

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221589

基于 SWMM 模型的西北地区老城区 LID 措施方案研究

王元元¹, 刘碧云²

(1. 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司甘肃分公司, 甘肃 兰州 730030;
2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 全球各地持续的土地开发, 加速了不透水表面的建设, 改变了自然环境本身的水文循环途径, 导致城市内涝灾害频繁发生。老城区由于自身局限性, 不仅不能合理利用雨洪资源, 造成雨水资源浪费, 还常处于逢雨必涝的困境中。对此, 以甘肃省庆阳市西峰区老城区南大街片区为例, 通过 SWMM 建模, 模拟各重现期下不同 LID 措施方案构建效果, 比选适合研究区的最佳 LID 措施方案。结果表明, 组合措施削减作用最佳, 径流总量和径流峰值的削减率分别在 68.71%、68.90% 以上, 峰现时刻推迟 10~15 min, 且管网超载削减率随着降雨重现期的增大逐渐降低。研究结果可为西北地区老城区 LID 措施优化布设提供参考。

关键词: 海绵城市; 老城区; SWMM; LID

中图分类号: TV122⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)09-0077-04

1 概况

近年, 甘肃省庆阳市短历时强降雨频发, 2022年7月15日更是遭遇1956年以来最大洪水, 包括西峰区、宁县、庆城等7个县区不同程度受灾, 直接经济损失达1.36亿元。西峰区老城区建设年代久远且未进行系统规划, 建筑密度大, 绿化比例不足, 降雨形成的产流量大, 这使得老城区内涝风险变大, 且针对西北地区老城区 LID 措施建设的相关研究较为缺乏, 可参考的研究结果较少。研究不同 LID 措施方案在西峰区老城区的应用效果, 对推进西北地区老城区海绵城市建设、降低老城区内涝风险、缓解老城区水资源短缺及供需矛盾等方面均具有一定参考意义。本文选取陕甘宁盆地南部的西峰区兰州路以北, 九龙路以西, 南苑路以南, 南大街以东为研究区, 总面积约 0.92 km², 包含西峰区老城区九龙路和市人民医院两个内涝点; 全区年降水量为 400~600 mm。全市常年表现为盛夏、秋季多雨期, 春末、冬季少雪期, 一年两头旱、中间涝, 旱涝频繁; 在暴雨冲刷作用下, 塬面面积不断缩减, 水土流失严重; 为缓解极端天气对研究区的威胁, 通过收集相关降雨、径流、管网等基础资料, 建立南大街片区的 SWMM 模型, 研究 2、5、10、30、50 年五种重现期下不同

LID 措施构建效果, 提出适合研究区的最佳 LID 措施方案, 以期对西北地区老城区 LID 措施建设提供参考。

2 SWMM 建模

2.1 概化分区

选用计算状态稳定且能实现八种 LID 措施的 SWMM5.1 进行水文效应模拟^[1]。南大街片区开发密度较高, 采用人工划分法将研究区划分为 55 个子汇水区域, 利用管网和下垫面数据资料, 共概化 39 个管段, 39 个节点, 1 个排放口, 概化分区结果见图 1。

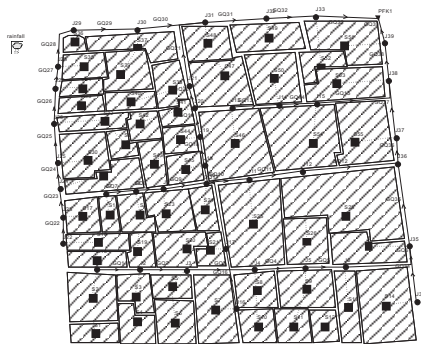


图 1 研究区南大街片区概化图

Fig. 1 Generalization of the south street area

2.2 设计暴雨

收稿日期: 2022-08-02, 修回日期: 2022-11-03

作者简介: 王元元(1993-), 男, 工程师, 研究方向为水利水电工程, E-mail: 651330691@qq.com

2.2.1 暴雨强度设定

庆阳市气象局依据《室外排水设计规范》要求,以 1951~2018 年国家基本气象站西峰站的气象监测资料为基础,修订了西峰区暴雨强度公式:

