

Urban Storm Water Modeling and Analysis Based on SWMM LID Modules

Jie Liu^{1,2}, Xiang Zhang¹, Hua Chen¹, Yuqiong Li³, Qiang Zeng³

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan

³Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, Chengdu Sichuan

Email: 27728881@qq.com

Received: Feb. 22nd, 2018; accepted: Mar. 6th, 2018; published: Mar. 13th, 2018

Abstract

The urban green garden department and its surrounding areas in Jinniu District, Chengdu city were selected as the study area. The SWMM (Storm Water Management Model) was used to simulate the discharge hydrographs at the outlets of the drainage system when the study area encountered design storm with different return periods under current situation and LID (Low Impact Development) applied situation. The results were then analyzed to estimate the reduction effects of sponge city with LID measures on urban storm flood. The results show that LID measures can effectively reduce urban storm flood, and the reduction effects are more obvious when the return period of design storm is smaller, which will provide reference for the application of LID measures in the urban storm flood control.

Keywords

Urban Storm Flood Control, LID, SWMM

基于SWMM低影响开发模块的城市雨洪模拟与分析

刘洁^{1,2}, 张翔¹, 陈华¹, 李玉琼³, 曾强³

¹武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²成都大学建筑与土木工程学院, 四川 成都

³中国建设集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都

Email: 27728881@qq.com

收稿日期: 2018年2月22日; 录用日期: 2018年3月6日; 发布日期: 2018年3月13日

作者简介: 刘洁(1983.06-), 江西省景德镇市人, 副教授, 研究方向城市水文, 城市水环境。

摘要

以成都市金牛区城市绿舟花园小区及附近区域为研究对象,运用SWMM模型模拟了该区域在现状条件和采用低影响开发(LID)措施情景下,遭遇不同重现期设计暴雨时的排水管道出口断面径流过程,分析和评估了基于海绵城市理念的LID措施对城市雨洪的削减效果。结果表明LID措施对城市雨洪具有削减和滞留作用,而且在低重现期暴雨情况下,LID措施对城市雨洪的控制作用更加显著,可为城市雨洪控制提供参考。

关键词

城市雨洪控制, 低影响开发, SWMM

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的推进,下垫面条件的改变导致城市降雨径流关系发生了显著变化。从降雨蒸发来看,绿地减少、大量建筑物和道路的出现以及大量的人工热源等因素,造成城市热岛效应;同时由于城市粉尘大、空气中凝结核多等原因,大城市往往更容易成为暴雨袭击的中心,产生城市雨岛效应[1],城市雨岛效应的存在,使城市的年降水量增加 5%以上,汛期雷暴雨的次数和暴雨量增加 10%以上[2]。从产汇流机制来看,城市不透水面积较天然情况大幅增加,不透水材料的大量使用隔断了地表水与地下水的联系,减小了下渗量[3];同时受城市建筑物的阻碍作用,地表径流难以通过坡面汇流直接排入河道,而是以管道和坡面汇流相结合的形式流入河道;天然条件下对洪水具有调蓄能力的洼地、湖泊等在城市建设的过程中遭到了一定程度的破坏;因此,城市洪水表现出洪峰流量大、洪峰靠前的特点,给城市居民生命财产安全带来了严重威胁[4]。目前国内城市排水系统普遍存在设计标准低、维护管理差等情况,使得城市内涝现象发生频繁[5]。然而城市地下排水管网的建设存在成本高而且建设周期长的特点,因此如何在现有排水管网的基础上实现洪涝灾害的防治就成为了一个亟待解决的问题。

为了解决城市雨洪管理问题,各国对城市暴雨径流控制策略进行了广泛研究,其中城市低影响开发雨洪管理策略(LID)作为新一代的城市雨洪管理策略,具有规模小、可持续、低能耗、景观设计与土地开发利用相结合等特点[6]。LID 采用源头控制的理念,以尽可能模拟自然水文条件为设计策略,采用建设绿色屋顶、雨水桶、渗透铺装等措施使城市化区域雨洪调蓄的能力达到开发前的水平。LID 措施可以方便地整合进城市基础设施,并且具有建设成本低、景观效应好等优点。因此,LID 模式自提出以来在美国、加拿大、日本、新西兰的城市暴雨管理中取得了广泛应用[7]。国内对 LID 的研究起步较晚,还没有形成成熟的理论和技术体系,且 LID 相关工程案例较少[8]。鉴于此,本文以四川省成都市金牛区城市绿舟花园小区及附近区域为研究对象,采用 SWMM 模型分析评估了 LID 措施对城市雨洪控制的效果,为 LID 在城市雨洪管理的应用提供了参考。

