

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.025

基于复杂高密度管网结构优化技术的银川城区排水过程高效模拟方法

栾广学¹, 侯精明¹, 王添¹, 李欣怡¹, 郭敏鹏¹, 李东来¹, 樊超², 沈健²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100044)

摘要:为高效高精度模拟大尺度城区的排水过程,掌握城市地表径流机制和管网排水规律,以银川市约310 km²的城区为研究区域,应用耦合地表径流及城市地下管网排水过程的GAST模型,结合当地污水处理厂、管网、地形和土地利用等特征,基于普适性的数字地形高程DEM数据处理、土地利用类型划分、合流制排水管网和污水处理厂概化等技术,提出了一种基于复杂高密度管网结构优化技术的城区排水过程高效模拟方法。采用理想地形和实际地形对该方法模拟的精度和效率进行了验证,结果表明:对一级支管做删除概化处理对实际的管网排水过程模拟结果影响较小,20.46 km²区域内一二维耦合节点数可削减27.8%,模型计算效率提高12.18%,且研究区域越大,计算效率提升越明显;模拟结果与实测值误差在6%以内,在保证模拟精度的同时大幅提高了计算效率。

关键词:城区排水;管网结构优化;一二维耦合模型;银川市

中国分类号:TU992.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0205-08

Efficient simulation method of Yinchuan urban drainage process based on structure optimization technology of complex high-density pipe network//LUAN Guangxue¹, HOU Jingming¹, WANG Tian¹, LI Xinyi¹, GUO Minpeng¹, LI Donglai¹, FAN Chao², SHEN Jian² (1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. CAUPD Beijing Planning and Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: To simulate large scale urban drainage process with high-efficiency and high-precision, and master the mechanism of urban surface runoff and pipe drainage pattern, taking the 310 km² urban area in Yinchuan as the studied area, a GAST model with coupled surface runoff and urban underground pipe network drainage process, combined with characteristics of local wastewater treatment plants, pipe networks, topography, land use, etc., is applied to raise an efficient simulation method for rapid modeling of urban drainage processes based on complex high-density pipe network structure optimization technology, which is based on technologies including universal DEM data processing, land use type classification, combined drainage network and wastewater treatment plant generalization, etc. The accuracy and efficiency of this modeling method is verified with both ideal terrain and actual terrain. The results show that: applying deletion treatment on the primary branch pipe has insignificant influence on the simulation results of the actual pipe network drainage process. In the 20.46 km² area, the number of 1D-2D coupling nodes is reduced by 27.8%, and the calculation efficiency of the model can be improved by 12.18%. The larger the study area is, the more significant improvement in calculation efficiency there would be. The errors between simulation results and measured values are smaller than 6%, which indicates that the proposed method can greatly improve the calculation efficiency while the simulation accuracy ensured.

Key words: urban drainage; structure optimization of pipe network; 1D-2D coupling model; Yinchuan City

近年来全球极端暴雨频发^[1-4],随着城镇化快速发展,我国城市硬化路面比例不断上升,地表径流

量增加^[5-6],导致城区道路雨天积水严重,对人民的生命财产安全造成严重威胁^[7-8]。不同区域下垫面

基金项目:中德合作交流项目(M-0427);国家自然科学基金(52009104,52079106)

作者简介:栾广学(1996—),男,博士研究生,主要从事内涝及水质模拟与预测研究。E-mail:963330152@qq.com

通信作者:侯精明(1982—),男,教授,博士,主要从事水文-水动力模型研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

条件和防洪排涝标准不同,内涝成因及受灾情况也不尽相同,为加强城市内涝治理,对暴雨洪水进行高效高精度模拟与预警预报至关重要^[9-12]。目前对城市雨洪过程模拟方法的研究主要针对一维暴雨管理模型 SWMM(storm water management model)或小区域二维城区雨洪模型,如栾清华等^[9]基于 SWMM 研究了复杂下垫面城区数字精细化关键技术,扩展了 SWMM 在未来更大尺度复杂下垫面区域的应用空间。国内外学者对城市排水过程的研究尺度基本在 50 km² 以下^[13-14],多为公园、建筑小区、校园等单一类型,已有较为成熟的雨洪模拟技术和方法^[9]。对于具有成熟管网排水系统和多样化土地利用的较大尺度现代化高密度城区,地形、建筑分布、管网路网布置和土地利用类型等下垫面信息的获取和处理较为困难和复杂^[15],对模拟速度和精度的影响较大^[16],使得大尺度城区排水过程高效模拟方面的研究较少。因此,提出一种充分考虑管网结构复杂性、合流制基础污水量、污水处理厂对上游的顶托、土地利用类型划分、房屋和路网的空间异质性等的高效模拟方法对大尺度城区排水机制和内涝积水过程高效高精度模拟至关重要。

