

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.017

# 排水模型在院落海绵化改造方案设计中的应用

吴思远<sup>1</sup>, 罗惠云<sup>1</sup>, 王建富<sup>2</sup>

(1. 湖南省建筑设计院有限公司, 湖南 长沙 410012; 2. 北京清控人居环境研究院有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 以常德市某院落为例,以问题为导向确定设计目标,在解析现状地形的基础上划分汇水分区,以源头分散为原则布设低影响开发(LID)设施并新增排水溢流设施。改造方案确定后以DigitalWater Simulation为模型构建工具,输入不同重现期的长、短历时降雨数据和全年降雨数据,构建海绵城市规划排水模型,对项目建设后的水文水质进行模拟评估。结果表明,该院落海绵化改造方案合理可行,典型年的降雨数据模拟结果显示,年径流总量控制率达到了86.3%,年SS总量去除率为48.5%,满足海绵城市建设目标要求。

**关键词:** 院落海绵化改造; 排水模型; 模拟评估

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0102-07

## Application of Drainage Model in Design of Courtyard Sponge Transformation Scheme

WU Si-yuan<sup>1</sup>, LUO Hui-yun<sup>1</sup>, WANG Jian-fu<sup>2</sup>

(1. Hunan Architectural Design Institute Co. Ltd., Changsha 410012, China; 2. Beijing Tsinghua Holding Human Settlement Environment Institute Co. Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** A design goal of a courtyard sponge transformation scheme in Changde was decided by problem-oriented approaches. Catchments were divided based on the analysis of current terrain, and low impact development (LID) facilities were set up based on the principle of source dispersed control and addition of new drainage overflow facilities. After the scheme was determined, DigitalWater Simulation was used as a tool, and long and short duration rainfall data and annual rainfall data with different return periods were input to construct a sponge city planning drainage model. Hydrology and water quality were evaluated afterwards. The results showed that the sponge transformation scheme of the courtyard was reasonable and feasible. According to simulation results of rainfall data in a typical year, the volume capture ratio of annual rainfall achieved 86.3% and the removal efficiency of annual total SS was 48.5%, which met the requirement of sponge city construction goal.

**Key words:** courtyard sponge transformation; drainage model; simulation and evaluation

海绵城市建设能有效缓解内涝积水、面源污染、生态环境恶化、水资源紧缺等城市发展问题,已成为众多行业和科技领域的讨论热点之一<sup>[1-2]</sup>。院落海

绵化改造作为海绵城市源头削减工程之一,无论是对于控制初雨污染还是对于降低城市雨水排水压力都具有重要意义。如何科学合理规划设计海绵设施

是海绵城市建设目标能否实现的前提,诸多研究表明,排水模型已逐步取代传统的水文、水力计算分析手段,被广泛应用于排水系统服务性能总体评价和问题识别,为海绵设施布局提供了决策支持<sup>[3-5]</sup>。此外,新颁布的《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)也推荐使用模型模拟的方法对海绵城市建设效果进行综合评价。笔者以国家第一批海绵城市建设试点城市常德市某院落海绵化改造方案设计为例,构建一维、二维排水模型对水量水质进行精确模拟计算,研究模型技术在海绵化改造方案达标性分析中的应用,以期排水模型法辅助海绵城市建设项目方案设计提供技术支持和参考,为系统方案设计提供技术支撑。

1 海绵化改造设计方案

1.1 项目概况

改造院落位于常德市江北城区,南临滨湖路,东至朝阳路,总占地面积约为 13 158 m<sup>2</sup>,建筑密度为 30%,绿地率为 15%。院落已建成 12 年,为多层商住楼,现场踏勘发现部分雨水口、路面、停车位破损严重,植被缺乏维护,大面积裸土暴露。暴雨天有 4 处积水点,人居环境较差,整体亟待改造。项目区属于副热带季风气候区,4 月—8 月为暴雨多发时段,暴雨日数占全年的 85.9%,年均降雨量为 1 373 mm,年均蒸发量为 1 193 mm。

