

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.020

合流污水漫溢及其地表输移过程高分辨率模拟

刘立军¹, 王添¹, 侯精明¹, 栾广学¹, 银雅伦¹, 景静¹,
范臣臣¹, 刘园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. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为深入了解降雨期间城市合流制管网与地表水量水质的互馈机理及输移规律,采用基于GAST与SWMM耦合的水动力水质高效高分辨率水环境数值模型,模拟分析了合流制节点在降雨期间的溢流水量及其漫溢和回流过程,以及溢流污染物TSS在地表的输移规律。结果表明,在3 600~21 600 s期间,3种重现期下(2、10、50年一遇)溢流污染物TSS>300 mg/L的比例总体呈下降趋势;道路径流与节点漫溢污染物TSS在地表的输移情况基本吻合,主要沿道路方向输移;随着降雨重现期的增大,地表溢流水量、面积以及溢流污染物TSS的浓度和负荷均呈先增加后减少的趋势。

关键词: 合流制管网; 节点漫溢; 高分辨率模拟; 污染物输移; GPU加速技术

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)19-0127-10

High-resolution Simulation of Combined Sewer Overflow and Its Surface Transport Process

LIU Li-jun¹, WANG Tian¹, HOU Jing-ming¹, LUAN Guang-xue¹, YIN Ya-lun¹,
JING Jing¹, FAN Chen-chen¹, LIU Yuan²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: To deeply comprehend the mutual feeding mechanism and transport principle of the urban combined sewer network and surface water quality during rainfall, an efficient and high-resolution water environment numerical model of hydrodynamic water quality based on the coupling of GAST and SWMM was employed to simulate and analyze the overflow volume, the overflow and backflow processes at the node of the combined sewer system, as well as the transport principle of the overflow pollutant TSS on the surface during rainfall. During the period ranging from 3 600 seconds to 21 600 seconds, the proportion of the overflow pollutant TSS exceeding 300 mg/L in the three recurrence intervals (2 years, 10 years, and 50 years) demonstrated a general downward trend. The road runoff was essentially in line with the surface transport of nodal pollutant TSS, mainly along the road direction. With the escalation of the rainfall recurrence interval, the surface overflow volume, area, as well as the concentration and load of the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079106); 中德合作交流项目(M-0427); 陕西省重点研发计划项目(2023GXJH-042); 中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-ZDXM-2022-41)

通信作者: 王添 E-mail: t.wang@xaut.edu.cn

overflow pollutant TSS, initially increased and then decreased.

Key words: combined sewer network; node overflow; high-resolution simulation; pollutant transport; GPU acceleration technology

当前我国大多数城市地下排水管网采用雨污分流制,但在一些人口密度较高且基础设施相对老旧的老城区,仍沿用着雨污合流制管网系统^[1]。鉴于合流制管网节点漫溢对城市水环境造成的严重危害,近年来越来越多的研究开始关注城市节点溢流污染的成因和解决方案^[2]。但目前对城市水环境中合流制管网与地表水量水质输移规律的研究相对较少,一、二维单向过程的松散耦合模型未考虑地表径流回流到管网情况,因此难以对节点漫溢的地表水量进行详细刻画。此外,针对合流污水漫溢,多数是研究其溢流控制中“源头、过程及末端”等综合控制之间的协调关系^[3],如闫攀等^[4]通过分析合流制溢流控制的系统衔接关系来合理制定控制策略,但缺少对合流制节点漫溢的污染物浓度进行深入分析。鉴于此,笔者采用基于 GAST 与 SWMM 水动力水质动态耦合的高效高分辨率水环境数值模型,探究不同降雨情景下,当管道达到满负荷状态时污染物通过节点漫溢到地表后的输移规律,以及在管道排水能力恢复后地表污染物重新回流到管道的过程,进而分析高浓度污染物的时空分布及其对城市造成的潜在风险,以期为城市水环境漫溢污染防治提供参考。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

研究区域为陕西省西安市某中心商务区,占地约 11.65 km²,年均降雨量为 545 mm,平均气温为 14.9 °C,降雨主要集中在夏季且多为暴雨。

1.2 基础数据

1.2.1 地形数据

采用无人机航测技术对研究区域进行地形高程的巡航测算,同时使用 GIS 技术对测量结果进行处理和加工,得到精度为 4 m×4 m 的 DEM 数据,如图 1(a)所示。通过对研究区域高清晰度的卫星影像图进行深入分析来获取土地利用数据,同时利用 ENVI 软件采用极大似然法对卫星影像图的不同色块进行精准分类,最终将研究区域下垫面划分为道路、绿地、不透水区及房屋共 4 种土地利用类型,它

们的面积占比分别为 18.05%、6.68%、54.47% 和 20.79%,具体划分情况如图 1(b)所示。

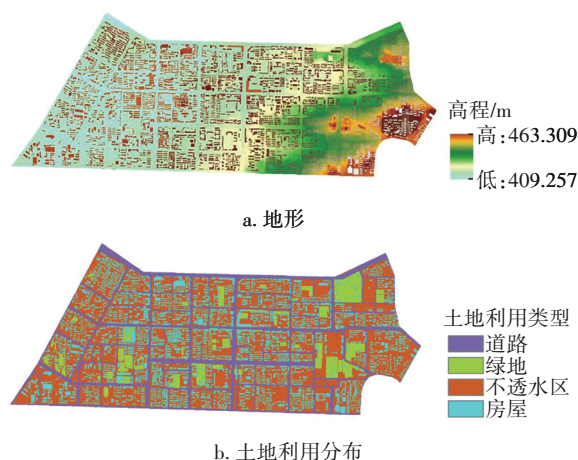


图1 研究区域的地形和土地利用分布情况

Fig.1 DEM data and land use distribution of study area

1.2.2 降雨数据

本研究的设计降雨数据采用芝加哥雨型生成器^[5]依据西安地区的特征参数生成,雨峰系数 $r=0.38$,降雨重现期 P 选用 2、10、50 年,降雨历时 $t=120$ min,具体降雨强度公式如式(1)所示,降雨过程曲线如图 2 所示。

