

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.23.021

低影响开发设施径流控制效果模拟评价实证研究

蒲政衡¹, 陈正侠¹, 杨萌祺¹, 孟恬园², 潘盛龙³, 贾海峰¹

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 北京分公司, 北京 100081; 3. 青岛市公用事业工程质量安全监督站, 山东 青岛 266071)

摘要: 以青岛市李沧区海绵城市试点区内某排水分区为研究对象,基于MIKE URBAN构建降雨径流模型,并与二维地表漫流模型耦合,进行低影响开发(LID)设施径流控制效果模拟评价的实证研究。采用6场实测降雨数据对模型参数进行率定和验证,纳什效率系数(NSE)均大于0.65,保证了模型的准确性。在重现期为1年、5年和10年的设计降雨情景下模拟分析LID设施的径流控制效果和内涝控制效果。结果表明,当设计降雨重现期为1年时,LID设施对雨水径流总量和峰值的控制效果显著,可达到海绵城市建设目标,但随着降雨强度的增加,LID设施的控制比例降低,这印证了城市内涝控制需要灰绿耦合、系统解决。

关键词: 海绵城市; 低影响开发; MIKE URBAN; 径流控制效果评价

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0134-05

Empirical Study on Simulation and Assessment of Runoff Control Performance of Low Impact Development Facilities

PU Zheng-heng¹, CHEN Zheng-xia¹, YANG Meng-qi¹, MENG Tian-yuan²,
PAN Sheng-long³, JIA Hai-feng¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100081, China; 3. Qingdao Public Utilities Project Quality and Safety Supervision Station, Qingdao 266071, China)

Abstract: To conduct an empirical study on the rainfall runoff control performance of low impact development (LID) facilities, the rainfall runoff model of a drainage area in the sponge city pilot area of Licang District, Qingdao was constructed based on MIKE URBAN and coupled with the two-dimensional surface overflow model. The model parameters were calibrated and validated by measured data of six rainfall events, and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) was all greater than 0.65, indicating that the accuracy of the model was satisfying. The runoff control performance and waterlogging control performance of LID facilities were simulated and analyzed under the design rainfall scenarios with return periods of 1-year, 5-year and 10-year. Under the designed rainfall scenario with return period of 1-year, LID facilities had a significant control effect on the total runoff volume and peak flow, which reached the goal of sponge city construction. However, with the increase of rainfall intensity, the control rate of LID

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070112); 青岛市海绵城市建设技术咨询项目(ZFCG2018000930)

通信作者: 陈正侠 E-mail: chenzhengxia@tsinghua.edu.cn; 贾海峰 E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn

facilities decreased, which also confirmed that urban waterlogging control required to be coupled with gray and green systems.

Key words: sponge city; low impact development; MIKE URBAN; assessment of runoff control performance

城市下垫面对雨水径流的控制是低影响开发(LID)建设绩效评价的核心指标之一^[1]。基于实际监测数据和模型对LID雨水径流控制效果进行模拟分析是目前较为科学且能定量评估的方法^[1]。经过监测数据率定和验证后的模型可靠性高,可以最大限度地降低降雨随机性带来的影响,目前已经在国内外得到了普遍的应用,其中,主流模型包括MIKE URBAN、SWMM、InfoWorks ICM等^[2]。国内的相关研究多围绕SWMM模型展开,但相比于SWMM模型,MIKE URBAN模型可以通过二维水力学模型模拟内涝积水的时空分布,能更直观地反映LID设施对径流水量的控制效果^[3]。

笔者以青岛市李沧区某个经LID改造的完整排水分区为研究对象,基于MIKE URBAN构建降雨径流模型,模拟分析LID改造前后不同设计降雨情景下的径流过程和积水情况,客观评价LID建设对降雨径流的控制效果,以期定量考核海绵城市整体建设效果提供技术支撑。

1 研究区域概况

研究区域下垫面分布如图1所示。



图1 研究区域下垫面分布示意

Fig.1 Schematics of underlying surface of study area

研究区域位于青岛市李沧区北部,总面积约为98.6 hm²,容积率为1.2,绿化率约为36%;地势北高南低、西高东低,西北部是低山丘陵,最高处高程为154.3 m,中部地势平坦,最低处高程为21.37 m,平均坡度约为2.58%。区域内的雨水系统在车行道上设置雨水口,建筑屋面落水管接入雨水口,雨水汇合至室外雨水管网后就近排入市政管网。区域内设置的LID设施包括下凹式绿地、雨水花园、植草沟、透水铺装4种。