借用 GIS 工具解析 1:500 地形图,将下垫面划分为屋面、绿地、道路、硬质铺装、裸土 5 种类型,分别占总面积的 33.0%、16.7%、21.0%、28.2%、1.1%,现状综合径流系数为 0.70,硬化地表面积占比较大,年径流总量控制率约为 38%,亟需海绵设施蓄滞雨水。

1.2 设计目标

院落位于海绵控制单元 B32 分区,根据《常德市海绵城市专项规划》要求,并考虑设施可落地性,确定年径流总量控制率为 85%,年 SS 总量去除率为 47.3%。

1.3 海绵设施布局设计

参考现状排水管网勘测资料、地形图、雨落管位置等信息,将项目区域划分为 5 个汇水分区,每一个排水分区对应一个独立的排水系统分别进行海绵城市设计。

海绵改造方案充分采用源头削减类海绵设施,利用“渗、滞、蓄、净”等技术控制雨水径流。具体设

计方案平面布置如图 1 所示。布局主要内容如下:①考虑到住户对停车位的需求,对现有硬质铺装车位以及部分绿地进行生态停车位改造;②在停车位内侧布设植草沟与雨水花园相连通;③对裸露的土地进行雨水花园改造,雨水花园内设溢流口,顶部标高高于绿地 100 mm;④院落休憩步道采用透水砖铺设;⑤对院落中央的硬质雨水池进行拆除,改造为干塘,周围建筑雨落管断接处理,雨水通过 DN200 连接管进入干塘;⑥对车库前的破损路面进行混凝土修复处理。

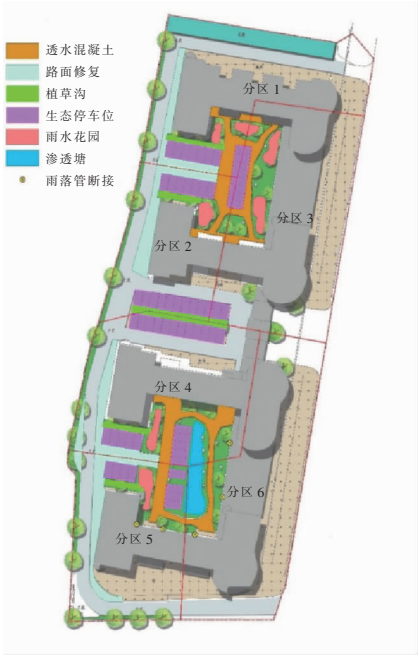


图 1 海绵设施平面布局

Fig.1 Layout diagram of sponge facilities

海绵设施规模计算如表 1 所示,采用容积法计算得到改造后年径流总量控制率可以达到 85.1%,年 SS 总量去除率可以达到 48.3%,可以满足总目标控制要求。

表 1 雨水径流控制量统计

Tab.1 Statistics of rainwater runoff control volume

汇水分区	面积/hm <sup>2</sup>	综合雨量径流系数	LID 设施面积/m <sup>2</sup>	径流控制容积/m <sup>3</sup>	设计降雨量/mm	年径流总量控制率/%	年 SS 总量去除率/%
1	0.23	0.67	332	40	26.4	83.9	45.4
2	0.15	0.61	275	29	31.5	87.6	47.1
3	0.26	0.75	307	55	27.7	84.8	47.3
4	0.24	0.62	431	56	38.3	92.5	52.5
5	0.18	0.63	321	38	33.2	88.7	49.8
6	0.25	0.68	175	33	18.9	75.3	47.6
总计	1.32	0.67	1 841	251	28.6	85.1	48.3

