

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.020

基于 HYSWMM 的 LID 与传统模式下雨水管网对比

曹 喆, 王川涛, 王成坤

(中国城市规划设计研究院深圳分院, 广东深圳 518034)

摘 要: 以深圳市光明新区光明北片区为研究区域,采用鸿业暴雨排水及低影响开发系统(HYSWMM)模型模拟不同降雨条件下低影响开发(LID)模式的雨水管网运行情况,从径流系数、管网排水能力、管道充满度、节点水深、径流峰值、峰现时间等方面分析 LID 对雨水管网运行状态的影响。结果表明,对于重现期 ≤ 10 年的2 h短历时降雨,LID设施的加入对雨水径流具有削减作用,与传统开发模式相比,LID模式下区域径流系数由0.53~0.67降低至0.42~0.56,排水能力提升约10%,管网排放口总出流量峰值降低9.9%~15.9%,节点最大水深降低0.09~0.5 m,充满度最大降低0.22,峰现时间最大可延迟3 min;对于重现期为50年的24 h长历时降雨,LID模式下管网排放口总出流量峰值相比传统开发模式几乎无变化,LID模式在极端暴雨情况下对雨水管网运行状态的影响微弱。

关键词: 低影响开发; 雨水管网; 鸿业暴雨排水及低影响开发系统; 重现期

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0117-06

Comparison of Stormwater Pipe Network between LID Mode and Traditional Mode Based on HYSWMM

CAO Zhe, WANG Chuan-tao, WANG Cheng-kun

(Shenzhen Branch, China Academy of Urban Planning & Design, Shenzhen 518034, China)

Abstract: Operation of stormwater pipe network in low impact development (LID) mode in northern area of Guangming District, Shenzhen at different rainfall conditions was simulated by using HYSWMM, and the influence of LID on the operation of stormwater pipe network was analyzed from the aspects of runoff coefficient, drainage capacity of pipe network, depth ratio, node water depth, runoff peak and peak time. For 2 hours short-duration rainfall with a return period less than 10 years, the addition of LID facilities could reduce stormwater runoff. Compared with traditional mode, regional runoff coefficient decreased from 0.53-0.67 to 0.42-0.56, drainage capacity increased by about 10%, the peak discharge of pipe network outlet decreased by 9.9%-15.9%, the maximum water depth of the node decreased by 0.09-0.5 m, the depth ratio decreased by 0.22 at most, and the peak time was prolonged by 3 minutes. For the 24 hours long-duration rainfall with a return period of 50 years, the peak discharge of pipe network outlet in LID mode was almost unchanged compared with that in the traditional mode, and the influence of LID mode on the operation of stormwater pipe network in extreme storm was weak.

Key words: low impact development; stormwater pipe network; HYSWMM; return period

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71741024)

低影响开发(LID)是指基于自然水文条件原理,采用源头控制理念来实现雨水控制与利用的雨水管理方法,其核心思想是在进行城市开发建设过程中,通过一系列措施,使区域开发前后的水文特征基本保持不变,常见的LID设施包括下沉式绿地、雨水花园、透水铺装、绿色屋顶等。LID设施在源头对雨水产汇流的滞峰、错峰、削峰的综合作用,将影响“过程控制”环节中雨水管网的运行。因此,为探究LID模式对雨水管网运行状态的影响,优化城市雨水管网系统,需要对LID模式下雨水管网的运行进行深入分析。

暴雨雨水管理模型(SWMM)是美国环境保护局发布的径流模拟计算模型,主要用于城市区域径流量和水质的单一事件或者长期连续模拟^[1]。鸿业暴雨排水及低影响开发系统(HYSWMM)是在AutoCAD环境下基于SWMM的二次开发系统,可以更快地识别现状CAD管网及电子地图,省去了CAD文件转ArcGIS文件再转SWMM输入文件的繁琐步骤^[2]。笔者以深圳市光明新区光明北片区为研究区域,采用HYSWMM模型进行水文分析,分别对重现期为1、2、3、5、10年的2h短历时降雨以及重现期为50年的24h长历时降雨进行模拟,分析LID模式对雨水管网运行状态的影响,并与传统开发模式进行对比,以期LID设施的实际应用及城市管网系统的优化提供理论依据。

