

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.09.016

# 新型容积-流量型雨水弃流装置设计及效果评估

侯文硕<sup>1,2</sup>, 周国华<sup>1,3,4</sup>, 葛铜岗<sup>4</sup>, 陈亮<sup>1</sup>, 郭祺忠<sup>5</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 引滦工程管理局大黑汀水库管理处, 河北 迁西 064309; 3. 天津生态城市政景观有限公司, 天津 300486; 4. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 5. 罗格斯大学新伯朗士威校区, 美国)

**摘要:** 道路雨水在城镇雨水资源化利用中拥有巨大潜力,但其初期水质较差。作为一种雨水分流手段,初期雨水弃流装置能有效分离初期雨水和后期雨水。在分析已有弃流装置特点的基础上提出了一种新型容积-流量型雨水弃流装置,并开展了针对性设计及效果评估。结果表明:弃流装置的弃流过程与降雨过程有关,选定弃流标准为考虑2 mm路面填洼损失量后30 min降雨产生的径流量;在试验条件下,满足弃流标准的弃流管直径与降雨强度呈对数关系;弃流装置对SS的弃流效果最好,而对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP及COD的弃流率相对较低,且装置的弃流效果与相关研究中其他类型弃流装置的效果基本一致。

**关键词:** 初期雨水; 弃流装置; 海绵城市; 城市道路

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)09-0103-06

## Design and Effect Evaluation of a New Volume-Runoff Stormwater Diverting Device

HOU Wen-shuo<sup>1,2</sup>, ZHOU Guo-hua<sup>1,3,4</sup>, GE Tong-gang<sup>4</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, GUO Qi-zhong<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Daheiting Reservoir Management Office of Luan River Diversion Project Management Bureau, Qianxi 064309, China; 3. Tianjin Eco-city Investment & Development Co. Ltd., Tianjin 300486, China; 4. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 5. Rutgers University New Brunswick, USA)

**Abstract:** Stormwater collected on road has huge potential in the process of urban stormwater resource utilization. However, the quality of most stormwater is poor in the initial stage. As a diverting means, the initial stormwater diverting device can effectively separate the initial stormwater and the later stormwater. This paper proposed a new volume-runoff stormwater diverting device based on the analysis of the existing diverting device characteristics, carried out the specific design, and evaluated the performance. The diverting process of the device was related to the rainfall process, and the diverting standard was the runoff generated by rainfall in 30 minutes after considering the loss of 2 mm pavement filling rainfall. Under the experimental conditions, the diameter of diverting pipe meeting the diverting standard was logarithmically correlated with the rainfall intensity. The device had the best diverting performance on SS, while diverting rates of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , TP and COD were relatively low. In

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(42277046); 中新天津生态城2018年度科技型中小企业升级专项  
通信作者: 陈亮 E-mail: liangchen@tju.edu.cn

addition, the performance of the device was basically consistent with the conclusions of other types of diverting devices in related studies.

**Key words:** initial stormwater; diverting device; sponge city; urban road

我国水资源十分短缺,而随着城市化进程的加快,一方面不透水面积大大增加,改变了自然水文过程,造成雨水资源大量流失;另一方面居民生活用水、工业用水等逐年增长,进一步加剧了城市用水紧张的情况。基于此,部分学者提出了城市雨水资源化利用<sup>[1-2]</sup>,以期缓解城市水资源短缺问题。其中,道路在城市建设用地中占比很大<sup>[3]</sup>,城市道路雨水开发利用潜力巨大<sup>[4]</sup>。然而,初期雨水的污染程度较高,有时甚至超过了城市污水的污染负荷<sup>[5]</sup>。

针对初期雨水污染问题,刘静等<sup>[6]</sup>调研发现初期雨水弃流有助于雨水净化和利用程度的提升。因此在实际工程中,若能按照经验或规范弃流初期雨水,将其排至市政污水或雨水管网,将后期干净的雨水排入蓄水池或雨水花园、生物滞留池等进行有效的资源化利用,具有十分重要的经济和生态效益。初期雨水弃流装置作为一种分流手段,能有效地分离初期雨水和后期雨水,控制雨水径流中大部分污染物<sup>[7]</sup>。不同类型弃流装置的弃流原理及控制方式不同,在弃流量控制精确性及灵活性上也存在一定差异<sup>[8]</sup>。比如,容积式考虑了弃流体积,但占地面积大;半容积式既考虑了弃流体积,又考虑了降雨过程的流量变化,但控制方式较为复杂,且运行维护频率较高;旋流式及跳跃井式在降雨过程中存在一直处于弃流状态、弃流量控制不精确的弊端;翻板式及切换式在运行过程中可能存在部分初期雨水进入后续雨水收集池,而后期雨水弃流的问题;电控型结构复杂、造价昂贵、运行维护繁琐。

