

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160260

# 基于 SWMM 情境模拟的外源雨水型公园绿地雨洪调控效果研究

林辰松  邵  明  葛韵宇  戈晓宇  
(北京林业大学园林学院)

**摘要:**公园绿地相对其他城建区拥有大面积的透水性下垫面,可以配合城市管网接纳外源雨水,有效地参与城市雨洪调控。本文以迁安市滨湖东路东侧绿化带为研究对象,对研究区域进行合理概化,并在区域内建立公园绿地的低影响开发(LID)模式和传统开发模式,根据项目要求引入外源雨水,运用 SWMM 模型模拟不同重现期(1 年一遇、2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇)1 h 降雨下的两种开发模式,对比分析排放口的径流总量、峰值流量和峰现时间,以及 2 年一遇 1 h 降雨下各单项 LID 设施对径流的调控效果。结果表明:1)SWMM 模型可以量化模拟 LID 设施对雨水径流的控制效果,为城市进行低影响开发建设提供技术支持和理论依据;2)在进行制定径流控制目标时,应结合场地现状情况,规划外源汇水面积;3) LID 设施对城市雨洪具有良好的调控效果,可以减少径流总量,降低径流峰值,推迟峰现时间。采用 LID 模式建设的外源雨水型公园绿地在 1 年一遇至 20 年一遇的降雨条件下,对径流总量的削减率为 100% ~ 37.69%,对峰值流量的削减率为 100% ~ 40.55%,峰值消失或出现时间迟滞 135 ~ 24 min。各项 LID 设施对径流总量削减的效率排序为:下沉式绿地 > 组合型 > 植草沟 > 生物滞留池 > 透水铺装;对峰值流量消减的效率排序为:下沉式绿地 > 组合型 > 生物滞留池 > 植草沟 > 透水铺装;对推迟洪峰出现时间的效率排序为:组合型 > 下沉式绿地 > 生物滞留池 > 植草沟 > 透水铺装。4)公园绿地在进行 LID 设计时,应考虑防灾避险等其他功能需求。

**关键词:**公园绿地; SWMM 情境模拟; 低影响开发; 外源雨水; 雨洪调控

**中图分类号:**UT982.29      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-1522(2016)12-0092-12

LIN Chen-song; SHAO Ming; GE Yun-yu; GE Xiao-yu. **Research of storm flood regulation efficiency of the low impact development of exogenous-rainwater park based on the SWMM simulation.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016) **38** (12) 92-103 [Ch, 14 ref.] School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Compared with other urban construction area, the park area has large well-drained underlying surface, which can work with the city pipe network to accept more exogenous rainwater and regulate the storm flood. This study generalizes the research area and constructs the low impact development (LID) model and traditional development model through a case study of Binhu East Road Park in Qianan City. The research introduces the exogenous rainwater and applies the storm water management model (SWMM) in 1 hour rainfall event with different return periods (once every 1, 2, 5, 10 and 20 years), simulating the regulative effect of two development models in total runoff, peak flow as well as time of peak flow appearance and the control efficiency of single LID facility under once 2-year 1 hour rainfall event. The results show that: 1) The SWMM model can stimulate the LID facilities' regulation of rainwater, and provide the technical supports and theory evidences for urban construction. 2) When setting goals of runoff regulation, we should plan the catchment sizes of exogenous-rainwater combined with the site current situation. 3) LID model has a good effect on storm flood regulation, can decrease the

收稿日期: 2016-08-13    修回日期: 2016-10-09  
**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-YL-01)、北京市共建项目(2016GJ-03)、北京市园林绿化局计划项目(SYJYY2015002)、云南云投生态环境科技股份有限公司科技项目(YTJS16R03)。  
**第一作者:** 林辰松,博士。主要研究方向:风景园林规划与设计。Email:tuberlmagnatum@hotmail.com    地址:100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。  
**责任作者:** 戈晓宇,博士,讲师。主要研究方向:风景园林规划与设计。Email:datou86604@163.com    地址:同上。  
**本刊网址:** http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

total runoff, peak flow and delay the time of peak flow occurrence significantly. Under the rainfall return periods from 1 to 20 years, the park construction based on the LID model can reduce total runoff, and peak flow by 100% - 37.69% and 100% - 40.55%, and eliminate the peak flow or delay the time of peak flow occurrence by 135 - 24 min, respectively. The efficiency of LID facilities decreasing total runoff ranked as: rain garden > combined system > vegetative swale > bio-retention cell > permeable pavement. The efficiency of LID facilities decreasing peak flow ranked as: rain garden > combined system > bio-retention cell > vegetative swale > permeable pavement. The efficiency of LID facilities to postpone the time of peak flow occurrence ranked as: combined system > rain garden > bio-retention cell > vegetative swale > permeable pavement. 4) When designing a low impact development park, we should consider other functional requirements such as disaster prevention.

**Key words** park green land; storm water management model (SWMM) situation simulation; low impact development (LID); exogenous rainwater; storm flood regulation

随着我国城市化进程的进一步加快,城市中下垫面的条件发生了很大的变化,硬质铺装的比例不断增大,从而引起城市在降雨后径流的产生速度加快,峰值流量加大,峰现时间提前等现象<sup>[1]</sup>。城市雨水控制系统滞后于城市发展,导致城市内涝频发,对人民群众的生命财产构成严重威胁<sup>[2]</sup>。有效控制降雨引起的城市内涝问题亟待解决,为此国家和地方相继发布了多项法规条例,同时新编和修订了多部相关规范和标准<sup>[3]</sup>，“海绵城市”的概念也应运而生。2013 年 12 月 12 日,习近平总书记在《中央城镇化工作会议》的讲话中强调:“提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来,优先考虑更多利用自然力量排水,建设自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市”<sup>[4]</sup>。海绵城市遵循顺应自然、与自然和谐共处的低影响发展模式,在一定程度上可称为低影响设计和低影响开发(Low impact design or development, LID)<sup>[5]</sup>。低影响开发是从基于宏观尺度景观控制的 BMPs 措施发展而来的,其理念由美国乔治省马里兰州环境资源署于 1990 年首次提出,主要是以分散式小规模措施对雨水径流进行源头控制<sup>[6]</sup>,可以有效缓解城市内涝、节约水资源、保护和改善城市生态环境。为有效开展海绵城市的建设,建设部发布了《海绵城市建设技术指南》,提出在城市开发建设过程中采用源头削减、中途转输、末端调蓄等多种手段,通过渗、滞、蓄、净、用、排等多种措施,实现城市良性水文循环,提高对径流雨水的渗透、调蓄、净化和利用能力,维持或恢复城市的“海绵”功能,并列举了包括透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地、雨水罐等多种 LID 设施,用于指导实践项目<sup>[7]</sup>。