$$i = \frac{2\,210.87(1 + 2.915\lg P)}{167(t + 21.933)^{0.974}} \quad (1)$$

式中: i 为暴雨强度, mm/h; P 为降雨重现期,年; t 为降雨历时, min。

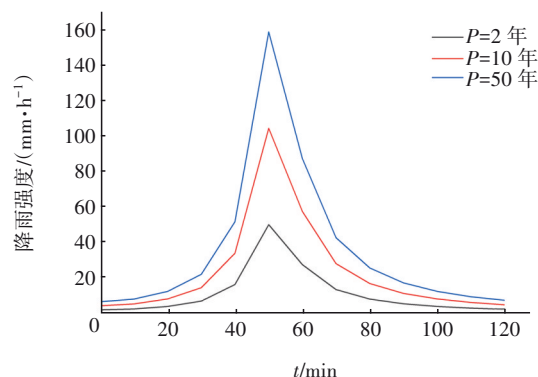


图2 研究区域不同重现期短历时设计降雨过程

Fig.2 Short-duration design rainfall process with different recurrence periods in study area

1.2.3 下渗数据

依据相关文献、SWMM 模型用户手册参考范围确定不同土地利用类型的曼宁系数及下渗速率,其中,房屋、道路、绿地和不透水区的曼宁系数分别取值为 0.015、0.014、0.24 和 0.015^[6-9];房屋、道路及不透水区的下渗速率设为 0,绿地的下渗速率设为 11 mm/h^[10-11]。

1.2.4 SWMM 水质参数设置

研究区域主要用地类型为居住区和商业区,均位于主要的合流制排水系统覆盖范围内。居民的污水排放模式主要是集中处理模式,即污水产生后,通过合流制管网进行收集,然后输送到污水厂进行处理。其中,研究区域各子汇水区的生活污水流量由人口密度、子汇水区面积加权确定。

$$q_i = s \times p \times c \times \alpha / 86\,400 \quad (2)$$

式中: q_i 为子汇区内产生的生活污水流量, m^3/s ; s 为子汇水区面积, m^2 ; p 为研究区域的人口密度,人/ m^2 ; c 为西安市城镇居民生活用水定额,取 140 L/(人·d); α 为生活污水排放系数。

本研究在一维 SWMM 管网模型中,参考李依江^[12]在西安市老城区合流制溢流污染控制研究中采用的水质参数,确定研究区域合流制排水管网中 TSS 平均浓度为 372.5 mg/L。在此基础上,根据实际情况对水质参数进行设定,如表 1 所示。

表 1 SWMM 各下垫面 TSS 参数取值
Tab.1 TSS parameters of each underlying surface in SWMM

下垫面	最大累积量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	半饱和累积时间/d	冲刷系数	冲刷指数
屋面	176	8.0	0.05	1.4
绿地	100	6.5	0.03	6.5
道路	310	5.5	0.05	1.8
其他	90	5.5	0.05	1.2

2 研究方法内容

GAST 模型是由西安理工大学与英国纽卡斯尔大学联合开发的二维浅水地表模型,可用来模拟流域洪水演进^[13],也可用来模拟城市雨洪过程^[14]。而 SWMM 一维管网模型具有免费开源、应用范围广等优点,在海绵城市建设、城市防涝等方面^[15]的应用成为研究热点。本研究采用的 GAST 与 SWMM 耦合的水动力水质高效高分辨率水环境数值模型主要包括二维地表水动力和一维排水管网两部分,具体

流程见图 3。该耦合模型能够描述城市合流制管网与地表水量水质之间的互馈作用(溢流及回流)。当降雨发生时,水流从二维的地表流入一维的排水管网;反之,当排水管网充满水后,水流会从节点处溢流到地表,即水流从一维的排水管网流入到二维的地表。传统水文水动力和水质模型在描述水动力和水质的演变过程时,往往难以全面反映从源头到末端的整体变化,同时也缺乏对城市道路和排水系统之间复杂反馈机制的准确模拟。单一模型难以详尽地描绘城市环境中水动力与水污染过程的细微变化以及多个过程之间的相互作用。本研究使用的是一种基于 GPU 加速技术,实现了高分辨率一、二维动态双向耦合的模型^[16]。该模型不仅能够更精确地捕捉道路和建筑物对水流的引导和阻断效应,还能够模拟排水系统与二维地表水动力和水质之间的动态相互作用,从而提供了一个更为全面和深入地了解城市水循环的视角。

