

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.020

LID 改造对城市内涝与面源污染的影响

雷向东¹, 赖成光^{1,2}, 王兆礼^{1,2}, 曾照洋¹, 林广思², 赵俊维³

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641;

2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 肇庆市恒发农业科技有限公司, 广东 肇庆 526114)

摘要:为了探究低影响开发(LID)措施对城市雨水-径流-污染过程的改善效果,以广州市某区域为例,提出了4种LID改造措施(绿色屋顶、生物滞留池、透水铺装、3种LID组合),并构建了SWMM模型来模拟分析5种暴雨重现期下不同LID改造措施的水文水质效应。结果表明:单一LID改造措施下,暴雨重现期较大时透水铺装效果最好,该情景下洪峰削减率、峰现时间延迟和总流量削减率都达到了最大;3种LID组合对总流量削减率最高,为26.12%~34.40%;单一LID改造措施下,透水铺装对COD与NH₃-N质量浓度峰值削减和峰现时间延迟效果最佳;3种LID组合对COD和NH₃-N总量削减率最高,分别为50.51%~60.83%和53.16%~58.47%。LID改造措施对城市内涝、COD和NH₃-N都有不同程度的减轻或削减,其中LID组合改造措施的效果最好。

关键词:SWMM模型;低影响开发;面源污染;暴雨内涝

中图分类号:TV213.4;TU992 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2021)05-0131-09

Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution // LEI Xiangdong¹, LAI Chengguang^{1,2}, WANG Zhaoli^{1,2}, ZENG Zhaoyang¹, LIN Guangsi², ZHAO Junwei³ (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Zhaoqing Hengfa Agricultural Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526114, China)

Abstract: In order to explore the improvement effect of low-impact development(LID) measures on the urban rainwater-runoff-pollution process, we took an area in Guangzhou as the research object and proposed four LID reconstruction measures(green roof, bioretention cell, permeable pavement, combination of three LID), and the SWMM model was constructed to simulate and analyze the hydrological and water quality effects of the different LID reconstruction measures under the five rainstorm recurrence periods. The results show that: under the single LID, the permeable pavement effect is the best when the rainfall recurrence period is large. Under this scenario, the flood peak flow reduction rate, peak time delay and total flow reduction rate have reached the maximum; In addition, combination of three LID has the highest total flow reduction rate of 26.12% ~ 34.40%; Under a single LID, permeable pavement has the best effect on COD and NH₃-N concentration peak reduction and peak time delay; The combination of three LID have the highest reduction rates for COD and NH₃-N, Which is 50.51% ~ 60.83% and 53.16% ~ 58.47%, respectively. The LID reconstruction measures have reduced urban flooding, COD and NH₃-N to varying degrees, and the combination of LID reconstruction measures has the best effect.

Key words: SWMM model; low impact development; non-point source pollution; rainstorm flooding

近年来,强降雨产生的洪涝灾害给人类带来了巨大的经济损失和严重的生命威胁,制约了城市的发展^[1-3]。目前普遍认为,暴雨频发和不透水面积增加是导致城市内涝日益严重的主要原因^[4-6]。除

了会导致城区内涝以外,城市暴雨还会带来一系列的水环境问题。暴雨冲刷地面使大量污染物溶入城市洪流,其所产生的面源污染对城市水环境的威胁和破坏日益严重^[7-8]。有研究表明,面源污染对中

基金项目:国家自然科学基金(51879107,51709117);广东省水利科技创新项目(2020A0505100009)

作者简介:雷向东(1994—),男,博士研究生,研究方向为海绵城市水文水环境。E-mail: lxdong_scut@163.com

通信作者:王兆礼(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: wangzhl@scut.edu.cn

国水体污染中的氮和磷的贡献率非常高,分别高达81%和93%^[9]。城市地区面源污染具有分布范围广、控制难度大、不确定性复杂、监测难度大、隐秘性强等特点^[10-11],对其进行预测和防治难度极大。在越来越重视城市安全和环境健康的今天,采取合理的措施解决或减缓城市内涝和面源污染问题显得刻不容缓。

自20世纪60年代至今,为解决城市内涝和城市水环境恶化的问题,不少国家开展了多种理论和实践探索,其中美国的最佳管理措施(best management practices, BMPs)、低影响开发(low impact development, LID),澳大利亚的城市水敏感设计(water sensitive urban design, WSUD),新西兰的低影响城市设计与开发(low impact urban design and development, LIUDD),英国的可持续城市排水系统(sustainable urban discharge system, SUDS)等效果尤为显著。在众多雨洪控制利用理念中,对LID的研究和应用最为广泛,Tredway等^[10]在Colorado州的研究表明LID可以有效减少雨水径流的峰值流量,并提高居民生活的安全保障;Eckart等^[12]利用Brog算法优化的暴雨管理模型(SWMM模型)对Windsor市进行LID雨水控制模拟,发现LID使洪峰径流量和总径流量分别减少13%和29%;Sparkman等^[13]对Chesapeake大湾区的市区进行LID改造模拟,发现采取LID措施后,每年每平方千米可分别削减约78 kg的氮、3 kg的磷和1 592 kg的SS。国内学者近年来也在暴雨径流污染的研究中取得丰硕的成果:朱寒松等^[14]对分别采取生物滞留池、渗透性路面、绿色屋顶和3种LID组合改造的重庆市花朝工业园区进行径流分析,研究发现单一的LID措施中透水铺装对洪峰削减效果最好,而组合式方案径流控制效果优于任何单一LID措施;陈垚等^[15]利用(SWMM模型)对不同LID设施改造方案的暴雨径流水文过程进行了验证模拟,发现LID设施可直接作为中小尺度海绵城市改造方案。现阶段,LID措施多应用于海绵城市建设等工程实践,LID在海绵城市中的优化布局、LID措施对径流和面源污染控制等研究相对较多,但针对广州市在径流和面源污染两方面评估多种LID措施综合控制效果的研究相对较少。

