

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.009

# 基于SWMM的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟

陆海明, 邹 鹰, 孙金华, 朱乾德, 牛 帅, 李晓红

(南京水利科学研究院水文水资源与水利科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:**基于南京水科院铁心桥实验基地的地形、下垫面条件等数据构建了SWMM,模拟了实验基地象目湖观景平台和水上餐厅两个监测点在不同降雨重现期、低影响开发措施、溢流孔设置和水泵强排条件下受淹情况。结果表明,初始水位较低(25.1 m)时,象目湖遭遇500年一遇的降雨事件时水位并未抬升至水上餐厅。初始水位较高(25.6 m)时,200年一遇和500年一遇的降雨事件中水上餐厅受淹持续时间分别为7 h和11 h。采用集水池、雨水花园和生物滞留池3种LID措施对象目湖水峰峰值影响模拟结果显示,在5年或10年一遇的降雨事件中雨水花园和集水池可以分别降低象目湖峰值水位0.06 m和0.02 m,生物滞留池没有削减峰值水位。在降雨量为218.5 mm的20160707次降雨事件中LID措施削减象目湖水峰峰值效果不明显。水泵抽排流量越大,象目湖水峰峰值越早回落到观景平台以下。LID在应对造成城市内涝的低频次、短历时强降雨方面作用有限,铁心桥实验基地象目湖内涝防治应以加强水文气象预测和水位管理、加大溢流孔尺寸和采用水泵强排等措施为主。

**关键词:**SWMM;城市内涝;LID措施;溢流孔;水泵;铁心桥实验基地;象目湖

**中图分类号:**TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)01-0058-08

**Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM**// LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, ZHU Qiande, NIU Shuai, LI Xiaohong (*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** Based on the data of terrain and underlying surface of Tiexinqiao experimental base of Nanjing Hydraulic Research Institute, SWMM was constructed. The flooded situation of two monitoring points of Xiangmu Lake observation platform and waterside restaurant in the experimental base were simulated under different rainfall return period, LID measures, overflow hole setting and strong drainage of water pump. The results show that when the initial water level is low (25.1 m), the water level of Xiangmu Lake does not rise to the waterside restaurant when encountering a rainfall with 500-year return period. When the initial water level is high (25.6 m), the inundation duration of the waterside restaurant is 7 h and 11 h respectively for the rainfall with 200-year return period and 500-year return period. The influence of three kinds of LID measures of collecting pool, rainwater garden and bioretention pond on the peak water level of Xiangmu Lake was simulated. The simulation results show that the peak water level can be reduced by 0.06 m and 0.02 m respectively in the case of 5-year or 10-year rainfall events when using collecting pool and rainwater garden, and the peak water level cannot be reduced by the bioretention pond. In 20160707 rainfall event with rainfall of 218.5 mm, the effect of LID measures on water level reduction of Xiangmu Lake is not obvious. The larger the water pump discharge, the earlier the water level of Xiangmu Lake falls below the observation platform. LID measures play a limited role in dealing with low frequency and short duration heavy rainfall which causes urban waterlogging. The main measures to control the waterlogging in Xiangmu Lake of Tiexinqiao experimental base are to strengthen the hydrometeorological forecast and water level management, increase the size of overflow hole and adopt the strong drainage of water pump.

**Key words:** SWMM; urban waterlogging; LID measure; overflow hole; water pump; Tiexinqiao experimental base; Xiangmu Lake

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401501);南京水利科学研究院基本科研业务费专项(Y513011, Y518002, Y917014)

作者简介:陆海明(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事水环境保护与生态水利学研究。E-mail: cnllhm@126.com

随着我国城市化进程的加快,城镇区域土地利用现状显著改变,地表不透水面积大幅增加,改变了原有的水文规律,导致建成区地表径流系数增加、洪峰流量增大、地表汇流时间缩短、洪峰时间提前,引发城市洪水内涝灾害<sup>[1-3]</sup>。为了解决城市内涝问题,实现科学合理的雨洪管理,我国正大力推进海绵城市建设工作,并在多个城市开展了海绵城市建设试点。海绵城市建设核心是通过城市雨洪采取“渗、滞、蓄、净、用、排”等综合措施,实现城市雨洪综合管理<sup>[3-4]</sup>。贾绍凤<sup>[1]</sup>指出对应于全年降水总量控制率 70%~85% 的场次设计降雨量,远小于造成城市内涝的场次降雨量,因此当前海绵城市建设措施满足不了根治“城市看海”问题的需求,并提出目前城市内涝、水污染、水短缺等城市水问题中,城市内涝问题是第一位的。

