

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.019

海绵设施的径流峰值控制贡献及调蓄容积计算方法

许文斌^{1,2}, 李益飞^{1,2}, 吴雪军¹, 尹小斌^{1,2}, 侯改娟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. 南昌市城市内涝防治与河湖水质调控工程技术研究中心, 江西 南昌 330038)

摘要: 为系统指导径流峰值控制方案的制定,对海绵设施进行了归纳总结,采用调蓄池概化各种设施,采用模型模拟分析了不同调蓄雨量及不同调蓄方式对径流峰值控制的贡献。结果表明,当调蓄雨量由14 mm增至22 mm时,径流峰值削减率由40.0%增至71.3%,径流峰值削减作用十分明显,峰值出现时间相应延后了4.8~14.8 min。在源头全程调蓄、末端全程调蓄、末端脱过调蓄3种情况下,源头全程调蓄所需调蓄容积约为末端全程调蓄的50%,末端脱过调蓄所需调蓄容积约为末端全程调蓄的22%,据此给出了调蓄池布置的合理建议。此外,推求了一种管道流量过程线,以便不具备模型使用条件的区域计算调蓄容积。

关键词: 海绵设施; 径流峰值控制; 调蓄容积; 全程调蓄; 脱过调蓄

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0120-06

Contribution of Sponge Facilities to Peak Runoff Control and Calculation Method of Storage Volume

XU Wen-bin^{1,2}, LI Yi-fei^{1,2}, WU Xue-jun¹, YIN Xiao-bin^{1,2}, HOU Gai-juan¹

(1. Nanchang Urban Planning & Design Institute, Nanchang 330038, China; 2. Nanchang Urban Waterlogging Prevention and Water Quality Control Engineering Research Center, Nanchang 330038, China)

Abstract: The sponge facilities were summarized to systematically guide the formulation of peak runoff control scheme. Various facilities were generalized by storage tank, and the contribution of different rainwater storage capacity and modes to the peak runoff control was analyzed by simulation. When the storage capacity increased from 14 mm to 22 mm, the peak runoff reduction rate increased from 40.0% to 71.3%, the peak runoff reduction effect was very obvious, and the occurrence time of peak runoff was delayed by 4.8 min to 14.8 min. Among three storage modes, namely whole-course storage at the source, whole-course storage at the end and partial storage at the end, the storage volume required for the whole-course storage at the source was only approximately 50% of the whole-course storage at the end, and the storage volume required for the partial storage at the end was only approximately 22% of the whole-course storage at the end. Based on this, reasonable suggestions for the arrangement of the storage tank were proposed. In addition, a pipeline flow process curve was deduced to calculate the storage volume in areas without available models.

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: 许文斌 E-mail: 993210512@qq.com

Key words: sponge facility; peak runoff control; storage volume; whole-course storage; partial storage

目前我国的海绵城市建设已取得一定进展,对径流总量和径流污染的削减初见成效。作为城市雨洪管控的重要组成部分,海绵设施对径流峰值控制的贡献也备受关注,该领域已有不少研究成果^[1-8],但大多数以某种单项或若干组合措施为研究对象,且关于调蓄雨量和调蓄方式对径流峰值控制的贡献鲜有探讨,缺乏系统性研究。

海绵设施根据径流峰值控制阶段的不同,可分为源头控制、中途控制和末端控制三类,根据径流峰值控制方式可分为渗、滞、蓄三种类型,每个阶段和方式都有各自的技术措施和主要目标^[9]。《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》里提及的单项海绵措施有20多种,其各种组合措施更是数不胜数,但这些措施本质上可分为五大类:生物滞留网格、透水铺装、渗渠、储水池和植草沟。而任何一种海绵设施均可分解为表面蓄水层、铺装层、土壤层、底部蓄水层及排干措施等五个基本单元。对于径流峰值的控制来讲,表面蓄水层及底部蓄水层直接发挥峰值的调蓄功能;而铺装层和土壤层作为表面蓄水层与底部蓄水层的中间层,表面上看是发挥雨水下渗作用,实质上是雨水进入底部蓄水层的排水通道;此外,排干措施则是恢复表面蓄水层和底部排水层调蓄能力以及铺装层和土壤层下渗能力的必要措施。据此分析,调蓄功能(蓄)是径流峰值控制的主要途径。为了进一步指导雨峰控制措施规划设计,笔者借鉴文献[10]的研究方法,采用调蓄池概化各种海绵设施,以某汇水区作为研究对象,采用模型分析不同调蓄雨量及不同调蓄方式对径流峰值控制的贡献。此外,为了便于不具备模型使用条件的区域计算调蓄容积,推求出了一种管道流量过程线。

