

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.018

北京某区域低影响开发措施实施效果分析

苏东霞, 吕放放, 刘学锋, 仲航, 任丽艳, 周童心
(北京北排水务设计研究院有限公司, 北京 100124)

摘要: 以北京市某新建区域的雨水系统为例,利用 InfoWorks ICM 水力评估软件建立区域地块及周边市政设施的一维雨水系统模型,对区域开发前后的雨水外排量及其排入的市政管线运行情况进行模拟分析。为使地块开发后外排水量满足建设区外排水量的要求,以及不对其排入的市政管网运行造成影响,借鉴海绵城市建设理念,提出了几种雨水排除及调蓄的低影响开发方案,并进行综合分析比较,得出可行的区域建设方案。结果表明,下凹式绿地、透水路面等“绿色”低影响开发措施可削峰,“灰色”调蓄池既可削峰又可错峰,且相同容积下离线调蓄池的运行效果较在线调蓄池更优,结合项目实际情况进行“灰”“绿”结合更有利于控制雨水外排。该研究提供了一种区域雨水外排评估方法及低影响开发措施在区域中实施的思路。

关键词: 排水系统; 低影响开发; 雨水外排; InfoWorks ICM; 海绵城市; 评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0110-06

Analysis on Implementation Effect of Low Impact Development Measures in a Region of Beijing

SU Dong-xia, LÜ Fang-fang, LIU Xue-feng, ZHONG Hang, REN Li-yan, ZHOU Tong-xin
(BDG Water Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: A one-dimensional pipe network system model of a newly built regional rainwater system and surrounding municipal facilities in Beijing was established by using hydraulic evaluation software of InfoWorks ICM, and the discharge amount of rainwater and the operation of the receiving municipal pipeline before and after regional development were simulated. In order to make the drainage amount of rainwater after development meet the requirements and not affect the operation of the municipal pipe network, several low impact development schemes of rainwater drainage, regulation and storage were proposed based on the construction concept of sponge city, and feasible regional construction schemes were obtained through comprehensive analysis and comparison. Green low impact development measures like sunken lawn and permeable pavement could cut the peak flow. Gray storage tank could cut and delay the peak flow, and the off-line storage tank with the same volume had a better operational performance than that of the online storage tank. Therefore, the combination of gray and green measures based on the actual situation of the project was more conducive to the control of rainwater drainage. The study provides an evaluation method of regional rainwater discharge and an idea of implementing low impact development measures in regional development.

Key words: drainage system; low impact development; rainwater discharge; InfoWorks ICM; sponge city; evaluation

在当前城市规模不断扩大的进程中,新建小区及新开发区域大量增加,由于地块开发后硬化面积增多导致其径流系数变大,进而造成雨水外排量增加,这势必会造成其接入的外部市政排水管线负荷增加甚至超负荷运行;另一方面,随着区域排水标准的提高,原有的市政管线已经不能满足现有的设计标准。因此,外部市政管线是否有能力接纳地块改造后排入的雨水量,以及改造后地块雨水的控制利用是否满足规划和设计的规范标准要求,可采用哪些改造措施以及效果如何,这些问题均需要进行科学地分析与验证。国内已有不少学者利用 SWMM、InfoWorks 等软件对城市排水系统进行模拟研究^[1],而针对以上问题进行的新开发或改扩建区域排水系统的模拟分析及外部市政管线接入能力的评估研究较少。笔者以北京市某新建小区为研究实例,借助 InfoWorks ICM 软件建立一维雨水系统模型并进行模拟评估,以期为新开发或改扩建区域的低影响开发方案的制定及区域雨水外排评估提供参考。

1 研究区域概况

研究区域为北京市丰台区某新建小区,建设用地面积为 2.352 hm^2 ,开发前主要为绿地,绿地面积约为 $21\,168 \text{ m}^2$ 、占比约为 90%,屋面和道路面积均约为 $1\,176 \text{ m}^2$ 、占比均约为 5%。