由于城市建设项目设计与施工的不同时性,且实施后不易进行调整,因此,利用软件模型模拟 LID 设施在项目中的效果成为必然趋势。目前对 LID 进

行模拟的软件最常用的是 EPA SWMM 和 Hydro CAD,而以前者的应用最为广泛<sup>[8]</sup>。雨洪管理模型(SWMM)是美国环境保护署开发的一个基于水动力学的降雨—径流模拟模型<sup>[9]</sup>,包含了水文、水力、水质模块,它具备模拟城市降雨径流运动过程(包括地面径流和排水系统中的水流、雨洪的调蓄处理过程)和 BOD(生化需氧量或生化耗氧量, Biochemical Oxygen Demand)、COD(化学需氧量, Chemical Oxygen Demand)、总磷、总氮等 8 种污染物的迁移扩散等功能<sup>[10]</sup>。其最新版本 SWMM 5.1 在 LID 模块中设置了植草沟、屋顶截流设施、雨水罐、透水铺装、下渗沟、绿色屋顶、雨水花园、生物滞留单元 8 种 LID 技术设施,本研究通过对地块水文过程的模拟,针对径流量、峰值流量、峰现时间进行计算分析。

现阶段,我国对于低影响开发的研究大多集中于市政道路、住宅小区或城市区域规划,涉及公园绿地内容也多为定性研究,对于怎样定量分析公园绿地参与城市雨洪管理的研究少之又少。公园绿地因其具有大面积的透水性下垫面,完成源头消减并不是难题,如何配合城市管网,引入外源雨水,发挥中途传输和末端调蓄的功能才是难点。迁安在 2015 年被住建部、财政部、水利部 3 个部委确立为第一批海绵城市试点城市,成为华北地区仅有的 3 个试点城市之一,且是唯一的县级市。本文以迁安滨湖东路东侧绿化带为研究区域,该项目为迁安市第一个海绵城市绿地项目,由北京林业大学园林学院与北林地景设计院合作完成设计。根据现状水文和雨水管网规划资料,引入城市管网中外源雨水,构建研究区传统开发模式和低影响开发模式的 SWMM 模型,模拟不同重现期下研究区域的雨洪调控效果,并对比各单项 LID 设施的控制效果。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域概况

迁安市位于河北省东北部,燕山南麓,滦河岸边,地理坐标为  $118^{\circ}37' \sim 118^{\circ}55'E, 39^{\circ}51' \sim 40^{\circ}15' N$ 。迁安地处暖温带,属于半湿润、季风性大陆气候,冷热干湿四季分明,冬季受西伯利亚和内蒙古冷空气影响,干冷少雨;夏季受太平洋高压影响,湿热多雨,多年平均降水量 649 mm,降雨量主要集中于夏季,汛期(6—9 月)径流占全年 80% 以上,对城市内涝造成极大压力。本文选取迁安市滨湖东路东侧绿化带作为研究区域。区域位于迁播公路东侧,阜安大路以西,紧邻商业、居住、科研教育用地,地势延绿化带长轴方向呈西北高东南低,总面积 25.16  $hm^2$ 。根据迁安海绵城市上位规划,此区域作为公园绿地,须承接消纳周边 3 块共 106.32  $hm^2$  城市建成区(见图 1)的雨水径流,径流通过雨水管网,经初期弃流,分别从北部(汇水区 1)、中部(汇水区 2、3)两处接入,顺地势流经整个公园绿地,最后溢流排回市政管网。

工程地质勘查显示,土壤表层为人工素填土,杂色,松散,主要由卵砾石、砂及少量黏性土组成,厚度



图 1 外源雨水区位图  
Fig. 1 Location of exogenous rainwater area

约为 0.50 m,渗透系数约为  $8.3 \times 10^{-6} m/s$ ;第 2 层为卵石层,杂色,稍密—中密,主要由岩浆岩、变质岩碎块组成,填充物为砂砾及砾石,渗透系数约为  $1.38 \times 10^{-4} m/s$ ,地下水位埋深 1.8~3.4 m。

## 1.2 研究区域概化

依据研究区域的地形特征以及周边城市管网的分布,遵循概化原则,将研究区域划分为 25 个汇水区和 58 个子汇水区,排水管网管段 2 段,末端出水口 1 个,划分结果如图 2 所示。

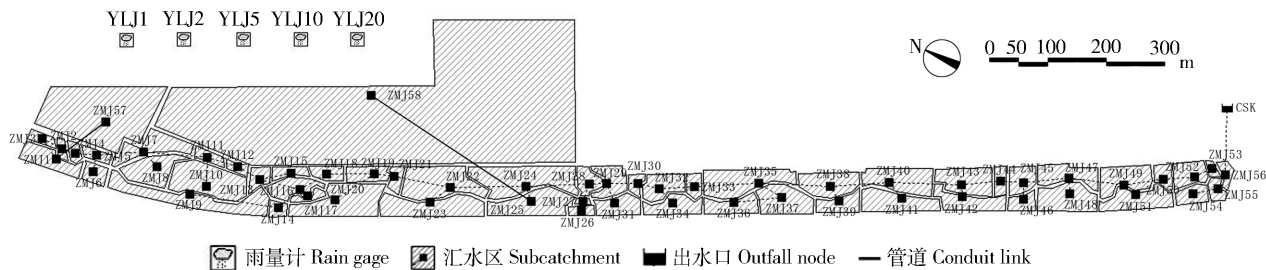


图 2 研究区域概化图  
Fig. 2 Generalized map of study area

## 1.3 模型建立

### 1.3.1 低影响开发模型构建

研究区域低影响开发的设计思路为:采用源头消减—中途传输—末端调蓄的径流排放体系(见图 3),引入外源雨水,因地制宜且最大限度地布置透水铺装、植草沟、下沉式绿地、生物滞留池、雨水罐等 LID 设施,同时在保证公园绿地功能性、景观性、科普性的前提下,实现雨水渗透、传输、净化、储存和回用的目标。区域内各类用地的面积比率根据《公园设计规范》建议,综合考虑区域现状条件进行设计,最终方案平面和 LID 设施布置如图 4、图 5 所示,经

