

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.006

低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟

蔡庆拟¹, 陈志和^{2,3}, 陈 星¹, 陈幸桢^{2,4}, 张丹蓉¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
3. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275; 4. 广州市番禺区水务局, 广东 广州 511400)

摘要:以广州市某小区为研究对象,根据实测降雨径流资料,结合现状排水管网,建立暴雨雨水管理模型(storm water management model, SWMM),模拟不同降雨条件下的产流与排水状况。基于 SWMM 的低影响开发(low impact development, LID)模块,模拟分析采用渗透铺装、下凹式绿地、雨水花园和 LID 组合方案对城市雨洪的控制作用。结果表明,采用渗透铺装、下凹式绿地和雨水花园等 LID 措施,洪峰流量和径流系数均明显降低,可有效缓解市政管网的排水压力,各种 LID 措施的雨洪控制效果在低重现期降雨时更为显著。其中雨水花园对径流系数和洪峰流量的削减效果最显著;LID 组合措施对洪峰的削减和滞后作用较好;下凹式绿地和渗透铺装单独布设的雨洪控制效果一般。

关键词:SWMM; 海绵城市; 低影响开发; 雨水花园; 渗透铺装; 下凹式绿地

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)02-0031-06

Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater

CAI Qingni¹, CHEN Zhihe^{2,3}, CHEN Xing¹, CHEN Xingzhen^{2,4}, ZHANG Danrong¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Research Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Guangzhou 510275, China;
4. Water Affairs Bureau of Panyu District, Guangzhou 511400, China)

Abstract: A storm water management model (SWMM) was set up in this study to simulate runoff generation and drainage with different types of precipitation in a residential area in Guangzhou City, based on real-time observed rainfall-runoff data and the current drainage network. Combined with the low impact development (LID) module, the influences of permeable pavement, sunken lawns, rain gardens, and combined LID appliances on urban storm water were simulated and analyzed. The results show that both peak flow and the runoff coefficient decreased significantly through application of permeable pavement, sunken lawns, rain gardens, and LID appliances, which was conducive to the drainage of municipal pipe network. The effect of storm water control and utilization was more significant during low-return periods. The decreases of peak flow and the runoff coefficient were more significant when rain gardens were used. The combined LID appliances had more significant effects in reducing peak flow and postponing the time of peak flow. The effect of storm water control and utilization was not significant when permeable pavement and sunken lawns were used.

Key words: SWMM; sponge city; low impact development; rain garden; permeable pavement; sunken lawn

基金项目:国家自然科学基金(51379225);广东省自然科学基金(2014A030313102)
作者简介:蔡庆拟(1992—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:caiqn@hhu.edu.cn
通信作者:陈星,副教授。E-mail:chenxing@hhu.edu.cn

近年来,快速城市化造成水循环过程的改变,在城市化驱动下,硬质化路面面积增加,区域降雨径流改变^[1-3]。如许有鹏等^[4]研究发现,临安市城市化前后南苕河流域年径流量增加将近 30%,径流系数提高将近 20%。下垫面变化及城市雨、热岛效应造成产汇流过程发生变化,进而导致城市内涝频发^[5-6]。据住建部统计,2007—2015 年全国超过 360 个城市遭遇内涝,北京、广州、武汉等城市的严重内涝甚至造成人员伤亡。因此,在快速城市化地区提高防洪排涝能力,缓解城市内涝,让城市不再“看海”显得越来越重要。

国外对此类问题研究较早,如美国的低影响开发(low impact development, LID),英国的可持续发展排水系统(sustainable urban drainage systems, SUDS),澳大利亚的水敏感城市设计(water sensitive urban design, WSUD),日本城市泄洪系统和雨水地下储存系统等^[7]。我国在总结国外城市雨洪控制理念的基础上,结合国内实际提出了一种可持续发展的城市建设模式——海绵城市。海绵城市强调城市在应对环境变化以及暴雨洪水灾害时能有较好的“弹性”,在保护和修复现有“海绵体”的基础上,新建一定数量的“海绵体”,将城市内涝水“化整为零、变害为利”,实现自然积存、自然渗透、自然净化^[8]。