本方案的排水设计主要目的为解决旧排水系统问题及新增海绵设施排水系统,具体布置如下:①对现有雨水管道全部疏通,并对破损管道进行修复;②对院落西南部雨污混接点进行改造,就近接入雨水主干管;③院落入口道路两侧新建缝隙式排水沟(150 mm×200 mm)排除积水;④植草沟、雨水花园溢流口之间新建 DN150 的 PVC 渗透管连接,溢流口与雨水系统检查井之间采用 DN200 的 HDPE 管连接。具体布置如图 2 所示。

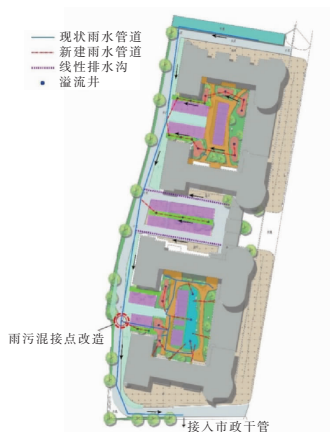


图2 排水系统建设示意

Fig. 2 Schematics of drainage system reconstruction

## 2 模型达标性评估

### 2.1 建模工具

本方案排水建模软件采用城市排水管网模拟系统(DigitalWater Simulation),该系统将 SWMM 排水管网动态模拟和 GIS 空间关系分析融合在一起,支持多种情景模拟以及方案对比;此外,该系统实现了管渠一维水动力和地表二维漫流之间的模型耦合,可以动态展示地表积水过程和系统退水过程,更加真实地反映内涝发生过程,而且模拟结果以多种图表样式灵活展示,可以为海绵改造系统方案提供决策支持<sup>[6]</sup>。

### 2.2 规划模型构建

#### 2.2.1 一维二维耦合模型构建

将地下管线勘测数据信息(检查井和管线)导入模型,对排水系统进行拓扑关系检查后人工纠错。“节点-管线”构建完毕后绘制汇水区。第一层级是利用地形对项目区进行汇水区划分;第二层级是在汇水区的基础上,用泰森多边形法以检查井为中心,结合人工修正边界,完成子汇水区划分,一维排

水系统模型骨架搭建完毕。

规划一维排水模型共计 47 个检查井、1 个排放口、415 m 雨水管道、47 个子汇水区。模型构建界面如图 3 所示。



图3 海绵城市规划排水模型示意

Fig. 3 Schematics of sponge city planning drainage model

将地形图高程数据进行加密处理,并结合 ArcGIS 的拓扑功能快速生成加密点,输入拟合曲线高程数据<sup>[7]</sup>,然后将屋面作为淹没阻碍图层叠加生成高精度 Dem,如图 4 所示。DigitalWater Simulation 根据 Dem 自动划分 0.5 m×0.5 m 正交网格,生成二维节点,对应生成二维检查井,最后将管网系统与地表网格进行关联,形成完整的一维管网和二维地表耦合模型。

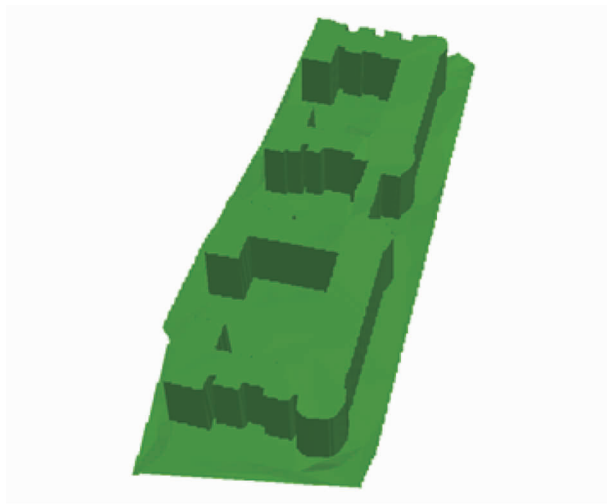


图4 高精度 Dem 示意(在 ArcScene 中显示)

Fig. 4 Schematics of high precision Dem (show file in ArcScene)

