

面向合流制溢流污染控制的 LID 空间配置优化与效益评估

李进松^{1,2}, 任梅芳^{1,2}, 田川², 马金来³, 饶远昊², 刘宇翔³

(1.城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2.中国城市规划设计研究院, 北京 100038; 3.吴忠市市政建设管理中心, 宁夏回族自治区 吴忠 751199)

摘要:【目的】揭示低影响开发 (LID) 技术在特定条件下对合流制溢流 (CSO) 污染的控制潜力, 为西北半干旱地区海绵城市建设与溢流污染控制提供理论依据与实践参考。【方法】以吴忠市第二污水处理厂服务片区为例, 基于雨洪管理模型 (SWMM) 与典型年长历时降雨数据, 模拟分析了不同降雨情景下溢流口的流量与污染物负荷响应, 并重点探讨了 LID 空间分布格局对其削减效能的影响。

【结果】①溢流发生存在 5.9 mm 临界降雨阈值, 超阈值后溢流量与污染物负荷呈非线性急剧增长, 24 h 降雨由 5.9 mm 升至 37.9 mm 时, 溢流量由 $0.014 \times 10^4 \text{ t}$ 增至 $7.86 \times 10^4 \text{ t}$ 。②在 20.8 mm 降雨条件下, 当 LID 总面积固定时, 扩大其空间分布范围可显著提升 CSO 控制效果, 布置范围由研究区面积的 1/5 扩大至 4/5 时, 最大溢流量削减率从 4.01% 提高至 21.41%。③同一降雨事件的最优布局条件下, BOD₅、TSS、COD、NH₃-N、TP 和 TN 的平均削减率分别为 30.08%、30.43%、31.90%、32.38%、27.13% 和 29.81%。【结论】LID 技术广泛布设相比集中布置更具减排优势, 建议半干旱地区海绵城市规划和建设中重视 LID 设施的分散化、系统性布局, 以提升区域降雨径流与面源污染的整体调控能力。

关键词: 合流制溢流污染; 面源污染监测; 雨洪管理模型 (SWMM); LID 空间分布; 海绵城市

中图分类号: X52; TV131.2

文献标识码: A

伴随城市化进程人口的持续增长和下垫面不透水面积的不断扩大, 城市降雨径流量显著增加, 原有排水系统的设计能力难以适应现状径流条件^[1-2], 导致系统长期超负荷运行, 进而诱发城市内涝及受纳水体水质恶化。中国老旧城区尤其是西北城市多采用合流制排水体制, 但由于设计标准低、人口增加等因素, 合流制溢流 (Combined Sewer Overflows, CSO) 现象频发^[3]。为应对 CSO 问题, 传统控制措施以分流制改造和末端调蓄池为主, 但存在重末端、轻源头等问题^[4]。近年来中国大力推动海绵城市建设, 其核心内涵是通过模仿自然水文过程, 减少人类城市开发对自然水系统循环的负面影响^[5-6], 通过低影响开发措施实现对城市水循环系统的重塑以及对环境变化的弹性适应^[7], 不仅能够提升城市应对极端降雨等自然灾害的韧性, 还能促进城市水环境的可持续发展, 成为城市雨洪管理、治理城市水环境问题的必要途径和重要举措^[8]。

海绵城市强调因地制宜新建或改造多种低影响开发 (Low-Impact Development, LID) 措施, 通过源头蓄滞与消纳雨水, 从降低污染负荷和削减径流流量两方面缓解雨季合流制溢流污染问题^[9-12]。围绕 LID 措施对排水系统及溢流控制的影响, 已有研究主要从以下几个方面展开: 在管网水力性能方面, 张沛林等^[13]以广州市荔湖片区为研究区域定量评估了低影响开发建设前后排水管网过流能力, 研究表明 LID 建设可显著改善不同降雨条件下的管网末端溢流情况; 在溢流削减效果方面, 周昕等^[14]证实了合流制溢流削减量及削减频次与 LID 设施总面积呈正相关, 但单位面积削减效益随总面积增加呈递减趋势; 在布设方案优化方面, 吴京戎等^[15]基于成本-效益分析发现雨水花园、透水铺装与绿色屋顶的组合措施对径流削减效果最优; 此外, 有研究提出了容量交易概念, Fu Lin 等^[16]人将透水性较好的盈余能力将其“转让”给径流管理压力相对

收稿日期/Received: 2026-01-20

修回日期/Revised: 2026-04-20

基金项目: 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室开放基金 (HYD2025OF01); 国家重点研发计划项目 (2022YFC3800500)。

第一作者: 李进松 (1996—), 男, 工程师, 硕士, 从事海绵城市建设方面的研究。E-mail: 15638867273@163.com。

通信作者: 任梅芳 (1987—), 女, 高级工程师, 博士, 从事城市水文学方面的研究。E-mail: renmeifang@mail.bnu.edu.cn。

大的排水单元,从而实现有效优化城市径流管理。综上所述,目前大量研究集中于低影响开发建设效益评价,缺少对空间尺度上海绵设施优化配置分析,尤其是海绵设施不同空间布设方式条件下溢流风险评估。雨洪管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)作为基于水动力学的城市动态降雨-径流模型,能够有效模拟城市水文、管网汇流、水质演变及 LID 优化过程^[17-21]。因此,建立排水分区尺度的产汇流模型,研究 LID 设施空间分布对径流削减及面源污染控制效果的影响,对于缓解合流制溢流污染具有重要的理论与现实意义。

