

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.03.019

基于MIKE+水质模型的径流污染控制研究

王震^{1,2}, 江竹青¹, 李悦¹, 熊宇奇¹, 吴雪军¹

(1. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330038; 2. 华东交通大学
土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 以南昌市前湖水系为研究对象,根据片区规划设计情况构建基于MIKE+平台的区域管网、河网、汇水区及水质模型,模型中包含了初期雨水截流管道、智能截流井、调蓄池等径流污染控制措施。采用污染物累积/冲刷模型,分析了单次降雨的径流污染情况。对智能截流井的3种控制方式进行了对比分析,并讨论了截流系统对径流污染的控制效果。模拟结果表明,径流污染具有明显的初期效应。智能截流井根据调蓄池水位进行控制时,既能发挥调蓄池的全部能力,又能较好地保证初期雨水不被稀释。截流系统对河道水质具有一定的保护作用,不同污染物的控制效果与其冲刷特性关系密切。

关键词: 水质模拟; 初期雨水; 径流污染控制; 末端截流; 智能截流井

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0124-06

Control of Runoff Pollution Based on MIKE+ Stormwater Quality Model

WANG Zhen^{1,2}, JIANG Zhu-qing¹, LI Yue¹, XIONG Yu-qi¹, WU Xue-jun¹

(1. Nanchang Urban Planning & Design Institute Group Co. Ltd., Nanchang 330038, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang
330013, China)

Abstract: This paper constructed the regional pipe network, river network, catchment area and water quality model of Qianhu River system in Nanchang City based on MIKE+ platform according to regional planning. The model included runoff pollution control measures such as initial rainfall interceptor pipe, intelligent intercepting well and storage pool. The runoff pollution of a single rainfall was analyzed by pollutant buildup/washoff model. Three methods for intelligent interceptor well control were analyzed, and the performance of intercepting system for runoff pollution control was discussed. The simulation results showed that the runoff pollution had obvious initial effect. When the intelligent interceptor well was controlled according to the water level of the storage pool, the full capacity of the storage pool was utilized without obviously diluting the initial rainwater. The intercepting system was capable of protecting the water quality of the river to a certain extent, and the control performance of different pollutants was closely related to its washoff characteristics.

Key words: water quality simulation; initial rainwater; runoff pollution control; terminal interception; intelligent intercepting well

基金项目: 2020年南昌市第二批科技计划项目(2020-NCGCZX-005)

通信作者: 王震 E-mail: hijackwangzhen@foxmail.com

1 研究区域概况

以南昌市前湖干流及其上游水系的汇水范围为研究区域,该区域位于南昌市西北方向,左邻乌沙河,右傍赣江,跨越红谷滩区及新建区,汇水面积约为40 km²。前湖干流由南北两支河道汇合而成,北支为物华渠-留山湖-华南渠,南支为永强渠,汇合后向东注入前湖,前湖干流及其上游水系河道总长约为12.5 km。研究区域范围及水系位置见图1。

