

文章编号:1671-6833(2024)04-0087-08

LID 设施布局对城市径流与污染负荷影响评估

窦明¹, 闫佳佳¹, 王 偲², 关 健³, 李桂秋¹, 侯进进⁴

(1. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 江苏省水文水资源勘测局 南通分局, 江苏 南通 226006; 3. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450018; 4. 水利部长江水利委员会 长江科学院, 湖北 武汉 430012)

摘要: 关于低影响开发(LID)空间布局对水量水质控制效果影响的研究较为缺乏。针对上述问题,以郑州市中原区为对象,基于 SWMM 模型原理构建建设 LID 设施的研究区城市水量水质模型。所提模型依据城市综合径流系数的经验值以及研究区实际情况,将中原区划分为城市建筑高、中、低密集区,并在研究区高、中、低密集子汇水区布设不同比例的 LID 设施(S1~S5),计算不同雨量级别下不同空间格局下的 LID 设施对水量水质的控制效果。结果表明:随着雨量级别的增大,LID 方案的径流总量削减率、峰值流量削减率和 TSS 负荷削减率不断减小。在降雨级别为暴雨、大雨和中雨时,在高、中、低密集子汇水区布设占比分别为 35%、35%和 30%的 LID 方案(S5),其径流总量削减率超过 80%,峰值流量削减率超过 70%,且 TSS 负荷削减率超过 50%。从各事件下水量与水质综合指标评估来看,该方案表现最佳。

关键词: SWMM 模型; LID 设施空间布局; 径流总量削减率; 管段超载; TSS 负荷削减率

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.04.012

随着经济发展和持续的城市化,城市区域地面硬化率提高,从而造成径流系数增大,城市面源污染愈发严重,并引发城市路面积水、水体黑臭现象,对人们的生活产生了严重影响^[1]。因此,需要采取有效的城市水系统调控措施,减轻对经济和居民的不利影响。目前国内外在城市雨洪应对方面研究侧重点正逐渐从传统的灰色基础设施过渡到可持续低影响开发(low impact development, LID)实践^[2],这为缓解城市雨洪和水质问题提供了途径。

SWMM 是一种广泛应用于区域洪峰流量削减效果评估、水量水质控制效果评估、LID 设施的成本效益研究^[3-5]等方面的暴雨管理模型。关于 LID 的优化布设研究,王婷等^[6]利用 SWMM 模型研究了不同 LID 占比(0.1%~15%)对径流控制的影响;Eck-art 等^[7]开发了耦合优化模拟模型,对不同类型的 LID 组合方案进行研究;黄铁兰等^[8]利用 ArcGIS 和 SWMM 模型来模拟不同设计降雨条件下地表径流和管道溢流的结果,预估 LID 设施的经济和效益成本;杜颖恩等^[9]通过构建沔西新城 SWMM 模型考察了单一 LID 设施(雨水花园)在汇水区域上、中、下

游位置不同空间布设下的径流量控制和径流污染负荷削减性能。

大量文献提供了城市 LID 设施的科学规划方案,其中,以考虑 LID 铺设数量对径流的影响和不同 LID 组合类型优化的研究为多数,而 LID 空间布局对城市水量水质结果的影响研究尚在起步阶段。郑州市中原区境内水系众多,该区雨水经过管网汇流最终排入贾鲁河干流,影响其水量水质,降低该区的内涝风险、控制河流面源污染,对改善城市水文循环系统具有重大意义。本文基于 GIS 和 SWMM 构建了雨洪模型,根据各个子汇水区的综合径流系数将中原区划分为高、中、低密集区,探索在 LID 设施种类与 LID 布设面积完全相同时,调整 LID 设施空间布局对中原区雨水径流量与径流水质的影响,并通过比较分析选出最优方案。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

郑州市地处河南省中北部,多年平均降水量 632.4 mm,降水集中在 6~8 月份,区域内总体地势

收稿日期:2024-01-30;修订日期:2024-03-24

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(21A570008);河南省科技攻关项目(222102320211)

作者简介:窦明(1975—),男,山东桓台人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事水资源与水环境研究,E-mail:dou_ming@163.com。

引用本文:窦明,闫佳佳,王偲,等. LID 设施布局对城市径流与污染负荷影响评估[J]. 郑州大学学报(工学版),2024,45(4):87-94. (DOU M, YAN J J, WANG C, et al. Assessment of the impact of LID facility layout on urban runoff and pollution loads[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(4): 87-94.)