城市暴雨洪水模拟是城市防洪减灾的关键技术之一,欧美发达国家早在 20 世纪 60 年代就开展了城市雨洪模拟方面的研究。20 世纪 90 年代以来,随着计算机技术和“3S”技术飞速发展,计算能力大幅提高,城市地形、管网基础数据日益丰富,城市雨洪模型不断优化,更多功能强大的模型应运而生<sup>[5-9]</sup>。其中以美国环保署开发的 SWMM 最为著名,已被国内外学者广泛应用于城市暴雨洪水模拟、排水管网设计、城市非点源负荷估算等研究<sup>[10-13]</sup>。如,黄国如等<sup>[14]</sup>系统地介绍了多个城市雨洪模型,并运用 SWMM 构建了济南市城市雨洪模型;刘家宏等<sup>[15]</sup>介绍了 SWMM,并以北京香山地区、亦庄地区和东升园小区为对象,详细阐述了 SWMM 模型构建、参数率定、水文分析计算等实际应用中的具体操作过程。SWMM 模型还可以用于定量模拟 LID 措施的水文效应,蔡庆拟等<sup>[16]</sup>的研究结果表明,采用透水铺装、下凹式绿地和雨水花园等 LID 措施,洪峰流量和径流系数均明显降低,各种控制措施效果在低重现期降雨时更为明显;其中雨水花园对径流系数和洪峰流量的削减效果最显著,LID 组合措施对洪峰的削减和滞后作用较好,下凹式绿地和渗透铺装单独布设的雨洪控制效果一般。常晓栋等<sup>[17-18]</sup>对北京清河流域的研究表明,LID 组合控制措施对高频暴雨的洪峰流量和径流总量的削减率显著高于低频暴雨,对于洪峰流量几乎没有影响,有效不透水面积是影响洪峰流量主要因子。对于大暴雨径流,增加绿色屋顶深度比增加生物滞留池和透水铺装面积更为有效,透水铺装减少洪峰流量方面更为经济合理<sup>[19]</sup>。Xing 等<sup>[20]</sup>利用 SWMM 研究了径流储存和过滤设施布局对于径流控制影响,并提出优化布局和调整方案。Feng 等<sup>[21]</sup>在半干旱区城市流域

的研究表明,以生物滞留设施和绿色屋顶为代表的绿色设施恢复方案可以将流域水平衡恢复到和未开发前流域最接近的状态。城市小区的雨水收集设施同样可以减少洪峰流量和雨洪总量<sup>[22]</sup>。

南京水利科学研究院铁心桥实验基地是我国南方水利科技创新基地的重要组成部分,与我国城市化过程中地表不透水率增加相似,随着实验基地承担更多的科研任务,实验基地实验厅总数超过 30 余个,基地内不透水面积比例呈逐年上升趋势。铁心桥实验基地围墙将基地内外地表径流隔开,内部管网相对独立简单,实验基地可以看成以象目湖为容纳水体的封闭城市小流域。在 2015—2016 年汛期强降雨过程中,象目湖水位漫堤,象目湖周边部分实验厅受淹。本研究以铁心桥实验基地象目湖周边区域内涝防治为研究对象,建立 SWMM,研究极端降雨事件情景条件下象目湖水位变化过程,探讨不同雨洪管理措施的水文效应,为铁心桥实验基地和类似城市小区内涝防治提供技术支撑。

## 1 研究区域概况

南京水利科学研究院铁心桥实验基地位于秦淮新河南岸(图 1),图片来自 Google Earth 图像,红线为实验基地边界,面积约 27 hm<sup>2</sup>。铁心桥实验基地主要建筑物为开展水利、水运、水电研究必需的物理模型实验大厅和辅助生活设施,基地内实验厅建筑面积达 10 余万 m<sup>2</sup>。



图 1 铁心桥实验基地影像

Fig. 1 Image of Tieshinqiao experimental base

铁心桥实验基地地形总体为东高西低,最高点为玉兰山和梅花山,象目湖及其周边区域为基地内高程最低区域,也是最容易受到洪涝灾害威胁区域。受地形影响,实验基地内西南角的环境工程实验厅和环境水力学实验厅部分区域降雨时地表水无法汇入象目湖,其他区域地表水均直接汇入象目湖或通过玉带河汇入象目湖。目前,象目湖涝水主要通过其北侧的边长为 0.3 m 的正方形溢流孔缓慢排出。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

铁心桥实验基地 SWMM 所需的数据资料包括数字高程数据、沟渠及管网资料、水文气象数据等。DEM 数据通过委托专业测绘部门测得的 1000 余个高程点经过插值获得,据此计算出坡度等地形参数。实验基地象目湖、玉带河和管网资料来自南京水利科学研究院相关职能部门,作者在研究过程中多次在现场复测校正。

实验基地降水资料来源于设置在基地内生态水文实验中心的 JDZ-1 型雨量计测量数据。象目湖水文观测点位于象目湖北侧,采用压力式自记水位计(HOBO)测定,在测井中在水面上和水面下分别放置 1 个水位计,每小时记录 1 次数据,利用水面上下压力差计算每小时探头的淹没水深,再利用探头位置高程校正象目湖水面水位动态变化数据。