随着“海绵城市”的提出,城市雨水管理逐渐成为国内学者的研究热点。如唐双成等^[9]通过实验研究得出雨水花园对暴雨径流的削减效果较为显著,年径流削减高达 90% 以上;黄俊杰等^[10]对植草沟的实地试验结果表明,植草沟能有效削减道路径流和洪峰流量,延后峰现时间等;翟丹丹等^[11]研究表明绿色屋顶对雨水径流有一定的滞留作用,但随降雨强度增大滞留效果减弱。LID 措施的合理选用是海绵城市建设的重要环节。Guan 等^[12]对蓄水池、绿色屋顶、渗透路面等进行模拟,分析不同降雨条件下 LID 措施对地表径流的控制作用;Palla 等^[13]通过实验模拟研究了绿色屋顶、渗透路面对水文过程的影响效果。本文选取广州市某小区为研究对象,利用实测降雨径流数据,率定城市排水模拟参数,模拟研究不同 LID 措施在不同降雨条件下对城市雨洪的控制效果,以期为海绵城市的实践提供理论支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区域概况

选取广州市某小区地块作为研究对象,该区域用地主要由居住、绿地、道路广场用地组成,总面积为 43.29 万 m²。研究区域属于亚热带海洋性季风气候区,多年平均气温为 21.8℃,雨量丰沛,多年平

均降雨量为 1 675.5 mm,降雨多集中于 4—9 月,占全年降雨量的 80%,尤其以 5—6 月雨量最大,占全年降雨量的 32%。

1.2 模型概化

暴雨雨水管理模型(storm water management model, SWMM)由松散型分布式物理模型思想构建而成,下垫面的数字化过程可分为子流域划分、子流域信息提取及概化、排水系统信息提取及概化 3 个步骤^[14]。依据研究区域的地形高程实测数据,考虑地表特性、土地利用及雨水管网的分布情况,共划分 25 个子流域,41 个节点,41 条管道,2 个排水口,雨水管网概化图见图 1^[15]。研究区域内各子汇水区

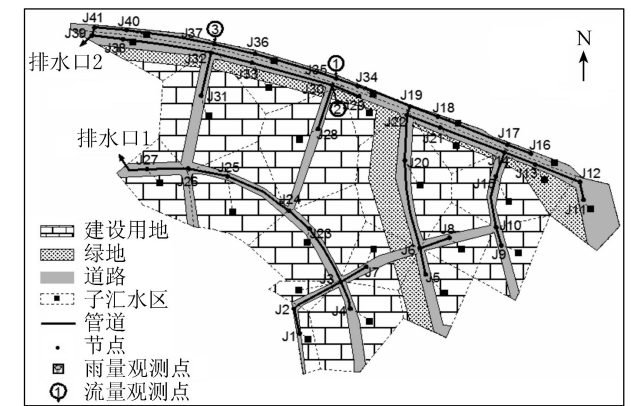


图 1 研究区域雨水管网概化

1.3 现场观测与参数率定

1.3.1 现场观测

选取研究区域中有代表性的观测点,实地观测降雨、径流等水文过程。选择仪器布置点时,主要考虑土地利用规划和现有的雨水管网设置情况,尽可能使布设位置具有代表性,反映研究区域的降雨和产汇流状况。通过实时观测的方式获取同步且连续的降雨和径流数据。共布设 1 个雨量观测点以及 3 个流量观测点,观测点位置见图 1。雨量记录仪放于地表空旷处,而流量计安置于雨水管网内,两者同步记录,每 10 min 存储一组数据。

1.3.2 参数率定

在 SWMM 中,参数分为可测量得到的确定性参数和需要优化的不确定性参数两种。其中确定性参数包括汇水区面积、平均坡度、漫流宽度、不透水面积和透水面积比例、管径及管道的长度等,可通过对收集的资料进行一定的技术处理获得参数值。不确定性参数则包括地表洼蓄深度、地表曼宁系数、管道曼宁系数、下渗参数等,主要通过参考参数的推荐取值范围、相关文献、邻近类似区域的研究成果和实测资料等方式率定获得^[16-17]。