西南高、东北低。作为国家中心城市,其城镇化水平高达 82%,但排水管网能力整体较低,排水防涝基础设施规划建设不足^[10],一旦遭遇暴雨或强降雨,易发生雨涝灾害,如郑州“7·20”特大暴雨内涝灾害,极大损害了人民生命与财产安全。中原区面积 193 km²,境内河流有贾鲁河(西流湖段)、须水河水系,该区降雨通过雨水管网汇集最终排入贾鲁河干流后流出郑州市。中原区下辖的高新技术产业开发区是中国中部颇具竞争力的高新技术产业高地,因此选择郑州市中原区为研究区(见图 1)。

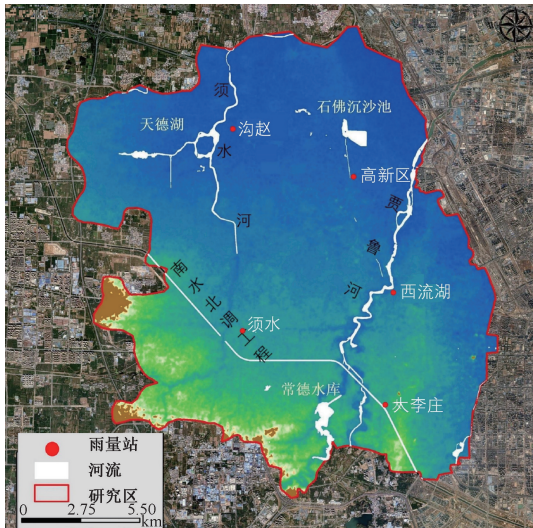


图 1 中原区流域边界、雨量站和数字地形模型
Figure 1 Zhongyuan District watershed boundaries, rainfall stations and digital terrain model

1.2 数据来源

SWMM 输入数据包括排水管网资料、高程数据 (DEM)、气象数据以及子汇水分区相关参数 (如坡度、特征宽度、面积等)。管网资料来源于《郑州市排水工程规划 (2011—2020)》,排水管道主要为圆管且管径为 0.6~1.4 m。本文选取了研究区内降雨数据完整、位置均匀分散的 5 个雨量站,分别为沟赵、须水、高新区、西流湖、大李庄雨量站,降雨资料为 5 个雨量站实测每小时降雨量摘录数据,由郑州市水利局提供。DEM 数据来源于中国科学院地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。根据遥感影像解译将研究区域划分为草地、林地、建设用地、耕地、水体和未利用地等 6 种土地利用类型。研究区域土地利用情况见图 2。

2 研究方法

2.1 研究思路

首先,根据研究区域遥感影像解译土地利用数据,并根据高程数据提取子汇水区不透水率等属性,

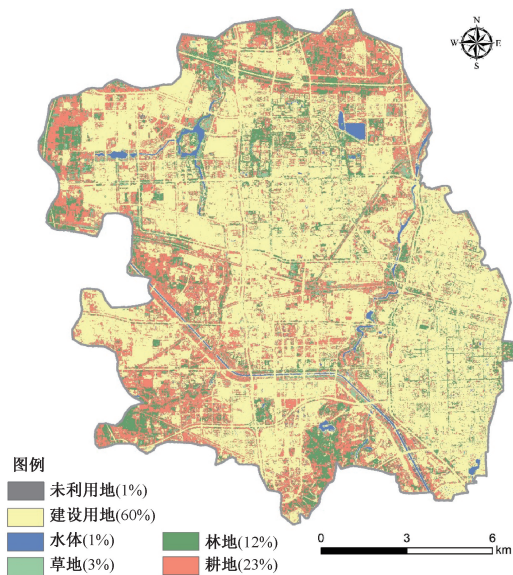


图 2 研究区土地利用
Figure 2 Land use of study area

结合管网数据建立 SWMM 模型;其次,根据综合径流系数划分出高、中、低密集子汇水区,设计不同空间布局的 LID 方案,建立 LID 设施调控作用下的城市水量水质模型;最后,对不同 LID 方案进行模拟,选择径流总量削减率、峰值流量削减率、超载管段削减率、TSS 负荷削减率为指标评估 LID 方案对水量水质结果的影响。模型汇流过程采用非线性水库法,下渗模型采用径流曲线 (SCS-CN) 法。SCS-CN 法适用于下垫面、土壤类型复杂多样的地区^[11],中原区下垫面条件复杂,因此该方法能较好地体现该研究区的下渗作用。管网水动力过程模拟采用动态波的流态形式,径流污染负荷的累积方程与冲刷方程均采用指数函数。本文模拟方案均为场次暴雨过程,因此蒸散发损失的水量可以忽略不计。

