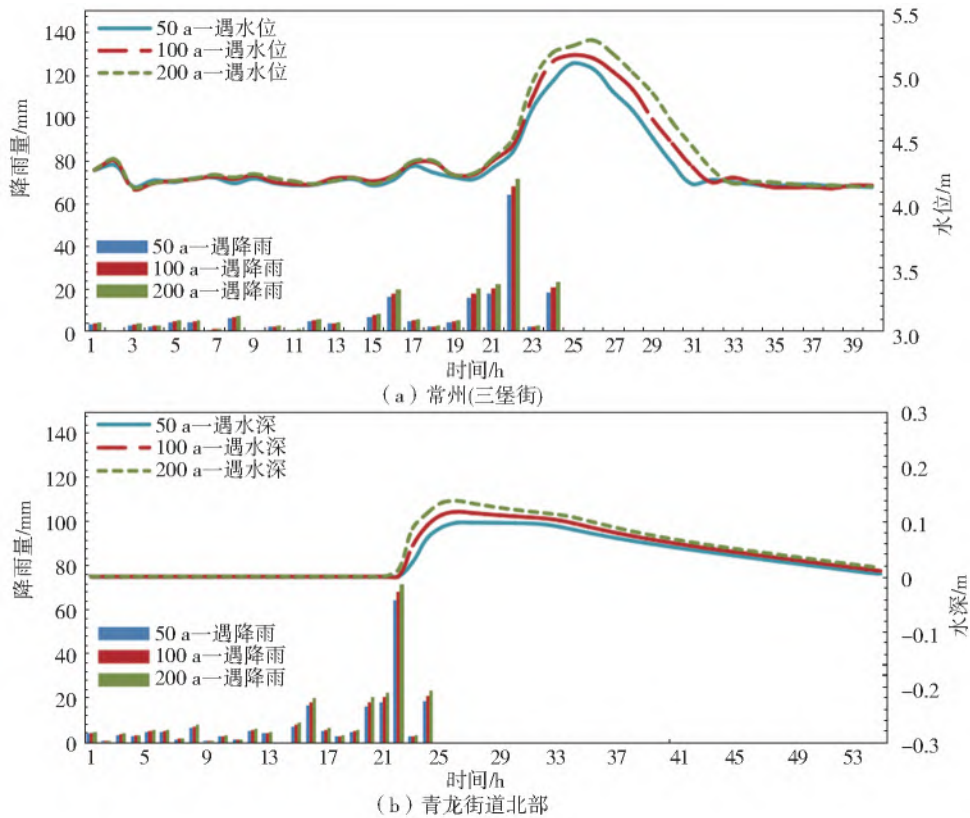


图 4 积水点水位变化过程

Fig. 4 Water level change process of stagnant water point

水利标准 50 a、100 a、200 a 一遇最大 24 h 设计暴雨条件计算的管道超负荷状态见表 6。由表 6 可知,在遭遇 3 种频率设计暴雨条件时,常州市主城区

的管道绝大部分均处于超负荷状态,其中,由于下游管道顶托而超负荷的管道占比分别为 65.99%、65.65%和 65.39%,由于管道本身过流能力限制而

超负荷的管道占比为 33.09%、33.46%和 33.74%。总的来说,常州市主城区在遭遇 50 a、100 a、200 a 一遇洪水最大 24 h 设计暴雨条件时,管网超负荷状

态均十分严重,且随着洪水量级的增加,管道超负荷状态增加,短历时强降雨是导致管网超负荷的主要原因。

表 6 遭遇不同频率设计暴雨管道超负荷状态统计
Tab.6 Statistics of pipeline overload status in different frequency design rainstorms

暴雨类型	S<1		S=1		S=2	
	长度/km	比例/%	长度/km	比例/%	长度/km	比例/%
50 a 一遇最大 24 h	4.38	0.92	313.60	65.99	157.26	33.09
100 a 一遇最大 24 h	4.23	0.89	311.99	65.65	159.02	33.46
200 a 一遇最大 24 h	4.13	0.87	310.75	65.39	160.36	33.74

