

深圳民治河流域低影响开发措施水文效应评估

黄国如^{1,2}, 李碧琦¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 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)

摘要: 低影响开发措施为一类较为有效的城市雨洪管理方法,在海绵城市建设中应用较为广泛。为评估其水文效应,以深圳民治河流域为研究区域,构建 SWMM 城市雨洪模型,设计 3 种 LID 措施方案,分别计算不同重现期降雨情形下 3 种 LID 措施实施前后的径流过程。结果表明:透水铺装和下凹式绿地等 LID 措施均对峰现时间有一定的延迟作用,对洪峰流量和径流量均有不同程度的削减效果,且洪峰流量和径流量的削减率均随着降雨重现期增大而减少,透水铺装和下凹式绿地两者的组合实施可以更好地发挥控制径流作用。

关键词: SWMM 模型; 低影响开发措施; 水文效应; 透水铺装; 下凹式绿地

中图分类号:TV213.4; TU992

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)03-0001-06

Hydrological effect evaluation of low impact development measures at Minzhi river basin in Shenzhen

HUANG Guoru^{1,2}, LI Biqui¹

(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)

Abstract: The Low Impact Development (LID) measures are the effective methods for urban rainstorm management, and are widely used in the construction of sponge city. To evaluate its hydrological effect, taking the Minzhi river basin in Shenzhen as the research area, the SWMM model is constructed. Three LID measure projects are designed, and the runoffs before and after the construction of the three LID measures at rainfall situation with different design return period are calculated respectively. The results showed that the LID measures, such as permeable pavement and concave green space, have different degrees of delay effect on flood peak time and different degrees of reduction effect on flood peak and volume of runoff, and the reduction effect decreases as the rainfall return period increases. The best results can be achieved by the combination of permeable pavement and concave green space at the same time, and they will play a better role of runoff control.

Key words: SWMM model; LID (low impact development) measure; hydrological effect; permeable pavement; concave green space

1 研究背景

随着国民经济的迅速发展,深圳市城市化程度有了显著提高,改变了城区的自然地理条件及排水体系,影响了水文要素变化规律,导致雨洪径流及洪峰流量增大,峰现时间提前,洪水陡涨陡落,行洪时间缩短,使得城市暴雨洪水出现频率与潜在风险不断增大^[1],为此国家提出海绵城市建设发展战略,

以减缓城市洪涝灾害和面源污染,其中低影响开发措施(LID)为其核心内容之一。随着海绵城市建设的不断推进,利用城市雨洪模型定量化评估 LID 措施水文效应可为海绵城市建设提供科学依据。SWMM 模型为一类较为有效的城市雨洪模型,其 5.1 版本增加了 LID 措施模块^[2-3],可利用该模型评估研究区域在采取 LID 措施后对降雨径流的控制效果^[4-17],例如,李霞等^[4]选择天津蓟县典型小区作

收稿日期:2018-01-13; 修回日期:2018-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51739011、51741903),广东省科技计划项目(2016A020223003)

作者简介:黄国如(1969-),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。

为研究区域,利用 SWMM 模型分析绿色屋顶、渗透铺装和下凹式绿地组合对地表径流量的削减率;胡爱兵等^[5]利用 SWMM 模型对 LID 开发模式下的水文条件进行模拟,以指导研究区域 LID 设施的合理布局;戚海军^[6]基于 SWMM 和 MIKE Urban 对北京建筑大学西城校区进行了 LID 措施的设计及效能模拟研究;蔡庆拟等^[7]以广州市海珠区高尔夫小区为例,利用 SWMM 模型评估了低影响开发措施效果。上述研究大多基于社区单元尺度进行,本文以深圳市民治河流域为研究区域,构建基于 SWMM 的城市雨洪模型,并利用实测资料率定模型参数,评估 LID 措施对民治河流域的水文效应,进而为流域海绵城市建设提供科学参考。

2 民治河流域 SWMM 模型构建

2.1 研究区域概况

民治河流域位于深圳市龙华新区民治街道,该区



图1 民治河流域水系图

2.2 SWMM 模型构建

SWMM 模型是集水文、水力和水质模拟功能于一体的降雨径流模拟模型^[2-3],SWMM 模型采用松散型分布式模型思想构建,数字化下垫面是构建模型的核心要素,主要分为排水系统概化与信息提取、子汇水区概化与信息提取等步骤,民治河流域 SWMM 模型具体构建过程详见文献[17]。