济技术指标见表 1。

### 1.3.2 传统开发模型构建

构建传统开发模式,径流排放体系为绿地—铺装—水体—市政管网(见图 6),同时满足公园的景观性与功能性。区域内绿地、铺装面积比与低影响开发模型中的面积比率设置相同。

## 1.4 模块参数设置

结合研究区域土壤特性和模型原理,分别对硬质铺装和绿地两大类下垫面进行模拟。降水下渗选用 Horton 模型,根据种植土壤特性,最大入渗速率为 76.2 mm/h,最小入渗速率为 3.3 mm/h,衰减常



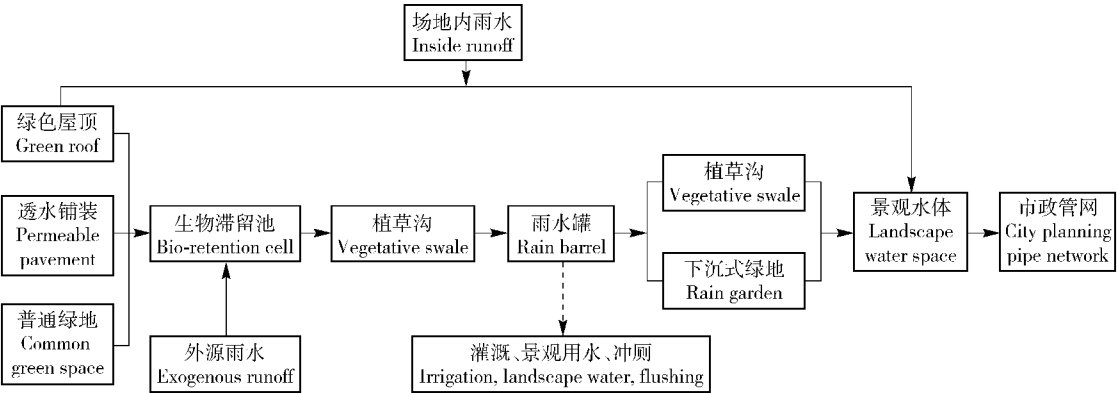


图 3 低影响开发模式雨水排放路径

Fig. 3 Drainage path of runoff in low impact development model



图 4 迁安市滨湖东路东侧绿化带平面图

Fig. 4 Master plan of Binhu East Road Park in Qianan City

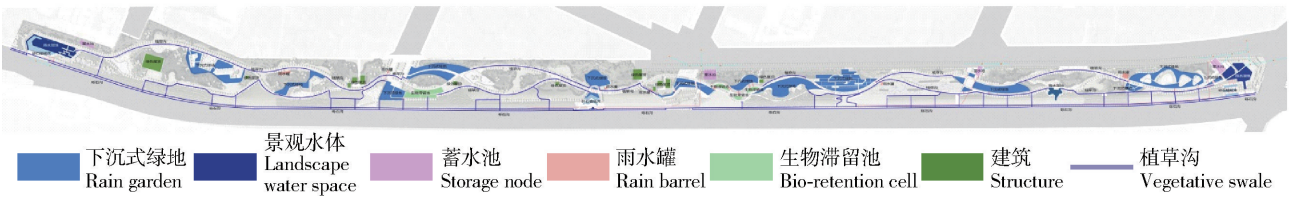


图 5 LID 设施布置平面图

Fig. 5 Plane graph of LID control arrangement

表 1 低影响开发模式经济技术指标

Tab. 1 Economic and technical index table of low impact development (LID) model

项目 Item	子项目 Subitem	工程量 Engineering quantity	总量 Total	比例 Proportion/%
绿地 Green space	普通绿地 Common green space	183 569. 2 m <sup>2</sup>	217 105 m <sup>2</sup>	86. 28
	植草沟 Vegetative swale	3 082. 8 m <sup>2</sup>		
	生物滞留池 Bio-retention cell	2 592 m <sup>2</sup>		
	下沉式绿地 Rain garden	27 861 m <sup>2</sup>		
雨水罐 Rain barrel	雨水罐 Rain barrel	4 984 m <sup>3</sup>	4 984 m <sup>3</sup>	
水体 Water space	景观水体 Landscape water space	4 207 m <sup>2</sup>	4 207 m <sup>2</sup>	1. 67
建筑 Structure	新建建筑 New structure	240 m <sup>2</sup>	2 395 m <sup>2</sup>	0. 95
	现状建筑 Current structure	2 155 m <sup>2</sup>		
道路广场 Path and square	透水铺装 Permeable pavement	20 461 m <sup>2</sup>	27 907 m <sup>2</sup>	11. 09
	不透水铺装 Impermeable pavement	7 446 m <sup>2</sup>		
合计 Total			251 614 m <sup>2</sup>	100

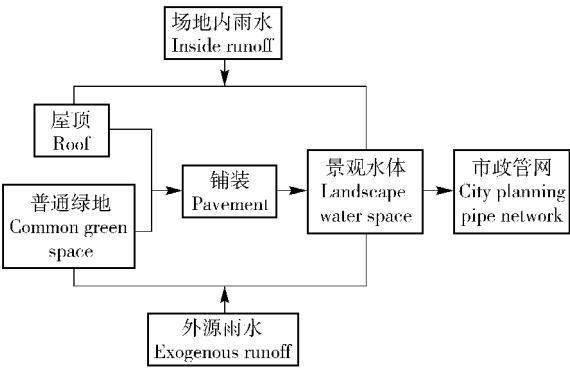


图 6 传统开发模式雨水排放路径

Fig. 6 Drainage path of runoff by traditional development model

数为  $4\text{ h}^{-1}$ ;地表径流模拟采用非线性水库模型,管道传输系统采用运动波方程<sup>[11]</sup>;各项参数综合参考模型用户手册中的典型值及相关文献,并根据场地地质勘察报告和施工方案设计的不同下垫面进行设定。不透水铺装、普通绿地和雨水管道的曼宁系数分别取 0.011、0.6 和 0.013,面积及坡度依据实施方案进行设定。下沉式绿地、植草沟、生物滞留池、透水铺装(透水砖和透水沥青)和雨水罐 5 项

LID 设施通过 SWMM 中 LID 控制器提供的模型种类,分别进行定义,具体参数见表 2。由于研究区域面积较小、且情况复杂,故 LID 设施的布置方式采用场地层布置,将 LID 设施设置为一个独立的子集水区,用子汇水区的属性参数来表达 LID 设施并将定义好的 LID 设施在子汇水区范围内满覆盖<sup>[12]</sup>。