本文以广州市某区域为例,基于SWMM模型^[16]构建适用于研究区的水文水质模型,模拟不同暴雨重现期下流域出口流量和污染物的情况,揭示LID改造对不同暴雨重现期下暴雨径流和污染物运动状态的影响,并以此评估出最佳的LID改造措施。研究结果可以为研究区科学合理的LID规划与设计提供依据,也可为我国海绵城市建设中的雨洪

管理和面源污染治理提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区地处珠江三角洲东江下游北岸、广州市东部,北部有低矮丘陵,南部属珠江三角洲平原,大体地势为北高南低,总面积约56.4 km²,如图1所示。研究区属亚热带海洋性季风气候,高温多雨、日照充足,全年平均气温为22℃,极端高低温分别为37.7℃和-1.9℃,年平均降水量为2 000 mm。研究区是暴雨内涝频发地区,有学者曾预测,到2050年广州市将是洪涝灾害风险最高的城市^[5]。可见以该研究区作为一个案例探讨LID改造对内涝与面源污染的影响具有很好的代表性。

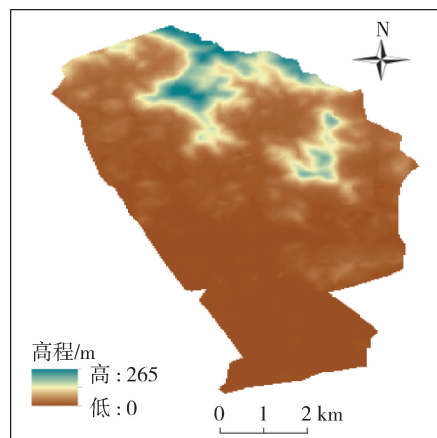


图1 研究区地势

Fig.1 Study area location

1.2 研究区概化

研究区目前处于管网规划阶段,区内的排水系统尚不完善,仅有几条沿河分布的管道。对研究区管网、河道、流域出口进行概化,最后得到258个管点、71段河道、190根管线以及3个出水口。

在进行子汇水区划分时,对于地势变化较大的区域可利用ArcGIS中的水文模块来实现小流域的划分,但该方法不适用地势较平坦的区域^[17]。由于研究区北部是高程变化较大的山区,南部是地势较平缓的地区,因此在进行子汇水区划分时,北部山区采取以河流水系分水岭划分为主,南部则采取结合坡度、坡向和土地开发情况综合划分。最终,将研究区划分为144个子汇水区,如图2所示。

1.3 暴雨条件设计

暴雨强度设计公式为

$$q = \frac{2785.833(1 + 1.1658 \lg P)}{(t + 16.813)^{0.9302}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度; t 为降雨历时; P 为设计暴雨的重现期。

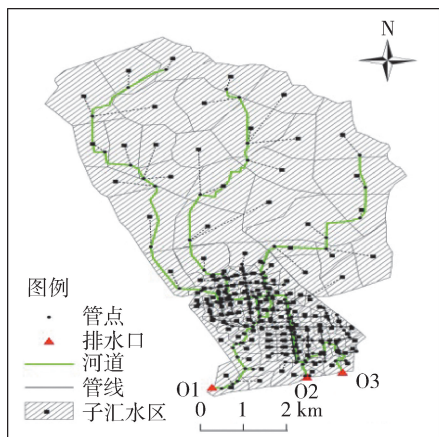


图2 研究区概化结果

Fig.2 Generalized results of the study area

设计暴雨采用芝加哥雨型, 降雨历时 t 取 120 min, 雨峰系数 r 取 0.4, 设计暴雨重现期 P 取 0.5 a、1 a、2 a、5 a 和 20 a, 设计暴雨过程如图 3 所示。

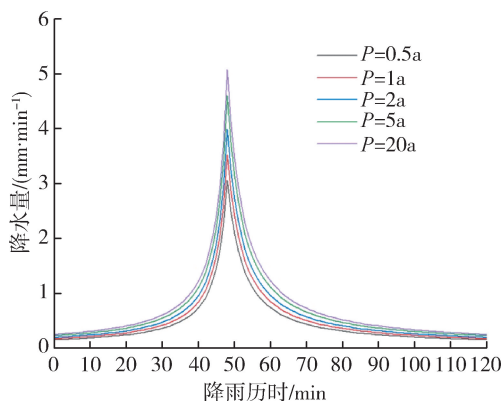


图3 5种设计暴雨过程

Fig.3 Five design rainfall processes

1.4 LID 改造措施布置

选取绿色屋顶、生物滞留池透水铺装和 3 种 LID 组合对研究区进行模拟改造, 并对模拟效果进行分析评价。利用 ENVI 对研究区的卫星影像图进行监督分类处理, 得到土地利用类型图 (图 4)。研究区大部分为居住区, 参考相关研究^[18], 同时考虑到各 LID 改造措施的设置效果以及未来研究区内的开发情况, 3 种 LID 组合改造情况设定为: 对每个子汇水区内 50% 建筑物顶部和 50% 的道路分别进行绿色屋顶和透水铺装改造, 对子汇水区 5% 的面积区域进行生物滞留池改造; 在研究单个 LID 改造措施的情境时, 每个子汇水区只采取一种 LID 改造措施。参考相关研究^[19-20], LID 改造措施参数设置见表 1。