2.2 SWMM 模型构建

2.2.1 研究区概化

合理划分子汇水区是提高城市径流过程模拟精度的关键。利用 ArcGIS 软件,基于 DEM 数据计算栅格的平均坡度;参照管网节点粗略概化子汇水区,根据雨水管网走向和街道分布进行人工调整,并求各子汇水区的平均坡度;最后利用 SWMM 模型对子汇水区进行概化。利用 ArcGIS 收集到的排水管网数据进行拓扑,并简化支管和部分节点,以此对管网进行概化,将河道概化为管线,实测易涝点处尽可能减少概化,保证管网上下游连接、埋深、坡度等方面的合理性,子汇水区由最近的雨量计分配降雨。最终将研究区概化为 281 个子汇水区,312 个节点,184 个管段和 12 个排水口。中原区排水系统 SWMM 模型概化情况见图 3。

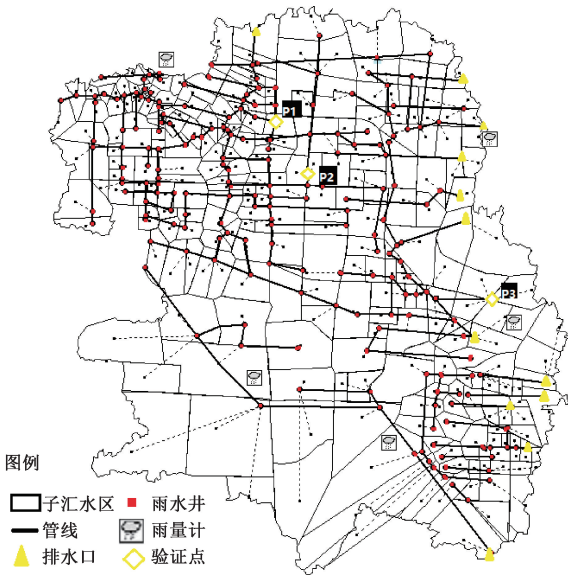


图 3 SWMM 模型概化

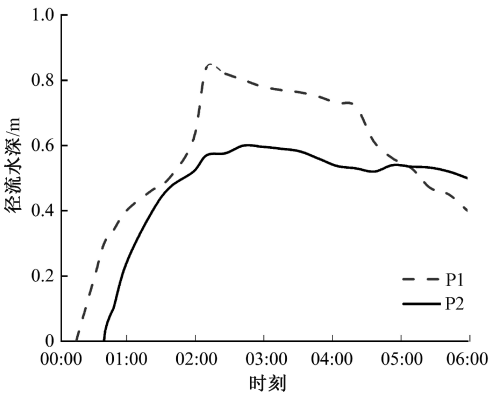
Figure 3 SWMM model generalization

2.2.2 模型率定与验证

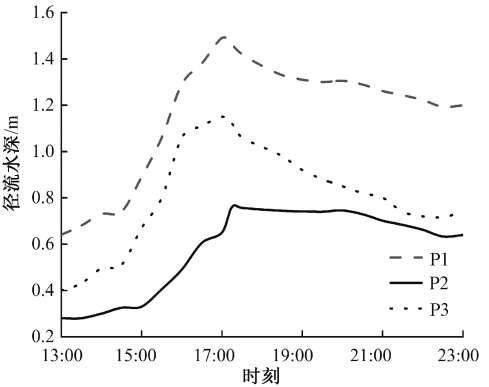
SWMM 模型中参数可分为确定性参数和不确定性参数,确定性参数可以通过对已有的资料进行技术处理得到,如子汇水区的面积、平均坡度、不透水率等。不确定性参数通过率定确定,本文采用 Morris 筛选法^[12]进行参数敏感性分析,选取验证点径流水深作为目标函数。模型率定期采用 20170812 降雨,验证期采用 20210720 暴雨。降雨数据来自位于研究区域内(图 3)的雨量的 1 h 分辨率降雨数据。

模拟径流水深过程如图 4 所示,模拟与实测指标统计结果见表 1。P1、P2、P3 这 3 个积水点的模拟水深均小于观测水深,率定期平均误差 AE 为 0.025 m;平均相对误差 RE 为 3.33%,观测值与模

拟值的相对误差 RE 小于 20%,故认为模型率定模拟结果精度较好^[13]。验证期选定的积水点的模拟径流深的 AE 平均为 0.05 m;RE 的绝对值不超过 5.00%,平均相对误差为 4.40%,故认为验证模拟精度较好。水质参数取值参考 SWMM 用户手册和文献^[14-15],取值见表 2。



(a) 率定期



(b) 验证期

图 4 率定期与验证期模拟径流过程线

Figure 4 Simulation results of runoff hydrograph in calibration and verification periods

表 1 积水点的模拟水深和实测水深的对比

监测点	20170812				20210720			
	H_s/m	H_M/m	AE/m	$RE/\%$	H_s/m	H_M/m	$AE/\%$	$RE/\%$
P ₁	0.85	0.82	0.03	3.53	1.55	1.49	0.06	4.02
P ₂	0.62	0.60	0.02	3.23	0.80	0.76	0.04	5.00
P ₃	—	—	—	—	1.20	1.15	0.05	4.17