1 研究工具

水力模拟软件采用鸿业暴雨排水和低影响开发模拟系统,该系统是在AutoCAD环境内进行二次开发得到,采用的核心计算模型是暴雨洪水管理模型(SWMM)。SWMM主要用于城市区域径流量和水质的单一事件或者长期(连续)模拟,其基于垂向积分的物质和动量守恒方程,即一维非恒定流圣

维南方程组来模拟管道的水流状态,方程组利用隐式有限差分格式求解。

2 降雨条件

本研究以单场2 h短历时降雨作为边界条件,选用国内外应用最多的芝加哥雨型,该雨型的雨峰部分与降雨历时无关,与频率分析法的误差最小,洪峰不受降雨历时影响,一场确定的降雨过程在各段管道计算时均能适用,雨强过程容易确定,雨峰相对位置容易得到。

3 不同调蓄雨量对径流峰值控制的贡献

以南昌市某小区为研究对象,该小区占地面积约为3.5 hm²,综合径流系数取0.6,小区雨水系统接入市政雨水管道处的市政主管管径为DN1 000。采用鸿业暴雨排水和低影响开发模拟系统构建管网模型,在小区雨水干管接入市政雨水管道前设置调蓄池,并以3年一遇2 h降雨作为边界条件,进行模拟计算,最后提取小区雨水干管末端的流量变化曲线(如图1所示),得到各调蓄雨量条件下的径流峰值削减率和峰值延后时间,如表1所示。可以看出,当调蓄雨量由14 mm增至22 mm时,调蓄池对径流峰值的削减率由40.0%增至71.3%,径流峰值削减效果十分明显,峰值出现时间相应延后了4.8~14.8 min。径流峰值削减率随调蓄雨量的变化曲线如图2所示。可以看出,径流峰值削减率随调蓄雨量单调递增,而且曲线斜率也单调递增,这是因为,随着降雨的延续,降雨强度逐渐减小,调蓄作用更加明显。

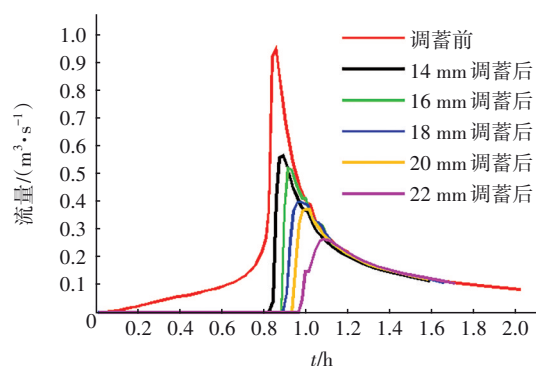


图1 各调蓄雨量条件下的流量过程线

Fig.1 Flow hydrograph at different rainwater storage

表1 调蓄效果

Tab.1 Comparison of storing effect

项 目	峰值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰现时间/min	峰值削减率/%	峰值延后时间/min
调蓄前	0.94	49.2	—	—
14 mm 调蓄后	0.57	54.0	40.0	4.8
16 mm 调蓄后	0.52	56.4	44.6	7.2
18 mm 调蓄后	0.40	58.2	57.4	9.0
20 mm 调蓄后	0.37	60.0	60.6	10.8
22 mm 调蓄后	0.27	64.0	71.3	14.8

