

城市雨水管理

不同降雨强度下 LID 改造对径流量的削减效果

秦宇, 陈兴, 陈焱, 吴明

(重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 以重庆市海绵城市建设试点区域秀山县为研究对象,通过实时监测传统片区和低影响开发(LID)片区的降雨径流数据,探析 LID 片区在不同降雨强度下对径流量的削减效果。结果表明,经 LID 改造后,地面透水性增大,所容纳的雨水量增加,与传统开发模式相比,中雨条件下对径流总量和峰值的削减率分别可达到 80.4% 和 56.0%;LID 措施的蓄水容积有限,不同降雨条件下对径流总量和峰值的削减程度不同,削减程度排序为:中雨(80.4%、56.0%)>大雨(69.4%、64.4%)>暴雨(56.1%、60.8%),而且随着降雨等级的增大,LID 片区的径流产生时间和峰现时间的滞后效果减弱,在暴雨条件下与传统片区无明显差别;LID 片区是否产生径流以及产生多大的径流,主要由降雨强度决定,而与降雨量关系不大,在本研究中,当降雨强度 $>0.2\text{ mm/min}$ 时才会产生径流,且降雨强度越大,径流量就越大。

关键词: 海绵城市; 低影响开发; 径流削减; 降雨强度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0104-05

Runoff Reduction Effect of Low Impact Development (LID) Reconstruction under Different Rainfall Intensities

QIN Yu, CHEN Xing, CHEN Yao, WU Ming

(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering <Ministry of Education>, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Through real-time monitoring rainfall runoff data in traditional development area and low impact development (LID) area in Xiushan County, a pilot area of sponge city construction in Chongqing City, the runoff reduction effect of LID area was analyzed under different rainfall intensities. After LID construction, the permeability and rainwater retention capacity of underlying surface increased. Compared with the traditional development mode, the reduction rates of total runoff and peak runoff were 80.4% and 56.0% respectively under the condition of moderate rain. The rainfall storage capacity of LID facilities was limited, and the reduction effect of the total runoff and peak runoff under different rainfall conditions was different. The runoff reduction effect from high to low was: moderate rain (80.4% and 56.0%), heavy rain (69.4% and 64.4%), and rainstorm (56.1% and 60.8%). With the increase of rainfall intensity, the lag effect of runoff generation time and peak occurrence time in the LID area weakened, and there was no significant difference between the LID area and traditional development area under the condition of rainstorm. Whether and how much runoff was generated in LID area was mainly determined by rainfall intensity, but it had little to do with rainfall volume. When the rainfall intensity was higher than 0.2 mm/min , there would be runoff. In addition, the higher the rainfall intensity, the

more the runoff.

Key words: spongy city; low impact development; runoff reduction; rainfall intensity

由于我国城市化进程加快,传统的“快排”模式已经满足不了现代化城市的发展要求,城市内涝灾害时有发生,分析其原因主要是由于屋面、道路、地面建设使下垫面硬化严重,雨水下渗困难,70%~80%的降雨形成径流,仅有20%~30%的雨水入渗地下^[1]。为此,我国提出开展海绵城市建设工作,致力于改变城市内涝频繁发生的现状。

重庆市秀山县是重庆市首批3个市级海绵城市建设试点地区之一,笔者通过对秀山县试点区域降雨量及径流量的实时监测,分析低影响开发(LID)对城市内涝的缓解作用,旨在为后期的海绵城市建设提供参考。

1 监测区域及方法

1.1 监测布点

海绵城市试点区域位于秀山县城,以城中武陵大道为界,西邻西环大道,南至凤栖路与白沙大道交界处,北到渝秀大道,申报区总面积为8.08 km²。为了对比LID模式和传统开发模式对降雨径流的削减情况,在该试点区域内分别设置1号和2号监测点。1号监测点位于东风路与香林北路交汇处,其汇水区域包含秀山县海绵城市试点建设二期项目的行政中心片区靠近东风路一侧的所有地块,该区域可监测到LID改造前公共设施用地片区的径流产生情况。2号监测点位于体育公园侧门处,汇水区域包括四馆、城建大楼、国税大楼、高级中学和体育公园在内的片区,该区域包含透水铺装、雨水花园、生物滞留带、植草沟等多种LID改造措施。为了排除外部因素的干扰,1号和2号监测区域的汇水面积相近,用地性质相近(均为商业用地),且结合前期对两区域的气象资料、地形图、径流分区及走向图、下垫面情况、管勘等基础资料的收集及现场调查,此两区域情况基本相近,同时两区域安装流量监测设备的雨水管段管径也相同。

1号监测区域总面积为217 679 m²,其中人行道、车行道、绿化、屋顶、水体的面积分别为65 291、34 457、30 554、86 634、743 m²。2号监测区域总面积为230 396 m²,其中硬地、屋面、透水铺装、水体、橡胶跑道、人工草地、绿地、道路、绿化面积分别为50 089、47 764、33 963、2 964、6 782、3 581、51 033、