本文以银川市约 310 km² 的城区为研究区域,基于耦合地表径流及城市地下管网排水过程的 GAST (GPU accelerated surface water flow and associated transport)模型探讨了以合流制排水管网为主的大尺度城区雨洪模型构建方法和关键技术,提出了一种基于复杂高密度管网结构优化技术的城区排水过程高效模拟方法,并对其实用性和有效性进行了验证。

1 研究区概况

银川是西北地区重要的中心城市,城区总面积约 310 km²,土地利用率达 80.2%。银川地处温带大陆性气候区域,四季分明,春迟夏短,秋早冬长,昼夜温差大,雨雪稀少,蒸发强烈,气候干燥,风大沙多,年平均气温为 8.5℃,年平均日照时数为 2800 ~ 3000 h,是中国太阳辐射和日照时数最多的地区之一,多年平均降水量约 250 mm,无霜期 185 d 左右。地表水水源充足,水质良好,沟渠成网,湖泊湿地众多。银川市城区根据污水处理厂服务范围划分为七大排水系统。银川市排水系统属于合流制,绝大部分地区都按雨污合流制建设,雨季城区排水能力有限。2021 年 3 月 31 日,2 h 累计降水量为 30.2 mm,对城区现场勘测发现,第三污水处理厂区域无污水提升泵站,所有污水管网均为重力流,下雨时污水处理厂达到满负荷运行后,高水位顶托导致进水受阻,而进水管网无法存蓄超量的雨污合流水,合流水从管

道冒溢至路面,同时地表水无法及时排入管道并在地表发生汇集,在路面形成积水。由于金波南街和济民路交叉口向南 200 m 范围内为污水处理厂进水管网末端和区域地势最低点,合流水最先从此处冒溢,形成大面积积水,路面积水面积约 2 万 m²,平均深度达 25 cm,车辆难以通行。其中上海路与北塔巷口积水面积约 1.6 万 m²,平均积水深度为 34 cm。根据当地芝加哥雨型参数计算得到 2021 年 3 月 31 日 2 h 降雨曲线过程如图 1 所示,积水点位置如图 2 所示。

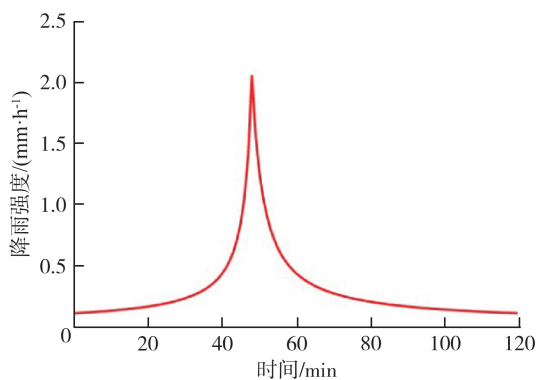


图1 2021年3月31日2h降雨曲线

Fig.1 2 h rainfall curve on March 31, 2021

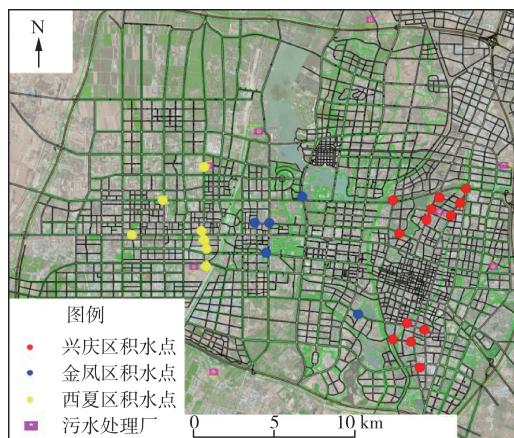


图2 积水点位置

Fig.2 Location of water accumulation spots

2 数值模型

2.1 一二维耦合模型及数值方法

本文主要采用 GAST 模型的地表水文水动力模块及管网水动力模块模拟城市雨洪过程^[17]。地表水文水动力模块基于 Godunov 格式的有限体积法对二维浅水方程进行空间离散,利用 HLLC (Harten-Lax-van Leer contact wave) 近似黎曼求解器进行通量计算^[18-19],底坡源项使用 Hou 等^[20]提出的底坡通量法处理,采用二阶 TVD-MUSCL 格式提高模型求解精度^[21-22],采用两步 Runge-Kutta 法进行时间步长的更新来保证时间积分的二阶精度^[17]。同时 GAST 模型引入 GPU 加速技术,以达到高速运算的

