

不同组合填料生物滤池对城市更新区暴雨径流净化效果研究

江毅^{1*}, 王培升², 杨长明^{2#}

¹中铁四局集团第四工程有限公司, 安徽 合肥

²同济大学环境科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2026年5月6日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月22日

摘要

随着城市建设加快, 暴雨径流携带的悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氮(N)、磷(P)等传统污染物对城市水生态安全构成严峻威胁。为提升生物滤池在暴雨径流污染控制中的净化效率, 探究不同填料组合的削减效果具有重要意义。本研究以合肥骆岗公园为研究对象, 通过模拟径流试验系统比较了河砂、河砂 + 绿沸石、河砂 + 污泥及河砂 + 生物炭四类常见填料组合对污染物的削减效果。结果显示, 河砂 + 绿沸石组合对SS、COD、TN、TP的平均去除率分别为84.3%、55.5%、55.2%、78.9%, 综合效果最佳。其优越性能主要归因于绿沸石规则的微孔结构和较高的比表面积, 可通过物理筛分和表面吸附有效截留悬浮颗粒, 并通过阳离子交换反应促进氮素去除。本研究结果表明, 组合填料生物滤池, 尤其是河砂 + 绿沸石在强化暴雨径流污染物削减方面具有显著优势, 为城市更新区水环境治理提供了新的技术路径, 未来应结合植被配置和长期运行监测, 进一步验证其工程应用的可行性与可持续性。

关键词

暴雨径流, 组合填料, 生物滤池, 污染削减

Study on the Purification Performance of Biological Filters with Different Combined Fillers for Stormwater Runoff in Urban Renewal Areas

Yi Jiang^{1*}, Peisheng Wang², Changming Yang^{2#}

¹China Railway Fourth Group Co., Ltd., Hefei Anhui

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 江毅, 王培升, 杨长明. 不同组合填料生物滤池对城市更新区暴雨径流净化效果研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1247-1256. DOI: 10.12677/aep.2026.167126

Abstract

With the acceleration of urban construction, conventional pollutants such as suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), nitrogen (N), phosphorus (P), and other emerging pollutants carried by rainstorm runoff. To enhance the purification efficiency of bioretention systems in storm-water pollution control, it is essential to investigate the pollutant removal performance of different filler combinations. This study takes Luogang Park in Hefei City, the capital of Anhui province as the research object, and compares the pollutant reduction effects of four common filler combinations, namely river sand, river sand + green zeolite, river sand + sludge, and river sand + biochar, through a simulated runoff experimental system. The results showed that the average removal rates of SS, COD, TN, and TP by the combination of river sand and green zeolite were 84.3%, 55.5%, 55.2%, 78.9%, respectively, with the best comprehensive purification performance. The superior performance was mainly attributed to the regular microporous structure and high specific surface area of green zeolite, which effectively intercepted suspended particles through physical sieving and surface adsorption, while promoting nitrogen removal via cation-exchange reactions. The results of this study show that the combined filler biofilter, especially river sand + green zeolite, has significant advantages in strengthening the reduction of storm runoff pollutants, providing a new technical path for water environment management in urban renewal areas. In the future, the feasibility and sustainability of its engineering application should be further verified in combination with vegetation configuration and long-term operation monitoring.

Keywords

Rainstorm Runoff, Combined Filler, Biological Filter, Pollution Reduction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市更新与海绵城市建设的不断推进,地表硬化、暴雨径流污染和内涝风险等一系列环境问题日益突出[1][2]。暴雨径流不仅具有水量集中、冲刷力强的特点,更携带了大量污染物进入受纳水体,对城市生态安全造成压力。已有研究表明,暴雨径流中常见的悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)等传统污染物常呈现高浓度波动,导致水体浑浊、富营养化和生态系统失衡[3][4]。因此,如何通过工程化手段高效削减暴雨径流中污染物负荷,已成为城市水环境治理的关键问题之一。