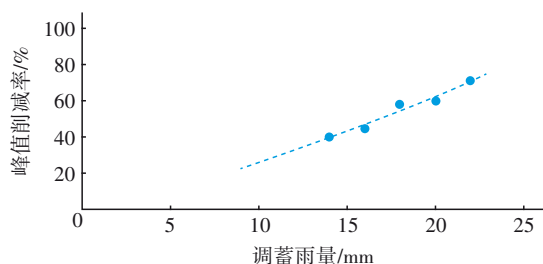


图2 径流峰值削减率随调蓄雨量的变化曲线

Fig.2 Curve of peak runoff reduction rate with rainwater storage

以1年一遇2 h降雨作为边界条件进行模拟计算,得到径流峰值为 $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。相对于3年一遇的径流峰值削减率为36%,对应图2横坐标为12.9 mm调蓄雨量。换言之,当调蓄雨量为12.9 mm时,径流峰值可由3年一遇削减至1年一遇。

4 不同调蓄方式对径流峰值控制的贡献

在具体分析前,先阐述两个概念:全程调蓄与脱过调蓄,如图3所示。

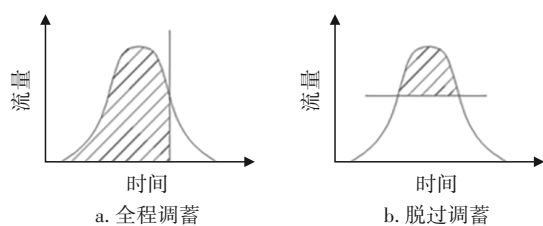


图3 全程调蓄与脱过调蓄示意

Fig.3 Schematics of whole-course storage and partial storage

全程调蓄是指降雨产生的径流雨水一开始就进入调蓄池,直至调蓄池蓄满,径流雨水再排入下游管道系统。一般用于源头控制径流污染和径流总量的海绵调蓄措施,多数采用的是全程调蓄方式。脱过调蓄是专门用来削减径流峰值的一种调蓄方式,即初期雨水量不大时,径流雨水直接排入下游管道,待雨量超过下游管道排水能力时,超出

的径流雨水进入调蓄池。根据调蓄池设置在雨水系统的源头还是末端,上述两种方式又可细分为源头全程调蓄、末端全程调蓄、源头脱过调蓄及末端脱过调蓄,其中源头脱过调蓄形式运用较少。

以下着重分析比较相同径流峰值削减率条件下,源头全程调蓄、末端全程调蓄、末端脱过调蓄3种情况下所需的调蓄容积大小,以指导工程实践。

以南方某市某独立的汇水区域为研究对象,该区域总汇水面积约为 50 hm^2 ,综合径流系数为0.6,雨水主箱涵断面尺寸为 $B \times H = 2000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 。采用鸿业暴雨排水和低影响开发模拟系统构建管网模型,以3年一遇2 h降雨作为边界条件进行模拟计算,得到未设调蓄和各地块均设有源头全程调蓄(调蓄雨量为12.9 mm)两种工况下雨水系统末端的流量过程曲线,如图4所示。

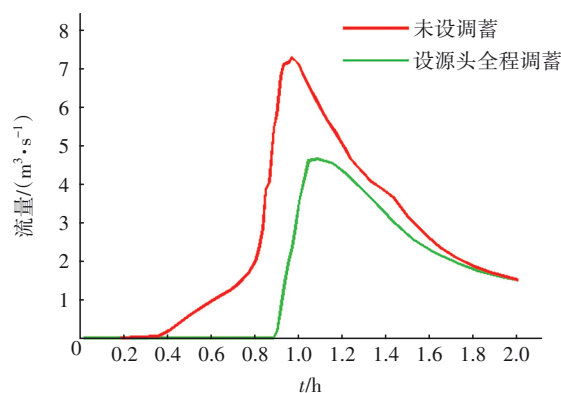


图4 未设调蓄和设有源头全程调蓄两种工况下的流量过程线

Fig.4 Flow hydrograph without storage and with whole-course storage at the source

提取上述曲线的数据并统计图4红色曲线的峰值削减至绿色曲线的峰值所需末端全程调蓄容积及末端脱过调蓄容积,即图5中的阴影部分面积。统计结果显示,源头全程调蓄容积、末端全程调蓄容积和末端脱过调蓄容积分别为 6450 、 12780 、 2860 m^3 (源头全程调蓄容积由调蓄雨量12.9 mm和汇水面积反算求得)。

