

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240560

# 基于雨水口功能复合的初期雨水截污过滤技术研究

袁悦<sup>1</sup>, 王盼<sup>1</sup>, 丁茜<sup>2</sup>, 王卫刚<sup>1</sup>

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海市 200237]

**摘要:** 针对绿色基础设施在高密度既有城区实施困难的问题, 利用现状排水系统分布广泛的雨水口设施, 开展雨水口内截污过滤技术研究。结果表明: 由活性炭、石英砂、陶粒按照特殊比例组成合成介质过滤后的水样粒度分布较为集中, 整体粒度不超过 66.9  $\mu\text{m}$ , 大粒度颗粒物已被拦截; 连续过滤试验期间, 合成介质对 SS 的去除率达到 70% 及以上, 且无溢流现象发生, 从源头削减了初期雨水进入管网及河道的污染负荷。

**关键词:** 初期雨水; 截污过滤; 合成介质; 雨水口; 过水能力

中图分类号: TU99

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0135-05

## Research on Initial Rainwater Interception Filter Technology Based on Function Combination of Rainwater Inlet

YUAN Yue<sup>1</sup>, WANG Pan<sup>1</sup>, DING Qian<sup>2</sup>, WANG Weigang<sup>1</sup>

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China]

**Abstract:** Aiming at the implementation difficulties of green infrastructure in the existing high-density urban areas, the rainwater inlet facilities widely distributed in the current drainage system are utilized to carry out the research on the sewage interception filter technology in the rainwater inlet. The results show that the particle size distribution of the water samples filtered by the synthetic medium composed of activated carbon, quartz sand and ceramisite according to the special proportion is relatively concentrated. The overall particle size does not exceed 66.9  $\mu\text{m}$ , and the large particulate matters have been intercepted. The SS removal rate of synthetic medium reaches 70% or more during the continuous filtering test without overflow phenomenon, which reduces the pollution load of the initial rainwater entering the pipe network and river channel from the source.

**Keywords:** initial rainwater; sewage interception filtration; synthetic medium; rainwater inlet; discharge capacity

### 0 引言

径流污染是影响水环境质量的主要因素之一, 其中悬浮物颗粒为流入水环境的主要污染物。源头海绵城市设施对雨水径流污染控制起到了良好的作用, 然而雨水花园、生物滞留池、植草沟等设施需要一定的实施场地且服务范围有限, 在密度既有城区推广应用相对困难。雨水口是现有排水系统的主要设施, 主要功能仅为收集地表雨水, 具有分布广、服务面积大等特点, 若在雨水口采取截污措施可有效控制雨水径流污染。

自 20 世纪 70 年代起, 欧美等发达国家已经开始重视城市雨水径流等面源污染控制的研究, 在雨水口截污净化方面做了部分研究并形成相关产品, 如衬板式雨水口、双层截污挂篮雨水口以及在雨水口内增设截污过滤装置等。相对欧美等发达国家来说, 我国对城市面源污染的研究起步较晚, 基础设施和研究方法相对落后, 自 20 世纪 80 年代初期, 有关城市面源污染的研究在我国逐渐展开, 直到 2014 年《海绵城市建设技术指南》发布, 我国才开始积极推进海绵城市的建设。针对雨水口截污关键技术也开展了一些研究, 周国华等考察了雨水口截污网篮对 SS 的去除效果, 结果表明基于物理拦截作用, 场次降雨 SS 平均去除率为 51.5%<sup>[1]</sup>, 同样地, 针对截污挂篮, 已有研究开展了设计方案、参数、透水性能、工作状态、截污效果等相关工作<sup>[3-4]</sup>; 关于水质型截污

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200700)

作者简介: 袁悦(1988—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水污染治理的相关研究和咨询工作。

雨水口,刘军等开展了相关设计与应用研究,通过中层填充陶粒、外层填充粗砂,降低径流中的污染物SS等<sup>[5]</sup>。

然而,已有研究对SS的截留作用较小,且相关装配化易维护的装备储备不足。因此,本研究针对高密度既有城区初期雨水污染控制的需求,基于雨水口狭小空间特性,通过过滤介质、构造形式等优选研究,揭示截污过滤技术对径流污染物去除能力的影响,研发保证排水安全前提下的高效过滤模块,设计雨水口功能复合的截污过滤成套装备,以期从源头削减初期雨水进入管网及河道的污染负荷。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