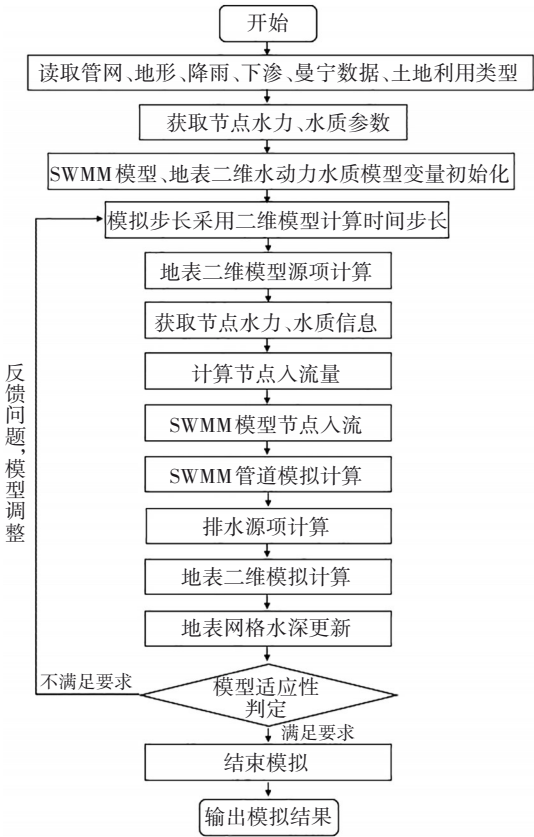


图 3 耦合模型流程

Fig.3 Flow chart of coupled model

2.1 二维地表水动力水质耦合高分辨率数值模型

高分辨率网格精度能够展示地表细节,捕捉细

微变化,提供更丰富和更高质量的地形信息。这种精度适用于需要呈现丰富细节和高精度的场景,如卫星地图。在模型中,地形精度越高,计算结果越精准^[17]。高分辨率数值模型还有利于更准确地描述城市地表各下垫面等复杂地形,从而更准确地反映地形对局地降水等的影响,提高预报准确度^[18],但需高数据存储和使用成本。低分辨率则提供较少细节和较低质量图像,适用于对图像质量要求不高或降低数据存储成本的场景,如全球范围的地形监测。低分辨率数值模拟对数据存储和使用成本的需求较低,但易造成地形信息缺失和失真,与实际地形存在较大的差异。

二维地表模型的控制方程为二维浅水方程(简称SWEs)和污染物输移方程^[19]。模型在空间离散时采用了Godunov格式的有限体积法求解二维浅水方程;采用HLLC近似黎曼求解器解决计算单元界面上质量与动量的通量问题^[20]。结合自适应方法与静水重构法,即在干湿边界处将易失稳的二阶格式自动降为稳定的一阶计算格式来保证模型稳定计算,并采用二步Runge-Kutta法来保证时间积分的二阶精度;选用底坡通量法处理底坡源项,保障计算协调,运用半隐式法对摩擦阻项进行计算^[21]。

2.2 耦合模型实现方式

传统的一、二维耦合模型通常是基于一维SWMM模型的计算结果,将节点、排口等结果信息作为输入文件纳入到二维模型中,然而这种方法忽略了水量和水质之间的交换过程。本研究所采用的一、二维耦合模型通过读取并验证SWMM的输入文件(inpfile),以确保输入文件的数据准确,随后将得到的SWMM节点、管网、排口等属性信息与二维模型进行校准和连接。主要考虑以下两种情况:①地表径流回流到排水管网,这种情况下,根据二维模型计算出的地表径流及水质数据,与一维排水管网进行交换;②排水管网污水流出地表,这种情况下,根据一维模型计算出的节点溢流污水流量和水质数据,与二维地表进行交换。通过这种耦合方式的优化,能够更准确地模拟水量及水质在不同空间维度上的交换变化情况。

在耦合模型模拟计算过程中,根据二维高精度DEM地表数据单元重新匹配SWMM中的节点地表高程等属性信息,以此作为各节点一、二维水量和水质交换的水位边界条件。从二维地表到一维排

水管网间水量与水质交换有两种情况,如图4(a)和(b)所示。在图4(a)中,当排水管网中节点水位 Z_j 低于地面高程 Z_b 时,引用了地表径流回流的观念,采用堰流公式,即地表径流雨水和污染物回流到排水管网中,这种优化实际考虑了城市排水管网系统中可能出现的回流现象,提高了模型的准确性和模拟精度。在图4(b)中,当排水管网中节点水位 Z_j 高于地面高程 Z_b 但低于地面水位 Z_w 时,发生地表回流,采用孔口流量公式,即地表雨水流入雨水井中。当排水管网总水头高于地表高程时,排水管网中的污水通过耦合节点溢流到二维地表中,对城市地表环境造成污染。节点从排水管网溢流到二维地表的水量和水质交换如图4(c)所示。当排水管网中节点水位 Z_j 高于地面水位 Z_w 时,引用了节点溢流的概念,采用孔口流量公式,即雨水井中的水向地表溢流。

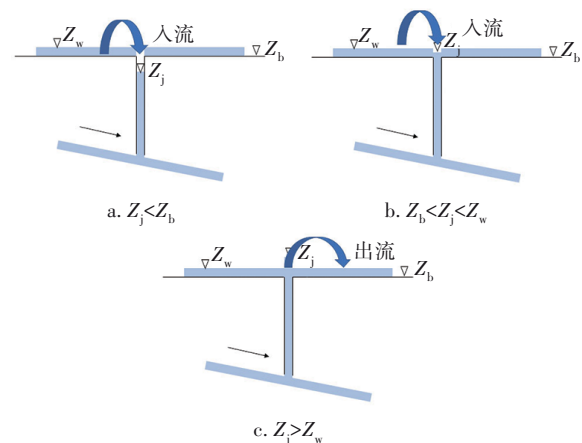


图4 节点漫溢处二维地表与排水管网间的水量、水质交换

Fig.4 Exchange of water quantity and quality between two-dimensional surface and drainage network at overflow node