2 模型构建

2.1 模型概化

雨水管网模型概化如图2所示。

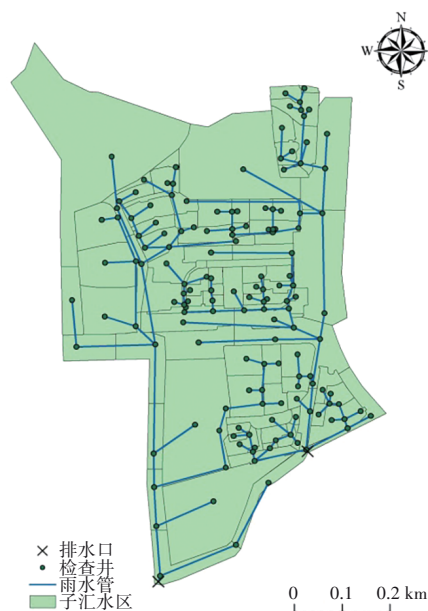


图2 研究区管网概化示意

Fig.2 General map of the pipe network in study area

根据研究片区内的下垫面类型,雨水管网分布以及小区分界线将研究区域划分成93个汇水区、150条雨水管道、149个管网节点,每个汇水区中的径流就近流入附近的检查井,研究区域共有两个排口,每个排口处均布置一台THWater智慧排水监测流量计,配合研究区域内的一台公用雨量计获得模型率定和验证所需的数据。

2.2 模型参数选择

构建降雨径流模型需要的参数如表1所示。其中除了部分模型控制参数需要通过率定和验证来确定以外,其他数据参数均来源于研究区域的基础资料。不透水率根据子汇水区内不同下垫面的面积加权平均计算得出,初损、衰减系数、汇流时间、时间-面积曲线系数参考文献中的数值范围进行率定^[4]。参数初始取值如下:透水面和不透水面的降雨初损分别取4、8 mm,衰减系数取0.9,透水面和不透水面的不透水率分别取0和1,屋顶、透水铺装、绿地、不透水面的初损分别取2、5、5、1 mm,时间-面积曲线系数取0.33。

表1 模型参数清单

Tab.1 Model parameter list

项 目	数据类型
节点参数	节点类型、井顶标高、井底标高、节点直径
管线参数	管道类型、管径、上下游管内底标高
汇水区参数	汇水区面积、中心点坐标、土地利用类型
模型控制参数	降雨数据、流量监测数据
模型运行参数	不透水率、初损、衰减系数、汇流时间、时间-面积曲线系数

2.3 参数率定与验证

2.3.1 降雨事件选择

《英国排水系统水力模型工程师职业规范》规定,单次降雨事件的累计降雨量应大于5 mm、峰值降雨强度应大于6 mm/h,且降雨事件之间的干期较长,能使土壤恢复到干旱时的状态^[4]。参考上述要求,选取2018年5月16日、6月13日、7月9日、7月23日、8月20日及8月29日这6场降雨事件作为模型率定和验证的边界条件。

2.3.2 模型率定

Moriasi 等人^[5]根据纳什效率系数(NSE),将模型的可靠程度分为4类:当 $NSE \leq 0.5$ 时,认为模型的可靠程度不合格;当 $0.5 < NSE \leq 0.65$ 时,认为模型基本可靠;当 $0.65 < NSE \leq 0.75$ 时,认为模型比较可靠;当 $0.75 < NSE \leq 1$ 时,认为模型非常可靠。本研究基于实测数据对降雨径流模型进行参数率定和模型验证,首先选用2018年6月13日、7月9日和7月23日3场降雨事件进行参数率定。参数率定结果如下:绿地和不透水面的初损分别为4、1 mm,衰减系数为0.9,屋顶、绿地、透水铺装和不透水面的汇流时间分别为2.4、6、6、1.2 min,汇流时间折算系数为