目的^[23]。

管网水动力模块是对 SWMM 源代码进行二次开发得到的^[24-26],选用能够模拟复杂水流状况的动力波法对管网水动力过程进行模拟计算。将雨水节点参数信息和水深等的获取和修改函数写入 SWMM 源代码中,编写生成可被地表二维水动力计算模型实时调用的 DLL 动态链接库,并将 DLL 动态链接库的调用函数嵌入到地表二维水动力模型中^[21],再通过循环使雨水节点与地表二维网格之间形成一一对应关系,通过将地表二维水动力模型的计算时间步长传递至管网计算模块来控制管网计算时间步长,以保证两者时间推进的同步性。在雨水节点处,通过对堰流公式、孔流公式及地表二维浅水方程等的转换使用,实现对地表与排水管网系统的水量交换模拟,完成地表水流入管网及管网水满后倒溢向地表的过程计算,由雨水节点信息的实时交互实现地表水文水动力模块与管网水动力模块的动态耦合^[27-31]。对于雨水节点处的水量交换存在图 3 所示的 3 种情况,针对不同情况,其水量交换所采用的公式也不同。

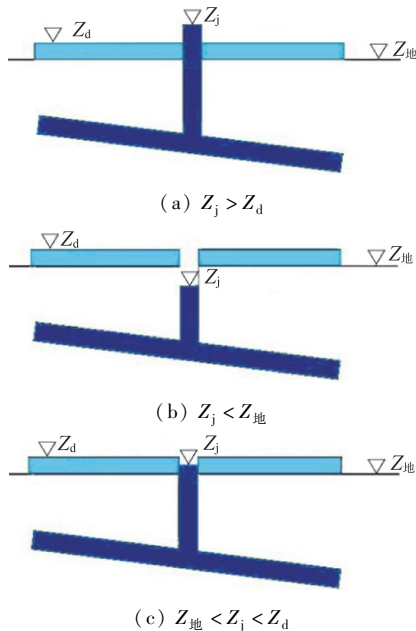


图 3 雨水节点处水量交换情况

Fig.3 Water exchange at rainwater nodes

a. 当所获取的雨水节点内水位 Z_j 高于地面水位 Z_d 时,形成节点溢流,即雨水井内的水溢流到地表,此时采用孔流公式计算节点溢流到地表的水量:

$$Q_{jd} = C_0 A_{mh} \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

式中: Q_{jd} 为雨水节点溢出的水量; C_0 为孔口系数,圆角孔取 0.8,方角孔取 0.6; A_{mh} 为雨水节点的进水孔口面积; h_1 为雨水节点水位与地面水位的差值,即 $h_1 = Z_j - Z_d$ 。

b. 当所获取的雨水节点内水位低于地面高程

$Z_{地}$ 时,形成地表回流,即地表雨水流入雨水井内,此时仍采用孔流公式计算地表回流到雨水节点的水量:

$$Q_{dj} = C_0 A_{mh} \sqrt{2gh_2} \quad (2)$$

式中: Q_{dj} 为地表回流到雨水节点的水量; h_2 为地面水位与雨水节点水位的差值,即 $h_2 = Z_d - Z_j$ 。

c. 当所获取的雨水节点内水位低于地面水位但高于地面高程时,形成地表回流,即地表雨水流入雨水井内,此时采用堰流公式计算地表回流到雨水节点的水量:

$$Q_{dj} = C_1 w h_2 \sqrt{2gh_2} \quad (3)$$

式中: C_1 为堰流系数; w 为溢流节点的等效堰宽。

在发生水量交换之后,对于地表回流进入雨水节点水量视作管道计算模块的节点入流量,地表二维网格需减去这部分水量,并对相应网格水深进行更新;对于溢流到地表的水量,则从管网计算中扣除,地表二维网格需加上此水量,并对相应网格的水深进行更新。模型计算过程如图 4 所示(图中 T 为当前模拟时长, T_{out} 为设定模拟总时长)。

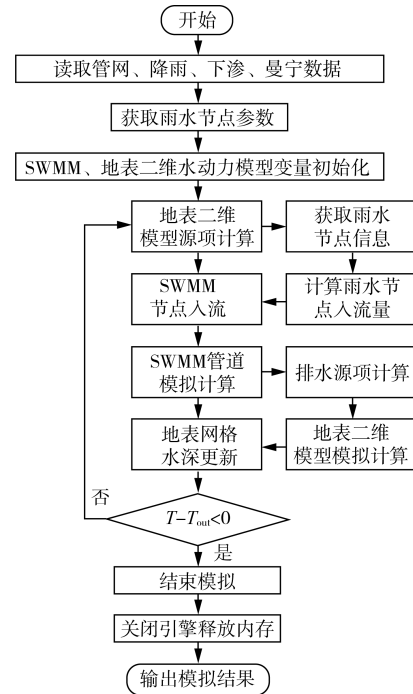


图 4 一二维耦合模型计算流程

Fig.4 Flowchart for 1D-2D coupling model calculation process

2.2 地表特征信息提取

a. DEM 数据提取。在城市内涝模拟中,DEM 数据处理起到平衡模拟精度和效率的关键作用。基于研究区地形变化程度和计算区域重要性进行网格划分,一般城市房屋密集且路网和管网等布局错综复杂,可获取的大尺度城市 DEM 数据无法真实体现道路与房屋情况,严重影响雨水产汇流计算,无法精确模拟城市内涝时空变化规律。为真实模拟道路与

