

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.010

杨梅河流域“海绵型”综合管廊水文效应模拟

李珊珊¹, 王兆礼^{1,2}, 赖成光^{1,2}, 吴旭树¹, 陈晓宏², 林广思¹, 赵俊维³

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641;

2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275; 3. 肇庆市恒发农业科技有限公司, 广东 肇庆 526114)

摘要:以广州市国家综合管廊试点区域——杨梅河流域为研究对象,利用 SWMM 和 SUSTAIN 模型对传统开发情景、传统综合管廊情景、低影响开发情景、低影响开发和综合管廊联合作用的“海绵型”综合管廊情景下的水文效应进行对比评估,结果表明:实测降雨条件下,SWMM 模型的模拟结果与流域内涝实际情况相符,证明该模型适用于杨梅河流域水文效应研究;结合 SWMM 和 SUSTAIN 模型的优势,将 SUSTAIN 模型中的低影响开发优化布局方案输入至 SWMM 模型进行水文模拟,使得低影响开发布局更科学合理;“海绵型”综合管廊情景下,溢流量削减效果最佳,50 a 重现期设计降雨条件下溢流总量削减率超过 60%,与“快排”模式下的传统综合管廊情景相比,“海绵型”综合管廊使杨梅河出水口峰值流量明显降低,峰现时间也相应延迟。

关键词:“海绵型”综合管廊;低影响开发;水文效应模拟;SWMM;SUSTAIN 模型;杨梅河流域

中图分类号:TV121⁺ **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0068-08

Hydrological effect simulation of LID-underground integrated pipe corridors in Yangmei River Basin // LI

Shanshan¹, WANG Zhaoli^{1,2}, LAI Chengguang^{1,2}, WU Xushu¹, CHEN Xiaohong², LIN Guangsi¹, ZHAO Junwei³
(1. State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Zhaoqing Hengfa Agricultural Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526114, China)

Abstract: The Yangmei River Basin, a national pilot area of integrated pipe corridors in Guangzhou City, was taken as the study area. The SWMM and SUSTAIN model were used to compare and evaluate hydrological effects under four scenarios, including the scenarios of traditional development, underground integrated pipe corridors (UIPC), low impact development (LID), and the combination of LID and UIPC (LID-UIPC). The results showed that, under the condition of measured rainfall, the simulated overflow point with the SWMM was in good agreement with the place prone to waterlogging in reality, proving that the SWMM was suitable for the hydrological effect evaluation in the Yangmei River Basin; combining the advantages of the SWMM and SUSTAIN model, the LID layout optimization schemes calculated by the SUSTAIN model were input into the SWMM for hydrological simulation, resulting in more reasonable LID layout; the overflow reduction rate under the LID-UIPC scenario was the highest, which exceeded 60% under the condition of a 50-year return period rainfall, its peak discharge at the outlet was lower than that under the UIPC scenario, and its peak appearance time was also delayed.

Key words: LID-underground integrated pipe corridors; low impact development; hydrological effect simulation; SWMM; SUSTAIN model; Yangmei River Basin

全球经济快速增长驱动城市用地扩张,城市下垫面硬化比例不断增加,导致地表产汇流时间缩短,地下排水系统负荷增大^[1];此外,全球气候变暖导致极端降雨事件频发,大大增加了城市洪涝灾害和

水资源问题发生的风险^[2]。针对日益突出的城市洪涝问题,20 世纪 90 年代美国马里兰州环境资源署首先提出了低影响开发(low impact design, LID)雨水管理体系^[3],即利用小型、分散、低成本且具有

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508200,2016YFA0601703,2016YFC0401005);国家自然科学基金(51879107,51709117);亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2021ZB23)

作者简介:李珊珊(1997—),女,博士研究生,主要从事海绵城市和低影响开发研究。E-mail: cllishanshan@mail.scut.edu.cn

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

景观效应的绿色基础设施削减径流总量,减少污染物负荷,提高雨水利用程度。此后,世界各国逐步开展类似的城市雨洪管理相关研究,如英国提出的“可持续排水系统(sustainable drainage system, SUDS)”^[4],澳大利亚提出的“水敏感城市(water sensitive urban design, WSUD)”理念^[5],以及新西兰提出的“低影响城市设计与开发(low impact urban design and development, LIUDD)”^[6]。我国在该方面的研究起步较晚,自2013年习近平总书记提出建设“海绵城市”后,与“海绵城市”相关的研究与政策才真正兴起^[7]。

