

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.018

北京中心城区管道空间调蓄技术的数学模型研究

李志丽¹, 姜明洁¹, 潘冉¹, 杨福天², 冀薪宇¹

(1. 北京北排智慧水务有限公司, 北京 100032; 2. 北京排水集团 第一管网分公司, 北京 100032)

摘要: 针对北京市中心城区现存的合流制溢流污染、初期雨水污染,以及地下建立调蓄设施条件受限等问题,提出了北京中心城区管道空间调蓄数学模型分析技术。该模型主要以排水管道的防汛风险控制、运行风险控制和结构风险控制为导向,通过在西盖板河末端建立闸门,并结合北京城区排水雨量特点制定闸门启闭方案,以提升整个区域的绿色防汛能力。该方案落地后,整体实施效果良好。

关键词: 管道空间; 数学模型; 调蓄; 管网; 北京中心城区; 西盖板河

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0111-06

Mathematical Model of Pipeline Spatial Storage Technology in Central District of Beijing

LI Zhi-li¹, JIANG Ming-jie¹, PAN Ran¹, YANG Fu-tian², JI Xin-yu¹

(1. Beijing BEIPAI Smart Water Co. Ltd., Beijing 100032, China; 2. No. 1 Network Operation Company, Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: The central district of Beijing has the problems of combined sewer overflow pollution, initial rainwater pollution and limited footprint area for the establishment of underground storage facilities. Therefore, a mathematical model analysis technique for pipeline spatial storage in central district of Beijing was proposed. The model was mainly guided by flood risk control, operational risk control and structural risk control of drainage pipes. Green flood prevention ability of the whole area was improved through setting up a gate at the end of the Xigaiban River and combining with the characteristics of Beijing City rainfall to formulate the gate opening and closing plan. Practice indicated that good overall performance of the technology was achieved.

Key words: pipeline space; mathematical model; storage; pipe network; central district of Beijing; Xigaiban River

在全球生态环境变化的大背景下,人们对居住环境的的要求逐步提高。习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调“要深入实施水污染防治行动计划,保障饮用水安全,基本消灭城市黑臭水体,还给老百姓清水绿岸、鱼翔浅底的景象”。2018年9月

29日,北京市市长陈吉宁在2018年防汛抗旱工作总结大会上要求“深化对构建绿色排水防洪格局的认识,研究提出构建绿色城市排洪体系工作方案”。

然而,排水管网设施的老化和排水管网连接关系^[1]的复杂化,导致了排水管网溢流、城市内涝等

问题日益突出^[2]。合流制混合雨污水发生溢流、雨污管道的错接、直接排入受纳水体,对水体的水质和生态系统产生了严重影响。从排水管网的建设、运行、管理需求出发,建立排水数字化资产管理数据库^[3]、实现流域级别的管理模式、优化排水系统运行和蓄存能力的合理利用迫在眉睫^[4]。王健等^[5]认为调蓄池的建立需因地制宜。但在北京中心城区却难以实现。笔者以北京中心城区西盖板河流域排水管网模型为例,以绿色防汛为目标,提出了管道空间调蓄数学模型分析技术。

1 研究区域概况

研究区域如图 1 所示。西盖板河位于北京市西二环路西侧,全长为 4.7 km,北起西直门桥,南至复兴门桥,东至新街口南大街,西抵三里河路。西盖板河流域的服务面积为 10.11 km²,属于分流制和合流制混合排水系统,管道总长为 191.783 km,其中合流管线长度为 39.178 km。西盖板河为双孔方沟,尺寸为 2.5 m × 2.5 m ~ 3.8 m × 10.6 m,末端尺寸为 10.6 m × 3.8 m,下游水体排入西护城河。西盖板河平均坡度为 0.09%。该区域内地表覆盖复杂,以建筑物和道路为主,不透水率较高,存在老旧胡同小区。地表相对高程为 41.58 ~ 57.50 m,地势西北高、东南低。



图 1 西盖板河流域示意

Fig.1 Schematics of the Xigaiiban River basin

2 北京西盖板河流域模型建立

本研究采用德国汉诺威水协开发的流体动力学排水管网计算软件 HYSTEM - EXTRAN 和以 GIS 为基础的城市排水设计软件包 FOG,该软件广泛应用于城市排水系统的模拟与评估。排水管网模型的构建和应用流程如图 2 所示。