作为海绵城市的重要组成部分,生物滤池因其建设成本较低、结构灵活、污染物削减效果突出而被广泛应用[5][6]。其净化机理主要依赖植物、微生物与填料的协同作用,其中填料通过过滤、吸附和化学沉淀等过程在污染物去除中发挥核心作用[7]。大量研究表明,河砂因获取便利常作为基础材料,绿沸石具有较高的离子交换与吸附性能,生物炭凭借比表面积大和丰富的孔隙结构在吸附有机污染物和部分微塑料方面表现突出,而含铁铝的净水厂污泥则在磷去除方面具备优势[8]-[10]。然而,不同填料的物理结构与化学特性差异明显,其对污染物的去除机制和稳定性存在显著差异,如何在多种填料间实现功能互

补与性能协同，仍是影响生物滤池长期运行效果的关键问题。

目前多数生物滤池工程仍以单一河砂作为主要滤料，虽然河砂来源广泛、价格低廉，但其孔隙率较低、吸附容量有限，运行过程中易出现孔隙堵塞，导致污染物去除率随时间快速衰减，难以满足对暴雨径流复合污染的长期控制需求[10]。针对这一不足，近年来学者开始探索通过引入功能性填料改善净化效果，其中生物炭因比表面积大、孔隙结构发达以及表面富含含氧官能团，能够增强对有机污染物和部分微塑料的吸附，同时具备一定的缓冲能力和微生物附着优势，被认为是提升滤池性能的潜在材料[11]。然而，现有研究多集中于单一填料的性能评价，缺乏对不同材料协同作用的系统比较。尤其是在传统污染物与新兴污染物并存的典型城市更新区场景中，如何通过合理的组合填料实现多污染物的协同削减，尚缺乏实证支撑。

针对上述问题，本文以合肥骆岗公园为研究对象，该区域由废弃机场改造而成，具有典型的城市更新区特征。本研究分析了公园暴雨径流的污染特征，明确其面临的主要环境风险。随后构建了四类填料组合(河砂、河砂 + 绿沸石、河砂 + 净水厂污泥、河砂 + 生物炭)，通过室内模拟试验比较其对 SS、COD、TN 及 TP 的去除能力，并结合孔隙度、容重及出水时间等指标评价填料堵塞特性。本研究的目标为：(1) 系统比较不同填料组合对暴雨径流中主要污染物的净化效果，揭示其在污染物削减方面的差异与机制；(2) 通过堵塞特性分析评估填料的长期运行稳定性，为城市更新区生物滤池的优化设计与工程应用提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况与径流特征

研究区域位于合肥市骆岗公园，亚热带季风性湿润气候，年均气温 15.7℃，年均降水量 1000 mm 左右。骆岗公园由原骆岗机场改造而成，地处城市核心区域，地表以透水铺装、草地和道路为主，局部保留旧跑道结构。受城市地表硬化与人类活动影响，该区域暴雨径流中含有较高浓度的悬浮物、COD、氮和磷等常规污染物，具有典型的城市更新区径流特征，适宜用于研究生物滤池在暴雨径流污染削减中的应用效果。

2.2. 试验填料与改性方法

为比较不同填料的去污效果，选取河砂、绿沸石、给水厂污泥和生物炭四类常见材料。河砂：粒径 1~5 mm，价格低廉，常作为基础滤料；绿沸石：粒径 1~5 mm；给水厂污泥：粒径 1~5 mm，含铁铝组分；生物炭：粒径 1~5 mm。填料的物化性质见表 1。

Table 1. Physicochemical properties of different materials
表 1. 不同材料的物化性质

材料	比表面积($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	阳离子交换量($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	零点电荷(pH_{pzc})
河砂	1.6	2.1	6.1
绿沸石	33.2	130.9	6.3
给水厂污泥	51.3	13.6	7.2
生物炭	610.7	37.8	8.7

2.3. 试验装置与设计

采用有机玻璃填料柱作为生物滤池模型，直径 10 cm，高 40 cm。设置以下试验组：(1) S0：河砂；(2) S1：河砂 + 绿沸石(体积比 1:1)；(3) S2：河砂 + 给水厂污泥(体积比 1:1)；(4) S3：河砂 + 生物炭(上下分层，上层为河砂，下层为生物炭，体积比 1:1)。各组均设置三组平行，进水采用配制的模拟暴雨径流