笔者在现有弃流装置的基础上,考虑开发一种结构简单、操作方便、节约成本且运行维护频率低,既能保证弃流后的溢流雨水水质,又能最大限度减少弃流水量的新型容积-流量型初期雨水弃流装置,并以中新天津生态城为研究区域,围绕弃流装置开展相关设计及运行效果评估研究。

## 1 弃流装置设计方案及评估方法

### 1.1 研究区域概况

中新天津生态城坐落于天津市滨海新区,占地面积约 15 000 hm<sup>2</sup>。年均降雨量约为 573 mm,降雨

主要集中在夏季,特别是7、8月份。

### 1.2 弃流装置设计方案

### 1.2.1 设计方案

新型容积-流量型初期雨水弃流装置的核心构件为自动弃流装置,主要包括浮球、连接杆及滑动装置3部分,其结构示意见图1。

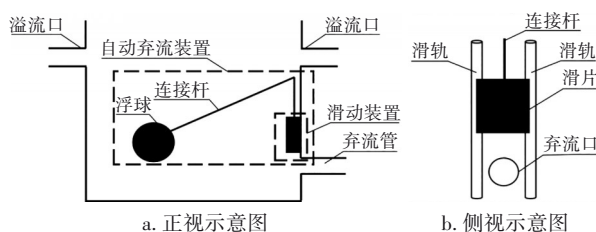
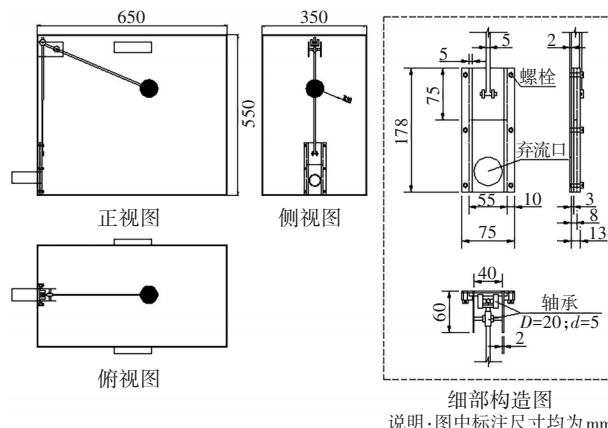


图1 弃流装置结构示意图

**Fig.1 Structural diagram of diverting device**

该弃流装置的运行原理:浮球可随装置内水位上下浮动,并通过连接杆带动滑动装置滑动,进而自动控制弃流口的开闭。其中,滑动装置由滑片和滑轨组成,滑轨设置于弃流口上方侧壁上,连接杆与滑片相连并带动滑片在滑轨中滑动。为保证降雨结束后装置内蓄存的雨水能从弃流口流出,滑片与弃流口间不完全闭合。在降雨过程中,弃流装置将一部分初期雨水通过弃流口排至污水管网,另一部分暂时存储在装置内,这样既确保了弃流容积,又考虑了降雨的流量过程。装置尺寸参考中新天津生态城道路两侧雨水篦子设计,见图2。