2.3 GPU加速技术

因模拟计算量大,计算时间过长,故在模型中引入GPU加速技术,通过CUDA编程在显卡上实现高速并行计算。在GPU上实现并行计算需要考虑网格结构、内存处理、内核代码、时间步长和线程调度等部分。GPU并行加速技术的核心是将算法进行并行化处理。通过将空间离散后的网格和网格节点作为并行计算的基本单位,GPU能够将每次需要计算的内容从CPU拷贝至GPU的每个线程中进行计算。在并行计算过程中,GPU会对通量及源项等进行并行计算,计算完毕后将计算结果重新拷贝

至显存CPU中。这种处理方式减少了GPU与CPU之间数据的传输频次,从而提高了计算效率。本研究模型模拟时长为21 600 s,共计运行时间为1 920 s,模型运行时总共占用计算机运行内存的38%,计算机的总内存为15.9 GB,处理器为Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20 GHz, GPU为RTX2080。

2.4 模型构建与验证

2.4.1 模型构建

本研究选用的排水管网数据源于陕西省西安市测绘院提供的详细管线普查数据资料,模型中节点、管道取值与普查数据资料保持一致,管道形状均设置为圆形。排水管网根据普查数据资料概化为735个节点、766根管道、97个子汇水区、8个合流排口,研究区域的SWMM模型如图5所示。GAST模型输入数据包括降雨数据、DEM数据、土地利用类型数据、曼宁系数、下渗速率、管网数据等。

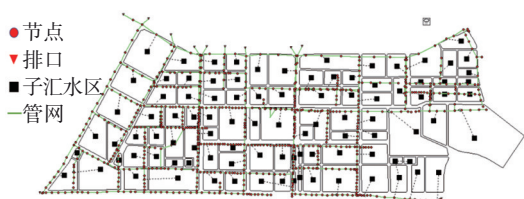


图5 研究区域的SWMM模型

Fig.5 SWMM model of study area

2.4.2 模型验证

本研究使用的GAST-SWMM一二维高效高分辨率水动力水质耦合模型的计算精度已被有效验证^[22],将其应用于研究区域,选取2022年8月4日19:00—21:00实测降雨数据对耦合模型进行验证。本场降雨历时1.5 h,降雨总量为62.66 mm,降雨过程如图6所示。

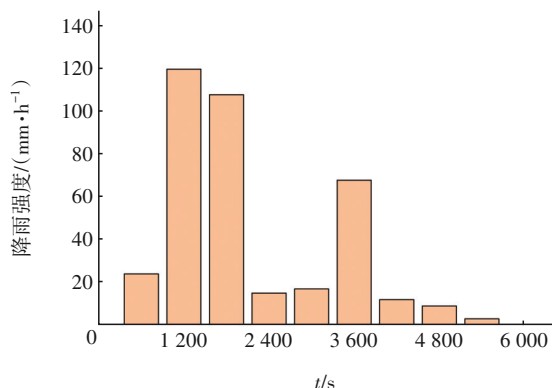


图6 2022年8月4日降雨数据

Fig.6 Rainfall data on August 4, 2022

将实测降雨数据导入一二维水动力水质耦合模型中,通过参数的不断调整得出曼宁系数和下渗速率参数值,使模型模拟结果与实测结果最为接近,最终得到符合实测结果时刻的积水分布模拟图,如图7所示。

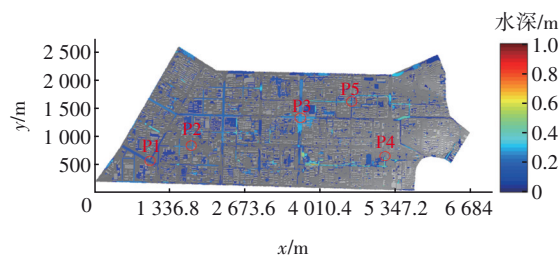


图7 2022年8月4日实测降雨数据模拟水深的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of simulated water depth based on measured rainfall data on August 4, 2022

将实测调研的内涝点位与模拟结果进行比对,并计算内涝点位与模拟结果的平均相对误差。P1点位模拟水深为0.058 m,实测水深为0.06 m;P2点位模拟水深为0.153 m,实测水深为0.116 m;P3点位模拟水深为0.218 m,实测水深为0.204 m;P4点位模拟水深为0.291 m,实测水深为0.276 m;P5点位模拟水深为0.332 m,实测水深为0.313 m。5个内涝积水点的实际水深与模拟水深之间的平均相对误差在10%左右,证明本研究构建的一二维耦合模型具有较高的准确性和可靠性。

3 合流污水漫溢及其地表输移过程模拟

本研究主要探讨2、10和50年一遇短历时降雨条件下,城市合流制管网与地表水量水质的互馈机理及输移转换规律,综合分析地表溢流污染物时空变化对不同降雨重现期的响应规律及SWMM节点漫溢变化。将研究区域设定为开边界,设置无入流,模拟时长为6 h,其中降雨2 h、退水4 h。

3.1 地表污染物时空变化规律对重现期的响应

3.1.1 地表溢流水量变化过程

图8为不同降雨重现期下地表溢流积水量的变化过程。2、10和50年一遇降雨条件下开始发生溢流的时间分别为2 700、2 400和2 100 s,10和50年一遇相比2年一遇降雨条件下开始发生溢流的时间分别提前了300 s和600 s。不同降雨重现期下地表溢流积水量分别在3 900、4 200、4 500 s时达到峰值,峰值分别为505.43、6 496.40、28 036.00 m³。50年一遇相比2和10年一遇降雨条件下达到地表溢

