

城市雨水管理

基于监测与模拟的海绵城市典型项目效果评估

郭效琛¹, 杜鹏飞¹, 辛克刚², 李萌³, 杨婷婷³, 郑钰¹

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 青岛市城乡建设委员会, 山东 青岛 266071;

3. 北京清环智慧水务科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 针对海绵城市建设效果定量化考核要求,选取典型海绵改造项目,通过在线监测+模型模拟的方式,对项目的关键控制指标即径流总量控制率进行计算与分析。案例分析结果表明,通过设置合理的监测方案,可以获取有效的监测数据,不仅可支持监测期间项目径流总量控制率的计算分析,还可对模型关键参数进行率定与验证。利用率定后的模型对典型降雨进行模拟,计算场次径流控制率;结合长时间连续模拟,进一步分析评估径流总量控制率。综合利用“监测+模拟”的方法,可提高对典型项目径流总量控制率计算的准确性和科学性,进一步支持海绵城市建设效果的定量化考核与评估。

关键词: 海绵城市项目评估; 径流总量控制率; THWater 在线监测; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0130-05

Performance Evaluation of Typical Projects in Sponge City Based on Monitoring and Simulation

GUO Xiao-chen¹, DU Peng-fei¹, XIN Ke-gang², LI Meng³, YANG Ting-ting³,
ZHENG Yu¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Qingdao Urban-rural Development Committee, Qingdao 266071, China; 3. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech Co. Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In view of the quantitative evaluating requirement of sponge city construction, the key control index, namely the total runoff capture ratio, was calculated and analyzed through on-line monitoring and simulation in a typical sponge project. The results of the case study showed that effective monitoring data could be obtained by setting reasonable monitoring plan. The data could not only support the calculation of total runoff capture ratio during the monitoring period, it could also be used to calibrate and verify the key model parameters. The verified model was used to simulate the typical rainfall and calculate the rainfall event capture ratio. Combining with the long-term continuous simulation, total runoff capture ratio was further analyzed. The comprehensive use of “monitoring + simulation” method can improve the accuracy and scientificity of calculating the total runoff capture ratio of typical projects, and further support the quantitative assessment and evaluation of sponge city construction effect.

Key words: evaluation of sponge project; total runoff capture ratio; THWater on-line monitoring; SWMM

海绵城市建设的核心目标之一即控制城市雨水径流、缓解城市内涝问题。在《海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)》中,径流量的控制也是核心评价指标之一。因此对于海绵城市建设效果的考核评估,要着重关注雨水径流的控制情况^[1-2],在对各海绵项目径流总量控制率进行计算分析的基础上,对海绵城市示范区整体的径流控制效果进行评估。利用监测与模拟联合法进行径流总量控制率的计算,是较为科学准确而且相对省时、省力的方法^[2]。模型的应用可避免降雨随机性带来的影响,但需要以准确的监测数据为基础,对模型进行率定和验证以确保模型的可靠性。该方法在发达国家已得到了普遍应用,在我国未来海绵城市评估及雨洪管理中也将成为主要方法。笔者根据“监测+模拟”的基本思想,以某海绵城市典型项目为案例进行应用研究。通过为期半年的雨季在线监测数据积累,对模型参数进行率定和验证,确保模型的可靠性后,进行不同降雨情景下的场次模拟和长时间连续模拟,从而能够相对准确地计算项目的径流总量控制率,客观评估项目的建设效果,作为海绵城市整体建设效果定量化考核的基础。

1 研究区域概况

某海绵试点城市典型项目属于住宅小区海绵改造类项目,占地面积约为 11 262 m²。项目设计改造植草沟、下沉式绿地、生物滞留设施面积为 600 m²,改造透水车行道为 2 244 m²,改造透水铺装面积为 2 159 m²,改造建筑屋面面积为 1 840 m²(其中包括雨落管雨水收集面积约为 1 095 m²、屋顶花园为 745 m²)。对现状雨水暗渠西侧雨水管网进行改造,同时在现状雨水暗渠内新设 1 根 DN300 雨水管,将其接入蓄水模块,回收利用场地雨水。海绵改造设施分布如图 1 所示。

根据海绵城市示范区的整体规划,该项目的规划目标为年径流总量控制率达到 80%,改造后低影响开发措施(LID)的总调蓄容积为 190 m³,具体如下:①雨水花园,面积为 600 m²,平均下凹深度为 0.2 m,径流系数为 0.15,调蓄容积为 60 m³;②透水铺装,面积为 2 244 m²,径流系数为 0.55;③透水路面,面积为 2 159 m²,径流系数为 0.45;④雨水桶,调