本文根据 2013 年 8 月 14 日(2:40—13:00)典型降雨过程的实测数据率定 SWMM 的参数。产流计算选用适合小区域模拟的霍顿(Horton)公式,地表产汇流计算时间步长设为 1 min,管网汇流计算时间步长设为 0.5 s。经多次试算反复调整,取初始下渗率为 103.81 mm/h,稳定下渗率为 11.44 mm/h,下渗衰减系数为 2.75 h⁻¹。汇流过程不透水地面洼蓄深度取 1 mm,透水地面洼蓄深度取 10~11 mm,不透水地面和透水地面的曼宁系数分别取 0.01~0.015 和 0.3~0.4,管网曼宁系数取 0.011~0.013。

1.4 模型验证

根据 2013 年 8 月 15 日(2:00—16:00)降雨过程的实测数据验证率定后的模型,模型验证结果见图 2。该场次降雨总降雨量为 51.9 mm,地表径流深为 38.2 mm,平均产流系数为 0.736,基本反映区域地块的覆盖情况,模拟结果体现该区域产汇流规律。模型验证结果显示,观测点 1、2、3 的模拟结果的纳什效率系数分别为 0.89、0.88、0.90,模拟质量较好,可信度高。说明基于 SWMM 构建的模型合理可靠,可用于研究地块市政排水设施的地表径流控制模拟。

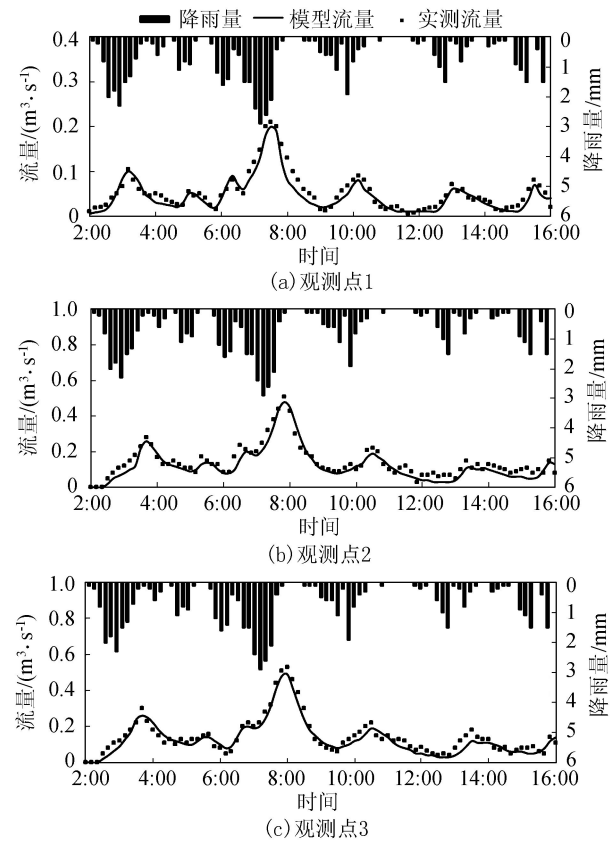


图 2 3 处流量观测点降雨流量过程验证

2 设计暴雨及 LID 措施布设

应用验证后的 SWMM,分析不同设计暴雨条件

下,不同 LID 措施布设方案对研究区域地表径流的调控效果。

2.1 设计暴雨

我国城市排水设计大多采用的是均匀雨型,但均匀雨型的计算结果与实际降雨过程相差甚远,尤其在城市化地区更为显著^[18]。近年来,国内外众多学者提出了包括三角形雨型、芝加哥雨型^[19]、Huff 雨型^[20]等计算方法,这些雨型更符合客观实际。因此,本文设计雨型选用芝加哥雨型。以最大雨强出现的时间作为原点或时间标度,设计暴雨过程线可表达为

$$i_{\text{峰前}} = \frac{S_p}{\left(\frac{t_1}{r} + b\right)^n} \left(1 - \frac{nt_1}{t_1 + rb}\right) \tag{1}$$

$$i_{\text{峰后}} = \frac{S_p}{\left(\frac{t_2}{1-r} + b\right)^n} \left[1 - \frac{nt_2}{t_2 + (1-r)b}\right] \tag{2}$$