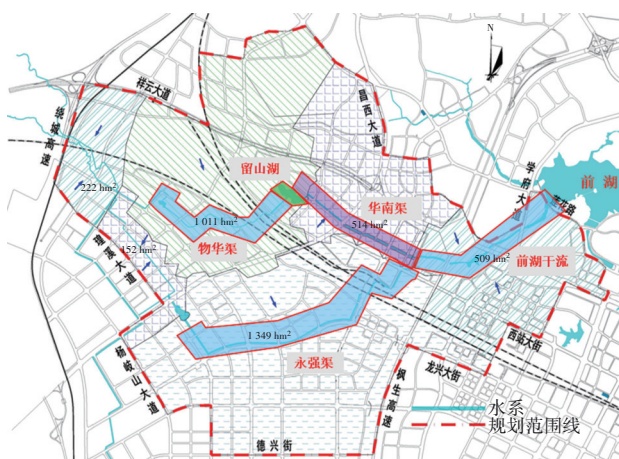


图1 研究区域范围及水系位置

Fig.1 Study area and location of river system

为提升前湖上游水系的水质,规划在其汇水范围内进行点源、面源、内源的污染治理,以及生态修复和水体活化五大工程措施。点源污染治理主要通过对整个服务范围内从源头开始进行雨污分流改造、错接漏接改造、污水管网完善等工程措施,完善污水收集系统。面源污染治理主要通过雨水排河口设置截流井,将初期雨水截流后经初雨管道输送至调蓄池,再经相关设施处理后排放水体,对径流污染进行控制^[1-3]。内源污染治理主要通过河道清淤和底泥处理的方式,缓解生物或物理等作用下内源释放造成的二次污染。生态修复是通过构建水生生态系统,并辅以生态浮岛、水生植物及人工增氧等强化措施增强水体自净能力。水体活化则是通过向河道补水提高水体流动性,以满足水体的环境功能要求。

本研究主要模拟径流污染对河道水质的影响,同时将由赣江引入的活化水及片区九龙湖污水厂的尾水纳入模拟,现简要介绍项目的初雨截流系统。研究区域的初雨截流标准为4 mm,水系沿线规划有58个雨水排口,拟在每个排口处设置智能截流

井,截流的初期雨水经由水系沿线的初雨截流管道分别输送至5座初雨调蓄池。1#调蓄池及2#调蓄池蓄存的初期雨水在降雨结束后由留山初雨处理站处理后排入华南渠,3#调蓄池及4#调蓄池蓄存的初期雨水分别由1#生态滤池及2#生态滤池处理后排入永强渠,5#调蓄池蓄存的初期雨水由前湖干流初雨处理站处理后排入前湖干流,初雨设施布置如图2所示。

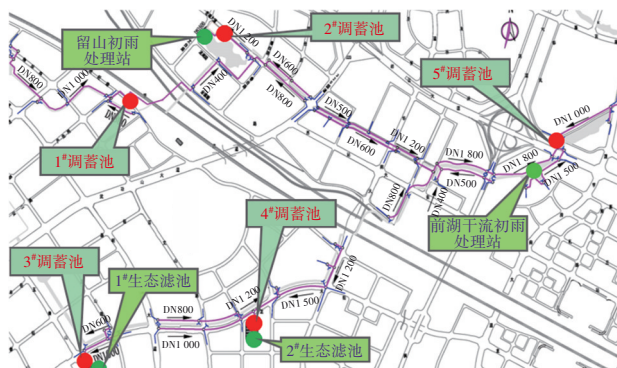


图2 初期雨水收集处理系统布置

Fig.2 Layout of initial rainwater collection system

调蓄池规模依据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017),采用单位面积调蓄深度确定^[4],处理设施按照2 d处理完确定规模,1#~5#调蓄池的调蓄规模分别为7 700、17 300、4 700、16 500、20 000 m³;留山初雨处理站、前湖干流初雨处理站、1#生态滤池、2#生态滤池的处理规模分别为12 500、10 000、2 350、8 250 m³/d。

水系补水点位于物华渠起点位置,水源为赣江,活化水水质满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2022)Ⅱ类水标准。九龙湖污水处理厂位于永强渠南侧,4#调蓄池下游约1 km处,处理规模为9×10⁴ m³/d,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,尾水排入永强渠内,最终进入前湖。

2 模型构建

本研究采用MIKE+模型进行前湖上游水系的径流污染模拟分析。MIKE+是由丹麦DHI公司开发的一款可用于排水管网、河网和二维地表漫流模拟的水文水动力模型软件,其包含降雨模块、一维管流水动力模块、一维河网水动力模块、实时控制模块、水质模块、二维漫流模块等^[5-6]。本研究主要考察初期雨水截流系统对前湖上游水系的径流污染

控制作用,需要应用降雨模块、一维管流模块、河网模块、实时控制模块及水质模块。

2.1 模型概化思路

面源污染对河道水质的影响涉及一系列复杂过程,结合本研究区域的特点对其进行概化。晴天时污染物在地面不断累积,降雨时雨水对地表的污染物形成冲刷,污染物随地表径流进入雨水管网。雨水流量较小时,初期雨水由智能截流井截流后经由截流管道输送至调蓄池;雨量超过设定标准后,智能截流井闸门关闭,雨水溢流进入河道,污染物在河道内对流、扩散、自衰减。雨停后,调蓄池内蓄存的初期雨水经过相关设施处理后排入河道。模型构建思路如图3所示。