4 结 论

本文构建了常州市主城区河网-管网一、二维水动力精细化模型,采用 2015 年、2017 年多场次实况洪水对该数学模型进行了率定和验证,并计算了主城区在遭遇 50 a、100 a、200 a 一遇最大 24 h 设计洪水情况时的洪水淹没情况,分析了内涝积水成因和管道运行负荷状况,结果如下。

(1)构建的常州市主城区河网-管网一体化数学模型模拟的河道水位变化过程和实测水位序列匹配较好,计算水位和实测水位最大绝对误差均小于 7 cm,且内涝积水模拟结果中 70%的积水点与实际相符,模型计算精度符合规范要求,能较好地模拟洪水演进及淹没情况。

(2)常州市主城区在遭遇 50 a、100 a、200 a 一遇最大 24 h 设计暴雨工况时,内涝风险面积分别为 29.04、31.48、34.70 km²,积水水深主要分布在 0.05~0.30 m,占总内涝风险面积的 70%左右,区域日最高降雨量在积水过程中起主导作用,表现为暴雨内涝积水范围大、淹没水深较小的特点。

(3)常州市主城区在遭遇 50 a、100 a、200 a 一遇最大 24 h 设计暴雨条件时,主城区管道绝大部分处于超负荷状态,其中,由于下游管道顶托而超负荷的管道占比分别为 65.99%、65.65%、65.39%,由于管道本身过流能力限制而超负荷的管道占比为 33.09%、33.46%、33.74%,短历时强降雨是导致管网超负荷的主要原因。

平原河网地区地势平坦、河湖众多,水网密布,城市下垫面变化快,水利工程众多,水动力模拟受外围水文形势影响大,但城区水系往往不封闭,模型计算边界条件难以设置,增加了模拟难度,建议今后加强流域模型的构建,以流域为单元构建河网大模型,城区内构建河网与管网耦合模型,形成流域-区域嵌套的模型,流域模型可为城区模型提供计算边界,提高模拟精度。

参考文献(References):

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG J Y,WANG Y T,HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2016. 04. 001.
- [2] 薛丰昌,戈晓峰,田娟,等. 城市暴雨积涝数值模拟技术方法[J]. 气象科技,2019,47(6):1021-1025. (XUE F C, GE X F, TIAN J, et al. A numerical simulation technique of urban rainstorm waterlogging[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(6): 1021-1025. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:QXKJ. 0. 2019-06-018.
- [3] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响[M]. 北京:科学出版社,2012. (XU Y P. The influence of urbanization in the Yangtze River Delta on the river system and hydrological process[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [4] 杨柳,范子武,谢忱,等. 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征研究[J]. 水利水运工程学报,2018(2):10-18. (LIU Y, FAN Z W, XIE C, et al. Study on the evolvement law of urban flood disasters in China under the background of urbanization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 10-18. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SLSY. 0. 2018-02-002.
- [5] CHOW M F, YUSOP Z, TORIMAN M E. Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using storm water management model[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2012, 9(4), 737-748. DOI: 10. 1007/s13762-012-0092-0.
- [6] CHOKSHI M. The Tale of Two solutions-1D vs. 2D solution for combined sewer system modeling[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2013, (1):738-742. DOI: 10. 2175/193864713813504098.
- [7] CHOI Y S, KIM J H, CHOI C K, et al. Development