### 2.2 研究方法

选用美国环境保护署开发的 SWMM 5.1 对研究区域进行水文模拟,该模型是基于水动力学的降雨径流模型,主要包括水文、水力和水质模块。SWMM 在地表汇流过程中,子流域概化为透水区域和不透水区域两部分,以反映不同的地表特征,子流域出流量为两部分产流之和。采用 Horton 模型方法进行下渗量计算。铁心桥实验基地面积较小,地形条件相对简单,借助 Google Earth 影像和基地基础地理数据<sup>[23]</sup>获得各子汇水区不透水面积占比介于 0.10~0.76。利用 DEM 数据,计算研究区域坡度分布范围。根据研究区域特点,SWMM 在进行管道排水计算时选择动力波法进行模拟,该方法包括管道中水流连续方程、动量方程和节点处的连续方程,为了保证计算稳定性,模型采用动态时间步长控制。

## 3 模型构建

### 3.1 子流域划分

实验基地分成 17 个子流域(图 2),子流域面积为 0.2805~3.6091 hm<sup>2</sup>,2016 年实验基地不透水比例约为 35%。铁心桥实验基地雨量计布置在生态水文实验中心,象目湖水体通过管道流入外秦淮河,为实验基地地表水最终排放口。

### 3.2 排水系统概化

铁心桥实验基地面积较小,排水系统主要由沿实验基地内主干道路布设的排水管网组成。排水管网由排水管道、检查井及其他构筑物组成。实验基地排水管网概化结果如图 2 所示。象目湖设置为蓄水型节点,玉带河概化为不规则断面沟渠,玉带河河

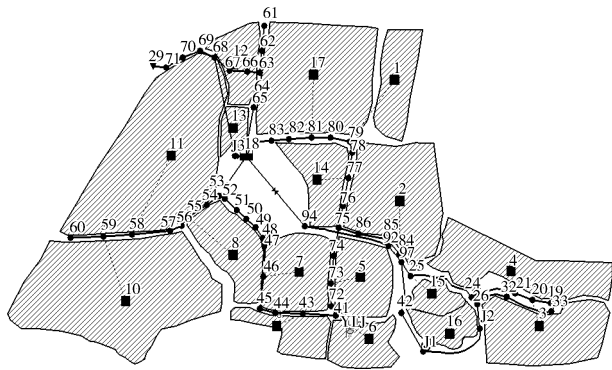


图 2 研究区域 SWMM 子流域划分

Fig. 2 SWMM subwatershed division of study area

水通过矩形堰进入象目湖,根据实际测量资料设置断面尺寸,其余管道均为原型断面排水管道,管径根据排水管网资料辅以实际测量结果设置。铁心桥实验基地共概化 7 段不规则断面沟渠,54 段管渠,60 个排水节点。

### 3.3 参数率定与验证

SWMM 模型参数可以分为确定性参数和不确定性参数两类。确定性参数包括汇水区面积、平均坡度、漫流宽度、不透水面积与透水面积比例、管径及管道长度等,参数取值可以通过现场调查和资料分析加工获得。不确定性参数包括地表洼地需水深度、地表曼宁系数、管道曼宁系数、下渗参数等,参数取值主要通过参考参数的推荐取值范围、相关文献、邻近类似区域的研究成果和实测资料等方式率定获得。

象目湖水位是水上餐厅以及周边实验厅是否受淹的主要判断依据,该片区也是实验基地内涝灾害主要影响区域。当水上餐厅观景平台受淹时,象目湖周边实验厅即受不同程度的内涝,随着水位升高,铁心桥实验基地内涝范围扩大。为了方便,本文以象目湖水位作为铁心桥实验基地内涝程度与提出控制措施的评价参数。选择 20160707 次暴雨过程和 20150601 次暴雨过程进行参数率定,并利用 20150626 次暴雨过程进行验证。子流域汇水区面积、平均坡度、不透水率等参数利用研究区资料直接计算获取;子流域汇水区特征宽度通过汇水面积除以地表漫流路径长度并经过校正得到,地表漫流路径长度主要根据汇水区下垫面汇水实际情况获取;其他敏感参数如透水区和不透水区曼宁系数、最大入渗率、最小入渗率、衰减系数等利用暴雨径流过程实测数据采用人工试错法反复调整参数取值直至模拟结果与实测结果相吻合。

参数率定结果为管道曼宁系数为 0.013,不透水区域曼宁系数为 0.015,透水区域曼宁系数为 0.150~0.300。在子流域 3 和 4 中的玉带河顶端水草植被覆盖度相对较高河段曼宁系数为 0.03,混凝

土浇筑的部分沟渠曼宁系数为 0.01,其余部分河段曼宁系数为 0.013。根据铁心桥实验基地土壤和植被覆盖特点,参考 SWMM 用户手册中不同土地利用类型典型值,研究区域土壤为黄棕壤,不同植被覆盖条件下的最大入渗率为 3 mm/h,最小入渗率为 0.5 mm/h,衰减系数为 4。