7 867、26 353 m²,占比分别为21.74%、20.73%、14.74%、1.29%、2.94%、1.55%、22.15%、3.41%、11.44%。

1.2 监测设备选取

基于前期对基础资料的收集及现场调查,本研究通过安装翻斗式雨量计和多普勒在线流量计,分别对降雨量和径流量进行实时监测。由于本研究中的海绵城市试点区域较为集中,均在秀山县城区规划中心区范围内,其面积较小,同场降雨在区域内各处降雨量差异性理论上不显著,考虑到设备安全且数据有效性等,最终选取1台JD-02型双翻斗雨量计作为降雨监测设备,该雨量计每分钟自动记录雨量数据,降雨强度测量范围为0.2~4 mm/min,分辨率为0.2 mm/min;1号和2号监测点各设置1台DY-FMGO1LS-FJDNSY型多普勒超声在线流量计,流速量程为0.05~5.00 m/s,流量量程为3.6~99 999 999 m³/h。

1.3 数据分析

在以往的研究中,通常以日降雨量作为研究单元,分析小雨(<10 mm/d)、中雨(10~25 mm/d)、大雨(25~50 mm/d)和暴雨(50~100 mm/d)对径流量的影响,侧重于降雨量与径流量的对应关系^[2],并通过径流系数将二者联系起来。这种以日降雨量为研究单元的分析方法,与水文学上的降雨日分界相同,数据整理相对简便,而且对于传统硬化下垫面来说,在一定程度上能较好地反映出降雨量和径流量的关系,也更便于推求出月降雨径流关系和年降雨径流关系^[3],但是以日降雨量作为研究单元忽略了降雨在一日之内的不连续性和降雨强度的不均匀性,存在一定缺陷。所以在本研究中采用以场次降雨量为研究单元,通过及时采集和接收降雨及径流数据,生成降雨-径流曲线;结合相关基础资料(土地利用类型和面积、LID措施类型和面积、地形图、卫星图像和雨水管网图等),分析径流产流时间、峰现时间和峰值流量与降雨强度、下垫面性质(LID措施及比例)的关系;对降雨按场次划归到水文学日降雨量的降雨等级,分别分析各等级下的降雨-径流关系图,找出LID改造条件下径流总量对降雨量的响应程度。

2 结果与讨论

2.1 不同降雨强度下LID措施的径流削减效果

表1为LID模式和传统模式下公共设施用地的径流监测结果。可以看出,经LID改造后的片区径流总量和峰值流量削减效果明显,与其他学者的研究结果一致^[4-5]。另外,随着降雨强度的增大,径流总量削减率呈下降趋势,这是因为LID设施所能滞留的径流量是有限的。

表1 不同降雨强度下LID和传统模式的径流监测结果

Tab.1 Runoff monitoring results of LID and traditional modes under different rainfall intensity

项 目		中雨(降雨量: 16.6 mm)	大雨(降雨量: 25.4 mm)	暴雨(降雨量: 72.2 mm)
径流总量	LID 片区/ m^3	552.46	1 350.62	5 655.58
	传统片区/ m^3	2 818.01	4 412.45	12 884.93
	削减率/%	80.4	69.4	56.1
单位面积径流总量	LID 片区/ mm	2.40	5.86	24.50
	传统片区/ mm	12.94	20.30	59.19
	削减率/%	81.5	71.1	58.6
峰值流量	LID 片区/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	48	57	58
	传统片区/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	109	159	148
	削减率/%	56.0	64.4	60.8

图1为不同降雨强度下LID片区和传统片区的降雨量与径流量。可以看出,在中雨条件下,LID片区径流产生时间和峰现时间均滞后于传统片区,这体现了LID措施对径流的“滞”效应;LID片区径流从产生到结束的时长为40 min,小于传统片区的82 min,而且LID片区在降雨未停止时就已经不再产生径流了,而传统片区在降雨结束后仍有径流产生。在大雨条件下,LID片区径流产生时间及峰现时间均比传统片区滞后8 min,但与中雨条件下不同的是,在降雨后期LID片区径流结束时间跨度较大且径流量呈先增加再减少的趋势,出现这种情况可能是因为LID改造措施有缓排作用。在暴雨条件下,虽然LID片区对径流量起到了一定的削减作用,但削减效果不如中雨和大雨条件下的,且径流产生滞后、峰现滞后和缓排等效果也相应减弱,这说明在暴雨强度下LID综合改造对径流的缓解作用较小。以上研究结果与其他学者的研究结果一致^[6-7]。

