

城市雨水调蓄泵站 InfoWorks 模拟研究及方案设计

王社平, 尹博涵, 王继斌, 郑 琴, 高荣宁, 井敏莉, 屈东洋
(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘 要: 对西安市某雨水调蓄泵站采用推理公式法计算和数学模型法模拟, 设计了多种调蓄提升方案, 通过 InfoWorks 软件模拟进行方案对比, 确定了设计规模及优化方案, 最终确定设计方案为 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 初雨调蓄 + $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 离线洪峰调蓄 + $21.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 水泵提升; 初雨调蓄和洪峰调蓄采用了地下式双层调蓄池, 可供同类型工程参考。

关键词: 初期雨水; 数学模型; 泵站; InfoWorks 模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)20-0047-06

InfoWorks Simulation and Plan Design of Urban Rainwater Storage Pumping Station

WANG She-ping, YIN Bo-han, WANG Ji-bin, ZHENG Qin, GAO Rong-ning,
JING Min-li, QU Dong-yang

(Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: The reasoning formula calculation and mathematical model simulation were used to design an urban rainwater storage pumping station. A variety of design plans were proposed for rainwater storage and lifting. The optimal design plan of the pumping station was determined as follows: the initial rainwater storage capacity was $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$, storm storage capacity was $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, and pump lifting scale was $21.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Double layer underground storage tank was used for initial rainwater storage and storm storage. The achievement could be used as a reference for other similar projects.

Key words: initial rainwater; mathematical model; pumping station; InfoWorks simulation

1 工程背景

西安市某雨水调蓄泵站总服务面积约 772.0 hm^2 (见图 1, 其中 I 区 308.68 hm^2 , II 区 463.32 hm^2)。



图 1 雨水流域示意

Fig. 1 Diagram of rainwater area

目前流域范围内大部分雨水管网已基本形成, 雨水在现状管道末端仅依靠临时泵站强排, 雨季时部分地区积水情况严重。拟建雨水泵站对区域雨水排除及内涝防治安全意义重大。

2 设计规模

有关统计数据表明, 我国泵机组消耗的电能超过全国电能消耗总量的 21%^[1]。增大雨水泵站规模可以提高排水能力, 及时排除积水, 降低城市内涝风险, 但同时也增加了建设费用和运行成本, 合理确定雨水泵站规模是节能降耗的重要举措。

西安市某雨水调蓄泵站针对实际情况, 分别采用恒定均匀流推理公式法 (以下简称推理公式法)

和数学模型法(InfoWorks 软件模拟)两种方法对比确定泵站规模。

2.1 推理公式法

确定设计参数如下:

根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006, 2016 年版)确定设计。

西安市暴雨强度公式:

$$q = \frac{2\,210.87 \times (1 + 2.915 \times \lg P)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (1)$$

综合径流系数 $\Psi = 0.60$;

雨水管渠设计重现期为 5 年;

降雨历时: $t = t_1 + t_2$, 地面集水时间 $t_1 = 10 \text{ min}$, t_2 为管渠雨水流行时间。

采用脱过系数法(脱过系数法是一种采用由径流成因所推理的流量过程线推求调蓄容积的方法,其适用范围与暴雨强度公式的适用范围相同^[2])进行设计计算,拟建泵站设计进水量为 $28.8 \text{ m}^3/\text{s}$,降雨历时为 72 min,为削减洪峰流量设置调蓄池,脱过系数 α 取 0.65,泵站设计规模为 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 离线洪峰调蓄 + $18.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 水泵提升。

本工程总流域面积为 772.0 hm^2 ,远大于 200 hm^2 ,由于推理公式法和脱过系数法基于的假设条件,即降雨在整个汇水面积上的分布是均匀的;降雨强度在选定的降雨时段内均匀不变;汇水面积随集流时间增长的速度为常数,在较大规模排水系统中并不完全成立,计算时会产生较大误差^[3],故推理公式法计算结果仅作为参考。

2.2 数学模型法

根据《西安市城市排水(雨水)防涝综合规划(2015—2020)》,本次设计在“西安市防涝规划所建模型网络”的基础上,采用 InfoWorks 6.5 软件进行模拟分析。

具体参数设置如下:

① 降雨事件:模型降雨事件采用重现期为 50 年、降雨历时为 24 h、间隔为 5 min 的数据。该数据依据《西安市暴雨强度公式编制技术报告》中的芝加哥雨型公式计算而得。

② 本次河道模拟水位采用河道 20 年洪水位高程为 368.608 m。

根据泵站模拟运行过程线确定了四种泵站方案(见表 1)。

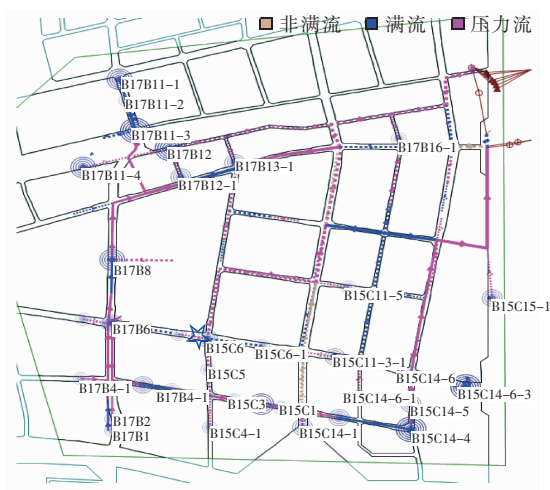
表 1 泵站设计方案

Tab. 1 Design scheme of pumping station

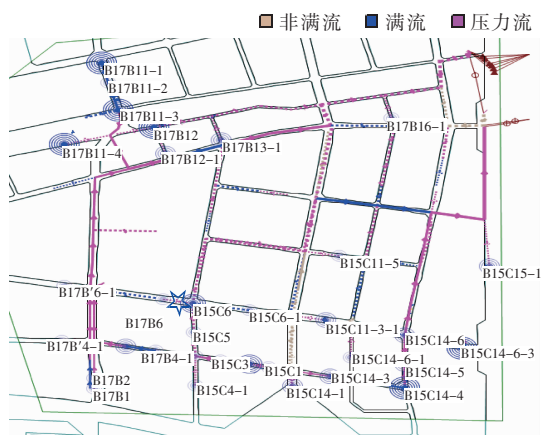
项目	初雨调蓄/ 10^4 m^3	洪峰调蓄/ 10^4 m^3	提升规模/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	占地面积/ m^2
方案一	1.1	1.8	21.0	11 617
方案二	无	无	30.0	6 613
方案三	无	1.5 (管道调蓄)	22.0	6 417
方案四	1.0	5.5	18.8	27 574

注: ①方案三将 $1.0 \text{ km d}300 \text{ mm}$ 的泵站进水管设计为 $d500 \text{ mm}$ 的调蓄管道,管道调蓄容积约为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。
②除方案三外,其余方案中的洪峰调蓄均为离线调蓄。

流域范围内 B15C6 点区域地势最低,降雨过程中最易内涝,InfoWorks 软件模拟时,以区域内特征点 B15C6 积水深度介于 $5 \sim 15 \text{ cm}$ 为控制标准,按照四种方案进行模拟,具体模拟情况见图 2、3 (B15C6 位于☆处)。