3.4 模拟结果评价方法

SL250—2000《水文水质预报规范》关于洪水预报精度评定项目包括洪峰流量(水位)、洪峰出现时间、洪量(径流量)和洪水过程等。洪水预报误差指标可以采用绝对误差、相对误差和确定性系数(纳什效率系数)。本研究采用纳什效率系数<sup>[24-25]</sup>、决定系数、洪峰水位绝对误差和峰现时间绝对误差 4 个指标评判 SWMM 模型模拟精度,计算方法为

$$R_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{oi} - P_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{oi} - \bar{P}_o)^2} \tag{1}$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (P_{oi} - \bar{P}_o)(P_{si} - \bar{P}_s) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_{oi} - \bar{P}_o)^2 \sum_{i=1}^n (P_{si} - \bar{P}_s)^2} \tag{2}$$

$$A_{EH} = H_{PS} - H_{PO} \tag{3}$$

$$A_{ET} = T_{PS} - T_{PO} \tag{4}$$

式中:  $R_{NS}$  为纳什效率系数;  $P_{oi}$  为第  $i$  次观测得到的水位;  $\bar{P}_o$  为全部观测水位的平均值;  $P_{si}$  为由模型计算得到与第  $i$  次观测对应的水位;  $\bar{P}_s$  为由模型计算所得全部水位的平均值;  $n$  为总观测次数;  $R^2$  为决定系数;  $A_{EH}$  为洪峰水位绝对误差;  $H_{PS}$  为模拟洪峰水位;  $H_{PO}$  为实测洪峰水位;  $A_{ET}$  为峰现时间绝对误差;  $T_{PS}$  为模拟洪峰出现时间;  $T_{PO}$  为实测洪峰出现时间。

3.5 模型率定和验证

铁心桥实验基地场次暴雨洪水过程线见图 3,洪水模拟效果评价见表 1。将降雨历时较短、降水量为 78.4 mm 的 20150601 次暴雨过程和降水量为 218.5 mm 的 20160707 次暴雨过程作为率定期暴雨事件,模拟效果相对较好。验证期选择降水历时较长、降水量为 267.6 mm 的 20150626 次暴雨过程,降水过程前期模拟水位低于实测水位,后期模拟水位高于实测水位。

表 1 SWMM 率定期和验证期模拟结果统计

Table 1 Statistics of simulation results of rainstorm runoff process in regular and validation periods of SWMM

时期	场次	$R_{NS}$	$R^2$	$A_{EH}/m$	$A_{ET}/h$
率定期	20150601	0.8	0.94	-0.08	3
	20160707	0.95	0.98	0	1
验证期	20150626	0.72	0.97	0.15	4

总体来说,铁心桥实验基地 3 次暴雨径流过程模拟效果较好。模型率定期 2 次暴雨过程纳什效率系数均超过 0.80,决定系数均超过 0.95,洪峰水位绝对误差不超过 0.08 m,峰现时间绝对误差不超过 3 h。模型验证期 20150626 次暴雨过程纳什效率系数为 0.72,决定系数为 0.97,峰值水位模拟值低于实测值 0.15 m,峰现时间模拟值提前 4 h 于实测值。

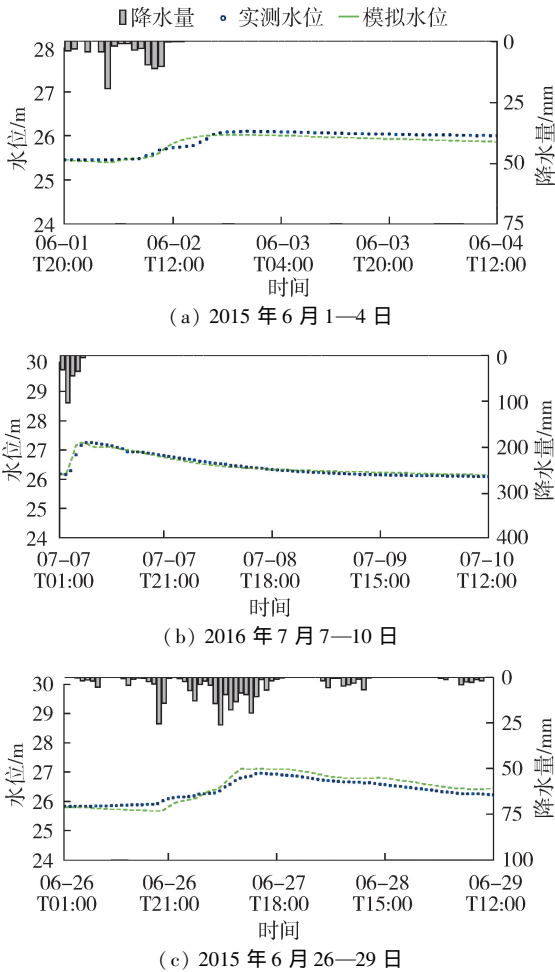


图 3 SWMM 率定期与验证期暴雨径流过程模拟结果  
Fig.3 Simulation results of rainstorm runoff process in regular and validation periods of SWMM