本研究以吴忠市第二污水处理厂服务片区为研究区域,构建了排水分区尺度的 SWMM 水质模型。通过设定下沉式绿地与透水铺装的面积占比,确定了源头控制措施的总规模,进而系统探讨了在总面积固定的前提下,不同 LID 空间布设方式对 CSO 的控制效果,最终提出了针对性的 LID 空间配置优化策略。研究有助于深入理解海绵设施空间布局方式与 CSO 控制之间的关系,以期为合流制地区海绵城市建设对城市溢流污染控制提供理论参考。

1 研究区概况

吴忠市位于宁夏回族自治区中部,地处黄河上游,属于干旱半干旱气候区,具有四季分明、降水集中的气候特征,研究区区位如图 1 所示。根据吴忠气象站 1995—2024 年日降雨量统计结果(数据来源:吴忠市气象局),中心城区多年平均降雨量为 191.2

mm,年最大降雨量为 288.7 mm,年最小降雨量为 64.8 mm,多年降雨量呈现缓慢上升趋势。降雨年内分配高度不均,表现出显著的季节性差异,其中 6—9 月的降雨量约占全年总量的 71%。

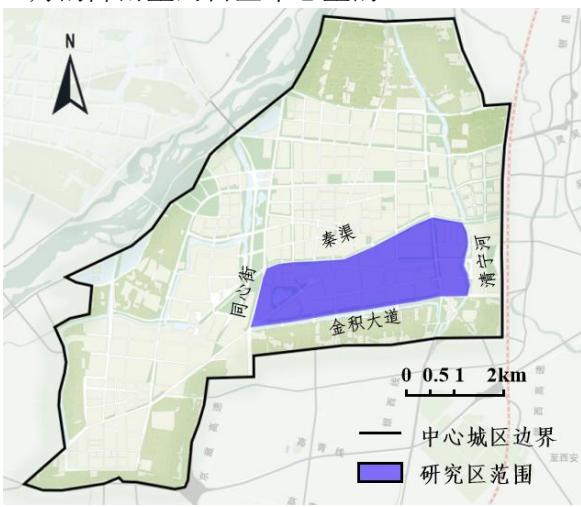
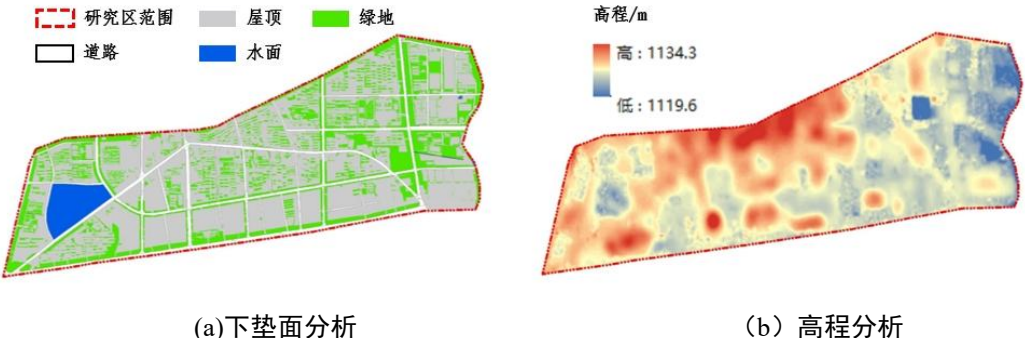


图 1 研究区区位图

Fig.1 Location map of the study area

吴忠市第二污水处理厂片区位于吴忠市南部,收水面积约 11.93 km²,其中合流制片区面积 9.94 km²,占比为 83.32%。考虑分流制片区由过河泵站提升至污水处理厂,汇水范围相对封闭且独立,据此,本文研究区域为 9.94 km² 合流制片区范围(以下片区范围均为合流制片区),如图 2 所示,片区内 66%为不透水表面(屋顶 53%、道路 13%),34%为透水区域(绿地、水面等)。根据实际管网、建筑物分布等直接进行人工划分子汇水区,以源头地块(小区、道路)为单元,进一步细分为 358 个子集水区,平均面积为 2.74 公顷。



(a)下垫面分析 (b) 高程分析

图 2 研究区概况

Fig.2 Overview of the study area

2 研究数据

2.1 降雨数据

本研究采用的降雨数据为 24 小时日降雨总量,为分析降雨的时间分布特征对 CSO 水量与典型污染物的影响,需获取时间分辨率更高的小时尺度降雨数据进行模拟。根据吴忠市气象局提供最新修编

