

刘波,戎贵文,陈情情,等.基于 SWMM 的 LID 设施分区布局及减排效益[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(5):930-939.
LIU B, RONG G W, CHEN Q Q, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 930-939. (in Chinese)

基于 SWMM 的 LID 设施分区布局及减排效益

刘波¹,戎贵文^{1,2},陈情情¹,陈上志¹,贺甜¹

(1. 安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南 232001; 2. 河海大学水利水电学院,南京 210098)

摘要:为探讨低影响开发(low impact development, LID)设施对缓解城市洪涝灾害以及削减污染负荷的效果,选取绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和雨水罐 4 种 LID 设施,通过构建暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),并根据实际地形和管网走向将研究区汇水面分为不同分区,分析 LID 设施组合在 7 种布设方案下对径流控制和雨水污染负荷减排的影响。结果表明:对于 7 种布设方案,LID 设施组合均能有效削减径流量和雨水污染负荷,且分区布设时,LID 设施组合在上中游分区对径流量的控制效果较好;在相同设计降雨重现期下,各布设方案的削减效果依次为全区>上中游分区>中下游分区>上下游分区>下游分区>中游分区>上游分区;LID 设施组合布设在下游分区时的径流量削减率较布设在上游分区提升 5.19%~6.82%,布设在上中游分区较布设在上下游分区提升 1.87%~3.62%,较布设在下游分区提升 16.48%~18.97%;LID 设施组合全区布设较布设在下游分区提升 29.60%~31.17%,较布设在上中游分区提升 12.20%~13.12%。因此,在海绵城市规划建设之前建议全区按需布设 LID 设施,在进行老旧小区改造时可着重考虑将 LID 设施布设在上中游分区。

关键词:LID 设施组合;SWMM 模型;分区布局;径流系数;污染物

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0090

在城市化进程中,天然地面被道路、建筑等不透水面所覆盖,在减少入渗量和蒸散量的同时,增加了径流量和径流污染负荷,两者共同作用改变了地表径流的水文条件,水文变化主要表现为更高的峰值流量和更短的洪峰到达时间^[1]。不透水面积的迅速增加和气候变化显著地影响了局部、区域甚至全球范围内的水文、环境和生态系统^[2]。随着城市化进程的快速发展,老旧小区数量逐渐增多,其污水、雨水管网大多已经老化,存在管网漏水、污水与雨水混排等问题,城市内涝和水体黑臭现象频发。全面推进海绵城市建设以及将其运用到城镇老旧小区改造已成为研究热点之一。因此,推进海绵城市建设对缓解城市内涝风险、改善水资源短缺问题具有重要意义。海绵城市建设倡导从源头滞水、蓄水、渗水和净水,使城市在开发过程中保持良好的雨水储存、渗透和净化功能^[3-4]。

绿色屋顶、透水铺装、雨水花园等低影响开发

(low impact development, LID)设施作为海绵城市建设的主要工程措施,能够有效促进雨洪的滞、蓄、渗以及蒸散发,从而缓解城市内涝等水问题^[5]。ZHENG 等^[6]以深圳市作为研究区域,对比 3 种土地利用类型的 LID 方案,认为基于径流评估、污染物模拟和投资计算的多目标优化模型更为有效。杜颖恩等^[7]研究 LID 设施空间格局对径流控制和雨水径流污染负荷的影响,发现将单一雨水花园布设在下游分区时对径流总量控制和雨水径流污染负荷的净化效果最好。戎贵文等^[8]针对工业园区研究不同 LID 设施组合对雨水源头控制和污染负荷削减效果,发现绿色屋顶、雨水罐、雨水花园和透水铺装组合方案对径流量和污染物的削减效果最好,但随着重现期的增大,削减效果均有不同程度的降低。徐宗学等^[9]运用 NSGA-II 算法以 LID 设施的成本、雨洪要素控制率为目标进行 LID 优化布局,发现透水铺装和绿色屋顶组合对径流总量和洪峰流量削减效果

收稿日期:2023-06-28 修回日期:2023-09-27 网络出版时间:2023-10-10

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231007.1539.010

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251);国家重点研发计划项目(2018YFC1508200);国家自然科学基金面上项目(52279055)

作者简介:刘波(1997—),男,甘肃天水人,主要从事环境水利方面研究。E-mail: llbauster@163.com

通信作者:戎贵文(1976—),男,山西原平人,教授,博士,从事水力学及河流动力学的教学与科研工作。E-mail: gwrong934sx@163.com

最显著。李尤等^[10]采用改进层次分析法开展下凹式绿地及雨水调蓄池的 LID 空间布局优化研究。关于 LID 设施的优化研究,许多学者致力于对 LID 组合类型与目标的优化,以此研究 LID 在雨洪调控方面的性能,但对于 LID 在分区布设方面的考虑较少,通常只选择在不透水面基础上全区布设;有部分学者研究了 LID 设施空间布局的优化,但模拟情景比较单一,没有与 LID 全区布设进行比较,同时也忽略了 LID 设施之间的交互作用,在一定程度上缺乏全面性。

LID 设施不仅可以缓解城市洪涝灾害、削减雨水污染负荷,还可以提升老旧小区环境和居民生活质量。本文以淮南市某老旧小区为研究对象,以相同 LID 设施组合类型布设子汇水区面积相当的分区,通过构建暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),研究 LID 设施组合布设于不同分区时对径流调控和雨水污染负荷削减效果的影响,以不同分区的径流量和雨水污染负荷的削减率为依据,提出关于分区布局的 LID 设施组合布设方案,旨在为海绵城市规划建设提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省淮南市,近 10 年淮南的平均降水量为 1 081.39 mm,6—8 月为每年降水高峰

期,平均降水量约占全年的 51% 左右。研究对象为某老旧小区,该区整体地势南高北低,东西地势较为平缓,平均坡度 0.8%,容易发生内涝。研究区总面积约为 6.90 hm²,屋顶、道路等不透水面积约为 4.89 hm²,占比 70.9%,不透水率较高。