SWMM 模型参数首先根据 SWMM 用户手册中各参数的取值范围先行确定^[2-3],再选取深圳市临近地区作为参照区域,结合该地区的参数率定结果进行参数预估^[5],并在此基础上进行参数优化。由于本研究

域已基本实现农村城镇化,尤其是近年来新建了深圳北站、地铁等一批重要基础设施,带动了该区域城镇化高速发展。民治河发源于深圳市大脑壳山,起点接民治水库溢洪道,流向基本从南向北,有支流牛咀水、樟坑水汇入,终点位于下游松村北侧,与坂田河合流后汇入观澜河。民治河河道全长 9.34 km,河道天然平均坡降 6.69‰,集雨面积 19.23 km²。根据流域内的排水管网位置分布及流向分析,流域内雨水经管网收集后主要排入民治河、樟坑水和牛咀水沿岸部分排水管网。流域水系分布见图 1。

近年来,深圳市民治片区遭受了多次较为严重的暴雨袭击,均发生不同程度内涝,局部区域积水严重,给人民生活造成较大影响。通过对研究区 2008-2014 年暴雨内涝实地调研,总结出民治内涝严重片区分布情况,内涝点主要发生在南城百货、电站路、泰明菜市场、民治第一工业区、樟坑旧村、横岭旧村、白石龙村及龙塘老村等 8 处,具体位置如图 2。

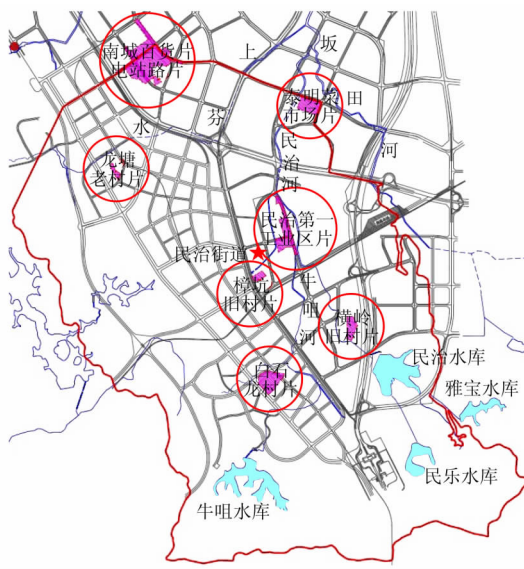


图2 暴雨内涝点分布图

区域内无水文站,缺乏流域出口实测流量数据,主要根据民治河流域内涝实地调查情况进行参数率定。具体选用民治河流域 2008-2014 年 6 场降雨总量和峰值强度均较大的降雨验证模型可靠性,得到民治河出口断面降雨径流过程线,结果表明出口流量过程线与降雨过程变化规律一致,模拟结果符合城市雨洪过程基本规律,并对模拟结果中的溢涝节点进行统计,尤其是 20130830 和 20140511 场次暴雨的降雨总量和降雨强度均很大,模拟得到的溢涝流量及溢涝点数量均较大,且与实际调研情况基本吻合,说明所构建的 SWMM 模型具有良好的精度和可靠性^[17],据此得到

的 SWMM 模型参数如表 1。

表 1 SWMM 模型参数取值

序号	名称	物理意义	取值
1	N - Imperv	不透水区曼宁系数	0.011
2	N - Perv	透水区曼宁系数	0.24
3	Destore - Imperv	不透水区洼蓄深	2.5
4	Destore - Perv	透水区洼蓄深	5.0
5	Zero - Imperv	不透水区无洼不透水面积比例	0.25
6	MaxRate	最大下渗率	78.1
7	MinRate	最小下渗率	3.30
8	Decay	渗透衰减系数	3.35

3 LID 计算原理及方案设计

3.1 LID 计算原理

各类低影响开发措施由不同的层构成,如透水铺装由透水面层、透水基层、透水底基层等组成,绿色屋顶由植物层、基质层、过滤层、排水层等组成。SWMM 模型基于各种低影响开发措施的基本原理概化为 7 种 LID 调控措施,分别为生物滞留池、透水铺装、渗渠、雨水桶、植草沟、绿色屋顶及雨水花园等,SWMM 模型也是通过竖向层的组合表示,主要包括表面层、路面层、土壤层、蓄水层和排水层等,不同 LID 措施含有不同的层,具体各 LID 措施所含层如表 2 所示^[3,8-9]。