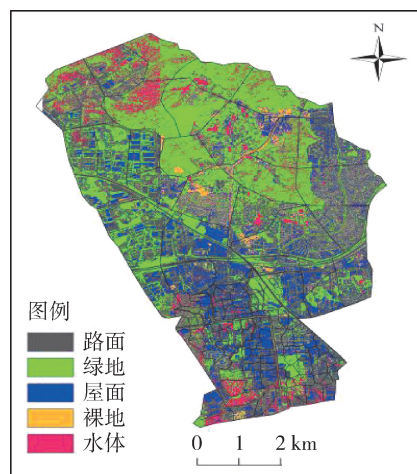


图4 土地利用类型

Fig.4 Map of land use types

表 1 LID 改造措施参数设置

Table 1 Parameter setting of LID reconstruction measures

LID 改造措施	表面层				排水层		
	蓄水深度/mm	植被覆盖率	曼宁系数	表面坡度	排水系数/ (mm · h ⁻¹)	排水指数	暗渠偏移 高度/mm
生物滞留池	200	0.2	0.15	1	0	0.5	50
绿色屋顶	20	0.2	0.25	0.002			
透水铺装	20	0	0.11	1	0	0.5	6
LID 改造措施	蓄水层				排水垫层		
	蓄水层厚度/mm	孔隙率	渗透速率/ (mm · h ⁻¹)	堵塞因子	厚度/mm	孔隙率	曼宁系数
生物滞留池	200	0.2	500	0			
绿色屋顶					20	0.6	0.35
透水铺装	250	0.43	500	0			
LID 改造措施	土壤层						
	土壤厚度/mm	孔隙率	土壤持水率	凋萎点	水力传导度/ (mm · h ⁻¹)	水力传导坡度	水吸力/mm
生物滞留池	500	0.18	0.1	0.03	3.6	10	200
绿色屋顶	300	0.18	0.15	0.03	18	50	100
透水铺装							

1.5 参数率定与模型验证

1.5.1 模型参数设置

SWMM 模型需要确定的水力参数包括子汇水区面积、漫流宽度、平均坡度、不透水率、不透水曼宁系数、透水曼宁系数、不透水注蓄深度、透水注蓄深度等,除此之外,还需要确定最大下渗率、最小下渗率、衰减系数等。在水质模拟方面,选取 COD、NH₃-N 两种污染物并分别选用饱和函数累积方程和指数冲刷方程作为地表污染物累积曲线和地表污染物冲刷曲线的模拟函数,主要参数包括最大累积量、半饱和和累积时间、冲刷系数、冲刷指数、街道清扫参数等。其中管道长度、管径大小、井底高程、子汇水面积大小、漫流宽度等几何参数可根据管网规划资料和 ArcGIS 测量计算获取。子汇水区的不透水率则根据土地利用类型计算,假定绿地、裸地为完全透水,取其不透水率为 0,水体、路面、屋面为完全不透水,取其不透水率为 100%,再分区统计得到各子汇水区的综合不透水率。其他水力与水质参数则结合研究区实际情况和参考文献[21-22]选取。

由于研究区内排水管网系统尚处在规划阶段,缺乏相应的水量水质实测数据,不能通过出水口实测数据进行模型参数的率定与验证。鉴于此,参考文献[22-23]并将模型模拟计算得到的径流系数与综合径流系数经验值进行对比,手动调试校准模型参数,其中不透水曼宁系数和透水地表曼宁系数分别取 0.013 和 0.24,不透水地表注蓄量和透水地表注蓄量分别取 2.5 mm 和 5.0 mm,管道糙率取 0.013,霍顿下渗模型中最大下渗率、最小下渗率与衰减系数分别为 103.8 mm/h、11.4 mm/h 和 8.46。在水质模拟方面,参考马萌华等^[23]的研究,污染物 COD 与 NH₃-N 在不同土地利用类型中的参数取值情况如表 2 所示。

表 2 COD 与 NH₃-N 在不同土地利用类型中的参数
Table 2 Parameters of COD and NH₃-N for different land use types

污染物	土地利用类型	累积过程参数		冲刷过程参数		
		最大累积量/(kg·hm ⁻²)	半饱和累积时间/d	冲刷系数	冲刷指数	街道清扫去除率/%
COD	屋面	60	7	0.006	1.7	70
	路面	110	4	0.007	1.8	70
	绿地	40	20	0.03	1.2	
NH ₃ -N	屋面	6	7	0.005	1.7	70
	路面	6	4	0.006	1.8	70
	绿地	1.8	20	0.008	1.2	