a. 方案一



b. 方案二

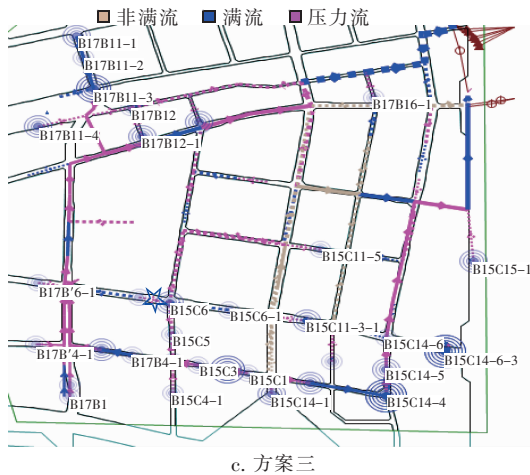


图 2 区域模拟情况

Fig. 2 Diagram of InfoWorks simulation

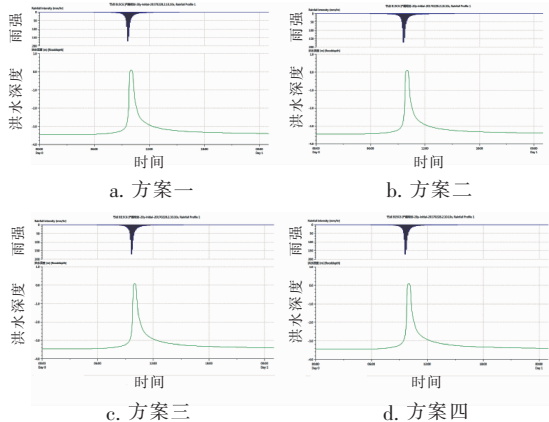


图 3 特征点 B15C6 积水情况

Fig. 3 Ponding depth of spot B15C6

从图 3 可见,各方案 B15C6 点最大积水深度均满足控制标准且积水能迅速消退,说明各设计方案

均满足防涝要求。

方案一泵站模拟运行流量过程线见图 4。

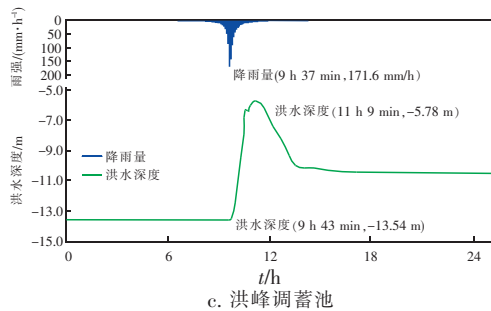
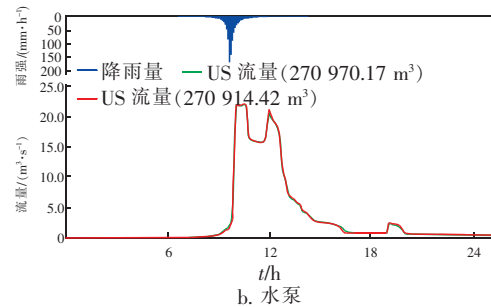
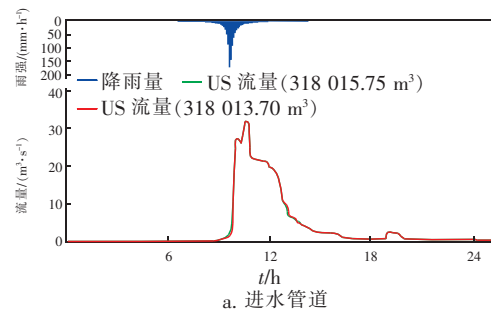


图 4 泵站模拟运行流量过程

Fig. 4 Simulated operational process of pumping station

通过图 4(a)和(b)可知,泵站进水管峰值流量约 $30.0 \text{ m}^3/\text{s}$,方案一在设置离线洪峰调蓄池的情况下水泵提升规模削减至 $21.0 \text{ m}^3/\text{s}$,表明离线洪峰调蓄池削峰效果显著;图 4(c)中洪水深度线为洪峰调蓄池水位线,洪水深度值为水位线标高与调蓄池室外地面标高的差值。通过图 4(c)可知,在降雨开始后 9 h 37 min,降雨强度达到最大值约 171.6 mm/h ; 9 h 43 min,洪峰调蓄池进水闸门开启进行蓄水,此时洪水深度约 -13.54 m ,然后水位迅速升高。至 11 h 9 min,洪峰调蓄池内水位达到最高水位,洪水深度约 -5.78 m ,此时达到满池工况。其余方案皆依此而定。

2.3 方案比选

通过对比推理公式法计算得出的一种泵站规模

及数学模型法模拟得出的四种泵站规模可知,推理公式法采用规范上限的5年设计重现期(特大城市、中心城区雨水管渠设计重现期为3~5年^[3])所计算的结果小于数学模型法。由于推理公式法无法兼顾内涝防治需求,本次设计不予采用。

从InfoWorks模拟结果可知,方案一有初雨调蓄,可有效控制流域径流污染,有洪峰调蓄,可提高泵站运行的安全性,泵站占地面积适中;方案二占地面积小,但无初雨调蓄、无洪峰调蓄,不能控制流域径流污染且安全性较低;方案三泵站占地面积最小,但站外调蓄管道需设置冲洗设备及控制系统,管理较为不便,无初雨调蓄功能;方案四提升规模最小,有初雨调蓄和洪峰调蓄,但占地面积太大。结合海绵城市建设及径流污染控制要求,确定方案一为该泵站最终设计方案。