表 2 水文参数取值

参数	率定值	参数	率定值
特征宽度/m	$0.3\sqrt{area}$	河道糙率	0.030
不透水曼宁系数	0.022	不透水区洼蓄量/mm	3.4
透水曼宁系数	0.181	透水区洼蓄量/mm	6.8
管道糙率	0.014	干燥所需天数/d	4

2.3 LID 方案

2.3.1 子汇水区综合径流系数计算

LID 方案根据子汇水区综合径流系数设置,依据 GB 50014—2021《室外排水设计标准》^[16]中城市综合径流系数 φ 的经验值以及研究区实际情况,本文将中原区划分为城市建筑高 ($0.75 < \varphi \leq 1$)、中 ($0.62 < \varphi \leq 0.75$)、低 ($0.35 < \varphi \leq 0.62$) 密集区。综合径流系数为不同种类下垫面雨量径流系数与面积

占比的加权平均值:

$$\varphi=\frac{\sum\left(\varphi_{c i} \cdot F_i\right)}{\sum F_i} .$$

(1)

式中: $\varphi_{c i}$ 为某一类下垫面场均雨量径流系数; F_i 为某一类下垫面的面积, m^2 。

2.3.2 LID 方案设计

本研究设置了 6 个方案,基线方案(S0)无 LID 设施;不同种类 LID 设施占比分别为绿色屋顶 60%、透水铺装 70%、雨水花园 20%。S1~S5 方案中 LID 总面积保持不变,区别在于 LID 的空间分布不同:S2、S3、S4 这 3 种方案强调 LID 设施主要铺设在密集程度较高的区域;S5 方案更考虑 LID 设施在研究区的均匀布设;S1 方案处于两者之间,具体方案设置见表 3。模型中不同种类 LID 设施的参数取值参考中国其他海绵城市研究^[17-18]以及 SWMM 手册的指导(见表 4)。根据方案设计对 LID 模式下城市水量水质进行模拟,用熵权法确定各指标权重,用效益评估法(TOPSIS)进行多目标决策分析。

表 3 6 种方案的 LID 控制占比

Table 3 Proportion of LID control in six schemes

子汇水区	LID 占总数比例/%					
	S0	S1	S2	S3	S4	S5
高密集子汇水区	0	50	50	50	45	35
中密集子汇水区	0	20	40	45	45	35
低密集子汇水区	0	30	10	5	10	30

表 4 LID 设施参数

Table 4 LID facility parameters

LID 类型	表面		路面		土壤		导水率/ (mm·h ⁻¹)
	护堤 高度 /mm	植被	厚度	不渗透	厚度	萎蔫点	
		容积	/mm	表面	/mm		
绿色屋顶	75	0.1	150	0.3	150	0.047	72
透水铺装	5		150	0.3			
雨水花园	300	0.1	150	0.3	150	0.047	72

3 结果与讨论

3.1 径流与污染负荷模拟结果分析

3.1.1 径流总量与峰值流量分析

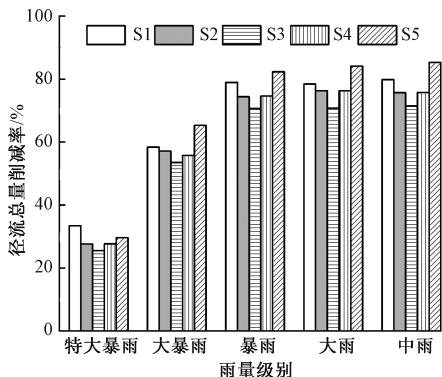
实验输入的 5 场降雨见表 5。通过 SWMM 对 6 种方案的模拟发现,基线方案(S0)下,雨量级别由大到小的径流率分别为 88.3%、75.5%、60.6%、55.5%、47.2%,而布设 LID 设施的方案(S1~S5)相比于 S0 的径流总量分别削减了 29.8%~34.1%、53.5%~65.1%、70.6%~82.3%、70.5%~84.1%、71.5%~85.3%,不同雨量下径流总量削减率见图 5。

由图 5 可知,随着雨量级别的增加径流总量削减率逐渐减小,在“7·20”特大暴雨期间,各方案径流总量削减率均不足 35%,因此在极端降水事件中,城市需要 LID 与灰色基础设施形成灰色骨架绿色纽带结构抵御灾害;在暴雨、大雨与中雨期间,所有方案的径流总量削减率都达到了 70%,其中 S3 方案表现最差。在“7·20”特大暴雨期间,S3 方案中高、中密集区大量的 LID 降低了高、中密集子汇水区的径流系数,径流系数平均为 0.60、0.70,但低密集区由于 LID 设施比例小,雨水无法快速入渗使得汇流量远大于下渗量,在低密集子汇水区的径流系数方案高于其他方案,径流系数平均为 0.82、0.67,且在这些区域的径流增加量高于高、中密集区径流削减量。