外源雨水场地通过 ZMJ57 和 ZMJ58 两个子汇水区进行概化,其汇水分别通过管道连接至 ZMJ1 和 ZMJ25 进入公园绿地。外源雨水场地用地性质共分为公园绿地、二类居住用地、文化设施用地、商业设施用地、教育科研用地、交通场站用地、城市道路用地 7 类。根据《城市绿化规划建设指标的规定》,在此 7 类用地中选择绿化率要求的最低值,计算得出外源雨水场地的参数值(见表 3)。

2 结果与分析

根据设定好的 SWMM 模型,模拟不同降雨条件下,低影响开发模式和传统开发模式对区域径流总量、峰值流量和峰现时间的调控效果,以及各单项 LID 设施的径流控制效率。

表 2 LID 设施参数表

Tab. 2 Table of parameters of LID controls

下沉式绿地 Rain garden(生物滞留池 Bio-retention cell)							植草沟 Vegetative swale		
表面 Surface		土壤 Soil		蓄水 Water storage		暗渠 Drain		表面 Surface	
蓄水深度 Berm height	500 mm	厚度 Thickness	300 mm	厚度 Thickness	2 000 mm	排水系数 Flow coefficient	0	蓄水深度 Berm height	300 mm
植被覆盖 Vegetation volume fraction	0.15 (0.5)	孔隙率 Porosity ( volume fraction)	0.463	孔隙比 Void ratio ( voids/solids)	0.75	排水指数 Flow exponent	0	植被覆盖 Vegetation volume fraction	0.2
表面粗糙系数 Surface roughness ( Mannings <i>n</i> )	0.4 (0.8)	产水能力 Field capacity ( volume fraction)	0.232	渗透率 Seepage rate	500 mm/h	暗渠偏移高度 Offset height	0	表面粗糙系数 Surface roughness ( Mannings <i>n</i> )	0.3
表面坡度 Surface slope ( percent)	0.3	枯萎点 Wilting point ( volume fraction)	0.116	堵塞因子 Clogging factor	0			表面坡度 Surface slope ( percent)	0.3
		导水率 Conductivity	3.3 mm/h					洼地边坡 Swale side slope( run/rise)	4
		导水率坡度 Conductivity slope	10						
		吸水头 Suction head	88.9 mm						

表 2( 续)

透水沥青( 透水砖) Permeable asphalt( Permeable brick)							
表面 Surface		路面 Pavement		蓄水 Water storage		暗渠 Drain	
蓄水深度 Berm height	5 mm	厚度 Thickness	150( 60) mm	厚度 Thickness	300( 250) mm	排水系数 Flow coefficient	0
植被覆盖 Vegetation volume fraction	0	孔隙比 Void ratio ( voids/solids)	0. 25( 0. 21)	孔隙比 Void ratio ( voids/solids)	0. 5	排水指数 Flow exponent	0
表面粗糙系数 Surface roughness ( Mannings <i>n</i> )	0. 011 ( 0. 014)	不渗透表面 Impervious surface fraction	0	渗透率 Seepage rate	250 mm/h	暗渠偏移高度 Offset height	0
表面坡度 Surface slope ( percent)	0. 3	渗透性 Permeability	800 mm/h	堵塞因子 Clogging factor	0		
		堵塞因子 Clogging factor	0				

表 3 外源雨水场地概化参数

Tab. 3 Generalized parameters of exogenous rainwater area

子汇水区 编号 Sub-catchment no.	公园绿 地/hm <sup>2</sup> Park green land/ha	二类居住 用地/hm <sup>2</sup> Second class residential land/ha	文化设施 用地/hm <sup>2</sup> Cultural facility land/ha	商业设施 用地/hm <sup>2</sup> Commercial facility land/ha	教育科研 用地/hm <sup>2</sup> Education and research land/ha	交通场站 用地/hm <sup>2</sup> Transporta- tion land/ha	城市道路 用地/hm <sup>2</sup> Urban road land/ha	总面积/ hm <sup>2</sup> Total area/ha	绿地面 积/hm <sup>2</sup> Green space/ha	渗透 百分比 Permeation percentage
ZMJ57	9. 81	14. 91	2. 46				13. 06	40. 23	14. 15	0. 35
ZMJ58	5. 73	24. 19	0. 61	8. 64	8. 69	0. 41	17. 82	66. 09	19. 00	0. 29

注:根据建设部《城市绿化规划建设指标的规定》,公园绿地、二类居住用地、文化设施用地、商业设施用地、教育科研用地、交通场站用地、城市道路用地的绿化率分别不得小于 70%、30%、35%、20%、35%、20%、15%。Notes: According to the Ministry of Construction, *Regulation for index of urban green space planning and construction*, green space in park land, second class residential land, cultural facility land, commercial facility land, education and research land, transportation land, urban road land shall not be less than 70%, 30%, 35%, 20%, 35%, 20% and 15%.

2.1 设计降雨选择

通过迁安市暴雨强度公式,分别计算设计重现期为 1、2、5、10、20 年的降雨量,得到结果分别为 30. 92、40. 20、52. 47、61. 75、71. 03 mm。依照迁安市海绵城市建设上位规划,研究区域在引入外源雨水后,需满足 1 h 场降雨 42. 6 mm 时不产生径流外

排,与设计重现期为 2 年的降雨量 40. 20 mm 相近,故用此降雨量来模拟是否达到设计目标。

设计雨型选用芝加哥降雨型,降雨历时为 1 h,雨峰相对位置为 0. 4。不同降雨强度下的 1 h 降雨时程分布见表 4。

表 4 不同降雨强度下的 1 h 降雨时程分布

Tab. 4 Distribution of one hour rainfall under different rainfall intensities

	mm·min <sup>-1</sup>				
时间步长 Time step/min	1 年一遇 Once 1-year	2 年一遇 Once 2-year	5 年一遇 Once 5-year	10 年一遇 Once 10-year	20 年一遇 Once 20-year
1	0. 19	0. 25	0. 31	0. 38	0. 44
2	0. 20	0. 26	0. 32	0. 40	0. 46
3	0. 21	0. 27	0. 33	0. 42	0. 48
4	0. 21	0. 28	0. 34	0. 43	0. 49
5	0. 22	0. 29	0. 35	0. 45	0. 51
6	0. 23	0. 30	0. 37	0. 47	0. 54
7	0. 25	0. 32	3. 87	0. 49	0. 56
8	0. 26	0. 33	0. 41	0. 51	0. 59
9	0. 27	0. 35	0. 43	0. 54	0. 62
10	0. 28	0. 37	0. 45	0. 57	0. 65

