

碱改性钢渣除磷滤柱对模拟农村生活污水的除磷效能

王熙瑶^{1,2}, 田梓扬^{1,2}, 王欢^{1,2}, 王海燕^{1,2*}, 常洋^{1,2}, 凌宇^{1,2}, 张艳杰^{1,2}, 王林洁^{1,2}, 吴佳丽^{1,2}

1. 环境基准标准与风险管控全国重点实验室, 中国环境科学研究院

2. 中国环境科学研究院环境污染控制工程技术研究中心

摘要 针对废弃钢渣亟待资源化及农村生活污水处理过程中除磷药剂成本与管控精度要求高的问题, 以废弃钢渣为原料, 优化制备了碱改性钢渣除磷复合填料, 通过扫描电子显微镜、X 射线衍射和傅里叶变换红外光谱对填料表面特性进行表征; 构建了碱改性钢渣填料小试滤柱, 用于农村生活污水生物处理单元出水的除磷, 重点研究了水力停留时间 (HRT) 与填料粒径对磷去除效能的影响, 并对其工程应用的经济性进行了评估。结果表明, 1) 碱改性形成的粗糙多孔结构可缩短磷酸根离子的扩散路径并提高活性位点可及性, 磷到达填料表面后主要通过配体交换和局部化学沉淀实现固定, 且吸附过程中填料晶体结构保持稳定。2) 小粒径填料具有更大的比表面积与更高的活性位点密度, 随着填料粒径由 15~20 mm 减小至 3~5 mm, 总磷 (TP) 去除率逐渐提高, 其中 3~5 mm 粒径填料的 TP 去除率最高 (>80%); 综合考虑细颗粒填料的堵塞风险、机械强度及除磷效率, 推荐采用 5~10 mm 填料, 其 TP 去除率为 57.5%。3) 采用 5~10 mm 填料, HRT 由 0.5 h 延长至 5.0 h 时, TP 去除率由 7.5% 提高至 99.0%; HRT 为 2.5 h 时, TP 去除率为 68.0%, 出水 TP 浓度稳定低于 0.30 mg/L, 满足河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020) 一级标准 (0.5 mg/L)。4) 碱改性钢渣除磷复合填料的实验室制备成本约 7.67 元/kg, 规模化生产后成本有望进一步降低, 兼具“以废治废”的循环经济优势, 具备工程应用潜力。

关键词: 碱改性钢渣复合填料; 除磷滤柱; 吸附性能; 水力停留时间 (HRT); 农村生活污水

中图分类号: X703 文章编号: 1674-991X(2026)05-0-0 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20260166

Phosphorus removal performance of an alkali-modified steel-slag filter column for treating simulated rural domestic wastewater

WANG Xiyao^{1,2}, TIAN Ziyang^{1,2}, WANG Huan^{1,2}, WANG Haiyan^{1,2*}, CHANG Yang^{1,2}, LING Yu^{1,2}, ZHANG Yanjie^{1,2}, WANG Linjie^{1,2}, WU Jiali^{1,2}

1.State Key Laboratory of Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.Research Center of Environmental Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

*收稿日期: 2026-03-11

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (52170173)

作者简介: 王熙瑶 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水污染防治原理与技术研究, wangxiyao0514@163.com

*通信作者: 王海燕 (1976—), 女, 研究员, 主要从事水污染防治原理与技术研究, wanghy@craes.org.cn

★

Abstract To address the dual challenges of waste steel slag urgent resource utilization and high requirements on cost and control accuracy of phosphorus removal agents used in rural domestic wastewater treatment, the waste-to-resource strategy was adopted to develop the alkali-modified steel slag as a phosphorus removal medium. The alkali-modified steel slag composite medium was optimized *via* NaOH activation and granulation, and its surface properties were characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). A bench-scale filter column packed with the prepared medium was then applied to remove phosphorus from the effluent of a biological treatment unit. The effects of hydraulic retention time (HRT) and medium particle size on total phosphorus (TP) removal were investigated, and the economic feasibility was evaluated. The results showed that the rough and porous structure generated by alkali modification shortened the diffusion path of phosphate ions and improved the accessibility of active sites. Once transported to the medium surface, phosphate was immobilized primarily through ligand exchange and localized chemical precipitation, while the crystalline framework of the medium remained stable throughout the adsorption process. As the medium particle size decreased from 15-20 mm to 3-5 mm, the TP removal efficiency increased progressively, reaching 80.0% for the 3-5 mm medium. Considering the potential clogging risk associated with fine particles, mechanical strength, and phosphorus removal efficiency, the 5-10 mm medium was recommended for engineering application, with a TP removal efficiency of 57.5%. For the 5-10 mm medium, extending the HRT from 0.5 h to 5.0 h increased the TP removal efficiency from 7.5% to 99.0%. At an HRT of 2.5 h, the TP removal efficiency reached 68.0%, and the effluent TP concentration remained consistently below 0.30 mg/L, meeting the Class I limit of 0.5 mg/L specified in the *Discharge Standard of Rural Domestic Sewage for Hebei Province* (DB13/2171—2020). The laboratory-scale preparation cost was estimated at 7.67 yuan/kg, and the cost is expected to be further reduced after large-scale production. This medium not only has the circular economy advantage of treating waste with waste, but also exhibits great potential for engineering application.