0.192,时间-面积曲线系数为0.33。

2018年6月13日降雨事件中排口流量过程的模拟与实测结果对比如图3所示。可以看出,模拟流量曲线和实测流量曲线基本保持一致。统计分析得到,经2018年6月13日、7月9日和7月23日这3场降雨事件率定后模型的NSE分别为0.76、0.76和0.78,均大于0.75,因此认为模型非常可靠^[5]。

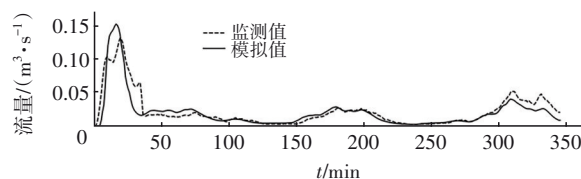


图3 2018年6月13日降雨事件的模型率定结果

Fig.3 Model calibration results of rainfall event on June 13, 2018

2.3.3 模型验证

模型参数率定后,选取2018年5月16日、8月20日和8月29日3场降雨事件对模型参数进行验证,其中,8月20日降雨事件的模型验证结果如图4所示。可以看出,模拟流量曲线和实测流量曲线基本吻合。3场降雨事件验证模型的NSE分别为0.76、0.76和0.69,均大于0.65,说明模型的模拟精度较高,与研究区域的实际情况较为吻合,可以准确反映研究区域内管网的真实运行状况,因此认为模型整体比较可靠^[5]。

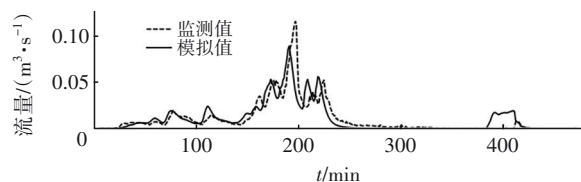


图4 2018年8月20日降雨事件的模型验证结果

Fig.4 Model verification results of rainfall event on August 20, 2018

2.4 降雨条件设计

结合青岛市雨水管网的重现期设计标准,考虑到青岛市降雨存在年内水量分配不均以及易受台风过境影响的特点,采用芝加哥雨型,生成1年和5年一遇的短历时降雨以及10年一遇的长历时强降雨,分别代表大雨、暴雨和大暴雨三种情景。其中,大雨情景的设计重现期为1年一遇,降雨历时120 min,降雨量为24.964 mm,符合海绵城市设计中的LID水量控制标准;暴雨情景的设计重现期为5年一遇,降雨历时120 min,降雨量为58.498 mm;大暴

雨情景的设计重现期为10年一遇,降雨历时300 min,降雨量为87.836 mm,模拟台风过境等极端天气条件下的降雨情景。

不同情景下降雨过程曲线的设计参考青岛市区的暴雨强度公式[见式(1)],具体如图5所示。

$$q = \frac{1909.009(1 + 0.997 \lg P)}{(t + 10.740)^{0.738}} \quad (1)$$

式中: q 为设计降雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为设计降雨重现期,a; t 为降雨历时,min。