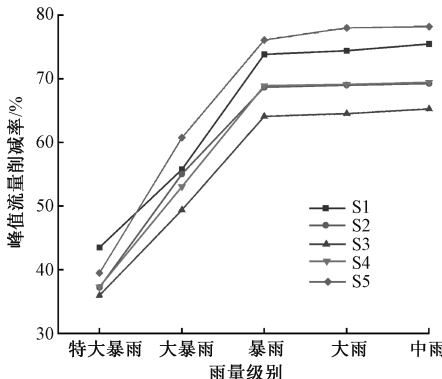
表 5 输入降雨数据

Table 5 Input rainfall data mm/d

降雨场次	雨量级别	研究区平均降雨量
20210720	特大暴雨(≥250)	458.7
20210719	大暴雨[100, 250)	138.8
20200806	暴雨[50, 100)	63.9
20190809	大雨[25, 50)	38.0
20200711	中雨[10, 25)	18.3



(a) 径流总量削减率



(b) 峰值流量削减率

图 5 不同雨量级别下 S1~S5 方案径流总量削减率与峰值流量削减率

Figure 5 Total runoff reduction rate and peak flow reduction rate at different rainfall levels in S1-S5 schemes

不同空间分布的 LID 方案各雨量级别峰值流量削减效果见图 5。通过与基线方案比较,评估了 S1~S5 这 5 种不同方案的水文响应。结果表明,雨量级别由大到小的径流峰值流量削减率分别为 35.9%~43.5%、48.4%~60.7%、64.1%~74.1%、64.5%~78.0%和 65.2%~78.2%,随着雨量的减小,峰值流量削减率逐渐增加,在特大暴雨与大暴雨期间,各方案峰值流量削减效果均不好,但在雨量降低后 S1 与 S5 方案的峰值流量削减率迅速升高到 70% 以上。结合径流总量与峰值流量削减效果分析,各方案在两者的表现具有一致性,S5 的水文响应总体表现较好,S3 总体削减效果最差。这些结果说明了城市化不同的区域 LID 设施变化对雨水径流的相对影响:从 S1 到 S3,随着 LID 布设比例向高、中密集区倾斜,峰值流量和径流量逐渐增大;从 S3 到 S5,随着 LID 布设比例向低密集区转移,布设比例逐渐均衡,峰值流量和径流量逐渐减小。

3.1.2 管段超载分析

管段超载主要受径流速率影响,因此不仅要分析径流量结果,还要结合管网超载情况评估不同方案的水量控制效果。不考虑河道概化成的管线,基线情境下,在“7·20”特大暴雨期间,管段超载率达到 60%,且模拟的主要超载区与主城区淹没范围位置一致,故认为模型具有较好的适用性,随着雨量的增加,超载管段的数量也在增加。在 LID 方案下,管线超载情况如表 6 所示。由于 LID 的设置,大暴雨期间管段的超载数量减少了近 50%,在暴雨、大雨、中雨期间分别减少了近 70%、75%、100%,降低了城市内涝的风险,但在特大暴雨事件中 LID 方案的表现并不理想,管段超载率仍在 44% 左右,在所有方案中 S5 对管段超载的控制效果最好。

表 6 不同雨量级别下 S0~S5 方案的管段超载数量

Table 6 Overload quantity of pipe section at different rainfall levels in S0~S5 schemes

雨量级别	管段超载数量					
	S0	S1	S2	S3	S4	S5
特大暴雨	90	65	66	67	66	65
大暴雨	72	31	32	35	33	30
暴雨	58	14	17	18	16	14
大雨	35	8	9	10	9	8
中雨	5	0	0	1	0	0

模拟结果证实了 LID 在减少雨水径流方面的有效性,并表明在城区进行城市密集程度划分,均衡配置 LID 可以提高 LID 对径流控制的效率。降雨期间在高、中密集子汇水区布设占比 90% 或 95% 的 LID 的方案(S2、S3)不如均衡铺设 LID 的方案(S1、S5)

控制水量效果好:降雨量较大时,雨水汇集较快,径流产生主要受下渗速率的影响,低密集区的透水路面和少量 LID 设施下渗能力有限,无法快速下渗急速增加的雨水,导致效果较差;降雨量较小时,雨水汇集较慢,此时对径流控制主要受 LID 设施和透水路面下渗饱和的限制,高、中密集区布设大量 LID 设施但下渗未达到饱和,即使 LID 覆盖非常高,也不可能在这些事件期间捕获大部分降雨,而低密集区已下渗饱和和导致径流增加。

