城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.019

城市排水系统排放口原位过滤技术及SS去除效果

钟江丽[1,2]， 张 萍[3,4]， 沈 捷[1]， 陈思思[1]， 周永潮[4]

（1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 311122；2. 浙江省华东生态环境工程研究院，浙江 杭州 311122；3. 新昌技师学院，浙江 绍兴 312500；4. 浙江大学 市政工程研究所，浙江 杭州 310058）

摘 要： 城市雨水径流面源污染经排放口直接排放逐渐成为水体污染的主要原因。针对雨水排放口点多面散的特点，提出了一种基于轻质填料的原位过滤技术，该技术可通过定期维护实现滤料清洗，从而实现长期运行。以悬浮固体(SS)作为评价指标对该技术进行了模拟评估，并在此基础上进一步开展了实际应用研究，考察该技术对SS的实际控制效果。结果表明，该技术对SS总体上具有很好的净化效果，在滤层厚度为10 cm、滤速为106.7 m/h的条件下，SS去除率可达到70%~80%。SS去除效果受滤料粒径、滤层厚度以及滤速(排放流量)的影响，较厚的滤层具有较好的SS去除效果，但滤层厚度超过10 cm后，SS去除率增幅较小；粒径较小的滤料具有更高的SS去除能力。但是，较厚的滤层和较小的滤料会造成水头损失的增加，对排放安全产生一定影响。因此，工程应用中应在综合考虑排放安全的前提下，合理选取滤层厚度与滤料粒径。

关键词： 雨水径流； 面源污染； 雨水排放口； 原位过滤； 悬浮固体(SS)

中图分类号： TU992 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－4602(2023)05－0128－05

In Situ Filtration Technology and Its SS Removal Performance at Drainage Outlet of Urban Drainage System

ZHONG Jiang-li[1,2], ZHANG Ping[3,4], SHEN Jie[1], CHEN Si-si[1], ZHOU Yong-chao[4]

(1. *PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited*, *Hangzhou* 311122, *China*; 2. *Huadong Eco-Environmental Engineering Research Institute of Zhejiang Province*, *Hangzhou* 311122, *China*; 3. *Xinchang Technician College*, *Shaoxing* 312500, *China*; 4. *Institute of Municipal Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: The pollution of urban rainfall runoff from non-point source directly discharging through the outlet is gradually becoming the main cause of water pollution. Aiming at the characteristics of high density rainwater outlet dispersed in urban areas, an in situ filtration technology based on lightweight media was proposed. The technology realized filter cleaning through regular maintenance, and long-term operation of the filter was achieved. The technology was simulated and evaluated by using suspended solids (SS) as the evaluation index. On this basis, the practical application of the technology was further carried out to investigate its actual performance for SS control. The technology had a good SS removal performance on the whole. When the depth of the media was 10 cm and the filtration velocity was 106.7 m/h, the SS removal rate reached 70%-80%. The SS removal performance was affected by the media particle

通信作者：周永潮 E-mail：zhoutang@zju.edu.cn

size, the depth of the filter bed and the filtration velocity (discharge flow). The larger filter layer depth resulted in a better SS removal performance. However, the SS removal rate increased slightly when the depth of the filter layer was more than 10 cm. The media with smaller particle size had better SS removal capacity. However, the thicker filter bed and smaller particle size media resulted in the increase of head loss, which had a certain impact on discharge safety. Therefore, filter bed thickness and media particle size should be selected reasonably on the premise of comprehensive consideration of discharge safety in engineering application.

Key words: rainfall runoff; non-point pollution; rainwater outlet; in situ filtration; suspended solid (SS)

随着生活污水点源污染收集与处理率的逐渐提升，城市雨水径流面源污染日益凸显。雨水径流面源污染主要来源于大气干湿沉降及地表沉积物和污染物的冲刷，北京[1-2]、上海[3]、广州[4]等地的径流水质调查结果均表明，我国屋面和道路雨水径流污染普遍较为严重。其中，悬浮固体（SS）是排河雨水的主要污染物之一，国内相关研究结果表明，城市非渗透性地面多次降雨径流中SS的次降雨径流平均浓度（EMC）中值高达248 mg/L[5]。悬浮物随降雨径流排入地表水体，一方面影响水体感官，同时，附着其上的其他有毒有害物质（重金属、有机物等）对水体也会产生较为严重的污染[6]。

城市雨水径流污染物含量高、影响因素众多，排放不规律，排放口点多面散，给污染控制造成了很多困难，也成为目前黑臭水体治理后反弹的主要原因。为了更好地控制雨水径流面源污染，研究雨水排放口原位污染控制技术意义重大。为此，笔者设计了一种以轻质颗粒为填料的雨水排放口末端过滤净化装置，并对其性能进行了模拟研究，以期为雨水排放口污染控制提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　末端过滤净化设施的设计