式中: S_p 为某一重现期时的雨力; $i_{\text{峰前}}$ 、 $i_{\text{峰后}}$ 为峰前、峰后瞬时雨强; t_1 为峰前时间; t_2 为峰后时间; b 、 n 为暴雨公式的参数; r 为雨峰系数,本文取 $r=0.375$ 。

本文暴雨公式采用广州市水务局发布的广州市中心城区暴雨公式,见表 1。其中 q 为暴雨强度, t 为时间。

表 1 设计暴雨计算公式

重现期/a	暴雨强度公式
0.5	$q=6\,561.430/(t+16.812)^{0.911}$
1	$q=6\,366.875/(t+16.190)^{0.863}$
2	$q=5\,920.317/(t+14.646)^{0.815}$
3	$q=5\,688.521/(t+13.841)^{0.789}$
5	$q=5\,411.802/(t+12.874)^{0.758}$

2.2 LID 措施布设

本文结合研究区域现有开发建设情况,遵循 LID 措施布设原则^[21],提出 4 种 LID 措施布设方案。2 个排水口的集水区域内各 LID 措施布设面积及所占比例见表 2,各种措施布设参数参考 SWMM 操作手册与国内外相关文献^[16,22-23],LID 措施布设情况见图 3。

表 2 LID 措施布设情况

排水口	渗透铺装		雨水花园		下凹式绿地	
	布设面积/m ²	占汇水区面积比例/%	布设面积/m ²	占汇水区面积比例/%	布设面积/m ²	占汇水区面积比例/%
1	11 250	8.03	8 000	5.71	18 770	13.40
2	25 080	8.57	34 000	11.61	37 910	12.95

方案 1:雨水花园。雨水花园指人工或天然的浅凹绿地,用于收集雨水,经过植被土壤的净化之后逐渐就地下渗,涵养地下水。雨水花园蓄水层深度为 200 mm,植物体积比为 20%;土壤层厚为 500

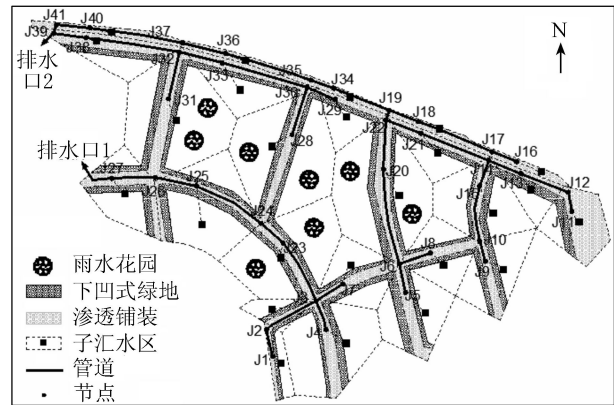


图3 LID措施布设图

mm,孔隙率为0.3;蓄水层厚为200 mm,孔隙比为0.6,雨水花园底部不设暗渠,无出流设施,雨水下渗后直接补给地下水。本文布设的雨水花园面积为4.2万m²,占总面积的9.70%。

方案2:渗透铺装。渗透铺装指采用透水性好、孔隙率高的材料代替现有的硬化路面铺装材料,在确保道路使用强度和耐久性的基础上,使暴雨径流能在短时间内渗入土壤或进入雨水管网中,从而达到削减地表径流的目的。本文布设的渗透铺装的面层厚度为60 mm,孔隙比为0.1,糙率为0.014;基层与垫层厚度为250 mm,孔隙比为0.43。将小区的部分硬化路面、停车场等改为渗透铺装,布设的渗透铺装总面积为3.63万m²,占总面积的8.39%。

方案3:下凹式绿地。下凹式绿地与普通绿地区别在于绿地高程低于路面,路面产生径流可流入绿地中储存起来,可有效减少径流直接外排量。本文布设的下凹式绿地面积为5.67万m²,滞蓄深度为100 mm,占总面积的13.09%。

方案4:LID组合方案。充分利用各子汇水区的自然条件,综合设置3种LID措施。将上述3种LID措施组合布设,各种LID措施的布设面积及参数设置均与其单独布设时一致。组合方案的LID布设总面积为前3种方案中布设面积的总和,即13.50万m²,占总面积的31.18%。