3.1.3 污染负荷模拟分析

降雨期间城市非点源污染 TSS 负荷如图 6 所示。由图 6 可知,随着降雨总量的增加,污染物负荷总量明显增加,其结果与文献[19]一致。在特大暴雨降雨事件中,S0 的污染物负荷为 480.0 t/d,S1~S5 分别为 422.5、426.6、411.6、423.6、419.6 t/d,使研究区 TSS 污染负荷分别削减了 11.98%、11.13%、14.25%、11.75%、12.58%。随着降雨雨量的减小,TSS 负荷削减率呈现出增大的趋势,由此可见雨量越小,LID 方案对 TSS 污染负荷的削减效果越强。

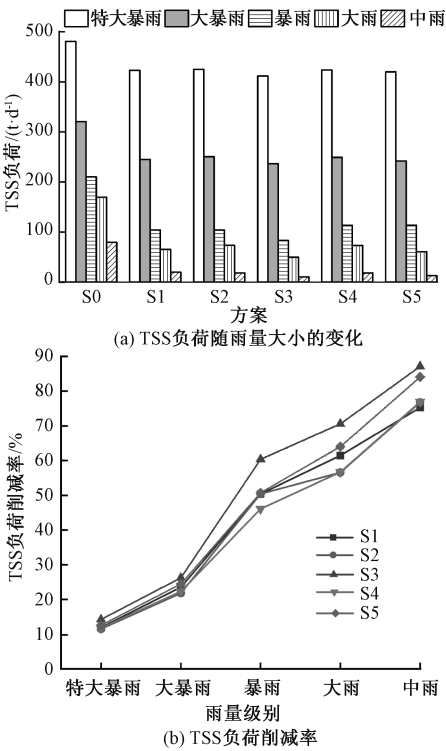


图 6 TSS 负荷随雨量大小的变化和 S1~S5 方案的 TSS 负荷削减率

Figure 6 Changes of TSS load with rainfall and TSS load reduction rate in S1~S5 schemes

5 场降雨事件中,在高密集区与中密集区分别布设占比 50%、45% 的 LID 设施的 S3 方案在污染物负荷削减结果最佳(大暴雨 24.04%、暴雨 66.28%、大雨 74.4%、中雨 87.1%);在降雨量小于暴雨时,

S5 方案的 TSS 削减效率迅速提升,优于 S1、S2 和 S4 方案。高、中密集子汇水区的道路与建筑物占比极高,而道路与建筑物下垫面也是面源污染的主要来源,而 S3 中大量 LID 设施集中在高、中密集区,大大减少了这些子汇水区污染物排放量。这与 S3 方案在径流量控制时的表现不一致,由此可见,在城市进行低影响开发时,若只强调对水量或水质的控制可能会无法达到优化城市水文响应的效果。

3.2 LID 对水量水质影响效果评估

不同空间布局的 LID 方案在水量、水质控制表现不一致,因此需要对 LID 方案进行综合评价。本文选取径流总量削减率、峰值流量削减率、TSS 负荷削减率、超载管段削减率 4 项指标,采用熵权法确定指标权重 w 如表 7 所示,用 TOPSIS 法计算每个方案的相对接近度 $C(0\sim1)$ 。由表 7 可知,在特大暴雨、大暴雨事件中,径流总量削减率与峰值流量削减率为 2 项重要评价指标;在暴雨事件中,TSS 负荷削减率在评价结果时占据主导地位;在大雨事件中径流总量削减率是最重要的指标;在中雨时,各评价指标所占权重较为均衡,其中径流总量削减率占主导地位。

表 7 不同雨量级别下各评价指标权重
Table 7 Weights of each evaluation index at different rainfall levels

雨量级别	评价指标权重 w			
	径流总量 削减率	峰值流量 削减率	TSS 负荷 削减率	超载管段 削减率
特大暴雨	0.374	0.322	0.231	0.073
大暴雨	0.355	0.349	0.129	0.167
暴雨	0.256	0.273	0.326	0.143
大雨	0.393	0.282	0.224	0.101
中雨	0.319	0.253	0.222	0.206

从图 7 可知,对于 5 场降雨事件,S5 具有最高的相对接近度,在 5 种方案中最优,在大暴雨与中雨事件中,S5 方案的相对接近度为 0.85、0.87。此方案效果最佳主要是在水量控制方面具有较好的效果,尽管特大暴雨事件中其效果不如 S1,但考虑到极端天气发生的频率,总体来说 S5 方案是 S1~S5 方案中最优的。其次为 S1 方案,这也主要是因为不同程度的城市化区域的 LID 占比较均衡,对于径流量、洪峰流量以及 TSS 的削减均处于较好水平。