1.2 研究方法

采用美国环境保护署开发的 SWMM,该模型能够较好地模拟降雨、下渗、地表漫流以及管网排水等过程,目前被广泛应用于城市雨洪过程模拟^[11]。研究区产流过程的下渗模型采用霍顿下渗模型,汇流过程采用非线性水库法,水质模拟分别采用幂函数累积模型和指数冲刷模型计算污染物累积与冲刷^[7,12-13]。SWMM 中管网计算方法包括恒定流、动力波和运动波 3 种^[14-15],其中动力波法计算结果较为精确^[16],且本研究需要添加 LID 设施,管道水流为非均匀流,因此管网计算采用动力波法^[17]。通过数值模拟结果评价不同方案效果,进而得出 LID 设施组合布设在不同分区对径流控制和雨水径流污染负荷的影响规律。

1.3 SWMM 概化

对研究区进行现场勘测,根据研究区规划、排水管网分布、坡度走向等^[18]在 SWMM 中对研究区进行概化和子汇水区划分^[19],共分为 14 个子汇水区、8 个节点、8 条管道和 1 个排放口,概化模型见图 1。

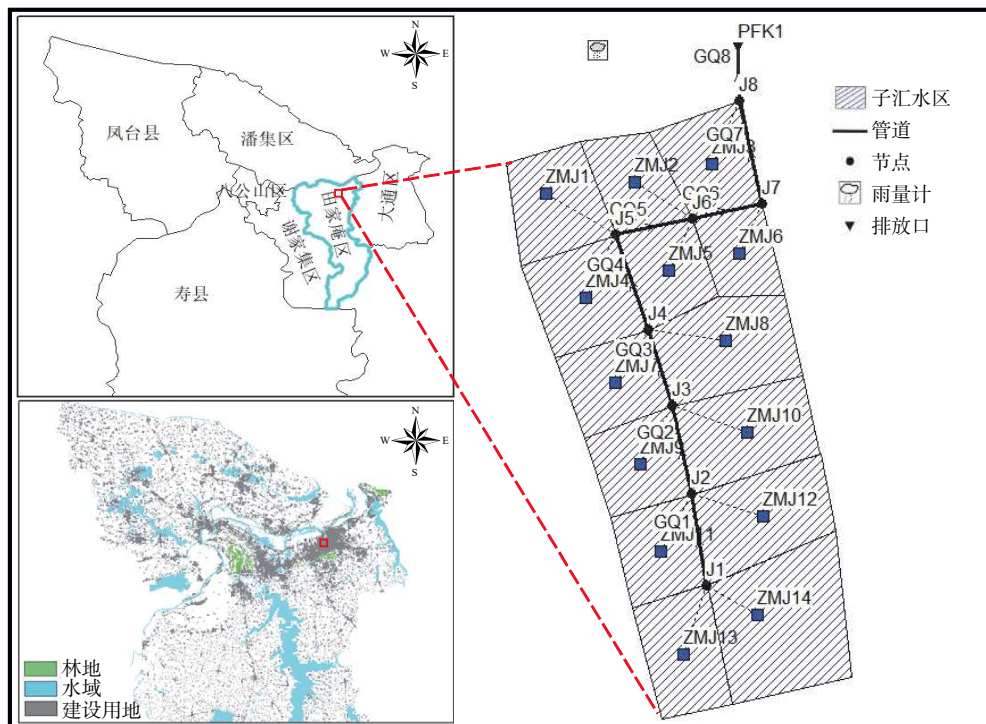


图 1 研究区概况及子汇水区划分

Fig. 1 Overview of the study area and sub-catchment division

1.3.1 设计暴雨

采用芝加哥雨型生成器和淮南市暴雨强度公式^[20](1)生成重现期为 1、3、5、10、20 和 30 a 的降雨情景,并绘制不同重现期的降雨强度过程线,雨峰系数设定为 0.4,降雨历时 t 取 120 min,结果见图 2。

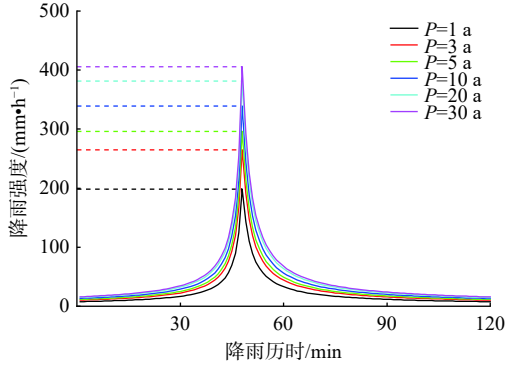


图 2 不同设计重现期降雨强度过程线

Fig. 2 Rainfall intensity process lines of different design return period

$$q = \frac{2\,030(1 + 0.71\lg P)}{(t + 6.29)^{0.71}} \quad (1)$$

式中: q 为设计降雨强度, mm/min; t 为降雨历时, min; P 为重现期, a。

1.3.2 参数率定与模型验证

为验证模型的可靠性,分别采用 2020 年 7 月 11 日与 2021 年 7 月 17 日的两场降雨实测资料进行参数率定与模型验证。子汇水面积、坡度、不透水面积比等通过实测数据获取,地表注蓄量、曼宁系数、下渗模型的参数等通过查阅国内外相关文献以及 SWMM 用户手册获取^[2, 11, 16],见表 1。选择 SS、COD、TN 和 TP 作为水质模拟的主要污染物指标^[21-23],模拟管网末端排放口污染物的质量浓度,将研究区下垫面分为绿地、道路和屋面 3 种土地利用类型,根据实际情况赋予对应的不同子汇水区相应的面积百分比,参数取值范围参考用户手册及相关文献^[4, 22, 24],见表 2。同时,采用纳什效率系数(E_{NS})作为水文模型率定的评价指标,当 $E_{NS} > 0.6$ 时,模型被认为具有