按照雨水口造型,利用泡沫自制截污过滤技术研究装置,见图1,每个自制雨水口过滤面积 $0.1\text{ m}^2$ 。其中,过滤介质中过滤棉(孔径 $0.2\text{ mm}$ )直接放入泡沫盒;石英砂(粒径 $2\sim 4\text{ mm}$ )、无烟煤(粒径 $2\sim 4\text{ mm}$ )、陶粒(粒径 $4\sim 8\text{ mm}$ )、活性炭(粒径 $3\text{ mm}$ )等颗粒状松散滤料放入前,需要置入钢丝网与土工布。试验用水为道路清扫颗粒物与自来水配制而成,在研究雨水口过滤介质优选与关键模块优化时,SS质量浓度在 $2\ 000\sim 5\ 000\text{ mg/L}$ 之间;在研究合成介质连续截污过滤过程时,SS质量浓度在 $500\sim 600\text{ mg/L}$ 之间。



图1 雨水口截污过滤试验装置

### 1.2 试验方法

按照气象降雨量,中雨 $12\text{ h}$ 降雨量为 $15\text{ mm}$ ,根据该标准值,以双车道道路为准,取道路宽度为 $8\text{ m}$ ,雨水口按间隔 $20\text{ m}$ 铺设,则道路两侧每个雨水口的汇水面积与水量分别为:

$$S = 20 \times 4/2 = 40\text{ m}^2$$

$$V = 0.015\text{ m} \times 40\text{ m}^2 = 0.6\text{ m}^3$$

取 $15\text{ mm}/12\text{ h}$ 降雨下的流量:

$$Q_1 = V/t = \frac{1.2\text{ m}^3}{24 \times 60} = 0.834\text{ L/min}$$

同样,为考察其他流量下的截污效果,取相同的降雨量在 $6、3、2\text{ h}$ 内全部流入,则3种流量分别为:

$$Q_2 = V/t = \frac{0.6 \times 1\ 000\text{ L}}{6 \times 60} = 1.667\text{ L/min}$$

$$Q_3 = V/t = \frac{0.6 \times 1\ 000\text{ L}}{3 \times 60} = 3.334\text{ L/min}$$

$$Q_4 = V/t = \frac{0.6 \times 1\ 000\text{ L}}{2 \times 60} = 5.004\text{ L/min}$$

为了减少测量雨水时的误差,试验中将收集好的模拟雨水搅拌均匀后,取 $1、2、3、4\text{ L/min}$ 的流量梯度进行试验,根据雨水过滤前后的悬浮物浓度计算SS去除率,从而分析判定滤料对污染物的去除效果,再结合考虑成本、维护便捷度等因素,综合选定最优过滤介质。

### 1.3 分析方法

SS(悬浮物)采用滤纸重量法测定;粒径采用马尔文激光粒度仪测定。使用秒表记录不同降雨流量下载污装置的溢流时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 雨水口过滤介质优选研究

#### 2.1.1 单一过滤介质截污效果比选

如图2所示,截污效果较好且在所有降雨流量下均稳定的是无烟煤与石英砂两种滤料。石英砂在各流量下SS去除率相差不大,基本按照降雨流量增大、浊度增大、截污效果减小的规律进行,这与研究滤速对滤柱滤后液体的浊度关系得到的实验结果一致,在 $2\text{ L/min}$ 的流量下载污效果最高,SS去除率可达 $97.1\%$ 。石英砂过滤时,颗粒直径小于孔隙的污染物固体会因“机会接触”的现象而被截留,颗粒运动速度越慢,“机会接触”可能性就越大,越容易被截留下来,过滤速度起了主要作用。因此,石英砂在慢速过滤时,具有较好的截污效果。无烟煤的SS去除率最高是在 $2\text{ L/min}$ 的流量下,数值为 $95.8\%$ ,其不同降雨流量下的去除率规律与石英砂类似,但出水色度会受到无烟煤自身颜色的影响。