LID设施有多种实现形式,包括生物滞留池、绿色屋顶、透水铺装等。国内外对LID设施的研究,前期主要集中于单一LID设施的试验^[8]和数值模拟^[9],如Versini等^[10]基于试验对绿色屋顶的水文影响进行评价;李家科等^[11]应用暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)模拟雨水花园对水量水质的调控效果。学者们还尝试将不同LID设施进行组合布局,胡爱兵等^[12-13]依据不同的下垫面类型,人工确定LID设施改造比例;王婷等^[14]直接采用单一LID设施最佳布设比例作为优化布局方案;刘海娇等^[15]在确定削减目标后,人工调整LID比例和布局以获取优化布局方案。尽管上述研究已取得不错的成果,但对LID设施分配比例和布局的确定方式欠妥,并未综合考虑成本效益、适建性以及不同LID设施间的相互作用。为实现效益最大化,近年来开始注重LID设施的优化布局,逐渐放弃以往机械式指定LID设施改造比例和采用单一LID设施最佳比例进行组合的方法,改用耦合水文模型与优化算法以求解LID优化布局,或直接采用LID优化布局建模工具。这些方法包括:将HIMS(hydro-informatic modeling system)分布式模拟系统与计算机优化算法相结合^[16];将长期水文影响评价(long-term hydrologic impact assessment-LID, L-THIA-LID)模型与多算法遗传自适应目标相耦合^[17];利用Python耦合SWMM模型和非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)-II形成优化算法^[18],或在此基础上提出基于边际成本的多目标优化贪心算法(marginal-cost-based greedy strategy, MCGS)进行LID设施的优化布局^[19]等。对于LID优化布局建模工具,目前应用较广泛的是SUSTAIN(system for urban stormwater treatment and analysis integration)模型,不少研究者^[20-21]采用SUSTAIN模型内置的NSGA-II优化算法成功实现LID优化布局设计。与人工设定LID设施布局方案和改造比例相比,采用SUSTAIN模型进

行LID设施优化布局的效率更高,但对于大区域而言,为减轻SUSTAIN模型的运行负荷,需要对子汇水区 and 管网进行大幅度的概化,其模拟精度仍有待提高;而SWMM模型虽然不能进行LID优化布局,但能实现对城市水文效应较高的模拟精度。因此本文尝试应用SUSTAIN模型进行成本最小化模拟,获取最优的LID设施布局方案,重新输入至SWMM模型中对LID设施进行更精确的水文模拟。

不少研究表明LID设施能有效滞蓄雨洪,但在极端降雨条件下对径流的削减效果较弱^[22-23],尤其在南方地区;而基于传统“快排”模式的地下排水系统能快速排走雨水,但目前管道的设计标准普遍偏低,导致逢大雨必涝。对此国家相关部门提出要加强地下综合管廊建设,推进“海绵城市”的建设,这促成了“海绵型”综合管廊的诞生,即在地下综合管廊建设中额外增添雨水调蓄仓以增大排水能力,同时对城市下垫面进行LID“海绵化”改造,联合提升城市防洪排涝能力。鉴于此,本文针对“海绵型”综合管廊试点区域——杨梅河流域,基于SWMM和SUSTAIN模型耦合,探讨“海绵型”综合管廊的水文效应,并与传统开发、传统综合管廊、LID情景相比较,为“海绵型”综合管廊规划、设计与建设提供参考。

1 研究区概况

2016年广州市入选国家第二批管廊试点城市,天河智慧城高唐路段是全国“海绵型”综合管廊建设的试点区域。高唐路段综合管廊建设区域位于广州市天河区杨梅河流域内(图1),流域总面积约

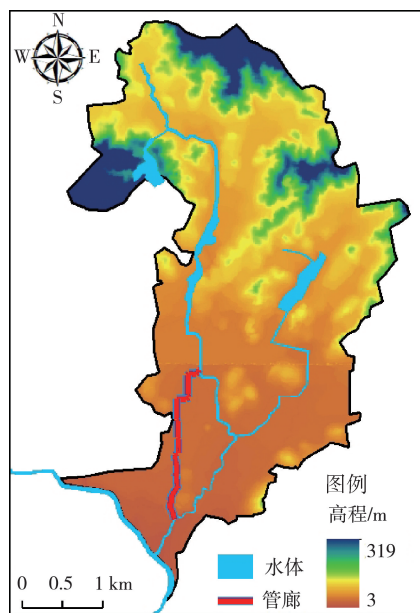


图1 研究区高程分布

Fig.1 Elevations of the study area

15.43 km²,地处南亚热带季风区,多年平均降水量为1725 mm,汛期集中于4—9月,汛期降水量占全年的81%。该区域目前没有水闸和泵站等排涝设施,排涝功能主要由河涌及管网承担,杨梅河在该区域的断面较小,经常发生洪涝灾害。