测绘数据和现场调查显示,在项目东侧的市政道路有一条管径为 800 mm 的雨水管线,流向由南向北,区域内的雨水拟排入该雨水管线。接入井上游的外部管线集水面积为 10.78 hm^2 ,下垫面分为一般地块、大片绿地、大片广场和普通居住小区四类,面积分别为 3.20 、 1.39 、 5.63 、 0.56 hm^2 。

该外部管线原设计标准为 1 年一遇,新的规划设计标准为 3 年一遇,而整个外部管线未实现规划,新建小区按 3 年一遇的设计标准执行,同时还需满足外排水量的要求,所以需采取低影响开发(LID)措施减少雨水外排量,通过数学模拟来实现水力评估,使其排水满足规划和设计的规范标准要求。

2 区域模型的构建及参数选择

2.1 排水模型的构建

研究区域内部及周边的排水系统数学模型构建过程主要包括:①数据导入,将区域及周边的管网数据导入模型软件并进行检查与修正,确保数据真实有效;②集水区划分,采用泰森多边形法进行划分,并利用用地红线及建筑总平面图进行调整;③集水

区设置,对地表类型进行解析,从而能够对不同表面产、汇流进行精细化地模拟^[2]。本研究将城市下垫面划分为四类:道路、房屋、绿地和透水铺装。每个集水区下垫面的占比根据卫星图及测绘图采用面积比例法进行设置。

2.2 水文参数及降雨设置

对于硬化表面(房屋和道路),根据硬化铺装的径流系数变化特征(径流系数在降雨中很快达到一个固定的值),产流模型采用固定径流系数模型,径流系数取 0.9;汇流模型采用 SWMM,曼宁粗糙系数取 0.013。对于可渗透表面(透水铺装、透水路面及绿地),由于其径流系数在降雨中不断变化,应采用可变径流系数模型,故产流模型采用霍顿渗透模型,透水铺装和透水路面的初渗率、稳渗率、衰减系数分别取 65 mm/h 、 2.5 mm/h 、 2 h^{-1} ,绿地的初渗率、稳渗率、衰减系数分别取 76.5 mm/h 、 2.5 mm/h 、 2 h^{-1} ;汇流模型采用 SWMM,透水铺装和透水路面的曼宁粗糙系数取 0.08,绿地的曼宁粗糙系数取 0.15。对于下凹式绿地,产流模型采用稳渗模型,渗透率取 20 mm/h ;汇流模型采用 SWMM,曼宁粗糙系数取 0.15。以上均为北京其他区域经流量校核后的经验参数。研究范围内的雨水口均为单算,泄水能力按 20 L/s 考虑。

本研究采用 3 年一遇 24 h 设计降雨对开发前后区域的雨水系统和外部市政管线进行评估,雨型按照《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2013)来生成,如图 1 所示。

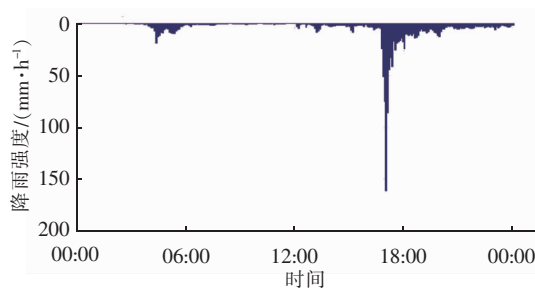


图1 北京市3年一遇24h设计雨型

Fig. 1 24-hour design rain pattern with 3-year return period in Beijing

3 区域雨水外排效果分析

区域雨水外排效果分析主要参照《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)中对建筑与小区的规定,即雨水控制与利用工程的设计标准,应使得建设区域的外排水总量不大于开发前水平,