1.5.2 模型验证

采用出水口流量过程和溢流空间分布的方法对模型进行验证。由于研究区内尚未设置雨量监测

站,考虑到气候的相似性与一致性,选取位于研究区西部约 20 km 雨量监测站作为降雨数据来源。经过降雨数据筛选,选取 2018 年 6 月 7—8 日的特大暴雨(简称“20180607”)进行模型验证,暴雨过程如图 5 所示。该场暴雨总降水量达 284 mm,历时达 40 h,其中,6 月 8 日单日降雨超过 10 年一遇标准,降水量达到 215 mm。

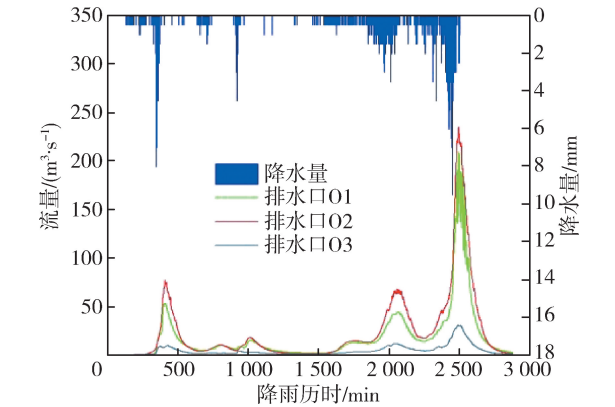


图 5 “20180607”暴雨过程与排水口模拟流量过程
Fig. 5 “20180607” rainstorm process and simulated flow processes of outfall

对“20180607”暴雨进行 SWMM 模拟,研究区的 3 个出水口(编号分别为 O1、O2、O3)模拟流量过程如图 5 所示。3 个出水口的流量过程线的形状基本相同,流量峰值均出现在 7 日的 6:00—8:00、8 日的 9:00—11:00 和 17:00—19:00,与暴雨峰值时段(7 日的 5:00—7:00、8 日的 8:00—10:00 和 16:00—18:00)接近,并且出口的流量峰值时段比暴雨峰值时段延长 1 h 左右,符合城市地区降雨一般规律。另外,根据曾照洋等^[23]在广州市天河区长湔片区的研究,在“20180607”暴雨下,长湔片区 SWMM 模拟的出水口流量过程与本研究区的基本一致,因此从侧面验证了本模型的可靠性。

广州市有关水务部门在 2017—2019 年先后公布了 177 处内涝水浸点,其中有一处内涝水浸点为新塘大道西洲路段,正好位于本研究区的内涝点上,模型能够很好地模拟研究区的内涝情况。

2 结果与分析

在 5 种设计暴雨的情境下,对绿色屋顶、生物滞留池、透水铺装、3 种 LID 组合这 4 种 LID 改造措施与未改造模式进行水文和水质模拟,并且对排水口水文效应和水质效应分别进行分析。

2.1 水文效应分析

选取研究区内最大排水口(O2)进行流量过程分析(图 6),并对 5 种设计暴雨情景下的水文情况进行统计(表 3)。

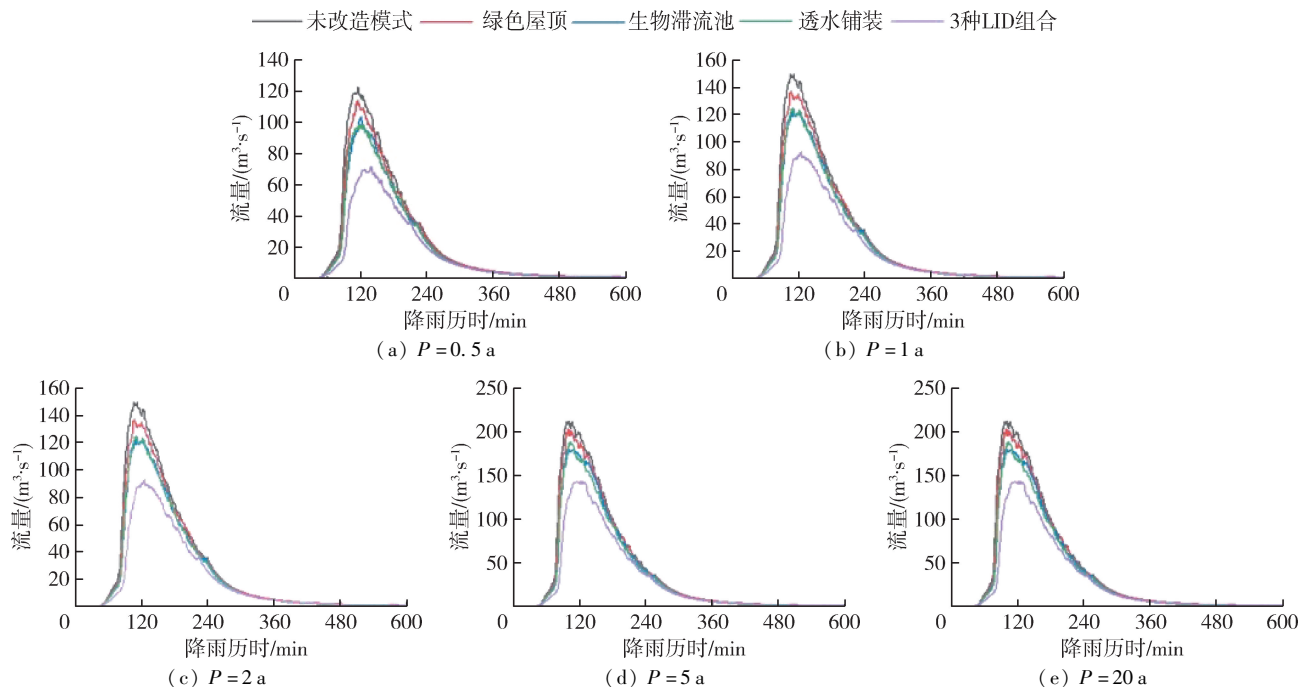


图6 不同改造措施下最大排水口流量变化过程

Fig. 6 Changes of flow at the maximum discharge outfall under different reconstruction measures