#### 2.2.2 LID 模块设置

在规划模型骨架构建完毕的基础上添加 LID 模

块,评估规划实施后的径流控制效果。本模型主要通过汇水区的相关参数设置调整实现,基于下垫面的精确解析,确定每种措施的工程量,与子汇水区叠加得到逐个子汇水区的 LID 设施规模,再根据设施规模逐一进行汇水区参数赋值,参数赋值主要参考相关文献<sup>[8]</sup>,具体如表 2 所示。

表 2 LID 设施参数设置

Tab. 2 Parameters of LID facilities

结构层	参数	雨水花园	透水铺装	植草沟	干塘	生态停车位
表面层	蓄水深度/mm	300	10	200	600	20
	植被覆盖率	0.85	0	0.9	0.75	40
	曼宁系数	0.35	0.012	0.2	0.15	0.1
	表面坡度/%	0.25	0	0.3	0.1	0
路面层	厚度/mm	—	280	—	—	290
	孔隙比	—	0.15	—	—	0.15
	不透水表面系数	—	0	—	—	0
	透水速率/(mm·h <sup>-1</sup> )	—	120	—	—	120
土壤层	厚度/mm	400	—	300	300	—
	孔隙比	0.45	—	0.45	0.45	—
	田间持水量分数	0.1	—	0.1	0.1	—
	枯萎系数	0.024	—	0.024	0.024	—
	导水率/(mm·h <sup>-1</sup> )	120	—	120	120	—
	导水坡度	5	—	5	10	—
	吸水头/mm	90	—	90	50	—
蓄水层	厚度/mm	350	120	350	200	200
	孔隙比	0.5	0.75	0.5	0.5	0.75
	透水速率/(mm·h <sup>-1</sup> )	300	400	300	300	400
	堵塞因子	0	—	0	—	—
暗渠 (排水层)	排水系数	0.6	—	0.6	—	—
	排水指数	0.5	—	0.5	—	—
	暗渠偏移高度/mm	100	—	100	—	—

2.2.3 参数及降雨条件输入

排水模型参数包含了水文、水动力、水质 3 大类,具有明显空间特征的参数可通过测量资料直接

获取,不确定参数可参考 SWMM 手册及相关文献<sup>[9-11]</sup>,具体见表 3 和表 4。其中,下渗模型选用 Horton 模型,污染物累积和冲刷模型选用指数函数。

表 3 排水模型水文、水动力参数

Tab. 3 Hydrology and hydrodynamic parameters

参数名称	物理意义	取值范围	获取方法
Width - K	汇水区特征宽度	19.1 ~ 25.6	2.29A <sup>0.4</sup>
Slope	汇水区坡度/%	0.1 ~ 0.5	GIS 方法
Imperv	汇水区不透水比例/%	30 ~ 65	GIS 方法
N - imperv	不透水区曼宁系数	0.011 ~ 0.015	GIS 方法
N - perv	透水区曼宁系数	0.2 ~ 0.5	GIS 方法
Destore - imperv	不透水区洼蓄深/mm	1 ~ 2	GIS 方法
Destore - perv	透水区洼蓄深/mm	2.5 ~ 3	GIS 方法
% Zero - imperv	无洼蓄不透水区所占比例/%	50 ~ 80	GIS 方法
Conduit roughness	管道曼宁系数	0.011 ~ 0.024	实测输入
Max. infil. rate	最大下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	30 ~ 50	实测输入
Min. infil. rate	最小下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	2 ~ 5	实测输入
Decay constant	渗透衰减常数/h <sup>-1</sup>	2 ~ 7	实测输入
Drying time	完全干燥所需天数/d	7 ~ 10	实测输入



表4 排水模型水质初始值参数(SS)

Tab.4 Initial value parameters of water quality(SS)