并满足以下要求:①新开发区域外排水流量径流系数不大于0.4;②外排水峰值流量不大于市政管网的接纳能力。

3.1 现况外部市政雨水管线的接纳能力评估

在3年一遇24 h设计降雨情景下,项目区域开发前,在有或无雨水外排的情况下,外部市政雨水管线最不利情况时水位线在部分位置已高出地面,如图2所示(蓝色表示由于下游水位高而导致管道满流,粉色表示管道本身排水能力不足)。可知,在有或无雨水外排的情况下,管道均已经出现满负荷运行,部分检查井出现冒水情况,由此说明,峰值时外部市政管线无法接纳区域外排水。

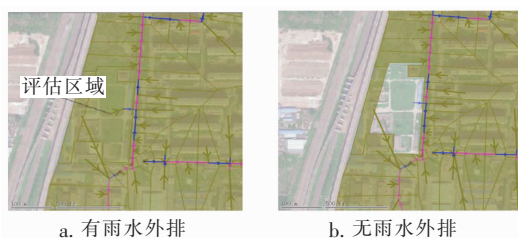


图2 设计降雨条件下外部市政管线的运行情况

Fig. 2 Operation of external municipal pipelines under design rainfall condition

项目区域在无雨水外排情况下,外部市政管线接入井的水位变化如图3所示。在设计降雨情景下,第17小时之前以及第22小时5分钟之后的时间段内接入井的水位深度小于-1.27 m(满管时的水位),说明下游管道未满流,此时间段内项目区域的雨水可以排入市政管线,其余时间下游管道处于满流状态,无法接纳项目区域的雨水。

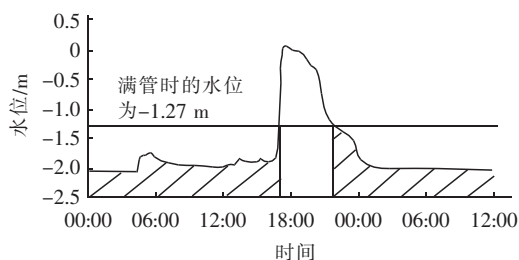


图3 设计降雨条件下外排水接入井的水位变化

Fig. 3 Water level change of drainage rainwater well under design rainfall condition

综上,项目区域在开发前,3年一遇24 h设计降雨情景下,现况外部市政雨水管线已出现管道超负荷运行和检查井冒水情况,虽然市政管线在满流前可以接纳项目区域的外排水,但在峰值时无法接

纳项目区域的外排水。

3.2 小区内部原始开发方案评估

开发商原始开发方案中下垫面主要有屋面、绿地、道路广场以及透水铺装四类,同时还建设雨水调蓄池,雨水出口由原来的一个变为南北两个出口。其中,屋面面积为5 713 m²,绿化面积为8 403 m²,道路、广场、停车场硬化面积为8 856 m²,透水铺装面积为548 m²。北侧和南侧调蓄池的容积分别为66、105 m³,调蓄池容积根据《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)中“每1 000 m²硬化面积(屋顶硬化面积)需建设不小于30 m³的调蓄池”计算所得,设计的调蓄池为在线式调蓄池。

与开发前相比,开发后项目区域下垫面的硬化面积明显增加,势必会造成雨水外排量及径流系数也发生变化。为确定项目区域开发后其雨水外排是否能够满足现行标准规范的要求,需对开发前后区域雨水外排情况进行评估。

在3年一遇24 h设计降雨情景下,利用排水系统模型计算得到开发前后区域外排水的流量过程线分别如图4和图5所示。可得开发前后项目区域的雨水外排水总量分别为726.56 m³和1 642.12 m³,径流系数分别为0.26和0.58。可知,项目区域开发后的雨水外排总量大于开发前,且雨水流量径流系数也大于0.4,不满足规范要求,因此需要对开发商的开发方案进行优化。