- and evaluation of a 2-dimensional land surface flood analysis model using uniform square grid[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2019, 52(5): 361-372. DOI:10. 2175/193864713813504098.
- [8] LEE C H, HAN K Y. Integration model for urban flood inundation linked with underground space flood analysis model[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2007, 40(4): 313-324. DOI: 10. 3741/JK-WRA. 2007. 40. 4. 313.
- [9] 李智,刘玉菲,任星芮男,等. 基于 SWMM 的城市洪涝风险管理研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 35-42. (LI Z, LIU Y F, REN X R N, et al. Research on urban flood risk management based on SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11): 35-42. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SJWJ. 0. 2019-11-005.
- [10] 曹梦然,叶亚平,张其成,等. 基于 SWMM 模型的南京秦淮区暴雨内涝风险分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(11): 110-114. (CAO M R, YE Y P, ZHANG Q C, et al. A risk analysis of rainstorm waterlogging in Qinhuai district of Nanjing based on SWMM model [J]. 2019(11): 110-114. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZNSD. 0. 2019-11-023.
- [11] 王嘉仪,赵连军,张华,等. 基于 SWMM 模型的城市排水管道优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(4): 41-44. (WANG J Y, ZHAO L J, ZHANG H, et al. Research on optimization of urban drainage pipelines' carrying capacity based on SWMM model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(4): 41-44. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;ZNSD. 0. 2017-04-012.
- [12] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (GENG Y F. Study on hydrodynamic coupling model of urban rain flood[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)) DOI:10. 7666/d. y965504.
- [13] 杨甜甜,梁国华,何斌,等. 基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 72-78. (YANG T T, LIANG G H, HE B, et al. Study and application on flood forecasting model based on coupling hydrological-hydrodynamic [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 72-78. (in Chinese)) DOI:10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 01. 013.
- [14] 周浩澜,陈洋波. 城市化地面二维浅水模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 407-412. (ZHOU H L, CHEN Y B. 2D shallow-water simulation for urbanized areas[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 407-412. (in Chinese)) DOI:CNKI;32-1309/P. 20110514. 1449. 016.
- [15] 乌景秀,范子武,杨帆,等. 防洪排涝排水一体化模型在洪水风险图编制中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 1-9. (WU J X, FAN Z W, YANG F, et al. Flood control and drainage integration model applied to flood risk mapping[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10. 16198/j. cnki. 1009-640X. 2018. 06. 001.
- [16] 陈靖,张容焱,解以扬,等. 基于城市暴雨内涝数学模型的福州市内涝灾害风险评估[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 89-95. (CHEN J, ZHANG R Y, XIE Y Y, et al. 2020. Risk assessment of rainstorm waterlogging disaster based on urban rainstorm waterlogging mathematical model in Fuzhou City[J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(1): 89-95. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HBQX. 0. 2020-01-011.
- [17] 邓金运,刘聪聪. 不同土地利用类型下城市内涝风险及损失评估[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2293-2299. (DENG J Y, LIU C C. Assessment of the disaster risk and the loss brought about by the urban waterlogging under different land use modes[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(6): 2293-2299. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; AQHJ. 0. 2018-06-045.
- [18] 余富强,鱼京善,蒋卫威,等. 基于水文水动力耦合模型的洪水淹没模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 37-43. (YU F Q, YU J S, JIANG W W, et al. Flood inundation simulation based on coupled hydrologic-hydrodynamic model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 37-43. (in Chinese)) DOI:10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0107.
- [19] 杨帆,周钰林,范子武,等. 苏南运河沿线精细化水文-水动力模型构建及验证[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 16-24. (YANG F, ZHOU Y L, FAN Z W, et al. Building and verification of refined hydrology-hydrodynamic model for South Jiangsu Canal and its river networks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 16-24. (in Chinese)) DOI:10. 12170/20190501001.
- [20] 柳杨,范子武,刘国庆,等. 基于 Infoworks RS 的新沭河溃堤洪水风险分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 47-51. (LIU Y, FAN Z W, LIU G Q, et al. Risk analysis of levee - breach flood for Xinshu River based on InfoWorks RS[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(8): 47-51. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY. 0. 2018-08-012.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范(2014年版);GB 50014—2006[S]. 北京:中国计划出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of outdoor wastewater engineering (2014

edition):GB 50014-2006[S], Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese))