3 模拟结果与分析

为了评估LID措施对不同重现期暴雨的影响,利用设计暴雨公式(式1)推求出重现期 P 为1、2、5年,降雨历时 $t=2$ h的设计暴雨过程,降雨采用的时间间隔 $\Delta t=1$ min。运用SWMM模拟现状用地及渗透铺装、雨水花园、下凹式绿地单独布设和LID组合布设方案在不同设计暴雨重现期下出口断面径流过程,模拟总时长取4.5 h,时间步长为1 min。

3.1 洪峰流量

在不同设计暴雨重现期下各LID布设方案的出口断面洪峰模拟结果见表3。由表3可以看出:①与现状用地相比,4种方案均能够起到削减和滞后洪峰的作用,各重现期设计暴雨过程中的洪峰流量均有所减少,峰现时间滞后。这是由于渗透铺装、雨水花园和下凹式绿地等LID措施能在一定程度上提高城市“渗”、“滞”、“蓄”能力。②4种方案中,洪峰削减比例随重现期的增大出现先增加后减少的现象,在5年一遇降雨情况下洪峰削减比例较小。这是由于LID措施的蓄水容积有限,超过最大蓄水容积的部分将形成径流。③4种方案对洪峰削减比例从大到小依次是:LID组合、渗透铺装、雨水花园、下凹式绿地。LID组合方案对洪峰流量的削减效果最为显著,在1、2年一遇降雨情况下洪峰削减比例可达40%左右,而在5年一遇降雨时也能削减30%的洪峰。进一步计算单位布设面积的削峰滞洪效果,可以得出:在削减洪峰效果上,4种方案效果从大到小依次是:LID组合、雨水花园、渗透铺装、下凹式绿地;而在滞后洪峰效果上,LID组合效果最佳,下凹式绿地次之,渗透铺装和雨水花园效果不明显。

3.2 径流总量

各布设方案下不同设计暴雨重现期下的出口断面径流总量模拟结果见表4。由表4可看出:①对比现状用地,4种方案均能在一定程度上降低区域的径流系数,削减径流总量,体现海绵城市的“吸

表3 不同降雨重现期下各布设方案洪峰模拟结果

LID布设方案	排水口	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)			洪峰削减比例/%			峰值时刻		
		$P=1a$	$P=2a$	$P=5a$	$P=1a$	$P=2a$	$P=5a$	$P=1a$	$P=2a$	$P=5a$
现状用地	1	2.96	3.89	4.16				0:54	0:50	0:49
	2	4.22	4.99	5.64				1:03	1:00	0:53
渗透铺装	1	2.33	2.77	3.75	21.28	28.79	9.86	0:55	0:54	0:51
	2	3.47	4.36	5.24	17.77	12.63	7.09	1:07	1:02	0:57
雨水花园	1	2.57	3.18	3.98	13.18	18.25	4.33	0:55	0:53	0:50
	2	3.26	4.08	4.57	22.75	18.24	18.97	1:06	1:03	0:59
下凹式绿地	1	2.33	2.81	3.82	21.28	27.76	8.17	0:56	0:55	0:51
	2	3.71	4.65	5.41	12.09	6.81	4.08	1:07	1:02	0:56
LID组合	1	1.69	2.06	2.58	42.91	47.04	37.98	0:57	0:57	0:56
	2	2.6	3.13	4.09	38.39	37.27	27.48	1:10	1:08	1:04

表 4 不同降雨重现期下各布设方案径流总量情况

LID 布设方案	排水口	径流总量/(10 ³ m ³)			径流系数			径流系数减少百分比/%		
		P=1 a	P=2 a	P=5 a	P=1 a	P=2 a	P=5 a	P=1 a	P=2 a	P=5 a
现状用地	1	6.44	7.89	9.92	0.761	0.779	0.802			
	2	15.55	18.44	21.95						
渗透铺装	1	5.38	6.81	9.02	0.642	0.672	0.711	15.64	13.74	11.35
	2	13.22	16.32	20.16						
雨水花园	1	5.77	7.10	9.06	0.623	0.639	0.661	18.13	17.97	17.58
	2	12.24	14.79	17.89						
下凹式绿地	1	6.01	7.60	9.90	0.719	0.75	0.783	5.52	3.72	2.37
	2	14.76	18.03	21.90						
LID 组合	1	4.56	5.94	8.03	0.499	0.536	0.578	34.43	31.19	27.93
	2	9.96	12.50	16.17						