房屋对地表水产汇流的影响,采用 GIS 技术将道路和房屋做局部处理以保证模型模拟得到贴合实际的地表产汇流过程。由于研究区面积较大(约 310 km²),为提高计算效率,将 DEM 数据转换为 10 m 精度,共 516.056 万个均匀结构网格,并提高房屋高程,道路高程降低 0.3 m。处理后 DEM 数据如图 5 所示。

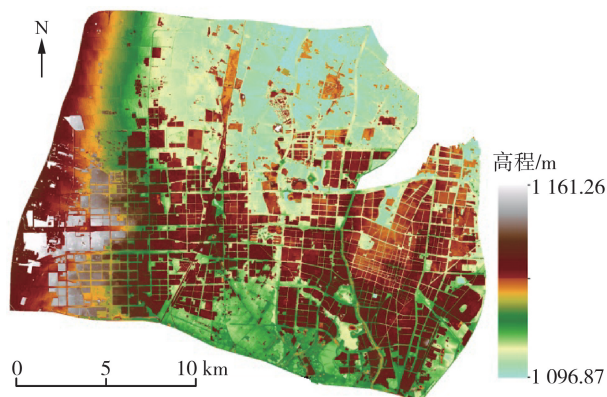


图 5 处理后的研究区 DEM 数据

Fig. 5 DEM data in the studied area after processing

b. 土地利用类型细化。土地利用类型作为本底特征的一部分,与地表曼宁系数和稳渗率密切相关。根据银川市人民政府发布的《银川市城市中心城区用地规划图》划分土地利用类型,采用 GIS 技术将研究区域划分为未开发区、工业用地、居民用地、林地、道路、公园绿地、水田、水系和裸土地,如图 6 所示。

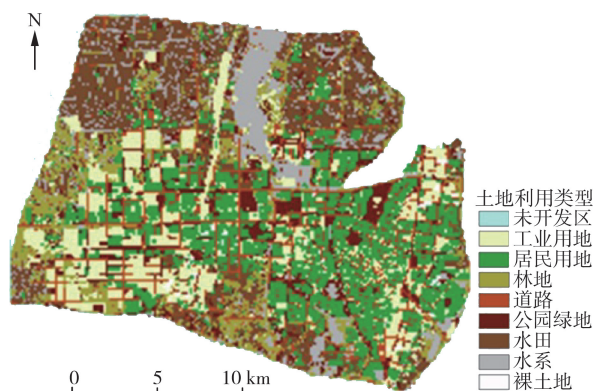


图 6 土地利用类型

Fig. 6 Land use types

c. 曼宁系数与稳渗率。现状用地的曼宁系数及稳渗率取值可参照城市排涝相关标准及文献确定,与土地利用类型对应。采用的参数如图 7 所示。

基于土壤性质,选取 Green-Ampt 下渗模型描述黄土的下渗过程。参考宁夏固原玫瑰苑片区、清水河片区、山城名邸片区相近土地利用类型的下渗值,并通过实测积水情况进行率定,得到研究区草地、林地、裸地稳定下渗率分别为 169.2 mm/h、114.6 mm/h 和 38.22 mm/h。

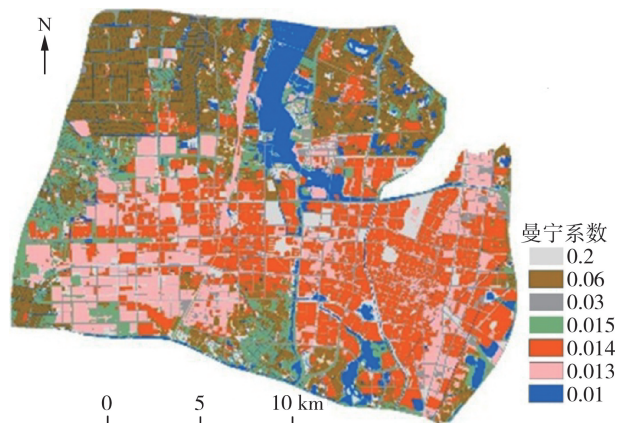


图 7 现状用地曼宁系数值

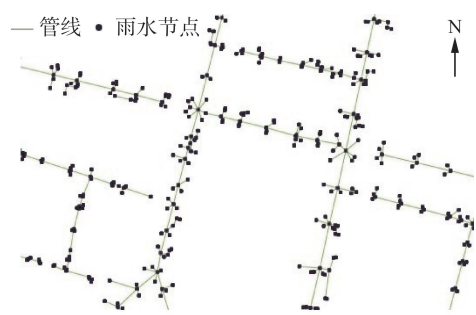
Fig. 7 Manning coefficient value of current land use