项 目	参数类别	参数名称	物理意义	初始值
路面	污染物累积	Max. Buildup	最大累积量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	30
		Rate Constant	累积速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.2
	污染物冲刷	Coefficient	冲刷系数	0.02
		Ecponent	冲刷指数	0.5
		Cleaning Effic	街道清扫去除率/%	60
绿地	污染物累积	Max. Buildup	最大累积量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	30
		Rate Constant	累积速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.5
	污染物冲刷	Coefficient	冲刷系数	0.01
		Ecponent	冲刷指数	0.5
屋面	污染物累积	Max. Buildup	最大累积量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	20
		Rate Constant	累积速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.5
	污染物冲刷	Coefficient	冲刷系数	0.09
		Ecponent	冲刷指数	1.7
其他	污染物衰减	Decay Coeff	降解速率常数/ $\text{d}^{-1}$	0.15
	降雨浓度	Rain Concen	降雨中污染物浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	10

参数输入完毕后完成降雨条件设置。①实测降雨输入:参考《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(简称《指南》)选取至少近30年日降雨数据作为统计样本,确定城市年径流总量控制率与设计降雨量对应关系。2014年降雨量(1415 mm)与30年年均降雨量相对误差为3.1%,年累计降雨频率与多年均值的相关系数 $R^2$ 为0.9989,年径流总量控制率曲线与多年均值的相关系数 $R^2$ 为0.9982<sup>[12]</sup>,因此,将2014年作为典型年输入逐日降雨及蒸发数据(水面蒸发)。②合成降雨输入:常德市排涝标准为30年一遇,推求出30年一遇24h降雨量为206.59 mm,见图5。此外,采用芝加哥雨型对180 min短历时降雨进行分配,王光明等人<sup>[13]</sup>研究表明,湖南短历时降雨雨峰位置基本处于整场降雨的1/3分位,本方案中雨峰位置取0.35,合成1年一遇、3年一遇、5年一遇降雨。

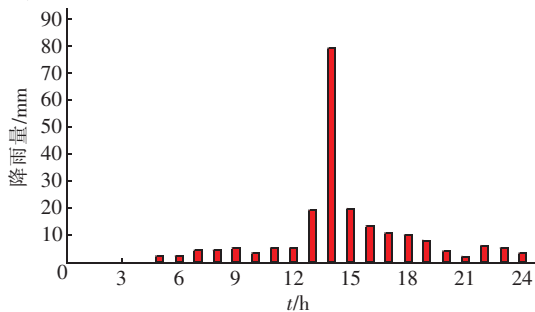


图5 30年一遇24h降雨时程分配情况

Fig.5 Time distribution of 24-h rainfall with 30-year return period

## 2.3 达标性评估

### 2.3.1 径流量评估

30年一遇24h降雨条件下的模拟结果显示,通过海绵城市改造,院落积水点减至两处,且积水深度低于15 cm,达到了内涝防治标准要求。改造前后积水区情况对比如图6所示。

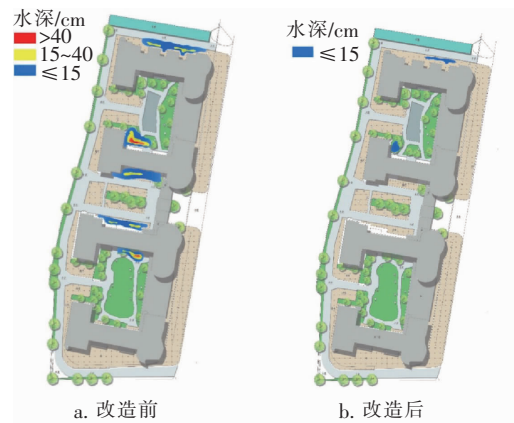


图6 改造前后积水区情况对比

Fig.6 Comparison of ponding area before and after transformation

2014年降雨数据模拟结果显示,院落径流量由改造前的 $1.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ 降至改造后的 $0.25 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,年径流总量控制率达到了86.3%,已满足设计目标(85%)要求。