### 图2 弃流装置尺寸设计

**Fig.2 Dimension design of diverting device**

在整体尺寸确定的前提下,弃流过程中(见图3)弃流管直径将直接影响弃流管出流及滑片作用下的弃流量大小,因此需对弃流管直径进行率定。

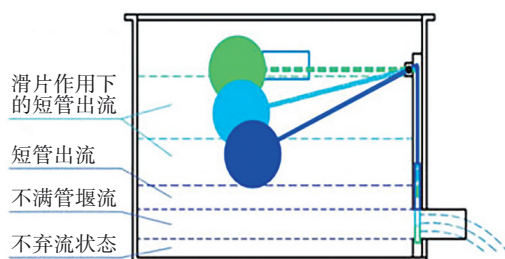


图3 装置弃流过程示意

Fig.3 Schematics of diverting process in device

### 1.2.2 弃流管直径率定方法

第一步,选择典型设计降雨过程:在中国气象数据网下载气象数据集,选取并整理天津塘沽气象站的逐日降雨量资料,采用年多个样本法进行频率分析,并绘制频率曲线。

本研究综合考虑长历时(24 h)与短历时(2 h)降雨。同时,为了在弃流初期雨水的同时最大程度利用雨水资源,分别选择0.33、0.5、1、2年一遇设计重现期,通过频率曲线中不同频率下的日降雨量计算24和2 h的最大降雨量。然后根据《天津市海绵城市建设技术导则》设计暴雨雨型分配方法,计算产流后1 h的平均雨强,并结合道路汇流面积计算道路雨水汇流流量(一个弃流装置对应的汇水面积为240 m<sup>2</sup>,其中人行道面积为100 m<sup>2</sup>,取径流系数为0.35;马路面积为140 m<sup>2</sup>,取径流系数为0.85),具体道路雨水汇流流量(弃流装置入流流量)见表1。

表1 弃流装置入流流量

Tab.1 Inflow of diverting device

降雨 历时/h	设计重 现期/a	产流后1 h的平均雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	入流流量/ (mL·min <sup>-1</sup> )
24	0.33	0.057	8 778
	0.5	0.072	11 088
	1	0.095	14 630
	2	0.131	20 174
2	0.33	0.136	20 944
	0.5	0.192	29 568
	1	0.286	44 044
	2	0.395	60 830

第二步,确定弃流量(弃流标准):本研究中弃流装置的弃流过程与降雨过程有关,结合实际工程以及相关文献中利用初期降雨时间界定初期雨水

的方法,确定弃流标准为考虑2 mm路面填洼损失量后30 min降雨产生的径流量<sup>[9-10]</sup>。

第三步,设计弃流管径并进行率定:模拟弃流装置在不同设计降雨下满足弃流标准的弃流过程,从而率定弃流管直径,试验装置见图4。

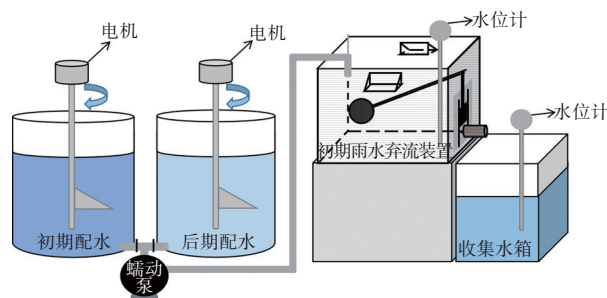


图4 试验装置示意

Fig.4 Schematics of experiment device

试验装置由注水箱、弃流装置、蠕动泵、收集水箱等构成,弃流装置及收集水箱内水位采用电容式液位计测定,时间采用秒表测定。试验中降雨强度在设计降雨强度下进行扩展,范围为0.05~0.40 mm/min,入流流量范围为7.7~58.52 L/min。

### 1.3 弃流效果评估方法

以弃流和溢流水质作为主要指标,通过模拟试验对弃流装置进行效果评估。采用人工配水的方法模拟道路径流,每隔一定时间取装置弃流口及溢流口处的水样,确定特征污染物(SS、N、P和COD等)的弃流率,从而评估装置的弃流效果。

#### 1.3.1 模拟降雨

参考相关道路径流水质的监测结果<sup>[11]</sup>,得到特征污染物SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP和COD在初期径流中的平均浓度分别为655、1.83、10.63、0.57和6.0 mg/L,在后期径流中分别为255、0.65、0.22、0.09和5.5 mg/L。

选择强度为0.14 mm/min的2 h降雨历时、0.33年一遇的典型设计降雨进行验证。试验用水为人工配水,通过在自来水中加入一定量的污染物以模拟道路径流,分别采用硅藻土模拟SS、氯化铵模拟NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、硝酸钾模拟NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、磷酸二氢钾模拟TP、葡萄糖模拟COD。可先配制好高浓度的试剂,试验开始前根据浓度设计值按比例进行稀释。

#### 1.3.2 分析测试方法

SS:称量法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂分光光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:紫外分光光度法;TP:钼酸铵分光光度法;

COD:快速消解分光光度法。

### 1.3.3 数据处理方法

污染物弃流率的计算如下所示:

$$R_c = \frac{M_{in} - M_{out}}{M_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$M_{in/out} = \sum_{i=1}^n C_i \times Q_i \times \Delta t_i \quad (2)$$