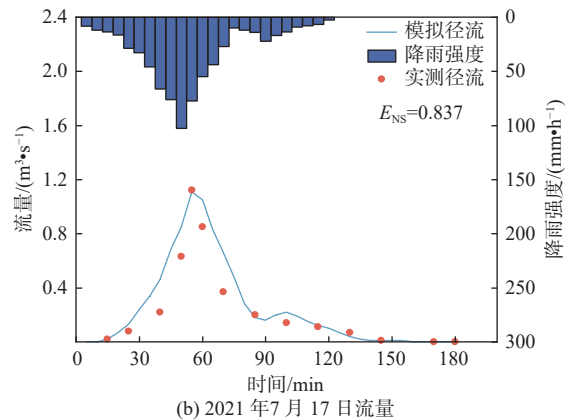
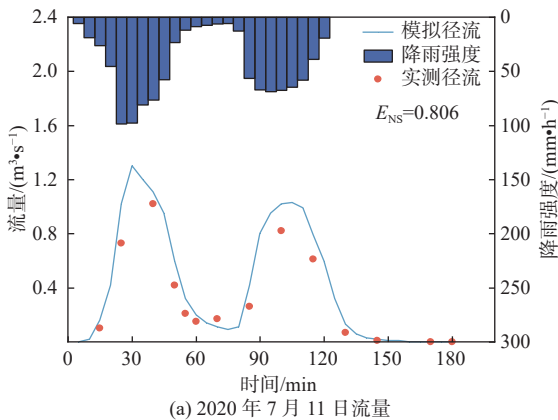
良好的精度^[25-26]。排水口模拟流量与实测流量的拟合 E_{NS} 为 0.806 和 0.837,采用 2021 年 7 月 17 日降雨的污染物质量浓度模拟污染过程, E_{NS} 均大于 0.800,如图 3 所示,表明所构建的模型参数取值合理,拟合度高,所建模型适用于研究区。

表 1 水文相关参数
Tab. 1 Hydrological related parameters

参数类型	参数名称	参考范围	取值
霍顿参数	最大入渗率/(mm·h ⁻¹)	10~100	98.7
	最小入渗率/(mm·h ⁻¹)	0.5~25.0	22.5
	衰减常数/h ⁻¹	2~7	4
	排干时间/d		7
曼宁系数	不透水区	0.001~0.015	0.01
	透水区	0.1~0.3	0.2
洼地蓄水	不透水区/mm	1~3	2
	透水区/mm	3~10	7

表 2 污染物累积与冲刷参数
Tab. 2 Pollutant accumulation and scouring parameters

下垫面类型	参数名称	SS	COD	TN	TP
屋顶	最大累积量/(kg·km ⁻²)	130	90	3	0.2
	速率常数/d ⁻¹	0.2	0.2	0.2	0.2
	冲刷系数	0.003	0.004	0.003	0.002
	冲刷指数	1.4	1.6	1.4	1.6
路面	最大累积量/(kg·km ⁻²)	240	160	3	0.3
	速率常数/d ⁻¹	0.2	0.2	0.2	0.2
	冲刷系数	0.004	0.005	0.004	0.002
	冲刷指数	1.6	1.6	1.5	1.6
绿地	最大累积量/(kg·km ⁻²)	40	70	7	0.6
	速率常数/d ⁻¹	0.2	0.2	0.2	0.2
	冲刷系数	0.003	0.002	0.002	0.001
	冲刷指数	1.2	1.2	1.2	1.2



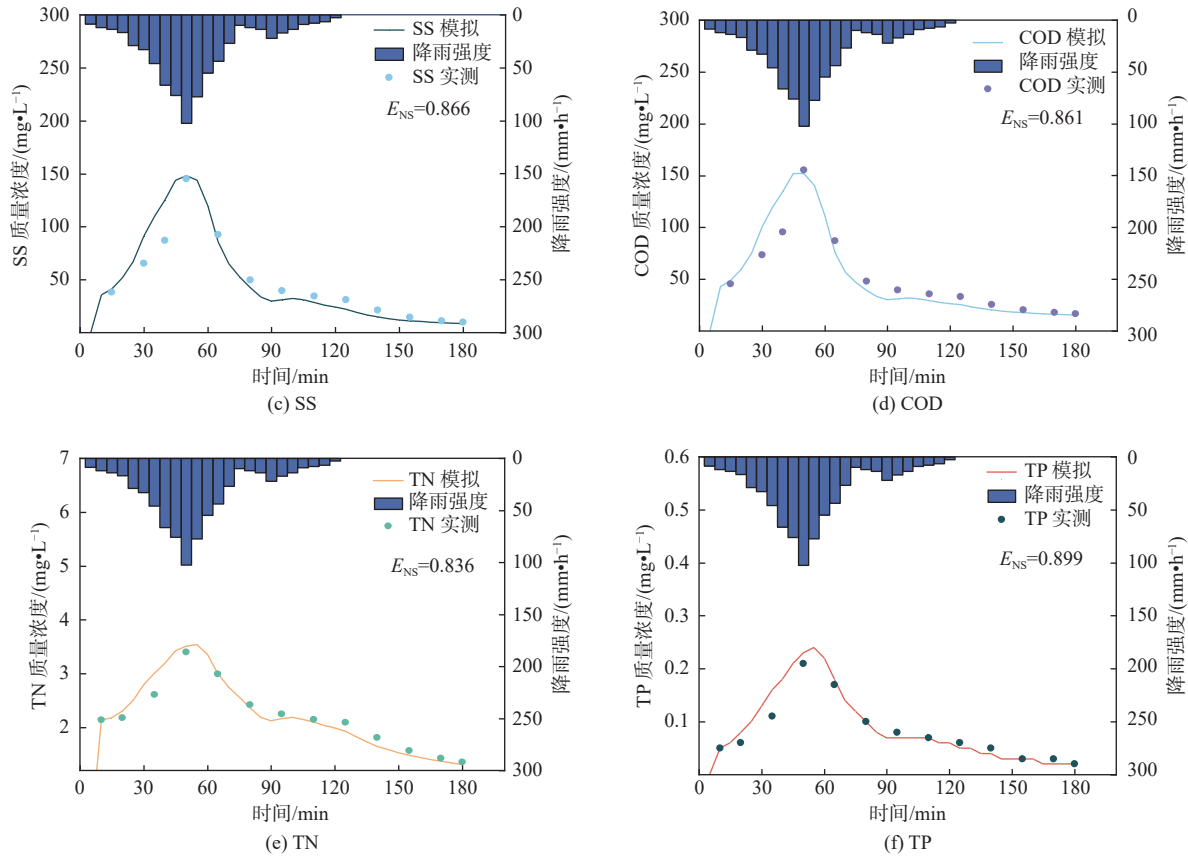


图3 排放口流量与污染物质量浓度的率定结果

Fig. 3 Calibration results of discharge and pollutant mass concentration of discharge