陶粒与活性炭的SS去除率较高,其截污效果与降雨流量变化规律相似。所用陶粒是不规则圆形,具有孔隙率大、表面积大、化学性质稳定。陶粒在 $4\text{ L/min}$ 的流量下载污效果最好,SS去除率可达 $95.43\%$ ,随着雨水截污进程的推进,颗粒直径大于滤料空隙的固体污染物被截留下来,而颗粒较小的SS则穿过滤料孔隙进入下层滤料,即前期滤过的颗粒残渣会遗留在滤料层内部,使得过滤层空隙越来越小,截污能力增强。活性炭在 $4\text{ L/min}$ 的流量下载污效果最高,SS去除率可达 $87.0\%$ ;在 $3\text{ L/min}$ 的流量下

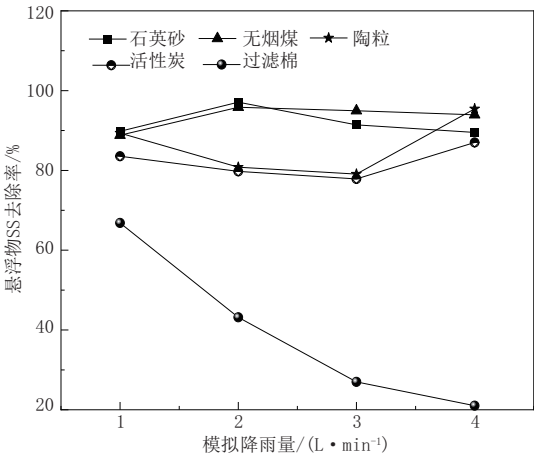


图2 不同降雨量下不同过滤介质的截污效果

截污效果最低,SS去除率可达77.9%。活性炭由不规则石墨组合形成,具有无数微小空隙,吸附量大、截污能力强。

由图2明显得出,5种滤料中过滤棉的截污效果最差,最高去除率在1 L/min时仅为66.83%。随着降雨流量的增大,其截污效果逐渐减小,滤出液体浑浊明显,但过滤速度快、过流能力强,与入口流速几乎一致,试验过程中各流量下雨水都无溢流现象。

2.1.2 单一过滤介质过流能力比选

如表2所列,5种滤料中过滤棉的过流能力最好,未发生溢流情况。陶粒与活性炭在1 L/min与3 L/min的小流量时未发生溢流情况,但在4 L/min时均发生明显溢流。其中陶粒在4 L/min时,液体明显阻塞、陶粒从底部到表面逐渐漂浮。陶粒质地轻、密度小,在25.12 s时所有陶粒都浮于表面,出口流水呈缓慢流出状。活性炭也是在4 L/min时发生溢流,水漫过活性炭表面,形成明显堵塞。

表2 不同降雨流量下各滤料发生溢流的时间

| 流量/(L·min <sup>-1</sup> ) | 石英砂/s | 无烟煤/s | 陶粒/s  | 活性炭/s | 过滤棉 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 1                         | —     | —     | —     | —     | —   |
| 2                         | 18.02 | 30.40 | —     | —     | —   |
| 3                         | 12.20 | 25.13 | —     | —     | —   |
| 4                         | 10.12 | 15.15 | 25.12 | 22.21 | —   |

石英砂和无烟煤的截污效果较好,但过流能力很差,除了在1 L/min时未发生溢流,其他流量下都存在溢流堵塞现象。石英砂和无烟煤的粒径是1~2 mm,相较于其他滤料粒径偏小,在同样体积下堆积密度更大、压得更实,所以过流能力也越低。滤料层的过流能力会随着时间运行变得越来越差,这是因为滤料中小粒径的颗粒会随着过滤过程的推进而逐渐堆积增多。当降雨量为2 L/min时,石英砂在18.02 s发生溢流;为3 L/min时,在12.20 s发生溢流;

为4 L/min时,在10.12 s就发生溢流;无烟煤发生溢流的时间也从30.40 s提前到后来的15.15 s。这两种滤料发生溢流的时间随着流量的增大而提前,说明石英砂和无烟煤有吸附容量的极限、中间空隙比较小,所以截污效果好,过流能力很差。

2.2 雨水口过滤关键模块优化研究

过滤介质应具备过水能力高、截污能力强、抗压性能好、使用周期长、耐磨损程度高、可重复利用等特点。因此,相比于形状容易变化、滤料容易流失的滤包,选择坚硬的合成介质作为构造形式,方便清洗与替换;质地坚硬,强度大、耐压力强,可以承受压力,不易损坏,非常适合做过滤截污材料。构造形式确定后,进行最优滤料比选:首先,排除过滤棉,其结构难以与其他滤料进行组合搭配,虽然过流能力很好,但截污能力太低;其次,排除无烟煤,无烟煤的过流效果差,滤料自身会影响出水的色度;石英砂、陶粒与活性炭对SS的去除效果都达到80%以上,陶粒与活性炭的过流能力较好,只有在大流量时发生溢流。因此,选择这三种最优滤料制成合成介质。