Key words alkali-modified steel slag composite filler; phosphorus removal filter column; adsorption performance; hydraulic retention time (HRT); rural domestic sewage

水体富营养化已成为全球水环境治理的核心挑战，磷是导致淡水生态系统失衡的关键限制性营养盐之一^[1]。农村生活污水是水体磷污染的主要来源之一，其磷浓度为 2~8 mg/L，通常采用投加除磷药剂的方法进行去除，但由于农村生活污水具有分散性、水质水量波动大等特点^[2]，其未经有效控制排放后可能成为区域水体磷污染的重要来源。传统化学除磷主要依赖铝盐、铁盐等药剂投加，虽然处理效果较好，但药剂投加量需要根据进水水质及时调整，存在运行成本较高、控制精度要求高和污泥产量增加等问题，难以适应农村污水处理设施低成本、简便化运行的需求^[3-7]。

农村生活污水处理工程常采用生物法如缺氧/好氧（A/O）工艺进行处理，该类工艺对有机物和氮去除效果好^[8-9]，但生物除磷能力相对有限，经生物反应和固液分离后的最终出水总磷（TP）浓度仍可能为1~2 mg/L。生物处理最终出水达到相应排放或资源化利用要求后可直接排放或回用；当TP浓度超过相应限值时，则需增设沉淀、吸附过滤或人工湿地等深度处理单元。固定床吸附过滤工艺是将具有磷固定能力的颗粒填料装填于滤池或滤柱中，使最终出水连续流经填料层，通过表面吸附、配体交换和化学沉淀等作用进一步去除磷^[10-11]。该工艺具有构造简单、无需连续精确投加药剂及适用于低浓度磷去除等特点，可作为农村生活污水生物处理最终出水的深度除磷工艺^[12-13]。已有研究在小型生物处理设施后设置天然材料和工业副产物组成的两级吸附过滤单元，连续运行4个月后出水磷浓度低于1 mg/L，表明吸附过滤可用于小型生物处理设施的出水深度处理^[14]。

钢渣是炼钢过程的副产物，富含CaO、Fe₂O₃及SiO₂等活性组分，其表面羟基位点可通过化学沉淀与配位作用高效固定磷酸盐。针对低浓度含磷出水，Yu^[15-16]等采用35.5 kg热改性钢渣床处理生活污水，连续运行158 d后出水磷浓度才超过0.5 mg/L；针对污水处理厂尾水，钢渣强化生态砾石床对TP的去除率可达40.08%^[17]。此外，钢渣滤池用于纺织印染废水三级处理时，磷去除率可达到85%以上^[18]；钢渣复合生物滤池处理模拟工业二级出水时，TP平均去除率为55%~81%^[19]。上述研究表明，钢渣基材料可用于生活污水、污水处理厂尾水及工业二级出水的深度除磷，但现有研究主要采用生态砾石床、复合生物滤池或人工湿地。将碱改性钢渣制备为颗粒填料，并用于模拟农村生活污水A/O生物处理最终出水的固定床连续流深度除磷研究仍较少，填料粒径和HRT对除磷性能及水力运行稳定性的影响也有待进一步明确。

因此，本研究以废弃钢渣为主要原料，采用正交试验设计和造粒工艺优化制备碱改性钢渣除磷复合填料，通过SEM、XRD、FTIR、等温吸附及吸附动力学试验分析其除磷特性与作用机制；进一步将填料装填于小试固定床滤柱，用于处理模拟农村生活污水A/O生物处理最终出水，重点考察水力停留时间（HRT）和填料粒径对动态除磷性能的影响，并初步评价其工程应用经济性，以期为废弃钢渣资源化利用及农村生活污水生物处理出水的低成本深度除磷提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

主要试验材料包括：钢渣粉末（粒径<250 μm，天津某钢厂）；水泥（P.O 42.5，安徽宣城海螺水泥有限公司）；硅藻土（化学纯，上海麦克林生化科技有限公司）；海藻酸钠（化学纯，国药集团化学试剂有限公司）。

1.2 碱改性钢渣除磷填料制备

1.2.1 钢渣改性

称取 5.0 kg 钢渣粉末置于反应容器中，加入 3.0 L 浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液，于室温下静置浸渍 24 h 进行碱改性。浸渍结束后使用自来水反复洗涤所得固体，直至洗脱液的 pH 降至中性（pH 7~8）。冲洗结束后，静置使钢渣沉降。利用倾析法除去上层清水，将剩余的少量浓稠悬浊液进行抽滤。最后，将洗涤后的钢渣平铺置于阴凉通风处自然风干 3 d，待其完全干燥后研磨并过 60 目标准筛，密封收集备用。

1.2.2 填料配比预试验

依据三因素三水平正交试验设计（表 1），进行碱改性钢渣复合填料的制备与造粒。准确称取表 1 中对应质量的改性钢渣粉末、水泥及硅藻土，将其置于混合器中进行干料预混，直至混合均匀。随后，向混合粉体中加入占改性钢渣质量 20% 的海藻酸钠溶液（浓度 2%），搅拌均匀后将湿料投入滚筒造粒机（QLC400-II，滁州新冶环境工程技术有限公司）。

表 1 正交试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of the orthogonal experiment

因素	碱改性钢渣/g	水泥/g	硅藻土/g
1	50	20	5
2	70	25	10
3	90	30	15

启动滚筒造粒机，初始转速设定为 40 r/min，期间采用喷雾法逐步加入占改性钢渣质量 10% 的蒸馏水以诱导成核；随后将转速降至 15 r/min，并再次补加总量 10% 的蒸馏水，使粉体在滚动摩擦作用下逐渐团聚成球。待复合填料粒径增长至 3~5 mm 时通过筛分取出，置于室温下自然阴干 7 d，得到粒径为 3~5 mm 的碱改性钢渣复合填料，密封保存备用。将改性钢渣粉末替换为等质量的原始钢渣粉末（即未进行碱改性），其余配比及工艺参数保持不变，制得粒径 3~5 mm 的未改性钢渣复合填料，用于对照试验。