2 优化方案及模拟结果

2.1 优化方案拟定

目前较为常见的 LID 设施主要包括绿色屋顶^[27]、雨水罐、植被浅沟、渗渠、雨水花园和透水铺装^[28]等,而 LID 设施组合也是控制径流的有效措施,可大大降低城市流域的洪涝风险^[29]。研究 LID 设施对城市雨洪过程的影响,一般考虑单项 LID 设施以及不同类型 LID 设施组合的效果^[30]。根据研究区实际地形由高到低的走势以及排水管网的分布走向,将研究区分为上、中、下游分区,并选用绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和雨水罐进行 LID 设施组合,将 LID 设施组合布设在不同的分区,以此对径流调控和水质调控的影响进行研究。

7 种布设方案如下:方案一: LID 设施组合仅集中布设在上游分区;方案二: LID 设施组合仅集中布设在中游分区;方案三: LID 设施组合仅集中布设在下游分区;方案四: LID 设施组合集中布设在上中游分区;方案五: LID 设施组合集中布设在上下游分区;方案六: LID 设施组合集中布设在中下游分区;方案七: LID 设施组合在原有不透水面积上布设全区。

LID 设施组合分区分布见图 4。

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 径流调控模拟结果与分析

根据以上 7 种布设方案分别进行模拟,计算不同重现期下的径流系数和径流量削减率,结果见图 5。由模拟结果可知,不同降雨重现期下,7 种布设方案下的径流系数随着重现期的增大而增大,而径流量削减率随着重现期的增大而减小,其变化趋势随着重现期的增大而逐渐趋于平稳。同一设计降雨重现期下,当 LID 设施组合单块分区布设时,在下游分区的径流控制效果较好;双块分区布设时,在上中游分区的控制效果较好;上游分区的径流控制效果与中游基本相同,上下游分区与中下游的径流控制效果也基本相同;LID 设施组合布设在下游分区时的径流量削减率较布设在上游分区提升 5.19%~6.82%;布设在上中游分区较布设在上下游分区提升 1.87%~3.62%,较布设在下游分区提升 16.48%~18.97%。LID 设施组合全区布设较布设在下游分区提升 29.60%~31.17%,较布设在上中游分区提升 12.20%~13.12%。同时,在上、中、下游分区分别布设 LID 设施组合时,下游分区的原有绿地面