1 研究区域概况

深圳市光明新区东北部的光明北片区汇水面积约为3.33 km²,属于茅州河一级支流新陂头河流域范围,涉及新陂头河南、北两支,其中1.28 km²位于新头陂南支汇水分区内、2.05 km²位于新头陂北支汇水分区内。该地区降雨量充沛,多年平均降雨量为1 600 mm;年内降雨分布不均,4月—8月的降雨量约占全年降雨量的70%,极端降雨时间较多,降雨峰现时间较早。土壤渗透系数为10⁻⁶~10⁻⁴ m/s,适宜雨水渗透。区域内地下水属上层滞水—潜水及基岩裂隙水类型,近茅洲河谷区域,地势较低、地下水埋深较浅。

2 HYSWMM模型构建

2.1 模型搭建

2.1.1 区域概化

利用研究区规划地形图的高程点数据在HYSWMM中生成地形曲面;结合规划雨水管网图以

及规划土地利用图,将研究区域概化为299个子汇水区、208个连接节点、34个排放口节点以及209段雨水管道。研究区域概化如图1所示。

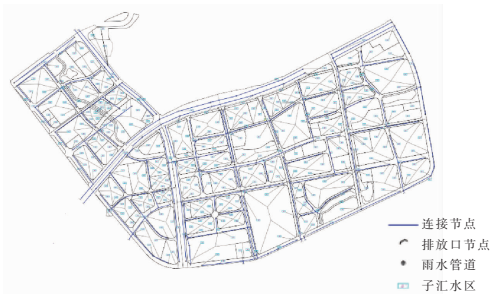


图1 研究区域概化

Fig. 1 Regional generalization of research area

2.1.2 地表产汇流参数设定

研究区域内的下垫面类型概括为屋顶、道路以及绿地,可归纳为不透水地面和渗透地面两大类。子汇水区地面汇流模型采用非线性水库模型,子汇水区产流模型选用Horton模型^[3]。参照HYSWMM手册中的推荐数值确定地表产汇流参数初始值,并使用人工试错法率定模型地表产汇流参数,使用Nash-Sutcliffe系数评价模拟结果与监测结果的误差,采用R²指标来衡量模拟结果与监测结果之间的线性相关程度,最终确定最大、最小入渗率分别为70、20 mm/h,衰减系数为2 h⁻¹,透水和不透水地表糙率分别为0.06和0.01,透水与不透水洼蓄量分别为3.5、1.3 mm。另外,采用动态波法^[4]进行管网系统汇流计算。

2.2 不同重现期下的设计降雨过程线推求

深圳市短历时暴雨强度公式见式(1)。该公式是2015年深圳市气象局等单位结合54年降水资料以及最新技术规范编制,适用于不大于2h的短历时降雨。

$$i = \frac{8.701(1 + 0.594 \lg P)}{(t + 11.13)^{0.555}} \quad (1)$$

式中: i 为降雨强度,L/(s·hm²); P 为重现期,年; t 为降雨历时,min。

依据《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》,以及孙昆鹏等人^[5]对深圳市雨型的分析成果,本研究选用芝加哥雨型。按照深圳市暴雨强度公式,计算出重现期分别为1、2、3、5、10年时,降雨历时2h、5min间隔、雨峰系数 $r=0.4$ 的5种设计降雨过程线。

根据《广东省暴雨参数等值线图》(2003)和《深

圳市城市设计暴雨雨型分析研究》相关结论^[6],确定重现期为 50 年时的最大 24 h 设计降雨量为 411.4 mm。本研究结合《深圳市排水(雨水)防涝综合规划总报告》,选用珠江三角洲 24 h 设计暴雨雨型;综合上述条件确定重现期为 50 年的 24 h 长历时降雨过程线。

2.3 LID 设施控制比例及参数

根据 LID 的适用条件、环境影响、优缺点等要素^[7],并结合下垫面和用地类型,选择下沉式绿地、绿色屋顶以及透水铺装作为研究区域的 LID 设施。参考相关文献^[8]和研究区域 LID 设施实际设计规格,对 LID 设施的参数进行了设置:

① 绿色屋顶。表面层:蓄水深度为 50 mm,植被体积比为 0.2,表面粗糙系数为 0.15,表面坡度为 1%;土壤层:厚度为 100 mm,孔隙率为 0.46,产水能力为 23.2%,枯萎点为 0.116,导水率为 3.3 mm/h,导水率坡度为 15,吸水头为 89 mm;蓄水层:蓄水深度为 50 mm,孔隙比为 0.2,堵塞因子为 0.15,导水率为 1 mm/h;铺装层:厚度为 100 mm,孔隙比为 0.463,不渗透表面系数为 0.232,渗透性为 0.116 mm/h,堵塞因子为 3.3。