暴雨强度公式(公式 1),采用芝加哥雨型分别推求设计降雨,雨峰系数采用 0.37。

$$q = \frac{268.252 \times (1 + 4.295 \lg P)}{(t + 5.004)^{0.741}} \quad (1)$$

式中: q 为短历时设计暴雨强度, L/(s·hm²); t 为降雨历时, min, 长历时时间取值范围为 1~1440min; P 为重现期。

2.2 空间数据

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 下载于国家地理数据云, 空间分辨率为 10 米^[22]。土地利用数据采用欧洲航天局 2021 年发布的 WorldCover 10 米分辨率地表覆盖数据集, 用于推求地表径流系数等参数^[22]。易涝点数据包括实测积水位置、积水面积与水深等信息, 由吴忠市市政建设管理中心提供, 通过野外实地勘察与监测获取。排水管网数据由吴忠市市政建设管理中心提供, 主要包括管网布局、拓扑结构、管道与雨水井之间的连接关系与流向规则, 以及排水管道与雨水井的详细参数。其中, 排水管道物理特征涵盖长度、管径 (最大直径为 2.0 m)、管渠形状 (圆管、方涵) 等; 雨水井参数包括井底标高、深度、进出口管径等^[22]。

3 研究方法

3.1 模型模拟方法

本研究构建了 SWMM 模型用于模拟研究区域内污水处理厂前的溢流情况^[23]。以子汇水区为产流计算单元, 每个子汇水区下垫面为透水区与不透水区的组合^[24]。考虑所有模拟都是以实际降雨数据为基础的, 因此, 本研究忽略了蒸发过程。

地表污染物的累积与冲刷过程分别通过饱和函数累积模型与指数冲刷函数模型进行模拟^[25-26], 根据土地利用类型, 将子汇水区分分为建筑物、绿地和道路 3 种类型。模型中采用的污染物累积与冲刷参数主要基于文献推荐值确定, 其时空变异性可能对模拟精度产生影响。

3.2 污染物浓度数据取值方法

3.2.1 污染物初始浓度

采用生化需氧量 (Biochemical oxygen demand, BOD₅)、总悬浮固体 (Total Suspended Solids, TSS)、化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)、总氮 (Total Nitrogen, TN)、总磷 (Total Phosphorus, TP) 和氨氮 (ammonia nitrogen, NH₃-N) 六种水体典型污染物用于研究溢流混合水水质变化情况。基于 SWMM 模型用户手册和吴忠市本地实测降雨条件下的污染物浓度数据, 最终确定天然雨水中 BOD₅、TSS、COD、TN、TP 和 NH₃-N 的初始浓度分别为 2、5、10、0.5、0.01、0.1 mg/L。上述浓度值作为模型降雨径流中污染物的初始背景浓度输入, 用于模拟天然雨水携带污染物的本底条件。

选择万达广场周边道路 (道路类型下垫面) 设置雨水采样点, 自采样点出流即开始采样, 并于径

流产生 0、5、10、15、30、45、60、90、120 min 进行后续采样, 2 h 后每间隔 30 min 采样一次, 直至降雨结束, 图 3 所示为 2025 年 7 月 18 日降雨 (雨强约 10 mm/h, 此前 12 天未下雨) 前 120 分钟 COD、TN 浓度变化曲线, 结果显示雨水冲刷效应较明显, 污染物浓度随降雨时间变化逐渐降低, COD、TN 平均浓度为 165 和 3.12 mg/L。以道路 COD 模型参数为例, 最大累积量为 90 kg/hm², 该降雨前 120 min 冲刷污染物总量占总累积量的约 40%, 符合初期雨水冲刷比例, 进一步证实模型所选参数合理性。

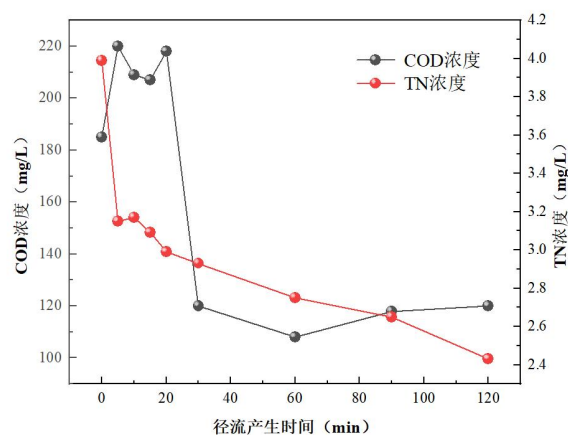


图 3 典型下垫面雨水径流污染物浓度变化图 (市政道路)
Fig.3 Variation of pollutant concentrations in stormwater runoff from a typical underlying surface (municipal road)

3.2.2 基础生活污水流量及污染物浓度

构建 SWMM 水质模型时将基础生活污水污染物作为 CSO 排放污染的主要来源。基于第二污水处理厂近三年的日常进水水量与水质监测数据, 通过统计分析旱季进水特征, 确定了该区域污水厂的年均处理规模及各污染物浓度水平, 旱季污水厂的平均进水流量为 162 L/s, BOD、TSS、COD、TN、TP 和 NH₃-N 的进水浓度均值分别为 205.40 mg/L、332.46 mg/L、301.14 mg/L、72.13 mg/L、5.92 mg/L 和 55.79 mg/L。

3.3 实验方案

为科学量化 LID 设施的布局策略及其水文响应, 选取下沉式绿地和透水铺装作为典型 LID 设施, 主要基于两方面考量: 其一, 气候适应性, 两类设施均能有效增强雨水下渗, 契合西北半干旱地区以蓄渗为核心的水文调控目标; 其二, 技术成熟性, 二者在国内工程实践中应用广泛, 相关设计与施工规范较为完善, 具备较强的工程代表性。其中, 下沉式绿地面积为 23.82 hm², 透水铺装面积为 25 hm², 重点探讨在 LID 空间配置对区域水文效应的影响。

