基于暴雨洪水管理模型的铁路车站片区雨洪模拟及低影响开发效果评价

韩媛雯，鲍学英

（兰州交通大学 土木工程学院，兰州 730070）

摘　要：[目的] 减轻西北地区高速铁路车站片区建设过程引起的水资源矛盾问题，实现铁路车站片区雨水的积存、渗透和净化，促进雨水资源的利用和生态环境保护，实现高速铁路绿色施工。[方法] 以甘肃省兰州市西客站为研究对象，采用暴雨洪水管理模型(SWMM)研究了传统开发下的雨水径流效应，并对采用生物滞留池、透水铺装、绿色屋顶及生物滞留池＋透水铺装＋绿色屋顶组合措施方案 3 种低影响开发(LID)方案进行了模拟。[结果] 不同 LID 措施均能有效削减径流总量、洪峰流量、溢水量及延后峰现时间，其中组合 LID 方案的控制效果最佳，对洪峰流量和径流总量削减率高达 75.9%和 41.6%；透水铺装和生物滞留池对洪峰流量和径流总量的削减效果较显著；绿色屋顶单独铺设时，雨洪控制效果较差。[结论] 合理采用 LID 措施可以有效地实现雨水的可持续管理，减小铁路车站片区的洪涝灾害。

关键词：可持续雨洪管理；SWMM；低影响开发；铁路车站片区；海绵城市

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2020)01-0123-07　　**中图分类号**：U217，S276.5

文献参数：韩媛雯，鲍学英. 基于暴雨洪水管理模型的铁路车站片区雨洪模拟及低影响开发效果评价[J]. 水土保持通报，2020，40(1)：123-129. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.018；Han Yuanwen，Bao Xueying. Rainfall flood simulation and low impact development effect evaluation of railway station area based on stormwater management model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(1)：123-129.

Rainfall Flood Simulation and Low Impact Development Effect Evaluation of Railway Station Area Based on Stormwater Management Model

Han Yuanwen，Bao Xueying

（*School of Civil Engineering*，*Lanzhou Jiaotong University*，*Lanzhou*，*Gansu* 730070，*China*）

Abstract：[Objective] Rainfall accumulation，penetration，and purification are implemented in a railway station area to alleviate the barrier of water resources caused by the construction of a high-speed railway station in Northwest China. The aim is to promote the utilization of rainfall resources and ecological environment protection and achieve the sustainable construction of a high-speed railway. [Methods] The west railway station in Lanzhou City，Gansu Province was selected for this study. Based on stormwater management model (SWMM)，the rainwater runoff effect were analyzed under traditional development conditions，after the independent implementation of a biological retention pool，permeable pavement，and green roof，and after the combined implementation of the three measures above. The three low impact development (LID) measures were simulated. [Results] Different LID measures can effectively reduce total runoff，flood peak flow，overflow，and delayed peak time. The combined LID measures had the best control effect，and the total flood rate and runoff reduction rate reached a maximum of 75.9% and 41.6%，respectively. The permeable pavement and bioretention ponds had a significant effect on the reduction of flood peak flow and total runoff；when the green roof was implemented separately，the storm flood control effect was weak. [Conclusion] The use of LID measures can effectively result in the sustainable management of rainwater and reduce flood disasters in railway station areas.

收稿日期：2019-08-05　　**修回日期**：2019-09-10

资助项目：国家自然科学基金项目“西北寒冷地区铁路绿色施工措施及效果评价研究”(51768034)

第一作者：韩媛雯(1994—)，女(汉族)，甘肃省兰州市人，硕士研究生，研究方向为铁路绿色施工。Email：1762604815@qq.com。

通讯作者：鲍学英(1974—)，女(汉族)，宁夏回族自治区中卫市人，博士，教授，主要从事建设项目管理及经济评价工作。Email：813257032@qq.com。

Keywords: **sustainable stormwater management**; **stormwater management model (SWMM)**; **low impact development (LID)**; **railway station area**; **sponge city**

随着中国城市土地开发,下垫面硬化面积扩大,可渗性绿地急剧减少,破坏了城市原有的自然水文规律,在降雨天气时出现了汇流时间缩短,峰现期提前及洪峰量增加等现象,并引发了内涝,雨后水资源短缺,水体污染严重等一系列问题[1]。铁路车站工程建设作为城市建设的一部分,其雨水处理方式会对铁路的正常运营及人民的生命财产产生巨大的影响[2]。传统的铁路车站片区建设其雨水主要通过散排,排水沟,雨水管道等形式快速排除至市政雨水管道。这不但使得雨水资源没有充分利用,而且会使下游市政管道排涝负担加剧,局部出现洪涝灾害。特别是中国西北寒旱地区,这种矛盾更为突出。为此,探索新型铁路车站雨洪管理模式势在必行。