3 方案设计

拟建泵站按方案一: $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 初雨调蓄 + $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 离线洪峰调蓄 + $21.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 水泵提升规模进行设计,工艺流程见图5。

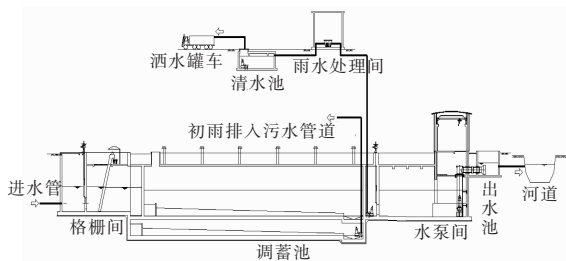


图5 泵站工艺流程

Fig. 5 Pumping station process flow

3.1 格栅间

格栅间为地下式钢筋混凝土结构,平面尺寸为 $25.5 \text{ m} \times 11.3 \text{ m}$,深为 13.0 m 。格栅渠道分8格,每格宽为 2.4 m 。栅渠内安装回转式格栅除污机。栅条间隙为 25 mm ,安装角度为 75° ,过栅流速为 0.85 m/s 。

3.2 调蓄池

3.2.1 初期雨水调蓄的必要性

2015年4月,国务院下发了《关于印发水污染防治行动计划的通知》(国发[2015]17号),要求有条件的地区要推进初期雨水收集、处理和资源化利用;2018年3月,西安市下发了《西安市补齐生态环境短板强化大气、水、土壤污染防治专项实施方案》,要求推进初期雨水收集、处理和资源化利用。

为了避免初期雨水中的污染物直接通过雨水管排放,需要对初期雨水进行收集处理,一种有效的方法是在雨水管网的末端,结合雨水泵站建设的同时设置初期雨水调蓄池。目前这种方法已经在上海、广州等城市成功运用^[4]。

北京市对城区1998年—2003年不同月份屋面和路面径流水质的数据分析表明,城区屋面、道路雨水径流污染都较严重,其初期雨水的污染程度通常超过城市污水。上海市对雨水水质监测表明,初期20 min雨水污染非常严重^[5]。上海成都路排水系统监测的初期雨水水质情况见表2^[6]。

表2 初期雨水水质

Tab. 2 Initial rainwater quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ - N	TP	SS
数值	452.9	135.9	23.3	3.19	550.6

方案除设计了雨水洪峰调蓄池外还设置了初期雨水调蓄池,以期缓解流域初期雨水径流污染。

3.2.2 初期雨水调蓄容积计算

由于我国对分流制雨水系统中初期雨水调蓄池的容积计算并没有相关规定,设计结合国内类似工程的情况,主要参考德国废水协会“ATV Arbeitsblatt A 128 1992”标准,对初期雨水调蓄池进行容积计算^[4,7]:

$$V = 1.5 \times V_{\text{SR}} \times A_{\text{U}} \quad (2)$$

式中 V ——调蓄池容积, m^3

V_{SR} ——单位面积需调蓄雨水量, m^3/hm^2

A_{U} ——非渗透面积, $A_{\text{U}} = \text{系统面积} \times \text{径流系数}$, hm^2

V_{SR} 与城市暴雨径流污染特点密切相关,德国根据其自身城市特点,取值一般为 $12 \text{ m}^3/\text{hm}^2 \leq V_{\text{SR}} \leq 40 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,一般可取 $15 \sim 20 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。考虑西安市现状,本工程 V_{SR} 取值为 $15 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

本工程雨水系统服务面积为 772 hm^2 ,平均径流系数 $\Psi = 0.6$,经计算所得初期雨水调蓄池有效容积为 $10\,422 \text{ m}^3$,取 $11\,000 \text{ m}^3$ 。