研究以独立排水的子汇水区为基本单元, 在 LID 设施总面积恒定为 48.82 hm² 的约束下, 设计

了四种空间配置情景(图4所示)。方案1将全部LID设施集中布置于占研究区总面积1/5的局部区域(面积约1.988 km²);方案2、方案3和方案4分别将LID设施逐步分散至占研究区总面积2/5、3/5和4/5的区域,其中方案4实现了完全分布式布局,即按各子汇水区面积比例将LID设施均匀分配

至整个研究区。在空间实现方式上,借助SWMM模型的随机布置功能,在各方案对应的目标空间范围内自动随机分布LID单元,以模拟实际工程中LID设施分散、非均匀分布的特征,进而系统比较不同空间配置(从集中到分散)对径流削减及雨水调控效果的影响。

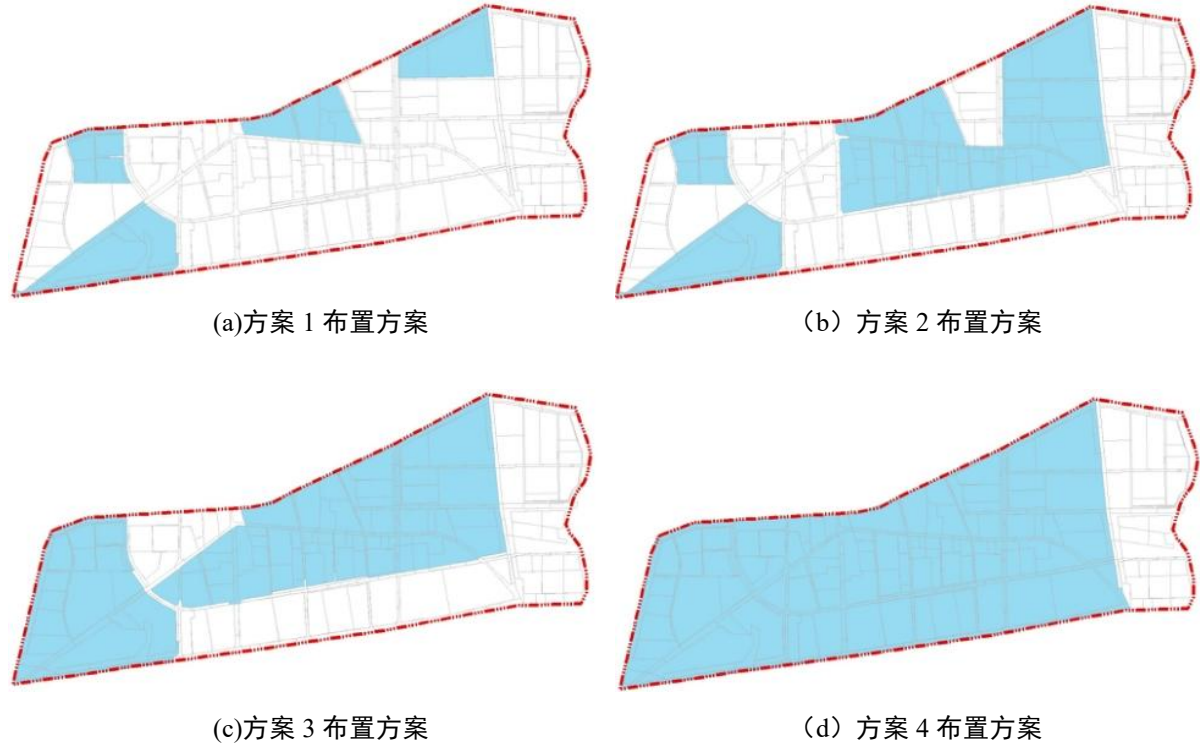


图4 LID设施布置方案示意图(蓝色为布置范围)

Fig.4 Layout plan of the LID practices (blue indicates the layout range)

3.4 模型率定与验证

由于缺乏研究区实测有效场次降雨径流数据,本研究采用实测地表积水点信息率定模型参数,基于吴忠市2022年7月10日场次降雨过程数据,及地表积水面积、最大积水深度等数据对模型参数进行率定。此暴雨条件下,研究区存在多处积水,其中,

福宁路与利通街交叉口积水区域积水面积可达8000 m²,最大积水深度达28 cm,经模型模拟,积水面积与最大积水深度模拟值与实测值的相对误差分别为5.14%和3.79%(表1所示),均在6%以内,表明本次模型参数选取基本合理^[27],具体计算值如下表所示:

表1 福宁路沿线积水区域模拟值与实测值对比一览表

Tab.1 Comparison of simulated and measured waterlogging depths along Funing road

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/%	实测积水深度/cm	模拟积水深度/cm	积水深度绝对误差/cm	积水深度相对误差/%
8000	8433	433	5.14	28	29.44	1.44	3.79