② 透水铺装。表面层:蓄水深度为零,植被体积比为 0.4,表面粗糙系数为 0.12,表面坡度为 0.4%;蓄水层:蓄水深度为零,孔隙比为 0.4,堵塞因子为 0.12,导水率为 0.4 mm/h。

③ 下沉式绿地。表面层:蓄水深度为 100 mm,植被体积比为 0.15,表面粗糙系数为 0.24,表面坡度为零;土壤层:厚度为 300 mm,孔隙率为 0.47,产水能力为 31.3%,枯萎点为 0.116,导水率为 3.3 mm/h,导水率坡度为 15,吸水头为 89 mm;蓄水层:蓄水深度为 100 mm,孔隙比为 0.15,堵塞因子为 0.24,导水率为零;铺装层:厚度为 300 mm,孔隙比为 0.469,不渗透表面系数为 0.313,渗透性为 0.116 mm/h,堵塞因子为 3.3。

依据《深圳市光明新区海绵规划》相关要求,研究区域需满足年径流总量控制率不低于 73% 的要求,为此采用《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》提供的方法设计研究区域内的 LID 设施组合方案。首先确定不同类型地块的 LID 设施种类比例,推算地块的最大年径流控制率,再对各地块年径流控制率进行加权平均,判断是否满足项目的总体要求,重复调整优化地块 LID 配

置情况,最终使各地块年径流控制率加权平均值满足规划目标。优化后方案的 LID 设施总面积为 81 hm²,不同 LID 措施的地块指标比例如下:①绿色屋顶,对应的下垫面为建筑(屋顶),面积为 14 hm²,占比为 4.2%;②透水铺装,对应的下垫面为道路及人行道、停车场、广场,面积为 40 hm²,占比为 12.0%;③下沉式绿地,对应的下垫面为绿地、农林用地,面积为 27 hm²,占比为 8.0%。

2.4 模拟过程

基于已构建的 HYSWMM 模型,分别以 2 h 短历时设计降雨(重现期分别为 1、2、3、5、10 年)或 24 h 长历时设计降雨(重现期为 50 年)作为初始条件,模拟研究区域传统开发模式和 LID 模式下的雨水管网运行情况。以区域内雨水管段系统为研究对象,在短历时降雨条件下对区域径流系数进行评估;以 Y76-Y81 管段为局部管段研究对象,其雨水管道原设计降雨重现期为 3 年,管径为 DN800~1350,分别从管道水深、流量、充满度等方面分析 LID 对区域雨水管网系统运行状态的影响。以 Y76-Y81 管段中的连续节点为研究对象,从节点最大水深分析区域部分雨水节点的运行情况;以区域内 Y76-Y81 管段中的连续节点和总排放口节点为研究对象,从节点最大水深、排放口峰值流量控制两方面分析区域总排放口的运行情况。

3 结果与分析

3.1 径流系数评估

基于 HYSWMM 模型,评估了降雨历时为 2 h,重现期分别为 1、2、3、5、10 年(相应降雨量分别为 69.7、82.2、89.5、98.7、111.2 mm)时,LID 模式和传统开发模式下研究区域的径流系数。结果表明,在传统开发模式下,径流系数分别为 0.53、0.59、0.63、0.65、0.67;在 LID 模式下,径流系数分别为 0.38、0.45、0.49、0.53、0.56。可知,在相同重现期条件下,LID 模式下的径流系数均小于传统模式,陈莎等人^[9]采用 SWMM 模型对城市雨水径流系数进行模拟时也得到了类似结果。因此,LID 设施的加入有利于研究区域径流系数的降低,且在低重现期下此效果更为明显。

3.2 雨水管网排水能力评估

在降雨历时为 2 h,重现期分别为 1、2、3、5、10 年的条件下,模拟评估了 LID 模式和传统开发模式的雨水管网运行情况。结果表明,在重现期≤2 年

时,在两种模式下管网运行过程中均未发生溢流现象;对于传统开发模式,排水能力为10年的管段占比为82%,而对于LID模式,排水能力为10年的管段占比为92%,这说明LID设施的加入在一定程度上提高了管道的排水能力,这与许萍等人^[10]的研究结果一致。管网系统中排水能力较小的管段,主要为连接排出口的管段(如区域西北部的西光月一路冠城园区附近管段)和汇水区域较大的管段(区域中部公常路圳美片区管段);建议对LID模式下无法抵御3年一遇降雨的管段进行管径扩大调整。