流积水量峰值的时间分别迟滞了600 s和300 s,且峰值增加了5 446.96%和331.56%。退水4 h后,50年一遇相比2和10年一遇降雨条件下地表剩余溢流积水量分别增加了2 639.52%和353.38%。

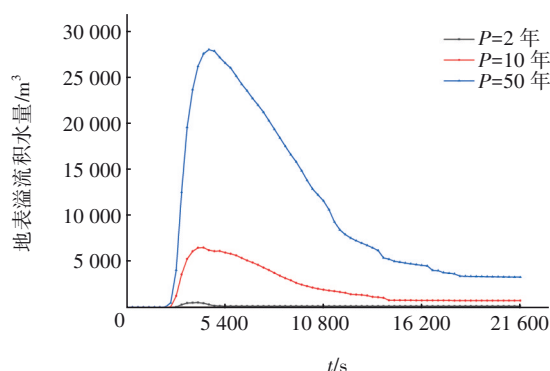


图8 不同重现期下地表溢流积水量的变化

Fig.8 Change of surface overflow volume under different recurrence intervals

随着降雨重现期和降雨强度的增大,排水管网可能会出现超载现象,导致节点发生溢流。降雨重现期越大意味着节点发生漫溢的时间越早。然而,随着降雨时间的增加,降雨强度会逐渐减小,从而使排水管网的排水能力逐渐恢复,减少节点漫溢的水量。在一定时间后,地表径流的回流量会超过节点的溢流量,因此地表溢流水量开始减少。

3.1.2 地表溢流面积变化过程

图9展示了不同降雨重现期下地表溢流面积的变化情况。在2年一遇降雨条件下,地表溢流面积在3 900 s达到峰值即11 216 m²,此后呈现下降趋势,直至6 600 s地表剩余溢流面积开始稳定在1 568 m²左右。在10和50年一遇降雨条件下,溢流面积峰值时间分别比2年一遇降雨条件下迟滞了300 s和600 s,溢流面积峰值分别为92 704、338 544 m²。10和50年一遇降雨条件下地表溢流面积分别在16 200 s和18 300 s开始稳定,此时地表剩余溢流面积分别为9 280、42 736 m²。退水4 h后,10和50年一遇降雨条件下的地表剩余溢流面积分别比2年一遇降雨条件下增加了491.83%和2 625.51%。

从整体时间分布来看,不同降雨重现期条件下的地表溢流面积呈明显增加趋势,特别是在降雨前1 h。然而,在降雨持续1.5 h后,相比降雨前1 h,地表溢流面积开始呈明显减少趋势。这是由于降雨强度的减小,导致排水管网的排水能力得以恢复,从而减少了节点漫溢的排放。

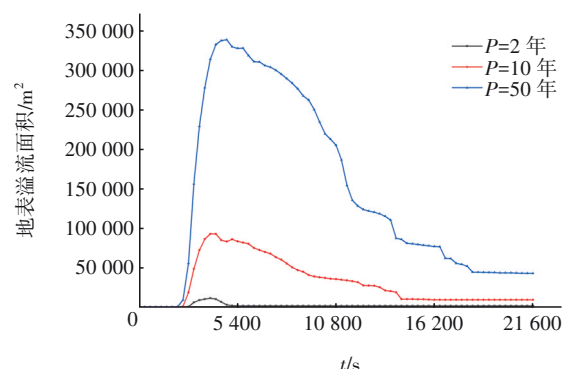


图9 不同重现期下地表溢流面积的变化

Fig.9 Change of surface overflow area under different recurrence intervals

值得注意的是,地表溢流面积的变化趋势与宋瑞宁等人^[23]研究的内涝积水面积的变化规律相似,都是先升高至峰值后下降。随着降雨重现期的增加,地表溢流面积的峰值增大,且下降速度也加快。在重现期较小的情况下,地表溢流面积在达到峰值后的下降趋势相对平缓,且最终地表剩余溢流面积的趋稳时间提前。

3.1.3 地表溢流污染物TSS高分辨率输移过程

图10展示了在不同降雨重现期下,合流制节点溢流污染物TSS在地表输移回流及浓度的变化情况,当水深<0.01 m时,结果不显示。在降雨期间(2 h),分析二维地表溢流污染物TSS浓度在1、1.5、2 h的变化情况;在退水过程中(4 h),每隔2 h得到一个二维地表模拟结果。可以看出,在降雨1~1.5 h内,城市地表溢流污染物TSS浓度普遍较高。

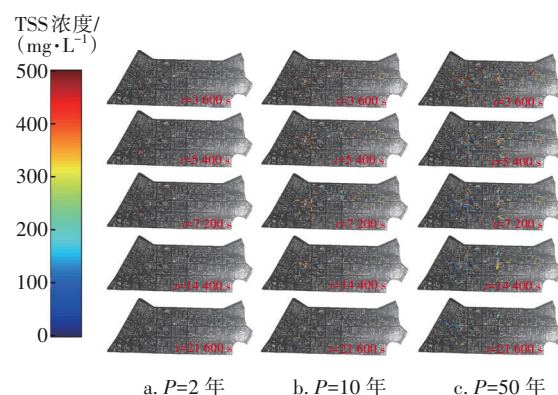


图10 不同重现期下地表溢流污染物TSS浓度时空分布

Fig.10 Spatial and temporal distribution of TSS concentration of surface overflow under different recurrence intervals