4 结果与分析

4.1 典型年溢流模拟结果与分析

针对典型年不同长历时降雨数据进行模拟分析,结果如表2所示,研究区域厂前溢流排口呈现显著的降雨响应特征。当24小时降雨量低于5.9 mm时,系统未观测到明显溢流现象,该降雨量可视为临界阈值。当降雨量超过临界阈值5.9 mm时候,厂前溢流开始发生,初始溢流量为0.014×10⁴ t,对应BOD₅、TSS、COD、NH₃-N、TP、TN的溢

流负荷量分别为7.65 kg、13.52 kg、32.56 kg、1.12 kg、0.32 kg和4.69kg,归结于低降雨量条件下,污水处理厂的处理能力与合流管网容量尚有充足容量,因此能够对入流雨水进行完全处理,使得溢流排口的水量与污染物负荷均维持在较低水平。当最大日降雨量提高至37.9 mm时,溢流量为7.86×10⁴ t,对应BOD₅、TSS、COD、NH₃-N、TP、TN的溢流负荷量分别为2140.91 kg、3404.47 kg、4187.60 kg、181.07 kg、10.57 kg和328.27 kg,这种非线性增长关系揭示了合流制管网系统在极端降

雨事件中的典型响应模式,即污水处理厂在应对瞬时水力冲击负荷时,其缓冲容量与处理能力的双重约束导致必须通过进水阀门调控与溢流排放协同

作用来维持系统稳定性,从而也造成了城市水体的严重污染。

表 2 不同降雨量条件下溢流量及污染物负荷量一览表

Tab.2 Summary of overflow volume and pollutant load under different rainfall conditions

降雨量/mm	溢流量/ (10 ⁶ L)	污染物负荷量					
		BOD ₅ /kg	TSS/kg	COD/kg	NH ₃ -N/kg	TP/kg	TN/kg
37.9	78.63	2140.91	3404.47	4187.60	181.07	10.57	328.27
20.8	59.17	1170.46	2466.62	3827.08	86.47	6.93	189.65
11.3	24.70	290.58	1004.07	2314.82	62.07	1.49	135.89
5.9	0.14	7.65	13.52	32.56	1.12	0.32	4.69

注：表中列出的降雨量数值为从研究区域典型年降雨序列中筛选出的几场代表性实测日降雨事件的累计降雨量

4.2 源头控制措施对合流制溢流总量控制效果分析

基于 SWMM 模型对 5.9、11.3、20.8、37.9 mm 降雨量共 4 种不同降雨量情景进行模拟分析,重点对比方案 1（集中式布局）与方案 4（分布式布局）的溢流控制效果。模拟结果如图 5 所示,在不同降雨条件下,源头措施的空间布局对 CSO 控制影响显著。当降雨量为 11.3 mm 时,方案 4 较方案 1 减少溢流量 0.97 万吨,削减率（均为相较于空白组）由 14.98%提升至 54.25%;随着降雨量增至 37.9 mm,两方案溢流量差值降低至 0.64 万吨,方案 4 仅保持 8.14%的削减优势,不同布局方案的效能差异显著减小。原因归结于 LID 设施调蓄功能随着降雨量逐渐饱和,如在小雨强事件（降雨量为 11.3 mm）中,模拟结果显示,下沉式绿地和透水铺装的蓄水层充满度在降雨峰值期间仅达到 70%-80%,但仍保留部分调蓄容量;而在大雨强事件（降雨量为 20.8 mm）中,多数 LID 设施的蓄水层在降雨中前期即迅速达到并维持近 100%的充满度,表明其调蓄能力已完全饱和,因此源头 LID 设施对缓解下游管网流量压力作用已无明显区别。这一现象揭示了绿色基础设施的空间布局效应具有显著的降雨量级依赖性,即当降雨强度超过系统设计容量时,空间优化带来的边际效益逐渐减弱。

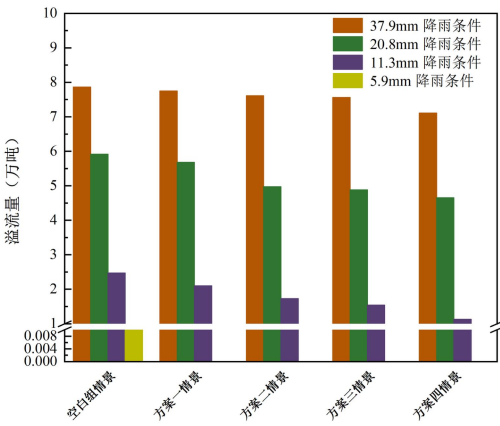


图 5 不同方案和降雨量情景下溢流量统计图

Fig.5 Overflow volume under different schemes and rainfall scenarios

4.3 源头控制措施对合流制排放口污染物排放量控制效果分析

以 20.8mm 降雨情景为例,探究不同布局模式情景下径流输出特征受降雨条件的影响。径流污染物输出总量如表 3 所示,在集中式布局（方案一）条件下,BOD₅、TSS、COD、NH₃-N、TP 和 TN 的平均削减率仅为 6.27%、7.89%、8.27%、6.34%、5.05%和 6.32%。与之形成鲜明对比的是,分布式布局(方案四)情景下的对应污染物削减率显著提升,分别达到 30.08%、30.43%、31.90%、32.38%、27.13%和 29.81%,削减效率提升幅度依次为 23.81%、22.55%、23.63%、26.04%、22.08%和 23.49%,这归因于分布式布局策略有效延长了雨水径流迁移路径与滞留时间,促进 LID 设施对 BOD₅、TSS、COD 等有机污染物及 NH₃-N、TP、TN 等营养盐的系统性削减。