水样(COD: 40.0 mg·L⁻¹, TN: 10.5 mg·L⁻¹, TP: 2.00 mg·L⁻¹, SS: 500 mg·L⁻¹)。

在试验运行前, 先从填料柱上口加入清水并打开下方出水口, 持续进水冲洗直至出水流量与浊度连续两次测定(间隔 10 min)变化均小于±5%, 判定为出水相对稳定, 此时说明水力通道已均匀形成。随后停止进水, 将填料柱静置 24 h, 使孔隙内空气充分排出、毛细水重新分布, 以保证填料层孔隙处于充分饱和状态, 为正式试验提供稳定初始条件。正式试验时, 在出水口放置水样瓶, 每隔 2 min 向各填料柱加入 45 mL 模拟暴雨径流水样, 同时记录自第一次加样至出水初现所需的时间, 当出水完全停止时立即封存样品。第一轮试验所得出水依次标记为 S0-1、S1-1、S2-1、S3-1 (四类填料对比试验), 并置于 4℃ 保存。此后, 四类填料对比试验每隔 2 天重复一次, 共进行 3 轮, 样品依次标记为 S0-2、S1-2、S2-2、S3-2 及 S0-3、S1-3、S2-3、S3-3。试验结束后, 于 S0、S1、S2 组填料柱中部各取约 50 mL 填料, S3 组分别在河砂层和生物炭层中部取样, 作为试验后填料样品以供进一步分析。试验装置如图 1 所示。

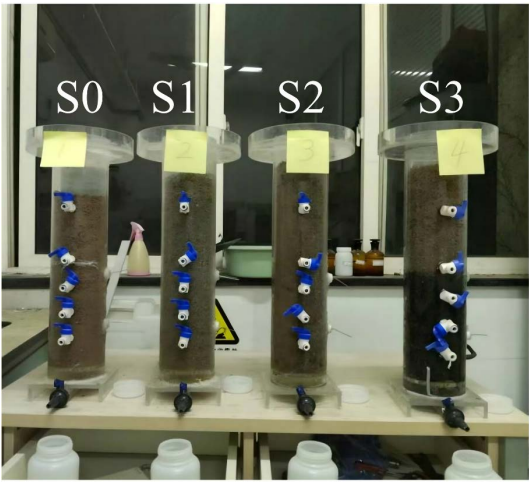


Figure 1. Biological filter experimental device with four different filler combinations (S0, S1, S2, S3)
图 1. 四种不同填料组合(S0、S1、S2、S3)的生物滤池试验装置

2.4. 指标测定与分析方法

水质指标 COD、总氮、总磷及 SS 按照《地表水和污水监测技术规范》¹(HJ/T 91-2002)进行测定。

2.5. 数据处理

通过 Excel 对数据进行整理与分析, 利用 Origin 软件进行图形的绘制, 并通过 SPSS 软件进行方差分析, 以判断不同处理组之间的差异是否显著。

3. 结果与讨论

3.1. 暴雨径流污染特征

合肥骆岗公园实地采样结果表明, 暴雨径流中传统污染物浓度普遍偏高, COD 介于 39~81 mg/L, 总氮为 3.4~5.4 mg·L⁻¹, 总磷为 0.3~0.5 mg·L⁻¹, 悬浮物浓度为 278~389 mg·L⁻¹, 均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)²V类限值(表 2)。其中, 悬浮物和 COD 超标倍数较大, 显示出强烈的地表冲刷效应; 氮、磷的累积则揭示出潜在的富营养化风险。

¹https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/200301/t20030101_66890.htm
²https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml

Table 2. Analysis results of on-site sampling of rainstorm runoff from the abandoned airport runway in Luogang Park
表 2. 骆岗公园原机场跑道暴雨径流现场采样分析结果

采样地点	COD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氮($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
骆岗公园机场跑道西侧排口	39	3.4	0.3	278
骆岗公园机场跑道西侧径流	72	4.9	0.3	347
骆岗公园机场跑道东侧排口	81	5.4	0.5	389

3.2. 不同填料对径流污染物的去除效果

试验结果表明, 四组填料对出水 pH 的影响均不显著(图 2)。模拟暴雨径流进水 pH 为 7.19~7.29, 经处理后各组出水 pH 保持在 7.06~7.79 之间, 仍呈弱碱性, 未出现超出中性范围的波动。值得注意的是, S1 与 S2 的出水 pH 略低(约 7.1), 而 S3 偏高(约 7.6~7.8), 说明生物炭表面碱性官能团溶出可能导致体系偏碱[11][12]。这表明在常规运行条件下, 所选填料不会显著改变水体酸碱性, 对水生生态系统的 pH 稳定性无明显风险。四类填料对 SS 均表现出一定的削减能力, 但差异较大(图 3)。S0 初期去除率可达 73.7%,