4 不同控制措施内涝防治效果模拟

4.1 不同降雨重现期象目湖水位变化过程模拟  
根据南京市城市管理局在 2014 年 2 月颁布的《南京市暴雨强度公式(修订)查算表》提供的南京市暴雨强度修订公式计算重现期分别为 5 a、10 a、50 a、100 a、200 a、500 a 的暴雨强度。芝加哥雨型是根据雨强-历时-频率相关关系得到的一种不均匀的设计雨型,根据峰值系数的不同,可以分为峰前和峰后两部分,本研究雨峰系数取 0.4,计算获得降雨历时为 2 h 的不同降雨重现期暴雨过程及次降雨过程降水量(图 4)。



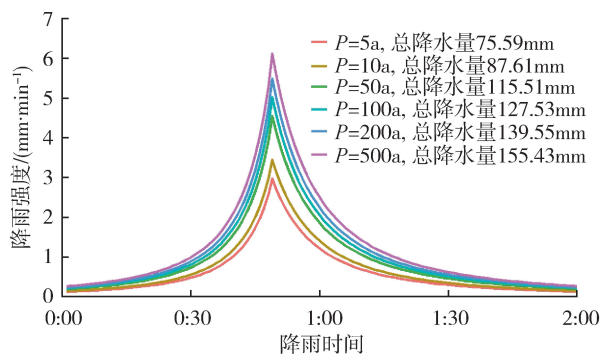


图4 不同重现期暴雨的降雨强度过程线及总降水量

Fig. 4 Rainfall intensity hydrograph and total rainfall in different return periods

利用 SWMM 模拟初始水位分别为 25.1 m 和 25.6 m 时,象目湖水位在不同降雨重现期条件下的变化过程,结果见图 5,图中黑线和红色虚线分别为象目湖观景平台和水上餐厅受淹时水位。随着暴雨强度重现期越来越大,象目湖水位峰值呈现变高的趋势。在初始水位较低(25.1 m)时,即使在 500 年一遇的持续 2 h、降雨量为 155.43 mm 的降雨事件中,象目湖最高水位也没有抬升至水上餐厅,200 年一遇和 500 年一遇的次降雨事件中象目湖最高水位超过湖中观景台。在初始水位较高(25.6 m)时,在超过 50 年一遇、降水量为 115.51 mm 的降水事件中,象目湖最高水位淹没湖中观景平台。200 年一遇和 500 年一遇的降雨事件中水上餐厅受淹持续时间分别为 7 h 和 11 h,湖中水上观景平台淹没时间更长。

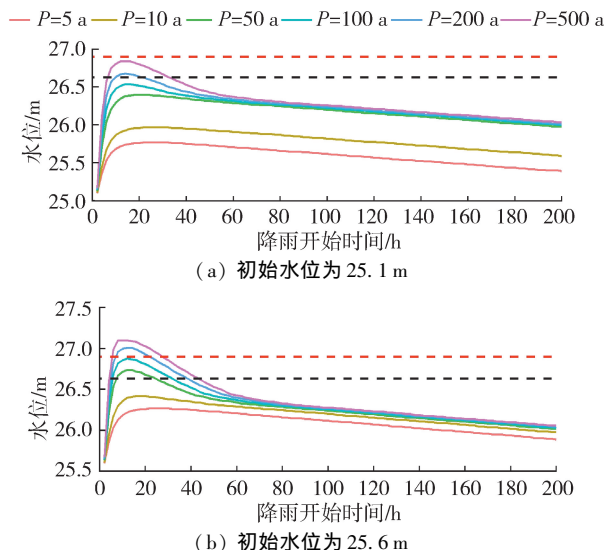


图5 不同重现期暴雨强度下象目湖水位变化过程

Fig. 5 Water level fluctuation of Xiangmu Lake under different return period rainstorm intensity

#### 4.2 LID 措施对象目湖水位变化影响模拟

集水池、雨水花园和生物滞流池等是国内外常用 LID 措施。利用率定好的 SWMM 模型,分别模拟不同重现期降雨条件下采用上述 3 种 LID 措施对象

目湖水位的影响。①集水池可以将雨水暂时储存,由于铁心桥实验基地开展物理模型实验用水对水质要求不高,可以考虑通过修建雨水收集池将雨水暂时存储稍加处理后使用,充分利用雨水资源,减少自来水的消耗、节约水资源的同时削减象目湖水位峰值。考察每个子流域的具体位置,结合地形和实验厅特点,确定可能设置集水池的位置和大小。本方案模拟了 11 个集水池,存储空间共 4.41 万  $\text{m}^3$ 。②雨水花园的水文效益主要来自蓄水和入渗能力。本方案通过现场考察铁心桥实验基地可用于修建雨水花园的场地条件,分别在每个子流域设定雨水花园面积,雨水花园的田埂高度 20 cm,土壤层厚度为 60 cm,在 15 个子流域模拟修建雨水花园,总面积为 2.01 万  $\text{m}^2$ 。③生物滞留池通常设置在地势较低的区域,是通过植物、土壤和微生物系统蓄渗、净化径流雨水的设施。生物滞留池主要通过其自身的存储容量和土壤入渗能力影响水文过程。本方案在现场调研的基础上共设置 14 个生物滞留池,总面积为 4600  $\text{m}^2$ 。