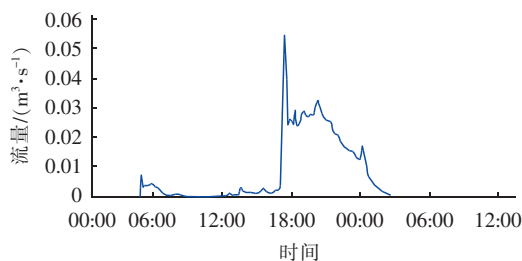
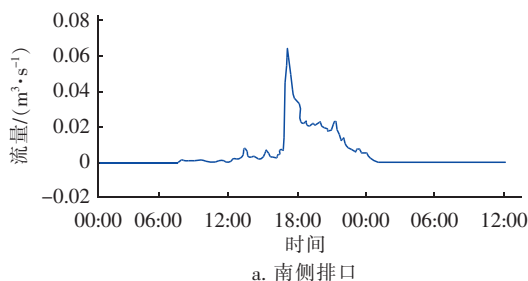


图4 区域开发前在设计降雨条件下的雨水外排流量过程线

Fig. 4 Rainfall discharge hydrograph under design rainfall condition before development of study area



a. 南侧排口

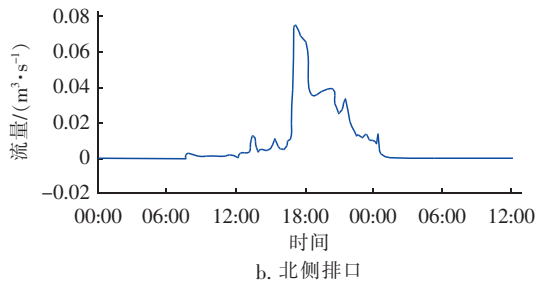


图5 区域开发后在设计降雨条件下的雨水外排流量过程线

Fig. 5 Rainfall discharge hydrograph under design rainfall condition after development of study area

3.3 小区内部低影响开发方案比选分析

为降低项目区域的雨水峰值流量及径流总量,可借鉴海绵城市建设理念对该区域进行开发,如建设下凹式绿地、透水铺装、透水路面及雨水调蓄设施等。开发后项目区域的雨水先通过渗透设施和绿地等进行渗蓄,超过设施渗蓄能力后再排入调蓄设施进行存蓄,水量超出所有设施的设计能力后再溢流排至市政雨水管线。由于小区开发前外部市政管线在降雨峰值时已经超负荷运行,存在外部市政管线雨水倒灌入小区内部的可能,因此必要时还需考虑设置防倒灌的控制措施,如设置闸阀或拍门。

3.3.1 不同低影响开发方案的效果对比

① 不同低影响开发方案模拟分析

为了评估项目区域各种源头控制措施的有效性,利用模型软件对不同措施下区域的雨水外排情况进行评估。不同低影响开发方案的雨水控制措施组成如表1所示。

表1 不同低影响开发方案的雨水控制措施组成

Tab. 1 Composition of rainwater control measures for different LID schemes

项目	绿地面积/m ²		路面面积/m ²		调蓄池容积/m ³	屋面面积/m ²	透水铺装面积/m ²
	不下凹	下凹15 cm	硬化	透水			
方案一	8 403	—	8 856	—	—	5 713	548
方案二	8 403	—	8 856	—	171		
方案三	8 403	—	—	8 856	—		
方案四	—	8 403	8 856	—	—		
方案五	—	8 403	—	8 856	—		
方案六	—	8 403	—	8 856	171		