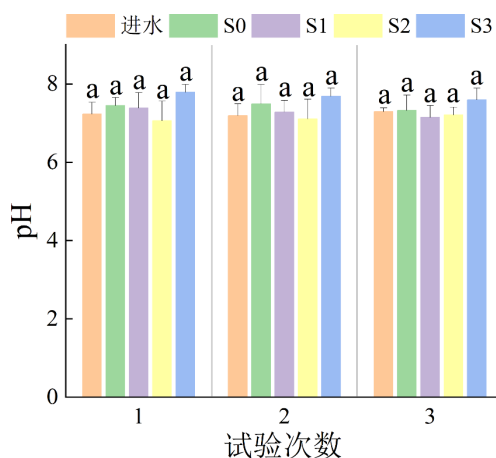


Figure 2. The changes in pH after treatment in different treatment groups (S0, S1, S2, S3). The same letters indicate that the differences among different treatment groups in each round of the experiment are not significant ($P > 0.05$)

图 2. 不同处理组(S0、S1、S2、S3)处理后 pH 的变化。相同的字母表示每轮试验不同处理组之间的差异不显著($P > 0.05$)

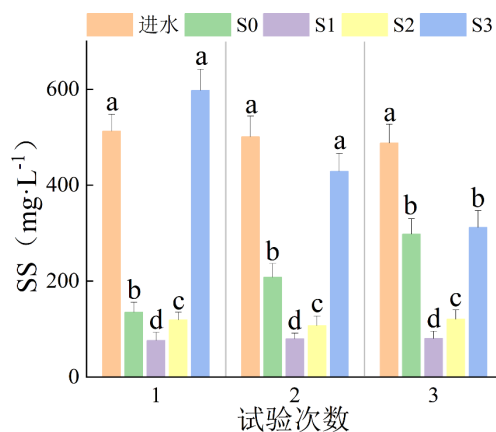


Figure 3. The removal effects of SS by different treatment groups (S0, S1, S2, S3). Different letters indicate significant differences among different treatment groups in each round of the experiment ($P < 0.05$)

图 3. 不同处理组(S0、S1、S2、S3)对 SS 的去除效果。不同的字母表示每轮试验不同处理组之间的差异显著($P < 0.05$)

但在第三次试验时下降至 38.9%，表明单一河砂易因孔隙堵塞导致性能快速衰退；S1 组在三次试验中 SS 去除率分别为 85.2%、84.1%、83.5%，平均去除率 84.3%，表现最为稳定；S2 组去除率分别为 76.8%、78.6%、75.2%之间，平均为 76.9%；S3 组在首轮试验中甚至出现负去除率(出水 SS 高于进水)，随后逐渐稳定在 36.1%，推测与生物炭粉末溶出及孔隙逐渐饱和和相关。因此，绿沸石能够提供较多微孔与吸附位点，保持稳定的颗粒截留能力，而生物炭则需预处理去除细粉，否则初期会恶化水质。

在 COD 削减方面，S0 组从 43.7%下降到 30.2%，呈下降趋势；S1 组表现突出，三次试验去除率分别为 57.1%、54.5%、55.0%，平均为 55.5%，这可能与绿沸石表面负电位与微孔可吸附部分有机物有关 [13] [14]；S2 组首轮试验出现出水 COD 升高(去除率为负)，随后逐渐恢复至 30.6%，说明给水厂污泥填料中存在可溶性有机物释放[15][16]；S3 组去除率随运行时间逐步提升，从 32.4%增加到 51.7%，平均为 43.9%，表明生物炭在运行稳定后对有机物吸附较强(图 4) [17]。

各处理组对 TN 的去除能力差异显著(图 5)。S0 组由 27.5%下降到 12.6%，去除率明显衰减；S1 组平均去除率约为 55.1%，表现最优；S2 组表现最差，三轮平均仅 21.8%；S3 组则稳定在 45.0%~50.1%。