2. SWMM 模型简介

雨水管理模型 SWMM (Storm Water Management Model)是美国环境保护局 EPA (Environmental Protection Agency)研发的一个动态降雨-径流模拟模型,主要用于城市区域的径流水量和水质的单一事件或者长期模拟[9]。当前最新版本 SWMM5.1 在以前版本基础上进行了全新的升级,可以对研究区域水文、水力和水质的情况

进行模拟。SWMM5.1 版本下的 LID 模块包含了 8 种 LID 措施：绿色屋顶(Green Roof)、屋顶散水(Rooftop Disconnection)、雨水桶(Rain Barrel)、渗透铺装(Permeable Pavement)、植草沟(Vegetative Swale)、渗渠(Infiltration Trench)、生物滞留池(Bio-Retention Cell)和雨水花园(Rain Garden)。其中，绿屋顶、屋顶散水及雨水桶属于就地拦截/处理措施；植草沟、渗渠属于径流过程处理措施；雨水花园、生物滞留池属于区域存储/处理措施。LID 模块结合 SWMM 模型本身的水力模块及水质模块，通过对雨洪调蓄、下渗以及蒸散发等过程的模拟，实现了对不同 LID 措施下研究区域各控制节点洪峰流量、污染物含量等要素的模拟。

3. 研究实例

3.1. 研究区域简介

研究区域位于四川省成都市金牛区一环与二环之间，总面积约为 1.18 km²，其中建筑用地 0.36 km²，绿地面积 0.41 km²，不透水路面及广场 0.39 km²，其他为未利用土地面积，研究区域总体不透水面积所占比例为 63.25%。区域内地势平坦，降雨丰富，土壤黏土含量较高，渗透能力低。

按照 SWMM 模型对输入资料的要求，首先根据研究区域管网资料结合地形资料将区域划分为 96 个子汇水区域，并利用 ArcGIS 空间分析方法提取了子汇水区的面积、坡度、各土地利用类型所占面积及比例等基础数据；然后对收集到的管网数据按照模型计算要求进行了概化，将雨水管道概化为 228 个节点，235 个管段，如图 1 所示，其中管网包含三个出水口。