称取约 0.5 g 钢渣复合填料于 50 mL 离心管中，加入初始浓度为 50 mg/L 的磷酸二氢钾（ KH_2PO_4 ）溶液 50 mL，将其置于摇床中，转速为 130 r/min，在 28 °C 下振荡 24 h。平衡后经 0.45 μm 滤膜抽滤取样，测定 TP 浓度。以筛选优化的填料制备条件。

1.3 除磷填料吸附试验

1.3.1 等温吸附试验

称取 0.5 g 碱改性钢渣复合填料分别置于 9 个 100 mL 离心管中，加入初始浓度为 0 mg/L、2 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、40 mg/L、60 mg/L、80 mg/L、100 mg/L 的 KH_2PO_4 溶液 50 mL，将其置于摇床。

中，转速为 130 r/min，在 28 °C 下振荡 24 h。水样经 0.45 μm 滤膜抽滤后，测定 TP 浓度。以相同条件设置未改性钢渣填料的对照组。

1.3.2 吸附动力学试验

称取 5 g 碱改性钢渣复合填料于 1 000 mL 锥形瓶中。加入初始浓度为 50 mg/L、pH 为 7 的 KH_2PO_4 溶液 1000 mL。将其置于摇床中，在 28 °C 下以 130 r/min 的速度振荡。分别在震荡时间为 5 min、10 min、30 min、60 min、120 min、240 min、480 min、720 min、1 440 min 和 2 880 min 时取样，水样经 0.45 μm 滤膜抽滤后，测定 TP 浓度。以相同条件设置未改性钢渣填料的对照组。

1.4 滤柱运行参数优化试验设计

1.4.1 试验装置

为考察固定床反应器在动态连续流模式下对农村生活污水 A/O 生物处理单元出水的除磷效能，本研究设计并构建了小试固定床吸附滤柱（图 1）。吸附滤柱直径 8 cm，柱高 40 cm，滤柱自下而上依次为厚度 10 cm 的承托层、厚度 25 cm 的填料层（1000 g），承托层为 1~2 cm 粒径的石英砂，4 根滤柱填料一致。试验期间，控制进水 pH 为 7~8，反应温度维持在室温（约 20~25 °C）。以填料层几何体积计算水力停留时间，则 HRT 为 0.5、1.0、2.5 和 5.0 h 时，对应的单柱进水流量分别约为 2.51 L/h、1.26 L/h、0.50 L/h 和 0.25 L/h，单柱日处理水量分别约为 60.3 L/d、30.2 L/d、12.1 L/d 和 6.0 L/d。粒径影响试验的 HRT 统一设置为 2.5 h，对应单柱流量约为 0.50 L/h，单柱日处理水量约为 12.1 L/d。

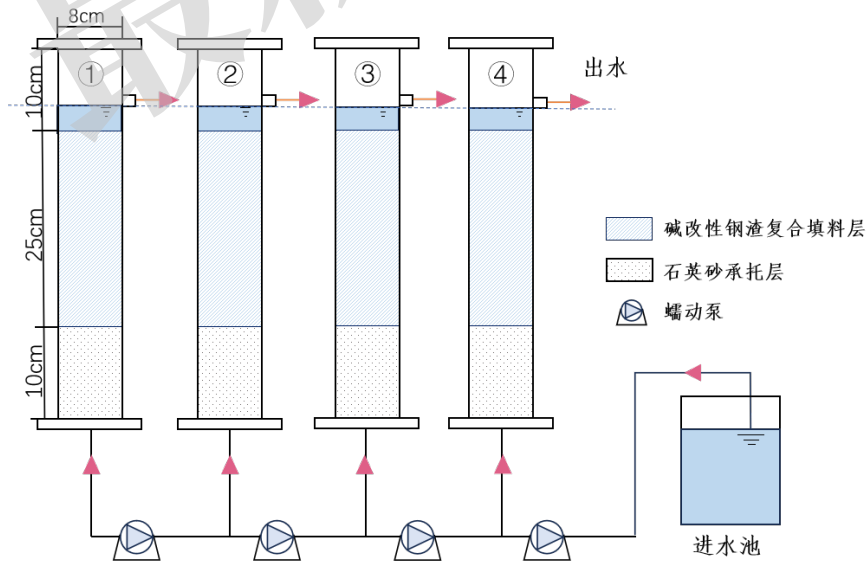


图 1 小试固定床吸附滤柱装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the filter column

1.4.2 试验设计

动态连续流柱试验共开展两组，采用单因素控制变量法分别考察水力停留时间（HRT）与填料粒径对磷动态吸附性能的影响：1)探究粒径影响时，固定 HRT 为 2.5 h，设置填料粒径分别为 15~20 mm、10~15 mm、5~10 mm 和 3~5 mm；2)探究 HRT 影响时，固定填料粒径为 5~10 mm，设置 HRT 分别为 5.0 h、2.5 h、1.0 h 和 0.5 h。其中，HRT 试验连续运行约 500 h，粒径试验连续运行约 400 h。运行期间，各滤柱出水 TP 浓度在初始阶段快速下降后均进入相对稳定的波动平台期，未出现因吸附饱和导致的持续上升穿透现象。试验期间，各滤柱均采用连续进水方式运行，并定期检查和调节进水流量，以维持设定的 HRT。每隔 12 h 在进水池和各滤柱出水口采集水样。进水水样用于监测试验期间进水 TP 浓度的变化，各滤柱出水水样用于评价不同填料粒径和 HRT 条件下的除磷效果。水样采集经抽滤后测定 TP 浓度。结合 1.3 节吸附试验结果，评估该滤柱在动态连续流模式下的除磷性能与稳定性。