综上所述:①在源头全程调蓄、末端全程调蓄和末端脱过调蓄3种情况下,源头全程调蓄所需调蓄容积约为末端全程调蓄的50%,末端脱过调蓄所需调蓄容积约为末端全程调蓄的22%。②相对于末端调蓄,源头调蓄可以减轻下游所有管道的负荷,而末端调蓄只能减轻出水口下游水体的负荷,

而且如果源头调蓄能与初雨截流措施有效结合,则对径流污染控制也能起到重要作用,故首先推荐采用源头调蓄措施来削减径流峰值。③若采用末端调蓄,则不应采用全程调蓄方式,但因脱过调蓄需将初期雨水首先排除,故如需控制径流污染和径流总量,则应搭配初雨截流措施。

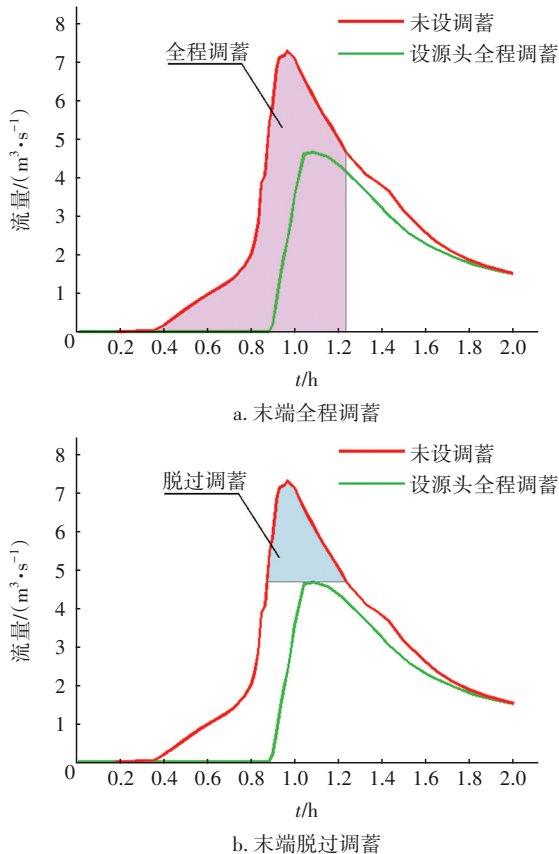


图5 末端全程调蓄和末端脱过调蓄

Fig.5 Whole-course storage and partial storage at the end

5 流量过程线理论计算式的推求

对于径流峰值调蓄容积的确定,传统计算方法为脱过系数法,但该方法无法反映流量的动态变化,计算结果可靠性不足。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),要计算径流峰值调蓄容积,需先求得管道流量随时间的变化曲线。有条件的地区可采用模型软件进行模拟求解,而对于不具备条件的地区,模型软件应用受限。为此,有必要推求任意管道流量随时间变化的函数关系式,以此来确定调蓄池大小。

根据极限强度理论^[11]的假设条件,汇水面积的增长速度为定值,即 $dF=C \times dt$,因此,可对芝加哥雨

型进行积分,再乘以相应的系数,即可求得给定设计管段的流量随时间变化的曲线。当然,该思路还应补充另一个假设条件:假设汇流全过程最远点流行至设计管段的时间为定值(可按各管段最大流量时的流速来推求),这也是等流时线法的常用假设^[11]。显然,在工程应用上,该假设条件是安全的。

流量过程线理论计算式的推求过程如下:

芝加哥雨型雨峰前、后的降雨强度公式分别如式(1)和式(2)所示。

$$i = \frac{a[(1-n)t_1/r + b]}{(t_1/r + b)^{n+1}} \quad (1)$$

$$i = \frac{a[(1-n)t_2/(1-r) + b]}{[t_2/(1-r) + b]^{n+1}} \quad (2)$$

式中: i 为降雨强度; t_1 、 t_2 分别为峰前和峰后历时; r 为雨峰系数(峰前历时与总历时之比),根据当地降雨过程资料统计,可取多场降雨的平均值,通常 r 值在0.3~0.5之间。

上式转化为降雨强度随时间变化的分段函数如下:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{a \left[\frac{(1-n)(rT-t)}{r} + b \right]}{\left(\frac{rT-t}{r} + b \right)^{n+1}} & t < rT \\ \frac{a \left[\frac{(1-n)(t-rT)}{1-r} + b \right]}{\left(\frac{t-rT}{1-r} + b \right)^{n+1}} & t \geq rT \end{cases} \quad (3)$$