[22] 中华人民共和国水利部. 洪水风险图编制导则: SL 483—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Flood risk mapping guidelines: SL 483-2017[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2017. (in Chinese))

Analysis on the risk of rainstorm waterlogging in urban area of Changzhou City

CHEN Aiping¹, LIU Yang², LIU Guoqing², HONG Xin³, FAN Ziwu², YANG Yang², YANG Fan²

(1. *Changzhou Flood Control and Drought Control Command Center, Changzhou 213022, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 3. *Changzhou River and Lake Management Office, Changzhou 213022, China*)

Abstract: Flood disasters are one of the most serious natural disasters in our country. More than two-thirds of cities across the country have experienced rainstorms and floods of varying degrees. In recent years, with the rapid development of urbanization, a series of problems such as drastic changes in the underlying surface, changes in the law of runoff generation and confluence in river basins, and obsolescence of urban drainage facilities have greatly increased the exposure to flood risk. On average, more than 200 cities have flooded every year, and the phenomenon of "city watching the sea" is getting worse.

The mathematical model is the main method to calculate and analyze urban rainstorm waterlogging. The main urban area of Changzhou City is taken as the research object to analyze its rainstorm waterlogging risk. Using InfoWorks ICM, according to the topography, river system, underground pipeline, water conservancy project, and engineering scheduling rules of the main urban area of Changzhou City, the hydrological and hydrodynamic, one-dimensional and two-dimensional, river network and pipe network coupling models of the main urban area of Changzhou City are constructed. The scope of the model covers 179.2 km² of the main urban area of Changzhou City.

To ensure the refinement level and simulation accuracy of the model, the river sections in the constructed model are all measured sections, including 113 river channels and 1 154 sections. The pipeline network model covers the entire compilation range of the main urban area of Changzhou City. During the construction of the two-dimensional model, the road elevation was intensively measured, and the distance between points was controlled to be about 100 m to 300 m according to the changes in elevation. A high-precision DEM data was collected to build a ground model. The hydrological model was used to calculate the confluence process. The calculation results of river water level may also affect the pipe network and ground model. The pipe network, river network, and submerged area may exchange water according to the above process, nesting each other and real-time mutual feed, to realize the one and two-dimensional coupling of the river network and pipe network.

The mathematical model was calibrated and verified with the 2017 field prototype observation data, and the 2015 flood simulation situation was compared with the actual submerged area and submerged water depth. The verification results show that the maximum absolute error of the calculated water level and the measured water level are both less than 7 cm, and the shape of the calculated water level curve matches well with the measured water level sequence. Using the calibrated and verified one and two dimensional coupled model of the refined river network and pipe network in the main urban area of Changzhou City to simulate and analyze the flood inundation and pipeline operation load under the maximum 24 h design rainstorm conditions in 50 years, 100 years, and 200 years. The results show that: The inundation area is 29.04 km², 31.48 km², and 34.70 km², respectively, under the maximum design rainstorm of 24 h. The submerged water depth is mainly distributed in the range of 0.05 to 0.30 m, accounting for about 70% of the total submerged area. The daily maximum rainfall in the region plays a leading role in the process of water accumulation, which is characterized by a large area of waterlogging in torrential rain and a small submerged water depth. Most of the pipelines in the main urban area are overloaded. Among them, the percentages of overloaded pipelines due to the jacking of downstream pipelines were 65.99%, 65.65%, and 65.39%, respectively, and the proportions of overloaded pipelines due to the limitation of the flow capacity of the pipeline itself accounted for 33.09%, 33.46%, and 33.74%. Short-duration heavy rainfall is the main cause of overloading of the pipeline network. The research results provide a basis for predicting the risk of rainstorm waterlogging in Changzhou City, guiding the decision-making of flood control and drainage, and also provide a reference for the urban development and construction of Changzhou City.

Key words: main urban area in Changzhou City; mathematical model of river network-pipe network coupling; rainstorm; flood risk analysis