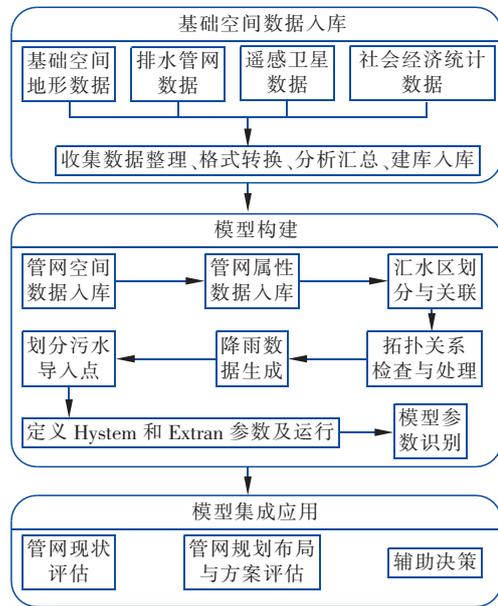


图 2 排水管网模型的构建和应用流程

Fig.2 Construction and application flow chart of drainage network models

2.1 管网数据入库

西盖板河流域模型包括雨水管、污水管、合流管的相关空间和属性数据,进行管网节点汇水区划分,构建“节点 - 管线 - 汇水区”空间网络对应关系(见图 3),该模型不包含小区内部管网。模型包含 6 328 座检查井、191.783 km 长度的管网、4 155 个子集水区、1 座泵站、13 个截流堰、36 个排水口。

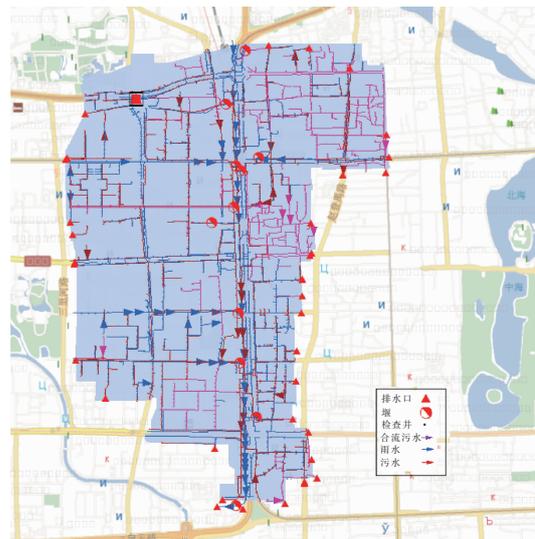


图 3 西盖板河流域管线数据

Fig.3 Pipeline data of the Xigaiiban River basin

2.2 产汇流方法

西盖板河流域排水系统模型的产流模型考虑了

不同下垫面的透水和不透水特性,进行了各子集水区的产流计算^[6]。绿地等透水下垫面的降雨产流采用 Horton 下渗法模拟,汇流模拟采用非线性水库法模拟产流模型和各子集水区的汇流过程。

2.3 水动力方法

地表产流进入排水管网后,在雨水管道中的流动状态较复杂^[7]。本模型采用动力波法进行圣维南方程组离散求解,动态模拟管道中的复杂流态。

2.4 监测数据分析

在西盖板河流域模型建立过程中,同步进行相应雨量和管道节点的监测。借助实际的监测数据,进行监测站点及监测数据的可靠性分析并用于模型率定,使模拟结果更加接近于实际情况,提高模型的精度和可靠性。

2.4.1 雨量计及管道监测点分布

图4为西盖板河流域监测站的分布情况。在西盖板河流域范围内,共设置2座雨量计,分别为排水集团雨量计和展览路雨量计,同时有5个管道监测点位。这2座雨量计对该流域均具有较强的参考意义,通过比选,排水集团雨量计为最佳站点。