表 4( 续 )

时间步长	1 年一遇	2 年一遇	5 年一遇	10 年一遇	20 年一遇
Time step/min	Once 1-year	Once 2-year	Once 5-year	Once 10-year	Once 20-year
11	0. 30	0. 39	0. 48	0. 60	0. 69
12	0. 32	0. 42	0. 51	0. 64	0. 74
13	0. 34	0. 44	0. 54	0. 68	0. 79
14	0. 37	0. 48	0. 58	0. 73	0. 85
15	0. 40	0. 52	0. 63	0. 79	0. 91
16	0. 43	0. 56	0. 69	0. 86	1. 00
17	0. 48	0. 62	0. 75	0. 95	0. 98
18	0. 53	0. 69	0. 84	1. 06	1. 22
19	0. 60	0. 77	0. 94	1. 19	1. 37
20	0. 68	0. 89	1. 08	1. 36	1. 57
21	0. 80	1. 04	1. 26	1. 59	1. 84
22	0. 96	1. 25	1. 52	1. 92	2. 21
23	1. 20	1. 57	1. 91	2. 40	2. 77
24	1. 60	2. 08	2. 53	3. 19	3. 68
25	2. 32	3. 02	3. 68	4. 64	5. 34
26	1. 79	2. 32	2. 83	3. 57	4. 11
27	1. 44	1. 88	2. 29	2. 88	3. 32
28	1. 20	1. 57	1. 91	2. 40	2. 77
29	1. 03	1. 34	1. 63	2. 06	2. 37
30	0. 90	1. 17	1. 43	1. 80	2. 07
31	0. 80	1. 04	1. 26	1. 59	1. 84
32	0. 72	0. 93	1. 14	1. 43	1. 65
33	0. 65	0. 85	1. 03	1. 30	1. 50
34	0. 60	0. 77	0. 94	1. 19	1. 37
35	0. 55	0. 71	0. 87	1. 10	1. 26
36	0. 51	0. 66	0. 81	1. 02	1. 17
37	0. 48	0. 62	0. 75	0. 95	1. 10
38	0. 45	0. 58	0. 71	0. 89	1. 03
39	0. 42	0. 55	0. 67	0. 84	0. 97
40	0. 40	0. 52	0. 63	0. 79	0. 91
41	0. 38	0. 49	0. 60	0. 75	0. 87
42	0. 36	0. 47	0. 57	0. 72	0. 82
43	0. 34	0. 44	0. 54	0. 68	0. 79
44	0. 33	0. 43	0. 52	0. 65	0. 75
45	0. 31	0. 41	0. 50	0. 63	0. 72
46	0. 30	0. 39	0. 48	0. 60	0. 69
47	0. 29	0. 38	0. 46	0. 58	0. 67
48	0. 28	0. 36	0. 44	0. 56	0. 64
49	0. 27	0. 35	0. 43	0. 54	0. 62
50	0. 26	0. 34	0. 41	0. 52	0. 60
51	0. 25	0. 33	0. 40	0. 50	0. 58
52	0. 24	0. 32	0. 39	0. 49	0. 56
53	0. 24	0. 31	0. 38	0. 47	0. 55
54	0. 23	0. 30	0. 36	0. 46	0. 53
55	0. 22	0. 29	0. 35	0. 45	0. 51
56	0. 22	0. 28	0. 35	0. 43	0. 50
57	0. 21	0. 28	0. 34	0. 43	0. 49
58	0. 21	0. 27	0. 33	0. 41	0. 48
59	0. 20	0. 26	0. 32	0. 40	0. 46
60	0. 20	0. 26	0. 31	0. 39	0. 45
总计 Total	30. 92	40. 20	52. 47	61. 75	71. 03

2.2 结果与讨论

在重现期分别为 1、2、5、10、20 年的设计降雨，降雨历时 1 h、模拟时间 6 h，研究区域低影响开发模式和传统开发模式下，外源雨水的径流情况见图 7~11；末端出水口的径流情况见图 12~16，径流总量、峰值流量和峰现时间见表 5、图 17；各 LID 设施对径流的调控效果见表 6。

1) 根据表 5 可得，外源雨水径流总量在 1 年一遇、2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇及 20 年一遇时分别是 21 600、29 380、40 490、49 280、58 280 m<sup>3</sup>，经过公园绿地后，末端出水口径流量均有减小；对比

图 7~16 可以发现，外源雨水通过公园绿地的调控，峰值流量减小，峰现时间推后。公园绿地采取传统开发模式或低影响开发模式，均可以有效地吸纳外源雨水，起到调控的作用。逐级查看各子汇水区径流控制情况，可发现传统开发模式下的公园绿地主要依靠景观水体的调蓄和绿地的下渗，而低影响开发模式下的公园绿地则主要靠景观水体调蓄和 LID 设施的作用。

2) 根据海绵城市上位规划，研究区域在接入外源雨水后应满足 1 h 场降雨 42.6 mm 时径流不外排的要求。根据表 5 可以看出，2 年一遇(40.20 mm)降