本文使用的数据有数字高程模型(DEM)、卫星遥感影像数据、土地利用类型数据、管网和综合管廊设计资料等。DEM和土地利用类型数据(2014年)来源于国土部门,其中DEM分辨率高达8 m。土地利用类型数据已结合Google地理卫星影像图和实地调研结果作局部修正(图2)。管网、综合管廊、河道等数据均来源于市政相关部门(图3)。

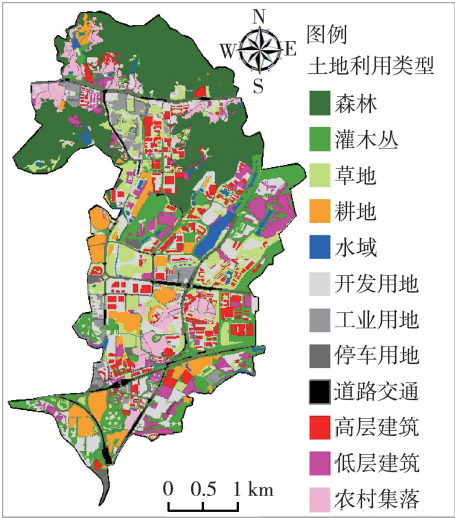


图2 研究区土地利用类型
Fig.2 Land cover map

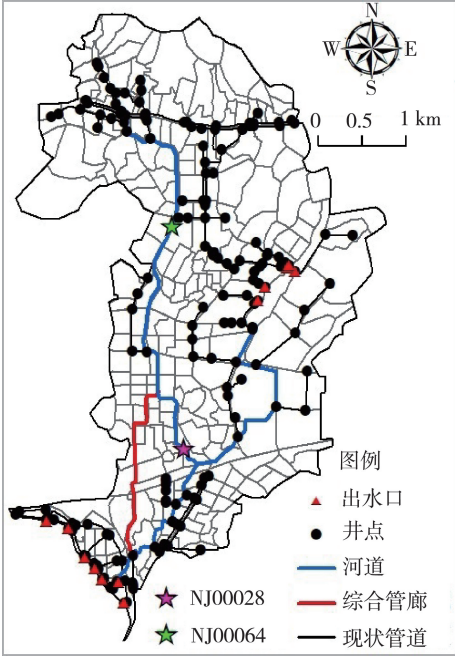


图3 研究区管网系统概况
Fig.3 Pipe network overview

2 研究方法

为了探究“海绵型”综合管廊的水文效应,分别设置了4种不同的情景:传统开发(情景1)、传统综合管廊(情景2)、LID(情景3)和“海绵型”综合管廊(情景4)。情景1采用研究区内现有的排水管网系统,不考虑综合管廊和LID设施的建设;情景2和情景3基于传统开发情景分别新增地下综合管廊和LID设施;情景4将地下综合管廊建设与LID设施改造相结合。基于符合成本-效益的削减率目标,应用SUSTAIN模型获取LID优化布局方案,然后输入至SWMM模型中进行水文模拟,对上述4种情景的水文效应进行对比评估,技术路线见图4。

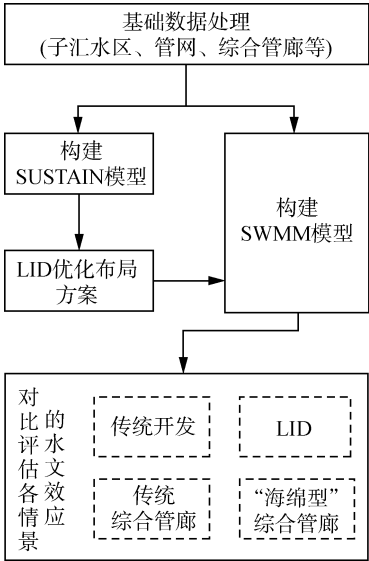


图4 水文评估技术路线

Fig.4 Flowchart of hydrological evaluation

2.1 SWMM 模型构建

SWMM 模型^[24]为分布式水文水动力模型,主要模块包括地表产流、地面径流和管网汇流等。

2.1.1 研究区概化

对管网进行概化,共获取管道154条、井点175个、出水口7个;依据综合管廊雨水仓的工程参数将其概化为矩形断面和部分圆形输水管;杨梅河被概化为梯形断面的明渠进行模拟。子汇水区是SWMM计算产汇流的子单元,根据研究区DEM数据、建筑物、交通道路和管网分布,人工划分263个子汇水区,平均面积为5.86 hm²,研究区概化结果见图3。