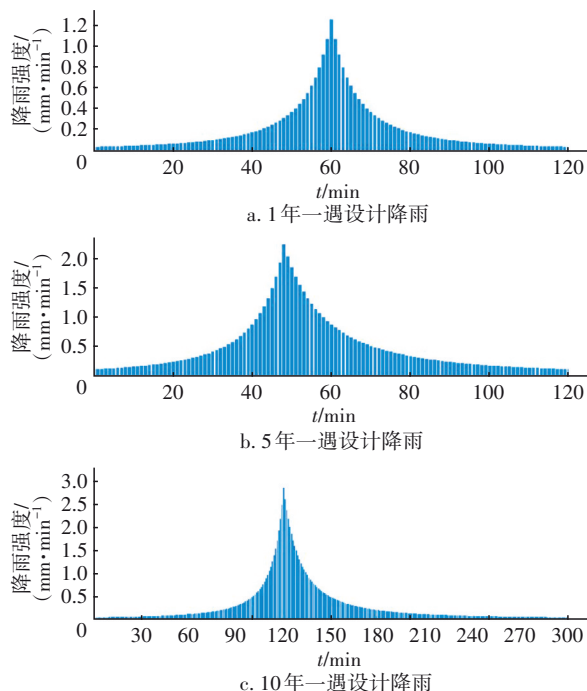


图5 设计降雨过程线

Fig.5 Designed rainfall process

3 降雨情景分析

3.1 径流量模拟

分别模拟了3种设计降雨情景下研究区域在LID设施建设前后的径流过程,如图6所示。

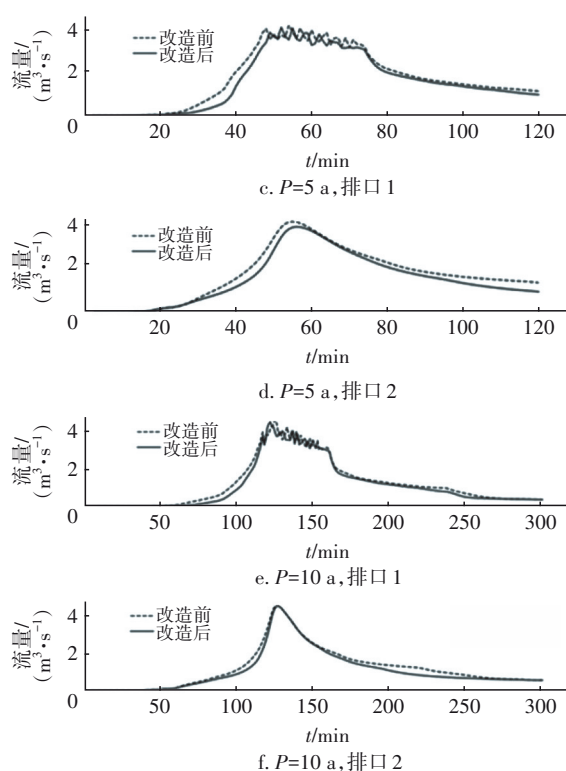
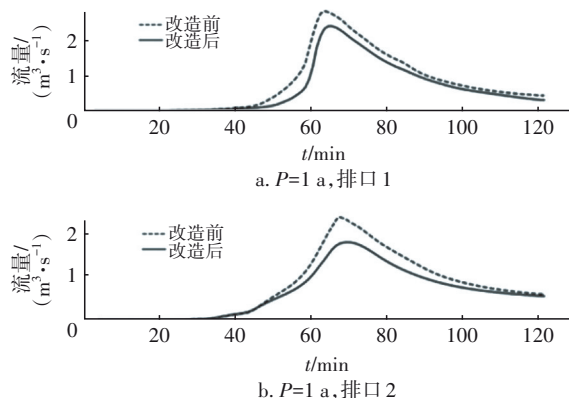


图6 不同设计降雨重现期下LID设施建设前后的径流过程
Fig.6 Runoff process before and after construction of LID facilities under different design rainfall return periods

对比两个排口的径流峰值和径流总量可以发现,经LID设施改造后,区域径流总量和径流峰值都得到了不同程度的削减,但峰现时间变化不大。在1、5、10年一遇降雨情景下,两个排口的径流总量削减率分别为19.78%和17.58%、9.55%和11.99%、8.82%和10.87%,径流峰值削减率分别为15.60%和21.88%、2.31%和5.79%、2.29%和1.05%,1年一遇降雨情景下的径流总量和径流峰值削减率显著高于5年和10年一遇降雨情景下的。因此,在城市雨洪管理中遇到重现期在5年以上的强降雨情景时,还需要结合管网排水、河道泄洪等措施来系统化调控。

3.2 内涝风险模拟

分别模拟了3种设计降雨情景下研究区域在LID设施建设前后的积水情况,结果如图7所示。《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中提到,道路积水深度超过0.15 m会引起交通瘫痪,阻碍城市居民的正常出行,因此将0.15 m作为界定积水深度是否妨碍公共秩序的临界值,将积水深度的范围划分为5类:0~0.15、0.15~0.3、0.3~0.6、0.6~1、>1 m。