表 2 各类 LID 措施所含结构层

LID 措施	表面层	路面层	土壤层	蓄水层	排水层
生物滞留池	√	×	√	√	0
透水铺装	√	√	0	√	0
渗渠	√	×	×	√	0
雨水桶	×	×	×	√	√
植草沟	√	×	×	×	×
绿色屋顶	√	×	√	×	√
雨水花园	√	×	√	×	×

注:表中√代表有该层,×代表无该层,0 代表该层可选。

SWMM 模型有 7 种 LID 措施,现以生物滞留池为例介绍 LID 计算原理,其他 LID 措施类似,在此不再一一赘述。SWMM 将每个 LID 措施概化为一个含有填充物,填充物含有孔隙的蓄水池(图 3),蓄水池中表层接受直接降雨和其他不透水区的降雨入流,种植有植物,并需设置表层厚度、空间植被覆盖率、曼宁系数和坡度等参数,当表层蓄满时径流便从顶端溢流流出;土壤层需设置厚度、孔隙率、土壤持水率、凋萎点、水力传导度、水力传导坡度和水吸力

等,其中孔隙率决定孔隙的体积,即可以蓄存的水的体积,凋萎点指土壤在最干旱时所含水量,而土壤持水率指水分在土壤层和其他竖向层之间不发生水分交换的最大含水量,故土壤持水率需大于凋萎点,否则模型会报错;蓄水层即类似于蓄水池蓄水,需要设置蓄水层厚度、孔隙率和下渗速率,蓄水层可以下渗雨水至本地土壤层;如果设置了排水层,蓄水层便会通过排水层向外排水,排水层需设置出流系数、出流指数及管底抬高等。

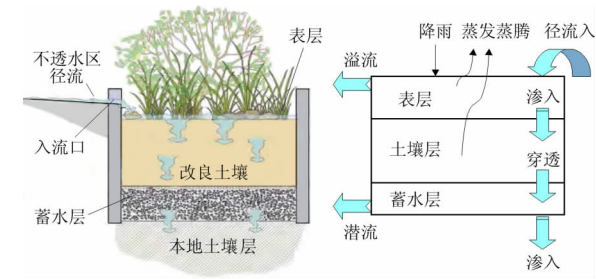


图 3 生物滞留池概化图

3.2 LID 措施方案设计

SWMM 模型中 LID 控制措施是在子汇水区属性中设置,可以在同一子汇水区中设置多种不同 LID 措施和多个同种 LID 措施单元。有两种不同的方法可以将 LID 措施置入子汇水区,分别为:(1)向一个没有 LID 措施子汇水区加入一种或多种 LID 措施(图 4 左);(2)同一个子汇水区只添加一种 LID 措施(图 4 右)。第一种方法允许将多个 LID 措施混合置于一个子汇水区中,但各 LID 措施并列运行,每个 LID 措施分别处理其对应面积子汇水区水流部分,不可以一个 LID 措施的出流数据作为另一个 LID 措施的入流数据。

第二种方法允许 LID 措施占据整个子汇水区,并允许接受来自上游子汇水区的出流作为该子汇水区的入流,故可以满足流向设置,但第二种方法需要创建新的子汇水区,并设置新的 LID 子汇水区面积属性。

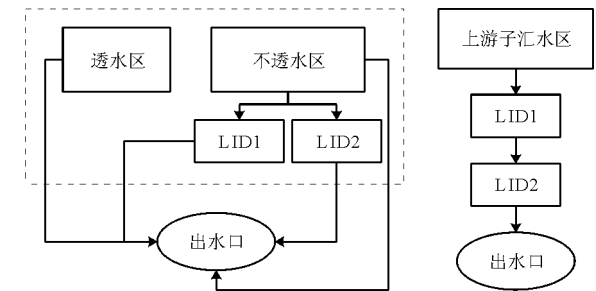


图 4 LID 置入子汇水区方案

无论第 1 种、还是第 2 种 LID 措施设置方式,在设置完 LID 措施后,均需根据实际情况重新调整子汇水区不透水率,如将不透水区设置为透水区后,需重新计算不透水区,尤其第二种方法,还需调整新建的子汇水区面积和原子汇水区面积等,加入 LID 后的不透水率调整见图 5。调整后的子汇水区不透水率计算如公式(1):

$$p = \frac{100 \times (A \cdot f/100 - A_{\text{imper,LID}})}{A - A_{\text{LID}}} \quad (1)$$