2.1.2 模型参数和验证

SWMM模型参数分为测量参数和经验参数。杨梅河流域的子汇水区面积、平均坡度和不透水率等测量参数可通过ArcGIS间接获取,管线参数根据

CAD 设计图纸获取;经验参数则主要参考 SWMM 模型应用手册和邻近类似区域的研究成果^[25-26],透水区和不透水区曼宁系数分别为 0.011 和 0.24,透水区和不透水区洼蓄深度分别为 2.5 mm 和 5 mm,霍顿模型的最大、最小入渗率和渗透衰减系数分别为 103.8、11.44 和 8.46。在 SUSTAIN 模型中获取 LID 优化布局方案后,输入至 SWMM 模型中,对 LID 设施和“海绵型”综合管廊的水文效应进行研究的 过程中,需要输入 LID 设施的相关参数,而这些参数 依据模型用户手册和工程技术规范等确定(表 1)。 此外,渗透路面、生物滞留池和绿色屋顶等设施表面 层的表面坡度均为 1%,土壤层的田间持水量和凋 萎点含水量的体积分数分别为 0.2 和 0.1,土壤层 的导水率、导水坡度和吸附水头分别为 12 mm/h、 45% 和 90 mm。

选用 2018 年 6 月 8 日 0:00 至 18:50 的实测降 雨资料对 SWMM 模型的适用性进行验证。模拟发 现整个研究区溢流量最大的井点是位于杨梅河下游 易涝片区的井点 NJ00028(图 3)。由于缺乏管网流 量和水位数据,通过现场调查发现,该点所在区域是 洪涝多发区,逢暴雨必涝,模拟的溢流点位置与实际 的内涝点基本重合,表明模型模拟结果与实际情况 相吻合。因此本研究所构建的 SWMM 模型可用于 杨梅河流域不同重现期降雨条件下不同情景的水文 效应研究。

2.2 SUSTAIN 模型构建

SUSTAIN 模型^[21]是一款以插件形式嵌入 ArcGIS 平台的城市降雨径流模拟分析决策系统,可

对 LID 设施进行有效的模拟、布局、分析和优化。

2.2.1 降雨资料和径流模拟设置

选用 2018 年 5 月 7 日至 12 月 30 日的实测长 序列降雨资料进行模拟,以外部径流模拟方式向概 化的土地利用类型分配 SWMM 模拟所得的径流时 间序列(表 2),因此无需对 SUSTAIN 进行二次 验证。

2.2.2 管网和子汇水区概化

SUSTAIN 模型每次只能将一个出水口作为评 估点进行 LID 成本-效益优化,其中杨梅河出水口最 具代表性,故对其他出水口控制的小范围子汇水区 不予以考虑。综合考虑研究区地形地势、卫星图及 管网走向等因素的影响,将前述的 263 个子汇水区 概化为 41 个,其中面积最大的一个为 0.7 km²,其余 均小于 0.5 km²。由于过于详细的管道资料可能会 降低模型模拟速度甚至导致运行中途崩溃的风险, 因此,基于已概化的子汇水区、管网流向、道路、河流 等对管网进行概化(图 5)。

2.2.3 集合式 LID 设施的设计

本文根据土地利用类型的概化结果选择 LID 设施,如高层建筑适宜建设绿色屋顶,低层建筑则 适合安装雨水桶对雨水回收利用,道路交通则适 合铺设渗透路面,其他透水区(如森林、灌木丛、耕 地等)则不进行过多“海绵化”改造,直接流向出水 口;另外还需在研究区中增设湿塘用于储蓄和处 理来自植草沟、草地、透水铺装等海绵体的径流, 具体的设计方案见图 6,LID 设施的相关参数与单 位成本取值见表 3。

表 1 SWMM 模型中 LID 设施参数设置
Table 1 Parameters of LID facilities in SWMM

LID 设施	表面层			土壤层		蓄水层		
	高度/mm	植被覆盖比值	表面糙率	厚度/mm	孔隙率	厚度/mm	孔隙比	糙率
渗透路面	0	0	0.013	35	0.30	200	0.50	
生物滞留池	250	0.1	0.240	300	0.25	300	0.50	
绿色屋顶	50	0.2	0.240	200	0.40	80	0.50	0.1
湿塘	0	0	0.100			1 500	0.75	
下凹式绿地	100	0.1	0.150					
雨水桶	1 000							

表 2 土地利用类型概化及径流时间序列
Table 2 Land use reclassification and runoff time series

土地利用类型		径流时间序列	不透水率/%
概化后	概化前		
草地	草地	Grass2018. txt	0
透水区	森林、灌木丛、耕地、水域	Bush2018. txt	0
高层建筑	高层建筑	Roof2018. txt	100
低层建筑	工业用地、农村集落、底层建筑	SmallBldg2018. txt	100
道路交通	道路交通、停车用地	Road. txt	100
其他不透水区	开发用地	Open_space. txt	100