根据前面的假设条件,任一管段的流量随时间的变化函数如下:

$$Q(t) = \frac{\psi \cdot F}{\tau} \cdot \int_t^{t+\tau} i(t) dt \quad (4)$$

式中: τ 为集流时间。

对于南昌市而言, $a=2\ 124$ (重现期取3年一遇)、 $n=0.64$ 、 $b=1.4$ 、 $r=0.35$ 、 $T=120\text{ min}$,代入式(3)可得:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{2\ 124 [1.03(42-t) + 1.4]}{[2.86(42-t) + 1.4]^{1.64}} & t < 42 \\ \frac{2\ 124 [0.56(t-42) + 1.4]}{[1.56(t-42) + 1.4]^{1.64}} & t \geq 42 \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)并积分,得到如下分段函数:

$$Q(t) = \frac{F \cdot \psi}{\tau} \begin{cases} \frac{2124t - 89248}{(122 - 2.86t)^{0.64}} - \frac{2124(t - \tau) - 89248}{[122 - 2.86(t - \tau)]^{0.64}} & \tau < t \leq 42 \\ -19.6 - \frac{2124(t - \tau) - 89248}{[122 - 2.86(t - \tau)]^{0.64}} + \frac{2117(t - 42) - 8.8}{[1.56(t - 42) + 1.4]^{0.64}} & 42 < t \leq 42 + \tau \\ \frac{2117(t - 42) - 8.8}{[1.56(t - 42) + 1.4]^{0.64}} - \frac{2117(t - \tau - 42) - 8.8}{[1.56(t - \tau - 42) + 1.4]^{0.64}} & 42 + \tau < t \leq 120 \end{cases} \quad (6)$$

上述公式,只要先算出流行时间,便可得到流量随时间的变化曲线,进一步可求得调蓄容积。

举例说明:取汇水面积 $F=50 \text{ hm}^2$,集流时间 $\tau=30 \text{ min}$,综合径流系数 $\psi=0.6$,代入式(6),对时间变量赋整数值(1、2、3、…、120 min),得到相应的流量值 $Q(\text{L/s})$,绘制出流量随时间的变化曲线,如图6所示。

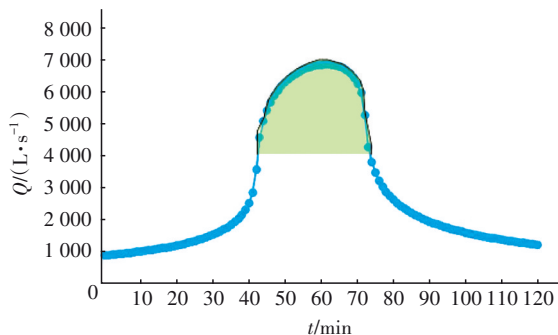


图6 流量随时间的变化曲线

Fig.6 Flow curve with time

由图6可知,径流峰值如需由 7000 L/s 削减至 4000 L/s ,若采用末端脱过调蓄方式,调蓄容积即为图中阴影部分面积,筛选大于 4000 L/s 的流量值并求和再乘以时间转化系数即可,采用该方案求得本次需调蓄容积约为 12000 m^3 。

6 结论

① 简单介绍了海绵设施对径流峰值控制的两种分类方式,并分析了海绵设施的基本分类和组成,通过归纳总结得出,调蓄功能对径流峰值的控制起主要作用。提出了在规划层面,可采用调蓄池概化各类海绵设施对工程效果进行综合模拟评价。

② 通过研究不同调蓄雨量对径流峰值控制的贡献得出,当调蓄雨量由 14 mm 增至 22 mm 时,调蓄池对径流峰值的削减率由 40.0% 增至 71.3% ,径流峰值削减效果明显,峰值出现时间相应延后了 $4.8\sim 14.8 \text{ min}$,可以实现错峰以减轻下游管网负荷。