实验装置见图1（a），水体循环由离心泵带动，通过隔膜阀和电磁流量计控制管道流量；塑料沙通过加沙器进入管道，加沙器上设有阀门以控制加沙量和速率；模型雨水井后设有排水箱，内设钢丝网以截留未能在雨水井内沉淀而随径流出流的悬浮颗粒，避免其进入循环体系；排水箱由底部连通管与供水箱连接，供水箱内为不含塑料沙的清水。

末端过滤实验装置如图1（b）所示，在原末端检查井（或增设处理井）内设置过滤层、溢流堰和沉泥区，污染浓度较大、水量较小的初期雨水通过进水管进入后，由溢流堰导流到过滤层；过滤层由轻质过滤填料即聚苯乙烯（EPS）泡沫颗粒组成，EPS颗粒表面较为致密，本身无吸附能力，且具有较好的韧性，反复过滤无破损风险；EPS颗粒通过过滤框自然压紧，上层压板可放松；雨水径流经过滤层过滤净化后直接排放。暴雨时，排放安全成为首要任务，大流量降雨径流则直接通过溢流堰排放至水体。运行一段时间后，通过放松过滤框上层压板，使滤料在浮力作用下膨胀松散，所截留的悬浮颗粒可沉降至沉泥区，通过定期清掏沉泥区得到去除。

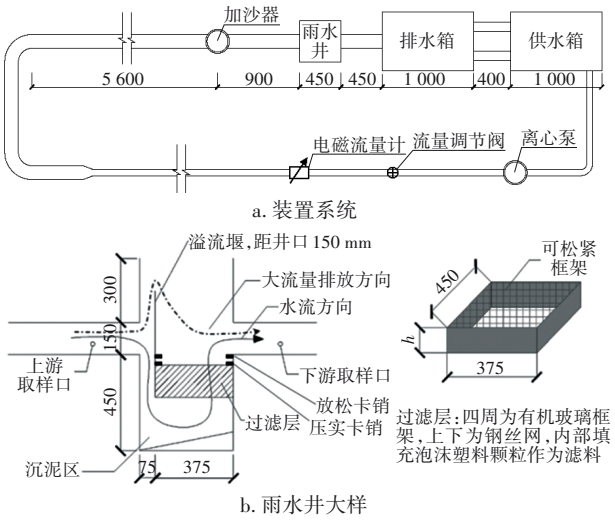


图1　雨水排放口末端过滤实验装置

Fig.1　Filtration device of rainwater outlet

1.2　实验材料

本研究在JX市采集路面雨水径流中的悬浮物，测得悬浮物平均堆积密度为1 460 kg/m^3，平均粒径为149 μm，最小粒径约为78 μm。据此，实验选用塑料沙模拟雨水径流中的悬浮物，塑料沙的堆积密

度为 1 365 kg/m^3，与悬浮物较接近；采用马尔文激光粒度仪测定塑料沙的粒径分布，D_{50}为 180 μm、最小粒径约为 100 μm，与实际沉积物粒径也较接近。

1.3　实验方法

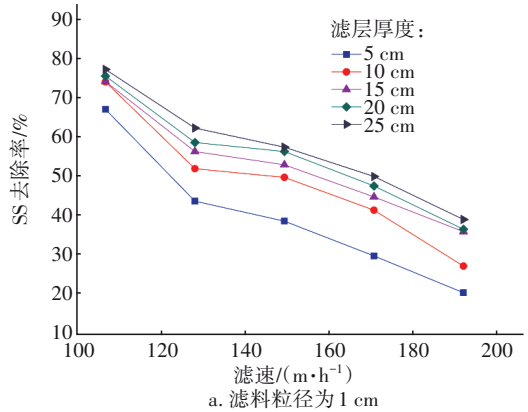
将不同装置安装于模型井内，向循环系统注水至水箱固定水位，启动离心泵，调节隔膜阀，使水流稳定且流量达到设定值；然后以事先调节好的速率向加沙器内加入 2 kg 塑料沙，加沙速率通过调节加沙口开度、以“进水 SS 为 500 mg/L”进行控制。