式中: p 为调整后子汇水区不透水面积百分比,即不透水区占非 LID 部分的百分比,% ; A 为子汇水区面积, m^2 ; f 为调整前子汇水区不透水面积百分比,% ; $A_{\text{imper,LID}}$ 为该子汇水区由不透水部分变为 LID 措施的面积, m^2 ; A_{LID} 为调整后该子汇水区中 LID 措施所占面积, m^2 。

参考相关文献和各地区设计手册^[5],选取下垫面的 50% 改造为相应的低影响开发措施,分析各种方案情况下 LID 措施效果,其中 LID 措施采用第二种方法置入子汇水区,具体方案如下:

(1) 方案 A: 将除去主干道外道路的 50% 改造为透水铺装,屋顶和透水铺装雨水直接排放。

(2) 方案 B: 将绿地的 50% 改造为下凹式绿地,屋顶雨水汇流至下凹式绿地收集处理排放。

(3) 方案 C: 将除去主干道外道路的 50% 改造为透水铺装,绿地的 50% 改造为下凹式绿地,透水铺装雨水直接排放,屋顶雨水汇流至下凹式绿地收集处理排放。

本模型所涉及的透水铺装和下凹式绿地等 LID 参数参考相关文献和模型手册^[2-16],具体设计参数如表 3 和表 4,其中下凹式绿地参照生物滞留池进行参数设置。

将 LID 措施置入 SWMM 模型,设置包括模拟时间、模拟步长等参数,并生成模型数据文件 *.inp,即可进行 LID 措施模拟计算。模拟时间从降雨开始后至降雨结束延后 2 h,计算步长为 2 s,结果记录步长为 1 min。

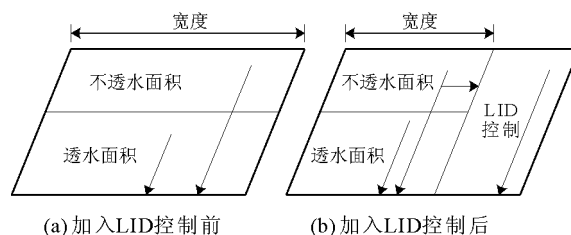


图 5 加入 LID 措施后的子汇水区参数调整

表 3 透水铺装设计参数

表面层	滞留深度/mm	空间植被覆盖率	曼宁系数	表面坡度/%	
	5	0	0.11	1	
路面层	厚度/mm	孔隙率	不透水率	渗透率/(mm · h ⁻¹)	阻碍因子
	60	0.1	0	200	0
蓄水层	厚度/mm	孔隙率	下渗率/(mm. h ⁻¹)	阻碍因子	
	250	0.43	500	0	
排水层	出流系数/(mm · s ⁻¹)	出流指数	管底抬高/mm		
	0	0.5	6		

表 4 下凹式绿地设计参数

表面层	滞留深度/mm	空间植被覆盖率	曼宁系数	表面坡度/%			
	150	0.2	0.15	1			
土壤层	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
	500	0.18	0.1	0.03	3.6	10	90
蓄水层	厚度/mm	孔隙率	下渗率/(mm·h ⁻¹)	阻碍因子			
	200	0.2	500	0			
排水层	出流系数/ (mm·s ⁻¹)	出流指数	管底抬高/mm				
	0	0.5	50				

4 低影响开发措施水文效应评估

深圳市气象局根据深圳国家基本气象站 1961–2014 共 54 a 的降水记录,于 2015 年 11 月编制了深圳市暴雨强度公式及计算图表,公式如下:

q = \frac{1450.239 \times (1 + 0.594 \lg P)}{(1 + 11.13)^{0.555}} \tag{2}

式中:q 为设计暴雨强度,L/s · hm²; t 为降雨历时,min; P 为设计重现期,a。

设计暴雨采用深圳市暴雨强度公式,结合芝加哥雨型得到降雨过程,选取降雨历时为 60 min,雨峰系数 r = 0.35,以 5 min 为记录间隔,得到降雨重现期分别为 1、2、5、10 和 20 a 的设计降雨过程,用于评估各种 LID 方案的低影响开发效果。