积与上、中游分区相比占比较小,但径流调控效果较好,说明当原有绿地面积占比相差不大时,下游

分区布设 LID 设施能有效控制雨水径流。

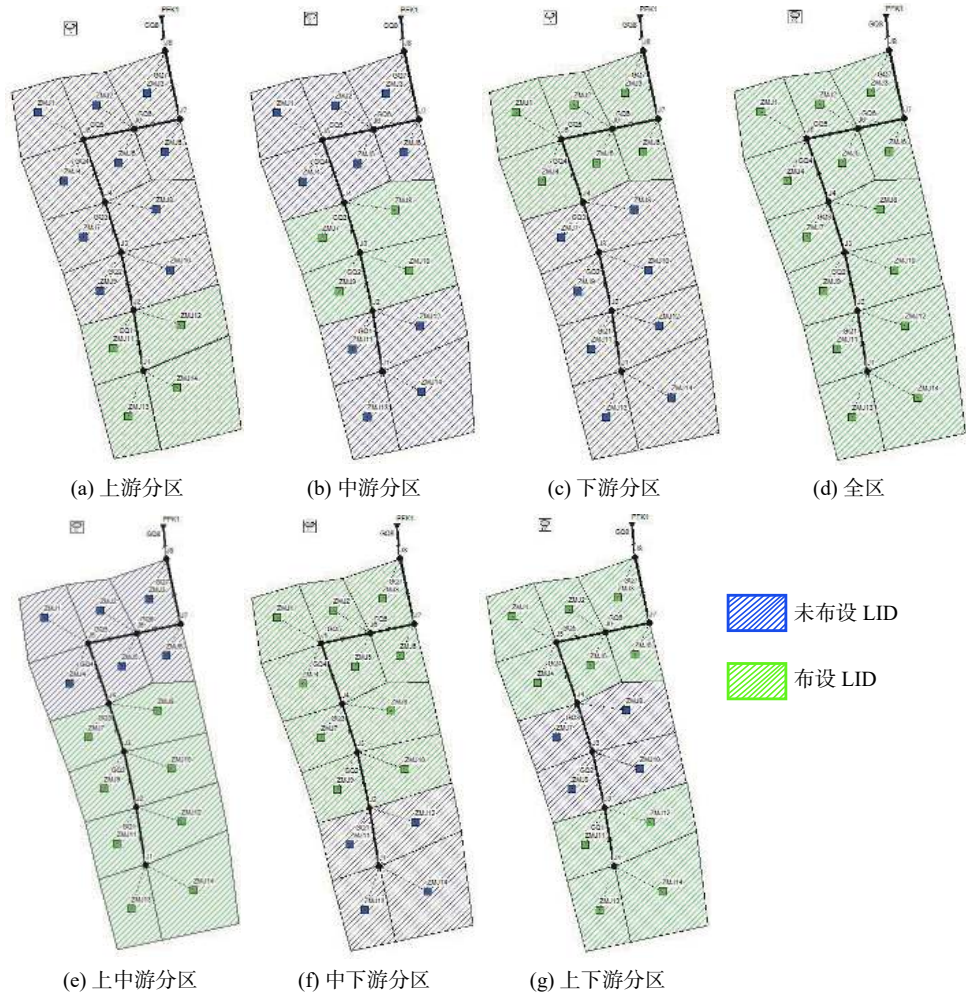


图 4 LID 应用分布

Fig. 4 LID application distributions

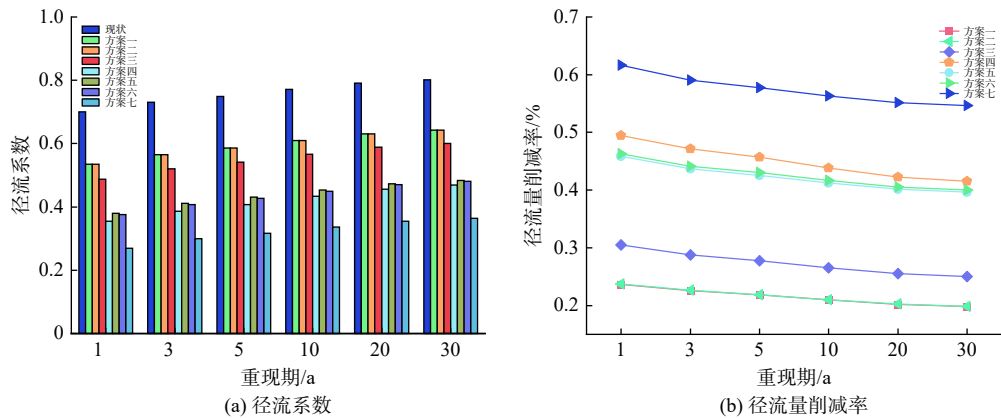


图 5 不同重现期下的径流系数及径流量削减率模拟结果

Fig. 5 Simulation results of runoff coefficient and runoff reduction rate under different return periods

在 SWMM 中选取重现期为 3 a 时的排放口水深度, 见图 6, 可以看出: 布设 LID 设施后积水深度峰值有明显下降, 随着布设面积的增大, 地表径流时间也随之增长, 有效减缓了经历强降雨时管道的承载力; 同时, 分区布设相比较于未布设时, 其峰值下降也较为明显。因此, 在小区建设规划之前,

建议全区按需布设 LID 设施组合; 进行低影响开发改造时, 可根据小区实际地形走势和排水管网分布情况, 优先将 LID 设施组合布设在上中游分区或下游分区, 以充分发挥 LID 设施组合的综合作用; 在不新增加低影响开发建设成本的情况下, 径流控制效果达到最佳。

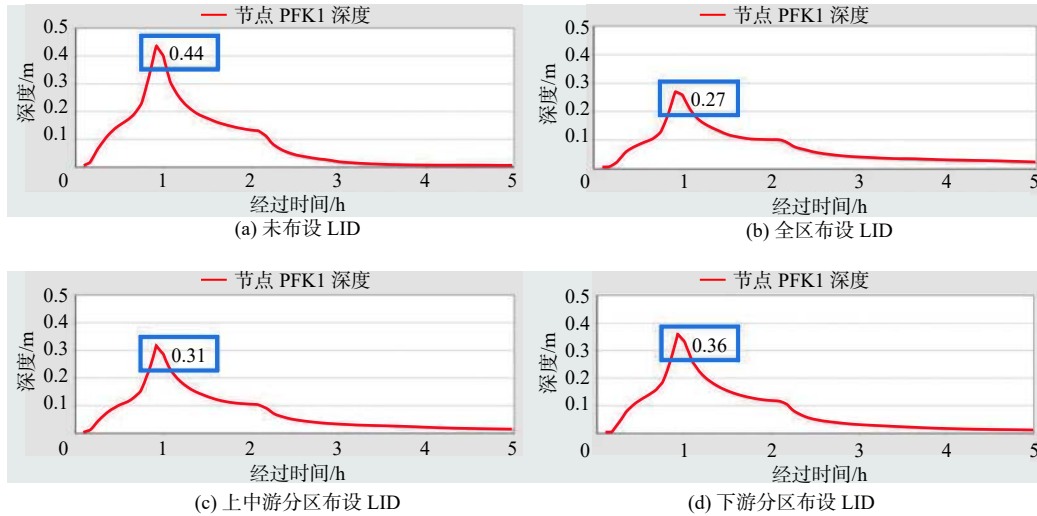


图6 排放口积水深度

Fig. 6 The depth of water in the discharge port

2.2.2 水质调控模拟结果与分析

针对上述7种LID布设方案,以SS、COD、TN和TP为污染物指标,根据排放口污染物累积总量,分析不同降雨重现期下的污染物累积量,见图7。布设LID设施与未布设相比,各种污染物累积总量都有所降低,具体见表3。分析可知:当LID设施组合布设在中游分区与上游分区以及中下游分区与上下游分区相比时,其累计减少量相差不大;当重

现期大于10a时,TN累积量在中游分区与上游分区相比稍有所上升,SS累积量在上中游分区比在上下、中下游分区略高;当重现期大于5a时,COD累积量在上中游分区比在上下、中下游分区略高。由此可见,单块分区布设时,LID设施组合布设在下游分区对排放口污染物累积量降低较多,双块分区布设时在上中游分区对排放口污染物累积量降低较多;当全区布设时,污染物累积量降低最多。