注: 上述方案中的调蓄池均为在线调蓄池。

在3年一遇24 h设计降雨条件下,上述6种方案在自由出流情况下,北侧出水口的雨水流量过程线(降雨峰值附近时段)如图6所示。

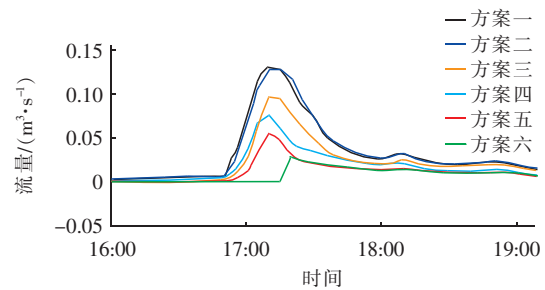


图6 6种方案自由出流情况下的雨水流量过程线

Fig. 6 Rainwater flow hydrograph of six schemes under free flow condition

方案一~六的雨水外排量依次为1 813.73、1 642.12、1 196.77、584.54、342.46、164.59 m³,雨水流量径流系数依次为0.64、0.58、0.42、0.21、0.12、0.058。结合图6可以看出,方案一与方案二相比,基本未改变雨水的流量过程,方案三、四、五可在一定程度减少雨水外排量和削减峰值流量,而方案六既可以减少外排量又可以起到削峰错峰的作用。由此可知,低影响绿色设施可削减峰值流量但无明显错峰作用,且多种措施组合优于单一措施,方案六中下凹式绿地、透水路面及调蓄池组合措施为最优方案,削峰错峰效果均最明显。

② 不同形式调蓄池模拟分析

根据调蓄池在水流方向上位置的不同,可以分为在线式和离线式两种形式。在线式调蓄池,是小区内雨水主流先进入调蓄池,不外排入市政管线,待调蓄池满后,雨水溢流排入市政管线;离线式调蓄池,是小区内雨水在降雨初期外部市政管线还有接纳能力时不排入调蓄池,而排入市政管线,当市政管线没有接纳能力时,小区内雨水再排入调蓄池,当调蓄池满后溢流入市政管线。

在方案五的下垫面(下凹式绿地+透水路面)条件下,采用3年一遇24 h设计降雨,对项目北侧范围内的雨水外排情况进行模拟,对两种形式的调蓄池运行效果进行对比。两种调蓄池容积与开发商原始方案中的容积相同,均采用66 m³。图7为两种调蓄池条件下小区与市政管线连接管上游井内水位的变化。小区与市政管线连接管的管顶高为43.68 m,由图7可以看出,在线调蓄池条件下,在17:20—21:35时间段内连接管上游井内水位高于43.68 m,说明此时间段内连接管超负荷运行;离线调蓄池条件下,在17:45—21:35时间段内连接管超负荷运

行,相比在线调蓄池少了 25 min。在相同条件下,离线调蓄池相比于在线调蓄池,连接管内满流超负荷的时间更短,说明离线调蓄池的运行效果优于同容积的在线调蓄池。但是,两种不同形式的调蓄池,连接管均存在满流超负荷运行的时间段,说明即使是离线调蓄池,北侧 66 m^3 的容积也不能满足要求,尚需增大调蓄池容积。为避免连接管超负荷运行,所需离线调蓄池的精确容积仍需利用模型进一步模拟计算,下文中将进行说明。

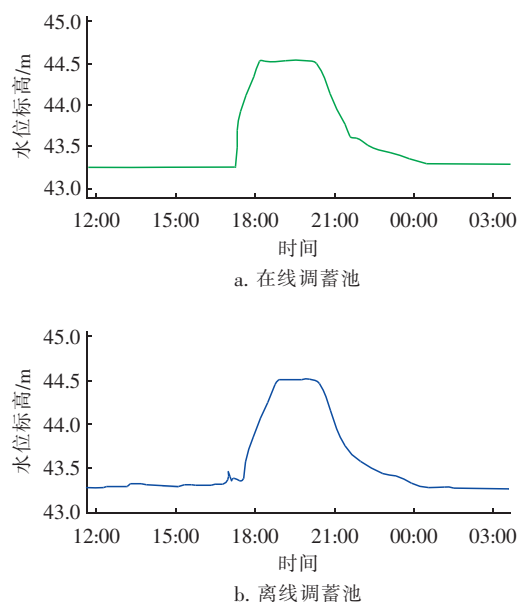


图7 不同类型调蓄池条件下小区与市政管线连接管上游井内的水位变化

Fig. 7 Change of water level in the wells upstream of the connecting pipe between residential area and municipal pipeline under different types of storage tank