2.3 管网结构优化

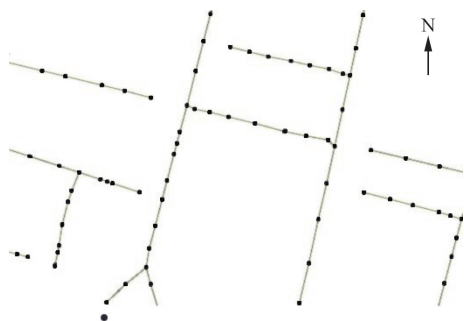
2.3.1 排水管网优化

排水管网数据为 shp 格式矢量数据,共 95 228 个排水管点和 96 795 根排水管线,以雨污合流为主。根据污水处理厂划分排水分区,各排水分区的污水雨水最终均进入对应的污水处理厂。由于大量管网数据的获取需要人工录入,数据出现错误不可避免,导致原始管网数据无法直接使用,需要对数据进一步加工、处理、校验及补充完善,排水管网数据分析及处理过程可见文献[32]。降雨径流进入雨水篦子通过连接支管进入地下主管网,其主要作用是将地表径流汇入地下排水管网并过滤径流中地表树叶、垃圾等,防止其进入管网发生堵塞。在模型模拟时,不考虑径流伴随物,且可以设置降雨径流直接通过管网检查井进入地下排水管网,故在管网结构优化时,可以将雨水篦子及其连接的支管删除。局部优化前后对比如图 8 所示,优化为 25 781 个节点和 23 557 个管道,节点数量减少了 72.93%,如图 9 所示。

采用耦合模型对研究区域进行模拟计算时,一二维耦合节点数量对模型的模拟效率有一定影响,采用理想算例验证模型在保证计算精度的同时,可通过减少一二维耦合节点数量来提升模型的计算效率。模型模拟时,删除一级支管会导致部分雨水由支管转为二维地表径流流向主管,会对实际排水过程产生影响。通过建立一个理想地形对其进行模拟分析,模拟时长为 2 h,理想地形 DEM 数据及管网数据如图 10 所示。地形长 200 m,宽 100 m,坡率设置为 5% 以保证雨水最终由排水口排出,网格精度为 10 m,下游边界为开边界,其余为闭边界,主管线管径设置为 1 m,支管线管径设置为 0.3 m,将节点 1 与排水口之间的管径设置为 0.1 m 以保证实际排水过程中下游水流对上游的顶托作用,降雨强度设置为



(a) 优化前



(b) 优化后

图 8 管网结构优化前后示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the pipe network structure before and after optimization

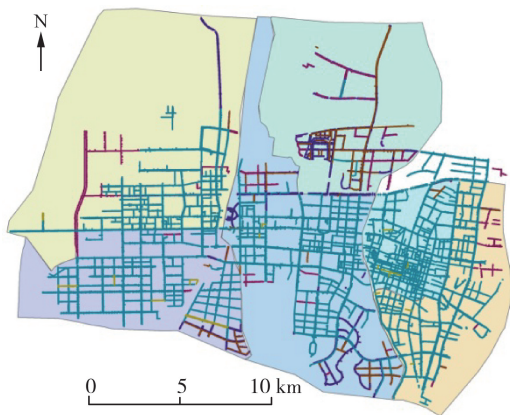


图 9 优化后研究区管网和节点示意图

Fig. 9 Pipe network and node diagram after optimization

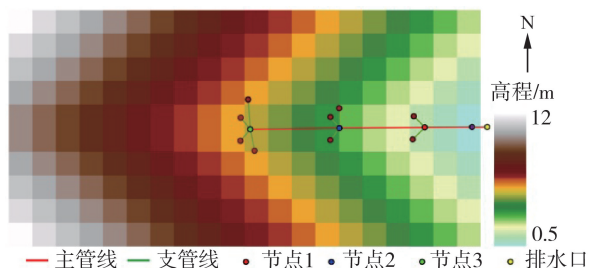


图 10 理想算例 DEM 及管网数据

Fig. 10 DEM and pipe network data of ideal calculation example

恒定 100 mm/h, 节点优化前有 13 个节点与地表进行耦合, 优化后仅保留主管线。

一级支管做删除处理前后节点 1、2、3 和雨水排水口的流量过程模拟结果对比如图 11 所示。可见, 节点 3 为主管线起始端, 节点流量存在误差, 因受到上游来水和下游管道水压, 节点 2 的流量误差缩小, 到达第 3 个主干道节点时, 流量误差基本消除, 下游排水口处流量基本一致。表明删除只有少量耦合节点数的一级支流管网对大流域的排水过程影响不大, 优化前后的模型运行时间分别为 5.715 s 和 5.506 s, 计算效率提升 3.36%, 这是由于模型节点数较少, 一二维耦合节点处水量交换的计算时间在整个系统的运行时间中占比较小, 故在小区域内减少耦合节点数量对模型的计算效率提升并不显著。