低影响开发(low impact development, LID)技术[3]是以维持区域开发前后自然水文条件基本不变为目标,达到有效控制城市雨洪径流和保护生态环境的新型生态技术措施。目前,低影响开发措施主要包括透水铺装、绿色屋顶、雨水花园、下凹式绿地、雨水桶、植草沟等。国内外有很多 LID 仿真软件[4],SWMM(stormwater management model,暴雨洪水管理模型)是其中比较完善的一个,包括水文、水力、水质 3 个模块,能够对连续事件和单一事件进行模拟,且适用性比其他模型更为广泛。近年来,国内外学者针对 SWMM 模型在城市雨洪管理中的适用性做了很多研究。朱寒松等[5]以重庆市渝北区花朝工业园为研究对象,构建 SWMM 模型模拟分析了组合 LID 方案与单一 LID 方案间的关系。王静等[6]基于 SWMM 软件模拟不同雨水控制方案下山地城市的径流效应。胡爱兵等[7]以深圳市光明新区某已建 LID 市政道路为例,介绍了 LID 措施及 SWMM 模型的建立方法。张亚洲等[8]通过研究提出雨水花园可缓解西北地区城市普遍缺水的问题。熊赟等[9]以深圳市某已建公共建筑为例,选用绿色屋顶、下沉式绿地、植被草沟、透水性铺装和雨水桶 5 种 LID 措施,分析评价了单项及其组合对雨水径流削减的效果。张亮[10]重点分析了湿陷性黄土、干旱地区等的海绵城市建设方式,并以西咸新区为例提出解决措施和方案。任博[2]指出铁路车站雨水排放和资源最佳化利用的重要性,并指出低影响开发技术在铁路车站建设中的应用前景。陈言菲等[11]对比分析了海绵城市改造措施(增加透水地面面价)和传统改造措施(增大雨水管道,增设泵站,雨水池)两种优化方案对雨水控制效果。Li Qian 等[1]运用 AHP 方法来定量评估 LID 实践的环境,经济和社会效益。Fanhua Kong 等[12]基于雨水管理模型(SWMM)探索了雨水径流特征对城市规模的四种不同土地利用转换情景的水文响应。现有研究多集中于城市化发展成熟的城市区域和居民区,鲜有针对铁路车站工程可持续雨洪管理的研究。

因此,本文以兰州市西客站为例,运用 SWMM 模型模拟分析在不同降雨重现期下不同 LID 措施情景方案的水文过程。通过对西客站车站片区不同 LID 措施方案的优选,以期为铁路车站工程可持续雨洪管理提供新方法、新思路。

1 SWMM 模型建立

1.1 研究区概况

兰州市西客站位于中国西北地区甘肃省兰州市,处于半干旱气候区,多年平均降水 315.1 mm。总建筑面积 2.60×10^5 m^2,其中站房工程面积为 1.02×10^5 m^2。开发前研究区主要是耕地,部分零散住宅及道路组成,不透水率为 24%;开发后主要由停车场、道路、建筑屋面及景观广场组成,不透水率达到 86%;透水区域主要是景观绿地,仅为 14%。

1.2 研究区概化

根据设计院等相关单位提供的高程、土地利用类型、排水管网等资料构建 SWMM 模型。先将所收集的管网数据在 AutoCAD 中进行预处理,运用 HS-Data 插件提取排水管网中的雨水井、管段信息。其中雨水井概化为节点,管段概化为线段,调整各管段水流方向并确定出水口。然后利用 HS-Data 中的泰森多边形法自动生成子汇水区域。最终,研究区概化为 254 个子汇水区(S1-S254),253 个雨水井(J1-J259),252 条管段(C1-C252)及 4 个排放口(Out1-Out4),结果如图 1 所示。