以重现期为1、3、5年,历时180 min合成降雨作为模拟条件,结果显示,海绵城市改造具有削减径流总量和峰值流量、推迟峰现时刻的作用,具体数据

如下:当重现期为1、3、5年时,改造前径流总量分别为471.0、669.8、788.2  $\text{m}^3$ ,改造后分别降至319.5、493.2、607.2  $\text{m}^3$ ;改造前雨量径流系数分别为0.68、0.70、0.73,改造后分别降至0.46、0.52、0.56;改造前峰值流量分别为0.50、0.68、0.81  $\text{m}^3/\text{s}$ ,改造后分别降至0.38、0.55、0.67  $\text{m}^3/\text{s}$ ;改造前峰现时刻分别为00:56、00:55、00:54,改造后分别为01:01、00:58、00:56。在重现期为1年、历时180 min合成降雨条件下,改造前后的径流过程线对比见图7。

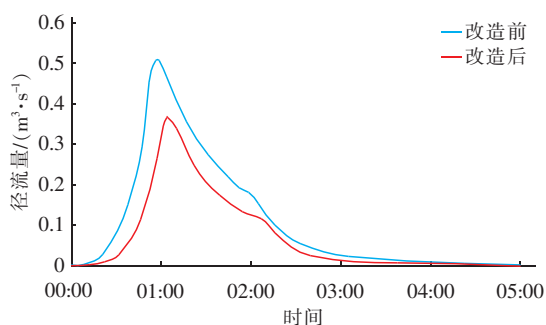


图7 改造前后的径流过程线对比

Fig. 7 Comparison of runoff hydrograph before and after transformation

### 2.3.2 径流污染评估

2014年降雨数据模拟结果显示,改造后规划区年SS总负荷为811.5 kg,年SS总量去除率为48.5%,达到了设计目标要求。

以重现期为1、3、5年,历时180 min合成降雨作为模拟条件,结果显示,海绵城市改造具有削减污染物总量和峰值浓度、推迟峰现时刻的作用,对径流污染削减效果显著。具体数据如下:当重现期为1、3、5年时,改造前SS总负荷分别为39.5、45.2、47.7 kg,改造后分别降至24.1、29.8、32.6 kg;改造前SS峰值浓度分别为138.5、146.7、149.1  $\text{mg/L}$ ,改造后分别降至98.1、107.4、113.2  $\text{mg/L}$ ;改造前SS峰现时刻分别为00:55、00:54、00:53,改造后分别为01:01、00:58、00:56。

## 3 结论

① 模拟结果表明,院落海绵城市改造后积水点减少3处,且均满足内涝防治标准要求。在重现期为1、3、5年,历时180 min模拟降雨条件下,对比改造前,径流总量削减率分别为32.2%、26.4%、23.0%,径流峰值流量削减率为24.0%、19.1%、17.3%,雨量径流系数减少了0.22、0.18、0.17,径

流峰现时刻推迟了5、3、2 min;SS总量削减率为39.0%、34.1%、31.7%,SS峰值浓度削减率为29.2%、26.8%、24.1%,SS浓度峰现时刻推迟了6、4、3 min。可以看出,降雨重现期越小,LID设施的径流控制效果越明显。

② 本次改造严格遵循以问题为导向原则设计方案,并构建海绵城市规划模型验证水质、水量目标可达性,虽然《指南》中提供了容积法计算示例,但无法表达其复杂的水文过程。因此,模型法比手算调蓄容积法更具科学性和准确性。