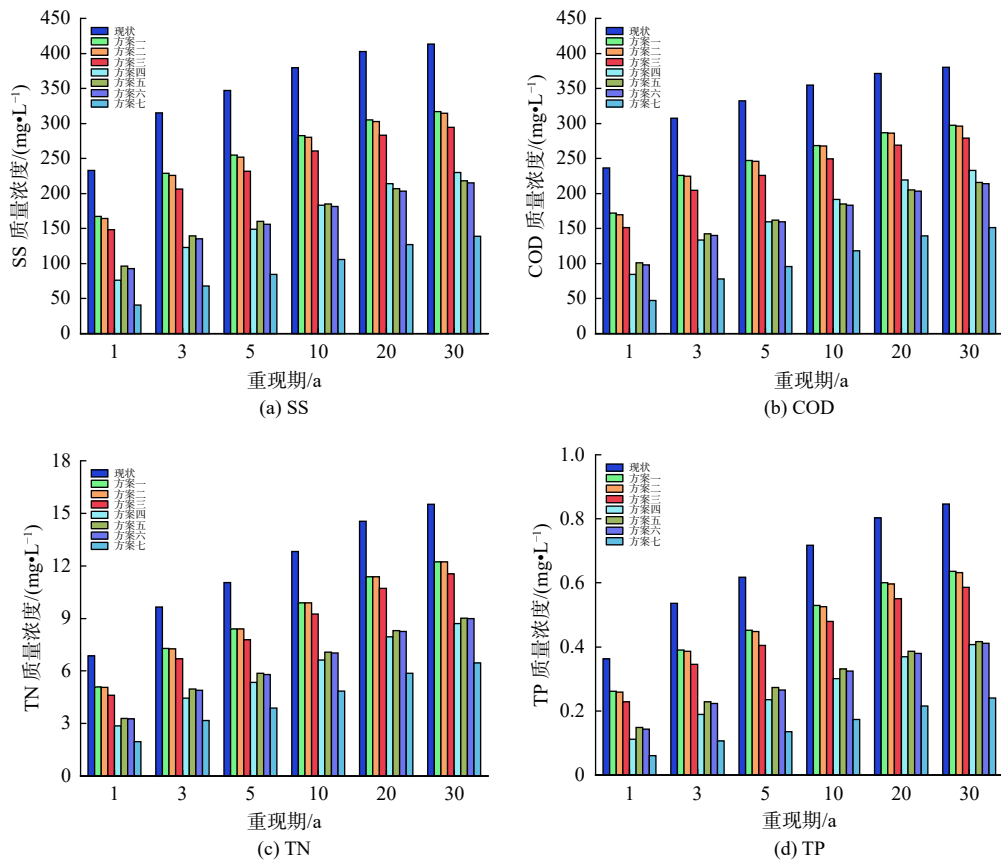


图7 排放口不同污染物累积量

Fig. 7 Accumulation of different pollutants at outlet

表 3 污染物累计降低量
Tab. 3 Cumulative reduction of pollutants

方案	污染物质量浓度累计降低量/(mg·L ⁻¹)			
	SS	COD	TN	TP
方案一	65.057 ~ 96.766	64.876 ~ 82.592	1.785 ~ 3.297	0.101 ~ 0.210
方案二	68.066 ~ 99.077	66.827 ~ 83.532	1.798 ~ 3.284	0.104 ~ 0.214
方案三	84.381 ~ 119.116	85.192 ~ 100.715	2.261 ~ 3.966	0.134 ~ 0.260
方案四	156.583 ~ 183.498	151.880 ~ 146.718	3.999 ~ 6.807	0.251 ~ 0.439
方案五	136.469 ~ 195.369	135.842 ~ 163.848	3.566 ~ 6.495	0.215 ~ 0.429
方案六	140.072 ~ 198.425	138.529 ~ 165.610	3.067 ~ 6.537	0.220 ~ 0.435
方案七	192.160 ~ 274.677	189.179 ~ 228.743	4.913 ~ 9.066	0.302 ~ 0.605

在不同降雨重现期下, 污染物削减率模拟结果见图 8。随着重现期的增大, 对 4 种污染物的削减效果逐渐减弱; 在相同降雨重现期下, 7 种布设方案对研究区总体的污染物负荷均有一定的削减效果。当 LID 设施组合分区布设时, 对 4 种污染物的控制效果依次为 TP>SS>COD>TN, 其中: LID 设施组合布设在上中游分区时的削减效果较好, 布设在上游分区与中游分区和上下游分区与中下游分区时的削减效果基本相同, 布设在下游分区时对各污染物的削减率较布设在上游分区分别提升 5.91% ~ 9.09%、5.41% ~ 8.30%、4.77% ~ 8.58%、4.31% ~ 6.93%, 布设在上中游分区较布设在上下游分别提升 1.18% ~ 9.92%、

-2.87% ~ 8.64%、-4.51% ~ 6.78%、2.01% ~ 6.31%, 布设在上中游分区较布设在下游分别提升 21.16% ~ 32.23%、15.57% ~ 31.03%、12.10% ~ 28.18%、18.31% ~ 25.32%; 而全区布设较布设在下游分区分别提升 40.78% ~ 46.28%、37.62% ~ 46.31%、33.69% ~ 43.94%、32.87% ~ 38.63%, 较布设在上中游分区分别提升 14.05% ~ 19.62%、15.28% ~ 22.05%、15.76% ~ 21.58%、13.31% ~ 14.56%。由此可见, 在相同设计降雨重现期下, 7 种布设方案的削减效果依次为全区>上中游分区>中下游分区>上下游分区>下游分区>中游分区>上游分区, 均可以有效改善小区排放水质质量。