式中:  $R_c$  为污染物负荷弃流率, %;  $M_{in}$ 、 $M_{out}$  分别为试验进、出水污染物质量, mg;  $C_i$  为样品浓度, mg/L;  $Q_i$  为间隔时段出流流量, 试验中通过水位计及秒表共同测定,  $m^3/s$ ;  $\Delta t$  为取样间隔时段, 由秒表测定, 本试验中选定间隔时段为 5 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 弃流管直径率定

通过模拟试验得到装置在不同降雨强度下满足弃流标准所需要的弃流管直径, 结果见图 5。

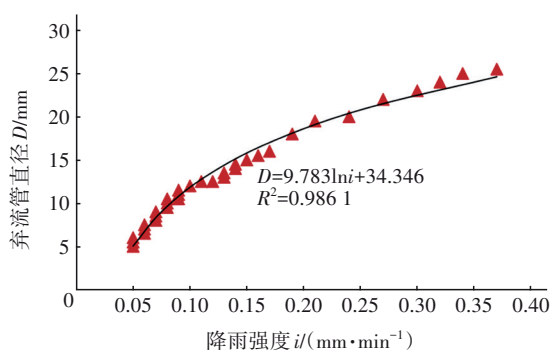


图5 弃流管直径与降雨强度拟合曲线

Fig.5 Fitting curve between diverting pipe diameter and rainfall intensity

由图 5 可知, 满足弃流标准的弃流管直径随着降雨强度的增加而增大, 且在本试验条件和降雨强度范围下, 两者呈对数相关 ( $R^2=0.9861$ )。在降雨强度较小时, 满足弃流标准的弃流管直径增速较快, 随着降雨强度增加, 增速逐渐减慢; 在某一降雨强度下, 满足弃流标准的弃流管直径分布在一个较小范围内, 比如当降雨强度为 0.05 mm/min 时, 5、5.5、6 mm 的弃流管直径均能满足弃流标准。因此, 在工程应用时, 可结合当地实际情况, 在弃流装置其他设计尺寸相同的条件下, 通过图 5 选取合适的弃流管直径。