表3 5种设计暴雨的水文情况统计结果

Table 3 Statistical results of hydrology of five design rainstorms

改造措施	设计暴雨 重现期/a	排水口 O2 洪峰 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排水口 O2 洪峰时间/min	溢流点数量/个	总溢流量 削减率/%	排水系统总流 量削减率/%
未改造模式	0.5	122.71	115	52		
	1	150.07	111	57		
	2	180.91	105	61		
	5	213.61	100	63		
	20	247.91	96	67		
绿色屋顶	0.5	114.24	114	50	21.67	5.85
	1	137.70	106	55	20.96	5.45
	2	165.55	107	58	19.27	5.04
	5	203.92	99	61	17.55	3.44
	20	227.06	94	66	16.24	3.64
生物滞留池	0.5	103.36	121	50	29.38	14.98
	1	123.15	107	52	27.96	13.53
	2	155.17	107	56	24.56	12.60
	5	180.51	108	62	20.73	10.57
	20	218.53	102	63	18.80	8.89
透水铺装	0.5	98.81	125	46	35.36	15.48
	1	125.61	110	51	35.38	14.39
	2	155.93	107	55	34.18	14.12
	5	189.19	102	60	33.18	13.3
	20	211.02	106	62	32.71	12.83
3种LID组合	0.5	72.10	139	37	69.29	34.40
	1	92.94	124	42	67.88	31.96
	2	117.42	119	43	66.63	30.35
	5	144.14	122	52	63.90	27.93
	20	174.42	109	56	61.21	26.12

图6表明,在5种不同暴雨重现期下,与未改造模式相比,绿色屋顶、生物滞留池和透水铺装的单独改造措施均能削减出口流量峰值,3种LID组合改造措施的削减作用更明显。由表3的排水口洪峰流

量可知,在重现期为0.5a时,未改造模式排水口O2的洪峰流量为 $122.71 \text{ m}^3/\text{s}$,4种LID改造措施对排水口洪峰削减效果优劣排序分别为:3种LID组合、透水铺装、生物滞留池、绿色屋顶。但在重现期为

1 a 的条件下,生物滞留池改造的出口洪峰流量为 $123.15 \text{ m}^3/\text{s}$,而透水铺装改造的出口洪峰流量为 $125.61 \text{ m}^3/\text{s}$,可见,随暴雨重现期的增大,生物滞留池对出口洪峰削减效果会超过透水铺装,表明透水铺装对出口流量峰值的削减效果受重现期变化的影响较大。

由表 3 可知,在重现期为 20 a 的设计暴雨条件下,进行透水铺装改造时,排水口 O2 的峰现时间为 106 min,比未改造模式的 96 min 延迟了 10 min,而 3 种 LID 组合改造措施的峰现时间为 109 min,比未改造模式延迟了 13 min,在其他设计暴雨重现期下也是呈现类似规律。因此,在不同的暴雨重现期下,4 种 LID 改造措施均可延迟峰现时间,其中透水铺装是延长峰现时间最有效的单一 LID 措施,而 3 种 LID 组合是延迟峰现时间效果最佳的改造措施。

表 3 的溢流点数量分析表明,4 种 LID 改造措施都可使溢流点数量显著减少,其中 3 种 LID 组合对溢流点数量的减少最多;通过对表 3 的总溢流量削减率分析,在不同的设计暴雨重现期条件下,4 种 LID 改造措施均能在一定程度上减少总溢流量,但总溢流量削减率随重现期的增大而减小。总体而言,在不同的设计暴雨重现期条件下,4 种 LID 改造措施的总溢流量削减效果优劣排序为:3 种 LID 组合、透水铺装、生物滞留池、绿色屋顶。

表 3 的排水系统总流量削减率分析表明,与未改造模式相比,4 种 LID 改造措施对排水系统总流量都有很好的削减效果,在 0.5 a 的设计暴雨条件

下,对削减效果优劣排序分别为:3 种 LID 组合 (34.40%)、透水铺装 (15.48%)、生物滞留池 (14.98%)、绿色屋顶 (5.85%),在其他暴雨重现期也呈现类似规律。

2.2 水质效应分析

城市面源污染主要来源于道路机动车辆轮胎磨损碎屑、遗漏的燃料有机物、生活垃圾,建筑屋面的大气干湿沉降,绿地的农药,生活污水的溢流等。选取最大排水口(O2)进行 COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度变化过程分析(图 7 和图 8),并对 5 种设计暴雨情景下的水质情况进行统计(表 4)。