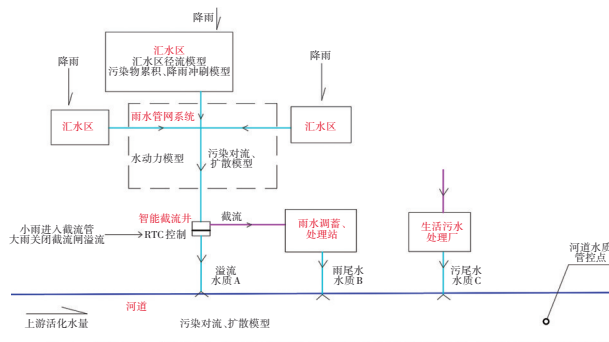


图3 模型构建概化思路

Fig.3 Idea of model generalization

2.2 管网、河网、汇水区及水质模型构建

管网模型:根据片区排水规划图,构建研究范围内的雨水管网系统及初雨截流管网系统,见图4。



图4 管网、河网模型平面

Fig.4 Model plan of pipe network and river network

管网模型共包含1 615段管线、1 678个检查井、58个排河口及5座调蓄池。通过在模型中构建

闸门和溢流堰的组合单元,模拟排口前的智能截流井,并设定闸门、溢流堰相应控制规则,实现截流并在雨天的自动启闭。

河网模型:在模型中建立物华渠、留山湖、华南渠、永强渠及前湖干流5条河道。需整治的河段按照规划断面设定,现状利用的河段断面根据测量资料确定,断面之间的河道里程间距一般不超过200 m。河道上根据现状及规划情况设置水工构筑物,共包含17座桥涵、3处溢流堰及1处闸门。

汇水区模型:根据片区用地规划,将汇水范围划分为住宅用地、工业用地、绿地、市政道路和非建设用地5种类型,其对应的不透水率分别设置为0.6、0.7、0.15、0.9、0.3。采用泰森多边形法划分雨水管道的汇水面积,将研究区域划分为1 566个子汇水区,通过时间-面积曲线模拟产流过程。

水质模型:由于河道水质管控点的要求是达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅳ类标准,因此将COD、BOD₅、NH₃-N及TP作为模拟的污染物参数。MIKE+内置了两种径流污染物计算方法,分别为累积/冲刷计算方法和降雨平均浓度计算方法。本研究考察初期雨水的作用,采用累积/冲刷计算方法^[7]。累积函数分为线性函数和指数函数,这里采用指数函数,具体公式如下:

$$\frac{dM}{dt} = A_c - D_{rem} M \quad (1)$$

$$M_{max} = \frac{A_c}{D_{rem}} \quad (2)$$

式中: t 为时间,d; M 为 t 时刻单位面积上累积的污染物质量,kg/hm²; M_{max} 为单位面积上累积的污染物的最大质量,kg/hm²; A_c 为污染物净累积速率常数,kg/(hm²·d); D_{rem} 为风吹等降雨除外因素造成的污染物损失率,d⁻¹。

冲刷模型建立在冲刷的污染物与降雨强度呈指数关系的假设上,其函数如下:

$$\frac{dM_{rem}}{dt} = D_r \left(\frac{i_r}{i_d} \right)^n \quad (3)$$

式中: M_{rem} 为单位面积上残留的污染物浓度,kg/hm²; D_r 为降雨冲刷系数,kg/(hm²·d); i_r 为降雨强度,mm/h; i_d 为降雨强度常数,25.4 mm/h; n 为冲刷指数。

MIKE+模型中需要输入的累积/冲刷参数为 M_{max} 、 A_c 、 D_r 、 n 。综合秦攀^[8]、聂铁锋^[9]、吴建立^[10]获得的结果,各水质模型参数取值见表1。

表1 累积/冲刷模型参数

Tab.1 Buildup/washoff model parameters

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP
$M_{\max}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	60	10	2	0.3
$A_c/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	5	5	5	5
$D_f/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	2 880	480	96	14.4
n	2	2	2	2