表 3 20.8mm 降雨条件下不同工况污染物负荷总量一览表

Tab.3 Summary of total pollutant load under different operating conditions with 20.8 mm rainfall

工况	污染物负荷量					
	BOD ₅ /kg	TSS/kg	COD/kg	NH ₃ -N/kg	TP/kg	TN/kg
空白组	1170.46	2466.62	3827.08	86.47	6.93	189.65
方案 1	1097.05	2272.11	3510.60	80.99	6.58	177.66
方案 2	910.882	1897.02	2919.74	65.42	5.62	147.71
方案 3	866.13	1823.48	2810.76	60.88	5.34	139.42
方案 4	818.41	1716.01	2606.21	58.47	5.05	133.11

以 COD 为例,不同情景下针对 20.8 mm 降雨事件开展的径流与污染物输出过程模拟结果如图 6 所示。随着 LID 设施空间布局广度的增加,相同时间序列下的排水污染物浓度显著降低。其峰值浓度约为 63 mg/L,相较于无 LID 措施情景降低了约 34%,与前文所述的污染物总量变化规律一致。此外,相比无 LID 情景,从方案一到方案四,污染物出口浓度峰值出现时间逐渐推迟,其中方案四的延迟效应最为显著,峰值出现在第 9.3 小时(基准情景下峰值时间为第 9 小时),峰现时间推迟了 3.3%。该现象主要源于随着 LID 设施空间布设范围的扩大,地表径流得以在更广的区域内被截留和处理,从而延长了水文响应时间,推迟了峰值形成;同时,LID 设施通过物理过滤、生物降解等机制有效去除了污染物,导致浓度峰值显著降低,该结果进一步证实了扩大 LID 设施的空间覆盖范围不仅有助于削减污染负荷,还能调节径流过程,延缓峰现时间,对城市雨水管理具有积极意义。

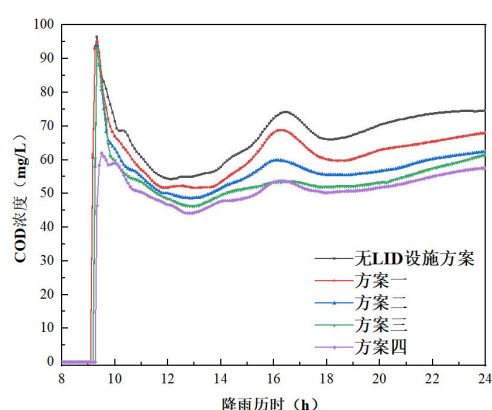


图 6 20.8mm 降雨条件下不同工况 COD 浓度变化曲线图

Fig.6 Variation curves of COD concentration under different working conditions for a rainfall of 20.8 mm

5 结论

本研究以吴忠市第二污水处理厂服务片区为研究对象,基于 SWMM 模型,在典型年长历时降雨条件下,系统评估了以渗透、蓄滞功能为主的 LID 技术对 CSO 污染的控制效果,重点分析了不同降雨条件及 LID 空间分布格局对溢流量与污染物负

荷的调控机制。

1) LID 设施对 CSO 污染的控制效果受降雨强度和空间布局共同影响。在 LID 总面积固定条件下,将其布置范围从占研究区面积的 1/5 扩大至 4/5 时,模型模拟条件下,各 LID 情景对径流总量及污染物负荷的削减呈现显著上升的相对趋势,然而,该过程伴随明显的“调蓄饱和”特征,即当布设范围超过总面积 3/5 后,单位面积 LID 的边际削减效益开始递减。

2) 在 LID 总面积固定条件下,分布式布局的整体削减效果优于集中式布局。实际工程中需综合权衡用地整合、运维成本及产权协调等因素,以经济与环境综合效益最优为目标进行方案比选。

3) 在西北半干旱地区,中小降雨事件下优化 LID 空间布局可显著提升径流与污染控制效益;高强度降雨事件下则应注重源头 LID 与末端调蓄设施的协同作用,审慎评估单一布局优化的边际效益。

需要指出的是,本研究构建的数值模型在一定程度上受限于实测数据样本量与监测周期的完备性。受城市排水管网及汇水区实测径流与水质同步连续监测数据的可得性限制,模型在率定与验证环节仍存在进一步优化的空间,部分 LID 设施参数参考了技术手册及相关文献的推荐值。因此,本研究得出的径流总量与污染物负荷削减率是在当前模型假设与参数设置条件下模拟计算的结果,反映了不同 LID 布设情景下的相对效能差异与变化趋势,其绝对值不宜直接等同于实际工程建成后的全生命周期精确预期值。未来研究需依托更长期的现场实测数据对模型进行动态校正与不确定性分析,以进一步提升定量评价的精确度。

参 考 文 献

- [1] Tanaka T,Kiyohara K,Tachikawa Y.Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset:a case study in Nagoya,Japan[J].Journal of Hydrology,2020,584:124706.
- [2] 张金萍,李玉达,左其亨,等.城市洪涝应急响应能力评价及优化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学