1.4.3 进水水质及出水要求

由于农村生活污水经传统 A/O 生物处理单元处理后出水 TP 浓度为 0.5~2.0 mg/L^[20]，且主要以溶解性无机磷为主，因此本试验采用 KH_2PO_4 配制模拟 A/O 生物处理单元出水作为滤柱的进水。

在优化粒径试验部分，进水中 TP 浓度为 (2.05 ± 0.08) mg/L，以模拟 TP 较高浓度情景，以便在有限的连续流运行周期内充分体现不同粒径填料的吸附潜力差异，从而筛选出最优粒径。在确定最优填料粒径条件后，优化关键工艺参数 HRT，进水中 TP 浓度为 (1.02 ± 0.13) mg/L，以模拟农村生活污水生物处理单元出水中常规 TP 浓度。进水中 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度参照河北省《农村生活污水排放标准》（DB13/2171—2020）一级标准限值模拟配置。（COD 浓度 ≤ 50 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 ≤ 5 mg/L）处理后滤柱出水 TP 浓度要满足河北省《农村生活污水排放标准》（DB13/2171—2020）一级标准（TP 浓度 ≤ 0.5 mg/L）。

1.5 填料表征方法

HRT 优化试验结束后，滤柱已连续运行 500 h，滤柱出水 TP 浓度已稳定在 0.30 mg/L 以下，且滤柱无穿透趋势，填料处于非饱和吸附状态，将 5~10 mm 的碱改性钢渣复合填料取出，于阴凉处自然干燥，进行表征分析，此时，表征结果反映的是填料在长期低负荷运行下的表面状态，而非饱和或失效状态。

扫描电子显微镜（SEM，Sigma 360，德国蔡司）：从干燥的原始及吸附后填料中，随机选取表面相对光滑、易于观察且粒径约为 10 mm 的代表性颗粒，经喷金处理后，观测其微观形貌。

X 射线衍射（XRD）分析（Ultima IV，日本理学）：将原始及吸附后的填料样品（ >100 mg）研磨成粉末，用于物相及晶体结构分析。

傅里叶变换红外光谱（FTIR）分析（iS50 FTIR，美国赛默飞世尔）：取少量上述研磨后的原始填料及吸附试验后的粉末样品（ >10 mg），与光谱纯溴化钾（KBr）按 1:100 质量比在玛瑙研钵中充分混合研

磨均匀，压制成透明薄片，用于官能团及化学键分析。

2 结果与讨论

2.1 碱改性钢渣复合除磷填料制备及优选

由表 2 的极差分析结果可知，各因素对碱改性钢渣复合填料除磷吸附量的影响程度（极差 R 值）依次为： $R_A(1.38)>R_B(0.88)>R_C(0.67)$ 。这表明，碱改性钢渣的掺加用量（因素 A）是影响吸附性能的最显著因素，其次为水泥用量（因素 B），硅藻土用量（因素 C）的影响相对较小。

表 2 正交试验结果
Table 2 Orthogonal experiment results

试验号	碱改性钢渣 (A)	水泥 (B)	硅藻土 (C)	空白列 (D)	吸附量/(mg/g)
1	1	1	1	1	2.34
2	1	2	2	2	2.60
3	1	3	3	3	3.19
4	2	1	2	3	3.03
5	2	2	3	1	3.01
6	2	3	1	2	3.10
7	3	1	3	2	2.70
8	3	2	1	3	2.43
9	3	3	2	1	2.63
I	8.13	8.07	7.98		
II	9.14	8.04	8.40		
III	7.76	8.92	8.65		
极差	1.38	0.88	0.67		

进一步分析各因素的均值 k ，可确定各因素的最优水平：A 因素中 k_2 最大（70 g），B 因素中 k_3 最大（30g），C 因素中 k_3 最大（15g）。因此，仅从极差分析角度推断，理论上的最优制备工艺组合为 $A_2B_3C_3$ 。

为进一步验证极差分析结论的可靠性，利用 SPSS 26.0 进行主体间效应检验（表 3）。结果显示，因素 A 的 F 值（4.451），明显高于因素 B（2.178）和 C（2.359）。尽管各因素均未表现出统计学上的显著性差异（ $p>0.05$ ），可能受限于正交试验的样本量及误差自由度（ $df=2$ ），但 F 值的大小趋势与极差分析结果基本一致，再次确认了碱改性钢渣掺加量是主控因素。

出现上述结果的原因在于：碱改性钢渣作为主要的活性组分，其含有的 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等活性位点直接决定了对磷酸盐的化学沉淀与吸附能力^[21]，因此其掺加量对吸附容量最为敏感。水泥主要作为黏结剂^[22]提供机械强度，而硅藻土主要起到调节孔隙结构的作用，二者作为辅料，在一定范围内变化时对总吸附量的贡献相对有限。

表 3 方差分析
Table 3 Analysis of variance

影响因素	平方和 (SS)	自由度 (df)	均方 (MS)	F	显著性
A (钢渣配比)	0.340	2	0.170	4.451	0.183
B (水泥配比)	0.166	2	0.083	2.178	0.315
C (硅藻土配比)	0.180	2	0.090	2.359	0.298
误差	0.076	2	0.038	-	-
修正后总计	0.763	8	-	-	-