通过对图 7 和图 8 进行分析可知,在不同的暴雨重现期情境下,与未改造模式相比,4 种 LID 改造措施均可削减污染物 COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值,削减效果优劣排序均为:3 种 LID 组合、透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池。表 4 的 COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值分析表明,在重现期为 2 a 的设计暴雨条件下,未改造模式的排水口 O2 的 COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值分别为 232.56 mg/L 和 5.00 mg/L ,在 4 种 LID 改造方案下 COD 质量浓度峰值从小到大分别为: 120.71 mg/L (3 种 LID 组合)、 146.53 mg/L (透水铺装)、 203.21 mg/L (绿色屋顶)、 206.80 mg/L (生物滞留池), $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰值从小到大分别为: 2.54 mg/L (3 种 LID 组合)、 3.15 mg/L (透水铺装)、 4.29 mg/L (绿色屋顶)、 4.38 mg/L (生物滞留池),在其他设计暴雨重现期下也呈现类似规律。

表 4 表明,在不同的设计暴雨重现期下,绿色屋

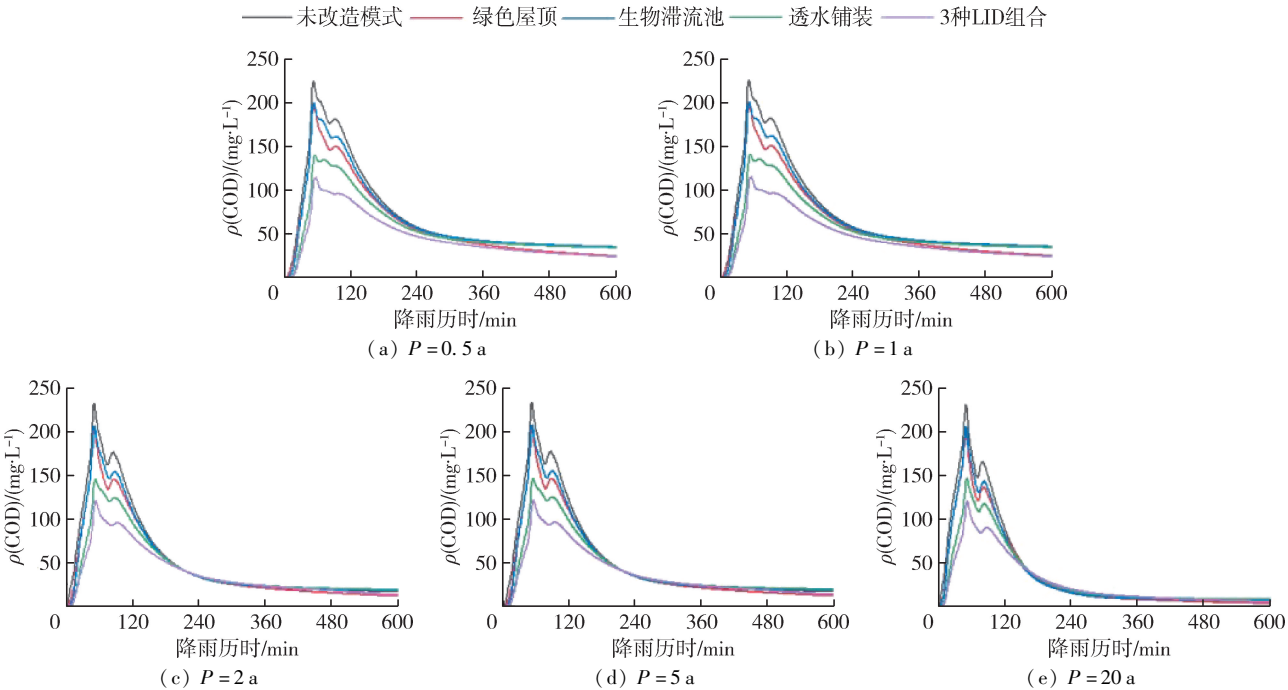


图 7 不同改造措施下最大排水口 COD 质量浓度变化过程

Fig. 7 Changes of COD concentration at the maximum discharge outfall under different reconstruction measures