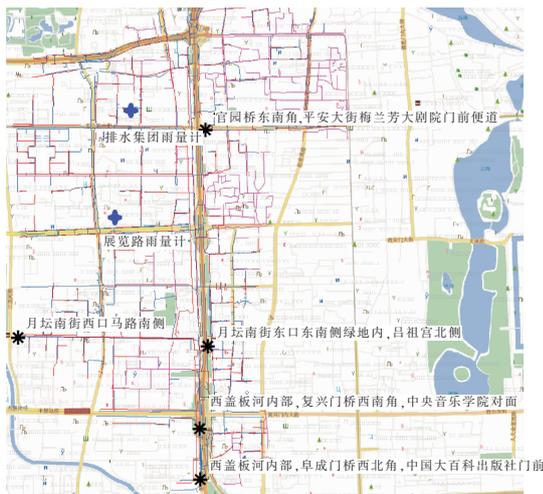


图4 西盖板河流域监测站的分布情况

Fig.4 Monitoring station distribution of the Xigaiiban River basin

2.4.2 降雨数据

本研究采用设计降雨数据和真实降雨数据两种类型。根据《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11/T 969—2016)中设计暴雨强度公式,进行北京市设计暴雨雨型分配。降雨模型分为1年一遇(总降雨量为42.86 mm)、2年一遇(总降雨量为57.75 mm)、3年一遇(总降雨量为64.39 mm)和

5年一遇(总降雨量为71.67 mm),时间步长为5 min,设计暴雨历时选取120 min(见图5)。真实降雨数据为排水集团雨量计的监测数据(见图6)。

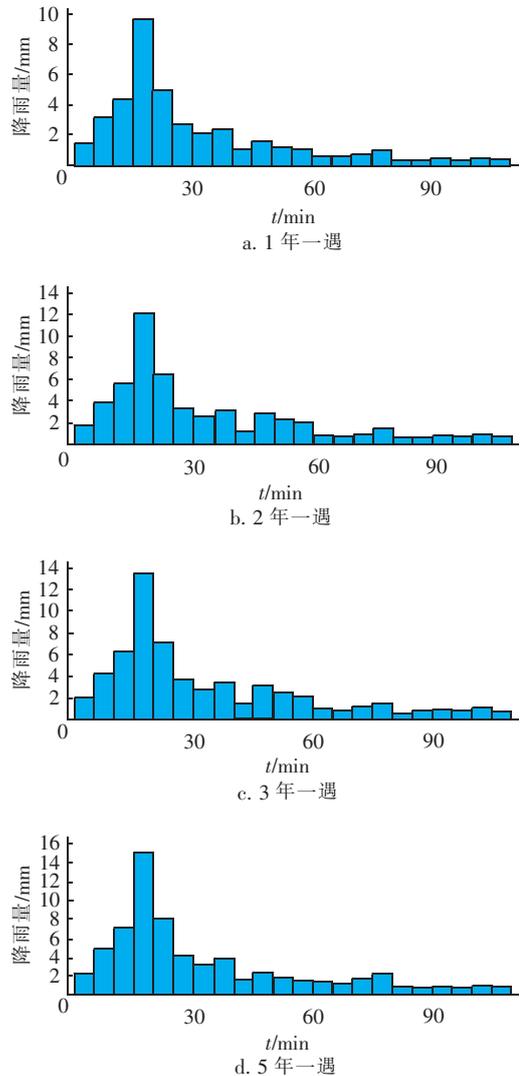


图5 不同重现期设计雨型

Fig.5 Design rain type of different return periods

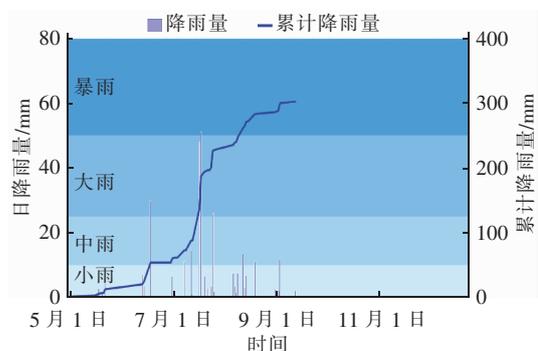


图6 真实降雨统计

Fig.6 Statistics of real rainfall

2.5 参数率定

2.5.1 产汇流

该区域的土层结构为黄土,初期径流参数(f_0)为 $167 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ 或 $1.0 \text{ mm}/\text{min}$;终端径流参数(f_e)为 $8 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ 或 $0.048 \text{ mm}/\text{min}$;恢复系数(k)为 72 d^{-1} ;衰减系数(kD)为 0.432 d^{-1} 。