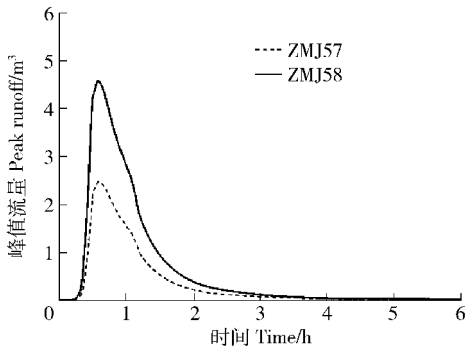


图 7 1 年一遇 1 h 降雨外源雨水径流曲线

Fig. 7 Exogenous runoff curve of once 1-year 1 hour rainfall event

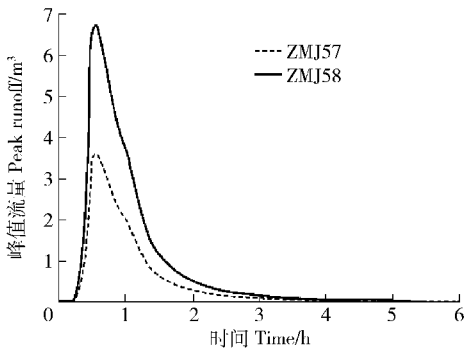


图 8 2 年一遇 1 h 降雨外源雨水径流曲线

Fig. 8 Exogenous runoff curve of once 2-year 1 hour rainfall event

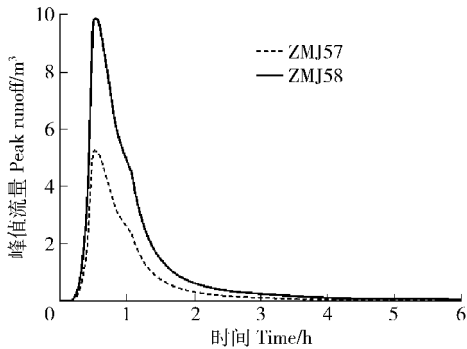


图 9 5 年一遇 1 h 降雨外源雨水径流曲线

Fig. 9 Exogenous runoff curve of once 5-year 1 hour rainfall event

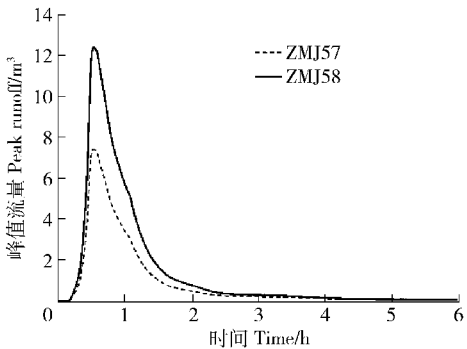


图 10 10 年一遇 1 h 降雨外源雨水径流曲线

Fig. 10 Exogenous runoff curve of once 10-year 1 hour rainfall event

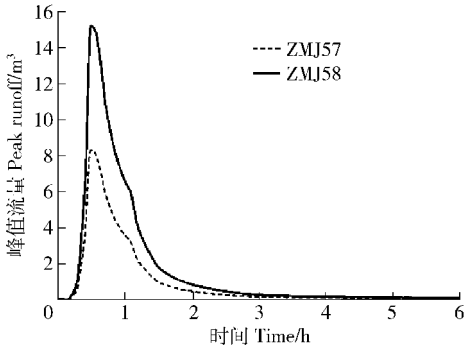


图 11 20 年一遇 1 h 降雨外源雨水径流曲线

Fig. 11 Exogenous runoff curve of once 20-year 1 hour rainfall event

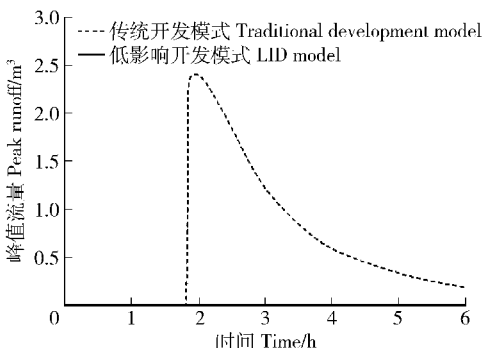


图 12 1 年一遇 1 h 降雨出口径流曲线

Fig. 12 Runoff curve of once 1-year 1 hour rainfall event



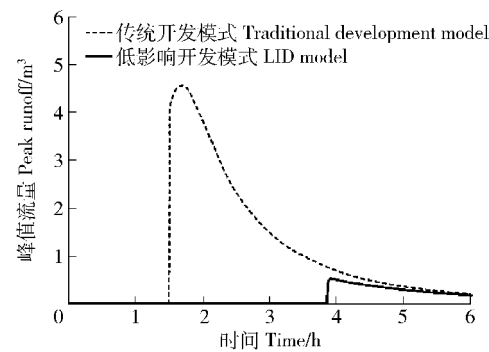


图 13 2 年一遇 1 h 降雨出口径流曲线

Fig. 13 Runoff curve of once 2-year 1 hour rainfall event

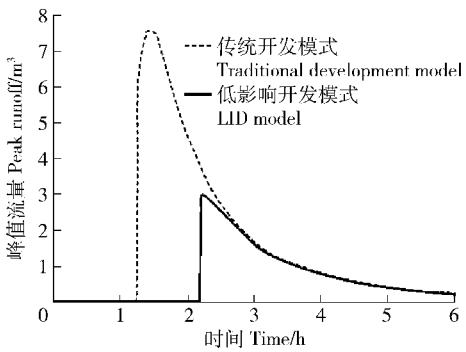


图 14 5 年一遇 1 h 降雨出口径流曲线

Fig. 14 Runoff curve of once 5-year 1 hour rainfall event

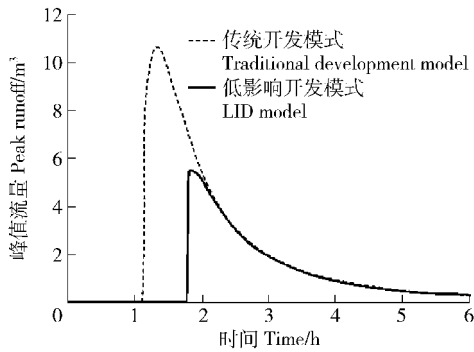


图 15 10 年一遇 1 h 降雨出口径流曲线

Fig. 15 Runoff curve of once 10-year 1 hour rainfall event

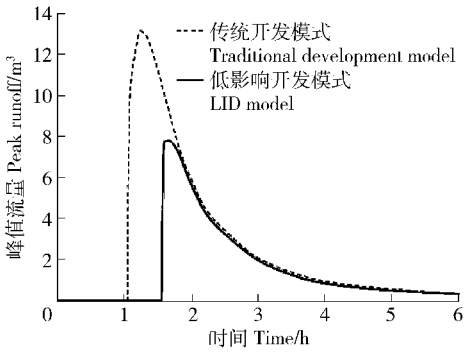


图 16 20 年一遇 1 h 降雨出口径流曲线

Fig. 16 Runoff curve of once 20-year 1 hour rainfall event

表 5 不同降雨强度下的出水口径流量模拟结果

Tab. 5 Simulated results of the runoff under different rainfall intensities

模拟项目 Simulation item	1 年一遇 1 h Once 1-year, 1 hour			2 年一遇 1 h Once 2-year, 1 hour			5 年一遇 1 h Once 5-year, 1 hour		
	低影响开 发模式 LID model	传统开发模式 Traditional development model	差值 Difference value	低影响开 发模式 LID model	传统开发模式 Traditional development model	差值 Difference value	低影响开 发模式 LID model	传统开发模式 Traditional development model	差值 Difference value
外源径流总量 Exogenous runoff/m <sup>3</sup>		21 600			29 380			40 490	
径流总量 Total runoff/m <sup>3</sup>	0	13 030	13 030	2 570	22 190	19 620	14 950	35 450	20 500
峰值流量 Peak flow/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0	2. 31	2. 31	0. 54	4. 37	3. 82	3. 02	7. 56	4. 56
峰现时间 Time of peak flow occurrence/min	消失 Elimination	118		234	99	135	133	86	46