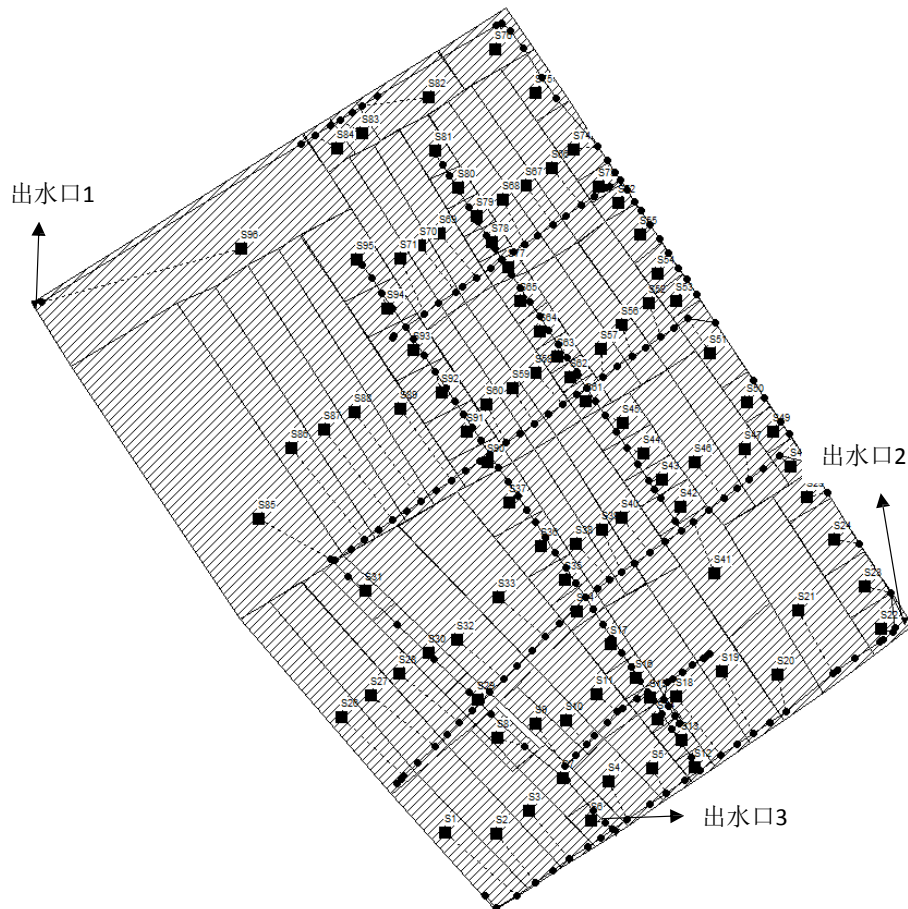


Figure 1. Generalized map of drainage system in study area

图 1. 研究区排水管网概化图

Table 1. Area of each LID measure and its percentage to total area
表 1. 各 LID 措施布设面积及占区域总面积的百分比

项目	绿屋顶(m ²)	雨水桶(个)	植草沟(m ²)	生物滞留池(m ²)
布设面积	107,778	4517	58,609	163,036
百分比(%)	9.1	--	5.0	13.8

3.2. 研究区 LID 布设方案

根据低影响开发尽量减少开发建设区域的不透水表面积的原则，结合研究区域土壤特性、坡度、汇水面积等特征，并参考各 LID 措施的适用范围[10]，本文采用绿屋顶和雨水桶进行雨水就地拦截；采用植草沟作为径流过程处理措施；采用生物滞留池作为区域存储设施。根据研究区域高精度卫星影像图采用 ArcGIS 分析工具，结合人工经验判断，筛选出各项 LID 措施的适建区域。各 LID 措施布设面积及占区域总面积的百分比如表 1 所示。

3.3. 模型参数

SWMM 模型水文、水力参数包括子汇水区属性参数、土壤类型及下渗参数以及排水管网参数等。子汇水区属性参数中，面积、不渗透性、宽度、坡度直接从研究区域下垫面资料经 ArcGIS 软件提取得到，根据研究区域实际情况并参考 SWMM 模型用户手册[9]，取不透水区曼宁粗糙系数为 0.011，透水区曼宁粗糙系数为 0.24，取不透水区洼蓄量为 2.5 mm，透水区洼蓄量为 5 mm。土壤类型及下渗参数根据联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)得到，研究区域土壤类型为不饱和冲积土(Dystric Fluvisols)，根据其沙、淤泥以及粘土所占百分比进一步判断其为壤土。根据研究区域土壤实际情况，本文采用 Horton 模型作为下渗模型，模型的初始下渗能力、最小下渗能力、衰减系数分别取为 76 mm/h、3.8 mm/h、4 h⁻¹。管网参数包括管道长度、管径、入口及出口偏移量等参数，从研究区域管网资料中提取，管道曼宁系数根据 SWMM 模型用户手册[9]，取值为 0.013。

LID 措施条件下，模型参数的取值主要结合研究区域实际情况并参考 SWMM 模型用户手册[9]中的推荐值以及相关的一些参考文献[11] [12] [13] [14]确定。

3.4. 设计暴雨

成都市水务局与成都市气象局在 2015 年发布的成都市中心城区暴雨强度公式如下：

$$i = \frac{44.594(1 + 0.65 \log P)}{(t + 27.346)^{0.953(\log P)^{-0.017}}} \quad (1)$$

式中： i 表示降雨强度(mm/min)； t 表示降雨历时(min)； P 表示重现期(年)。

为了研究不同暴雨强度下，LID 措施对雨洪的削减效果，本文采用公式(1)计算重现期为 2、5、10、20、50、100 年，2 小时设计暴雨，并采用国内外常用的芝加哥雨型[15]生成时间步长为 1 min 的暴雨过程，得到的 2 小时设计暴雨如表 2 所示，各重现期下暴雨过程线如图 2 所示。

4. 结果与分析

将各重现期下的设计暴雨过程作为 SWMM 模型的输入，分别模拟在现状条件和采用 LID 措施情景下各出口断面洪峰流量、峰值时刻以及区域总径流量。为便于说明，本文将三个出口流量过程相加得到区域总的出流过程进行分析。各降雨情景下研究区域径流模拟结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，随着降雨量的增大，两种情况下区域径流量及流量峰值均逐渐增大；在现状条件下，区域下渗量随降雨量变化不明显，说明区域在遭遇