2.5.2 旱季污水校核

本研究集水区域中的居住人口为 24.8 万,根据《室外给水设计标准》(GB 50013—2018),人均日耗水量取 $220 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。此外,根据旱季流量的日波动曲线(见图 7),旱季日流量峰值为日平均值的 2.4 倍,由此得出旱季峰值流量为 $1\ 516 \text{ L}/\text{s}$ 。

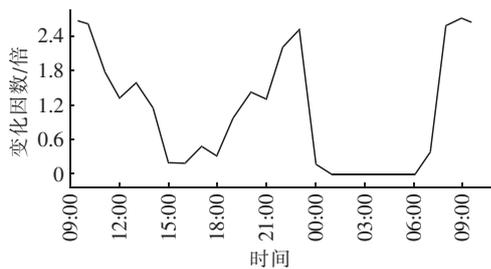


图7 旱季污水时变化曲线

Fig.7 Time curve of sewage during dry season

2.5.3 雨季雨水校核

校核只针对流量监测点位及其上游所携带的管线数据有效。本研究以官园桥东南角、平安大街梅兰芳大剧院门前便道一个监测点为例,其上游管道的长度为 13.139 km ,占全流域管线长度的 6.9% 。根据《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11/T 969—2016)及流域内下垫面的差异,分别调整了模型的道路、建筑物、绿地、综合面积的润湿损失、洼地损失、初始径流和终止径流值,直至模拟径流曲线最大可能地接近于真实监测的径流曲线后,模型才算校核成功。调整过程中遵循三点重要原则,即体积近似相等原则、峰值近似相同原则和峰值时间近似相同原则。

图8为2017年6月13日监测数据与模拟数据的校核情况。可以看出,监测数据和模拟数据的峰值流量时间分别为 $09:15$ 和 $09:20$,时间偏差不超过 5 min ;极小值流量时间分别为 $10:48$ 和 $11:30$,时间偏差小于 1 h 。监测数据的峰值流量为 $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$,模型模拟峰值的流量为 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$,数值偏差为 6% 。监测数据的总流量为 22.37 m^3 ,模型模拟数据的总流量为 21.89 m^3 ,数值偏差为 2% 。

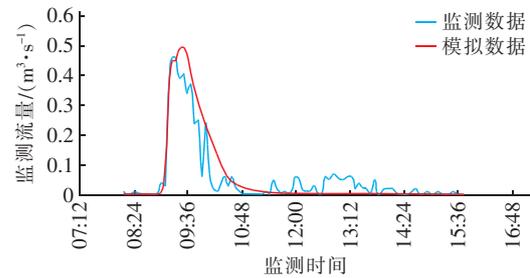


图8 监测点校核结果

Fig.8 Verification results of monitoring point

3 空间调蓄方案

3.1 方案思路

进行管道空间调蓄,主要考虑以下三点风险。

防汛风险控制:复兴门桥为整个流域的高程最低点。模拟过程中,当闸门蓄水时,调蓄水位线低于桥区最低点雨水算子水位线,不会造成桥区淹泡的防汛风险。

运行风险控制:确保闸门的自动泄压阀能够正常运行,当出现紧急状况时,可以快速将闸门放倒。

结构风险控制:模拟过程中,降雨条件相同时,在西盖板河未蓄水和蓄水两种情况下,管道上游各条次干线、直支线和户线的管道水力负荷率均未发生明显变化。因此,不会造成倒灌风险,且管道不存在结构性功能缺陷,能够满足短期承压的要求。

3.2 方案模拟

软件模拟得到的闸板高度与调蓄水量的关系如图9所示。

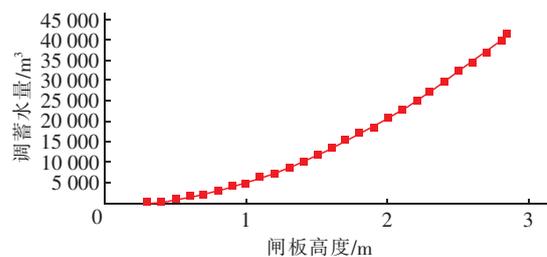


图9 闸板高度与调蓄水量的关系

Fig.9 Relationship of gate height and storage water

西盖板河流域所处地势条件特殊,上方含有多个桥区。该流域的风险点为流域地势最低处,即复兴门桥区。采用不同条件降雨进行模拟,水位线未超过复兴门桥区雨水算子最低点,为安全调蓄阈值。图10为重点管段-桥区地下管网水位线纵断面图。根据模型的模拟结果,为了确保调蓄水位在安全水位 75% 以下,最终的调蓄方案如图11所示。