4.1 遭遇 1 年一遇 1 h 设计降雨

当研究区域遭遇 1 年一遇 1 h 设计降雨时,利

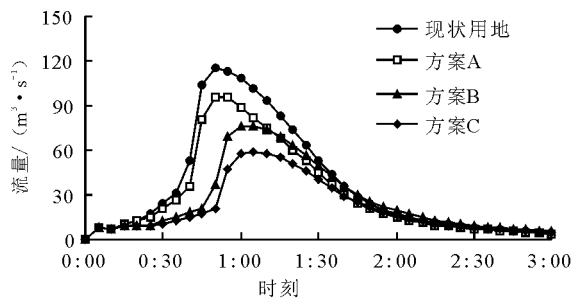


图 6 1 年一遇降雨民治河出口流量过程

4.2 遭遇 2 年一遇 1 h 设计降雨

当研究区域遭遇 2 年一遇 1 h 设计降雨时,利用已经构建的 SWMM 模型进行模拟计算,得到各种方案情形下民治河河口径流模拟结果(图 7 和表 6)。

由图 7 和表 6 可知,当研究区域遭遇 2 年一遇 1h 设计降雨时,方案 A、B、C 的峰现时间比现状情形分别延迟了 1、9 和 11 min,3 个方案的洪峰流量削减率分别为 13.25%、25.57% 和 41.46%,径流量削减率分别为 16.40%、24.62% 和 39.24%。

表 5 1 年一遇降雨各方案民治河出口径流模拟结果

LID 布设方案	峰现时间	洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	洪峰 削减 率/%	径流量/ 10 ³ m ³	径流量 削减率/ %
现状用地	0:51:00	116.30		403.56	
方案 A	0:52:00	96.81	16.76	334.29	17.17
方案 B	1:02:00	77.13	33.68	293.33	27.31
方案 C	1:04:00	59.28	49.03	233.41	42.16

用已经构建的 SWMM 模型进行模拟计算,得到各种方案情形下民治河河口径流模拟结果(图 6 和表 5)。由图 6 和表 5 可知,当研究区域遭遇 1 年一遇 1 h 设计降雨时,3 种 LID 方案对洪峰均有延迟作用,洪峰流量和径流量均有不同程度的削减效果。方案 A 对延迟峰现时间的效果最不明显,仅比现状情形延迟 1 min;组合方案 C 对延迟峰现时间的效果最为显著,比现状情形延迟 13 min,体现了 3 个方案对雨水滞留作用有一定差异。由流量模拟结果可看出,方案 A > 方案 B > 方案 C,这是由于 3 个方案的削减效果不同造成,方案 C 是方案 A 和方案 B 的组合,故削减洪峰流量及径流量的效果最为显著,方案 C 洪峰流量削减率为 49.03%,径流量削减率为 42.16%;方案 B 削减效果明显优于方案 A,方案 B 洪峰削减率为 33.68%,径流量削减率为 27.31%,对降雨径流控制效果较好。

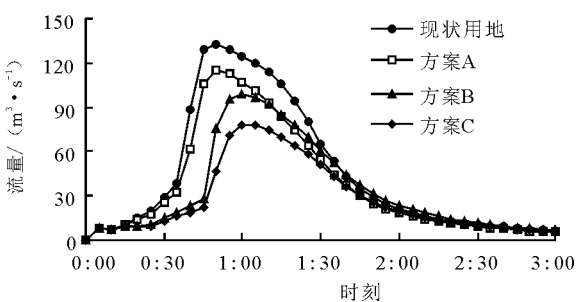


图 7 2 年一遇降雨民治河出口流量过程

表 6 2 年一遇降雨各方案民治河出口径流模拟结果

LID 布设方案	峰现时间	洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	洪峰削 减率/%	径流量/ 10 ³ m ³	径流量削 减率/%
现状用地	0:50:00	133.29		494.58	
方案 A	0:51:00	115.63	13.25	413.45	16.40
方案 B	0:59:00	99.21	25.57	372.83	24.62
方案 C	1:01:00	78.03	41.46	300.53	39.24

4.3 不同重现期 LID 措施综合评估

模拟其余不同设计重现期情形下降雨径流,可以发现民治河河口在 LID 措施前后流量变化过程规律与遭遇 1 年和 2 年一遇暴雨结果类似,这里不再赘述,汇总得到不同设计降雨重现期下方案 A、方案 B 和方案 C 情形的模拟结果(表 7)。