2.3 模型边界条件

降雨边界:根据南昌地区的暴雨强度公式转化为2 h历时芝加哥雨型^[11],雨峰系数为0.35。

流量边界:本研究模拟时长为3 d,按照流量发生时段分为3种类型。①全过程,物华渠源头汇入流量为0.1 m³/s,污水处理厂尾水汇入流量为1.05 m³/s。②降雨后2~40 h,1[#]生态滤池汇入流量为100 m³/h,2[#]生态滤池汇入流量为350 m³/h,留山初雨处理站汇入流量为520 m³/h,前湖干流初雨处理站汇入流量为360 m³/h。③降雨后2~72 h(模拟结束),活化水量为1.5 m³/s。

水位边界:前湖常水位为18.0 m。

水质边界:污水处理厂及初雨处理设施出水均为一级A,物华渠源头入流及活化水质均按照实测水质确定,前湖水质按照地表水准Ⅳ类标准考虑。研究范围的雨前干旱天数取7 d。

3 结果与讨论

3.1 径流污染水质分析

选取任意一段起端雨水管(Link_3357),分析地表汇入管网的径流污染水质变化规律,以COD为例,如图5所示。

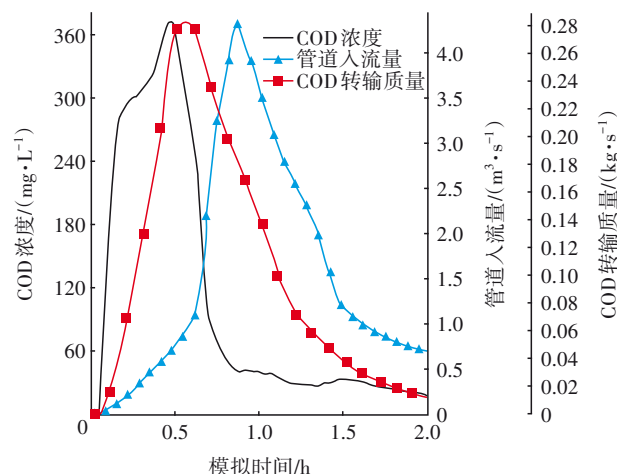


图5 起端管道内COD浓度与流量和COD运输质量的关系

Fig.5 Relationship between COD concentration and flow rate/COD transport in upstream pipe

进入管道系统的浓度随着降雨的进行逐渐升高,在28 min左右达到最高值(约为375 mg/L)。此时进入管道系统的流量仍在急速上升,而单位时间进入管道系统的COD质量即将下降,说明此时地表污染物已被大量冲刷掉,而雨量仍在变大,造成了COD浓度下降,体现了径流污染初期效应较为明显。与此规律相似,BOD₅、NH₃-N和TP的最高浓度分别为87、17.8和2.8 mg/L。

在模型中选择与此起端管道连接的末端管道(Link_3855),分析管道内的水质,结果如图6所示。可知,末端管道的COD浓度峰值较起端管道存在约12 min的滞后,峰值浓度约为340 mg/L,略低于起端管道。但末端管道内的COD运输质量为7.8 kg/s,远大于起端的0.28 kg/s。这是因为末端管道汇水面积大,收集了沿线汇入的径流污染物,排河对水体影响也较大。

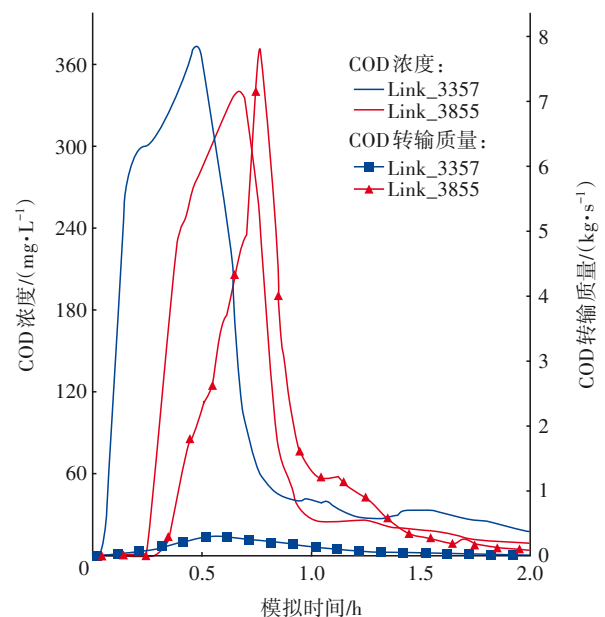


图6 起端管道与末端管道内COD浓度和COD运输质量的变化

Fig.6 Change of COD concentration and COD transport in upstream and downstream pipes