本研究通过改变流量、滤料粒径、滤层厚度控制实验条件，以塑料沙为实验对象，设置了 5 个流量（5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 L/s，对应 5 个滤速即 106.7、128.0、149.3、170.7、192.0 m/h）、3 种滤料（A：粒径为 1 cm 的 EPS 泡沫颗粒；B：粒径为 3~4 mm 的 EPS 泡沫颗粒；C：两种滤料各占半层，上半层粒径为 1 cm、下半层粒径为 3~4 mm）、5 个滤层厚度（5、10、15、20、25 cm）共 65 种工况。

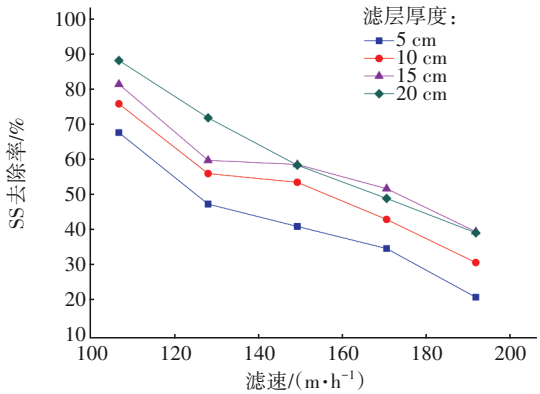
2　结果与分析

2.1　SS 的去除效果

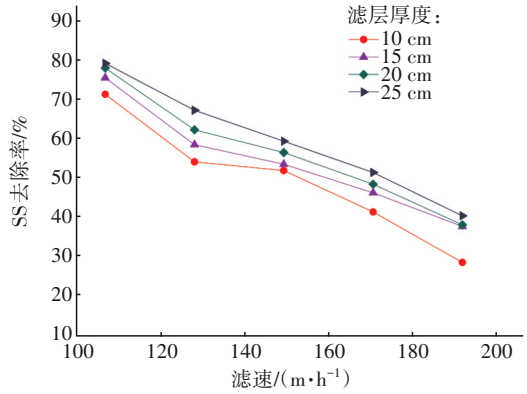
图 2 为以不同粒径的 EPS 泡沫颗粒作为滤料时，末端过滤装置在不同滤速下的 SS 去除率。



a. 滤料粒径为 1 cm



b. 滤料粒径为 3~4 mm



c. 双层滤料

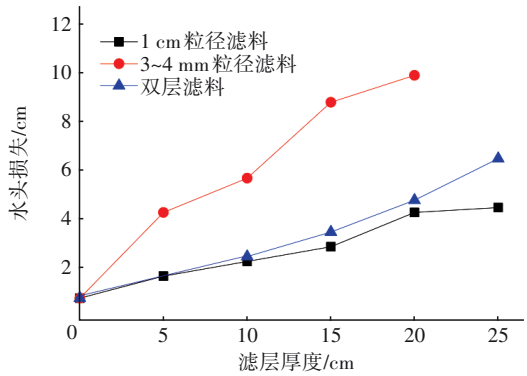
图 2　不同条件下雨水排放口末端过滤装置的 SS 去除效果

Fig.2　Removal effect of SS by filtration device of rainwater outlet under different conditions

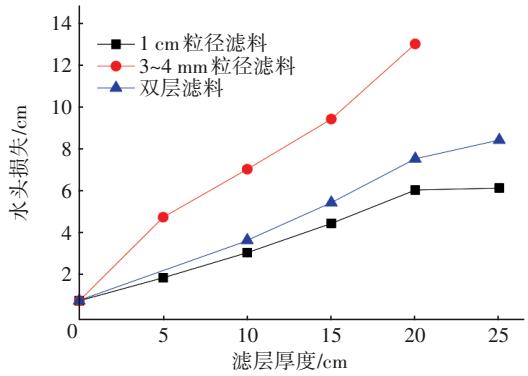
由图 2 可知，在最小滤速下，厚度仅为 5 cm 的 A 和 B 滤层的 SS 去除率分别达到 67.8% 和 69.2%，而 10 cm 厚混合滤层的 SS 去除率达到了 72.3%；当 A 和 C 滤层厚度达到 25 cm、B 滤层厚度达到 20 cm 时，在最小滤速下，对 SS 的去除率分别达到了 78.0%、81.2%、89.8%。据此可知，末端过滤技术对 SS 具有很好的去除效果。同时，从图 2 可知，随着滤速的增大，SS 去除率逐渐降低，对于粒径为 1 cm、厚度为 5 cm 的滤层，5 个滤速下的 SS 去除率分别为 67.8%、44.3%、39.2%、30.3%、20.9%；而当滤层厚度增加到 25 cm 时，5 个滤速下的 SS 去除率分别达到了 78.0%、63.0%、58.1%、50.6% 和 39.6%，可以发现，滤层厚度增加后，SS 去除率得到明显提升，但滤层厚度超过 10 cm 后，增加滤层厚度对 SS 去除率的提升效果逐渐减弱。另外，相同滤层厚度下，小粒径的填料具有更好的 SS 去除效果。