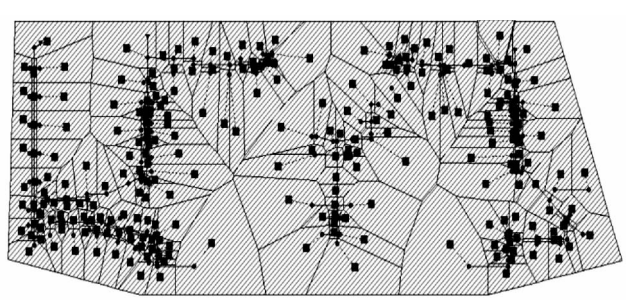


图 1 兰州市西客站排水管网概化图

1.3　模型参数选择与优化验证

SWMM 模型的参数包括实测参数和经验参数。本研究区域中实测参数如汇水区面积、平均坡度、不透水面积比、管径及管道的长度等,可通过实测数据、规划图纸等资料获得。经验参数如地表洼蓄量、透水和不透水曼宁系数等,很难进行实际测量,但在模型的运行过程中又必不可少,这部分数据的初值主要参考 SWMM 模型手册的推荐值及相关文献[13-15],再通过率定和检验获取适合本研究区实际情况的经验参数。降雨入渗过程采用适合城市区域的霍顿方程(Horton)进行模拟。地表产流模型分为有洼蓄量的不透水地表、无洼蓄量的不透水地表和透水地表 3 部分,分别进行计算。地表汇流计算采用非线性水库模型,模拟排水系统流量演算的水力模型选用动力波模型,主要参数取值如表 1 所示。

为验证校准结果的稳定性,选定两场实际降雨(20170623 和 20170711)进行参数验证,将研究区监测点的实测流量过程和 SWMM 模型的模拟流量过程进行对比分析,根据《水文水情预报规范》(GBT 22482-2008)[16]要求,采用 Nash-Sutcliffe 效率系数和平均流量误差 e_R 来评估模型模拟的精度。

图 2 为 2017 年 6 月 23 日和 2017 年 7 月 11 日两场降雨的径流量监测值和模拟值。经计算两场降雨模拟结果的纳什效率系数 R_{NS} 分别为 0.86,0.90,均在 0.8 以上;且平均流量误差 e_R 分别为 12.6%,10.9%,均在 15%以内,故说明该 SWMM 模型在研究区域内的模拟效果较好,可信度高。

表 1　SWMM 模型主要参数取值

项 目	模型主要参数	参数取值	建议取值范围
Horton 入渗模型	最大下渗率/(mm·h^{-1})	76.2	72.4～78.0
	最小下渗率/(mm·h^{-1})	3.81	3.18～3.82
	下渗衰减系数/h	2.0	—
子汇水区	不透水地表曼宁系数	0.015	0.01～0.05
	透水地表曼宁系数	0.3	0.05～0.8
	不透水地面洼蓄水量/mm	2.5	1.30～2.6
	透水地面洼蓄水量/mm	6.5	2.54～7.59
	平均坡度/%	0.015	0～1
管 道	管道曼宁系数	0.013	0.012～0.015

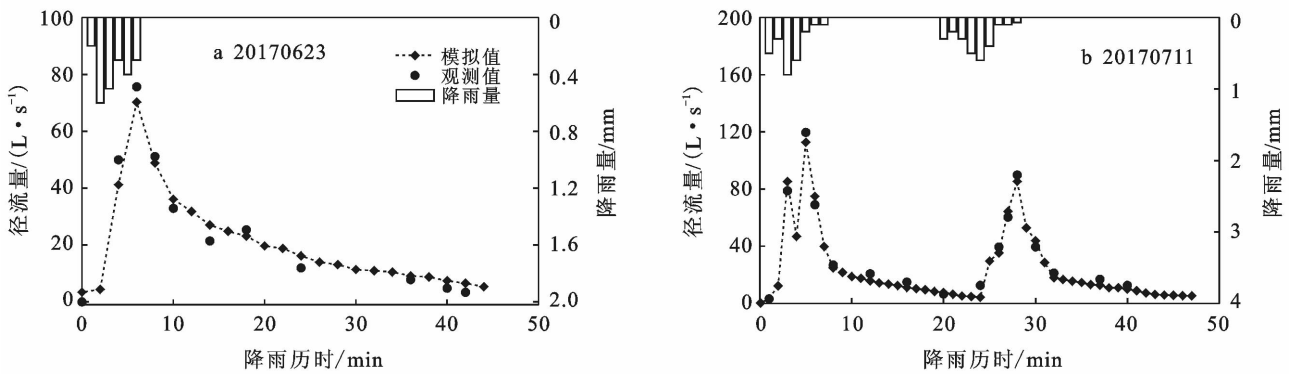


图 2　SWMM 模型参数率定与验证模拟结果

1.4　设计降雨

依据 2014 年最新的兰州市暴雨强度公式[17]求取兰州市的设计降雨强度,降雨历时为 2 h,降雨重现期分别为 2,5,10,20 a,由于缺乏当地降雨统计资料,根据相关资料推荐该系数取值一般为 0.3～0.5,本研究雨峰系数 r 选用经验值 0.4[14,18],采用芝加哥降雨模型[19-20]拟合生成 2 h 降雨过程线,兰州市降雨强度如式(1),不同重现期下的降雨强度过程如图 3 所示。

$$q=\frac{1\ 143.985\ 3(1.0+1.330\ 2\lg P)}{(t+12.695\ 620)^{0.830\ 818}} \tag{1}$$