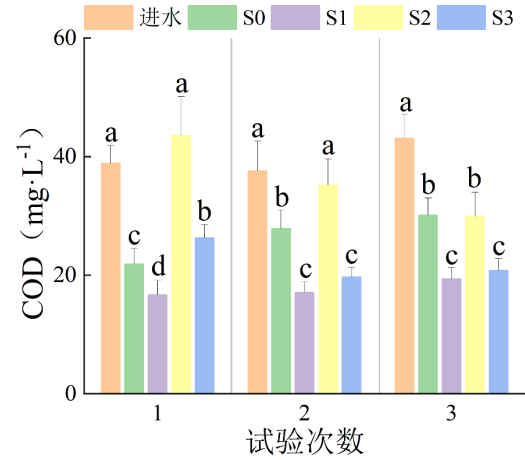


Figure 4. The removal effects of COD by different treatment groups (S0, S1, S2, S3). Different letters indicate significant differences among different treatment groups in each round of the experiment ($P < 0.05$)

图 4. 不同处理组(S0、S1、S2、S3)对 COD 的去除效果。不同的字母表示每轮试验不同处理组之间的差异显著($P < 0.05$)

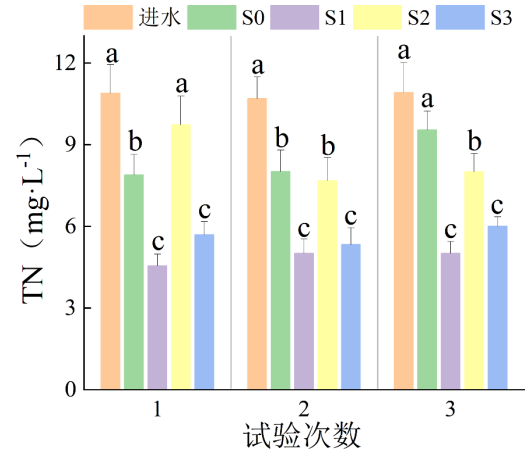


Figure 5. The removal effects of TN by different treatment groups (S0, S1, S2, S3). Different letters indicate significant differences among different treatment groups in each round of the experiment ($P < 0.05$)

图 5. 不同处理组(S0、S1、S2、S3)对 TN 的去除效果。不同的字母表示每轮试验不同处理组之间的差异显著($P < 0.05$)

由此可知,绿沸石通过对氨氮的高效吸附支撑了 TN 的削减,而污泥的氮素释放削弱了其整体效果。由此可见,填料的氮素去除能力高度依赖其阳离子交换性能与后期稳定性[18] [19]。

TP 去除方面,S0 组表现最差,出水 TP 基本维持在 $1.0\sim 1.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;S1 组去除率随运行下降,从 67.2% 降至 27.7%,表明绿沸石对磷的吸附容量有限,且易随运行饱和;S2 组表现最优,三轮平均去除率 78.9%,出水浓度最低可降至 $0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可能主要依赖污泥中 Fe/Al 氧化物与磷酸根生成沉淀[20];S3 组去除率维持在 61.3%~70.1%,存在逐渐衰减的趋势(图 6)。因此,这一结果表明,污泥在除磷方面具有优势,但伴随氮素释放问题,需要合理掺混使用。

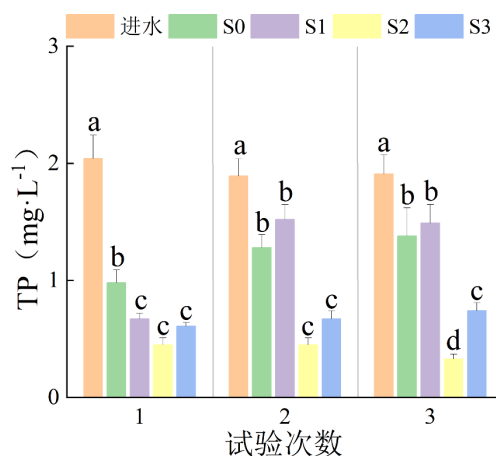


Figure 6. The removal effects of TP by different treatment groups (S0, S1, S2, S3). Different letters indicate significant differences among different treatment groups in each round of the experiment ($P < 0.05$)

图 6. 不同处理组(S0、S1、S2、S3)对 TP 的去除效果。不同的字母表示每轮试验不同处理组之间的差异显著($P < 0.05$)