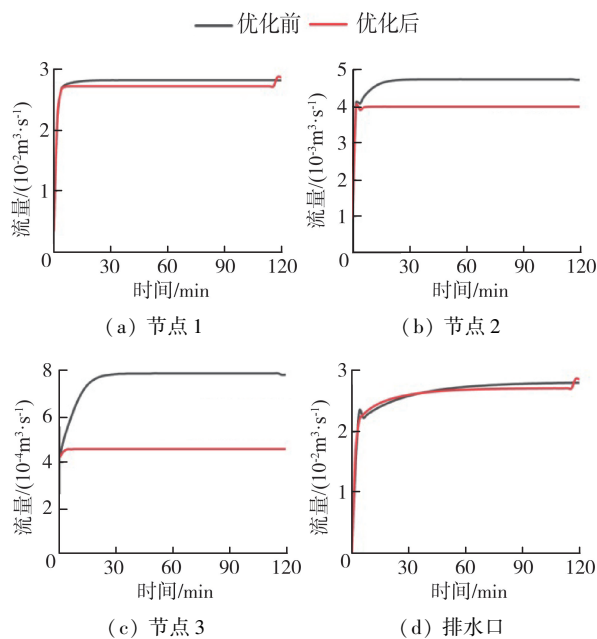


图 11 理想算例节点 1、2、3 和排水口处流量过程

Fig. 11 Flow process at nodes 1, 2, 3 and the outlet of ideal calculation example

由上述结果初步判定模拟区域越大, 耦合节点水量交换计算时间在整个系统运行时间中占比越大, 故选取银川市第一污水处理厂污水片区, 模拟验证耦合节点数的削减对计算效率的提升效果。模拟验证区域面积为 20.46 km², 雨水节点数由 7957 优化为 5745, 减少 27.8%。DEM 网格精度为 5 m, 共 1225867 个网格, 模拟时长为 4 h。模型运行时间分别为 2579.79 s 和 2265.5 s, 模拟速度提升 12.18%, 可见, 当耦合节点数量较多时, 减少一定比例的节点数量可大幅提升模型运行速度。由此推断, 本文构建的银川市城区雨洪模型对一级支管做删除处理对实际的产汇流及排水过程影响较小, 且可大幅提高模型计算效率。

2.3.2 污水处理厂概化与泵站设置

合流制管网系统水流最终汇流至对应污水处理

表 2 旱天管道污水量

Table 2 Pipeline effluent volume in dry days

污水处理厂	污水量/m ³	污水流量/(L·s ⁻¹)
第一污水处理厂	89 792.38	1 039.26
第二污水处理厂	63 038.89	729.62
第三污水处理厂	70 238.65	825.37
第四污水处理厂	65 554.54	758.73
第五污水处理厂	81 594.86	944.39
第六污水处理厂	69 584.46	783.21

3 模拟结果验证

模型计算采用开放边界,四周无入流,计算过程库朗数取值为 0.4。积水点模拟结果如图 14 所示,积水点模拟值与实测值对比如表 3 所示。

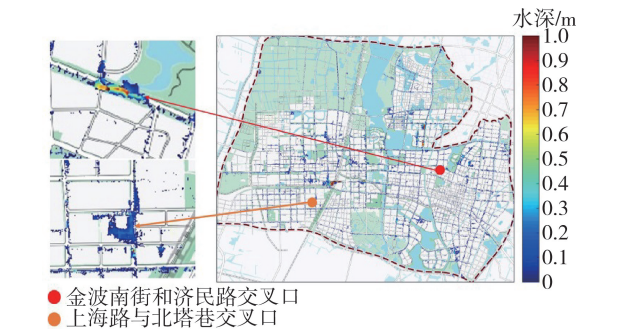


图 14 积水点模拟结果

Fig. 14 Simulation results of waterlogging points

表 3 模拟值与实测值对比

Table 3 Comparison between simulated and measured values

积水点	实测积水面积/m ²	模拟积水面积/m ²	积水面积绝对误差/m ²	积水面积相对误差/%
金波南街和济民路交叉口	20 000	19 300	700	3.50
上海路与北塔巷交叉口	16 000	15 800	200	1.25

积水点	实测积水深度/m	模拟积水深度/m	积水深度绝对误差/m	积水深度相对误差/%
金波南街和济民路交叉口	0.25	0.237	0.013	5.20
上海路与北塔巷交叉口	0.34	0.355	0.015	4.41