3.3 雨水管段及节点运行状态分析

3.3.1 雨水管段运行状态分析

选取Y76-Y81管段(Y81为排水口节点),在重现期为2年、降雨历时为2h的条件下,分别模拟LID模式和传统开发模式下管段的最大流量、最大充满度和最大流量发生时间,结果如图2所示。

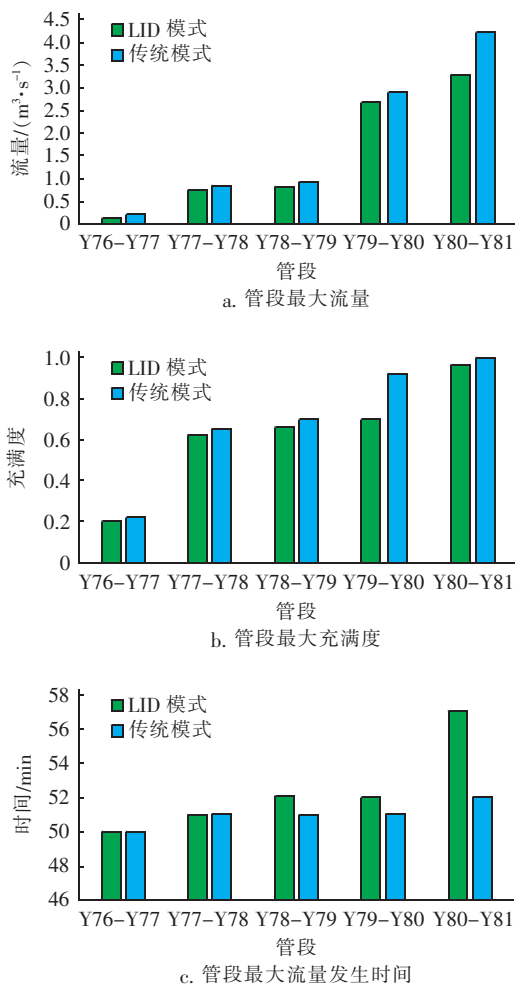


图2 Y76-Y81管段的运行状态

Fig.2 Operation status of Y76-Y81 pipeline section

在两种开发模式下,随着汇水面积的增加,管段从上游至下游的最大流量和最大充满度均相应增加。与传统开发模式相比,LID模式下相同管段的最大流量降低8.3%~21.8%,最大流量发生时间滞后0~5 min,相应管道的充满度亦有所降低,最大降低0.22,其中Y80-Y81出水管段最大流量发生时间明显滞后,主要归因于LID设施对管段上游汇水分区降雨的蓄滞作用^[11]。

3.3.2 雨水节点运行状态分析

在2h短历时设计降雨条件下,分析了Y76-Y81管段中节点的最大水深,结果如图3所示。与传统开发模式相比,在LID模式下,除起始节点Y76外,多数节点最大水深降低0.09~0.5 m,其中Y80、Y81节点为出水管段对应节点,该节点所承担的汇水面积相对更大,因此水深变化最大,这与对应管段的运行状态结果一致。

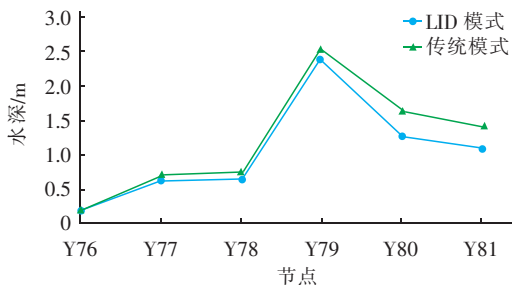


图3 Y76-Y81管段中节点的最大水深

Fig.3 Maximum water depth of nodes in Y76-Y81 pipeline section

在降雨历时为2h,重现期分别为1、2、3、5、10年的条件下,区域内雨水管网34个排放口节点的总径流过程曲线模拟结果如图4所示。可知,在相同重现期下,LID模式的排放口径流发生时间较传统开发模式明显推迟,排放口总峰值流量也显著降低;在重现期分别为1、2、3、5、10年时,LID模式下排放口总峰值流量分别由40.81、56.43、66.24、78.09、95.71 m³/s降至34.32、48.93、58.43、70.31、86.20 m³/s,下降幅度随重现期的增加而逐渐降低,分别为15.90%、13.20%、11.70%、9.96%、9.93%,LID模式在低重现期下的削峰作用更为明显。上述结果归因于雨水径流随重现期的增大而增大,而LID设施蓄滞作用和土壤渗透作用并未变化^[12]。此外,与传统开发模式相比,当重现期≤3年时,LID模式下管网系统的总径流峰现时间会延迟1~3 min;而当重