3.3. 填料堵塞特性

试验前后对填料容重、孔隙度及出水时间的测定结果显示,不同填料在抗堵塞性能上存在显著差异(图 7)。S0 在三轮运行后容重由 $1.38\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 上升至 $1.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,孔隙度由 29.9% 下降至 29.3%,表现出一定程度的颗粒沉积与孔隙压缩,但整体变化相对缓慢,出水时间稳定,说明其结构较为致密,抗堵塞性能中等。S1 容重保持稳定($1.17\rightarrow 1.18\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),孔隙度由 38.1% 下降至 34.8%,三轮试验出水时间逐渐下降,表明绿沸石颗粒级配合理、孔隙结构稳定,能有效维持水力通道,因此抗堵塞性能良好。S2 相较于其他处理组容重变化较为明显($1.00\rightarrow 1.14\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),孔隙度由 38.5% 降至 33.8%。同时,如图 7(c)所示,在第 2 和第 3 次试验中,S2 的出水时间显著长于 S0 和 S1。这并非通道畅通,而是由于净水厂污泥中细小颗粒在水流冲刷下发生迁移,迅速淤积并堵塞了填料层的内部孔隙,造成了明显的物理堵塞。孔隙的大面积堵塞导致有效水流通道减少、水流穿透阻力显著增大,因此表现为水力停留(出水)时间明显延长。这种严重的物理堵塞不仅降低了系统的水力学稳定性,还可能导致部分有效吸附位点被掩蔽,限制了其长期应用的潜力。S3 表现最不稳定,活性炭的容重由 $0.16\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 上升至 $0.28\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,孔隙度则由 35.3% 降至 24.4%,同时在第二轮试验后出水时间明显缩短。这可能是初期因细粉溶出和表层滤饼形成出现出水延迟,后期随着部分炭粉被冲刷,局部通道被冲开,出水提前,但这一过程伴随显著波动,说明其孔隙结构不稳定、抗堵性能较差。

因此,这一结果表明,填料堵塞受颗粒级配、表面特性及溶出物质的共同影响。河砂提供骨架稳定性,绿沸石孔隙结构规则且不易压实,因此 S1 能在保持较高去除率的同时维持良好水力性能。污泥虽然强化了磷的去除,但细颗粒和可溶性有机物导致严重堵塞,限制其长期应用。生物炭具有一定的有机物

和 TWP_s 吸附能力, 但初期细粉迁移与孔隙结构不稳定性降低了系统的可持续运行能力[21]。由此可见, 填料抗堵塞特性与水质净化效率同等重要, 是评估其工程适用性的关键指标。