模拟项目 Simulation item	10 年一遇 1 h Once 10-year, 1 hour			20 年一遇 1 h Once 20-year, 1 hour		
	低影响开 发模式 LID model	传统开发模式 Traditional development model	差值 Difference value	低影响开 发模式 LID model	传统开发模式 Traditional development model	差值 Difference value
外源径流总量 Exogenous runoff/m <sup>3</sup>		49 280			58 280	
径流总量 Total runoff/m <sup>3</sup>	24 980	45 950	20 970	35 350	56 730	21 380
峰值流量 Peak flow/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	5. 29	10. 26	4. 96	7. 80	13. 12	5. 32
峰现时间 Time of peak flow occurrence/min	110	80	30	99	75	24

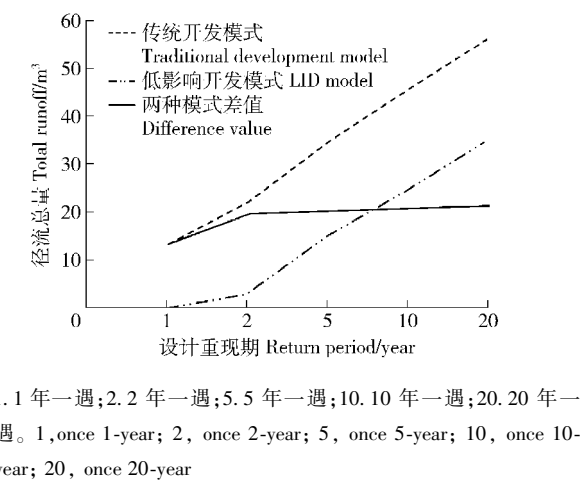


图 17 不同降雨强度下的径流总量曲线

Fig. 17 Runoff curve under different rainfall intensities

雨条件下,末端出水口已产生径流,所以设计并未达标。因现状场地内存留多条地下管线和不可拆迁的建筑,又须最大限度地保留现状乔木,方案设计在保证景观效果和预算要求的前提下,已尽可能多地增加 LID 设施的面积,径流控制量上基本已达到饱和值,所以应与上位规划进行协调,适当减少外源雨水的汇水面积。

3)由表 5 可以看出:添加了低影响开发设施后,研究区域出水口 1 年一遇、2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇的径流总量分别减少 100%、88.42%、57.83%、45.64%、37.69%;峰值流量分别减少 100%、87.41%、60.32%、48.34%、40.55%;峰现时间分别为峰值消失,延迟 135、46、30、24 min。由模拟结果可以得出,LID 设施具有削峰减量、迟滞

表 6 不同 LID 设施 2 年一遇 1 h 降雨强度下的径流量模拟结构

Tab. 6 Simulated results of the runoff of different LID controls under once 2-year 1 hour rainfall event

LID 设施种类 Type of LID facilities	面积比 Area ratio	径流总量 Total runoff/m <sup>3</sup>	径流消减量 Reduction in total runoff/m <sup>3</sup>	单位公顷面积径流消减量 Reduction in total runoff per ha/m <sup>3</sup>	峰值流量 Peak flow/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	峰值消减量 Reduction in peak flow/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	单位公顷面积峰值消减量 Reduction in peak flow per ha/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	峰现时间 Time of peak flow occurrence/min	峰现时间差 Reduction in time of peak flow occurrence/min	单位公顷面积峰现时间差 Reduction in time of peak flow occurrence per ha/min
无 LID 设施 No LID facilities		22 190			4.37			99		
下沉式绿地 Rain garden	11.07%	8 920	13 270	4 762.93	1.59	2.77	0.99	155	56	20.11
植草沟 Vegetative swale	1.23%	21 550	640	2 076.03	4.27	0.09	0.29	100	1	3.23
生物滞留池 Bio-retention cell	1.03%	21 740	450	1736.11	4.23	0.13	0.50	101	2	7.72
透水铺装 Permeable pavement	8.13%	21 530	660	322.56	4.25	0.12	0.06	100	1	0.49
雨水罐 Rain barrel	4 984 m <sup>3</sup>	17 380	4 810		3.83	0.54		106	7	
组合 LID 设施 Combination of LID facilities	21.46%	2 670	19 520	3 615.06	0.60	3.76	0.70	232	133	24.63

洪峰的作用,但是随着重现期的增大和降雨强度的上升,径流削减效率会随之减小。此结果与李家科等<sup>[13]</sup>对雨水花园调节控制城市雨水径流效果的模拟结果一致,其设计模型中雨水花园占总用地面积的 2%,在 2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇和 20 年一遇的降水条件下,总径流量削减超过 25.69%,洪峰迟滞时间能达到 5~7 min。根据图 17 可以看出,在降雨强度上升到一定程度时,削减量曲线的曲率趋于平稳,各项 LID 设施均很快进入饱和状态,低影响

开发模式对径流的控制能力也趋近于最大限度。

4)选取在 2 年一遇 1 h 降雨强度下,针对研究区域,对下沉式绿地、植草沟、生物滞留池、透水铺装、雨水罐各单项 LID 设施进行模拟,得到结果见表 6。从表 6 可以看出:各项 LID 设施均对径流总量、峰值流量产生了消减作用,使峰现时间延迟;对峰值流量的消减和峰现时间的推迟均是组合型大于单项之和,但对径流总量的削减却是组合型小于单项之和。其原因因为外源雨水在进入公园绿地后,组合