- 版),2024,45(4):8-15.[Zhang Jinping,Li Yuda,Zuo Qiting,et al.Evaluation and Optimization of Urban Flood Emergency Response Capacity[J].Journal of North China university of water resources and electric power(natural science edition),2024,45(4): 8-15.]
- [3] 杨康达,胡成,李亚峰,等.黄河下游某市 LID 削减城市溢流污染优化研究[J].水电能源科学,2025,43(3):46-50.[Yang Kangda,Hu Cheng,Li Yafeng,et al.LID Optimization Research on Reducing Urban Overflow Pollution of a City in the Lower Reaches of the Yellow River[J].Water Resources and Power,2025,43(3): 46-50.]
- [4] 牟晋铭,耿晓酒.上海典型合流制排水系统溢流污染控制策略 [J]. 净 水 技 术 ,2024,43(10):154-159.[Mou Jinming,Geng Xiaosa.Coutermeasures of Overflow Pollution Control for Typical Combined Drainage System in Shanghai[J].Water Purification Technology,2024,43(10): 154-159.]
- [5] Guo Zhou,Zhang Xiang,Winston R,et al.A holistic analysis of Chinese sponge city cases by region: using PLS-SEM models to understand key factors impacting LID performance[J].Journal of Hydrology,2024,637:131405.
- [6] Wei Ying,Cao Xinyu,Li Jianing,et al.Greenhouse gas, water, and economic implications of permeable pavements: quantification for pilot sponge cities in China[J].Journal of Cleaner Production,2024,471:143424.
- [7] Essamlali I,Nhaila H,El Khaili M.Optimizing runoff and pollution mitigation through strategic low-impact development (LID) integration in the Bouznika city development plan[J].Case Studies in Chemical and Environmental Engineering,2024,10:100838.
- [8] Tan Yuqing,ChengQiming,Lyu Fengwei,et al.Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: a case in university campus[J].Journal of Environmental Management,2024,349:119599.
- [9] Wang Ting,Wang Huimin,Wang Zhiqiang,et al.Dynamic risk assessment of urban flood disasters based on functional area division: a case study in Shenzhen, China[J].Journal of Environmental Management,2023,345:118787.
- [10] Zhu Yifei,Xu Changqing,Yin Dingkun,et al.Environmental and economic cost-benefit comparison of sponge city construction in different urban functional regions[J].Journal of Environmental Management,2022,304:114230.
- [11] Yang Boyuan,Zhang Ting,Li Jianzhu,et al.Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, north China[J].Journal of Environmental Management,2023,334:117442.
- [12] 赵宇桑,詹雨尘.SWMM 模型耦合 MOPSO 算法优化配置大型城市绿地海绵设施 [J]. 水 资 源 开 发 与 管 理 ,2024,10(9):15-23.[Zhao Yusang,Zhan Yuchen.Optimization of Large Urban Green Space Sponge Facilities Using the SWMM Model Coupled with the MOPSO Algorithm[J].Water Resources Development and Management,2024,10(9): 15-23.]
- [13] 张沛林,杨建涛,王森,等.基于 SWMM 模型的海绵城市建设效果评估[J].中国农村水利水电,2025(1):70-77.[Zhang Peilin,Yang Jiantao,Wang Sen,et al.Evaluation of Sponge City Construction Effect Based on SWMM Model[J].China Rural Water and Hydropower,2025(1): 70-77.]
- [14] 周昕,高玉琴,吴迪.不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J].水资源保护,2021,37(3):26-31,73.[Zhou Xin,Gao Yuqin,Wu Di.Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures[J].Water Resources Protection,2021,37(3): 26-31,73.]
- [15] 吴京戎,方舒婷.LID 组合设计对径流影响及成本效益分析[J].水电能源科学,2022,40(9):35-39.[Wu Jingrong,Fang Shuting.Analysis of Runoff Impact and Cost Benefit of LID Combination Design[J].Water Resources and Power,2022,40(9):35-39.]
- [16] Fu Xin,Hopton M E,Wang Xinhao,et al. A runoff trading system to meet watershed-level stormwater reduction goals with parcel-level green infrastructure installation [J] . Science of The Total Environment,2019,689 : 1149-1159.
- [17] 张金萍,张朝阳,左其亭.郑州“7·20”极端降雨的城市内涝模拟及风险评估[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(2):1-7.[Zhang Jinping,Zhang Chaoyang,Zuo Qiting,et al.Urban waterlogging simulation and risk assessment of “7 • 20” extreme rainfall in Zhengzhou[J].Journal of North China university of water resources and electricpower(natural science edition),2023,44(2):1-7,63.]
- [18] 高佳玉,李家科,刘柯涵,等.SWMM 的模型改进和耦合应用研究进展 [J]. 中 国 给 水 排 水 ,2025,41(4):39-48.[Gao Jiayu,Li Jiake,Liu Kehan,et al.Research Progress on Refinement and Coupling of Storm Water Management Model(SWMM)[J].China Water & Wastewater,2025,41(4): 39-48.]