2.2　不同厚度滤层的水头损失

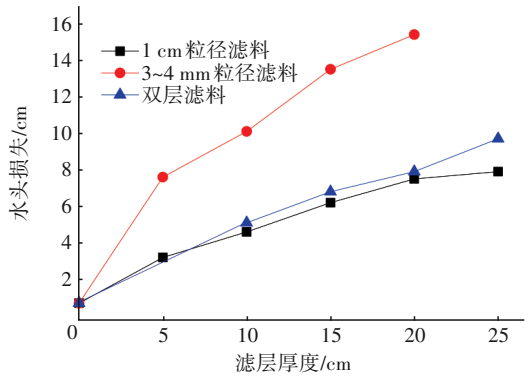
图 3 为不同厚度的滤层在不同滤速条件下的水头损失。



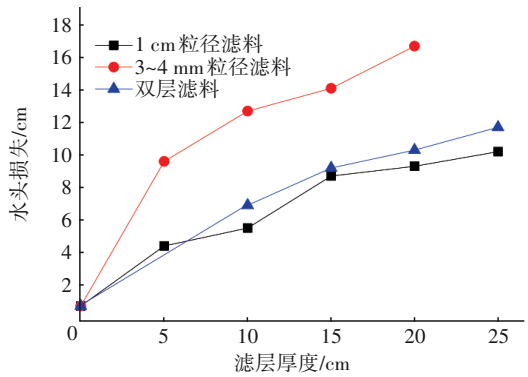
a. 滤速=106.6 m/h



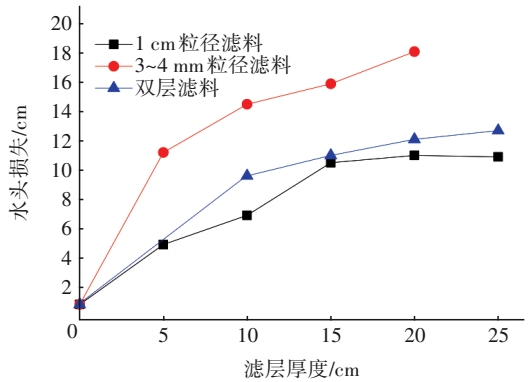
b. 滤速=128.0 m/h



c. 滤速=149.3 m/h



d. 滤速=170.7 m/h



e. 滤速=192.0 m/h

图3　不同厚度滤层在不同滤速下的水头损失

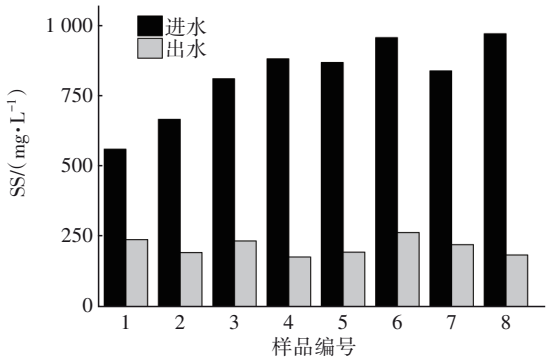
Fig.3　Head loss of filtration layer with different thickness at different filtering velocities

雨水排放口末端过滤装置的安装会导致雨水排放过程中水头损失的增大，这将会影响排放安全，因此，末端过滤装置对水头损失的影响也是本研究评估的重点。由图3可知，当滤速较小时，水头损失增加较为有限；但当滤速增大时，水头损失持续增大，当滤速达到192.0 m/h时，1 cm粒径滤料和双层滤料在最大滤层厚度时的过滤水头损失分别为11.2、13.0 cm，而3~4 mm的小粒径滤料则达到了18.4 cm。

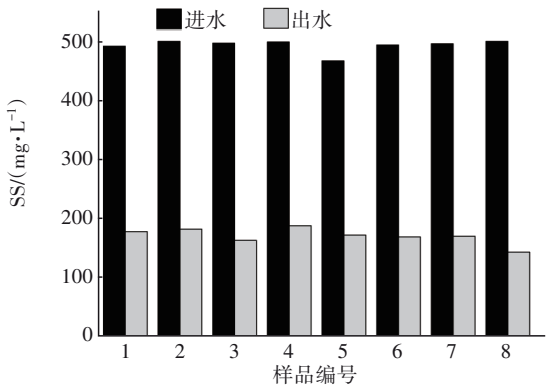
2.3　工程应用效果

2.3.1　效果评估

由于塑料沙与雨水径流中的实际SS存在一定差异，为此，在JX市选取一个雨水排放口进行原位过滤技术改造，滤料粒径为1 cm、滤层厚度为20 cm、滤层面积为1.2 m^2，对实际应用中的SS去除效果进行评估，结果如图4所示。