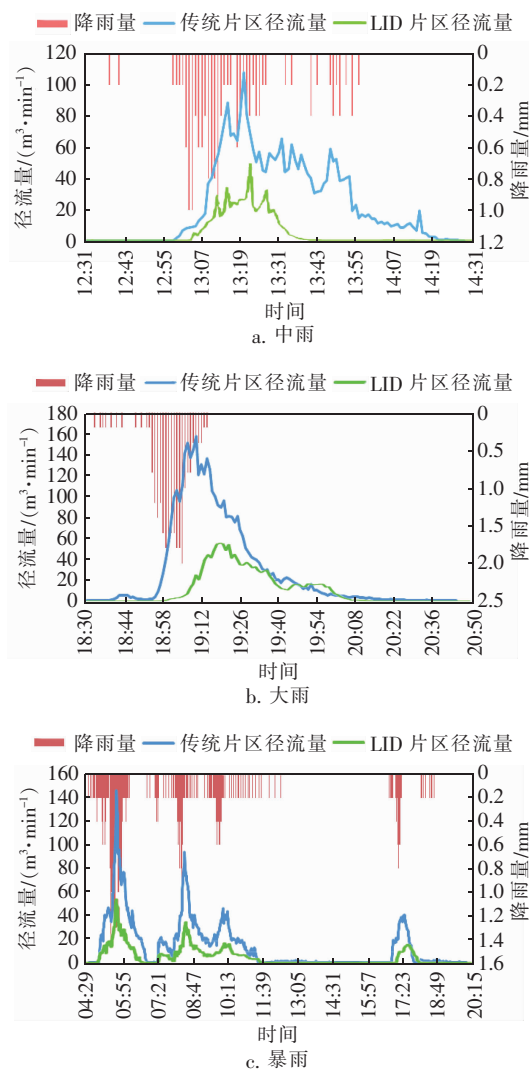


图1 不同降雨强度下LID片区和传统片区的降雨量与径流量

Fig.1 Rainfall and runoff of LID area and traditional area under different rainfall intensity

2.2 LID片区降雨强度、降雨量与径流的关系

降雨是径流产生的直接原因,对径流量的削减实质上是对雨水的有效控制与合理利用。图1(b)为大雨条件下降雨与径流的关系,这场降雨的平均强度为36.29 mm/h,降雨量为25.4 mm,在18:33—18:53期间由于降雨强度一直维持在0.2 mm/min的较低水平,LID片区未产生径流,但之后降雨强度增大到1.0 mm/min以上、最大达到了1.8 mm/min,且这种高强度降雨持续时间超过了20 min,超过了LID设施的渗透能力,地表径流开始出现,并快速达到了峰值,在峰值附近停留了数分钟之后,伴随着降雨强度的陡降而开始减小。本场降雨属于夏季

较为典型的短历时高强度降雨,虽然降雨量仅为25.4 mm,但雨峰急促,平均降雨强度大,径流产生较快、消失也快。

图2为LID改造片区在另一场降雨过程中的径流产生情况,此场降雨的平均强度为5.02 mm/h、降雨量为63.8 mm。

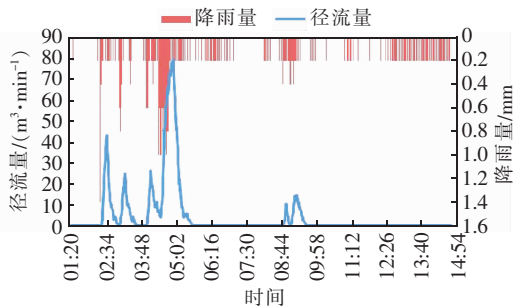


图2 LID片区的降雨量和径流量
Fig.2 Rainfall and runoff of LID area

从图2可以看出,此场降雨强度大都较小,在0.2 mm/min左右,在径流峰现之后处于0.2 mm/min左右强度的降雨时间较长,大约有440 min,累积降雨量远远超过了图1(b)中大雨强度下的降雨量,但在本场降雨中,LID片区却在径流峰现之后大部分时间未产生径流,仅在08:44—09:40期间由于降雨强度达到0.2 mm/min以上而产生了径流,而且在所有降雨强度>0.2 mm/min的时段内均产生了径流。比较图1(b)和图2的径流产生情况可知,经过LID改造的片区是否产生径流以及产生多大的径流量,主要由降雨强度决定,而与降雨量关系不

大,在本研究中,当降雨强度>0.2 mm/min时才会有径流产生,而且降雨强度越大,径流量就越大。

2.3 LID 片区径流系数的变化

在传统开发模式下,由于硬化地面透水性极差,甚至完全不透水,落到地上的雨水除少部分被植物截留和洼地滞留而损失之外,剩下的绝大部分均形成径流,故降雨量和径流量存在极高的线性相关性,降雨强度等其他因素对径流系数的影响通常可忽略不计,径流系数是径流量与对应降雨量的比值,所以在不透水下垫面区域,研究径流系数对不同日降雨等级的响应是很有必要的^[8]。