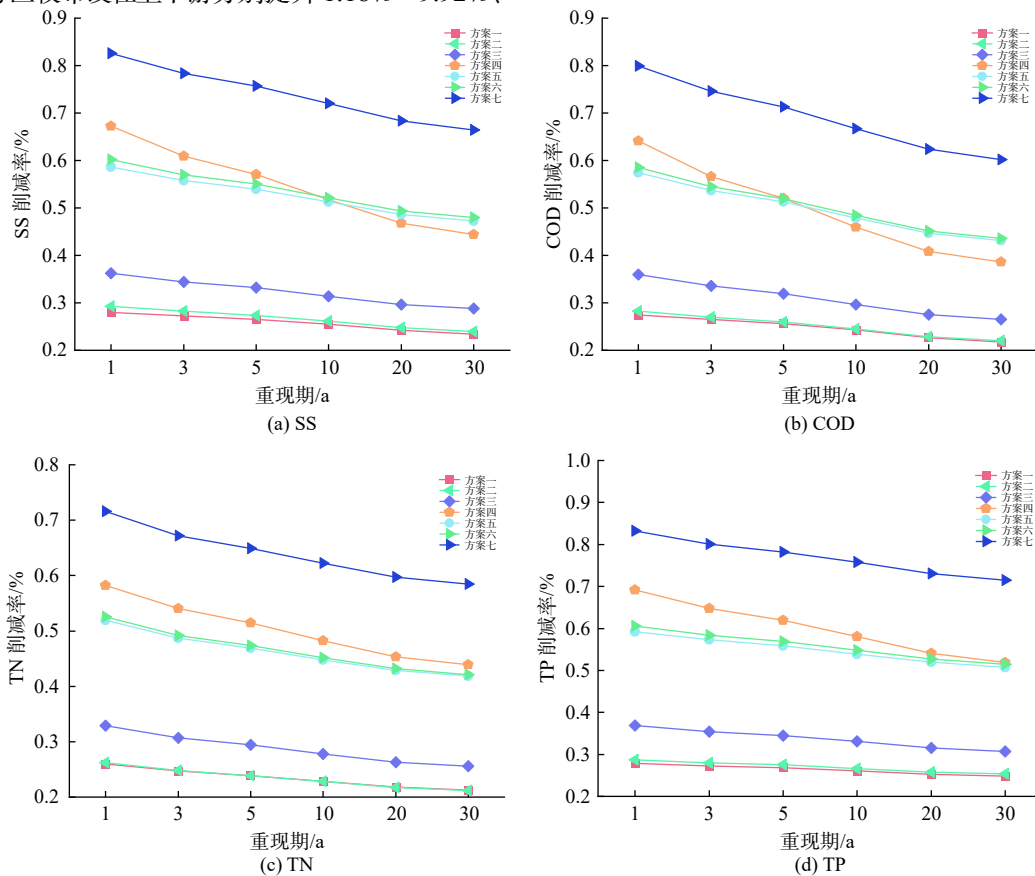


图 8 排放口不同污染物削减率

Fig. 8 Reduction rate of different pollutants at discharge outlet

3 讨论

通过分析 LID 设施组合在不同分区的布设对径流量和雨水污染负荷的减排效果发现, LID 设施组合布设在上中游分区时的减排效果要优于布设其他分区, 雨水污染负荷的减排效果在重现期增大时出现 SS 和 COD 削减率下降的情况。这是由于 LID 吸收雨水污染负荷的作用更快地达到饱和状态, LID 设施布设在上中游分区与布设在上下、中下游分区相比, 没有灰色雨水设施对污染负荷的截留过程, 因此其削减率会低于布设在上下、中下游分区。同时, 削减率与 LID 类型的选取有关, 不同类型的 LID 设施性能都会有所差异, 对污染物的吸收效果也有所不同^[31], 所以分区布设 LID 设施时对类型的选取也至关重要。

LID 设施的布设位置对雨水污染负荷的削减效果有重要影响, 对比不同的方案发现, LID 设施组合在单块分区布设时, 下游分区的减排效益较好, 这是由于单块分区布设面积相对占比最小, 当发生重大雨洪事件时, 下游分区距离排水口更近, 在此布设 LID 设施可以减缓雨洪对排放口的直接压力, 对污染物的吸收和缓冲性能更加明显^[32]。杜颖恩^[7]等研究了雨水花园在上、中、下游分区对雨洪的调控效果, 发现在下游分区时的减排效果较好, 这与本文的研究结果一致。LID 设施组合布设在两块分区时, 上中游分区减排效益较好, 这是因为布设面积的增大直接提高了 LID 设施对城市雨洪的缓冲性能, 进一步增强了该分区对污染物的减排效果。此外, 由于上中游分区地势较高, 雨水径流冲刷速度更快, 相对于下游分区更容易进行雨水收集和治理。本文通过研究 LID 设施组合的减排效果, 提出了更多的分区布设方案, 对于老旧小区改造, 分区布设是一个更好的选择, 其径流量和雨水污染负荷减排效果虽会有所降低, 但相比于未布设 LID 设施时仍能有效减缓雨洪事件的发生。与全区布设效果相比, 虽然全区布设效果最好, 但是其成本也会随之增加^[8]。

4 结论

本文基于 SWMM 开展 LID 设施组合分区布局及减排效益研究, 在验证模型可靠性的基础上, 对某老旧小区 LID 设施组合的分区布局进行方案设计, 根据地势和管网走向将小区分为上、中、下游分

区, 并在不同设计降雨重现期条件下进行模拟与分析, 得到以下结论:

在相同设计降雨重现期下, 各布设方案的削减效果依次为全区>上中游分区>中下游分区>上下游分区>下游分区>中游分区>上游分区。LID 设施组合在上中游分区对径流总量和雨水污染负荷的调控效果较好, 不仅可以延缓雨水径流的速度、降低径流峰值流量, 而且还能有效减少雨水径流中的非点源污染物。对于不同污染物的削减效果, LID 设施组合对 TP 和 SS 的削减效果整体要优于对 COD 和 TN 的削减效果。

通过研究 LID 设施组合布设在不同分区的调控效果发现, 分区位置对 LID 性能有重要影响。上游分区布设以源头控制为主, 中游和下游分区则以延缓径流速度和吸收污染物为主; 不同分区的组合布设会影响 LID 设施的调控效果, 布设时应考虑分区布局与 LID 设施之间的联通性。

分区划分应结合研究区实际地形走势以及管网分布情况, 在小区建设规划之前要对全区按需布设 LID 设施; 进行老旧小区改造时, 可优先选择分区布设 LID 设施, 并主要考虑修建在上中游分区或下游分区, 以充分发挥 LID 的作用。