利用南京市暴雨强度公式和芝加哥雨型计算降雨历时为 2 h,重现期分别为 1 a、5 a、10 a 的降雨过程,分别模拟在 3 种不同 LID 措施以及不采取任何措施条件下象目湖水位变化过程,此外还模拟了 20160707 次降雨过程采取不同 LID 控制措施对象目湖水位的影响(图 6)。

在重现期分别为 5 a 和 10 a 的降雨事件中,相比于未应用 LID 措施时,雨水花园削减象目湖水位最明显,水位降低 0.06 m,其次为集水池,水位降低 0.02 m,生物滞留池基本没有削减峰值水位的作用。在 1 年一遇的降雨事件和 20160707 次降雨事件中,LID 措施削减象目湖水位效果不明显。在 1 年一遇的降雨事件中,由于降水量偏低,在未应用 LID 措施时象目湖水位仅升高 0.22 m,增加幅度有限,因此即使应用 LID 措施,水位降低值比较有限。随着降水量增大,LID 措施的调蓄和存储空间逐渐发挥作用,对象目湖水位的削减效果逐渐显现。但是随着降水量继续增大,有限的 LID 调蓄空间在降雨开始时就可能被完全利用,通过 LID 措施调蓄的降水量占次降雨事件中全部降水量的比例相对较小,因此 20160707 次降雨事件中降水量超过 200 mm 时,象目湖水位变化不明显。

LID 措施削减洪峰的效果不仅与采取 LID 措施类型有关,也与 LID 措施规模大小有关。在实际应用时,建设场地条件和投资额度等客观因素同样也是 LID 措施建设规模的重要考量因素<sup>[5,19]</sup>。铁心桥实验基地现有实验厅用地非常紧张,能够用来改造

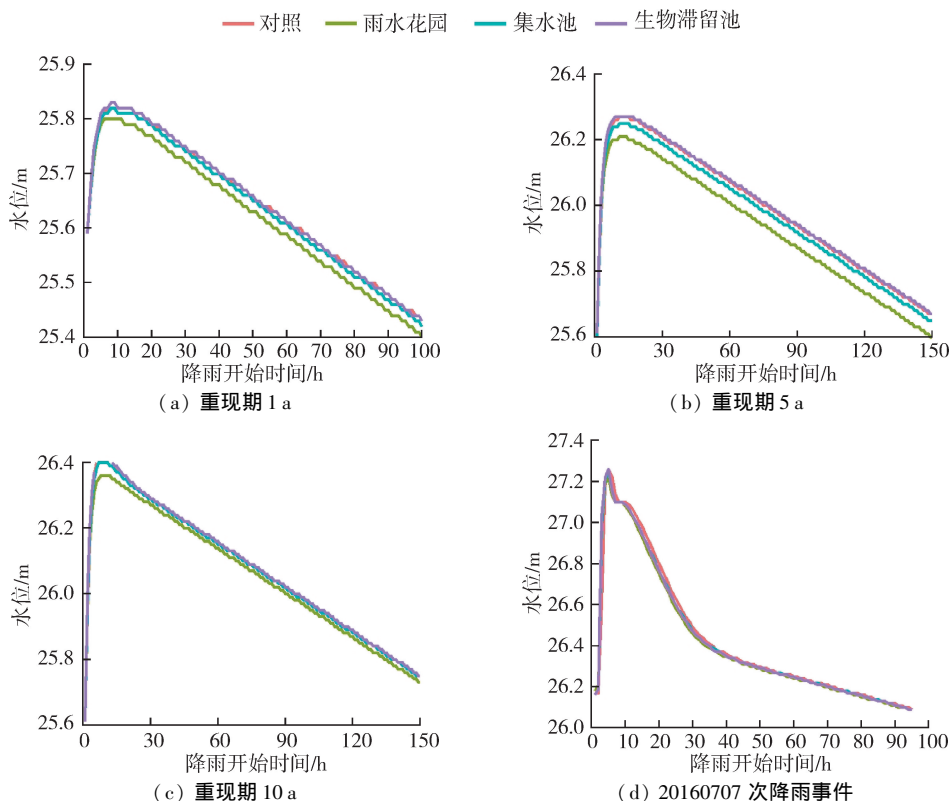


图6 不同降雨事件中模拟 LID 措施时象目湖水位变化

Fig. 6 Water level fluctuation of Xiangmu Lake with LID measures in different rainfall events

成为 LID 措施的场所有限,单位面积 LID 措施改造投资较大等诸多因素导致实际可操作的 LID 措施总体规模较小。小规模 LID 措施在应对大暴雨,特别是应对能够导致水上餐厅被淹的短历时强暴雨的效果非常有限,所以采用 LID 措施减少象目湖水上餐厅被淹的工程可行性较差。