注: $R^2=0.900$ (调整后 $R^2=0.600$)。

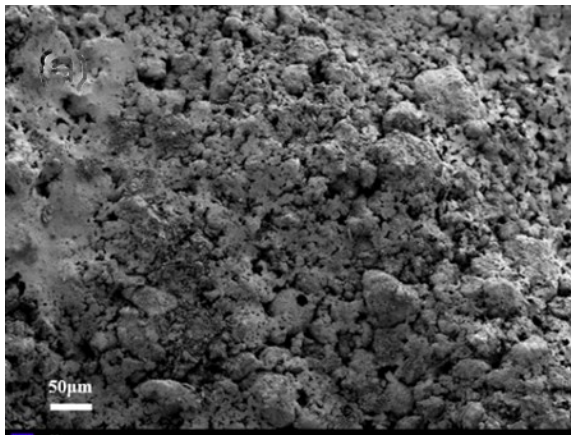
综上, 选定后续填料制备方案为 $A_2B_3C_3$, 即碱改性钢渣:水泥:硅藻土=70:30:15。归一化处理后, 各组分质量分数分别为: 碱改性钢渣 60.9%, 水泥 26.1%, 硅藻土 13.0%。后续试验均基于此配比制备的填料进行。

2.2 填料特性表征

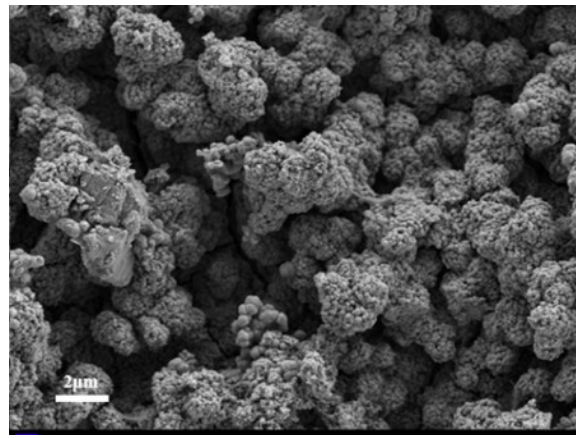
2.2.1 SEM 结果分析

碱改性钢渣填料磷吸附前后表面形态具有明显的共性特征, 其表面均呈现出粗糙的质感, 并且分布着众多不规则的孔隙 (图 2), 这些孔隙的存在以及粗糙的表面结构极大地增加了填料的吸附比表面积, 为磷的吸附提供了丰富的物理吸附位点^[23]。

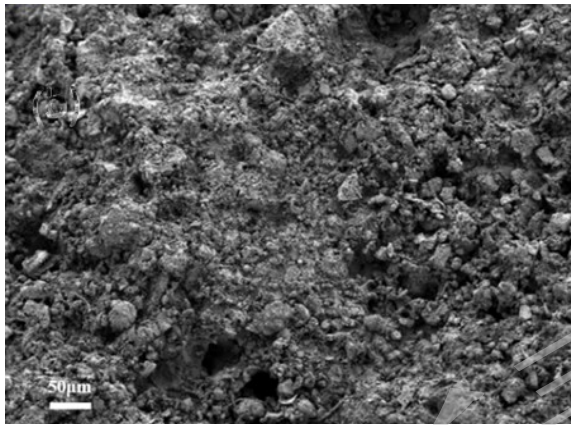
磷吸附前填料表面的孔隙大小不一, 形态各异, 从微观尺度上呈现出复杂的三维结构 (图 2 (a) (b))。对比钢渣陶粒^[16]烧结形成的均匀球形孔隙 (孔隙率 60%), 本填料的不规则孔隙可提升磷捕获效率。这种结构有利于在吸附过程中捕捉水中的磷物质, 使得磷分子能够在孔隙中发生物理吸附或与表面的活性位点发生化学反应。而吸附后填料表面形态基本保持不变, 尽管经过了吸附磷的过程, 仍然维持着粗糙和多孔的特性 (图 2 (c) (d))。与 MgO 改性生物炭^[24]吸附后出现 $Mg_3(PO_4)_2$ 片状沉淀覆盖相比, 本填料表面化学吸附未显著改变物理结构。这表明填料在吸附磷的过程中, 其表面结构具有良好的稳定性, 能够持续有效地提供吸附位点, 保证了除磷过程的稳定性和可持续性。



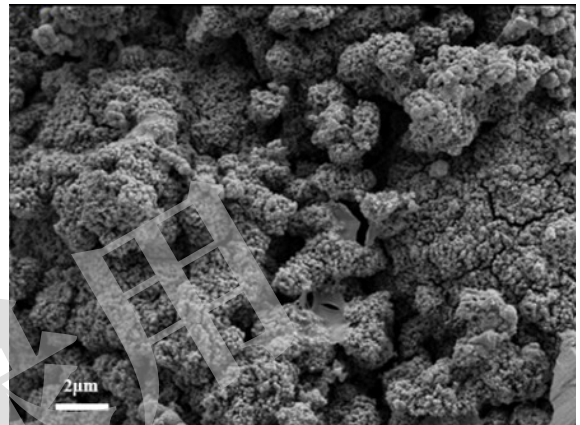
(a) 吸附前 ($\times 160$)



(b) 吸附前 ($\times 5\,000$)



(c) 吸附后 ($\times 160$)



(d) 吸附后 ($\times 5\,000$)

图2 碱改性钢渣复合填料 SEM 图

Fig. 2 SEM images of the alkali-modified steel slag composite fillers

综上，通过 SEM 分析可知，碱改性钢渣复合填料表面粗糙且多孔的特性是其具备良好除磷性能的重要物理基础，这一特性在吸附前后的稳定性也为其在实际污水处理中的长期应用提供了有力支持，为进一步优化填料性能和开发高效除磷工艺提供了参考依据。