3.3.2 最终建议方案及评估

综上,最终选择方案六中下凹式绿地、透水路面、离线调蓄池相结合的开发措施,在3年一遇24h设计降雨条件下,对小区内雨水排水系统及外部市政管线进行模拟。在模拟过程中,发现存在外部市政管线倒灌进入小区雨水管网的问题。图8为小区北侧户线连接管内的雨水流量过程线,可知流量存在负值的时段,说明有回灌现象,外部市政管线对小区内部产生了影响。为了解决这一问题,可在户线连接管上设置闸门或拍门等防倒灌设施,通过设置一定的闸阀运行规则实现当接入井内的水位高于市政管线管顶高时(此时市政管线超负荷运行)闸阀关闭,以此避免回灌现象的发生。

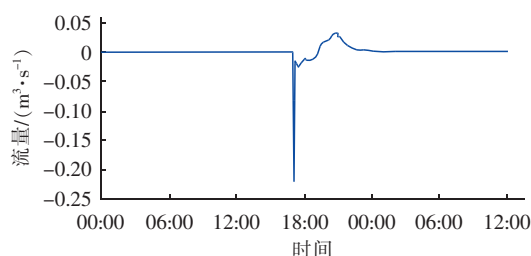


图8 北侧户线连接管内的雨水流量过程线

Fig. 8 Rainwater flow hydrograph in household line connecting pipe of north side

图9为采取上述优化措施(下凹+透水+离线调蓄池)后项目南北两侧排口处模型设置情况。采用离线调蓄池,需在小区与市政管线连接管及离线调蓄池进水管上设置闸门,并在接入井内设置液位监测计,与自控设备相关联。以小区北侧调蓄池为例,运行规则如下:当接入井内液位高于市政管线管顶高时,连接管上闸门1.1关闭,闸门1.2打开,雨水排入调蓄池;当接入井内液位低于市政管线管顶高时,连接管上闸门1.1打开,闸门1.2关闭,雨水排入外部市政管线。此种运行规则既不会对外部市政管线的稳定运行产生影响,又能充分利用市政管线的接纳空间。

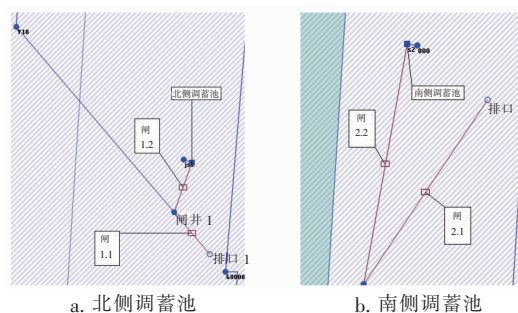


图9 采取优化措施后南北两侧排口模型设置情况

Fig. 9 Model setting of the outlet in north and south sides after taking optimization measures

图10为雨水排入南北两侧离线调蓄池的流量过程线,由模型计算可得北侧和南侧的离线调蓄池容积分别为 193.04 、 111.27 m^3 ,总容积为 304.31 m^3 。图11为南北两侧离线调蓄池溢流雨水排入市政管线的流量过程线,可知雨水外排量为 38.11 m^3 (北侧为 29.32 m^3 ,南侧为 8.79 m^3),雨水外排量明显小于建设前的水平,综合径流系数为 0.013 ,符合规范要求。经计算,径流总量控制率为 98.66% ,能控制的降雨量为 119.48 mm 。

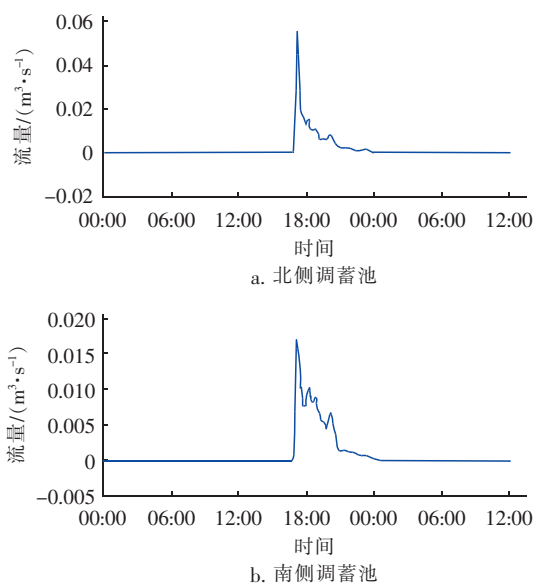


图10 优化后雨水排入离线调蓄池的流量过程线

Fig. 10 Flow hydrograph of rainwater discharged into off-line storage tanks after optimization