在2年一遇降雨条件下,3 600 s时刻的TSS浓度分布中,TSS>300 mg/L的占比达到57.22%,而在

10和50年一遇降雨条件下,这一比例分别为72.84%和55.35%。在10和50年一遇降雨条件下,与2年一遇降雨条件相比,在3600 s时刻地表溢流TSS>300 mg/L的体积分别增加了583.89%和1104.28%。2年一遇降雨条件下,地表溢流TSS>300 mg/L的占比在3600~21600 s期间增长了6.07%;但在10和50年一遇降雨条件下,这一占比在相同时间范围内分别下降了10.47%和19.01%。随着降雨重现期的增加,降雨量较大导致排水管网中的生活污水被大量稀释,因此溢流到地表TSS浓度逐渐降低,从而使得整体地表溢流TSS浓度开始减小。不同降雨重现期下地表退水4 h后,研究区域总体的地表溢流TSS浓度大部分低于200 mg/L, TSS浓度仍较高。但在部分地势低洼地区,由于污水积聚, TSS浓度仍大于400 mg/L。

图11为50年一遇降雨条件下7200 s时刻的流速场,箭头长度和方向分别表示水流流速大小与方向,当水深<0.01 m时,结果不显示。通过对比流速场与地表溢流TSS浓度的时空分布可知,道路径流与节点漫溢污染物TSS在地表的输移情况基本一致,主要沿道路方向输移,少部分径流向地势较低的建筑区域输移,在研究区域内整体上呈现出向北及西北方向输移的规律。

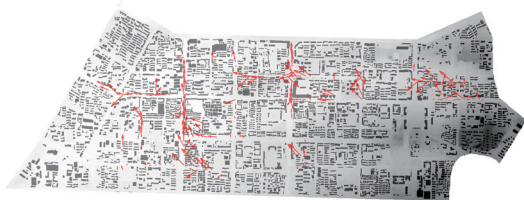


图11 流速场变化情况

Fig.11 Change of flow velocity field

3.1.4 地表溢流TSS污染负荷时空演变过程

图12展示了不同降雨重现期下6 h内地表溢流污染物TSS的单位面积负荷量变化情况,当水深<0.01 m时,结果不显示。本次模拟降雨峰值在2700 s时刻,由于地表径流的产汇流需要一定时间,因此地表积水的面积峰值相对于降雨峰值有所滞后。大多数溢流节点在持续降雨1 h前处于溢流状态,根据图8~10所示的地表溢流积水量、面积及污染物TSS浓度的变化趋势,此时地表溢流污染物TSS的单位面积负荷量偏大。随着降雨持续进行以及降雨结束后地表径流逐渐退去,通过节点漫溢释

放到地表的污染物TSS浓度会开始下降;与此同时,地表覆盖的污染物TSS单位面积负荷量也会随时间推移而逐步减少。

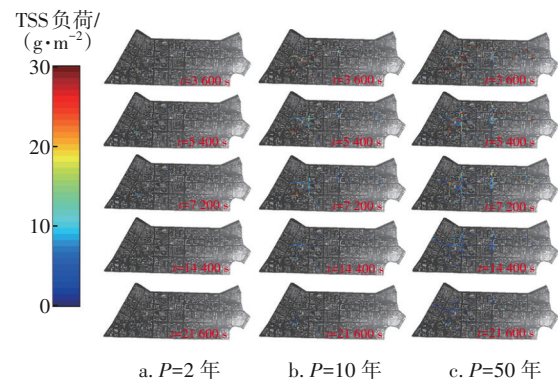


图12 不同重现期下地表溢流污染物TSS单位面积负荷量的时空分布

Fig.12 Spatial and temporal distribution of TSS load per unit area of surface overflow under different recurrence intervals

图13为不同降雨重现期下地表溢流污染物TSS总负荷量的变化情况。可以明显看出,在3600 s时刻TSS总负荷量达到峰值后开始大幅下降,最终趋于稳定,与图12中的二维地表模拟结果相吻合。

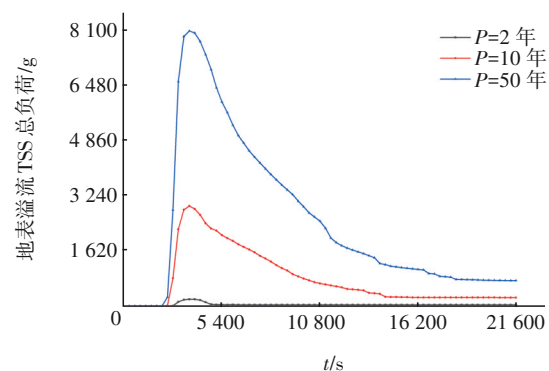


图13 不同重现期下地表溢流TSS总负荷量变化过程

Fig.13 Change process of TSS load of surface overflow under different recurrence intervals

3.2 SWMM节点漫溢分析

3.2.1 节点溢流数量及区位

2、10、50年一遇降雨条件下分别有14、88、222个节点发生溢流,漫溢总量分别为562、10558、54810 m³;漫溢量>50 m³分别有4、23、53个节点,漫溢总量分别为440、10266、53918 m³。相比2、10年一遇降雨条件下,在50年一遇降雨条件下发生溢流的节点数量分别增加了49和30个,漫溢量分别增加了12154.09%和425.21%。其中,有4个节点的