水”功能。②4 种方案的径流系数减少效果均随降雨重现期的增大而减少,主要是由于 LID 措施的滞蓄水能力有限,当降雨量随重现期增大而增大时,LID 措施的滞蓄水效果会逐渐减弱。③4 种方案径流系数减少比例从大到小依次是:LID 组合、雨水花园、渗透铺装、下凹式绿地。LID 组合总布设面积最大,因此径流系数减少比例最大,而雨水花园蓄水层较厚,蓄水能力强于渗透铺装,下凹式绿地削减径流系数能力不明显。在此基础上,计算单位布设面积的径流总量及径流系数,得出:雨水花园削减径流总量、径流系数的效果最佳,渗透铺装和 LID 组合方案次之,下凹式绿地效果不显著。

3.3 溢流节点数与地表蓄水深度

不同设计暴雨重现期下各布设方案的溢流节点数和地表蓄水深度模拟结果见表 5,其中溢流节点指管内积水深度超过排水管顶高程的节点,地表蓄水深度指降雨过程中地表植被及 LID 措施蓄水总量折算到全流域的水深。由表 5 可看出:①对比现状用地,4 种方案均能减少溢流节点数量,重现期为 1 年时尤为显著,在重现期为 2、5 年时 LID 组合方案仍有显著效果,单独布设方案效果一般。主要由于重现期较大的降雨产生的径流量远大于 LID 措施的滞蓄水能力,导致 LID 措施对减少溢流节点能力减弱。②4 种方案的地表蓄水深度较现状用地均能有明显增加,且均随重现期增大而增加。③从溢流节点减少以及增加地表蓄水深度来看,4 种方案的效

表 5 不同降雨重现期下各布设方案溢流节点数与地表蓄水深度模拟结果

LID 布设方案	溢流节点数量/个			地表蓄水深度/mm		
	P=1 a	P=2 a	P=5 a	P=1 a	P=2 a	P=5 a
现状用地	28	38	41	1.30	1.33	1.77
渗透铺装	5	29	40	5.84	6.46	7.58
雨水花园	8	30	36	10.72	12.59	15.63
下凹式绿地	7	31	40	2.29	2.56	3.40
LID 组合	0	5	24	15.03	17.67	21.47

果从大到小依次是:LID 组合方案、雨水花园、渗透铺装、下凹式绿地。

综上可知,渗透铺装、雨水花园、下凹式绿地均能够达到削减洪峰流量、滞后峰现时间、削减径流总量及增加地表蓄水量的目的,可有效提高城市地表蓄滞水量,减少市政排水管网的压力,并且 LID 措施对城市内涝的缓解效果在低重现期降雨时更为显著。在布设面积相同时,雨水花园能够起到较好的削减径流系数和洪峰流量作用,LID 组合方案则在削减及滞后洪峰效果上较明显。

4 结 论

随着城市化的快速发展,城市雨洪控制研究得到广泛重视。本文以典型城市化地区——广州市某小区为例,结合实测资料建立并率定 SWMM。通过模型模拟评估了不同重现期下不同 LID 措施对洪峰流量和径流总量的控制效果。结果表明:采用 4 种 LID 布设方案均能减少洪峰流量、径流总量以及径流系数,从而减小城市市政管网的排水压力,缓解城市内涝。其中雨水花园在削减径流系数和洪峰流量上有更好的效果,滞后洪峰效果不明显;LID 组合方案在削减洪峰流量和延后洪峰出现时间上效果比较显著,削减径流系数效果一般;渗透铺装单独布设的雨洪控制效果一般;下凹式绿地能起到一定滞后洪峰作用,对径流量削减效果不明显。由于 LID 措施自身滞蓄水能力的限制,在低重现期降雨时,对城市雨洪控制效果更显著。

参考文献:

[1] GRANT S B, SAPHORES J D, FELDMAN D L, et al. Taking the “waste” out of “waste water” for human water security and ecosystem sustainability[J]. Science,2012, 337(6095):681-686.