蓄容积为 30 m³;⑤屋顶花园,面积为 745 m²,径流系数为 0.4;⑥雨水回用模块(兼蓄水),调蓄容积为 100 m³。通过各项 LID 措施的调蓄容积,反算设计降雨量,得出经 LID 措施改造后,本地块控制的设计降雨量为 44.8 mm,对应的年径流总量控制率为 86.4%,可满足规划指标要求。

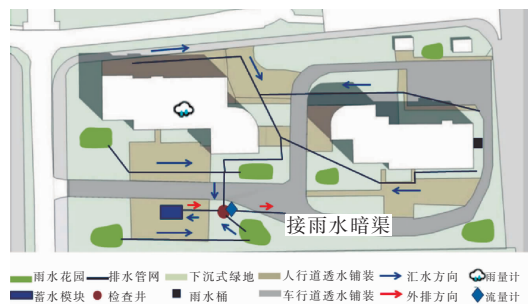


图1 海绵设施总体布局

Fig.1 Layout of sponge installations

2 在线监测及数据分析

2.1 监测方案

根据海绵改造设计方案,项目内的雨水径流优先进入雨水花园与蓄水模块进行调蓄净化,当降雨超过雨水花园与蓄水模块的控制能力后进入雨水暗渠排出场地。结合现场踏勘情况,在地块西侧屋顶安装雨量计,进行雨量的监测分析;在雨水花园与蓄水模块外排出口安装流量计进行项目外排流量的监测,监测点布置如图 1 所示。以雨量监测数据为背景,根据外排口流量的监测数据,可计算得到项目的径流总量控制率。

2.2 监测设备

基于海绵城市监测需求和现场实际工况,选用的设备应根据排水管网多种不同运行工况进行专业优化,以获得有效的监测数据;应使用产品级的整机设备,而不是组装式的拼凑设备,从而符合排水管网防潮防腐防腐的技术要求;监测设备应和数据网关实现软硬件一体化,保证监测数据采集与传输的畅通性和持续性;应便于进行监测点的更换和监测点现场的调整优化,尽可能减少现场的施工量和施工时间,有利于监测点的更换。

本项目选用 THWater 智慧排水监测流量仪作为流量监测仪表,可用于排水管道、排水渠、排水口

等不同工况的在线流量测定,适合浅流、非满流、满流、管道过载等状态的流速、液位和流量的在线监测,可测逆流,测量数据可以本地储存,也可以通过无线网络发送到统一数据网关。另外,选用 THWater 智慧雨量监测仪作为降雨监测仪表。通过使用高可靠性的雨量筒,实现降雨过程中降雨量的在线监测与自动记录,采集分钟级降雨过程数据,测量数据可本地储存和无线发送。

2.3 监测数据

THWater 智慧雨量监测仪安装时间为 2017 年 4 月 21 日,截止到 2017 年 11 月 17 日共采集 210 d 降雨数据,累积降雨量为 577.0 mm。在这期间所监测到的降雨多为中小型降雨,其中降雨量大于设计目标 44.8 mm 的降雨总共 4 场,分别在 7 月 25 日、7 月 31 日、8 月 1 日和 8 月 5 日,对应的日累计降雨量分别为 48.5、46、49 和 65 mm。

地块内雨水花园与蓄水模块总排口的 THWater 智慧排水监测流量仪安装于 2017 年 4 月 21 日,截止到 2017 年 11 月 17 日,逐日累计流量监测数据如图 2 所示。可以看出,在降雨量 < 44.8 mm 设计控制雨量的条件下,地块的雨水径流由雨水花园和蓄水模块进行调蓄、净化、下渗、回用等,末端排口未监测到出流量,即对全部雨水径流进行了有效控制。

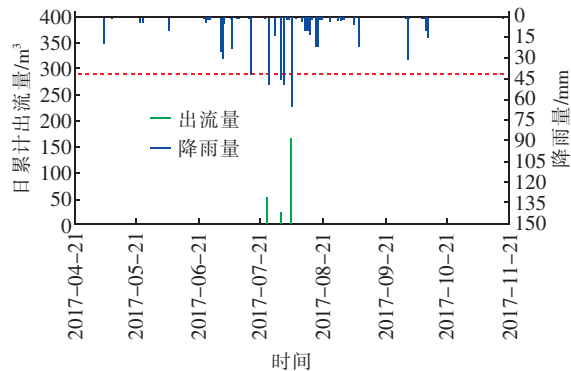


图2 总排口流量与降雨量的关系

Fig. 2 Relationship between flow and rainfall at total discharge port

在降雨量 > 44.8 mm 的 4 场降雨中,有 3 场降雨监测到排口有出流,分别为 7 月 25 日、7 月 31 日和 8 月 5 日,排口累计出流量分别为 50、21.5、165 m³。8 月 1 日的降雨量虽然大于 7 月 25 日和 31 日,但由于当日降雨较为分散,无较强集中降雨,场地内各类 LID 措施能充分发挥对雨水的蓄积作用,因而排口未监测到明显出流。