3.2 智能截流井控制方式讨论

传统截流井由于无法准确截流,导致在降雨后期大量较为洁净的雨水进入到截流系统,降低了设施的处理能力,使出水水质变差,影响对径流污染的控制效果。近些年,配备闸门、堰门、水泵等设备,以及可实现智能化控制的截流井被广泛使用,如何确定截流井的控制原则是决定截流效果的关键。

键。本研究通过模型对3种控制方案进行比较。

方案一:根据截流系统的设计标准控制(雨量控制)。本项目中初期雨水截流标准为4 mm,按照降雨达到4 mm后延迟一定的管道流行时间再关闭限流闸门。

方案二:根据智能截流井内水位控制。当截流井内水位达到与截流井连接的截流支管管顶时,关闭限流闸门。

方案三:根据末端调蓄池的水位控制。当末端对应的调蓄池水位达到设计水位时,关闭限流闸门。

根据采用的雨型,当降雨重现期为3年时,降雨16 min后降雨总量达到4 mm。1#~5#调蓄池的蓄满时间分别为42、44、39、45、54 min,即降雨达到4 mm时,需要延迟23~38 min后关闭限流闸,才能达到调蓄池的设计能力。由于调蓄池汇水区的形状、大小不同,其蓄满时间相差15 min,且蓄满时间基本与调蓄池的有效容积呈正相关,因此方案一根据降雨统一进行控制的方式难以同时保证几个调蓄池达到截流初雨设计能力且不被后续清洁雨水稀释。方案三根据调蓄池分片控制其对应的截流井,可以较好地解决方案一的问题。方案二控制的目的是针对每一个排口采取不同的关闸时间以更为准确地截流到初期雨水。采用这种控制方式时,1#~5#调蓄池的充满度分别为0.35、0.43、0.065、0.93、0.60。值得注意的是,3#调蓄池的充满度不足10%。在不关闭限流闸的情况下,3#调蓄池也是最早充满的,即相对来说其截流管内流量较大,较早超过了截流管的管顶,造成限流闸门很快关闭,调蓄池未收集到设计要求的初雨量。因此,在实际工程中建议采用方案三的调蓄池分片控制规则,既能发挥调蓄池的全部能力,又能较好地保证初期雨水不被稀释。

3.3 初雨截流系统对径流污染控制效果的讨论

采用上述方案三的智能截流井控制原则,在降雨结束2 h后,1#~5#调蓄池内的COD浓度分别为274.5、240.6、223.8、265.9、213.3 mg/L。按照初雨处理设施出水为一级A标准,根据调蓄池的调蓄容积计算,5座调蓄池能够控制的COD总量分别为1 728.7、3 297.4、816.9、3 562.4和3 266 kg, COD削减总量为12.67 t。同样,可计算出BOD₅的削减总量为2.5 t,氨氮的削减总量为245.9 kg,总磷的削减总量为62.2 kg。

以前湖干流末端管控点的水质考察截流系统对河道的影响。表2为降雨过程中该管控点的污染物峰值。模拟结果表明,截流系统对降雨时河道管控点的污染物有一定控制作用,其中对COD的控制效果最为明显,对TP的控制效果最差。通过对起端管道污染物浓度随时间变化的曲线分析,判断该现象与4种污染物的冲刷特性不同有关。在降雨1 h时COD浓度(为峰值浓度的10.8%)已经大幅削减,而TP浓度(为峰值浓度的28.6%)仍然较高,因此,调蓄池蓄满时仍有较高比例的TP溢流至河道。可见,不同污染物随降雨的冲刷特性会对截流系统功能有很大影响,值得进行深入研究。同时,初雨截流系统的设计标准,应根据需要控制的主要污染物指标合理确定,从而更有针对性地保护水体环境。

表2 水质管控点污染物峰值浓度

Tab.2 Peak concentrations of pollutants at water

quality control location		mg·L ⁻¹		
项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP
未设截流系统	170.5	43.4	9	1.43
设置截流系统	119.0	38.3	8	1.31