- [19] 翁时超.基于 SWMM 模型的海绵城市措施效果模拟分析:以坡地小区为例[J].净水技术,2025,44(2):166-173.[Weng Shichao.Simulation Analysis of Effectiveness of Sponge City Measures Based on SWMM Model:Case of a Sloping Landform Community[J].Water Purification Technology,2025,44 (2): 166-173.]
- [20] 海永龙,郁达伟,魏源送,等.北运河上游降雨演变特征对合流制溢流的影响[J].中国给水排水,2024,40(7):123-129.[Hai Yonglong,Yu Dawei,Wei Yuansong,et al.Effect of Rainfall Evolution Characteristics on Combined Sewer Overflows in the Upstream of North Canal[J].China Water & Wastewater,2024,40(7): 123-129.]
- [21] 李庆,蔡然,王文亮,等.城市复合区域合流制溢流量对降雨特征的响应:基于截污工程的分析[J].环境工程学报,2025,19(3):717-726.[Li Qing,Cai Ran,Wang Wenliang,et al.Impact of rainfall characteristics on combined sewer overflow volume in an urban complex area: A pollution interception project study[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2025,19(3): 717-726.]
- [22] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等.海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深-流速联合分布特征[J].水资源保护,2025,41(1):76-84.[Shu Xinyi,Xu Zongxue,Ye Chenlei,et al.Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities[J].Water Resources Protection,2025,41(1):76-84.]
- [23] 海永龙,佃柳,郁达伟,等.降雨特征对合流制管网溢流污染的影响[J].环境工程学报,2020,14(11):3082-3091.[Hai Yonglong,Dian Liu,Yu Dawei,et al.Effect of rainfall on the pollution characteristics of combined sewer overflows[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2020,14(11): 3082-3091.]
- [24] Qin Huapeng,Li Zhuoxi,Fu Guangtao.The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics[J].Journal of Environmental Management,2013,129:577-585.
- [25] 胡良宇,戎贵文,汪星,等.初期弃流后板房屋面雨水污染物质量浓度衰减规律[J].水资源保护,2021,37(3):102-107.[Hu Liangyu,Rong Guiwen,Wang Xing,et al.Attenuation rule of rainwater pollutant concentration on slab roof after split-flow of first flush runoff[J].Water Resources Protection,2021,37(3) : 102-107.]
- [26] 张湖川.海绵城市建设初期雨水径流污染特征及削减率研究[D].重庆:重庆理工大学,2019.[Zhang Huchuan.Study on Pollution Characteristics and Reduction Rate of Initial Rainfall Runoff in Sponge City Construction[D].Chongqing: Chongqing University of Technology,2019.]
- [27] 侯精明,栾广学,王添,等.“灰绿”协同措施对银川市合流制溢流污染的影响[J].水资源保护,2022,38(3):43-49,86.[Hou Jingming,Luan Guangxue,Wang Tian,et al. Influence of “grey-green” synergistic measures on combined sewer overflow pollution in Yinchuan City[J].Water Resources Protection,2022,38(3): 43-49,86.]

Optimization of LID Spatial Configuration and Benefit Assessment for Combined Sewer Overflow Pollution Control

Li Jinsong^{1,2},Ren Meifang^{1,2},Tian Chuan²,Ma Jinlai³,Rao Yuanhao¹,Liu Yuxiang³

(1.Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 2.China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100037, China; 3.Center of Wuzhong Construction Management, Wuzhong 751199, China)

Abstract: **【Objective】** This study aimed to reveal the control potential of low impact development (LID) techniques on combined sewer overflow (CSO) pollution under specific conditions, and to provide a theoretical basis and practical reference for sponge city construction and CSO control in semi-arid regions of Northwest China. **【Methods】** Taking the service area of the Second Wastewater Treatment Plant in Wuzhong City as an example, simulations were conducted based on the SWMM model and long-term rainfall data of a typical year. The responses of overflow discharge and pollutant loads under different rainfall scenarios were analyzed, with a particular focus on the impact of LID spatial layout on its reduction efficiency. **【Results】** (1)A critical rainfall threshold of 5.9 mm for overflow occurrence was identified; beyond this threshold, both overflow volume and pollutant loads exhibited a sharp nonlinear increase. When the 24-h rainfall increased

from 5.9 mm to 37.9 mm, the overflow volume rose from 0.014×10^4 t to 7.86×10^4 t. (2) Under a 20.8 mm rainfall event, with the total LID area fixed, expanding the spatial distribution range significantly improves CSO control performance: when the deployment range increases from 1/5 to 4/5 of the study area, the maximum overflow reduction rate increases from 4.01% to 21.41%. (3) Under the optimal layout of the same rainfall event, the average reduction rates for BOD₅, TSS, COD, NH₃-N, TP, and TN are 30.08%, 30.43%, 31.90%, 32.38%, 27.13%, and 29.81%, respectively. **【 Conclusion 】** Widespread deployment of LID technologies offers greater advantages in reducing combined sewer overflows than centralized placement. It is recommended that sponge city planning and construction in semi-arid regions prioritize decentralized and systematic LID layouts to enhance the overall control capacity for rainfall runoff and non-point source pollution.

Keywords : CSO; Non-point source pollution monitoring; Storm Water Management Model (SWMM); LID spatial distribution; Sponge city