③ 通过研究不同调蓄方式对径流峰值控制的贡献得出,源头全程调蓄所需调蓄容积约为末端

全程调蓄的 50% ,末端脱过调蓄所需调蓄容积约为末端全程调蓄的 22% 。考虑到源头全程调蓄对削减径流污染作用最为明显,首先推荐采用源头全程调蓄措施来削减径流峰值;当源头调蓄实施较困难时,则推荐采用末端脱过调蓄方式。

④ 基于等流时线法和极限强度理论的假设条件,推求出了流量过程线理论计算式,以便于不具备模型使用条件的区域计算调蓄容积,同时克服了传统脱过系数法的弊端。

参考文献:

- [1] 陈世杰,宫永伟,李俊奇,等.某低影响开发道路的雨水滞蓄效果模拟与评价[J].中国给水排水,2016,32(11):132-136.
CHEN Shijie, GONG Yongwei, LI Junqi, et al. Simulation and evaluation of stormwater control efficiency of a low impact development road [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 132-136 (in Chinese).
- [2] 杨擎柱.透水路面与生物滞留组合系统对径流峰值控制效能的实验研究[D].北京:北京建筑大学,2018:71-72.
YANG Qingzhu. Experimental Study on Peak Runoff Control Efficiency of Combined System of Pervious Asphalt Pavement and Bioretention Facility [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018: 71-72 (in Chinese).
- [3] 国小伟,张海行,赵晨辰,等.基于模型及在线监测的校园海绵改造项目效果评估[J].中国给水排水,2020,36(16):1-5,11.
GUO Xiaowei, ZHANG Haihang, ZHAO Chenchen, et al. Effect assessment of campus sponge construction project based on model and online monitoring[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 1-5, 11 (in Chinese).
- [4] 王路平,曾磊,刘俊,等.基于内涝防治目标的雨水调蓄池设计[J].水电能源科学,2021,39(2):47-50.

- WANG Luping, ZENG Lei, LIU Jun, *et al.* Design of rainwater storage tank based on the goal of waterlogging control[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(2): 47–50 (in Chinese).
- [5] 付潇然, 刘家宏, 周冠南, 等. 面向内涝防治的地下调蓄池容量设计[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(11): 1–8.
- FU Xiaoran, LIU Jiahong, ZHOU Guannan, *et al.* Waterlogging control oriented-design of capacity of underground rainwater storage pool [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(11): 1–8 (in Chinese).
- [6] 张伟, 王翔. 基于海绵城市理念的慈城新城排水安全系统构建[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(14): 12–17.
- ZHANG Wei, WANG Xiang. Construction of Cicheng New Town drainage safety system based on sponge city concept [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 12–17 (in Chinese).
- [7] 赵熠辉, 韩小波, 张金松. 深圳市某水质净化厂海绵体径流控制效果模拟[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 110–114.
- ZHAO Yihui, HAN Xiaobo, ZHANG Jinsong. Stimulation of rainfall runoff control effect of sponge area in a wastewater treatment plant in Shenzhen [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(17): 110–114 (in Chinese).
- [8] 秦宇, 陈兴, 陈垚, 等. 不同降雨强度下LID改造对径流量的削减效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(5): 104–108.
- QIN Yu, CHEN Xing, CHEN Yao, *et al.* Runoff reduction effect of low impact development (LID) reconstruction under different rainfall intensities [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(5): 104–108 (in Chinese).
- [9] 徐涛. 城市低影响开发技术及其效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 14–38.
- XU Tao. Research on the Measures and Impacts of Low Impact Development for Urban Areas [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 14–38 (in Chinese).
- [10] 林进昌, 李江云, 吕建新, 等. 低影响开发设施的调蓄池代用模型研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(23): 94–100.
- LIN Jinchang, LI Jiangyun, LÜ Jianxin, *et al.* Detention tank substitute model for low impact development facilities [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(23): 94–100 (in Chinese).
- [11] 孙慧修. 排水工程[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 68–72.
- SUN Huixiu. Drainage Engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999: 68–72 (in Chinese).
-
- 作者简介:**许文斌(1987–),男,江西乐平人,硕士,高级工程师,主要研究方向为城市排水系统理论与技术。
- E-mail:**993210512@qq.com
- 收稿日期:**2021-07-20
- 修回日期:**2022-01-24

(编辑:刘贵春)

依法划定河湖管理范围**严格水域岸线水生态空间管控**