— 未改造模式 — 绿色屋顶 — 生物滞留池 — 透水铺装 — 3种LID组合

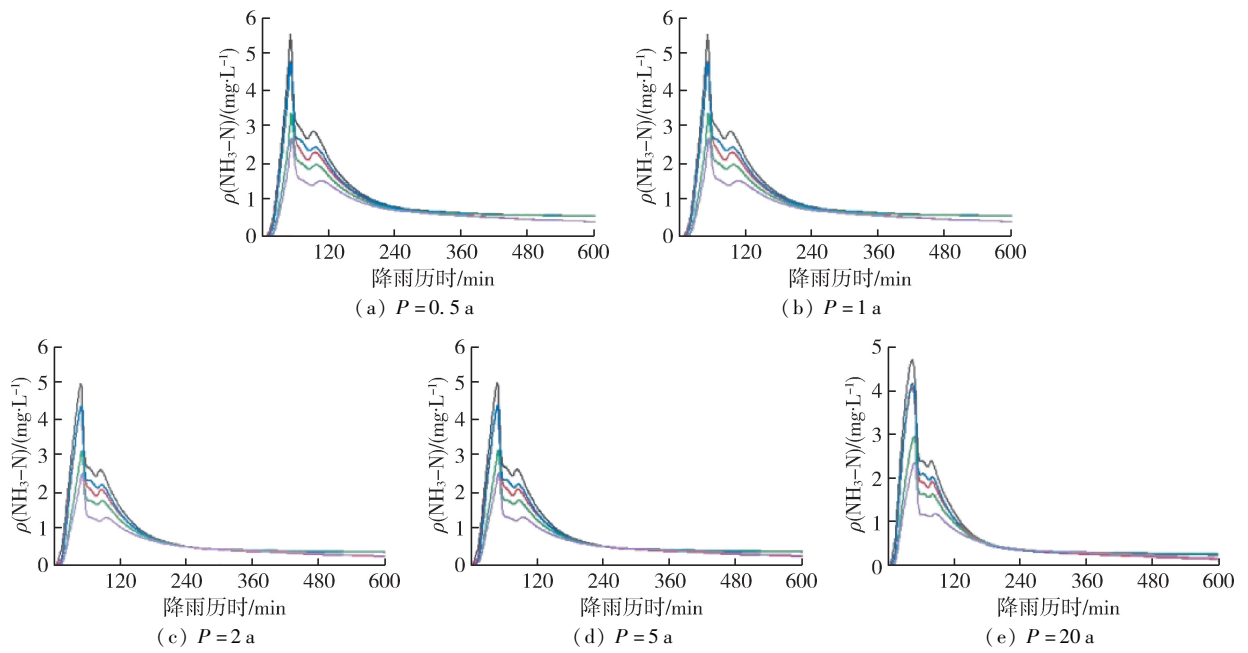


图 8 不同改造措施下最大排水口 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度变化过程

Fig. 8 Changes of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration at the maximum discharge outfall under different reconstruction measures

表 4 5 种设计暴雨的水质情况统计结果

Table 4 Statistical results of water quality of five design rainstorms

改造措施	设计暴雨 重现期/a	排水口 O ₂ COD 质量浓度峰值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	排水口 O ₂ COD 质量浓度峰现 时间/min	COD 总量 削减率/%	排水口 O ₂ $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度 峰值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	排水口 O ₂ $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度 峰现时间/min	$\text{NH}_3\text{-N}$ 总量 削减率/%
未改造模式	0.5	225.64	53		5.53	50	
	1	229.92	52		5.24	49	
	2	232.65	52		5.00	48	
	5	233.04	51		4.78	45	
	20	232.27	51		4.70	43	
绿色屋顶	0.5	198.02	54	18.91	4.72	50	20.22
	1	201.74	53	17.66	4.49	49	19.80
	2	203.21	52	16.66	4.29	48	19.13
	5	202.28	51	15.35	4.13	45	17.66
	20	201.02	51	15.68	4.08	43	17.59
生物滞留池	0.5	200.99	54	23.06	4.80	50	24.94
	1	205.11	53	22.13	4.58	49	24.35
	2	206.80	52	21.64	4.38	48	23.83
	5	207.15	52	20.97	4.23	46	22.80
	20	206.44	51	20.60	4.16	43	21.98
透水铺装	0.5	140.83	56	35.09	3.37	51	35.12
	1	144.44	55	32.86	3.26	50	34.41
	2	146.53	54	31.32	3.15	50	33.75
	5	147.61	53	29.64	3.04	48	32.43
	20	147.14	52	28.88	2.97	47	31.43
3 种 LID 组合	0.5	115.17	56	60.83	2.70	52	58.47
	1	118.75	55	57.58	2.63	51	57.22
	2	120.71	55	54.94	2.54	50	56.16
	5	121.63	54	52.07	2.44	49	54.45
	20	121.56	53	50.51	2.38	47	53.16

顶和生物滞留池对污染物 COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰现时间无明显影响,但透水铺装能较有效地延迟 COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的峰现时间,且延迟时间随设计暴雨重现期增大而减少,透水铺装对 COD 质量浓度峰现

延迟的时间分别为 3 min ($P = 0.5 \text{ a}$)、3 min ($P = 1 \text{ a}$)、2 min ($P = 2 \text{ a}$)、2 min ($P = 5 \text{ a}$) 和 1 min ($P = 20 \text{ a}$),对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度峰现延迟的时间分别为 1 min ($P = 0.5 \text{ a}$)、1 min ($P = 1 \text{ a}$)、2 min ($P = 2 \text{ a}$)、

3 min($P=5$ a)和4 min($P=20$ a)。

COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 总量削减率分析(表4)表明,与未改造模式相比,4种LID改造措施对COD总量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 总量都有很好的削减效果,在重现期为2a的设计暴雨条件下,对COD总量削减效果优劣排序分别为:3种LID组合(54.94%)、透水铺装(31.32%)、生物滞留池(21.64%)、绿色屋顶(16.66%),对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 总量削减效果优劣排序分别为:3种LID组合(56.16%)、透水铺装(33.75%)、生物滞留池(23.83%)、绿色屋顶(19.13%),在其他重现期下也呈现类似规律。