③ 在小设计尺度下历时积水法校核模型精度欠佳,建议后续增设排水监测设施,利用监测数据率定模型参数,形成一套可靠的模型标准参数表,更为准确地指导后续设计工作。

## 参考文献:

- [1] 黄国如,吴思远. 基于InfoWorks CS的雨水利用措施对城市雨洪影响的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2013,31(5):1-4,17.  
Huang Guoru, Wu Siyuan. Simulation study on effect of rainwater utilization measures on urban stormwater based on InfoWorks CS [J]. Water Resources and Power, 2013,31(5):1-4,17 (in Chinese).
- [2] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展,2016,27(6):793-799.  
Zhang Jianyun, Wang Yintang, Hu Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China [J]. Advances in Water Science, 2016,27(6):793-799 (in Chinese).
- [3] 张大伟,赵冬泉,陈吉宁,等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水,2008,34(S1):354-357.  
Zhang Dawei, Zhao Dongquan, Chen Jining, et al. Application of Chicago rainfall line model in drainage system simulation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008,34(S1):354-357 (in Chinese).
- [4] 曹万春,张彬,黄克虎. 基于SWMM模型的校园海绵化改造方案研究[J]. 中国给水排水,2018,34(15):122-126.  
Cao Wanchun, Zhang Bin, Huang Kehu. Campus sponge transformation scheme based on SWMM model [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(15):122-126 (in Chinese).
- [5] 任心欣,汤伟真,李建宁,等. 水文模型法辅助低影响

- 开发方案设计案例探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17): 109–114.
- Ren Xinxin, Tang Weizhen, Li Jianing, *et al.* Case study on low impact development design based on hydrology model[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 109–114 (in Chinese).
- [6] 陈小龙, 赵思东, 赵冬泉, 等. 城市排水管网模拟系统介绍[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1): 104–108.
- Chen Xiaolong, Zhao Sidong, Zhao Dongquan, *et al.* Introduction of DigitalWater Simulation system [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1): 104–108 (in Chinese).
- [7] 吕放放, 胡俊, 卢爱国, 等. 北京某下凹桥区排水系统建模研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 103–108.
- Lü Fangfang, Hu Jun, Lu Aiguo, *et al.* Building of mathematical model for drainage system at an underpass in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(7): 103–108 (in Chinese).
- [8] 刘小梅, 吴思远, 云海兰, 等. 水力模型在排水防涝规划体系中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(11): 133–138.
- Liu Xiaomei, Wu Siyuan, Yun Hailan, *et al.* Application of hydraulic models in drainage and flood control planning systems in small watersheds [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 133–138 (in Chinese).
- [9] Zaghoul N A. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation [J]. Adv Water Res, 1983, 6(4): 214–223.
- [10] 赵冬泉, 董鲁燕, 王浩正, 等. 降雨径流连续模拟参数全局灵敏性分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 717–723.
- Zhao Dongquan, Dong Luyan, Wang Haozheng, *et al.* Global sensitivity analysis of a rainfall-runoff model using continuous simulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(4): 717–723 (in Chinese).
- [11] 赵冬泉, 陈吉宁, 王浩正, 等. 城市降雨径流污染模拟的水质参数局部灵敏度分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1170–1177.
- Zhao Dongquan, Chen Jining, Wang Haozheng, *et al.* Local sensitivity analysis for pollution simulation of urban rainfall-runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(6): 1170–1177 (in Chinese).
- [12] 白永强, 刘绪为, 李成江, 等. 基于年径流总量控制率的降雨典型年的研究及确定[J]. 中国给水排水, 2018, 34(1): 106–109.
- Bai Yongqiang, Liu Xuwei, Li Chengjiang, *et al.* Determination of typical rainfall year based on volume capture ratio of annual rainfall [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 106–109 (in Chinese).
- [13] 王光明, 廖玉芳, 曾向红, 等. 湖南短历时暴雨雨型分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 86–90.
- Wang Guangming, Liao Yufang, Zeng Xianghong, *et al.* The analysis of the short-duration rainstorm pattern over Hunan Province [J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(1): 86–90 (in Chinese).



作者简介: 吴思远(1987–), 男, 湖南常德人, 硕士, 工程师, 主要从事排水防涝规划设计、海绵城市规划设计工作。

E-mail: 34212749@qq.com

收稿日期: 2019–06–27