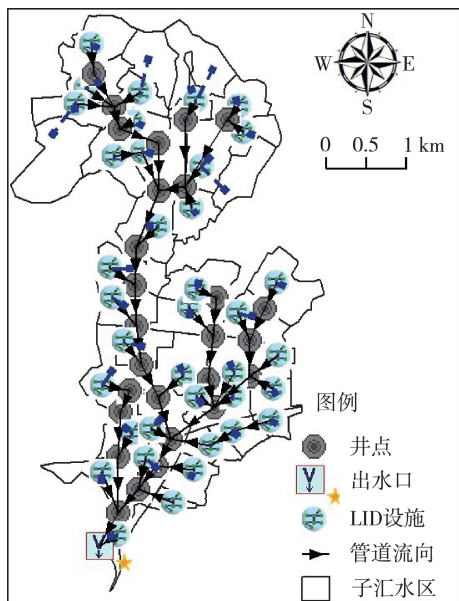


图5 概化的子汇水区 and 管网

Fig. 5 Subcatchments and pipe network after generalization

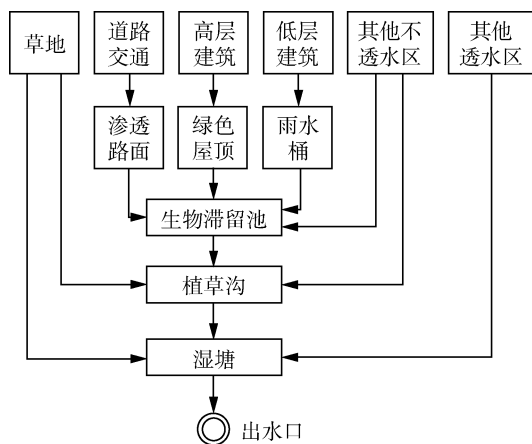


图6 集合式 LID 设施设计方案

Fig. 6 Aggregate LID design scheme

表3 SUSTAIN 模型中 LID 设施相关参数和单位成本取值

Table 3 Design parameters and unit cost for LID facilities in SUSTAIN model

LID 设施	长度/m	宽度/m	设计排水面积/m ²	单位成本/(元·m ⁻²)
绿色屋顶	3	3	40	300
雨水桶			40	1 200
渗透路面	3	3	400	200
生物滞留池	3	3	400	800
植草沟	12	1	400	200
湿塘	24	8		600

注:雨水桶的直径为 1.2 m。

2.2.4 LID 成本-效益分析

为初步预估符合实际成本-效益的径流削减率目标,在 SUSTAIN 模型中采用 NSGA-II 进行优化计算,获取 LID 优化布局的成本-效益曲线(图 7)。由图 7 可以看出,LID 优化布局后的年径流削减率范围在 5% ~ 40% 之间,相应的建设总成本为 8.5

亿~14 亿。以预算成本 0.7 亿元/km²对本研究区进行“海绵化”改造^[27],总成本约为 10 亿元,由图 7 可知,与该预算成本相应的年径流削减率最高只能达到 30%。以此为控制目标在 SUSTAIN 模型中进行成本最小化模拟,获取 LID 的布局 and 数量。

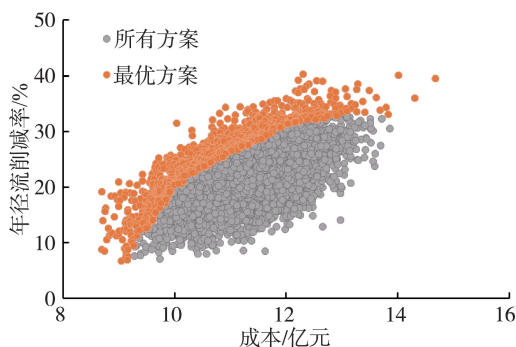


图7 LID 设施的成本-效益分布

Fig. 7 Cost-effectiveness distribution of LID facilities

2.2.5 LID 优化布局方案验证

对于大尺度流域,SUSTAIN 模型中的子汇水区和管网数据均被大幅度概化,其中管道类型设置为虚拟类型,因此模拟精度较低。SWMM 模型虽能对整个研究区和 LID 设施实现较精确的水文模拟,但仅基于人工设定的 LID 改造比例,无法实现自动的优化布局。因此本研究结合二者的优势,以年径流削减率 30% 作为控制目标,在 SUSTAIN 模型中获取 LID 优化布局方案后,输入至 SWMM 模型中进行水文模拟,结果显示在重现期 P 为 50 a 设计降雨条件下,流域溢流量削减率为 31.44%,与 SUSTAIN 模型中初步设定的年径流削减率 30% 相吻合,与实际成本-效益相符。由此可见,结合 SUSTAIN 模型中 LID 优化布局的优势,利用 SWMM 模型对情景 1~4 进行水文模拟评估,可有效评估 LID 设施和综合管廊作用下水文效应的差异。