$$q = \frac{1\ 035.6(1 + 1.061\lg P)}{(t + 7.881)^{0.732\ 9}} \quad (1)$$

式中, q 为降雨强度, mm/min; P 为重现期, a; t 为降雨时长, min。

2.2.2 雨型设定

西峰区降雨多为短历时降雨,且降雨较为集中,一般在 3 h 内,选用芝加哥雨型来反映西峰区不同重现期下历时为 180 min、时间间隔为 1 min 的短历时降雨过程,西峰区雨峰位置系数 $r = 0.38$,可推求出重现期为 2、5、10、30、50 年对应的 3 h 降雨量分别为 31.74、41.90、49.58、61.76、67.42 mm。图 2 为不同重现期下西峰区的芝加哥降雨雨型。

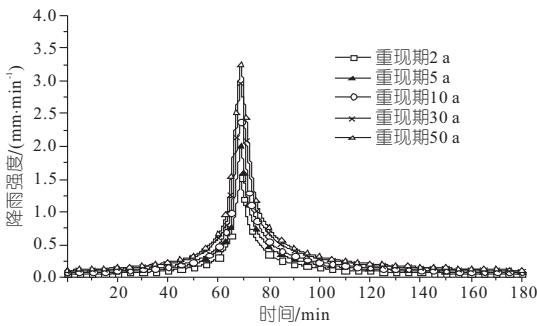


图 2 不同重现期下西峰区的芝加哥降雨雨型
Fig. 2 Chicago rainfall patterns in Xifeng under different return periods

2.3 模型参数率定检验

采用纳什效率系数法来判断模型是否可信,当纳什效率系数大于 0.75 时,表示模型可信。根据西峰区实测降雨资料和相关提供的南大街片区排放口流量资料,以西峰区 20180821、20190506 两场降雨实测样本作为参数率定、验证的依据。由纳什效率系数评判方法计算得径流率定、验证的效率系数分别为 0.89、0.94,均大于 0.75,洪峰流量误差分别为 8.13%、7.18%,均小于 10.00%,峰现时间误差较小,接近于 0。因此,率定、验证过程中模型可信度较好,故该模型在南大街片区的可信度较高。

2.4 现状模拟情况

查看南大街片区模拟情况发现,九龙路、南苑路、华宇路、育才东路、秦霸岭东路及永平东路为该片区易发生内涝风险的路段。重现期为 2 年时,节点和管道均未发生超载现象;随着重现期的增大,管道负荷不断加重,节点和管道超载个数占

比逐渐增加,内涝风险也逐渐增大。分析可知,导致该片区内涝路段的主要原因有四点:①该片区道路硬化程度普遍偏高,且中央绿化带渗水能力不足;②雨水管渠设计重现期偏低,排水管径偏小,过流能力不足;③老城区雨污合流污染严重,排水管混接严重;④现有雨水管渠系统维护不足,堵塞问题普遍存在,且缺乏雨水收集回用功能,造成雨水资源浪费。表 1 为各重现期下研究区水文特征现状统计,图 3 为研究区各重现期下现状径流过程线。

表 1 各重现期下研究区水文特征现状统计表

Tab. 1 Statistical table of the current status of hydrological characteristics in the study area under each recurrence period

重现期 P/a	降雨总 量/mm	降雨峰值 /($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	径流总 量/ mm	径流峰值 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值时 刻/min	径流 系数
2	31.738 6	91.356	23.156 5	7.527 2	78	0.729 6
5	41.895 2	120.594	31.471 7	10.609 1	74	0.751 2
10	49.578 3	142.710	37.853 0	13.408 5	72	0.763 5
30	61.755 8	177.762	48.064 5	17.102 4	71	0.778 3
50	67.418 0	194.058	52.849 0	19.679 1	71	0.783 9