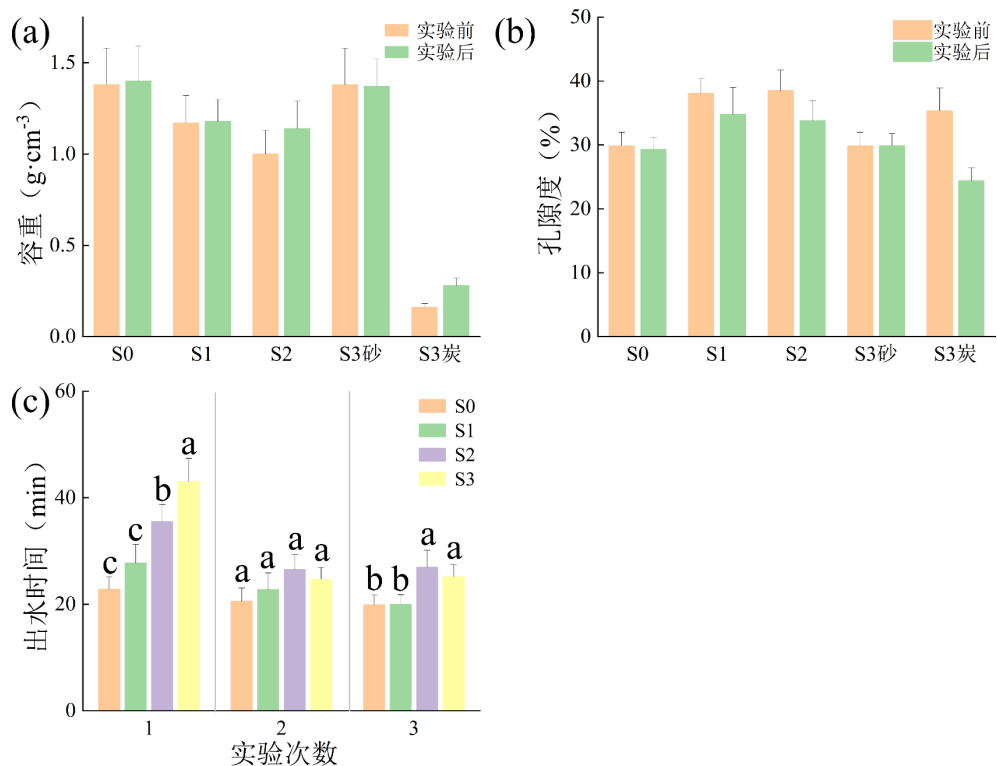


Figure 7. Results of packing clogging characteristics in different treatment groups (S0, S1, S2, S3)
图 7. 不同处理组(S0、S1、S2、S3)填料堵塞特性结果

4. 结论与展望

本研究表明, 不同填料组合在短期污染物削减与水力学稳定性上存在显著差异。河砂 + 绿沸石组合在悬浮物、有机物、氮素等方面均表现出较高的去除率和较好的水力学稳定性, 短期综合物化效能最优; 河砂 + 净水厂污泥组合在除磷上具有突出优势, 但伴随较快的孔隙堵塞风险, 限制了其物理稳定性; 河砂 + 生物炭组合能够改善有机物去除, 但初期细粉溶出和孔隙结构不稳定影响了系统的水力学表现。整体来看, 填料的多孔结构、离子交换性能和颗粒稳定性共同决定了系统的初期物化截留与抗堵塞特性。本研究结果主要反映填料的短期物理化学性能。受限于模拟径流水质、运行周期较短以及缺乏完整植物与微生物群落的实验条件, 当前结论无法直接等同于成熟生物滤池的长期运行效果。未来研究需在长期真实的降雨径流条件下, 结合植被配置与微生物演替特征, 进一步验证组合填料在成熟生物滤池中的长期净化效能与可持续性, 以推动其在城市更新区雨洪管理中的工程推广。

基金项目

中铁四局集团有限公司重点研发项目(2024ZD037)。

参考文献

[1] Fu, X., Liu, J., Mei, C., Luan, Q., Wang, H., Shao, W., *et al.* (2021) Effect of Typhoon Rainstorm Patterns on the Spatio-Temporal Distribution of Non-Point Source Pollution in a Coastal Urbanized Watershed. *Journal of Cleaner Production*,