### 2.2 弃流效果评估

#### 2.2.1 不同污染物浓度变化

弃流出水与溢流出水中各类污染物浓度随时

间的变化曲线见图 6。

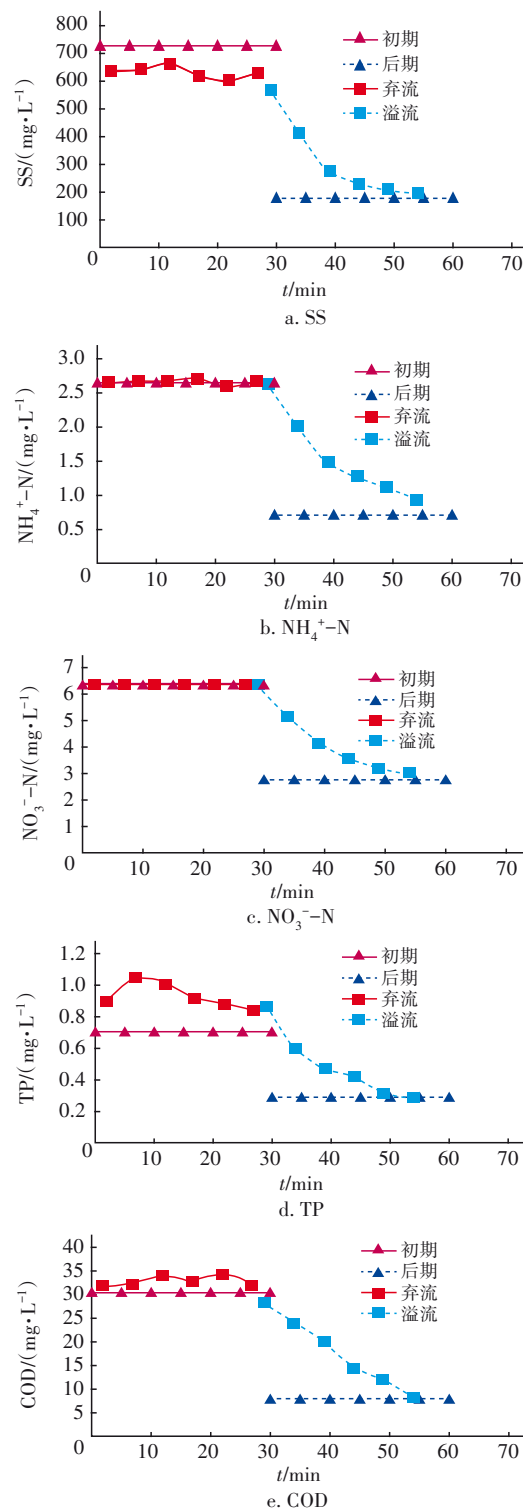


图6 不同污染物浓度随时间的变化曲线

Fig.6 Change curves of different pollutants concentration with time

由图 6 可知, 溢流出水的污染物浓度均随降雨历时的延长呈逐渐下降的趋势, 初期溢流出水中污



染物浓度稍低于弃流出水,且下降速度较快,而后下降速度逐渐放缓,最终稳定在后期径流配水中污染物的设计浓度值附近。以SS为例,在初期配水浓度为727 mg/L、后期配水浓度为180 mg/L的条件下,弃流出水中SS平均浓度为632 mg/L,溢流出水中SS浓度由570 mg/L下降至195 mg/L,最后基本稳定在180 mg/L左右。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP和COD的浓度变化规律与SS基本相同。

### 2.2.2 弃流效果

结合污染物弃流率的计算公式,得到试验中装置对SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP和COD的弃流率,结果如表2所示。可知,装置对SS的弃流效果最好,弃流率为52.47%,而对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP和COD的

弃流效果相对较差,弃流率范围在26%~43%之间。黄勇强等<sup>[12]</sup>通过在实际5场降雨中测定容积式弃流装置内部及出水管处的雨水水质,发现弃流3 mm初期雨水后装置对SS和COD的去除率最高分别可达74.95%和60.90%,而对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除率最高分别可达40.85%和34.00%,同时弃流池内所截留的污染物中50%~70%以SS、COD为主。李继轩<sup>[13]</sup>对基于PLC控制的可识别雨频的新型弃流系统进行研究并监测其实际运行效果,发现砂滤型装置对雨水中SS和COD的平均去除率分别可达68.1%和51.1%,而使用活性炭滤棉作为滤料的装置对雨水中COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别可达58.6%和42.7%。

表2 弃流装置对污染物的弃流率

Tab.2 Diverting rate of pollutants by diverting device

项 目	初期平均入流浓度 $C_1/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	后期平均入流浓度 $C_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	平均入流质量 $m_1/\text{mg}$	平均溢流浓度 $C_3/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	平均溢流质量 $m_2/\text{mg}$	负荷弃流率/%
SS	726.98	180.09	661 301.42	315.23	314 326.17	52.47
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	2.66	0.71	2 486.32	1.58	1 436.99	42.20
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	6.34	2.77	6 721.68	4.22	4 466.12	33.56
TP	0.70	0.29	673.91	0.49	495.84	26.42
COD	30.39	7.97	28 217.60	17.85	16 196.52	42.60

可以看出,新型容积-流量型雨水弃流装置与相关研究中其他类型弃流装置的运行效果基本一致,但前者考虑了初期降雨期间降雨量由小变大的过程,将一部分初期雨水暂存于装置内,另一部分初期雨水通过弃流管排至污水管网,相较于容积式弃流装置有效减少了占地面积;而且,通过入流流量与弃流流量的动态变化,在弃流量的控制上相较于旋流式弃流装置更为精确;同时,相较于电控型弃流装置而言,其结构简单、操作方便、节约成本且运行维护频率低。

另外,由于实际道路雨水径流中的SS能够吸附大量的COD、N、P,若能对SS进行较好地弃流,便能同时去除大部分污染物。而且,为了简化试验,本研究中初期及后期径流配水未考虑降雨过程中复杂的污染物浓度动态变化,而一般在实际道路径流中初期径流雨水的污染物浓度较高,衰减趋势较快,后期径流雨水污染物浓度下降,最后逐渐稳定在较低水平。综上所述,可以推测本弃流装置在实际应用中的弃流效果会比模拟径流条件下更好。

## 3 结论

- ① 新型容积-流量型初期雨水弃流装置的弃流过程与降雨过程有关,弃流标准选定为考虑2 mm路面填洼损失量后30 min降雨产生的径流量。
- ② 在弃流装置为本试验装置参数及降雨强度为0.05~0.38 mm/min的条件下,满足弃流标准的弃流管直径与降雨强度呈对数关系。
- ③ 装置对SS的弃流效果最好,而对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP及COD的弃流率相对较低;装置的弃流效果与相关研究中其他类型弃流装置的效果基本一致。