式中:q 为平均降雨强度(mm·min^{-1});P 为设计降雨重现期(a);t 为降雨历时(min)。

从图 3 可看出,雨峰出现在大约 45～55 min 之间,最大降雨强度分别为 1.161 5,1.600 6,1.932 7,2.264 8 mm/min。

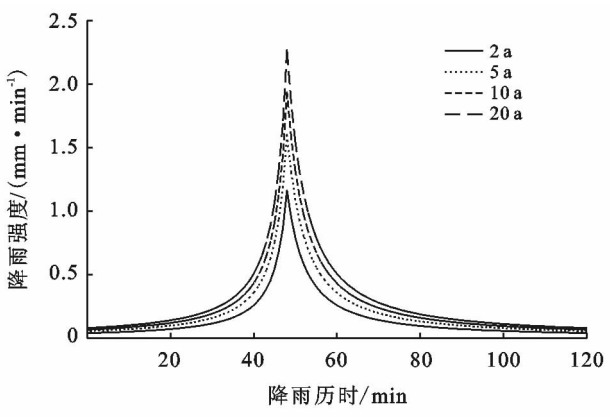


图 3　兰州市设计降雨过程线

1.5 LID 措施布设

考虑到兰州西客站车站区域的土地利用类型主要有屋顶、停车场、不透水道路、硬化广场、普通绿地等。根据实际情况，本文选取透水铺装、生物滞留池、绿色屋顶这 3 种典型 LID 措施，基于 SWMM 模型共设置 5 种不同 LID 用地布局情景，方案 A 为传统开发模式，无 LID 措施，作为对照组，其中不透水面积约占 86%；方案 B 为单一绿色屋顶措施，主要布设在站房屋顶、商业楼的楼顶，不透水面积约占 53.98%；方案 C 为单一透水铺装措施，主要布设在非承重道路、停车场、广场等，不透水面积约占 32.00%；方案 D 单一生物滞留池措施，主要布设在花园、绿化草坪中，不透水面积约占 46.82%；方案 E 为绿色屋顶＋透水铺装＋生物滞留池组合措施，不透水面积约占 12%，各 LID 措施设置参数及比例与方案 B—D 一致，以便于分析比较各方案对研究区雨水径流控制的效果。不同 LID 措施的参数设置主要参考《SWMM 模型 LID 参数设置方法》及国内外相关学者给定的参考值[21-22]，具体 LID 参数设置见表 2。

表 2 兰州市西客站 LID 措施主要参数设置

竖向结构	各层参数	LID 措施		
		生物滞留池	绿色屋顶	透水铺装
表面层	蓄水层深度/mm	250	50	5
	植被覆盖率/%	0.1	0.15	0
	曼宁系数	0.15	0.24	0.15
	表面坡度/%	0	1	1
种植土壤层	厚度/mm	600	150	—
	孔隙率/%	43.7	43.7	—
	田间持水率/%	10.5	10.5	—
	枯萎系数/%	4.7	4.7	—
	导水率/(mm·h^{-1})	30	30	—
	导水坡度	45	45	—
	吸水头/mm	61	61	—
铺装层	厚度/mm	—	—	100
	孔隙率/%	—	—	15
	透水速率/(mm·h^{-1})	—	—	150
蓄水层	厚度/mm	300	—	300
	孔隙度/%	70	—	70
排水层	流量系数	0.56	—	0.33
	流量指数	0.5	—	0.5
	偏移高度/mm	10	—	10
排水垫层	厚度/mm	—	50.8	—
	孔隙度/%	—	50	—
	粗糙系数	—	0.1	—