总体来说,在高、中、低密集子汇水区布设占比分别为 50%、45%、5% LID 的 S3 方案效果最差,在高、中、低密集子汇水区布设占比分别为 35%、35%、30% LID 的 S5 方案效果最好。LID 集中在高、中密集子汇水区的方案(S2、S3、S4)效果不好,其原因是

局部子汇水区水量与水质取得的预期效果无法代替整个城区。

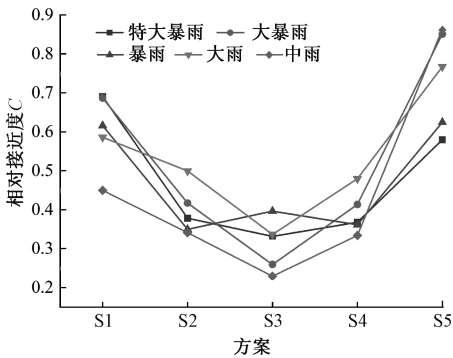


图 7 5 场降雨事件中 S1~S5 方案的 C
Figure 7 C of S1~S5 schemes in 5 rainfall events

4 结论

以郑州市中原区为研究对象,通过构建城市雨洪过程模型对研究区域降雨径流过程进行模拟,模拟水深与实测水深平均相对误差 $\leq 5\%$,表现出良好的适用性。在水量控制方面,高密集子汇水区占比 35%、中密集子汇水区占比 35%、低密集子汇水区占比 30%的 LID 方案表现较好,高密集子汇水区占比 50%、中密集子汇水区占比 45%、低密集子汇水区占比 5%的 LID 方案削减效果最差。在水质控制方面,对于 6 种方案,随着降雨总量的增加,污染物负荷总量明显增加。5 场降雨事件中,不同优化方案均对水质具有一定的调控效果,但 LID 铺设在建筑稠密的区域(S3)污染物负荷削减结果最佳。相比于基线方案(除特大暴雨事件),LID 铺设在径流控制和污染物负荷削减等方面均发挥了作用,提升效果显著,其中,S5 方案在综合评价中表现最优,但未来还需更进一步探索 LID 的布局方案使得其在各指标中均取得更好效果。研究结果也说明,当研究区 LID 铺设面积与种类相同时,应综合考虑不同密集程度城区的均衡占比,局部水量与水质控制不能在整体水平上缓解城市化水文效应。

参考文献:

[1] DELL T, RAZZAGHMANESH M, SHARVELLE S, et al. Development and application of a SWMM-based simulation model for municipal scale hydrologic assessments [J]. Water, 2021, 13(12): 1644.

[2] LENG L Y, MAO X H, JIA H F, et al. Performance assessment of coupled green-grey-blue systems for Sponge City construction[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 728: 138608.

[3] AHIALBLAME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Efficacy

tiveness of low impact development practices; literature review and suggestions for future research [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(7): 4253–4273.

[4] 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 X, GAO Y Q, WU D. 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.

[5] 戎贵文,甘丹妮,李姗姗,等. 不同 LID 设施的面积比例优选及径流污染控制效果[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 168–173, 204.

RONG G W, GAN D N, LI S S, et al. Area proportion optimization of different LID facilities and effect of runoff pollution control[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 168–173, 204.

[6] 王婷,刁秀媚,刘俊,等. 基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(4): 39–43, 128.

WANG T, DIAO X M, LIU J, et al. Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(4): 39–43, 128.

[7] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 564–576.

[8] 黄铁兰,刘志航,柯锦灿. 基于暴雨管理模型的广州某城市住区的低影响开发规划[J]. *人民珠江*, 2018, 39(8): 99–105.

HUANG T L, LIU Z H, KE J C. Planning of low impact development of an urban residential district in Guangzhou based on SWMM[J]. *Pearl River*, 2018, 39(8): 99–105.

[9] 杜颖恩,侯精明,马红丽,等. 基于 SWMM 的 LID 设施空间格局优化模拟研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(19): 120–125.

DU Y E, HOU J M, MA H L, et al. Spatial pattern optimization of LID facility based on SWMM[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(19): 120–125.

[10] 张金萍,张朝阳,左其亨. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 30–37.

ZHANG J P, ZHANG Z Y, ZUO Q T. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 30–37.

[11] 张士官,吕谋,焦春蛟,等. 雨洪管理模型 SWMM 原理解析及应用进展[J]. *人民珠江*, 2019, 40(12): 37–42, 69.