2.2.2 XRD 分析

为深入探究吸附过程对碱改性钢渣复合填料微观晶体结构的影响，对吸附前后的改性填料进行了 XRD 表征。由图 3 (a) 可知，碱改性钢渣复合填料吸附后的 XRD 图谱与吸附前基本保持一致。各主要特征衍射峰的峰型尖锐、基线平稳，且峰位 (2θ) 未发生显著偏移，表明填料的主体晶相结构在吸附过程中保持了高度稳定性，未发生明显的相变或骨架坍塌。

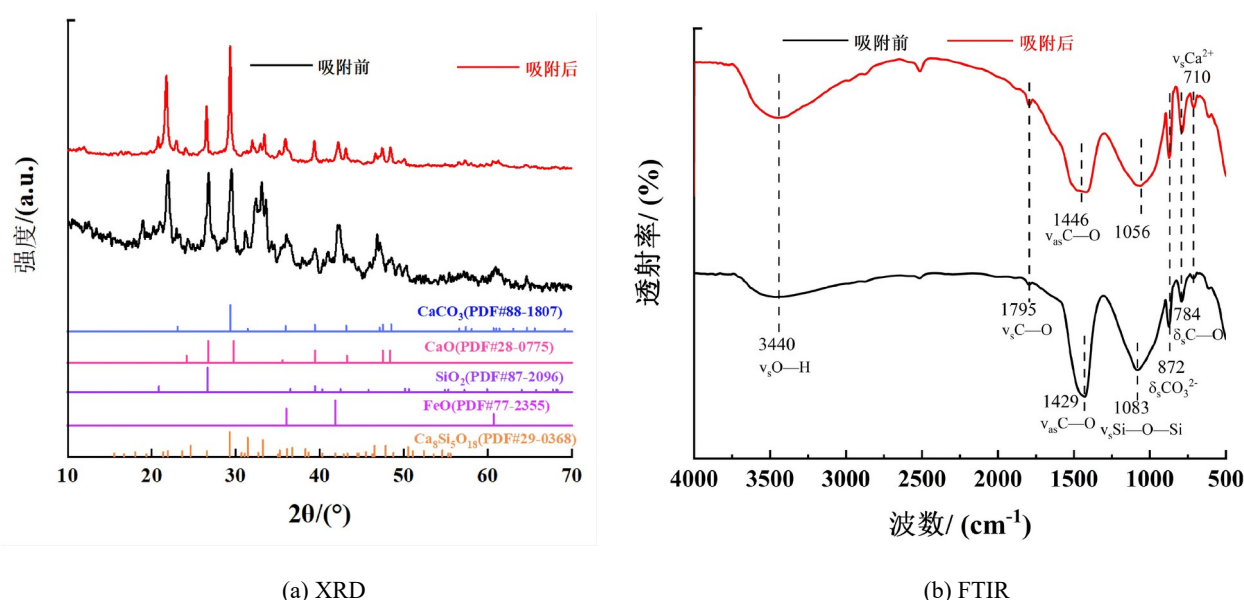


图3 磷吸附前后碱改性钢渣复合填料的XRD与FTIR图谱

Fig. 3 XRD patterns and FTIR spectra of the alkali-modified steel slag composite filler before and after phosphorus adsorption

此外，谱图中未检测到明显的新生含磷结晶产物（如 CaCO_3 或 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ）等衍射峰。这表明在当前的吸附负荷下，填料表面的除磷产物可能主要以无定形态存在^[25]，或其表面负载量尚未达到XRD技术的检测限。综上，本研究中的化学固定主要以表面配体交换形式进行，而非大量体相沉淀；若形成少量 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 结晶，其含量可能低于XRD检测限（<5%），故未检测到明显的含磷结晶产物衍射峰。该碱改性钢渣复合填料具有优异的结构稳定性，吸附过程未破坏其原始晶体骨架，这为其在实际废水处理中的长期稳定运行提供了有力保障。

2.2.3 FTIR 分析

由图3（b）可知，碱改性钢渣复合填料磷吸附前后的红外光谱整体趋势相似，但在一些特定波数处存在细微差异（其中， ν 、 ν_s 、 ν_{as} 和 δ 分别表示伸缩振动、对称伸缩振动、反对称伸缩振动和弯曲振动）。磷吸附前填料在 1429 cm^{-1} 处有强吸收峰，吸附后该峰位移至 1446 cm^{-1} 且强度显著减弱，这一显著变化说明了羧基（ C=O ）参与了磷的化学吸附过程，这可能源于钢渣和水泥中的氧化钙在储存、处理或使用过程中与空气中的 CO_2 反应生成了 CaCO_3 ^[26]，其结构或化学环境在吸附磷后发生了改变，从而导致红外吸收峰强度降低。 1083 cm^{-1} 处的吸收峰在吸附后移动至 1056 cm^{-1} ，且峰值强度显著降低，表明硅藻土中的 SiO_2 表面官能团可能与磷发生了相互作用^[27]，导致其红外吸收特性发生改变，进而该峰减弱。在 $2000\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ 区间内，存在一些较弱的峰，这些峰在吸附前后也有细微变化，虽然它们的强度相对较低，但这些峰可能与填料中一些复杂的化学键或官能团的组合振动相关。吸附磷后这些峰有所变化，表明这些复杂化学结构可能协同参与了磷的吸附过程。