3 结果与分析

研究区位于广州市中心城区天河区,根据《广州市排水管理办法实施细则》推荐采用区间公式设计暴雨强度,以芝加哥雨型为设计雨型,选用 P 为 2 a、20 a 和 50 a 设计降雨对上述 4 种情景进行城市雨洪模拟(图 8),对模拟结果从出水口流量、溢流量两方面进行分析评价。

3.1 出水口流量

选取研究区内最具代表性的杨梅河出水口进行流量过程分析,对 P 为 2 a、20 a 和 50 a 设计降雨条件下典型出水口的降雨-流量过程(图 8)、峰值流量以及峰现时间进行统计,结果表明:

a. 与情景 1 相比,情景 2 的出水口流量大幅增

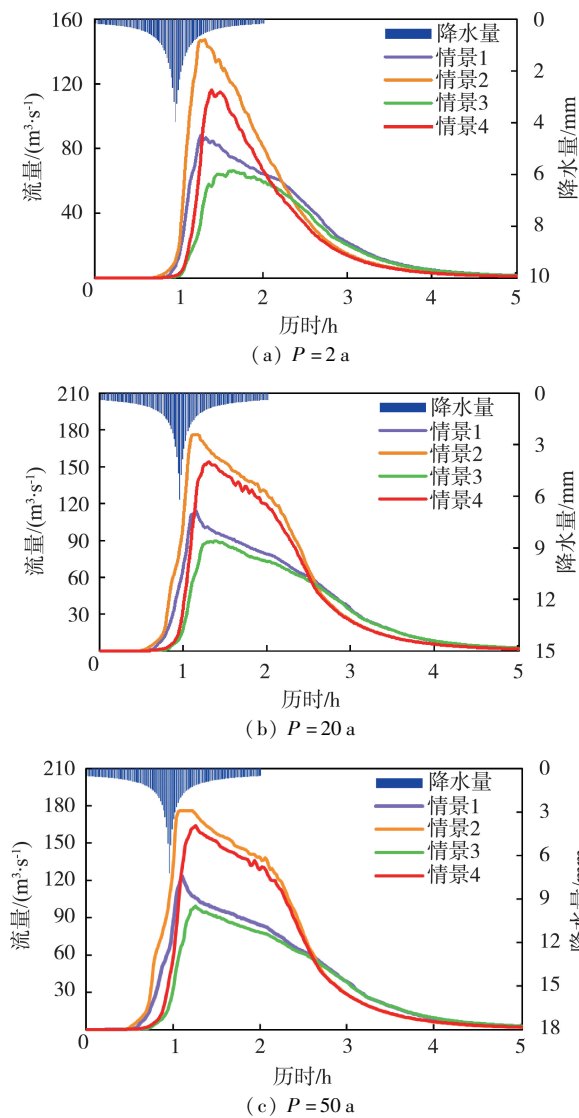


图8 各降雨重现期下典型出水口降雨和径流曲线

Fig.8 Rainfall and runoff curves at typical outlet under different rainfall return periods

加,在 P 为 2 a、20 a 和 50 a 设计降雨条件下,峰值流量分别增加了 66.93%、54.60% 和 42.87%,而峰现时间几乎没有发生变化;随着重现期的增大,峰值流

表4 各降雨重现期不同情景方案的溢流量信息

Table 4 Overflows and reduction rates for each design scenario under different rainfall return periods

重现期/a	情景	溢流总量/ 10^3 m^3	溢流量/ 10^3 m^3		溢流量占比/%		削减率/%		溢流总量
			NJ00028	NJ00064	NJ00028	NJ00064	NJ00028	NJ00064	
2	1	197.8	114.9	15.4	58.09	7.79			
	2	78.7	1.7	14.9	2.16	18.93	98.54	3.25	60.21
	3	81.1	58.0	0	71.52	0	49.52	100.00	59.00
	4	19.4	0	0	0	0	100.00	100.00	90.19
20	1	586.5	223.4	84.4	38.09	14.39			
	2	338.1	27.3	84.4	8.07	24.96	87.78	0	42.35
	3	379.9	182.5	53.8	48.04	14.16	18.31	36.26	35.23
	4	184.7	5.5	51.7	2.98	27.99	96.99	38.74	68.51
50	1	764.6	256.9	115.0	33.60	15.04			
	2	480.7	46.8	113.9	9.74	23.69	81.78	0.96	37.13
	3	524.2	213.8	84.5	40.79	16.12	16.78	26.52	31.44
	4	291.2	14.7	83.0	5.05	28.50	94.28	27.83	61.91