基于SS去除效果、维护便捷度、出水色度、经济性等,将活性炭、石英砂、陶粒按照特殊比例,经过加工而成合成介质,孔径0.1 mm。

2.2.1 合成介质与各组成滤料截污效果对比

合成介质与其组分滤料的SS去除效果(见图3),石英砂、活性炭与陶粒的截污效果基本稳定在75%至96%之间。合成介质对于SS的去除率都达到45%以上,基本在45%~65%之间。合成介质在3 L/min的流量下载污效果最高,SS去除率可达64.0%;在1 L/min的流量下载污效果最低,SS去除率可达49.3%。在1~3 L/min之间,合成介质的SS去除率随着流量逐渐增大,可能是因为被滤掉的颗粒物相互堆积,使得空隙减小,所以滤过的粒径愈来愈小,截污量增大。

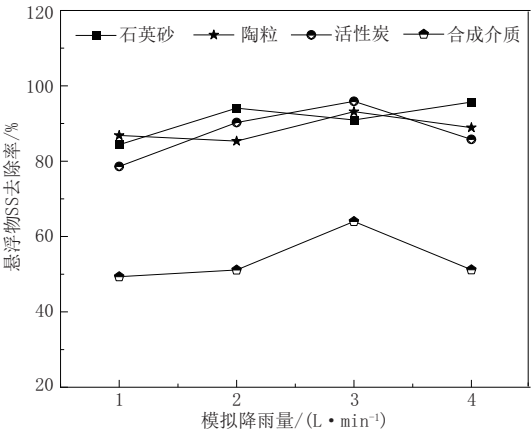


图3 不同降雨量合成介质与其他过滤介质的截污效果对比

粒度分析以 Ethanol 作为分散剂,以 Mie 作为散射模型得出溶液中颗粒物的浓度、径距等信息,各水样的粒度分布见表 3,粒度分布见图 4。未过滤前的原始水样中颗粒物粒度整体偏大,整体粒度不超过 240  $\mu\text{m}$ ,体积平均粒径为 41.3  $\mu\text{m}$ 。合成介质过滤后的水样中, $D_{v50}$  为 21.2  $\mu\text{m}$ ,整体粒度不超过 66.9  $\mu\text{m}$ ,粒度分布较为集中,大粒度颗粒物已被拦截。陶粒过滤后的水样中, $D_{v50}$  为 1.54  $\mu\text{m}$ ,整体粒度不超过 76  $\mu\text{m}$ ,径距为 6.484,粒度分布范围较大,也与陶粒分布松散的特点匹配。活性炭过滤后的水样中, $D_{v50}$  为 0.051 3  $\mu\text{m}$ ,整体粒度不超过 0.872  $\mu\text{m}$ ,与原始水样的粒度相差一个数量级,粒度变化最大;同时图像有两个峰值,说明过滤过程中除了物理拦截,存在活性炭吸附的其他过滤行为。石英砂过滤后的水样中, $D_{v50}$  为 0.590  $\mu\text{m}$ ,整体粒度不超过 0.990  $\mu\text{m}$ ;径距为 0.577,粒度分布最为集中。对比原始水样,所有滤后水样正态分布图左移,平均粒度与整体粒度都减小,说明过滤介质已过滤掉大粒径颗粒物,过滤机理以物理过滤为主。

表 3 各水样粒度分布相关信息表

| 水样名称 | 径距      | 一致性   | 比表面积/<br>( $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 表面积平均粒径/ $\mu\text{m}$ | 体积平均粒径/ $\mu\text{m}$ | $D_{v50}/\mu\text{m}$ |
|------|---------|-------|----------------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 原始水  | 1.898   | 0.603 | 329.4                                        | 17.3                   | 41.3                  | 40.3                  |
| 石英砂  | 0.577   | 0.178 | 9 962                                        | 0.574                  | 0.600                 | 0.590                 |
| 活性炭  | 2.437   | 0.987 | 143 600                                      | 0.039 8                | 0.080 6               | 0.051 3               |
| 陶粒   | 6.484   | 2.228 | 6 167                                        | 0.927                  | 4.13                  | 1.54                  |
| 合成介质 | 1.161 9 | 0.497 | 527.3                                        | 10.8                   | 22.4                  | 21.2                  |