由图 14 和表 3 可知,模型模拟结果与实测结果吻合度较高。由于实际降雨不稳定及室外自然条件等因素的影响,模拟结果与实测结果略有偏差,但误差较小,相对误差均在 6% 以内,表明采用基于复杂高密度管网结构优化技术的城区排水过程高效模拟方法对大尺度城区雨洪模型进行建模,模拟结果的精度较高。

4 结 语

本文应用 GAST 模型,结合当地污水处理厂、管

厂。根据污水处理厂自身蓄水能力大小可将其概化为不同容量的调蓄池,将调蓄池的顶部高程做升高处理,升高部分断面面积设定为 1 m²,在保证污水处理厂自身蓄水容积的同时,体现了污水处理厂蓄满后对上游管道水流的顶托作用。

研究区域共有 6 个污水片区,对应 6 个污水处理厂,概化后的污水处理厂如图 12 所示。依据实际节点标号连接泵站,根据泵站实际数据设置泵站起止水位、抽水能力等属性,其中西门泵站设置界面与运动曲线如图 13 所示。

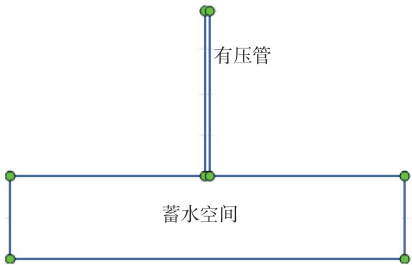
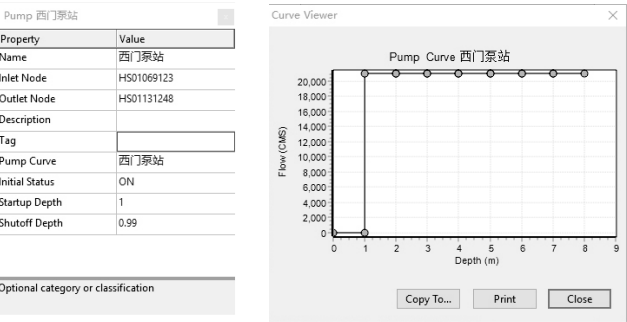


图 12 概化后的污水处理厂示意图

Fig. 12 Schematic diagram of a wastewater treatment plant after generalization



(a) 泵站属性

(b) 泵站运行曲线

图 13 SWMM 中泵站设置界面与运行曲线

Fig. 13 Setting interface and runing curve of a pump in SWMM

2.4 基础生活污水量的确定

在合流制排水系统中,居民生活污水流量在雨季管道中占有一定的比例,而不同子汇水分区的建筑密度和人口密度不同,因而产生的基础污水流量也不同。每个污水片区在旱季产生的污水量均汇流至污水处理厂,污水处理厂旱天的日进水量即为对应片区居民的日生活污水产生量。故将污水处理厂近几年的日均进水量作为该污水片区的基础污水总流量,根据子汇水分区内的建筑密度将基础污水总流量分配至污水片区各节点,以节点入流的方式加入模型中。

本文模型将各污水处理厂 2019—2020 年两年的日均进水量作为研究区的基础污水总流量,其中旱天各片区管道污水量如表 2 所示。

网、地形和土地利用等特征,提出了一种基于复杂高密度管网结构优化技术的城区排水过程高效模拟方法。该方法具有普适性的 DEM 数据处理、土地利用类型划分、合流制排水管网和污水处理厂概化的处理方法。在保证大尺度城区雨洪排水过程模拟精度的同时,充分优化管网结构,将银川城区 9 万多排水节点数概化为 25 781,大量削减了一二维耦合节点数量,大幅提高了模拟效率;20 km² 区域耦合节点数减少 27.8%,模型计算速度可提升 12.18%,且模拟区域越大,随着耦合节点比例的削减,模型模拟效率提升越明显。

建模过程充分考虑了合流管道旱天污水量,且在保证污水处理厂容积的基础上对其顶部高程做升高处理,真实反映了污水处理厂厂前阀门关闭时对上游管道水流的顶托作用,并通过 GIS 技术对房屋道路做局部处理以模拟真实地表产汇流过程,模型在实际应用中的模拟误差在 6% 以内。

参考文献:

[1] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护,2022,38(1):7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))

[2] 王承书,杨晓楠,孙文义,等. 极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J]. 土壤学报,2020,57(2):296-306. (WANG Chengshu, YANG Xiaonan, SUN Wenyi, et al. Soil water storage capacity and rainwater infiltration in hilly-gully loess region under severe rainstorm [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2):296-306. (in Chinese))

[3] 侯精明,康永德,李轩,等. 西安市暴雨致涝成因分析及对策[J]. 西安理工大学学报,2020,36(3):269-274. (HOU Jingming, KANG Yongde, LI Xuan, et al. Analysis and countermeasures of inundation caused by heavy rain in Xi'an [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(3):269-274. (in Chinese))