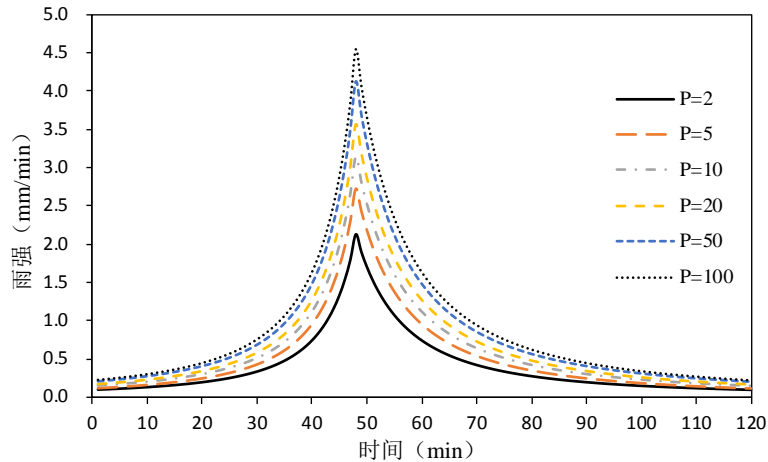


Figure 2. Design storm hyetograph of the study area
图 2. 研究区域设计暴雨过程线图

Table 2. Design storm of the study area
表 2. 研究区域设计暴雨表

重现期(年)	100	50	20	10	5	2
2 h 雨量(mm)	112	101	86.9	76.0	65.1	49.9

Table 3. Runoff simulation results of the study area under design storm with different return periods
表 3. 不同暴雨重现期情况下，研究区域径流模拟结果

降雨情景		降雨量(mm)	下渗量(mm)	径流量(mm)	下渗比例	径流系数	峰流量(m ³ /s)	最大峰值时刻
P = 2	无 LID	49.93	11.23	37.44	0.22	0.75	3.73	0:60
	有 LID	49.93	30.02	7.24	0.60	0.15	1.30	1:30
P = 5	无 LID	65.09	11.48	52.34	0.18	0.80	4.60	0:60
	有 LID	65.09	35.71	12.98	0.55	0.20	1.48	1:10
P = 10	无 LID	76.04	11.60	63.15	0.15	0.83	5.05	0:60
	有 LID	76.04	39.53	17.54	0.52	0.23	1.76	1:20
P = 20	无 LID	86.89	11.70	73.89	0.13	0.85	5.24	0:60
	有 LID	86.89	42.91	22.68	0.49	0.26	2.26	1:20
P = 50	无 LID	101.22	11.81	88.11	0.11	0.87	5.33	0:60
	有 LID	101.22	46.66	30.74	0.46	0.30	3.04	1:10
P = 100	无 LID	112.10	11.87	98.91	0.11	0.88	5.39	0:60
	有 LID	112.10	48.83	37.92	0.44	0.34	3.48	1:10

两年一遇以上强度暴雨时，区域土壤接近饱和状态，难以通过土壤调蓄雨洪；采用 LID 措施后，区域下渗量显著增加，且随降雨量的增加而逐渐增大，而流量峰值较现状条件显著减小，说明 LID 措施能够有效调蓄雨洪，削减洪峰，降低区域排水压力。

图 3(a)为区域是否采用 LID 措施下，三个排放口径流量之和以及径流削减率在六种不同降雨情景下的变化图。从图 3(a)中可以看出，随着暴雨重现期的增加，采用 LID 措施对径流总量的削减有一定增加，但径流削减率却逐渐减小，说明 LID 措施在低重现期时对雨洪的控制作用更加显著。图 3(b)为区域是否采用 LID 措施下，

三个排放口流量之和的峰值以及峰值削减率在六种不同降雨情景下的变化图。从图 3(b)中可以看出,随着暴雨重现期的增加,两种情景下的区域排水口流量之和的峰值均在逐渐增加;未使用 LID 措施时,暴雨重现期高于 10 年一遇之后,排水口峰值流量增加不明显,这主要是因为区域产流量已经超过排水管网排水能力;采用 LID 措施后,排水口峰值有效降低,但当暴雨重现期高于 10 年一遇之后,洪峰削减率显著下降,这主要是因为大暴雨情况下区域下渗量增加已经不再显著(表 3)。