- 292, Article ID: 126098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126098>
- [2] Zhang, Y., Zou, L., Li, P., Du, Z., Dou, M., Huang, Z., *et al.* (2022) Differential Characteristics and Source Contribution of Water Pollutants before and after the Extreme Rainfall Event in the Huaihe River Basin. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article 1003421. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1003421>
 - [3] Hou, J., Mao, H., Li, J. and Sun, S. (2019) Spatial Simulation of the Ecological Processes of Stormwater for Sponge Cities. *Journal of Environmental Management*, **232**, 574-583. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.111>
 - [4] 杨帆, 蒋轶锋, 王翠翠, 等. 西湖龙泓涧流域暴雨径流氮磷流失特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 141-147.
 - [5] Ahmed, M.B., Zhou, J.L., Ngo, H.H., Guo, W., Thomaidis, N.S. and Xu, J. (2017) Progress in the Biological and Chemical Treatment Technologies for Emerging Contaminant Removal from Wastewater: A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials*, **323**, 274-298. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.045>
 - [6] Gu, Y., Li, Y., Yuan, F. and Yang, Q. (2023) Optimization and Control Strategies of Aeration in WWTPs: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **418**, Article ID: 138008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138008>
 - [7] Mirzaei, S., Gorczyca, B., Uyaguari-Diaz, M., Sparling, R. and Maksimova, E. (2025) Microbial Consortia in Full-Scale Pre-Ozonated Biologically Active Filters Treating a High-Doc Water: Effects of Seasonal and Operational Variations. *Water Research*, **285**, Article ID: 124065. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124065>
 - [8] Zhao, H., Liu, F., He, T., Tian, W., Zheng, C., Liao, Y., *et al.* (2025) Boosting Microbial Nitrogen Removal through Green-Engineered Iron Nanocomposites: A Sustainable Strategy for High-Strength Inorganic Nitrogen Wastewater Treatment. *Environmental Research*, **280**, Article ID: 121967. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121967>
 - [9] Jahin, H.S., Abbas, M.H.H., Farid, I.M., Gameel, A. and Bassouny, M.A. (2025) A Comparative Study on the Efficiency of Biochar and Iron-Modified Biochar for Pb-Removal from Aqueous Solutions. *Water Science*, **39**, 171-182. <https://doi.org/10.1080/23570008.2025.2467358>
 - [10] Wang, M., He, J., Zhang, R., Li, L. and Zhang, J. (2025) How Do Salt-Tolerant Granular Sludge Cultivated under Different Conditions Carry Out Nitrogen and Phosphorus Removal? *Environmental Research*, **285**, Article ID: 122365. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122365>
 - [11] Huang, Y. and Hu, H. (2020) The Interaction of Perrhenate and Acidic/Basic Oxygen-Containing Groups on Biochar Surface: A DFT Study. *Chemical Engineering Journal*, **381**, Article ID: 122647. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122647>
 - [12] James R., A.M., Yuan, W., Wang, D., Wang, D. and Kumar, A. (2020) The Effect of Gasification Conditions on the Surface Properties of Biochar Produced in a Top-Lit Updraft Gasifier. *Applied Sciences*, **10**, Article 688. <https://doi.org/10.3390/app10020688>
 - [13] Cieřla, J., Franus, W., Franus, M., Kedziora, K., Gluszczyk, J., Szerement, J., *et al.* (2019) Environmental-friendly Modifications of Zeolite to Increase Its Sorption and Anion Exchange Properties, Physicochemical Studies of the Modified Materials. *Materials*, **12**, Article 3213. <https://doi.org/10.3390/ma12193213>
 - [14] Hailu, S.L., Nair, B.U., Redi-Abshiro, M., Diaz, I. and Tessema, M. (2017) Preparation and Characterization of Cationic Surfactant Modified Zeolite Adsorbent Material for Adsorption of Organic and Inorganic Industrial Pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**, 3319-3329. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.039>
 - [15] Nguyen, M.D., Donaldson, D., Adhikari, S., Amini, N., Mallya, D.S., Thomas, M., *et al.* (2023) Phosphorus Adsorption and Organic Release from Dried and Thermally Treated Water Treatment Sludge. *Environmental Research*, **234**, Article ID: 116524. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116524>
 - [16] Tan, Y., Han, M. and Ke, R. (2020) Degradation Mechanism of Sludge Organic Matter Treated in Alkaline/Acidic Solution and Its Effect on Long-Term Strength. *Marine Georesources & Geotechnology*, **39**, 756-764. <https://doi.org/10.1080/1064119x.2020.1750514>
 - [17] Zhao, N., Zhao, C., Lv, Y., Zhang, W., Du, Y., Hao, Z., *et al.* (2017) Adsorption and Coadsorption Mechanisms of Cr(VI) and Organic Contaminants on H₃PO₄ Treated Biochar. *Chemosphere*, **186**, 422-429. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.016>
 - [18] Li, C., Li, T., Cui, Q., Wang, T., Wang, C., Yang, J., *et al.* (2025) Ion Exchange: An Essential Piece in the Fabrication of Zeolite Adsorbents. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **27**, 15819-15834. <https://doi.org/10.1039/d5cp00894h>
 - [19] Park, J., Wang, J.J., Kim, S., Cho, J., Kang, S., Delaune, R.D., *et al.* (2017) Recycling of Rice Straw through Pyrolysis and Its Adsorption Behaviors for Cu and Zn Ions in Aqueous Solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **533**, 330-337. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.08.041>
 - [20] Sousa, A.F.D., Braga, T.P., Gomes, E.C.C., Valentini, A. and Longhinotti, E. (2012) Adsorption of Phosphate Using Mesoporous Spheres Containing Iron and Aluminum Oxide. *Chemical Engineering Journal*, **210**, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.080>

- [21] Lu, S. and Zong, Y. (2018) Pore Structure and Environmental Serves of Biochars Derived from Different Feedstocks and Pyrolysis Conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 30401-30409.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3018-7>