3 模型建立与校核

3.1 模型搭建

选用 SWMM 暴雨模型对研究区域进行模拟分析,基于竖向高程、管网数据及下垫面等资料,对场地内管网拓扑结构、方向及连接性进行梳理,建立 SWMM 模型,见图 3。共包含 28 个雨水检查井,管网总长度约为 542 m,管径为 DN200 ~ 300;并根据当地资料和文献资料设置模型初始参数。

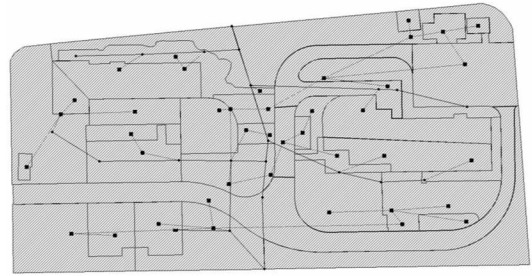


图3 研究地块的 SWMM 模型概化示意

Fig. 3 Generalized diagram of SWMM for study area

3.2 模型的率定与验证

选取 2017 年 8 月 5 日的监测数据进行参数率定,并利用 7 月 25 日的相关数据进行验证。水文参数通过复合型混合演算法 (SCEUA) 进行率定。使用排口流量变化曲线作为观测参数,运算参数选择最大迭代数为 500、复合型数位为 10、迭代数为 100、容许值为 0.001、收敛域值为 0.001。经过迭代计算,主要参数的率定结果如下:起始入渗率为 68.312 mm/h、最终入渗率为 3.856 mm/h、入渗递减率为 4.393 h⁻¹、不透水区的曼宁系数为 0.016、透水区的曼宁系数为 0.112、不透水区的洼蓄量为 2.294 mm、透水区的洼蓄量为 4.832 mm。

率定后模型模拟值与实测值的对比见图 4。

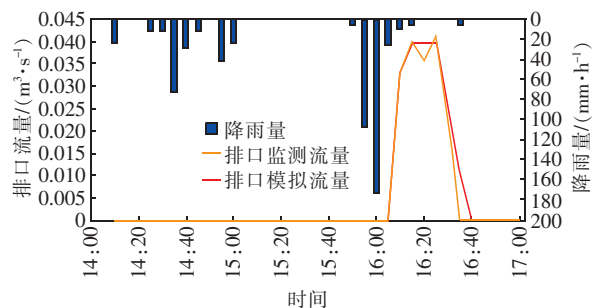


图4 率定后模型模拟值与实测值的对比

Fig. 4 Comparison of simulated data with monitoring data of calibrated model

率定后模型模拟值与实测值的纳什效率系数为

0.89,说明模型的可靠性较高,可利用模型对该项目的径流总量控制情况作进一步的分析研究。

4 结果与讨论

4.1 监测期径流总量控制率的计算

利用监测期内的雨量和流量监测数据,可对场地内的径流总量控制率进行计算,公式如下:

$$\alpha = \frac{10 \times \sum_{i=0}^n R_i \cdot A - \sum_{0 \leq i \leq n} Q(i)}{10 \times \sum_{i=0}^n R_i \cdot A} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为径流总量控制率; R_i 为评估期内第*i*时间段的降雨监测量,mm; A 为片区对应的汇水区面积,km²; $Q(i)$ 为评估期内第*i*时间段的排口累计监测流量,m³。

2017年4月21日—11月17日,研究区的累计监测流量为236.5 m³,结合本段时间内的降雨量与汇水区面积,根据式(1)计算得出,评估期内的径流总量控制率约为96.4%。该监测时间段主要覆盖雨季,大于设计雨量44.8 mm的降雨有4场,对应最小外排产流的降雨量为46 mm,对应年径流总量控制率约为87.3%,满足LID措施设计目标(86.4%)要求。

由于监测期较短,覆盖的场次降雨有限,因而基于典型监测数据对模型参数进行率定,利用模型模拟支持更为全面和长时期的项目建设效果评估。

4.2 短历时场次降雨模拟

4.2.1 降雨事件确定

采用项目所在地区的暴雨强度公式,如式(2)所示。并根据研究区域的降雨特点,选用芝加哥雨型,将雨峰系数*r*设为0.4,降雨历时取120 min。

$$q = \frac{4\,336.99(1+0.831\lg P)}{(t+20.54)^{0.878}} \quad (2)$$

式中: q 为暴雨强度,L/(s·km²); P 为降雨重现期,年; t 为降雨历时,min。

将降雨重现期分别设为1、2、3和5年,总降雨量分别为40.61、49.28、56.72、64.20 mm,平均降雨强度分别为20.3、24.6、28.4、32.1 mm/h,峰值降雨强度分别为119.4、155.4、176.4、202.8 mm/h。