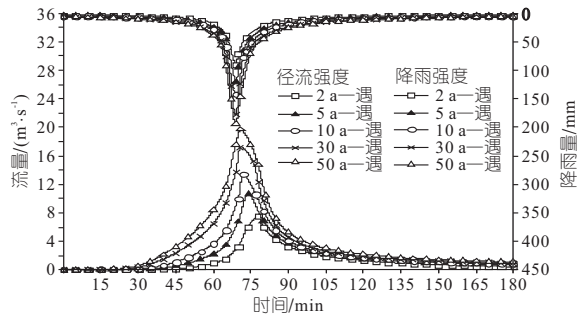


图 3 研究区各重现期下现状径流过程线
Fig. 3 The current runoff process line under each recurrence period in the study area

模拟结果显示,随着降雨设计重现期的增大,径流系数、径流总量及径流峰值均不断增大,其对应的峰值时刻也相应提前,这就意味着当极端天气来临时,南大街片区内涝风险也相应变大。为减小这种风险对人民生命财产的危害,需改造研究区 LID 措施,使研究区径流系数变小,以减轻城市排水系统的负荷。

3 LID 措施研究

3.1 LID 措施比选

LID 措施主要有透水铺装、雨水花园、植草沟、雨水桶、渗渠、绿色屋顶、生物滞留设施、雨水调蓄池^[2]。LID 措施适用性分析^[3]见表 2,LID 措施经济效益分析^[4-5]见表 3。

研究区为老城区,下垫面多为建筑屋面、道路、停车场、广场等,通过适用性和经济效益综合

表 2 LID 措施适用性分析

Tab. 2 LID measure applicability analysis

LID 措施名称	性能				
	收集雨水	净化雨水	地下水补给	削减峰值	控制径流
透水铺装	○	◎	●	◎	●
雨水花园	○	◎	●	◎	●
植草沟	○	◎	◎	○	○
雨水桶	●	◎	○	◎	◎
渗渠	○	○	◎	○	○
绿色屋顶	○	◎	○	◎	●
生物滞留池	○	●	●	◎	●
雨水调蓄池	●	◎	○	◎	●

注:●、◎、○分别为适用性强、较强、弱。

表 3 LID 措施经济效益分析

Tab. 3 Analysis of economic benefits of LID measures

LID 措施名称	成本 (元·a ⁻¹ ·m ⁻²)	维修费用 (元·m ⁻²)	维护要求
透水铺装	65~210	2.5~14.5	定期修剪、清理
雨水花园	160~700	32~74	定期浇灌、除草及修剪
植草沟	70~440	5.0~7.5	定期除泥、除草
雨水桶	40~100	2.0~6.0	定期清理、除淤
渗渠	40~200	3.5~7.5	定期清理、除泥
绿色屋顶	140~280	17~60	定期清理
生物滞留池	160~780	35~90	定期浇灌、除草及修剪
雨水调蓄池	700~1 200	60~170	定期清理、除淤

比较,透水铺装、绿色屋顶和雨水花园这 3 种措施在控制径流和削减峰值方面均有一定优势,同时能满足老城区建筑情况和下垫面类型的需求,景观效果较强,建设成本适中,维护保养也较为简单,因此本研究选用透水铺装、绿色屋顶和雨水花园 3 种雨洪管理措施对老城区进行改造。

3.2 LID 方案设计及参数设置

3.2.1 LID 方案设计

研究区土地类别主要有绿地、停车场、道路及建筑物,子汇水区面积不透水面积率高达 85.93%,为最大程度减少洪峰流量,集蓄雨水资源,本着应改尽改的原则,考虑对老城区能够进行 LID 措施控制的地块全部施加相应改造措施。表 4 为南大街片区 LID 措施布置方案。

表 4 南大街片区 LID 措施布置方案

Tab. 4 The south street area LID measures layout plan

方案名称	LID 措施名称	改造面积/km ²	改造比例/%
单项措施 1	透水铺装	0.377	46.27
单项措施 2	绿色屋顶	0.213	26.17
单项措施 3	雨水花园	0.072	8.83
组合措施	3 种措施组合	0.662	81.27