[4] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2):81-88. (in Chinese))

[5] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水电工程学报,2012(1):1-4. (ZHANG Jianyun. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1):1-4. (in Chinese))

[6] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护,2021,37(5):131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):131-139. (in Chinese))

[7] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护,2022,38(6):15-21. (HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, et al. Effects of rainfall patterns on urban waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):15-21. (in Chinese))

[8] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6):820-828. (in Chinese))

[9] 栾清华,付潇然,王海潮,等. 大尺度无管流数据城区 SWMM 构建及模拟:I. 复杂下垫面城区数字精细化关键技术[J]. 水科学进展,2019,30(5):653-660. (LUAN Qinghua, FU Xiaoran, WANG Haichao, et al. SWMM-based rainfall-runoff simulations in large-scale urban area with no pipeline-flow observations:I. key techniques for digitalizing urban area with complicated land-surface characteristics [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5):653-660. (in Chinese))

[10] 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 Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, 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))

[11] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))

[12] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6):528-533. (in Chinese))

[13] SALVADORE E, BRONDERS J, BATELAAN O. Hydrological modelling of urbanized catchments: a review and future directions [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 62-81.

[14] 杨少雄,侯精明,陈光照,等. LID 径流控制效果对设计

- 暴雨重现期的响应[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 93-98. (YANG Shaoxiong, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Response law of LID runoff control effect to design rainstorm return period [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 93-98. (in Chinese))
- [15] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 137-144. (HU Weixian, HE Wenhua, HUANG Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 137-144. (in Chinese))
- [16] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 791-800. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Comprehensive review on the impact of spatial features of urban underlying surface on runoff processes [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 791-800. (in Chinese))
- [17] HOU Jingming, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 257: 126-149.
- [18] SMITH L S, LIANG Qiuhua. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 334-343.
- [19] ZHANG Lili, LIANG Qiuhua, WANG Yueling, et al. A robust coupled model for solute transport driven by severe flow conditions [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2015, 9(1): 49-60.
- [20] HOU Jingming, LIANG Qiuhua, SIMONS F, et al. A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment[J]. Advances in Water Resources, 2013, 52: 107-131.
- [21] HOU Jingming, LIANG Qiuhua, LI Zhanbin, et al. Numerical error control for second-order explicit TVD scheme with limiters in advection simulation [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2015, 70(9): 2197-2209.
- [22] HOU Jingming, LIANG Qiuhua, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.
- [23] LIANG Qiuhua, XIA Xilin, HOU Jingming. Catchment-scale high-resolution flash flood simulation using the GPU-based technology [J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 975-981.
- [24] 马萌华, 李家科, 邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62-72. (MA Menghua, LI Jiak, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11): 62-72. (in Chinese))
- [25] 臧文斌, 赵雪, 李敏, 等. 城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(11): 1-13. (ZANG Wenbin, ZHAO Xue, LI Min, et al. Research progress and development trend of urban flood simulation technology [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(11): 1-13. (in Chinese))
- [26] 王浩正, 冯宇, 孙文超, 等. 城市排水系统模型综述[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 1-10. (WANG Haozheng, FENG Yu, SUN Wenchao, et al. Review of urban drainage system models [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 1-10. (in Chinese))
- [27] 栾广学, 侯精明, 郭敏鹏, 等. 海绵改造对城市内涝过程的时空影响分析[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(10): 5-9. (LUAN Guangxue, HOU Jingming, GUO Minpeng, et al. The impact analysis of sponge reconstruction on urban inundation process in temporal and spatial scales [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(10): 5-9. (in Chinese))
- [28] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese))
- [29] 金溪, 王芳. 基于 CUDA 架构的内涝一维/二维耦合模型求解方法[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 103-109. (JIN Xi, WANG Fang. Calculation method of urban flooding one-dimensional/two-dimensional coupling model based on CUDA-based parallel implementation[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 103-109. (in Chinese))
- [30] 江春波, 周琦, 申言霞, 等. 山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1137-1150. (JIANG Chunbo, ZHOU Qi, SHEN Yanxia, et al. Review on hydrological and hydrodynamic coupling models for flood forecasting in mountains watershed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1137-1150. (in Chinese))
- [31] 赵仕霖, 金生, 杨宁. 地表水流与地下管流耦合的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2020, 35(4): 454-460. (ZHAO Shilin, JIN Sheng, YANG Ning. Numerical simulation of coupling of surface flow and underground pipe flow[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(4): 454-460. (in Chinese))
- [32] 孔彦虎. 基于 GIS 的城市排水管网数据处理与校验[D]. 昆明: 云南大学, 2012.

(收稿日期: 2022-03-18 编辑: 熊水斌)