现期为 5 年或 10 年时,总径流峰现时间则几乎没有差别,这表明 LID 设施的加入在一定程度上有利于雨水管网承载能力的提升,因此在规划设计雨水管网的管径、坡度时,需要考虑 LID 设施对管道流量的影响。

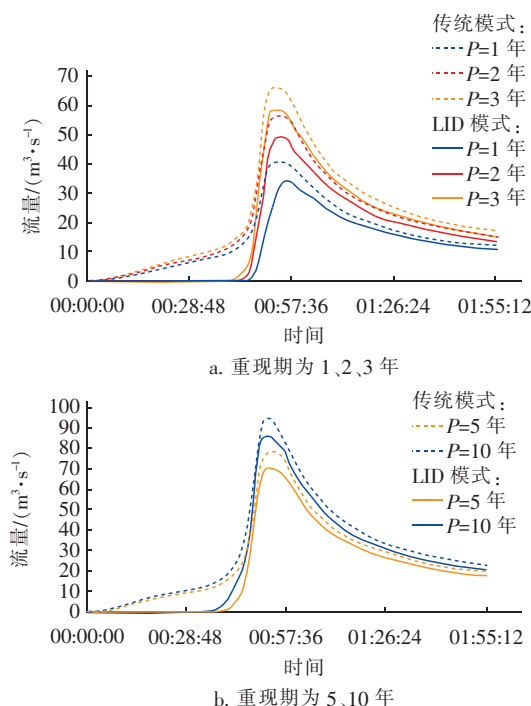


图 4 不同重现期下管网系统排放口的总径流曲线 (短历时降雨)

Fig. 4 Total runoff curve of discharge port of pipeline network system in different return periods (short duration rainfall)

在城市规划建设中,往往需考虑极端降雨条件对城市排水管道的影响。为分析高重现期、长历时降雨过程中 LID 对管道运行的作用效果,模拟了重现期为 50 年、降雨历时为 24 h 时,两种开发模式下管网系统排放口总径流情况,结果如图 5 所示。

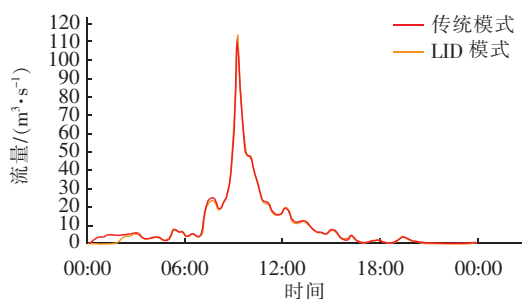


图 5 不同重现期下管网系统排放口的总径流曲线 (长历时降雨)

Fig. 5 Total runoff curve of discharge port of pipeline network system in different return periods (long duration rainfall)

长历时降雨条件下,LID 模式对降雨初期(0~2 h)的雨水径流有一定的抑制作用;而在降雨历时为 9.25 h 时,相比传统开发模式,LID 模式的径流峰值仅由 $115.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 下降至 $113.24 \text{ m}^3/\text{s}$,这是由于在高重现期下,LID 设施对管网系统整体径流量的控制作用微弱,管网也无法满足雨水径流的排放,因此,在高重现期、长历时降雨条件下,还需进一步考虑整个城市大排水体系中河道水系的排水作用。

4 结论

① 基于 HYSWMM 模型,在重现期分别为 1、2、3、5、10 年的 2 h 短历时降雨条件下对研究区域的径流系数进行了评估。与传统开发模式相比,LID 模式下径流系数由 0.53~0.67 降低至 0.38~0.56,表明 LID 设施在一定程度上降低了研究区域的径流系数,且重现期较低时此效果更为显著。