量增加幅度减小,维持在 $170 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,这与管道的流量承载力有关。

b. 情景3的出水口流量随着重现期的增大而增大,与情景1相比,在 P 为 2 a、20 a 和 50 a 设计降雨条件下,峰值流量削减率分别为 24.88%、21.25% 和 19.37%;峰现时间明显延迟,在 P 为 2 a 设计降雨条件下,峰现时间延迟了 23 min,即使在 P 为 50 a 设计降雨条件下亦延迟 9 min。

c. 与情景2相比,在 P 为 2 a 降雨条件下,情景4的出水口峰值流量削减率达 20.97%,而在 P 为 20 a 和 50 a 设计降雨条件下,峰值流量削减率分别为 12.53% 和 6.98%;在 3 种重现期下,峰现时间均明显延迟,至少可达 8 min,表明 LID 设施具有滞蓄雨洪的作用,与基于“快排”模式的综合管廊相结合可减轻河道的行洪压力。

3.2 溢流量分析

位于杨梅河下游的井点 NJ00028 溢流情况最严重,故选取井点 NJ00028 和位于上游的井点 NJ00064(图3)作为典型溢流点进行对比,分析综合管廊和 LID 的径流削减效果。各重现期下不同情景方案的溢流总量和典型溢流点的信息见表4,由表4可知:

a. 与情景1相比,情景2的下游井点 NJ00028 的溢流量削减率范围为 81.78%~98.54%;而上游井点 NJ00064 的溢流量削减率低于 3.25%,削减效果甚微,表明综合管廊的位置和设计方法直接影响着不同位置溢流点的溢流量削减效果。

b. 与情景1相比,在 LID 作用下井点 NJ00064 和 NJ00028 的溢流量均在减小,但随着设计降雨重现期的增大,溢流量的削减率逐步减小。尤其是在 P 为 50 a 设计降雨条件下,井点 NJ00064 和 NJ00028 的溢流量和溢流总量的削减率仅为 26.52%、16.78% 和 31.44%,表明在低频降雨条件

下,LID 对溢流量的削减效果较差。

c. 情景 4 对溢流量的削减效果最佳,与情景 1 相比,溢流总量削减率达到 60% 以上,在 P 为 2 a 设计降雨条件下最高可达 90.19%;即使在 P 为 50 a 设计降雨条件下,井点 NJ00028 的溢流量削减率达到了 94.28%,表明将“快排”与“滞蓄”相结合的“海绵型”综合管廊对研究区溢流量具有极佳的削减效果。

4 结 论

a. 实测降雨条件下,采用 SWMM 模型对传统开发情景下的水文效应进行了分析,结果表明杨梅河下游典型溢流点溢流量最大,与易涝片区实际淹没情况相符,证明所构建的 SWMM 模型适用于杨梅河流域不同情景水文效应的模拟分析。

b. 以 30% 年径流削减率为目标在 SUSTAIN 模型中获取 LID 优化布局方案,输入至 SWMM 模型中进行水文模拟,在 P 为 50 a 设计降雨条件下,研究区的溢流总量削减率为 31.44%,与 SUSTAIN 模型计算结果几乎一致,表明与传统机械式确定 LID 改造比例和布局的方式相比,本文提出的方法可同时实现 LID 优化布局及精细化的水文模拟,以进行情景分析。

c. 在地下综合管廊作用下,流域出水口流量增大,峰现时间几乎不变,但对溢流量的削减效果明显,其中处于下游的 NJ00028 井点溢流量削减率可达 80% 以上;LID 设施能够降低出水口流量,延迟峰现时间,但对溢流量的削减效果不如地下综合管廊;“海绵型”综合管廊对溢流量的削减效果最佳,在 P 为 50 a 设计降雨条件下,下游井点的溢流量削减率高达 94.28%,对溢流总量的削减率达 61.91%,与“快排”模式下的传统综合管廊情景相比,“海绵型”综合管廊使流域出水口峰值流量明显降低,峰现时间也明显延迟,说明“海绵型”综合管廊结合了 LID 和地下综合管廊的优势,是行之有效的洪灾缓解措施,值得推广。

参考文献:

- [1] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1): 53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese))
- [2] PALL P, AINA T, STONE D A, et al. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and

Wales in autumn 2000 [J]. Nature, 2011, 470 (7334): 382-385.