由表 7 可看出,相比现状用地,方案 A、方案 B 和方案 C 均能在一定程度上延长汇流时间、削减径流量,这是由于透水铺装和下凹式绿地在一定程度上能提高城市“渗”、“滞”、“蓄”能力,方案 A、方案

B 和方案 C 的洪峰流量和径流量削减率均随着重现期增大而减小。相同重现期降雨条件下,将方案 A、方案 B 和方案 C 计算结果进行比较,得知各种情况下方案 C > 方案 B > 方案 A,说明方案 C 优于方案 B,方案 B 优于方案 A。方案 C 为方案 A 与方案 B 的组合,低影响开发改造面积较大,效果优于方案 A 和方案 B;方案 A 滞洪能力明显弱于方案 B,透水铺装延迟洪峰效果不太明显,下凹式绿地延迟洪峰能力较强。同时也可以看出,对于较低设计重现期而言(比如 $P=1, 2$),洪峰流量和径流量削减率均较高,因此,LID 组合实施可以较好地发挥控制径流作用,可有效地减缓洪涝灾害。

表 7 不同重现期设计降雨各方案模拟结果

LID 布设方案	现状用地	方案 A	方案 B	方案 C
峰现 时间	$P=1a$	0:51:00	0:52:00	1:04:00
	$P=2a$	0:50:00	0:51:00	1:01:00
	$P=5a$	0:49:00	0:49:00	0:59:00
	$P=10a$	0:51:00	0:51:00	0:57:00
	$P=20a$	0:48:00	0:51:00	0:57:00
洪峰削 减率/%	$P=1a$	16.76	33.68	49.03
	$P=2a$	13.25	25.57	41.46
	$P=5a$	12.10	18.75	32.36
	$P=10a$	11.28	17.20	28.25
	$P=20a$	9.88	14.33	24.18
径流量 削减率/%	$P=1a$	17.17	27.31	42.16
	$P=2a$	16.40	24.62	39.24
	$P=5a$	15.35	21.98	36.28
	$P=10a$	14.91	20.80	34.63
	$P=20a$	14.04	19.78	32.96

5 结 论

(1)构建了基于 SWMM 的深圳民治河流域城市雨洪模型,设计了 3 种低影响开发措施方案,分别模拟了 1、2、5、10 和 20a 不同重现期降雨对 3 种 LID 布设方案的结果,3 种方案均有延迟洪峰及控制城市暴雨径流效果。

(2)方案 A、方案 B 和方案 C 对洪峰流量和径流量的削减效果均随重现期增大而减小,削减效果依次为方案 C > 方案 B > 方案 A,透水铺装和下凹式绿地两者的组合实施可以更好地发挥控制径流作用。

(3)方案 A、方案 B 和方案 C 在 5 种设计重现期情形下的洪峰流量削减率分别为 9.88% ~ 16.76%、14.33% ~ 33.68% 和 24.18% ~ 49.03%,

径流量削减率分别为 14.04% ~ 17.17%、19.78% ~ 27.31% 和 32.96% ~ 42.16%。

参考文献:

- [1] 黄国如,冯杰,刘宁宁,等. 城市雨洪模型及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [2] ROSSMAN L A, HUBER W C. Storm water management model reference manual volume I - Hydrology[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency,2016.
- [3] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual version 5.1[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency,2015.
- [4] 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,2015,41(5):152-156.
- [5] 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.
- [6] 威海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [7] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护,2017,33(2):31-36.
- [8] 吴建立. 低影响开发雨水利用典型措施评估及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [9] 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,2013,31(12):42-45.
- [10] 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.
- [11] 苏义敬,王思思,车伍,等. 基于“海绵城市”理念的下沉式绿地优化设计[J]. 南方建筑,2014(3):39-43.
- [12] 张明珠,麦叶鹏,孟庆强,等. 广州市东濠涌流域低影响开发措施雨洪控制效应评估[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):28-34.
- [13] 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.
- [14] 许萍,何俊超,任心欣,等. 基于 SWMM 模型的城市道路 LID 设施设计参数优化研究[J]. 水电能源科学,2016,34(2):21-25.
- [15] 乔梦曦. 区域开发不同尺度雨水系统关系研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [16] 黄国如,麦叶鹏,李碧琦,等. 基于 PCSWMM 模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究[J]. 南方建筑,2017(3):38-45.
- [17] 黄国如,张灵敏,雒翠,等. SWMM 模型在深圳市民治河流域的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(4):10-14.