[2] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. Nature

- Climate Change, 2013(9):802-806.
- [3] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战 II: 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5):752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment II: urban stormwater modeling and management [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5):752-764 (in Chinese))
- [4] 许有鹏, 丁瑾佳, 陈莹. 长江三角洲地区城市化的水文效应研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(4):67-73. (XU Youpeng, DING Jinjia, CHEN Ying. Impacts of urbanization on hydrology in Yangtze River Delta [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(4):67-73. (in Chinese))
- [5] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战 I: 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4):594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment I: hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4):594-605 (in Chinese))
- [6] 孙艳伟, 王文川, 魏晓妹, 等. 城市化生态水文效应[J]. 水科学进展, 2012, 23(4):569-574. (SUN Yanwei, WANG Wenchuan, WEI Xiaomei, et al. Eco-hydrological impacts of urbanization [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(4):569-574 (in Chinese))
- [7] 崔广柏, 张其成, 湛忠宇, 等. 海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(2):1-4. (CUI Guangbo, ZHANG Qicheng, ZHAN Zhongyu, et al. Research progress and discussion of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):1-4. (in Chinese))
- [8] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1):79-97. (WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics [J]. China Soft Science, 2016(1):79-97. (in Chinese))
- [9] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 等. 雨水花园对暴雨径流的削减效果[J]. 水科学进展, 2015, 26(6):787-794. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Effect of rain gardens on storm runoff reduction [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6):787-794. (in Chinese))
- [10] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟对道路径流的水文控制效果研究[J]. 中国给水排水, 2016(3):118-122. (HUANG Junjie, SHEN Qingran, LI Tian. Study on hydrological effect of grass swales on road runoff [J]. China Water and Wastewater, 2016(3):118-122. (in Chinese))
- [11] 翟丹丹, 宫永伟, 张雪, 等. 简单式绿色屋顶雨水径流滞留效果的影响因素[J]. 中国给水排水, 2015(11):106-110. (ZHAI Dandan, GONG Yongwei, ZHANG Xue, et al. Influence factors of extensive green roof on stormwater runoff retention performance [J]. China Water and Wastewater, 2015(11):106-110. (in Chinese))
- [12] GUAN M, SILLANPAA N, KOIVUSALO H. Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland. [J]. Water Science & Technology, 2015, 71(10):1485-1491.
- [13] PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528:361-368.
- [14] 喻海军, 黄国如, 武传号. 基于 SWMM 模型的济南城市雨洪模拟研究[J]. 水资源研究, 2012, 1(6):433-439. (YU Haijun, HUANG Guoru, WU Chuanhao. Study on urban storm water modeling at Jinan City using SWMM model [J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(6):433-439. (in Chinese))
- [15] ZHU Z, CHEN Z, CHEN X, et al. Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems[J]. Science of the Total Environment, 2016, 553:1-12.
- [16] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.0 [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2010.
- [17] DAVID J R, JOHN C C, MICHAEL E D. Calibration and verification of SWMM for low impact development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51(3):746-757.
- [18] 邹霞, 宋星原, 张艳军, 等. 城市地表暴雨产流模型及应用[J]. 水电能源科学, 2014(3):10-14. (ZOU Xia, SONG Xingyuan, ZHANG Yanjun, et al. Research and application of rainstorm runoff yield model in urban surface [J]. Water Resources and Power, 2014(3):10-14. (in Chinese))
- [19] KEIFER C J, CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83(4):1-25.
- [20] KIBLER D F. Urban stormwater hydrology [M]. Washington D C: American Geophysical Union, 1982.
- [21] 建城函[2014]275号 海绵城市建设技术指南(试行)[S].
- [22] BURSZAADAMIAK E, MROWIEC M. Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM [J]. Water Science & Technology, 2013, 68(1):36-42.
- [23] QIN H P, LI Z X, FU G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129(18):577-585.

(收稿日期:2016-09-10 编辑:王 芳)