4 结论

以南昌市前湖水系作为研究对象,根据其规划设计情况构建了径流污染的MIKE+水质模型,并对径流污染模拟的水质进行了分析。结果表明,径流污染具有较为明显的初期效应,进入管网的COD、BOD₅、NH₃-N及TP最高浓度分别达到了375、87、17.8和2.8 mg/L。通过对智能截流井三种不同的控制方式模拟,建议截流井采用调蓄池水位控制方式。模型分析表明截流系统对河道水质具有一定的保护作用,但具体效果与不同污染物的冲刷特性存在较大关联,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 李晓莉,李益飞,许秋海,等.截流式分流制在水系污染控制治理中的应用:以南昌市幸福水系为例[J].环境工程,2020,38(4):124-127,140.
LI Xiaoli, LI Yifei, XU Qiuhai, et al. Application of intercepting shunt system in water pollution control and treatment: a case study on Xingfu water system in Nanchang [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (4): 124-127, 140(in Chinese).
- [2] 王肖军.初期雨水调蓄池在城市排水系统中的应用

- [J]. 中国给水排水, 2012, 28(10): 45-47.
- WANG Xiaojun. Application of initial rainwater storage tanks in urban drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(10): 45-47 (in Chinese).
- [3] 曾木海, 谢小龙. 初雨调蓄池在武汉市某湖泊综合整治工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 93-97.
- ZENG Muhai, XIE Xiaolong. Application of initial rainwater storage tank in a lake comprehensive treatment project in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 93-97 (in Chinese).
- [4] 吴海涛, 闫爱萍, 曾祥国, 等. 分流制排水系统中组合式初雨调蓄池的设计与优化[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 106-110.
- WU Haitao, YAN Aiping, ZENG Xiangguo, *et al.* Design and optimization of combined initial rainwater storage tank in separate drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 106-110 (in Chinese).
- [5] 马盼盼, 于磊, 潘兴瑶, 等. 排水模型不同概化方式对模拟结果的影响研究——以 MIKE URBAN 软件为例[J]. 给水排水, 2019, 45(3): 132-138.
- MA Panpan, YU Lei, PAN Xingyao, *et al.* Study of the influence of different generalization methods of drainage model on simulation results: a case study of MIKE URBAN [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(3): 132-138 (in Chinese).
- [6] 刘龙志, 马宏伟, 杜垚, 等. 基于 Mike 模型的海绵城市内涝整治方案效果分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(12): 13-18.
- LIU Longzhi, MA Hongwei, DU Yao, *et al.* Analysis of waterlogging renovation effect in sponge city based on Mike model [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12): 13-18 (in Chinese).
- [7] 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 等. 不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3328-3337.
- SHAN Xihuan, XIE Wenxia, LIAO Yunjie, *et al.* Influence of impervious surface roughness on accumulation and erosion of urban non-point source particles [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3328-3337 (in Chinese).
- [8] 秦攀. 子汇水区划分精度对 SWMM 模型应用于城市非点源污染负荷估算影响的研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2015.
- QIN Pan. The Influence of Sub-catchment Size Delineation on Urban Non-point Source Pollutants Load Estimation Based on SWMM [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2015 (in Chinese).
- [9] 聂铁锋. 广州市城区暴雨径流非点源污染负荷核算技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- NIE Tiefeng. Calculating Techniques Research on Guangzhou Urban Non-point Source Pollution Load Caused by Stormwater Runoff [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [10] 吴建立. 低影响开发雨水利用典型措施评估及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WU Jianli. Evaluation and Application of Typical Methods for Rainwater Utilization of Low Impact Development [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [11] 李晶, 刘志生, 薛喜权, 等. 长春市降雨特征及雨型分析研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 100-104.
- LI Jing, LIU Zhisheng, XUE Xiquan, *et al.* Study of rainfall characteristics and pattern in Changchun City [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(5): 100-104 (in Chinese).

作者简介: 王震(1992-), 男, 江西南昌人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为市政给排水工程设计。

E-mail: hijackwangzhen@foxmail.com

收稿日期: 2022-03-22

修回日期: 2022-05-07

(编辑: 任莹莹)