3 结 论

a. 基于SWMM模型构建的研究区水文水质模型,经出水口流量过程和溢流空间分布方面的模型验证,结果表明模型能够很好地反应研究区的实际情况。

b. 水文模拟结果表明,就单一LID改造措施而言,暴雨重现期较小时洪峰削减和峰现时间延迟效果最好的是生物滞留池,而暴雨重现期较大时最好的是透水铺装;对溢流情况控制效果最好的是透水铺装,其控制效果随重现期的增大而减弱;在不同情境下透水铺装、生物滞留池和绿色屋顶对排水系统总流量削减效果分别为12.83%~15.48%、8.89%~14.98%和3.64%~5.85%。3种LID组合改造措施对排水系统总流量削减效果最好,为26.12%~34.40%。

c. 水质模拟结果表明,就单一LID改造措施而言,COD与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度峰值削减和峰现时间延迟效果最佳的均为透水铺装,其对两种污染物的总量削减率分别为28.88%~35.09%和31.43%~35.12%。3种LID组合改造措施对COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 总量的削减效果最好,分别为50.51%~60.83%和53.16%~58.47%。

参考文献:

[1] BLOESCHL G, HALL J, PARAICA J, et al. Changing climate shifts timing of European floods[J]. Science, 2017, 357(6351): 588-590.

[2] TENG J, JAKEMAN A J, VAZE J, et al. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 90: 201-216.

[3] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph

for urban waterlogging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 479-487. (in Chinese))

[4] 丁继勇,蔡珏芳,李娜,等. 全生命周期视角下海绵城市建设的管理机制探析[J]. 水利经济, 2019, 37(6): 53-59. (DING Jiyong, CAI Juefang, LI Na, et al. Management mechanism of sponge city construction from perspective of lifecycle[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(6): 53-59. (in Chinese))

[5] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于SWMM模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))

[6] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的GPU并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 528-533. (in Chinese))

[7] 汤鹏,王玮,张展,等. 海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 15-20. (TANG Peng, WANG Wei, ZHANG Zhan, et al. Quantitative research on rain-flood patterns of urban area in the construction of "sponge cities"[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(1): 15-20. (in Chinese))

[8] 郑宇,程香菊,王兆礼,等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 78-85. (ZHENG Yu, CHENG Xiangju, WANG Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its relation with landscape pattern[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 78-85. (in Chinese))

[9] SHEN Z, LIAO Q, HONG Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 104-111.

[10] TREDWAY J C, HAVLICK D G. Assessing the potential of low-impact development techniques on runoff and streamflow in the Templeton Gap Watershed, Colorado[J]. Professional Geographer, 2017, 69(3): 372-382.

[11] 吴义根,冯开文,李谷成. 我国农业面源污染的时空分异与动态演进[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 186-199. (WU Yigen, FENG Kaiwen, LI Gucheng. Spatial-temporal pattern and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 186-199. (in Chinese))

[12] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 564-576.

- [13] SPARKMAN S A, HOGAN D M, HOPKINS K G, et al. Modeling watershed-scale impacts of stormwater management with traditional versus low impact development design [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(5): 1081-1094.
- [14] 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. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))
- [15] 陈垚, 何智伟, 张琦, 等. 基于水文控制目标的中小尺度海绵城市改造方案评价 [J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 1-8. (CHEN Yao, HE Zhiwei, ZHANG Qi, et al. Evaluation of reconstruction schemes for small-and medium-scale sponge city based on hydrological control target [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 1-8. (in Chinese))
- [16] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese))
- [17] 栾清华, 付潇然, 王海潮, 等. 大尺度无管流数据城区 SWMM 构建及模拟: I. 复杂下垫面城区数字精细化关键技术 [J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 653-660. (LUAN Qinghua, FU Xiaoran, WANG Haichao, et al. SWMM-based rainfall-runoff simulations in large-scale urban area with no pipeline-flow observations: I. key techniques for digitalizing urban area with complicated land-surface characteristics [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 653-660. (in Chinese))
- [18] 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. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Urban rainfall-runoff simulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model: a case study of Qinghe catchment in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11): 84-93. (in Chinese))
- [19] 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. (ZHANG Man, ZHOU Keke, ZHANG Ting, et al. Hydrological responses and stormwater control effects of typical urban LID measures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 57-71. (in Chinese))
- [20] 马冰然, 曾逸凡, 曾维华, 等. 气候变化背景下城市应对极端降水的适应性方案研究: 以西宁海绵城市试点区为例 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1361-1370. (MA Bingran, ZENG Yifan, ZENG Weihua, et al. Adapt to urban extreme precipitation under climate change: a pilot scale study in Xining, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4): 1361-1370. (in Chinese))
- [21] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual version 5.1 [M]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 2015.
- [22] 曾照洋, 赖成光, 王兆礼, 等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟 [J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38. (ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))
- [23] 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. (MA Menghua, LI Jiake, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11): 62-72. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-09 编辑: 彭桃英)

(上接第 101 页)

- [21] HUANG P N, LI Z J, LI Q L, et al. Application and comparison of coaxial correlation diagram and hydrological model for reconstructing flood series under human disturbance [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(7): 1245-1264.
- [22] 李致家, 霍文博, 张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48(5): 385-391. (LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 385-391. (in Chinese))
- [23] HUO W, LI Z, ZHANG K, et al. GA-PIC: an improved Green-Ampt rainfall-runoff model with a physically based infiltration distribution curve for semi-arid basins [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124900.
- [24] YAO C, LI Z J, BAO H J, et al. Application of a developed Grid-Xinjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(9): 923-934.
- [25] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [26] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-02-21 编辑: 熊水斌)