- [3] Department of Environmental Resources. Low-impact development design strategies: an integrated design approach [R]. Largo: Department of Environmental Resources, 1999.
- [4] FRYD O, DAM T, JENSERN M B. A planning framework for sustainable urban drainage systems[J]. Water Policy, 2012, 14(5): 865-886.
- [5] WONG T H F. Improving urban stormwater quality: from theory to implementation [J]. Water: Journal of the Australian Water Association, 2000, 27(6): 28-31.
- [6] VAN ROON M, VAN ROON H. Low impact urban design and development principles for assessment of planning, policy and development outcomes[R]. [S. l.]: Centre for Urban Ecosystem Sustainability, 2005.
- [7] 王浩,梅超,刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1009-1014 (WANG Hao, MEI Chao, LIU Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1009-1022. (in Chinese))
- [8] 李家科,张兆鑫,蒋春博,等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 1-8. (LI Jiake, ZHANG Zhaoxin, JIANG Chunbo, et al. Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 1-8. (in Chinese))
- [9] 李娜,孟雨婷,王静,等. 低影响开发措施的内涝削减效果研究以济南市海绵试点区为例[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 55-68. (LI Na, MENG Yuting, WANG Jing, et al. Effect of low impact development measures on inundation reduction: taking Jinan pilot area as example [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12): 55-68. (in Chinese))
- [10] VERSINI P A, RAMIER D, BERTHIER E, et al. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 562-575.
- [11] 李家科,李亚,沈冰,等. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 60-67. (LI Jiake, LI Ya, SHEN Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 60-67. (in Chinese))
- [12] 胡爱兵,任心欣,丁年,等. 基于 SWMM 的深圳市某区域 LID 设施布局与优化[J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 96-100. (HU Aibing, REN Xinxin, DING Nian, et al. LID facilities layout and optimization in an area in Shenzhen based on SWMM [J]. China Water &

- Wastewater,2015,31(21):96-100. (in Chinese))
- [13] 王雯雯,赵智杰,秦华鹏. 基于 SWMM 的低冲击开发模式水文效应模拟评估[J]. 北京大学学报(自然科学版),2012,48(2):303-309. (WANG Wenwen, ZHAO Zhijie, QIN Huapeng. Hydrological effect assessment of low impact development for urbanized area based on SWMM[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2012,48(2):303-309. (in Chinese))
- [14] 王婷,刁秀媚,刘俊,等. 基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):39-43. (WANG Ting, DIAO Xiumei, LIU Jun, et al. Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4):39-43. (in Chinese))
- [15] 刘海娇,于磊,薛丽娟,等. 基于 PCSWMM 的老校区 LID 设施模拟[J]. 中国给水排水,2016(23):143-146. (LIU Haijiao, DING Lei, XUE Lijuan, et al. Simulation of LID facilities in old campus based on PCSWMM[J]. China Water & Wastewater, 2016(23):143-146. (in Chinese))
- [16] 刘昌明,张永勇,王中根,等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报,2016,31(5):719-731. (LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area:a preliminary study of planning and techniques for sponge city[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5):719-731. (in Chinese))
- [17] LIU Y Z, THELLER L O, PIJANOWSKI B C, et al. Optimal selection and placement of green infrastructure to reduce impacts of land use change and climate change on hydrology and water quality: an application to the Trail Creek Watershed, Indiana [J]. Science of the Total Environment, 2016, 553:149-163.
- [18] XU T, JIA H F, WANG Z, et al. SWMM-based methodology for block-scale LID-BMPs planning based on site-scale multi-objective optimization: a case study in Tianjin [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(4):1-12.
- [19] XU T, ENGEL B A, SHI X M, et al. Marginal-cost-based greedy strategy (MCGS): fast and reliable optimization of low impact development (LID) layout [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640-641:570-580.
- [20] MAO X H, JIA H F, YU S L. Assessing the ecological benefits of aggregate LID-BMPs through modelling [J]. Ecological Modelling, 2017, 353:139-149.
- [21] 贾海峰,姚海蓉,唐颖,等. 城市降雨径流控制 LID-BMPs 规划方法及案例[J]. 水科学进展,2014,25(2):260-267. (JIA Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al. LID-BMPs planning for urban runoff control and case study[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2):260-267. (in Chinese))
- [22] 李卓熹,秦华鹏,谢坤. 不同降雨条件下低冲击开发的水文效应分析[J]. 中国给水排水,2012,28(21):37-41. (LI Zhuoxi, QIN Huapeng, XIE Kun. Hydrological effect analysis of low impact development under different rainfall conditions[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21):37-41. (in Chinese))
- [23] 杨少雄,侯精明,陈光照,等. LID 径流控制效果对设计暴雨重现期的响应[J]. 水资源保护,2020,36(6):93-98. (YANG Shaoxiong, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Response law of LID runoff control effect to design rainstorm return period [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):93-98. (in Chinese))
- [24] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):47-57. (HOU Jingming, LI Donglai, Wang Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1):47-57. (in Chinese))
- [25] WU X S, WANG Z L, GUO S L, et al. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: a case study in Dongguan City, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547:428-442.
- [26] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3):15-21. (in Chinese))
- [27] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. 给水排水,2015(6):1-7. (ZHANG Linwei. Introduction to the construction of the sponge city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015(6):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2020-12-16 编辑:施业)