漫溢量在3个重现期下均超过了 50 m^3 ,它们的位置如图14所示(分别记作A~D)。

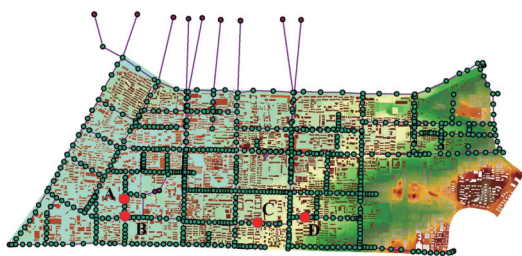


图14 4个典型溢流节点的位置

Fig.14 Location of four typical overflow nodes

3.2.2 典型节点漫溢分析

选取上述4个节点中最大漫溢量节点A进行分析,节点A在2、10、50年一遇降雨条件下的漫溢量分别为221、1 315、3 868 m^3 。对节点A在50年一遇降雨条件下的TSS浓度、入流量及漫溢量的关系进行分析,结果如图15所示。

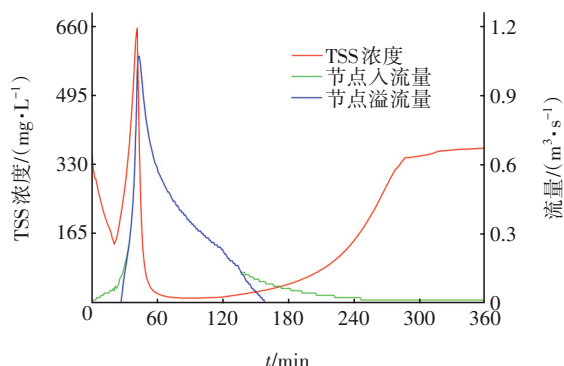


图15 SWMM节点漫溢分析

Fig.15 SWMM node overflow analysis

从图15可以发现,降雨0~25 min期间雨水进入合流制管网并不会产生节点漫溢,此时由于雨水与生活污水混合,管道中节点TSS浓度逐渐下降。在降雨25~45 min期间,合流制管网中大量混合污水冲刷管网中沉积的污染物,此时管道中节点TSS浓度开始升高。当降雨强度降低时,管网的排水能力恢复,节点漫溢量开始下降,当漫溢的污水重新汇流至排水管网时,流入的污水TSS浓度较低,这种低浓度的污水对管道中的生活污水起到了显著的稀释作用,此时管道中节点TSS浓度开始下降。降雨120 min后,管道中的合流污水均已逐渐排走,此时高浓度的生活污水占据主导地位,管道中的TSS浓度逐渐回升。综上,不同降雨重现期下的地表溢流变化与排水管网的排水能力密切相关。随着降雨

重现期的增加,排水系统的负担逐渐加重,因此需要更快的排水速度来有效应对溢流情况。

4 结论

① 随着降雨重现期的增大,节点发生溢流的时间逐步提前,且地表溢流积水量、面积及溢流污染物TSS浓度和负荷量均呈先增大后减小的趋势。

② 地表溢流污染物TSS以地表径流为载体,道路径流与节点漫溢污染物TSS在地表的输移情况基本吻合,主要沿道路方向输移。

③ 在3 600~21 600 s期间,2、10、50年一遇降雨重现期下溢流污染物TSS>300 mg/L的占比总体上呈减小趋势。

④ 随着降雨重现期的增大,节点漫溢数量及漫溢量呈大幅增长趋势。随着降雨强度的增大,合流制管网中污水的冲刷作用会逐渐占主导地位,使管网中污染物TSS浓度逐渐升高。

研究短历时强降雨条件下节点漫溢及其溢流到地表后的输移规律,有助于提高对城市节点漫溢输移过程的理解,并在高分辨率地形下实现对合流制污染的精准识别和控制,进而从源头实现对合流制污染的控制。在城市规划和排水系统设计中,需要充分考虑不同降雨重现期下的排水需求和能力,以确保城市水环境的安全和正常运行。

参考文献:

- [1] 银雅伦,侯精明,杨露,等.银川市某高密度城区合流制溢流污染特性研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(6):95-102.
YIN Yalun, HOU Jingming, YANG Lu, et al. Pollution characteristics of combined sewer overflow in a high density urban area of Yinchuan City [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(6): 95-102 (in Chinese).
- [2] 娄和震,吴习锦,郝芳华,等.近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J].环境科学学报,2020,40(5):1535-1549.
LOU Hezhen, WU Xijin, HAO Fanghua, et al. Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1535-1549 (in Chinese).
- [3] 王建龙,黄涛,张萍萍,等.合流制溢流调蓄池污染控制研究进展[J].环境污染与防治,2015,37(8):