#### 4.3 溢流孔大小对象目湖水位变化影响模拟

溢流设施设置相对简单,投资额度小,设置溢流设施是控制湖泊水库水位、优化排水系统的重要措施<sup>[26]</sup>。铁心桥实验基地位于外秦淮河畔,象目湖湖底高程显著高于外秦淮河,目前湖水可以通过较小尺寸的溢流孔自流排出。以 20160707 次降雨事件为例,模拟设置不同边长大小的正方形溢流孔时象目湖的水位变化(图 7),溢流孔底高程设置为高于湖底高程 4.0 m。从图 7 可以看出,相对于现有边长 0.3 m 的正方形溢流孔,分别设置边长为 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m 的正方形溢流孔,象目湖水位峰值从 27.26 m 分别下降到 27.18 m、27.11 m、27.10 m、27.09 m。溢流口边长由 0.3 m 增大为 0.5 m 时,峰值水位降低 0.08 m;溢流口边长增大为 1.0 m 时,峰值水位降低 0.15 m,再增大尺寸对于降低峰值水位效果有限。增加溢流孔能够比较明显地减少水上餐厅的受淹时间,溢流孔孔径由 0.3 m 增加到 0.5 m 时,受淹时间从 13 h 缩短至 6 h,孔径尺寸增加到

1.0 m 时,受淹时间继续缩短至 5 h,孔径尺寸继续增加对象目湖水上餐厅受淹时间作用较小。

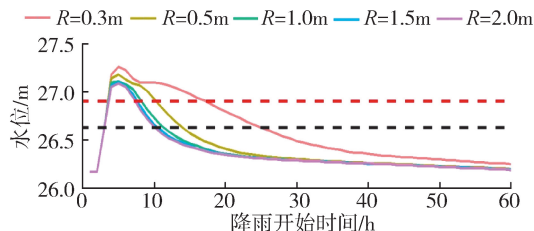


图7 20160707 次暴雨不同尺寸溢流孔时象目湖水位变化  
Fig. 7 Water level change of Xiangmu Lake in 20160707 rainstorm with overflow hole of different sizes

#### 4.4 水泵排水能力对水位变化影响模拟

暴雨时原有排水管网来不及排水,利用水泵将积水强行排出是城市洪涝灾害防治的重要措施。以 20160707 次暴雨事件为例,模拟设置不同流量大小的水泵将象目湖水直接抽排至外秦淮河,结果见图 8。水泵抽排流量小于  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  时,水泵对象目湖峰值水位基本没有削减作用;当水泵流量为  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  时,水位峰值从 27.26 m 降低到 26.79 m,水上餐厅不会受淹。水泵流量越大,象目湖水位越早回落到水上平台以下。水泵抽水流量为  $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$  时,对象目湖水位过程基本没有影响,在图 8 中其水位过程线基本与对照组重合。水泵流量大小为  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$

时,象目湖水上观景台淹没时间分别为 20 h、16 h、8 h、2 h,相比于没有水泵抽排需 23 h,分别缩短 3 h、7 h、15 h、21 h。

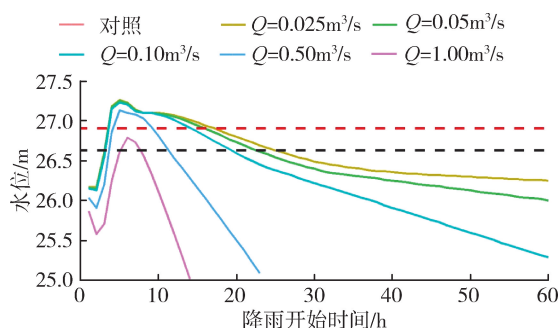


图8 20160707 次暴雨不同水泵排水能力时象目湖水位变化

Fig.8 Water level change of Xiangmu Lake in 20160707 rainstorm with different drainage capacity of water pump

## 5 结 论

a. 铁心桥实验基地次降雨事件 SWMM 模拟效果较好,验证期次降雨事件纳什效率系数为 0.72,决定系数为 0.97。象目湖水位初始处于较低水平(25.1 m)时,即使超过 500 年一遇、降雨量为 155.43 mm 的降雨事件,象目湖最高水位未抬升至水上餐厅。当象目湖初始水位较高(25.6 m)时,200 年一遇和 500 年一遇的降雨事件中水上餐厅受淹持续时间分别为 7 h 和 11 h,湖中水上观景平台淹没时间更长。

b. 在 5 年和 10 年一遇的降雨事件中雨水花园和集水池可以分别降低峰值水位 0.06 m 和 0.02 m,生物滞留池基本没有削减峰值水位。20160707 次降雨事件中 LID 措施削减象目湖水位效果不明显。不建议采用 LID 措施降低极端暴雨事件中象目湖峰值水位。

c. 象目湖岸边设置边长分别为 0.5 m 和 1.0 m 的正方形溢流孔时,相对于现有边长 0.3 m 的溢流孔,20160707 次暴雨事件中水上餐厅受淹时间从 13 h 缩短至 6 h 和 5 h,溢流孔尺寸继续增加,水上餐厅受淹时间基本不变。

d. 水泵抽排流量小于  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  时,水泵对象目湖峰值水位基本没有削减作用;当水泵流量为  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  时,水位峰值从 27.26 m 削减到 26.79 m,水上餐厅被淹的风险较小。水泵流量越大,象目湖水位越早回落到水上平台以下。

e. LID 措施在应对造成城市内涝的低频次、短历时强降雨方面作用有限,铁心桥实验基地内涝防治以加强水文气象预警和调度、加大溢流孔尺寸和采用水泵强排等综合措施为主。