a. 2016-09-28降雨事件



b. 2017-01-05降雨事件

图4　两场降雨下SS的去除效果

Fig.4　Removal effect of SS under two rainfall events

由图4可知，由于在实际应用中，排放口末端井内面积较大，过滤面积较大且流速较小，对SS具有很好的去除效果，进出水SS浓度具有明显差异，在两场降雨中，SS平均去除率分别达到了79.4%和

65.4%，有效控制了雨水径流污染。前人对降雨径流水质调查发现[7]，城市雨水径流污染存在一定的初期效应，即降雨初期较小流量部分具有较大的污染负荷比重，因此，末端过滤装置对小雨时的径流污染和初期雨水径流污染具有更好的控制效果。

2.3.2　维护方法

根据降雨频次，课题组持续对装置进行了维护，雨季1~2个月一次、旱季3~4个月一次。维护方法是将固定在压实卡销（见图1）位置的钢丝网放松至放松卡销，让滤料在浮力作用下膨胀，同时上下振荡钢丝网，促使截留的SS沉淀至沉泥区。由于截留的SS主要分布在滤料层下层，维护时仅有少量SS逃逸至出水区。

3　结论

①　针对点多面散的雨水排放口排放的径流面源污染问题，提出了排放口末端原位过滤技术，该技术采用轻质滤料，在截留SS的同时，通过定期放松滤层压杆，使滤料在浮力作用下漂浮膨胀，滤料中被截留的SS得到去除，从而实现长期运行。

②　采用塑料沙模拟雨水径流中的SS，对末端过滤技术进行效果评估，结果显示，末端过滤技术对SS总体上具有较好的去除效果；SS去除效果受滤料粒径、滤层厚度以及滤速（排放流量）的影响较大，增加滤层厚度，SS去除率相应增加，但滤层厚度超过10 cm后，SS去除率增幅较小，另外，相同滤层厚度下，较小粒径的填料有更好的SS去除效果。但是，较厚的滤层和较小的滤料会造成较大的水头损失，对排放安全产生一定影响。因此，工程应用中应在综合考虑排放安全的前提下，合理选取滤层厚度与滤料粒径。

参考文献：

[1] 车伍，汪慧珍，任超，等．北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]．中国给水排水，2001，17(6)：57-61.
CHE Wu, WANG Huizhen, REN Chao, *et al*. Studies on roof runoff pollution and utilization in Beijing urban area [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 57-61 (in Chinese).

[2] 车伍，欧岚，汪慧贞，等．北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]．环境污染治理技术与设备，2002，3(1)：33-37.
CHE Wu, OU Lan, WANG Huizhen, *et al*. The quality and major influential factors of runoff in Beijing urban area [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(1): 33-37 (in Chinese).

[3] 张善发，李田，高廷耀．上海市地表径流污染负荷研究[J]．中国给水排水，2006，22(21)：57-60.
ZHANG Shanfa, LI Tian, GAO Tingyao. Study on pollution load of urban surface runoff in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(21): 57-60 (in Chinese).

[4] 夏宏生，林芳莉．广州市城区降雨径流水质特征分析[J]．环境科学与管理，2010，35(5)：129-131.
XIA Hongsheng, LIN Fangli. Study on quality characterization of runoff in Guangzhou urban area [J]. Environment Science and Management, 2010, 35(5): 129-131 (in Chinese).

[5] 林莉峰．上海市城区地表径流污染特性调查与研究[D]．上海：同济大学，2006.
LIN Lifeng. Investigation and Research on Pollution Characteristics of Surface Runoff in Shanghai City [D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese).

[6] ROSSI L, FANKHAUSER R, CHEVRE N. Water quality criteria for total suspended solids (TSS) in urban wet-weather discharges [J]. Water Science and Technology, 2006, 54(6/7): 355-362.

[7] 李贺．上海城区径流水质特性研究[D]．上海：同济大学，2006.
LI He. Research on Water Quality Characteristics of Shanghai Urban Runoff [D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese).

作者简介：钟江丽（1981-　），女，浙江金华人，本科，高级工程师，主要从事城市水务设计、智慧水务等方面的工作。

E-mail：zhoutang@zju.edu.cn

收稿日期：2021-04-26

修回日期：2021-06-08

（编辑：刘贵春）