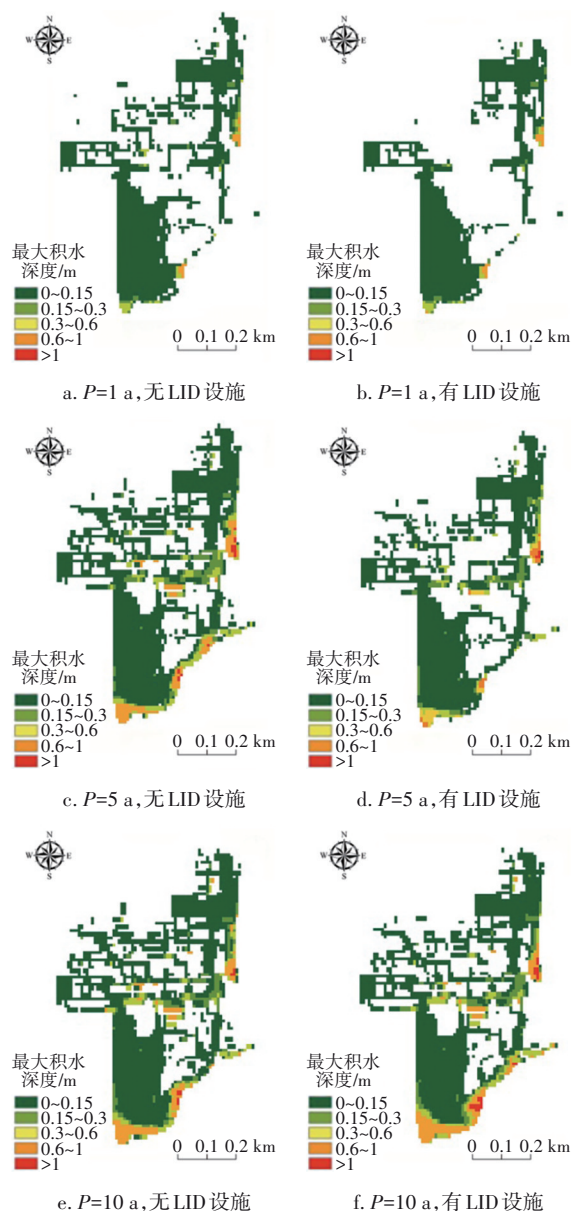


图7 不同设计降雨重现期下最大积水深度模拟结果

Fig.7 Simulation results of maximum ponding depth under different design rainfall return periods

分析图7可知,在1、5、10年一遇降雨情景下,LID设施建设前平均最大积水深度分别为0.019、0.097、0.140 m,建设后分别为0.017、0.053、0.102 m,建设LID设施对平均最大积水深度的削减率分别为10.53%、45.36%和27.14%,进一步说明LID设施在减缓城市内涝方面有较好的调控作用。

4 结论

① 相比传统开发模式,建设LID设施后对研究区域的径流总量和峰值均有不同程度的削减作

用,在1年一遇设计降雨情景下,两个总排口的径流总量削减率分别为19.78%和17.58%,径流峰值削减率分别为15.60%和21.88%,显著高于5年和10年一遇设计降雨情景下的。

② 随着设计降雨重现期的增大,LID设施对径流总量以及峰值的削减率逐渐递减,说明LID设施对降雨径流的控制效果存在局限性,解决城市内涝需要灰绿设施系统的有机结合。

③ 相比传统开发模式,建设LID设施对城市内涝有一定的缓解作用,在1、5、10年一遇设计降雨情景下,研究区域内的平均最大积水深度分别降低了10.53%、45.36%和27.14%。

参考文献:

- [1] 宫永伟,刘超,李俊奇,等.海绵城市建设主要目标的验收考核办法探讨[J].中国给水排水,2015,31(21):114-117.
GONG Yongwei, LIU Chao, LI Junqi, et al. Discussion on acceptance evaluation method of main objectives for sponge city construction [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21):114-117 (in Chinese).
- [2] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(3): 394-405.
- [3] BISHT D S, CHATTERJEE C, KALAKOTI S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study [J]. Natural Hazards, 2016, 84(2):749-776.
- [4] LIN F, CHEN X W, YAO H X. Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in "goodness-of-fit" measures for daily runoff simulation with SWAT [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017, 22(11): 5017023.
- [5] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASAE, 2007, 50(3): 885-900.

作者简介:蒲政衡(1997-),男,甘肃定西人,博士研究生,研究方向为城市雨洪管理。

E-mail:pzh15@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2019-12-04

修回日期:2020-05-25

(编辑:刘贵春)