## 参考文献:

- [1] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护,2017,33(2):13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):13-15. (in Chinese))
- [2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))
- [3] 张伟,车伍. 海绵城市建设内涵与多视角解析[J]. 水资源保护,2016,32(6):19-26. (ZHANG Wei,CHE Wu. Connotation and multi-angle analysis of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):19-26. (in Chinese))
- [4] 王兴超. 地下水库在海绵城市建设中的应用[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):83-87. (WANG Xingchao. Application of underground reservoirs in construction of sponge cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(1):83-87. (in Chinese))
- [5] ECKART K,MCPHEE Z,BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development:a review[J]. Science of the Total Environment,2017,607/608:413-432.
- [6] FLETCHER T D, ANDRIEU H, HAMEL P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art[J]. Advances in Water Resources,2013, 51:261-279.
- [7] SALVADORE E, BRONDERS J, BATELAAN O. Hydrological modelling of urbanized catchments;a review and future directions[J]. Journal of Hydrology,2015,529: 62-81.
- [8] 王龙,黄跃飞,王光谦. 城市非点源污染模型研究进展[J]. 环境科学,2010,31(10):2532-2540. (WANG Long, HUANG Yuefei, WANG Guangqian. Review of urban nonpoint source pollution models[J]. Environmental Science,2010,31(10):2532-2540. (in Chinese))
- [9] 陈军飞,陈梦晨,高士佩,等. 基于云物元模型的南京市雨洪灾害风险评估[J]. 水利经济,2019,37(2):67-72. (CHEN Junfei,CHEN Mengchen,GAO Shipai,et al. Risk assessment of rainstorm disasters in Nanjing based on cloud matter-element model[J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(2):67-72. (in Chinese))
- [10] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN

- Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4):1-5. (in Chinese))
- [11] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦. 论城市排水防涝工程水文问题[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1):42-48. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin. Hydrological problems for engineering of drainage and water log prevention in urban areas [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1):42-48. (in Chinese))
- [12] 朱寒松, 董增川, 曲兆松, 等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(2):32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):32-36. (in Chinese))
- [13] 吴海春, 胡爱兵, 任欣欣. 基于 SWMM 模型的 LID 措施年 SS 总量去除率计算[J]. 水资源保护, 2018, 34(5):9-12. (WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin. Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):9-12. (in Chinese))
- [14] 黄国如, 冯杰, 刘宁宁, 等. 城市雨洪模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013:36-42.
- [15] 刘家宏, 陈根发, 王海潮, 等. 暴雨径流管理模型理论及其应用: 以 SWMM 为例[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 24-36.
- [16] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33(2):31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):31-36. (in Chinese))
- [17] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价: 以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11):84-93. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang et al. Urban rainfall-runoff simulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model: a case study of Qinghe catchment in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11):84-93. (in Chinese))
- [18] PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528:361-368.
- [19] CHUI T F M, LIU X, ZHAN W T. Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events [J]. Journal of Hydrology, 2016, 533:353-364.
- [20] XING Wei, LI Peng, CAO Shangbin, et al. Layout effects and optimization of runoff storage and filtration facilities based on SWMM simulation in a demonstration area [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(2):115-124.
- [21] FENG Y, BURIAN S, POMEROY C. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542:744-755.
- [22] PALLA A, GNECCO I, LA BARBERA P. The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 191:297-305.
- [23] 苏程佳, 陈晓宏. 一种基于 Google Earth 影像的河道地形数据提取方法[J]. 水资源保护, 2019, 35(2):80-84. (SU Chengjia, CHEN Xiaohong. A new method for extracting river terrain data based on Google Earth image [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):80-84. (in Chinese))
- [24] 袁艳斌, 杨惜岁, 陈丽雅, 等. 基于多目标准则的流域站网优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2):102-107. (YUAN Yanbin, YANG Xisui, CHEN Liya, et al. Optimization of the basin hydrologic network based on multi-objective criteria [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(2):102-107. (in Chinese))
- [25] 徐杰, 李致家, 霍文博, 等. 半湿润流域洪水预报实时校正方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4):317-322. (XU Jie, LI Zhijia, HUO Wenbo, et al. Comparison of real-time correction methods of flood forecasting in semi-humid watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4):317-322. (in Chinese))
- [26] MARIA C C, ZEGERINO J A, SIMOES N E, et al. Optimal location and sizing of storage units in a drainage system [J]. Environmental Modeling & Software, 2016, 83:155-166.

(收稿日期:2019-01-05 编辑:王 芳)