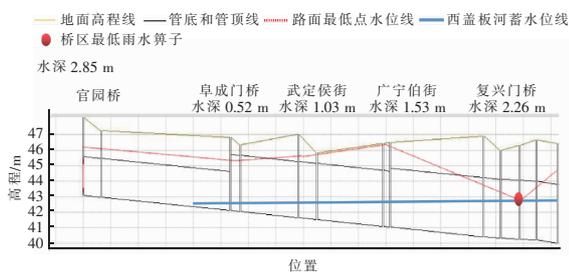


图10 重点管段-桥区地下管网水位线纵断面图

Fig. 10 Profile of key pipe section-underground pipe network water line

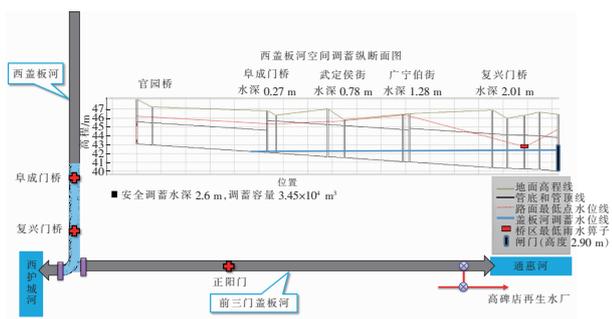


图11 西盖板河空间调蓄方案

Fig. 11 Spatial storage plan of the Xigaiiban River

① 在西盖板河末端及前三门连通沟起点处,分别修建2座远控向下平开式液压闸门和1座远控上开式电动板闸,液压闸门高度为2.9 m,两侧宽度各5.3 m。闸板上预留开孔0.95 m的安全水位。

② 在前三门连通沟处设置两台排空水泵。

③ 雨水从地面流入合流管或雨水管,降雨过程中通过视频和液位监控实时掌握沟内蓄水情况。

④ 当沟内蓄水水位达到2.6 m且降雨继续时,适当开启连通沟闸门向前三门盖板河泄水;当降雨减小时,关闭连通沟闸门继续蓄水;降雨停止后,首先适当打开连通沟闸门,向前三门盖板河泄水,通过前三门截流管道将存蓄水排入高碑店再生水厂进行处理,当盖板河内水位下降至1.3 m时,开启两台水泵,将剩余蓄水抽排入前三门盖板河。

⑤ 最大蓄水高度为2.90 m,安全蓄水高度为2.6 m,形成的有效蓄水容积为 $3.4 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ m}^3$,可安全存蓄15 mm以内全部降雨。

3.3 真实效果评价

在最大蓄水高度下,西盖板河流域增加管道调蓄空间 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,为管网创造了调蓄错峰的可容空间,并为初期雨水治理、净化水体做出了巨大贡献。自西盖板河空间调蓄项目2017年7月6日投

入使用以来,2017年蓄水19次,累计蓄水量为 $51 \times 10^4 \text{ m}^3$,这些水雨后抽排入高碑店再生水厂,增加了处理厂的进水量,减少了140 t的COD初期雨水和合流制溢流对河道的污染,保证了西护城河和南护城河的水环境质量。根据2017年汛期降雨情况,整个汛期65%降雨“零”入河,减少初期雨水及合流制溢流对通惠河的污染。在同等保障度和调蓄能力下,可节省70%的调蓄池建设投资。初雨溢流控制对比效果如图12所示。