LID 设施对径流的迟滞作用使下游段的 LID 设施不能尽早满负荷地下渗,导致下沉式绿地、植草沟、生物滞留池的下渗量在组合时均比单项时的值小。在单位面积相同时,各项 LID 设施对径流总量削减的效率排序为:下沉式绿地 > 组合型 > 植草沟 > 生物滞留池 > 透水铺装;对峰值流量消减的效率排序为:下沉式绿地 > 组合型 > 生物滞留池 > 植草沟 > 透水铺装;对于推迟洪峰出现时间的效率排序为:组合型 > 下沉式绿地 > 生物滞留池 > 植草沟 > 透水铺装。此结果与熊赞等<sup>[14]</sup>对深圳市某项目低影响开发设施的雨洪效果研究结果有所不同,其论文中单项 LID 设施削减地表径流总量与峰值流量的总和均大于组合时的削减量,因为其所研究区域下垫面主要为建筑屋顶及铺装,绿地等下渗功能强的 LID 设施面积均较小,而本文研究区域为狭长型公园绿地,并引入了外源雨水,对 LID 设施的参数设定也不尽相同,所以得出了不同的研究结果。

### 3 结 论

1)SWMM 模型可以量化模拟 LID 设施对雨水径流的控制效果,为城市进行低影响开发建设提供技术支持和理论依据。其可以很好地模拟公园绿地,并实现有外源雨水接入模型的设计,从计算数据来看,模型模拟效果良好,在迁安地区具有较好的适应性。工程实施时在研究区域的入水口和出水口均设置了流量计和液位计,用以监控实际结果,LID 设施的实际效果仍有待后续现场试验的验证。

2)在进行规划径流控制目标时,易出现未详细考虑场地现状的情况,所以针对外源雨水型公园绿地,在规划外源的汇水面积时,应结合场地详细情况进行划定,并在方案设计过程中进行调整修改,来保证径流控制目标的实现。

3)LID 设施对城市雨洪具有良好的调控效果,可以减少径流总量,降低径流峰值,推迟峰现时间。采用低影响开发模式建设的外源雨水型公园绿地在 1 年一遇至 20 年一遇的降雨条件下,对径流总量的削减率为 100% ~ 37.69%,对峰值流量的削减率为 100% ~ 40.55%,峰值消失或出现时间迟滞 135 ~ 24 min。在公园绿地中引入外源雨水的情况下,单位面积相同时,各项 LID 设施对径流总量削减的效率排序为:下沉式绿地 > 组合型 > 植草沟 > 生物滞留池 > 透水铺装;对峰值流量消减的效率排序为:下沉式绿地 > 组合型 > 生物滞留池 > 植草沟 > 透水铺装;对推迟洪峰出现时间的效率排序为:组合型 > 下沉式绿地 > 生物滞留池 > 植草沟 > 透水铺装。

4)公园绿地在进行低影响开发设计时,将大面

积绿地进行下凹设计,减少了平整绿地的面积。公园绿地是城市防灾避险体系的重要组成部分,支离破碎的绿地、易于汇水的地形致使公园内大量缺失适宜进行防灾避险的场所。所以在进行低影响开发设计时,并不应一味地追求最大面积的下沉空间,同时也应考虑防灾避险等其他功能需求,保证公园绿地各项基本功能的实现。

### 参 考 文 献

- [1] 张倩,苏保林,袁军营.城市居民小区 SWMM 降雨径流过程模拟;以营口市贵都花园小区为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(3):276-281.  
ZHANG Q, SU B L, YUAN J Y. Simulating rainfall-runoff in urban residential area based on SWMM [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(3):276-281.
- [2] 李霞,石宇亭,李国金.基于 SWMM 和低影响开发模式的老城区雨水控制模拟研究[J].给水排水,2015,51(5):152-156.  
LI X, SHI Y T, LI G J. Simulation study on stormwater controlling system of the old town based on SWMM and LID [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(5):152-156.
- [3] 王文亮,李俊奇,车伍,等.城市低影响开发雨水控制利用系统设计方法研究[J].中国给水排水,2014,30(24):12-17.  
WANG W L, LI J Q, CHE W, et al. Study on design method of urban stormwater management and utilization system based on low impact development [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24):12-17.
- [4] 车生泉,谢长坤,陈丹,等.海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J].中国园林,2015,31(6):11-15.  
CHE S Q, XIE C K, CHEN D, et al. Development and constructive approaches for theories and technologies of sponge city system[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(6):11-15.
- [5] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].给水排水,2015,51(3):1-7.  
QIU B X. The connotation, pathway and expectation of LID [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(3):1-7.
- [6] 车伍,吕放放,李俊奇,等.发达国家典型雨洪管理体系及启示[J].中国给水排水,2009,25(20):12-17.  
CHE W, LÜ F F, LI J Q, et al. Typical storm water and flood management systems in developed countries and their inspiration [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(20):12-17.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Sponge guide urban construction technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [8] 孙艳伟,魏晓妹,POMEROY C A.低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J].水科学进展,2011,22(2):287-293.  
SUN Y W, WEI X M, POMEROY C A. Review of current research and future directions of low impact development practices for storm water [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2):287-293.
- [9] 宋翠萍,王海潮,唐德善.暴雨洪水管理模型 SWMM 研究进展

及发展趋势[J]. 中国给水排水,2015, 31(16):16-20.

SONG C P, WANG H C, TANG D S. Research progress and development trend of storm water management model[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(16):16-20.

[10] 蔡凌豪. 适用于“海绵城市”的水文水力模型概述[J]. 风景园林,2016, 32(2):33-43.

CAI L H. Introduction of hydrological and hydraulic models for ‘Sponge City’[J]. Landscape Architecture,2016, 32(2):33-43.

[11] 张明亮,沈永明,沈丹. 城市小区雨水管网非恒定数学模型的对比研究[J]. 水力发电学报,2007,26(5):80-85.

ZHANG M L, SHEN Y M, SHEN D. Contrast study of unsteady flow mathematical model for rain pipeline networks of urban drainage system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5):80-85.

[12] 王文亮,李俊奇,宫永伟,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水,2012, 28(21):42-44.

WANG W L, LI J Q, GONG Y W, et al. LID stormwater control effect simulation based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21):42-44.

[13] 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 J K, LI Y, SHEN B, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4):60-67.

[14] 熊赆,李子富,胡爱兵,等. 某低影响开发公共建筑雨洪效应的 SWMM 模拟与评估[J]. 给水排水,2015,51(增刊1):282-285.

XIONG Y, LI Z F, HU A B, et al. Storm-water effect simulation and assessment of LID facilities application in public building based on SWMM[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015,51(Suppl.1):282-285.

(责任编辑 冯秀兰  
责任编辑 李 雄)