注:径距表明颗粒的分布宽度,径距越大,表明分布宽度越宽;一致性表示的是粒径分布偏离中间的程度,意义与数列的标准差相似; $D_{v50}$ 表示该粒度以下的含量占总含量的 50%。

2.2.2 合成介质与各组成滤料过流能力对比

雨水口是降雨时排泄雨水、防止积水与堵塞的重要枢纽,过流排水是雨水口最重要的职能,因此,过流能力是衡量滤料是否优越的重要指标。由过流能力对比实验可知,石英砂、活性炭和陶粒的过流能力为陶粒>活性炭>石英砂,但三者都存在溢流现象,而合成介质在试验全程中,均未产生溢流现象。不同降雨流量下各滤料发生溢流的时间见表 4。

2.2.3 合成介质连续截污过滤过程研究

为进一步优化截污过滤装备的关键模块,对合成介质进行长期过滤效果评估,按照降雨强度 2.5 mm/h 连续过滤 1.5 h,如图 5 所示,期间合成介质对 SS 的去除率达到 70% 及以上,且无溢流现象发生。陈望等<sup>[6]</sup>利用石英砂、沸石、活性炭三种滤料的

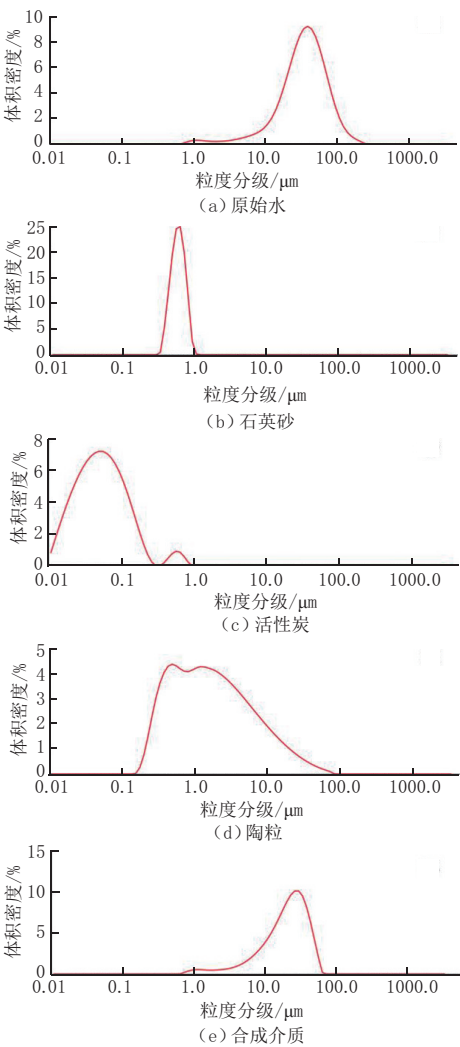


图 4 不同过滤介质滤后水样的粒径分布图

表 4 不同降雨流量下各滤料发生溢流的时间

| 流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 石英砂/s | 陶粒/s  | 活性炭/s | 合成介质 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|------|
| 1                                     | —     | —     | —     | —    |
| 2                                     | 18.02 | —     | —     | —    |
| 3                                     | 12.20 | —     | —     | —    |
| 4                                     | 10.12 | 25.12 | 22.21 | —    |

分级搭配与滤层厚度调控进行 SS 实验,发现三个滤柱的平均截污效果都达到 70% 以上,最大可以达到 81.30%。而张萍<sup>[7]</sup>等人通过泡沫塑料颗粒对模型沙进行过滤实验探究,其利用悬浮颗粒与泡沫塑料的黏附作用对模拟沙废水进行水流上向过滤处理,在不同流量下选择不同粒径的泡沫球进行实验,表明原水并悬浮颗粒物去除率不超过 50%,平均去除率基本在 30% 左右,而增加过滤装置后,SS 去除率均增加,最高增加了 20%,截污效果加强。与已有研究相比,本研究合成介质不影响排水安全的前提下实现场次径流 SS 质量去除率达 60% 以上,且合成介质质地紧密、便于安装拆卸、清洗反冲,结构简单结实、不易损坏。