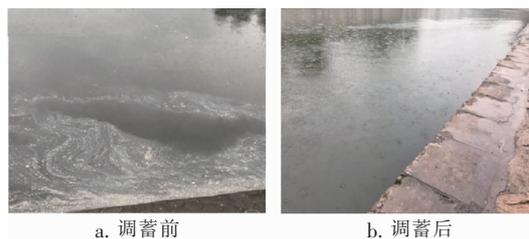


图12 西盖板河初雨溢流控制效果

Fig. 12 Initial rainwater overflow control effect of the Xigaiiban River

4 结论

城市建成区合流制排水系统改造和溢流污染控制一直是行业难题,本研究针对城市老城区雨水管网的特点以及改造条件,通过构建雨洪空间调蓄数字化模型,对排水系统进行专业分析和模拟。全面掌握不同降雨情景下溢流点位、溢流量和溢流时间,并进行雨水控制和调蓄方案研究。通过模型计算结果可以获知,西盖板河流域在最大蓄水高度下激活了管道调蓄空间 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,可以有效存蓄流域内的初期雨水和合流制溢流污染,为合流制区域的水污染控制提供了全新的技术路线,对北京西护城河水环境和生态质量的提升发挥了巨大作用。通过工程实践,优化管网统筹调度,提高调蓄错峰能力,降低排水系统压力,验证了方案的可行性和可靠性,对排水管网流域化排水性能总体评价、建成区合流制系统溢流污染控制提供了全新的技术路线和工程示范。

参考文献:

- [1] 张奎,张志刚. 给水排水管道系统[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
ZHANG Kui, ZHANG Zhigang. Water Supply and Drainage Pipe System [M]. Beijing: China Machine Press, 2017 (in Chinese).

- [2] 李书严,马京津. 城市化进程对北京地区降水的影响分析[J]. 气象科学,2011,31(4):414-421.
LI Shuyan, MA Jingjin. Impact of urbanization on precipitation in Beijing area [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31 (4): 414 - 421 (in Chinese).
- [3] 马洪涛. 数学模型在城市排水规划中应用的相关问题[J]. 中国给水排水,2013,29(21):138-143.
MA Hongtao. Discussion on issues about application of mathematical model in urban drainage planning [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29 (21): 138 - 143 (in Chinese).
- [4] 陈吉宁,赵东泉. 城市排水管网数字化管理理论与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
CHEN Jining, ZHAO Dongquan. Digital Management of Urban Drainage Network; Theory and Applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).
- [5] 王健,周玉文,刘嘉,等. 雨水调蓄池在国内外应用简况[J]. 北京水务,2010(3):6-9.
WANG Jian, ZHOU Yuwen, LIU Jia, *et al.* Application of rainwater storage tanks at home and abroad [J]. Beijing Water, 2010(3):6-9 (in Chinese).
- [6] 张一龙,王红武,秦语涵. 城市地表产流计算方法和径流模型研究进展[J]. 四川环境,2015,34(1):113-119.
ZHANG Yilong, WANG Hongwu, QIN Yuhan. Review of urban surface runoff calculation method and relevant models [J]. Sichuan Environment, 2015, 34 (1): 113 - 119 (in Chinese).
- [7] 张明亮,沈永明,沈丹. 城市小区雨水管网非恒定数学模型的对比研究[J]. 水力发电学报,2007,26(5):80-85.
ZHANG Mingliang, SHEN Yongming, SHEN Dan. Contrast study of unsteady flow mathematical model for rain pipeline networks of urban drainage system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26 (5): 80 - 85 (in Chinese).

作者简介:李志丽(1991-),女,河北唐山人,硕士,工程师,主要从事城市雨洪管理方面的研究工作。

E-mail:lizhili1012@163.com

收稿日期:2019-10-07

修回日期:2019-12-16

(编辑:任莹莹)

(上接第110页)

ZHOU Xiaohang. Study of Agricultural Sewage Pollution Characteristics and Treatment Process Plus Carbon Biological Nitrogen Removal Comparison of Greenhouse Region in the East Coast of Dianchi [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).

- [11] 曾晓岚,王涛涛,罗万申,等. 设施农业生产区降雨径流和氮磷输出特征及模拟——以滇池东岸花卉大棚种植区为例[J]. 湖泊科学,2017,29(5):1061-1069.
ZENG Xiaolan, WANG Taotao, LUO Wanshen, *et al.*

Characteristics and simulation of rainfall runoff and nitrogen & phosphorus outputs in facility agricultural area: a case study of flower greenhouse region in the east coast of Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29 (5): 1061 - 1069 (in Chinese).

作者简介:杨占强(1994-),男,甘肃会宁人,硕士研究生,主要研究方向为废水处理理论与技术。

E-mail:2737065197@qq.com

收稿日期:2020-05-19

修回日期:2020-07-10

(编辑:任莹莹)