参考文献:

- [1] KONRAD C P, BOOTH D B. Hydrologic trends associated with urban development for selected streams in the Puget Sound basin, Western Washington[M]. US Geological Survey, 2002.
- [2] BAEK S, LIGARAY M, PYO J, et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124886. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124886.
- [3] 汤梓杰, 刘浩泉, 杨侃, 等. 基于 AMPSO 算法的住宅区 LID 布设方案优化研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(11): 73-84. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.11.008.
- [4] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.023.
- [5] 李莹, 莫淑红, 杨元园, 等. 基于 NSGA-II 算法的海绵城市 LID 设施布设比例优化[J]. *给水排水*, 2021,

- 57(S1): 475-481. DOI: [10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.S1.097](https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.S1.097).
- [6] ZHENG K, GUAN Y. A multiobjective spatial optimization model of LID based on catchment landuse type[J]. *Water*, 2022, 14(12): 1944. DOI: [10.3390/w14121944](https://doi.org/10.3390/w14121944).
- [7] 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. DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.019](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.019).
- [8] 戎贵文, 李姗姗, 甘丹妮, 等. 不同LID组合对水质水量影响及成本效益分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 21-29. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0003](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0003).
- [9] 徐宗学, 李鹏, 程涛. 基于海绵城市理念的LID措施优化布局: 以济南市黄台桥流域为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 552-562. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0056](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0056).
- [10] 李尤, 邸苏闯, 潘兴瑶, 等. 基于改进层次分析法的LID空间布局优化研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(23): 113-120. DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.019](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.019).
- [11] 吴盈盈, 余敦先, 夏军, 等. 典型LID措施对城市降雨径流过程影响[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 833-842. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0087](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0087).
- [12] 叶陈雷, 徐宗学. 水工程调度与低影响开发协同作用下典型城市片区洪涝过程模拟: 以福州市为例[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 833-844. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20220220](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20220220).
- [13] 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. DOI: [10.11660/slfdb.20161110](https://doi.org/10.11660/slfdb.20161110).
- [14] 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. DOI: [10.11660/slfdb.20171107](https://doi.org/10.11660/slfdb.20171107).
- [15] 李怀民, 常晓栋, 徐宗学, 等. 基于SWMM模型的坡地小区海绵城市改造效果评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 43-49. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0004](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0004).
- [16] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下LID措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 45-55. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.005](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.005).
- [17] 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. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.027](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.027).
- [18] 张曼, 周可可, 张婷, 等. 城市典型LID措施水文效应及雨洪控制效果分析[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(5): 57-71. DOI: [10.11660/slfdb.20190507](https://doi.org/10.11660/slfdb.20190507).
- [19] 王小杰, 夏军强, 董柏良, 等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 196-207. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.004](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.004).
- [20] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册-排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [21] 杨利伟, 王岩松, 程舜媛, 等. 基于SWMM的透水铺装道路与生态沟渠耦合的排水系统削峰控污研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9): 142-151. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.014](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.014).
- [22] 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. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.005](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.005).
- [23] YANG T H, DONG Z C. The effect of sponge city construction on non-point source load reduction: A case study in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2021, 21(2): 223-232. DOI: [10.1016/j.ecohyd.2020.12.002](https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.12.002).
- [24] 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. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.007](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.007).
- [25] 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. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2021.03.002](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2021.03.002).
- [26] 郑妍妍, 秦华鹏. 低影响开发设施组合的水文模拟及不确定性分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 114-121. DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.018](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.018).
- [27] 戎贵文, 沈齐婷, 戴会超, 等. 基于海绵城市理念的屋面雨水源头调控技术探讨[J]. *水利学报*, 2017, 48(8): 1002-1008. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20170167](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20170167).
- [28] 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. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.020](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.020).
- [29] AHIABLAME L, SHAKYA R. Modeling flood re-

- duction effects of low impact development at a watershed scale[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 171: 81-91. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.01.03.
- [30] POUR S H, WAHAB A K A, SHAHID S, et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102373. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102373.
- [31] KONG Z, SHAO Z, SHEN Y, et al. Comprehensive evaluation of stormwater pollutants characteristics, purification process and environmental impact after low impact development practices[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123509. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123509.
- [32] LE FLOCH N, PONS V, HASSAN A E M, et al. Catchment scale effects of low impact development implementation scenarios at different urbanization densities[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128178. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128178.

Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM

LIU Bo¹, RONG Guiwen^{1,2}, CHEN Qingqing¹, CHEN Shangzhi¹, HE Tian¹

(1. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the effect of low impact development (LID) facilities on alleviating urban flood disaster and reducing pollution load, four kinds of LID facilities were selected, including green roof, rainwater garden, permeable pavement and rainwater tank. By constructing the SWMM model, the catchment surface was divided into different partitions according to the actual terrain and pipe network direction. The influence of LID facility combination on runoff control and rainwater pollution load under the seven layout schemes was analyzed, the results showed that the LID facility combination could effectively reduce the runoff and rainwater pollution load for the seven layout schemes, and the LID facility combination has a better control effect on the runoff in the upstream and midstream areas. Under the same design rainfall return period, the reduction effect of each layout scheme was as follows: the whole area > upstream and midstream areas > midstream and downstream areas > upstream and downstream areas > downstream area > midstream area > upstream area. The runoff reduction rate in the downstream area was 5.19% - 6.82% higher than the upstream area, the upstream and midstream areas were 1.87%-3.62% higher than the upstream and downstream areas, and 16.48%-18.97% higher than the downstream area. When the whole area was deployed, it was 29.60%-31.17% higher than the downstream area and 12.20% -13.12% higher than the upstream and midstream areas. Therefore, before the planning and construction of sponge city, it was suggested that: the LID facilities should be set up on demand in the whole area; in the transformation of old residential areas, the LID facilities could be emphatically considered in the upstream and midstream areas.

Key words: LID facility combination; SWMM model; regional distribution; runoff coefficient; pollutant