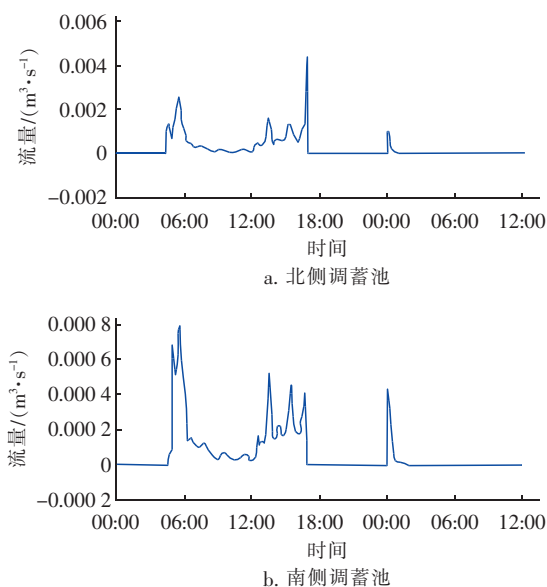


图11 优化后雨水排入外部市政管线的流量过程线

Fig. 11 Flow hydrograph of rainwater discharged into external municipal pipelines after optimization

4 结论与建议

① 通过本案例可以看出,解决排水问题单一依靠“灰色”或“绿色”设施可能无法完成,一味地增大“灰色”调蓄池容积,占地也会相应增加;而仅依靠“绿色”低影响措施也无法完全消纳降雨产生的径流。从径流的过程控制效果来看,“绿色”低影响措施主要可以起到削峰的作用,而调蓄池可以起到

削峰和错峰的作用。从整体效果来分析,本案例解决排水问题应采取“灰”“绿”结合的方法。

② 调蓄池的进水方式需综合分析和考量。调蓄池不同阶段的进水方式决定了其运行效果,从本案例可以看出,相同容积条件下离线调蓄池的运行效果较在线调蓄池更优,且能结合外部市政管线的运行情况控制小区的雨水外排,但同时也带来了控制设施的选择和运行成本的提高,所以对于不同的项目需经综合分析确定。

③ 在本案例中,径流总量控制率为98.66%,能控制的降雨量为119.48 mm,降雨前期有一定的外排量,因此对于年径流总量控制率对应下的控制降雨量的理解,并不是在降雨量未达到119.48 mm之前时不产生外排量,而是指降雨过程中能控制119.48 mm的降雨量不外排。

④ 不同的区域开发措施应进行合理设计与衔接。在细节设计上应区分不同区域的风险等级和汇水方式,尽量使雨水就地处理,减少雨水进入调蓄池及外排的量,同时不对区域内道路和建筑产生影响,这就要求不能孤立地考虑单个设施。

参考文献:

- [1] 毛云峰,王红武,高原,等. 基于 InfoWorks CS 软件的上海市某排水系统运行现状评估[J]. 给水排水, 2013,39(12):111-114.
MAO Yunfeng, WANG Hongwu, GAO Yuan, et al. Operation assessment of a drainage system in Shanghai based on InfoWorks CS [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(12): 111-114 (in Chinese).
- [2] 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).

作者简介:苏东霞(1988-),女,河北衡水人,硕士,工程师,主要从事管网及再生水厂等市政工程设计工作。

E-mail: Sudongxiaa@126.com

收稿日期:2020-02-21

修回日期:2020-07-09

(编辑:刘贵春)