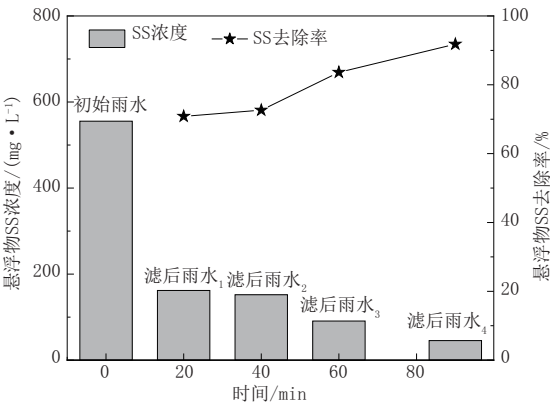


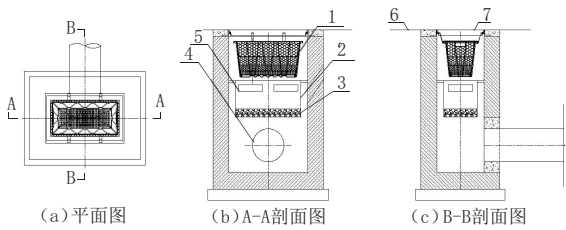
图5 合成介质连续截污过滤时的去除效果

2.3 基于雨水口功能复合的初期雨水截污过滤装备研发

基于雨水口首先需要满足原有的过水能力,其次才是发挥截污功能的原则,根据《雨水口标准图》(DBJT 08—120)中关于雨水口泄水能力和篦子尺寸的相关规定,单个篦子过水面积约为0.2 m<sup>2</sup>,综合考虑泄水能力和截污过滤装置实际尺寸,规定溢流口总面积不小于0.2 m<sup>2</sup>[8]。现有雨水口分为新式雨水口和老式雨水口两类,其中新式雨水口尺寸为750 mm×450 mm,老式雨水口尺寸为550 mm×400 mm,因此,截污过滤模块设计尺寸长500~550 mm,宽200~250 mm,高250~350 mm。考虑装置内极限满水情况,截污过滤模块载重负荷净重需要小于20 kg。综合过滤模块的强度以及过水能力,开孔率在50%~70%之间。过滤模块材质选择高强度塑料,壁厚在4~10 mm之间。过滤介质选用合成介质,厚度低于50 mm。初期雨水截污过滤装置示意图见图6。

3 结 语

(1)单一过滤介质的SS去除效率为无烟煤>石



1—截污挂篮;2—过滤箱;3—过滤介质;4—雨水口连管;  
5—溢流口;6—路面;7—雨水口箅子

图6 初期雨水截污过滤装置示意图

英砂>陶粒>活性炭>过滤棉;单一过滤介质的过流能力为过滤棉>陶粒>活性炭>无烟煤>石英砂。

(2)合成介质过滤后的水样中,粒度分布较为集中,整体粒度不超过66.9 μm,大粒度颗粒物已被拦截;连续过滤试验期间,合成介质对SS的去除率达到70%及以上,且无溢流现象发生。

参考文献:

[1] 周国华,马莎莎,李俊奇,等.雨水口截污装置对径流污染的控制效果[J].环境工程,2020,38(4):66-71;76.  
[2] 袁宗汉.新型雨水篦子对城市径流初期雨水水量控制与水质控制效能研究[D].重庆:重庆大学,2016.  
[3] 钱耀辉.新型雨水排水系统关键技术问题的研究[D].成都:西南交通大学,2009.  
[4] 陈莹,赵剑强,张小玲,等.西安市道路雨水口截污挂篮试验研究[J].安全与环境学报,2012,12(5):69-72.  
[5] 刘军,董文艺,李梓龙,等.水质型雨水截污口设计与应用研究[J].建筑经济,2014(2):73-76.  
[6] 陈望.西安市屋面径流污染特征及控制技术研究[D].西安:长安大学,2019.  
[7] 张萍.雨水排水系统末端悬浮颗粒物去除技术试验研究[D].杭州:浙江大学,2015.  
[8] 袁悦,洗巍,王盼,等.《上海市雨水口截污过滤装置技术规程》解读[J].城市道桥与防洪,2023(10):119-121.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [roadfloodbridge@163.com](mailto:roadfloodbridge@163.com)