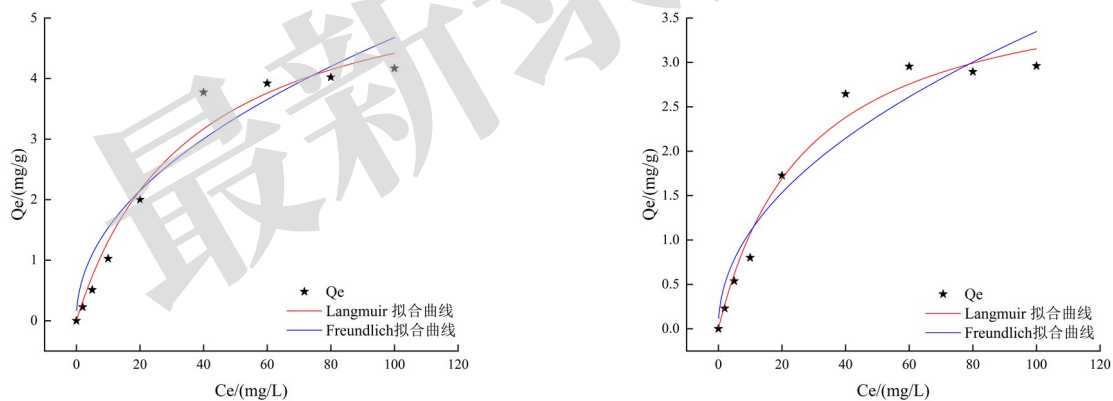
综合来看，不同波数处的波峰变化共同揭示了碱改性钢渣复合填料在吸附磷过程中的复杂化学相互

作用。整体光谱变化不大表明填料结构具有一定稳定性，而特定峰位的改变则有助于深入探究填料的除磷性能，为优化填料配方和提高除磷效率提供关键参考依据。FTIR 中碳酸根和 Si—O 相关特征峰的位移与强度变化表明，其局部化学环境在吸附后发生改变，提示相关官能团可能参与了磷酸盐的表面反应；XRD 无新峰则说明化学吸附以表面反应为主，未引起体相结晶。

2.3 等温吸附及吸附动力学分析

2.3.1 等温吸附特性

分别采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型，对改性及未改性钢渣复合填料吸附磷的试验数据进行拟合（图 4）。拟合结果表明，改性及未改性钢渣复合填料对磷的吸附行为均更符合 Langmuir 等温吸附模型，其拟合决定系数（ R^2 ）均大于 0.96，显著高于 Freundlich 模型。Langmuir 模型能够更好地描述该类吸附过程，说明磷在钢渣表面的吸附主要发生在能量分布均匀的特定活性位点上^[28]，呈现单分子层覆盖特征，这与化学吸附机制（如表面羟基配体交换或磷酸钙沉淀）相一致。相比之下，Freundlich 模型的拟合优度较低，进一步印证了在当前吸附体系中，吸附位点均匀性机理比多层异质吸附机理更具适用性。需要指出的是，Langmuir 模型描述的是吸附平衡时的位点分布与容量特征（热力学属性），并不排除吸附速率受扩散步骤控制的可能性；在后续 2.3.2 节动力学分析中进一步得到了证实。



(a) 碱改性钢渣复合填料

(b) 未改性钢渣复合填料

图 4 碱改性与未改性钢渣复合填料对磷的等温吸附模型拟合

Fig. 4 Isotherm model fits for phosphorus adsorption by alkali-modified and unmodified steel slag composite fillers

上述化学吸附的效能与钢渣的表面性质密切相关，而碱改性可有效调控其表面特性。NaOH 溶液可与钢渣中的 SiO_2 及 Al_2O_3 发生化学蚀刻反应（如 $\text{SiO}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{SiO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ ），溶解部分硅铝酸盐网络，致使原致密表面形成微孔与裂隙结构，从而显著增大比表面积及总孔容，为磷酸根离子提供更多物理吸附位点^[29-30]。同时，碱处理促进了钢渣中 CaO 、 Fe_2O_3 等活性组分的暴露，并诱导表面金属羟基（ $\text{M}-\text{OH}$ ）密度升高。在中性至弱碱性条件下，这些羟基基团可通过配体交换作用与 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 形成内层络合物；同时，溶出的 Ca^{2+} 可进一步诱导磷酸钙沉淀（如 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 或羟基磷灰石）的生成。OH⁻ 的侵入促使钢渣

表面发生羟基化，增加了活性化学基团的数量，为其后续在填料应用中的物理吸附与化学固定提供了理论基础^[31]。

本研究通过等温吸附模型拟合，明确了钢渣基填料对磷的吸附机制与改性效应，为其在实际水处理中作为经济高效吸附材料的开发与应用提供了理论支撑。

2.3.2 吸附动力学特性

为探究改性及未改性钢渣复合填料对磷的吸附动力学行为，采用准一级和准二级动力学模型对吸附试验数据进行拟合（图 5），两种填料对磷的吸附行为均更符合准一级动力学模型，其拟合决定系数（ R^2 ）均大于 0.99，拟合效果显著优于准二级动力学模型；此外，准一级模型计算得到的平衡吸附量（碱改性钢渣复合填料为 3.98 mg/g，未改性钢渣复合填料为 2.87 mg/g）与实测值（碱改性钢渣复合填料为 4.16 mg/g，未改性钢渣复合填料为 2.96 mg/g）更为接近，平均相对误差低于 5%，进一步表明该模型能够较好地模拟磷在钢渣复合填料表面的吸附过程。