3.2.2 LID 措施参数设置

根据子汇水区土地特征,查阅相关标准、文献及 SWMM 模型手册^[6-7],对绿色屋顶、透水铺装及雨水花园参数进行设置,见表 5。

表 5 LID 措施参数取值

Tab. 5 Parameters of LID measures

LID 措施	项目	透水铺装	绿色屋顶	雨水花园
表面层	护堤高度/mm	45	52	350
	表面粗糙度	0.18	0.14	0.21
	表面坡度/%	2.6	1.2	0.15
土壤层	厚度/mm	42	140	550
	孔隙率	0.67	0.45	0.57
	枯萎点		0.1	0.1
蓄水池	导水率/(mm·h ⁻¹)	15	0.5	160
	吸水头/mm	3.6	3.5	3.5
	厚度/mm	350		
排水垫层	孔隙率	0.48		
	渗透速率/(mm·h ⁻¹)	17		
	厚度/mm		30	
粗糙度	孔隙率		0.55	
	粗糙度		0.14	

3.3 LID 措施构建效果

3.3.1 LID 措施构建效果

在 SWMM 模型软件中运行各方案措施,将各方案模拟结果与现状模拟结果进行对比,得出不同重现期下各 LID 措施方案的构建效果,表 6 为各方案措施下不同重现期水文特征值统计,图 4 为各单项措施下不同重现期研究区径流过程线。

表 6 各方案措施下不同重现期水文特征值统计

Tab. 6 Statistics of hydrological characteristic values at different reproduction periods under each measure

方案名称	重现期 P/a	径流总量/mm	径流峰值/(m ³ ·s ⁻¹)	峰值时 间/min	径流系数
单项措施 1	2	12.984 3	4.224 1	87	0.409 1
	5	17.684 0	5.981 5	81	0.422 1
	10	21.303 8	7.533 3	78	0.429 7
	30	27.117 0	9.648 7	75	0.439 1
	50	30.924 6	11.541 1	73	0.458 7
单项措施 2	2	17.605 4	5.783 1	82	0.554 7
	5	23.934 7	8.300 3	76	0.571 3
	10	28.810 0	10.347 9	74	0.581 1
	30	38.375 1	13.695 3	72	0.621 4
	50	43.208 2	16.189 9	72	0.640 9
单项措施 3	2	21.477 5	6.681 3	80	0.676 7
	5	29.159 1	9.431 7	75	0.696 0
	10	35.051 9	12.415 8	73	0.707 0
	30	44.482 7	15.811 7	72	0.720 3
	50	48.905 0	18.270 8	72	0.725 4
组合措施	2	5.236 9	1.744 2	93	0.165 0
	5	7.147 3	2.450 7	88	0.170 6
	10	8.621 7	3.079 2	85	0.173 9
	30	12.956 4	4.639 6	82	0.209 8
	50	16.537 6	6.120 5	81	0.245 3

由表 6、图 4 可以看出,施加各 LID 方案时,南大街片区径流过程与径流现状过程趋势相同,总体呈现出先增后减的状态,且各 LID 方案均能削减径流总量和径流峰值,径流系数也相应减小。其中,在重现期 2、5、10、30、50 年下,施加单项措

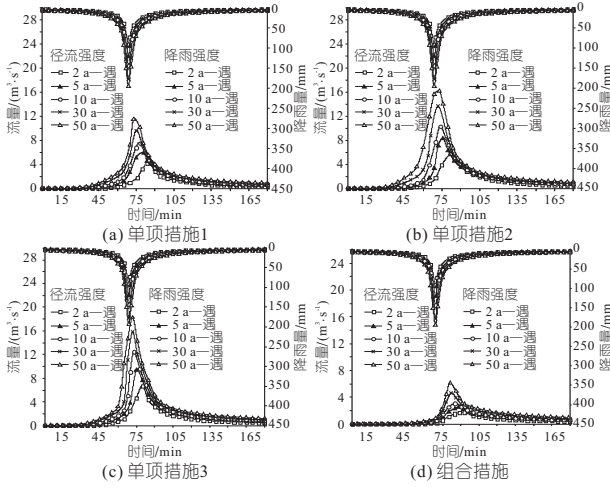


图4 各方案措施下不同重现期研究区径流过程线

Fig. 4 Runoff process lines in study areas with different reproducibility periods for each measure