2 模拟结果及分析

2.1 径流曲线变化特征

图 4 分别为不同降雨重现期下，方案 A—E 对降雨径流的控制效果曲线，由图 4 可知：①通过分析不同降雨重现期下的降雨径流过程，径流变化规律与降雨变化规律一致，径流峰值滞后于降雨峰值，滞后时间为 10 min 左右，符合降雨产流规律；②传统开发模式下初始产流时间最早，且径流量最大，持续时间最长，说明传统铁路车站片区的建设使土地下垫面大规模硬化，不透水表面增加，雨水无法及时下渗，从而极大地缩短了地表产流时间，且产生较大的径流，增加了下游排水系统的负担和内涝的风险。方案 B，C，D 下初始产流时间滞后效果不太明显，说明单独布设选用的 LID 措施对初始产流时间的滞后作用不大，这一现象与王静等[6]得出的结论一致；③与传统开发模式相比，各方案均能在一定程度上削减洪峰流量和延后峰现时间，这是由于渗透铺装、雨水花园和绿色屋顶等 LID 措施在一定程度上提高研究区的渗水、滞水、蓄水能力。在同一降雨重现期下，削减和滞后洪峰的效果依次为组合方案＞生物滞留池＞透水铺装＞绿色屋顶＞传统开发。由结果可知：组合方案的效果最好，在 4 种降雨情形下，洪峰流量分别削减了 0.583，0.919，1.279，1.465 m^3，径流峰现时间较降雨峰值分别推迟了 12，9，8，7 min。单独布设时，生物滞留池削峰减排的效果优于透水铺装和绿色屋顶，这是因为生物滞留池有较厚的种植土壤层和蓄水层，可以很好的下渗和储蓄雨水，从而能有效推迟突发暴雨的峰现时间，削减洪峰流量；而模型设置中透水铺装和绿色屋顶的蓄水容积都不及生物滞留池，故效果不理想（表 3）。

2.2 径流总量分析

图 5 为不同设计暴雨重现期下各布设方案的 4 个出水口断面径流过程模拟结果。

由图 5 可知：① 与传统开发模式相比，各方案均能在一定程度上降低径流系数、削减径流总量，这体现了以 LID 技术为核心的海绵城市化改造可以改善研究区的吸水能力。传统开发方案产生的径流总量最大，分别达到 4.237，5.666，6.987，8.993 m^3（见表 3）。组合 LID 方案削减径流总量效果最佳，相比于传统模式分别削减径流总量 41.7%，35.9%，35.3%，35.1%，透水铺装和生物滞留池的效果次之，绿色屋顶效果最差；②随着降雨强度的增大，各 LID 措施对径流总量的削减率均逐步减小（见图 5a），主要是因

为透水铺装、生物滞留池、绿色屋顶均是凭借一定的蓄水空间滞留雨水径流、增加下渗、延缓汇流时间,当储蓄空间逐渐达到饱和状态时,削减能力也相应减小。这也证明 LID 措施用于控制历时短,强度不大的降雨效果较为明显,而对于长时间的强降雨控制有限;③同一降雨重现期,5 种方案对径流总量的削减效果依次是:组合方案>生物滞留池>透水铺装>绿色屋顶>传统开发;而对综合径流系数的削减比例依次是:组合方案>透水铺装>生物滞留池>绿色屋顶>传统开发。结果表明:单独布设时,生物滞留池削减径流总量效果优于透水铺装,与削减洪峰值效果一致,主要是由于生物滞留池利用低洼空间贮存雨水,类似于小型雨水桶,达到减少径流外排、削减洪峰流量的作用。而透水铺装对径流系数的削减优于生物滞留池,则是因为透水铺装布置较为分散,更能延缓汇流过程,增加下渗;④为比较分析同等面积比例的 5 种 LID 方案对径流总量、径流峰值、径流系数的消减效果,进一步计算单位布设面积的径流总量、径流峰值、径流系数的削减比例(见表 4)。可以得出,单位面积比例下,生物滞留池措施的径流总量、径流峰值和径流系数削减量最高;渗透铺装和 LID 组合方案次之,绿色屋顶效果最小。