② 对两种开发模式下的雨水管网排水能力分别进行评估。结果表明,LID 设施的加入使排水能力为 10 年一遇的管道比例提升了 10%,雨水管网系统的排水能力有所增强。因此规划设计雨水管网的重现期、管径和坡度时,需考虑 LID 设施加入的影响。对于在 LID 模式下排水能力不足 3 年一遇的部分管段,可考虑适当扩大管径。

③ 在降雨重现期为 3 年、降雨历时为 2 h 的条件下,与传统开发模式相比,LID 模式下各管道最大流量降低 8.3%~21.8%,管道充满度最大降低 0.22。在重现期为 1~10 年的短历时降雨条件下,相比传统模式,LID 模式下水管网排放口峰值流量均有减少,且峰现时间有一定滞后。因此在计算雨水管道设计流量时,应考虑 LID 设施的加入对集水时间参数的影响。

④ 对于重现期为 50 年的 24 h 长历时设计降雨,相比传统开发模式,LID 模式下的峰值流量和峰现时间几乎无差别,表明在极端暴雨情况下 LID 的径流控制作用微弱,需进一步考虑城市大排水体系中河道水系的排水作用。

参考文献:

- [1] 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 Cuiping, Wang Haichao, Tang Deshan. Research progress and development trend of storm water

- management model [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(16): 16–20 (in Chinese).
- [2] 周晓喜. 城市雨水管网模型参数优化及应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Zhou Xiaoxi. Research on Parameter Optimization and Application of Urban Stormwater Pipe Network Model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [3] Jain G V, Agrawal R, Bhandari R J, *et al.* Estimation of sub-catchment area parameters for Storm Water Management Model (SWMM) using geo-informatics [J]. *Geocarto International*, 2016, 31(4): 462–476.
- [4] 任伯帆. 城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
Ren Bozhi. Study on the Urban Design Rainstorm and Rainfall Runoff Calculation Model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004 (in Chinese).
- [5] 孙昆鹏, 许萍, 张雅君, 等. 深圳市道路径流雨水典型污染物特征及其相关性分析 [J]. *市政技术*, 2014, 32(3): 125–128.
Sun Kunpeng, Xu Ping, Zhang Yajun, *et al.* Typical pollutant characteristic and relativity analysis of pavement runoff rainwater in Shenzhen [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2014, 32(3): 125–128 (in Chinese).
- [6] 许超峰. 深圳市城市设计暴雨雨型分析研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
Xu Chaofeng. Design Storm Pattern Analysis in the City of Shenzhen [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018 (in Chinese).
- [7] 邢薇, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 基于低影响开发 (LID) 的可持续城市雨水系统 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(20): 13–16.
Xing Wei, Zhao Dongquan, Chen Jining, *et al.* Sustainable urban rainwater system based on low impact development [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(20): 13–16 (in Chinese).
- [8] 张爽. 基于 SWMM 的海绵城市排水系统模拟计算及分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Zhang Shuang. Simulation and Analysis of Sponge City Drainage System Based on SWMM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [9] 陈莎, 陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 13–19.
Chen Sha, Chen Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 13–19 (in Chinese).
- [10] 许萍, 任恒阳, 徐慧纬, 等. LID 与传统开发模式下水管渠运行状态对比研究 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(15): 127–132.
Xu Ping, Ren Hengyang, Xu Huiwei, *et al.* Comparison of stormwater sewer running state between LID and traditional development mode [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(15): 127–132 (in Chinese).
- [11] 梅胜, 许明华, 周倩倩, 等. 排水管网改造与 LID 径流控制在城市雨洪管理中的应用和组合优化 [J]. *水电能源科学*, 2018, 36(3): 67–70.
Mei Sheng, Xu Minghua, Zhou Qianqian, *et al.* Application and combination strategies of pipe enlargement and LID runoff control measures in urban flood management [J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(3): 67–70 (in Chinese).
- [12] 吴建立, 孙飞云, 董文艺, 等. 基于 SWMM 模拟的城市内河区域雨水径流和水质分析 [J]. *水利水电技术*, 2012, 43(8): 90–94.
Wu Jianli, Sun Feiyun, Dong Wenyi, *et al.* SWMM simulation-based analysis on rainfall runoff and water quality within urban inland river area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2012, 43(8): 90–94 (in Chinese).



作者简介: 曹喆 (1993–), 女, 湖南益阳人, 硕士, 助理工程师, 主要从事海绵城市专项规划编制、排水防涝规划等方面的工作。

E-mail: czhe1993@qq.com

收稿日期: 2019–10–28