施1时,径流总量分别削减了现状的43.9%、43.8%、43.7%、43.6%、41.5%;径流峰值分别削减了现状的43.9%、43.7%、43.6%、43.5%、41.3%;径流系数分别减小为现状的56.1%、56.1%、56.2%、56.4%、58.5%;峰值时间分别推迟了9、7、6、4、2 min;施加单项措施2时,径流总量分别削减了现状的24.0%、23.9%、23.8%、20.2%、18.2%;径流峰值分别削减了现状的23.2%、21.8%、22.8%、19.9%、17.7%;径流系数分别减小为现状的76.02%、76.05%、76.11%、79.84%、81.75%;峰值时刻分别推迟了4、2、2、1、1 min;施加单项措施3时,径流总量分别削减了现状的7.25%、7.35%、7.40%、7.45%、7.46%;径流峰值分别削减了现状的11.2%、11.1%、7.4%、7.5%、7.2%;径流系数分别减小为现状的92.74%、92.65%、92.60%、92.55%、92.54%,峰值时间分别推迟了2、1、1、1、1 min;施加组合措施时,径流总量分别削减了现状的77.38%、77.29%、77.22%、73.04%、68.71%;径流峰值分别削减了现状的76.82%、76.90%、77.03%、72.87%、68.90%;径流系数分别减小为现状的22.62%、22.71%、22.78%、26.96%、31.29%;峰值时间分别推迟了15、14、13、11、10 min。

3.3.2 管网构建效果

统计分析不同重现期下的4种LID措施模拟结果,得不同措施各重现期管网超载削减率统计,见表7。统计分析表明,4种LID设计方案对南大街片区的节点超载、节点溢流和管道超载均有不同程度削减作用,削减效果由大到小依次为组合措施、单项措施1、单项措施2、单项措施3。

表7 不同措施各重现期管网超载削减率统计

Tab. 7 Statistics on the overload reduction rate of pipe networks in each reproduction period of different measures

措施	项目	不同重现期下的削减率/%			
		5 a	10 a	30 a	50 a
措施1	溢流节点削减率	100.00	100.00	85.71	80.77
	超载节点削减率	100.00	100.00	94.44	85.71
	超管道管削减率	100.00	100.00	90.00	84.62
措施2	溢流节点削减率	100.00	100.00	76.19	69.23
	超载节点削减率	100.00	92.86	77.78	67.86
	超管道管削减率	100.00	92.31	80.00	69.23
措施3	溢流节点削减率	100.00	92.31	66.67	57.69
	超载节点削减率	80.00	78.57	66.67	46.43
	超管道管削减率	75.00	84.62	65.00	57.69
组合措施	溢流节点削减率	100.00	100.00	90.48	84.62
	超载节点削减率	100.00	100.00	94.44	89.29
	超管道管削减率	100.00	100.00	95.00	88.46

4 结论

- a. 以西峰区老城区南大街片区为例,经过两场实测降雨率定、验证,确定SWMM模型较为可信。
- b. 研究区LID措施运行模拟削减效果排序为组合措施>单项措施1>单项措施2>单项措施3,即组合措施削减作用最佳。
- c. 通过分析管网构建效果,发现管网超载削减率随着降雨重现期的增大而逐渐降低。

参考文献:

[1] 符锐,罗龙洪,刘俊,等. SWMM模型在城市排水防涝系统能力评估中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2015(3):103-105,109.

[2] 李思祎,张建丰,李涛,等. 基于SWMM模型的LID设施的雨洪控制效果分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(6):60-65.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)[Z]. 2014.

[4] 戚海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.

[5] 陈秉楠. 新开发区低影响开发设施布置优化研究[D]. 深圳:深圳大学,2015.

[6] 许萍,何俊超,任心欣,等. 基于SWMM模型的城市道路LID设施设计参数优化研究[J]. 水电能源科学, 2016,34(2):21-25.

[7] HUA PEI, YANG WENYU, QI XIAOCHEN, et al. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development[J]. Journal of cleaner production, 2020, 242: 118515.