- 85-89, 95.
- WANG Jianlong, HUANG Tao, ZHANG Pingping, *et al.* Research progress on combined sewer overflow stormwater storage tank for pollution control [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, 37(8): 85-89, 95 (in Chinese).
- [4] 闫攀, 赵杨, 车伍, 等. 中国城市合流制溢流控制的系统衔接关系剖析 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(14): 37-45.
- YAN Pan, ZHAO Yang, CHE Wu, *et al.* Analysis of the conjunctive relationship of urban combined sewer overflow control system in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 37-45 (in Chinese).
- [5] 张文晴, 侯精明, 李轩, 等. 基于AHP-Fuzzy法的西安小寨水灾害防控效果评价 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(5): 55-58, 63.
- ZHANG Wenqing, HOU Jingming, LI Xuan, *et al.* Evaluation of water disaster prevention and control effect in Xiaozhai Xi'an based on AHP-Fuzzy method [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(5): 55-58, 63 (in Chinese).
- [6] 洪伟, 高徐军, 杜颖恩, 等. 西安市老城区海绵改造对雨水径流削减效益模拟研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(5): 70-77.
- HONG Wei, GAO Xujun, DU Ying'en, *et al.* Simulation of reduction effect of sponge reconstruction in old urban area of Xi'an City on rainfall runoff [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(5): 70-77 (in Chinese).
- [7] 薛树红, 高徐军, 刘园, 等. 西安市小寨区域城市雨洪综合模拟与解析研究 [J]. *人民黄河*, 2023, 45(6): 32-36, 42.
- XUE Shuhong, GAO Xujun, LIU Yuan, *et al.* Study on comprehensive simulation and analysis of urban stormwater in Xiaozhai of Xi'an City [J]. *Yellow River*, 2023, 45(6): 32-36, 42 (in Chinese).
- [8] 申红彬, 徐宗学. 城市地表灰尘径流冲刷过程模拟 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 556-566.
- SHEN Hongbin, XU Zongxue. Simulation of the dust wash-off process from impervious urban surfaces [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 556-566 (in Chinese).
- [9] 叶楚雄, 王劲松, 蒋明, 等. 九江市春季期间不同交通量下典型道路雨水径流污染特征分析 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(11): 50-54.
- YE Chuxiong, WANG Jinsong, JIANG Ming, *et al.* Analysis of pollution characteristics of typical roads runoff with different traffic volume in spring in Jiujiang City [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(11): 50-54 (in Chinese).
- [10] 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, 105.
- 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, 105 (in Chinese).
- [11] EGODAWATTA P, THOMAS E, GOONETILLEKE A. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall [J]. *Water Research*, 2007, 41(13): 3025-3031.
- [12] 李依江. 基于SWMM的西安市老城区合流制溢流污染控制研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- LI Yijiang. Research on Pollution Control of Combined System Overflow in Old Urban Area of Xi'an Based on SWMM [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [13] 侯精明, 李桂伊, 李国栋, 等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(2): 96-107.
- HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, *et al.* Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(2): 96-107 (in Chinese).
- [14] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(3): 40-49.
- HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, *et al.* High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(3): 40-49 (in Chinese).
- [15] 王洋洋. SWMM模型在城市防涝与流域防洪中的应用与研究 [J]. *城市道桥与防洪*, 2023(2): 206-208.
- WANG Yangyang. Application and research of SWMM model in urban waterlogging prevention and watershed flood control [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2023(2): 206-208 (in Chinese).
- [16] LUAN G X, HOU J M, WANG T, *et al.* A 1D-2D dynamic bidirectional coupling model for high-resolution simulation of urban water environments based on GPU

- acceleration techniques [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428: 139494.
- [17] 侯精明, 王俊琿, 同玉, 等. 基于非均匀网格的高效高精度洪涝过程模拟 [J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(4): 53-62.
- HOU Jingming, WANG Junhui, TONG Yu, *et al.* High-efficient and high-precision flood process simulation based on the non-uniform grid [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53 (4) : 53-62 (in Chinese).
- [18] 陈冬梅, 马玉龙, 李源, 等. 高分辨率地形资料应用对CMA-MESO模式地面气象要素的影响 [J]. *气象学报*, 2023, 81(6): 897-910.
- CHEN Dongmei, MA Yulong, LI Yuan, *et al.* The impact of high-resolution topographic data on the CMA-MESO model prediction of ground meteorological elements [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2023, 81 (6): 897-910 (in Chinese).
- [19] 侯精明, 张兆安, 马利平, 等. 基于GPU加速技术的非结构流域雨洪数值模型 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 567-576.
- HOU Jingming, ZHANG Zhao'an, MA Liping, *et al.* Unstructured numerical model for rainfall-runoff process in watershed based on GPU acceleration technology [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32 (4) : 567-576 (in Chinese).
- [20] 石宝山, 侯精明, 王俊琿, 等. 基于GAST模型的突发性水污染事故中污染物输移模拟 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(11): 1112-1119.
- SHI Baoshan, HOU Jingming, WANG Junhui, *et al.* Simulation of pollutant transport in sudden water pollution accident based on GAST model [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55 (11): 1112-1119 (in Chinese).
- [21] 栾广学, 侯精明, 马鑫, 等. 建筑小区尺度下径流控制率与非点源污染负荷削减率协同关系研究 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 208-215.
- LUAN Guangxue, HOU Jingming, MA Xin, *et al.* Research on synergistic relationship between runoff control rate and non-point source pollution load reduction rate at residential community scale [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39 (1) : 208-215 (in Chinese).
- [22] 栾广学, 侯精明, 杨露, 等. 河道水质高效高分辨率数值模拟及评估模型研究 [J]. *水动力学研究与进展A辑*, 2022, 37(3): 372-382.
- LUAN Guangxue, HOU Jingming, YANG Lu, *et al.* Research on high-efficient and high-resolution numerical simulation and assessment model for river water quality [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2022, 37 (3): 372-382 (in Chinese).
- [23] 宋瑞宁, 谢芳, 李小宁, 等. 设计降雨特征对城市内涝模拟结果的影响分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(3): 136-143.
- SONG Ruining, XIE Fang, LI Xiaoning, *et al.* Design rainfall characteristics affects urban flood inundation simulation [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(3): 136-143 (in Chinese).

作者简介: 刘立军(1998-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生, 研究方向为地表水力学及其伴生过程。

E-mail: 1362534194@qq.com

收稿日期: 2023-10-04

修回日期: 2024-01-12

(编辑: 刘贵春)

强化依法治水, 携手共护母亲河