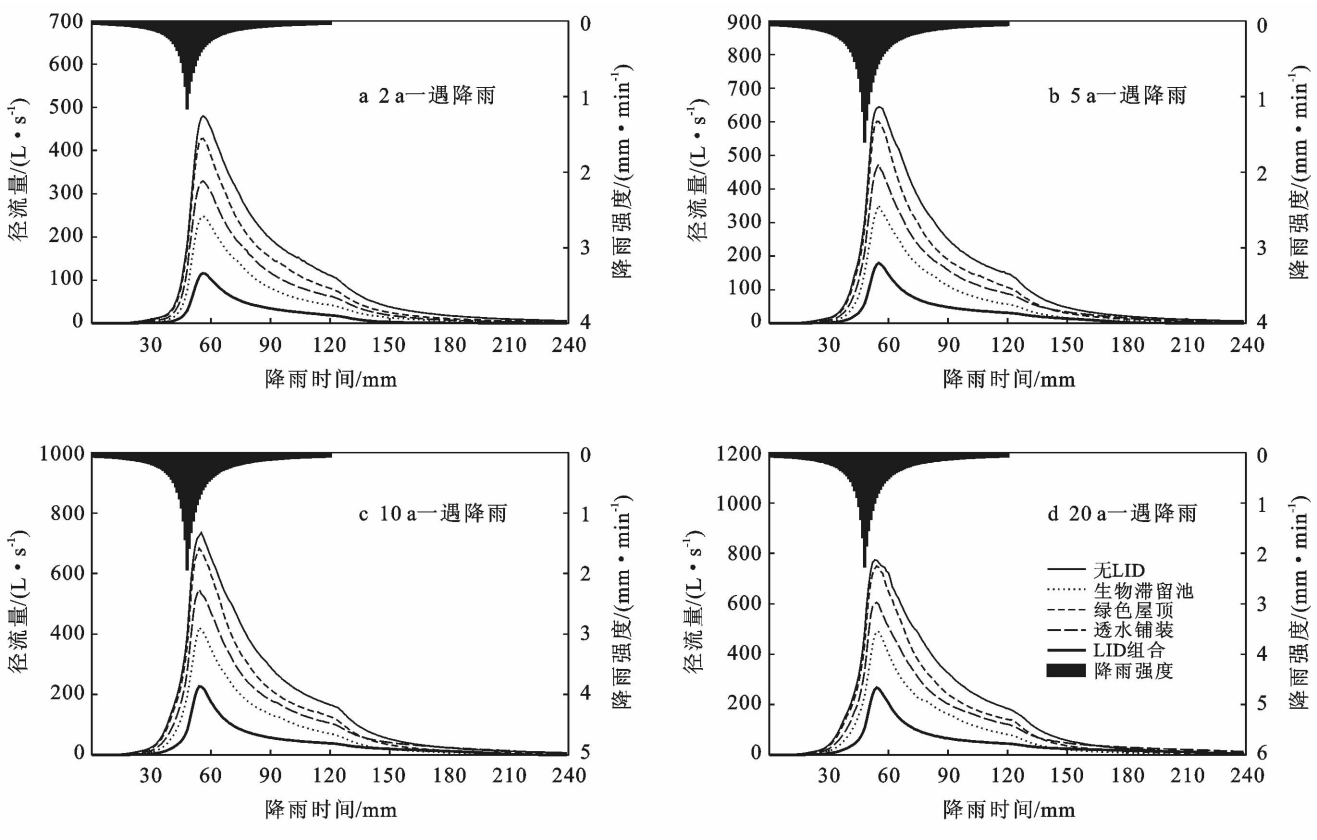


图 4　兰州市西客站不同雨频下各方案出口流量模拟结果

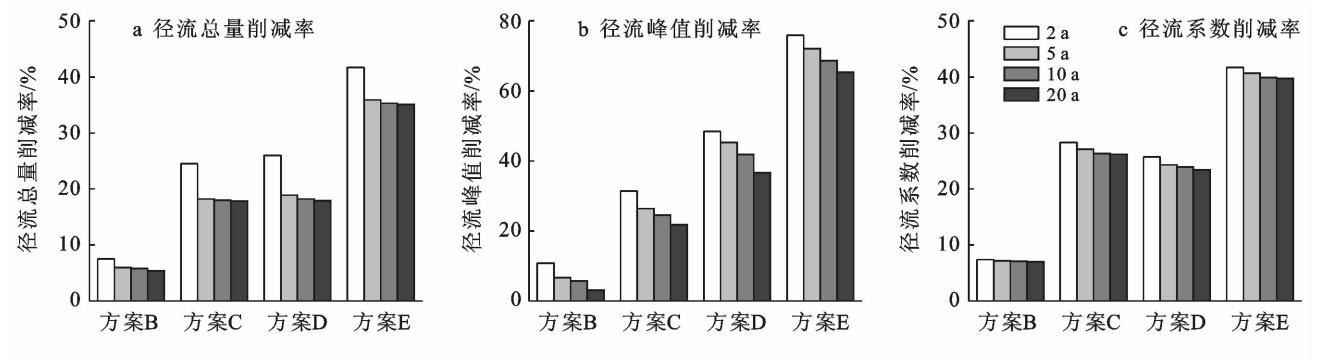


图 5　兰州市西客站不同降雨重现期下各 LID 方案对径流过程的影响

表 3 兰州市西客站不同降雨重现期下各方案径流总量及洪峰模拟结果

方案	径流总量/10^3 m^3				径流峰值/($m^3 \cdot s^{-1}$)				径流系数			
	P=2 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=2 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=2 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a
A	4.237	5.326	6.129	8.993	0.722	1.130	1.130	1.787	0.837	0.879	0.893	0.911
B	3.920	5.666	6.987	8.309	0.628	0.974	1.246	1.439	0.775	0.812	0.830	0.842
C	3.199	4.637	5.727	6.839	0.441	0.679	0.865	1.055	0.619	0.659	0.678	0.683
D	3.135	4.595	5.712	6.682	0.320	0.499	0.645	0.804	0.632	0.665	0.680	0.691
E	2.472	3.631	4.519	5.416	0.139	0.211	0.266	0.322	0.488	0.521	0.537	0.549

注:A,B,C,D,E 方案的具体措施详见正文 1.5LID 措施布市;P 为降雨重现期。下同。

表 4 兰州市西客站不同降雨重现期下各 LID 单位布设面积的径流控制结果

方案	径流总量削减率/%				径流峰值削减率/%				径流系数削减率/%			
	P=2 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=2 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a	P=2 a	P=5 a	P=10 a	P=20 a
A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	0.54	0.43	0.42	0.38	0.77	0.48	0.41	0.22	0.53	0.51	0.50	0.50
C	5.96	4.42	4.39	4.34	7.64	6.43	5.95	5.31	6.89	6.59	6.40	6.38
D	10.62	7.72	7.45	7.31	19.75	18.51	17.07	14.94	10.48	9.94	9.74	9.54