## 参考文献:

- [1] 路琪儿,罗平平,虞望琦,等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(6): 80-87.  
LU Qi'er, LUO Pingping, YU Wangqi, et al. Research progress of urban rainwater resources utilization [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 80-87 (in Chinese).
- [2] 李俊德,范功端. 融合进水调度控制的雨水调蓄设施多目标优化设计[J]. 中国给水排水,2022,38(9):

- 111-117.
- LI Junde, FAN Gongduan. Multi-objective optimization design of rainwater storage facilities integrating inflow regulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(9):111-117 (in Chinese).
- [3] 周飞祥,徐秋阳.既有市政道路海绵城市改造案例中若干关键问题探讨[J].*中国给水排水*,2022,38(12):100-106.
- ZHOU Feixiang, XU Qiuyang. Discussion on some key problems in a sponge city reconstruction case of existing municipal road [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(12):100-106 (in Chinese).
- [4] 何卫华,车伍,杨正,等.城市绿色道路及雨洪控制利用策略研究[J].*给水排水*,2012,38(9):42-47.
- HE Weihua, CHE Wu, YANG Zheng, *et al.* Research on urban green streets and stormwater management strategy [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(9):42-47 (in Chinese).
- [5] 张琼华,王晓昌.初期雨水识别及量化分析研究[J].*给水排水*,2016,42(S1):38-42.
- ZHANG Qionghua, WANG Xiaochang. Research and quantitative analysis of initial rainwater [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(S1):38-42 (in Chinese).
- [6] 刘静,张帆,杨骐华,等.上海高架道路径流污染特征及雨水资源化利用技术[J].*应用技术学报*,2017,17(4):304-308.
- LIU Jing, ZHANG Fan, YANG Qihua, *et al.* Characteristics of runoff pollution and rainwater resources utilization technology in Shanghai elevated road [J]. *Journal of Technology*, 2017, 17(4):304-308 (in Chinese).
- [7] 李亮,康威,谭松明,等.我国建筑小区雨水弃流技术与装置发展现状[J].*中国给水排水*,2016,32(4):1-6.
- LI Liang, KANG Wei, TAN Songming, *et al.* Current situation of technologies and devices for initial rainwater split-flow in residential building areas of China [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(4):1-6 (in Chinese).
- [8] 连庆堂,郭秀忠,王志超.屋面雨水收集利用中弃流装置的改进[J].*广州环境科学*,2011,26(1):20-22.
- LIAN Qingtang, GUO Xiuzhong, WANG Zhichao. Improvement of split-flow system for the collection & utilization of roof rainwater [J]. *Guangzhou Environmental Science*, 2011, 26(1):20-22 (in Chinese).
- [9] 白建国,朱洵.初期径流雨水工程截流措施及效果初探[J].*南水北调与水利科技*,2013,11(4):215-217.
- BAI Jianguo, ZHU Xun. Preliminary analysis of interception measures on initial rainwater runoff [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(4):215-217 (in Chinese).
- [10] 李畅,涂晓杰,秦雅琪,等.南宁市道路初期雨水径流污染物浓度分析[J].*环境工程*,2017,35(7):70-75.
- LI Chang, TU Xiaojie, QIN Yaqi, *et al.* Analysis of pollutants concentration of initial rainwater in Nanning roads [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(7):70-75 (in Chinese).
- [11] 孙明媚.天津城区雨水径流污染特点及其对汇入河道水质影响研究[D].天津:天津大学,2019.
- SUN Mingmei. Characteristics of Rainwater Runoff Pollution in Tianjin City and Its Influence on Water Quality of the Inflow River [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019 (in Chinese).
- [12] 黄勇强,徐明力,吴春笃,等.屋面初期雨水弃流装置的设计及试验[J].*江苏大学学报(自然科学版)*,2012,33(2):219-222.
- HUANG Yongqiang, XU Mingli, WU Chundu, *et al.* Design and experiment of split-flow device for roof initial rainwater [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2012, 33(2):219-222 (in Chinese).
- [13] 李继轩.一种绿地雨水收集处理装置的研发[D].扬州:扬州大学,2020.
- LI Jixuan. Research and Development of an Integrated Device for Collecting and Treating Green Rainwater [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020 (in Chinese).

作者简介:侯文硕(1996-),女,河北唐山人,硕士,助理工程师,主要研究方向为海绵城市。

E-mail:wenshuohou@163.com

收稿日期:2022-03-10

修回日期:2022-07-08

(编辑:沈靖怡)