4.2.2 不同重现期下的模拟结果分析

在不同重现期降雨条件下,利用率定后的SWMM模型进行模拟,模型在不同重现期降雨下均运行成功,且误差均控制在10%以内。根据模拟得到的区域内径流总量和排口总流量,对径流总量控

制率进行计算,如表1所示。

表1 不同重现期下径流总量控制率模拟结果

Tab.1 Control ratio of total runoff under rainfalls with different return periods

重现期/ 年	累计降雨 量/mm	径流总量/ m ³	排放总量/ m ³	径流总量控 制率/%
1	40.61	568.91	0	100
2	49.28	663.19	38	94.3
3	56.72	714.47	43	94.0
5	64.20	779.08	73	90.6

在降雨重现期为1年一遇条件下,累计降雨量小于设计降雨量44.8 mm,外排口没有出流,径流总量控制率为100%;当降雨重现期为2年一遇时,累计降雨量超过44.8 mm,有外排流量。随着降雨强度的增大,该项目的径流总量控制率降低,但在5年一遇的降雨条件下场次径流控制率仍在90%以上。

4.3 全年连续模拟结果分析

选择2012年全年降雨数据对研究区域进行长时间连续模拟。2012年全年累计降雨量为632.9 mm,以小到中雨为主,其中大于设计降雨量44.8 mm的降雨仅两场:2012年7月10日和8月3日,对应的降雨量分别为54.2和67 mm。

利用模型进行全年降雨的连续模拟,模拟结果显示,项目区域内所产生的总径流量约为7 128 m³,全年总外排量为245.7 m³,径流总量控制率约为96.6%。其中外排流量主要产生在7月10日和8月3日这两场降雨过程中。

4.4 项目效果评估与分析

综上,通过实际监测数据和模型模拟相结合的方式对该项目的径流总量控制率进行计算,实测雨季、短历时场次降雨和全年连续模拟得到的结果显示,在不同降雨情景下,项目的径流总量控制率都在90%以上,海绵改造措施在径流水量控制方面具有较好的效果。

2017年实际监测期的径流总量控制率略低于2012年全年的模拟结果,这主要是由于该项目所在地春冬季不仅累计降雨量小且无短时强降雨,基本不产生外排流量,实际监测期主要覆盖的是夏秋季,因而计算得到的径流总量控制率略低于2012年全年的模拟结果。

从全年降雨强度来看,大部分为中小型降雨,强度小于2年一遇,在小降雨下产生的径流可被完全控制,径流控制率为100%,因而2年一遇或3年一

遇的场次径流控制率会低于2017年雨季监测和2012年全年模拟的结果。

在监测期内按照式(1)计算径流总量控制率为96.4%的情景下,根据年径流总量控制率的概念,对应的是87.3%,高于设计目标86.4%,可以满足规划设计的要求。由于年径流总量控制率实际上是与降雨强度相关,需要通过日降雨量统计折算,对于场次降雨则难以直接对应准确的年径流总量控制率,但是根据径流控制情况,可以整体判断项目建设效果。根据年径流总量控制率的含义,利用模型模拟时,需要更长时间的模拟,且涵盖的日降雨量在设计降雨量附近相对连续,则可得到项目产流对应的最小降雨量。

5 结论

利用“监测+模拟”的方法,不仅可根据在线监测数据对项目实际监测期内的径流总量控制率进行计算,还可对模型进行率定和验证,通过模拟,分析不同降雨情景和长时间尺度下的径流总量控制率,从而更加准确、客观地评估海绵项目在径流量方面的控制效果。

对某海绵试点城市典型项目进行分析,实际监测期内的径流总量控制率为96.4%,对应的年径流总量控制率为87.3%,高于设计目标值86.4%。利用率定后的模型,在不同雨强下进行短历时场次降雨的模拟,当重现期为1、2、3和5年时,径流总量控制率分别为100%、94.3%、94.0%和90.6%;利用2012年典型年的降雨数据进行全年连续模拟,得到该项目地块的径流总量控制率约为96.6%。

基于监测与模拟联合的方法,通过关键管网节点、区域排口的在线监测数据对区域模型进行率定,可进一步对海绵试点区的径流总量控制率进行计

算,支持海绵城市建设效果的定量化考核。

参考文献:

- [1] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水, 2015,31(8):6-12.
Li Junqi, Wang Wenliang, Che Wu, et al. Explanation of *Sponge City Development Technical Guide*: Regional division for total rainfall runoff volume capture target[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8):6-12 (in Chinese).
- [2] 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).



作者简介:郭效琛(1992-),女,山西太原人,博士研究生,研究方向为城市雨洪管理。

E-mail: guoxiaochen_92@163.com

收稿日期:2018-11-12