根据国内的相关研究,采用降雨深度法来计算初期雨水调蓄池的有效容积,其计算公式为 $V = A \times h \times \Psi$,降雨深度一般取前 $3.5 \sim 5 \text{ mm}$ 降雨量,设计取 5 mm 。由于服务面积较大,当距离调蓄池较远的初期雨水还未到达调蓄池时,距离调蓄池较近的洁净雨水已经进入调蓄池,洁净雨水与初期雨水一起进入调蓄池内,影响初雨调蓄池的工作效率。设计

考虑降雨初期前 20 min 雨水的收集,即流域范围内,距初雨调蓄池最近的 200 hm² (直线距离约 1.75 km) 径流面积上的初雨调蓄。经计算,初雨调蓄池有效容积约 10 000 m³,这与采用德国废水协会的公式计算出的有效容积是比较接近的。

3.2.3 调蓄池设计

设计调蓄池为矩形地下式双层钢筋混凝土结构,平面尺寸为 95 m × 42 m,池顶覆土为 2.0 m。

下层为初期雨水调蓄池,池深约 3.6 m,有效调蓄容积为 1.1×10^4 m³,池内初期雨水待雨停后提升排入市政污水管道。

上层为离线洪峰调蓄池,池深约 12 m,有效水深为 6.0 m,有效调蓄容积为 1.8×10^4 m³,洪峰时段蓄水,雨停排水,排水可通过后续泵房提升排放或通过回用水泵提升处理后用于绿化及浇洒道路。

调蓄池上层设置过水廊道,廊道宽度为 5.0 m,廊道底坡度 $i = 1.6\%$,总长约 90 m;调蓄池内共设冲洗廊道 15 条,上层 7 条,下层 8 条,廊道宽度为 5.25 m,坡度为 1.6%,各冲洗廊道配套门式水力冲洗系统,共 15 套。调蓄池进出水口设置闸门,蓄水排水时闸门开启,储水时闸门关闭;调蓄池下层设初雨提升泵 2 台(1 用 1 备),单泵流量为 1 000 m³/h,扬程为 150 kPa;上层设回用水取水水泵 2 台(1 用 1 备),为雨水处理机房供水,单泵流量为 50 m³/h,扬程为 150 kPa。

3.3 水泵间

水泵间分上下两部分。地上部分为框架结构,平面尺寸为 22.8 m × 8.4 m,高为 8.4 m;地下部分为钢筋混凝土结构,包括前池和集水池,前池渐扩段尺寸为 (6.4 ~ 22.8) m × 9.8 m,深度为 12.6 m,集水池尺寸为 14.0 m × 22.8 m,深为 14.0 m;集水池和泵池总有效容积约 2 720 m³。

水泵间内设计 6 台主泵,3 大 3 小,不设备用。小泵单泵流量为 13 500 m³/h (3.75 m³/s),扬程为 118 kPa;大泵单泵流量为 29 700 m³/h (8.25 m³/s),扬程为 107 kPa。

3.4 出水池

出水池连接水泵出水管、溢流管道和泵站出水总管,起到消能稳流作用。出水池为半地下敞开式钢筋混凝土结构,平面尺寸为 31.8 m × 5.4 m,池深为 5.7 ~ 8.4 m。出水池水位标高按河道百年一遇洪水位推算为 371.91 m。各水泵出水管末端均

安装鸭嘴阀。

3.5 事故溢流通道

正常运行时事故溢流管道闸门关闭,雨水提升排入河道;下雨时突然断电或水泵出现故障,并且河道水位不高时,事故溢流管道前闸门开启,流入泵站的雨水可通过该管道溢流后经出水管排至河道,降低流域范围内内涝情况。

事故溢流通道流量同雨水泵站设计进水流量,为 30.0 m³/s。

3.6 调蓄泵站运行控制

调蓄池平面见图 6。

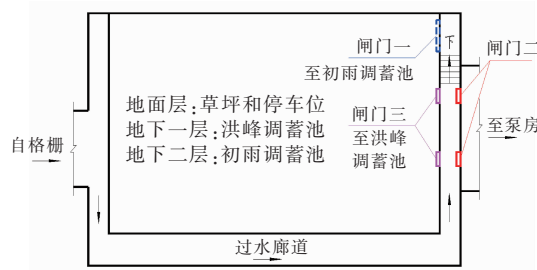


图6 调蓄池平面示意

Fig.6 Plane of storage tank

雨水提升泵启停采用液位控制,设计两种运行模式:

常规运行模式/削峰模式:下雨时,初期雨水首先经由进水井、格栅及调蓄池上层的过水廊道,通过闸门一进入调蓄池地下二层的初雨调蓄池,待初雨调蓄池满池后,后期清静雨水通过闸门二进入泵房提升,水泵由液位控制,随着水位上涨依次开启。如所有水泵均已启动运行,水位仍继续上涨至报警水位,则闸门三开启,洪峰调蓄池启用,洪峰过后雨水由洪峰调蓄池进入泵房提升排入河道。有暴雨洪涝预警时,初雨调蓄池也可作为洪峰调蓄池使用,此时池内应为空池,且闸门一应在水位达到报警水位后再开启。

蓄水模式:在无强降雨预警且有调蓄雨水并回收利用需求的情况下,闸门二常闭,闸门一、闸门三常开,待调蓄池下层及上层满蓄或储蓄足够的水量后关闭闸门二,打开闸门三,雨水进入泵房提升排入河道。

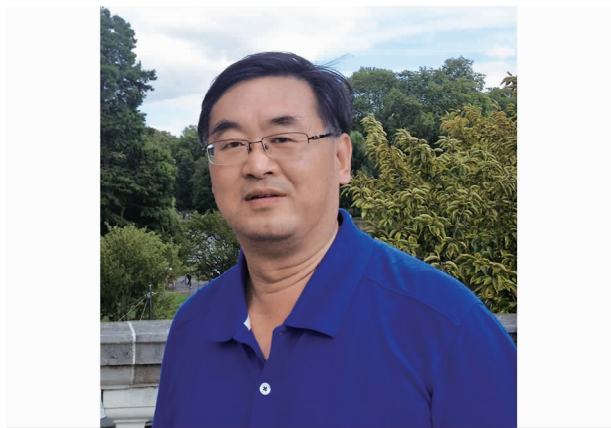
4 结语

通过对西安市某雨水调蓄泵站规模的计算和模拟,认为数学模型法可兼顾考虑排涝安全、区域地形、地下管道内空间的充分利用等因素,明显优于推

理公式法。该工程为城市雨水调蓄泵站的规模确定、方案对比、优化设计及径流污染控制提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 姜乃昌,许仕荣,张朝升,等. 泵与泵站[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
Jiang Naichang, Xu Shirong, Zhang Chaosheng, et al. Pumps and Pumping Stations [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007 (in Chinese).
- [2] GB 51174—2017, 城镇雨水调蓄工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2017.
GB 51174 - 2017, Technical Code for Urban Stormwater Detention and Retention Engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2017 (in Chinese).
- [3] GB 50014—2006, 室外排水设计规范[S]. 2016年版. 北京:中国计划出版社,2016.
GB 50014 - 2006, Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering [S]. 2016 ed. Beijing: China Planning Press, 2016 (in Chinese).
- [4] 金敦. 城市排水系统中初期雨水调蓄池的设计探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2013(7): 130 - 132.
Jin Dun. Discussion on design of initial rainwater storage tank in urban drainage system[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(7): 130 - 132 (in Chinese).
- [5] 史慧婷. 城市初期雨水收集与处理方法的探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2015(12): 69 - 71.
Shi Huiting. Discussion on collection and treatment methods of urban prime rainwater [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015 (12): 69 - 71 (in Chinese).
- [6] 程江,吕永鹏,黄小芳,等. 上海中心城区合流制排水系统调蓄池环境效应研究[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2234 - 2240.
Cheng Jiang, Lü Yongpeng, Huang Xiaofang, et al. Environmental effects of combined sewage detention tank in central Shanghai [J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2234 - 2240 (in Chinese).
- [7] 姚枝良. 石家庄正定新区园博园雨水泵站设计研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(11): 84 - 88.
Yao Zhiliang. Design of Garden Expo storm water pumping station in Shijiazhuang Zhengding New District [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(11): 84 - 88 (in Chinese).



作者简介:王社平(1963 -),男,陕西韩城人,工学博士,正高级工程师,主要研究方向为城镇污水处理及再生利用技术。

E-mail: 1592038115@qq.com

收稿日期: 2018 - 12 - 28

水利工程补短板,水利行业强监管