图 4 给出了各暴雨重现期情况下,区域排水口出流总量过程线。从图 4 可以看出,采用 LID 措施后,暴雨

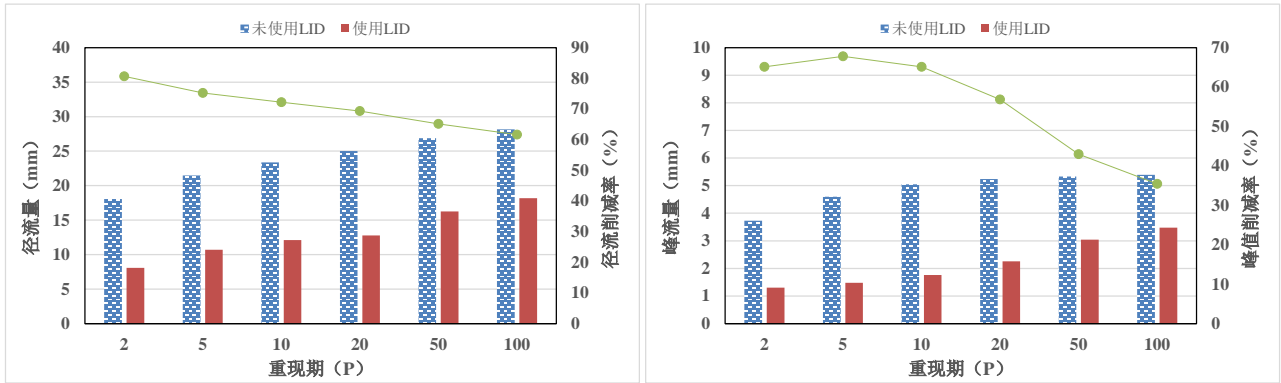
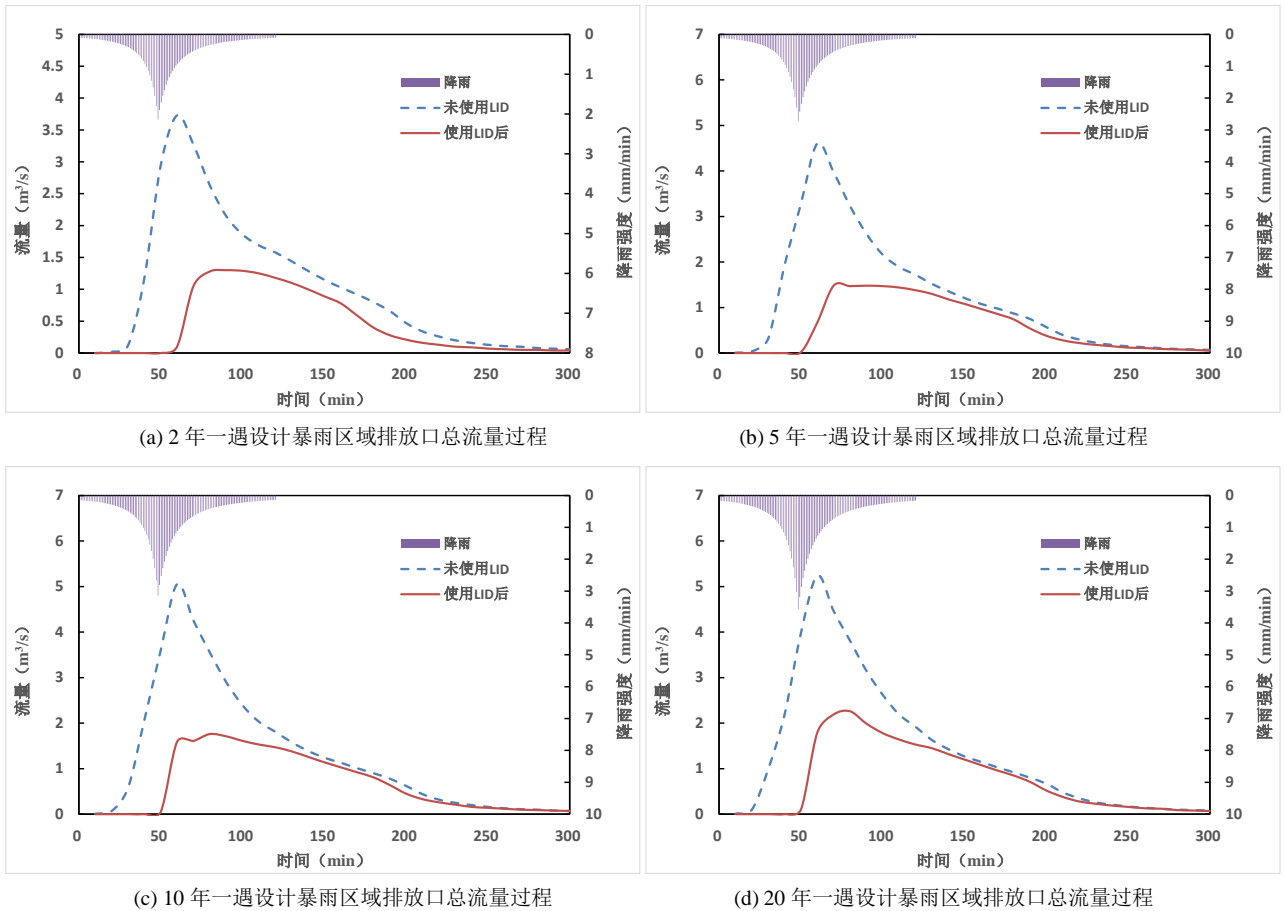