ZHANG S G, LYU M, JIAO C J, et al. Principle analysis and application progress of storm water management model (SWMM)[J]. *Pearl River*, 2019, 40(12): 37–42, 69.

[12] 赵月,张建丰,李涛,等. 降雨径流模型的参数敏感性分析与方法比较[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(7): 114–120.

ZHAO Y, ZHANG J F, LI T, et al. Parameter sensitivity analysis and method comparison of rainfall runoff model[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7): 114–120.

[13] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. *给水排水*, 2009, 45(11): 213–217.

LIU X P. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 45(11): 213–217.

[14] 杨默远,潘兴瑶,刘洪禄,等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1634–1644.

YANG M Y, PAN X Y, LIU H L, et al. Urban non-point pollution characteristics in China: a meta-analysis[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(8): 1634–1644.

[15] 孙康. 基于 SWMM 模型的海绵城市应用研究:以沣西新城为例[D]. 西安:西安工业大学, 2023.

SUN K. Research on the application of SWMM model in sponge city: a case study of Fengxi New City[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京:中国计划出版社, 2021.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Design of Outdoor Wastewater engineering: GB 50014—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021.

[17] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价:以北京市清河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(11): 84–93.

CHANG X D, XU Z X, ZHAO G, et al. Urban rainfall-runoff simulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model: a case study of Qinghe catchment in Beijing[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(11): 84–93.

[18] KONG F H, BAN Y L, YIN H W, et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 132–142.

[19] 刘华祥. 城市暴雨径流面源污染影响规律研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005.

LIU H X. The impact study on urban storm non-point source pollution[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.

Assessment of the Impact of LID Facility Layout on Urban Runoff and Pollution Loads

DOU Ming¹, YAN Jiajia¹, WANG Cai², GUAN Jian³, LI Guiqiu¹, HOU Jinjin⁴

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Nantong Branch, Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nantong 226006, China; 3. Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou 450018, China; 4. Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430012, China)

Abstract: In view of the lack of studies on the impact of low impact development (LID) spatial layout on the control effect of water quantity and quality, Zhongyuan District of Zhengzhou City as a target area, its urban water quantity and quality model with LID facilities was built based on SWMM model principle. Based on the empirical value of urban comprehensive runoff coefficient and the actual situation of the area, Zhongyuan District was divided into high, medium and low-density areas of urban buildings, and different proportions of LID (S1–S5) were deployed in the high, medium and low-density urban areas, and the control effect of different spatial patterns of LID facilities on water quantity and quality under different rainfall levels was calculated. The results showed that with the increase of rainfall level, the total runoff reduction rate, peak flow reduction rate and TSS load reduction rate of LID scheme continued to decrease. When rainfall levels were rainstorm, heavy rain and moderate rain, LID scheme (S5) with a proportion of 35%, 35% and 30% were deployed in high, medium and low dense urban areas, and the total runoff reduction rate exceeded 80%, the peak flow reduction rate exceeded 70%, and the TSS load reduction rate exceeded 50%. From the comprehensive index evaluation of water quantity and water quality in each event, the program had the best performance.

Keywords: SWMM model; spatial layout of LID facility; total runoff reduction rate; pipe section overload; TSS load reduction rate

(上接第 69 页)

Solving MTSP with Two-stage SA and GA Based on Spark

SUN Jian^{1,2}, LIU Pin¹, LI Hao¹, CHEN Pan¹

(1. School of Computer Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. The Key Laboratory of Images and Graphics Intelligent Processing of State Ethnic Affairs Commission, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: A two-stage KSAGA algorithm combining Spark-based simulated annealing and genetic algorithms was proposed for the single-depot multiple traveling salesman problem with minimum total path length. In the first stage, the multiple traveling salesman problem was split into multiple single traveling salesman problems by k -means clustering, and the traversal order of cities in the group was optimized using the simulated annealing algorithm. In the second stage, the classification of cities was optimized by genetic algorithm, and the cross-variance operator as well as the hybrid local optimization operator were designed based on the chromosome grouping encoding method to improve the search space and convergence speed of the algorithm. As the number of cities increased and the computational scale became larger, the characteristics of genetic algorithm were used to realize the parallelism of the algorithm in order to speed up the algorithm operation efficiency. Finally, the solution quality of KSAGA was compared with that of ACO, GA, SPKSA, ALNS and NSGA-II and the convergence speed of GA and NSGA-II by selecting some datasets of TSPLIB for simulation experiments. The results showed that KSAGA could converge quickly in solving the single-depot multiple traveling salesman problem, and the solution quality was greatly improved compared with other algorithms. Meanwhile, the advantage of KSAGA was more obvious as the number of cities and the number of travelers increased.

Keywords: MTSP; parallel; genetic algorithm; group encoding; local optimization operator