E	2.03	1.75	1.72	1.71	3.69	3.51	3.34	3.18	2.03	1.98	1.94	1.93

2.3 溢水节点

表 5 为分析比较不同重现期降雨下、不同方案设置下研究区溢流节点数量、溢流时长以及溢流容积变化规律。

表 5 兰州市西客站积水情况

重现期/a	方案 A			方案 B			方案 C			方案 D			方案 E		
	溢水节点/个	溢水量/m^3	溢水时间/min	溢水节点/个	溢水量/m^3	溢水时间/min	溢水节点/个	溢水量/m^3	溢水时间/min	溢水节点/个	溢水量/m^3	溢水时间/min	溢水节点/个	溢水量/m^3	溢水时间/min
2	8	0.20	61.2	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—
5	19	0.43	79.2	11	0.32	66.0	6	0.15	43.2	2	0.12	37.2	0	—	—
10	36	0.69	87.0	30	0.52	76.8	28	0.26	52.8	20	0.18	43.8	1	0	3
20	65	1.00	91.8	57	0.73	85.8	46	0.37	61.2	42	0.24	49.2	2	0.01	10.2

当节点水位超出检查井最大深度时发生溢流现象造成地面积水。溢流时间和溢流容积增大也会带来积水面积增加,从而引发车站片区内涝。故选取溢流节点、溢流时间、总溢流容积 3 个参数进行分析,由表 3 可知:①与传统开发模式相比,4 种 LID 方案均能减少溢水节点个数、总溢流量、溢流时间。② 随着降雨重现期的增加溢流节点个数增加,溢流时间也在增长,这会带来积水面积的增加,很有可能造成车站片区局部内涝。除了 LID 组合方案效果显著外,单独布设方案效果一般,表明组合方案能较好的缓解研究区内涝问题。③ 在同一降雨重现期下,5 种方案对积水的削减效果依次为组合方案>生物滞留池>透水铺装>绿色屋顶>传统开发,与 LID 措施对洪峰流量的削减效果一致。

3 结论

(1) 本文建立的模型在铁路车站片区内具有良好的适用性,模拟结果可信性较高。

(2) 径流曲线与降雨过程线的形状相似;传统开发模式下初始产流时间最早且径流持续时间最长,其阻碍了研究区的雨水下渗,增加了内涝风险。

(3) 不同 LID 方案均能有效削减径流总量、洪峰流量、溢水量及延后峰现时间,从而可以减小市政排水管网的排水压力。其中组合 LID 方案效果最佳,对洪峰流量和径流总量削减率高达 75.9%和 41.6%。

(4) 单独布设时,生物滞留池在削减径流总量和径流峰值上有更好的效果,透水铺装在削减径流系数上有更好的效果,绿色屋顶的雨洪控制效果一般。由于 LID 措施自身滞水、蓄水能力有限,在低重现期降雨时,对研究区雨洪控制效果更显著。

[参 考 文 献]

[1] Li Qian, Wang Feng, Yu Yang, et al. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 10-20.