Figure 3. Total runoff and flood peak of the study area under design storm with different return periods

图 3. 不同暴雨重现期情况下,区域洪水排放口总径流及总流量峰值变化图



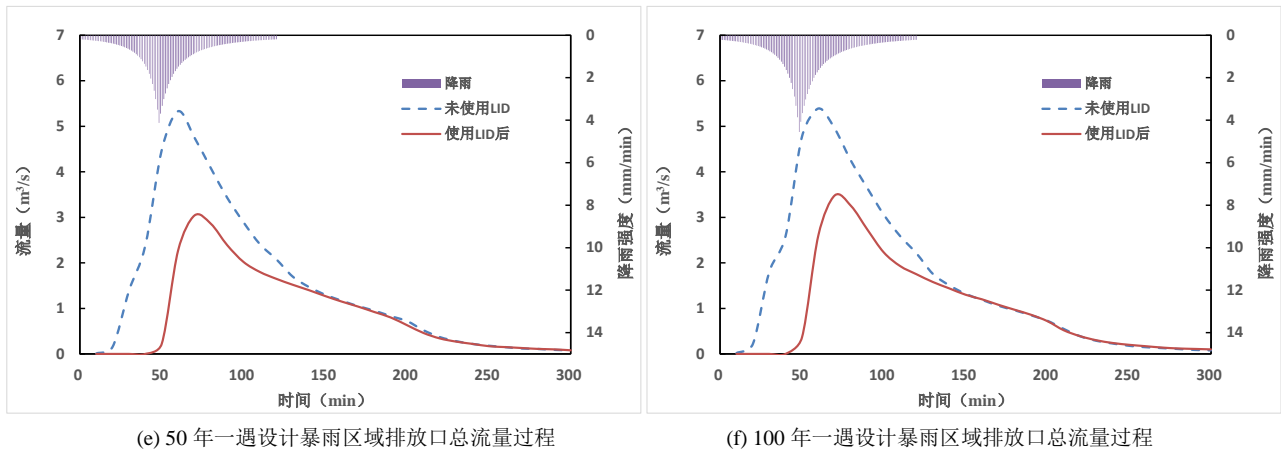


Figure 4. Total flood hydrograph of the study area under design storm of different return period

图 4. 不同暴雨重现期情况下, 区域洪水排放口总流量过程图

初期, 通过各 LID 措施下渗截留, 区域排水口排水过程线起涨时刻较现状情况下明显靠后, 且区域排水口总出流量峰值得到了明显得削弱, 峰现时间也相对靠后。当暴雨重现期在 10 年一遇以下时, LID 措施对区域雨洪过程具有明显的坦化作用。