表2为不同降雨强度下LID模式与传统开发模式的径流系数。降雨总量为场次降雨量与监控面积的乘积。可以看出,传统开发模式的径流系数随着降雨强度的增加没有明显的变化,这与其下垫面的不透水性有关;而LID模式的径流系数在不同降雨强度下均远小于传统开发模式,这说明LID综合改造措施在控制径流量的产生、防止雨洪方面起到了重要作用。另外从表2中还可以看出,在中雨条件下,传统开发模式的径流系数是LID模式的5.12倍;在大雨条件下,传统开发模式的径流系数是LID模式的2.83倍;在暴雨条件下,传统开发模式的径流系数仅是LID模式的2.28倍,倍数随着降雨强度的增大而减少,这说明LID综合改造措施对于中强度降雨有明显的径流削减作用,而对高强度降雨条件下的径流削减能力减弱。

表2 不同降雨强度下的径流系数

Tab.2 Runoff coefficient under different rainfall intensity

项 目	降雨总量/m ³	传统模式的 径流量/m ³	LID模式的 径流量/m ³	传统模式的 径流系数	LID模式的 径流系数
中雨	3 824.57	2 818.01	552.46	0.74	0.14
大雨	5 852.06	4 412.45	1 350.60	0.75	0.23
暴雨	16 634.60	12 884.93	5 655.58	0.77	0.34

3 结论

① 通过对实时降雨径流数据的监测与分析发现,传统开发模式由于硬化地面透水性极差,甚至完全不透水,降雨量和径流量存在极高的线性相关性;而经LID综合改造后,由于地面的透水性增大,所容纳的雨水量大大增加,与传统开发模式相比,对径流总量和峰值的削减率分别可达到80.4%和56.0%。

② 透水铺装、生物滞留带等LID综合改造措施,对降雨径流总量和峰值有显著的削减作用,而且

由于LID措施的蓄水能力有限,不同降雨条件下的径流削减程度也不同,中雨条件下径流总量和峰值削减率分别为80.4%和56.0%,大雨条件下径流总量和峰值削减率分别为69.4%和64.4%,暴雨条件下径流总量和峰值削减率分别为56.1%和60.8%,削减程度由大到小排序为:中雨、大雨、暴雨。

③ 经过LID改造的片区是否产生径流以及产生多大的径流,主要由降雨强度决定,而与降雨量没有太大关系。在本研究中,当降雨强度>0.2 mm/

min 时才有径流产生,而且降雨强度越大,径流量就越大。

参考文献:

- [1] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. 给水排水,2015,41(6):1-7.
Zhang Linwei. Introduction to sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41 (6): 1-7 (in Chinese).
- [2] 边志明,张蕾. 中国水资源存在的主要问题及合理开发利用新理念[J]. 环境科学与管理,2011,36(10):147-153.
Bian Zhiming, Zhang Lei. Main problems in the exploitation of China's water resources and some new fresh ideas to them [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(10):147-153 (in Chinese).
- [3] 徐光来,许有鹏,徐宏亮. 城市化水文效应研究进展[J]. 自然资源学报,2010,25(12):2171-2178.
Xu Guanglai, Xu Youpeng, Xu Hongliang. Advance in hydrologic process response to urbanization [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (12): 2171-2178 (in Chinese).
- [4] 张蓓,李家科,李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J]. 环境科学与技术,2017,40(8):87-95.
Zhang Bei, Li Jiako, Li Yajiao. Study on urban storm water and non-point source simulation under different development patterns [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 40(8):87-95 (in Chinese).
- [5] 张海行. 海绵城市低影响开发典型山城径流效应研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2016.
Zhang Haixing. The Research of the Typical Mountain Runoff Effect under the Low Impact Development of the Sponge Cities [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016 (in Chinese).
- [6] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护,2017,33(2):31-36.
Cai Qingni, Chen Zhihe, Chen Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):31-36 (in Chinese).
- [7] 李婉亭,孙冬梅,冯平. 低影响开发措施(LID)对天津市暴雨径流影响模拟研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(3):156-166.
Li Wanting, Sun Dongmei, Feng Ping. Simulation study on influence of low impact development measures on rainstorm runoff in Tianjin Municipality [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(3):156-166 (in Chinese).
- [8] 程江,徐启新,杨凯,等. 国外城市雨水资源利用管理体系的比较及启示[J]. 中国给水排水,2007,23(12):68-72.
Cheng Jiang, Xu Qixin, Yang Kai, et al. Comparison of foreign urban rainwater resource utilization management systems and some inspirations [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(12):68-72 (in Chinese).



作者简介:秦宇(1981-),女,重庆人,博士,副教授,主要从事水污染控制研究。

E-mail: qinyu54001@163.com

收稿日期:2019-08-13