[2] 任博. 低影响开发模式在铁路车站中的应用潜力分析[J]. 科技创新导报,2017,14(9):50-51,53.

[3] 梁小光,武治国,任俊雯. 子汇水区分割对 SWMM 低影响开发模拟的影响研究[J]. 中国给水排水,2019,35(6):1-5.

[4] 杨偲偲. LID 设施在城市道路设计中的应用[D]. 南京:东南大学,2017.

[5] 朱寒松,董增川,曲兆松,等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护,2019,35(2):32-36.

[6] 王静,林于廉,何强,等. 不同雨水控制利用方案下城市暴雨径流效应[J]. 中国给水排水,2016,32(1):100-105.

[7] 胡爱兵,任心欣,裴古中. 采用 SWMM 模拟 LID 市政道路的雨洪控制效果[J]. 中国给水排水,2015,31(23):130-133.

[8] 张亚洲,廖伟彪,李彬. 西北地区基于低影响开发理念的城市雨水花园设计[J]. 草原与草坪,2017,37(5):53-58.

[9] 熊赟,李子富,胡爱兵,等. 某低影响开发公共建筑雨洪效应的 SWMM 模拟与评估[J]. 给水排水,2015,51(S1):282-285.

[10] 张亮. 西北地区海绵城市建设路径探索:以西咸新区为例[J]. 城市规划,2016,40(3):108-112.

[11] 陈言菲,李翠梅,龙浩,等. 基于 SWMM 的海绵城市与传统措施下雨水系统优化改造模拟[J]. 水电能源科学,2016,34(11):86-89.

[12] Kong Fanhua, Ban Yulong, Yin Haiwei, 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.

[13] 黄金良,林杰,杜鹏飞. 城市降雨径流模拟的参数不确定性分析[J]. 环境科学,2012,33(7):2224-2234.

[14] 尚蕊玲,王华,黄宁俊,等. 城市新区低影响开发措施的效果模拟与评价[J]. 中国给水排水,2016,32(11):141-146.

[15] Liao Z L, Zhang G Q, Wu Z H, et al. Combined sewer overflow control with LID based on SWMM: An example in Shanghai, China[J]. Water Science and Technology, 2015, 71(8): 1136-1142.

[16] 孙继昌,梁家志,乐嘉祥. 贯彻实施《水文情报预报规范》努力实现水文情报预报现代化[J]. 水文,2001,21(1):60-63.

[17] 杨银,吴红,张生财. 兰州市暴雨强度公式拟合方法研究[C]//第 34 届中国气象学会年会论文集. 郑州,2017:265-272.

[18] Campisano A, Catania F V, Modica C. Evaluating the SWMM LID Editor rain barrel option for the estimation of retention potential of rainwater harvesting systems [J]. Urban Water Journal, 2017,14(8):876-881.

[19] 戴有学,王振华,戴临栋,等. 芝加哥雨型法在短历时暴雨雨型设计中的应用[J]. 干旱气象,2017,35(6):1061-1069.

[20] 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.

[21] 杨钢,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的北京大红门排水区雨洪模拟及 LID 效果评价[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2018,54(5):628-634.

[22] 潘文斌,柯锦燕,郑鹏,等. 低影响开发对城市内涝节点雨洪控制效果研究:不同降雨特性下的情景模拟[J]. 中国环境科学,2018,38(7):2555-2563.

(上接第 122 页)

[14] 谭洪涛,王彬,朱琳,等. 基于模糊综合评价法的涪江绵阳段水环境质量评价[J]. 安徽农业科学,2017,45(9):70-72,93.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会发布. GB12358-2006 作业场所环境气体检测报警仪 通用技术要求[M]. 北京:中国标准出版社,2006.

[16] 廖亮,罗亭. 灰关联分析在南湖水库水质评价中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):229-234.

[17] 于福荣,刘中培,李俊. 灰关联分析法和模糊综合评判法在水库水质评价中的应用[J]. 水文,2012,32(4):67-70.

[18] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.

[19] 李名升,张建辉,梁念,等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展,2012,31(5):617-624.

[20] 杨飞,支崇远. 喀斯特高原地区人工湖泊富营养化治理初探:以红枫湖、百花湖为例[J]. 安徽农业科学,2009,37(9):4181-4183,4194.

[21] 黄钰铃,惠二青,刘德富. 河道型水库库湾水体富营养化评价及防治初探[J]. 人民长江,2006,37(4):16-17,49.

[22] 宋菲菲,胡小贞,金相灿,等. 国外不同类型湖泊治理思路分析与启示[J]. 环境工程技术学报,2013,3(2):156-162.