以上结果表明 LID 措施对城市雨洪具有有效的削减、滞留作用, 且在低重现期暴雨情况下, 该作用表现得更为明显。

5. 结论

利用 SWMM 模型对研究区域现状条件和采用 LID 措施条件下的排水口出口断面径流过程进行了模拟, 发现采用 LID 措施可以有效削减城市雨洪, 并推迟洪峰出现时间, 但在不同强度暴雨情况下, LID 措施对流量峰值、洪峰时刻的控制作用不同。当暴雨重现期较小时, LID 措施对城市雨洪的控制效果显著, 随着暴雨重现期的增加, LID 措施的径流削减率和洪峰削减率均有所下降。因此在城市排水系统现状水平下, 适当增设 LID 措施, 能够在一定程度上提高城市的防洪能力, 经济有效地缓解城市内涝问题。

参考文献

- [1] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水运工程学报, 2012(1): 1-4.
ZHANG Jianyun. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today. Hydro-Science & Engineering, 2012(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] MAIDMENT, D. R., 著. 水文学手册[M]. 张建云, 李纪生, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
MAIDMENT, D. R. Handbook of hydrology. ZHANG Jianyun, LI Jisheng, Trans. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [3] WAKODE, H. B., BAIER, K., JHA, R., et al. Assessment of impact of urbanization on groundwater resources using GIS-techniques-case study of Hyderabad, India. International Journal of Environmental Research, 2014, 8(4): 1145-1158.
- [4] CHEN, Y., ZHOU, H., ZHANG, H., et al. Urban flood risk warning under rapid urbanization. Environmental Research, 2015, 139(S1): 3-10.
- [5] 车伍, 杨正, 赵杨, 等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(16): 13-19.
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China. China Water and Wastewater, 2013, 29(16): 13-19. (in Chinese)
- [6] 何爽, 刘俊, 朱嘉祺. 基于 SWMM 模型的低影响开发模式雨洪控制利用效果模拟与评估[J]. 水电能源科学, 2013(12): 42-45.
HE Shuang, LIU Jun and ZHU Jiaqi. Rainwater control and utilization effect assessment and simulation of low impact development based on SWMM. Water Resources and Power, 2013(12): 42-45. (in Chinese)
- [7] FLETCHER, T. D., SHUSTER, W. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology sur-

- rounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 2015, 12(7): 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- [8] 车伍, 闫攀, 李俊奇, 等. 低影响开发的本土化研究与推广[J]. *建设科技*, 2013(23): 50-52.
CHE Wu, YAN Pan, LI Junqi, et al. Localization research and promotion of low-impact development. *Construction Science and Technology*, 2013(23): 50-52. (in Chinese)
- [9] ROSSMAN, L. A. Storm water management model user's manual. Version 5. 0. Georgia: Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, USEPA, 2009.
- [10] 王琼珊, 刘晓梅, 赵冬泉. 低影响开发措施比选及适建区域分析[J]. *中国给水排水*, 2014(3): 96-100.
WANG Qiongshan, LIU Xiaomei and ZHAO Dongquan. Selection of low impact development techniques and analysis of suitable construction area. *China Water and Wastewater*, 2014(3): 96-100. (in Chinese)
- [11] 何福力. 基于 SWMM 的开封市雨洪模型应用研究——以运粮河组团项目为例[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2014.
HE Fuli. The applied research of storm water in Kaifeng city based on storm water management model (SWMM)—The case of Yunliang river group project. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)
- [12] QIN, H. P., LI, Z. X. and FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129(18): 577.
- [13] 李朋, 顾乐雨, 胡怀明, 等. 基于 SWMM 模型的城市化地区雨水桶应用研究[J]. *水电能源科学*, 2015(9): 5-7.
LI Peng, GU Leyu, HU Huaiming, et al. Application research of rain barrels in urbanized area based on SWMM model. *Water Resources and Power*, 2015(9): 5-7. (in Chinese)
- [14] 张胜杰. 利用暴雨管理模型(SWMM)对低影响开发措施效果的模拟研究[J]. *中国建设信息化*, 2013(19): 76-78.
ZHANG Shengjie. Simulation study on effects of low impact development measures using SWMM. *Information of China Construction*, 2013(19): 76-78. (in Chinese)
- [15] 岑国平, 沈晋. 城市设计暴雨雨型研究[J]. *水科学进展*, 1998, 9(1): 41-46.
CEN Guoping, SHEN Jin. Research on rainfall pattern of urban design storm. *Advances in Water Science*, 1998, 9(1): 41-46. (in Chinese)