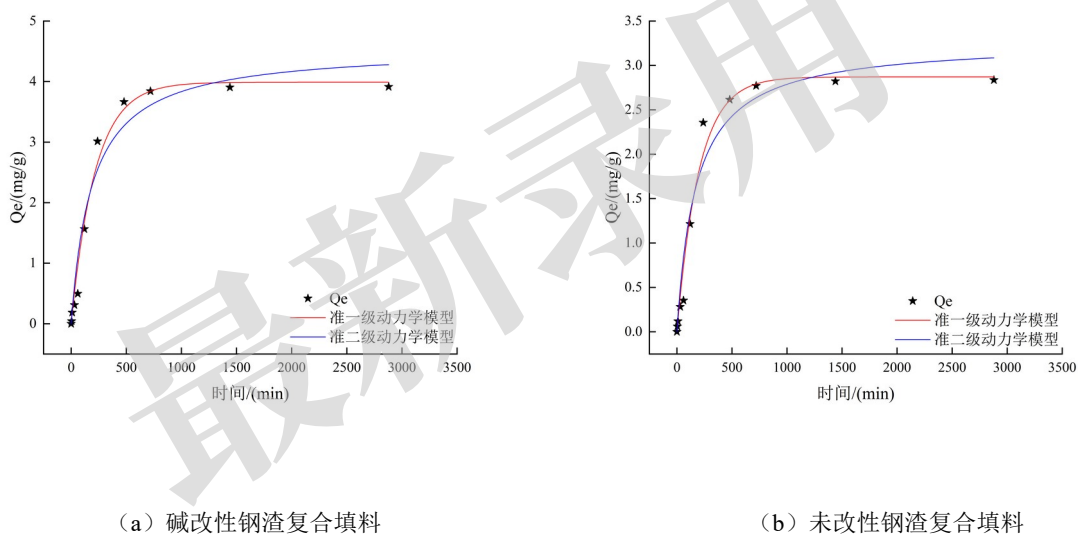


图 5 碱改性与未改性钢渣复合填料对磷的吸附动力学模型拟合

Fig. 5 Kinetic model fits for phosphorus adsorption by alkali-modified and unmodified steel slag composite fillers

准一级动力学的优势拟合主要反映了吸附初期磷酸根离子向填料表面活性位点扩散的高效性，以及填料丰富的孔隙结构所提供的低能垒扩散路径。从动力学视角分析，碱改性对吸附速率的提升机制同样体现为物理结构与表面化学的耦合效应。准一级动力学模型对改性填料的高拟合（ $R^2>0.99$ ）表明，吸附速率受磷酸根离子从液相向固相表面扩散的过程控制。碱改性后，钢渣表面形成的粗糙多孔结构显著缩短了扩散路径长度，降低了传质阻力，从而加速了初始吸附阶段。与此同时，比表面积的增长与活性位点（Ca、Fe 羟基位点及可溶性 Ca^{2+} 源）的增多，使得改性填料的平衡吸附量从未改性的 2.87 mg/g 提升至 3.98 mg/g，增幅达 38.7%。值得注意的是，准一级模型描述的是物理扩散主导的速率限制步骤，而化学沉淀与配体交换仍为磷最终固定的热力学驱动力，这与 Langmuir 单层化学吸附模型互为补充。因此，

碱改性通过“物理结构重构（扩孔、增表面积）”与“表面化学活化（增羟基、促沉淀）”的协同作用实现了吸附动力学的显著强化^[29]。

综上，动力学层面的准一级动力学行为（扩散受限）与热力学层面的 Langmuir 单层吸附模型在本质上高度统一。磷在碱改性钢渣复合填料上的去除过程是一个由物理扩散引导速率、化学亲和力主导容量的协同体系^[32]。准一级模型揭示了溶质分子向吸附位点传递过程中的动力学瓶颈；与之相对应的 Langmuir 模型则定量的描述了离子与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等组分通过配位或沉淀作用形成化学键合的平衡状态。本研究表明，碱改性可显著增强钢渣的磷吸附性能，为其作为高效磷吸附材料应用于磷污染防治应用提供了理论基础与依据。

综合填料特性表征、等温吸附、动力学结果，本研究的除磷过程可概括为：物理扩散引导磷酸根快速到达活性位点，表面配体交换与局部化学沉淀将其固定。

2.4 填料粒径和 HRT 对滤柱除磷性能的影响

2.4.1 填料粒径对滤柱除磷效果的影响

不同粒径碱改性钢渣复合填料滤柱的动态除磷性能见图 6。可见在 HRT 为 2.5 h 条件下，不同粒径填料滤柱对农村生活污水生物单元模拟出水的除磷性能存在差异，随着填料粒径从 15~20 mm 减至 3~5 mm，总磷去除率呈显著上升趋势，填料粒径与磷去除效率呈显著负相关。这一现象与 Liu 等^[33]在研究废弃混凝土粉末除磷时的发现高度一致，细颗粒往往拥有更大的比表面积，且能够暴露更多的钙、铁等活性组分，从而增加了磷酸根离子与吸附位点的接触几率。

然而，在实际工程应用中，单纯追求高吸附量的细颗粒并非最优选择。Vohla 等^[34]在人工湿地填料的综述中指出，虽然细颗粒基质（<4 mm）除磷潜力巨大，但其极易导致滤层水力传导性下降，引发严重的堵塞^[35]与地表径流问题。相比之下，中大粒径填料虽然牺牲了部分吸附容量，却能保障系统的长效水力运行^[36]。因此，综合权衡“活性位点暴露量”与“工程水力稳定性”，本研究推荐 5~10 mm 作为改性钢渣复合填料的工程应用粒径，这一选择在保留较高去除率（>57.5%）的同时，有效规避了潜在的工程堵塞风险。

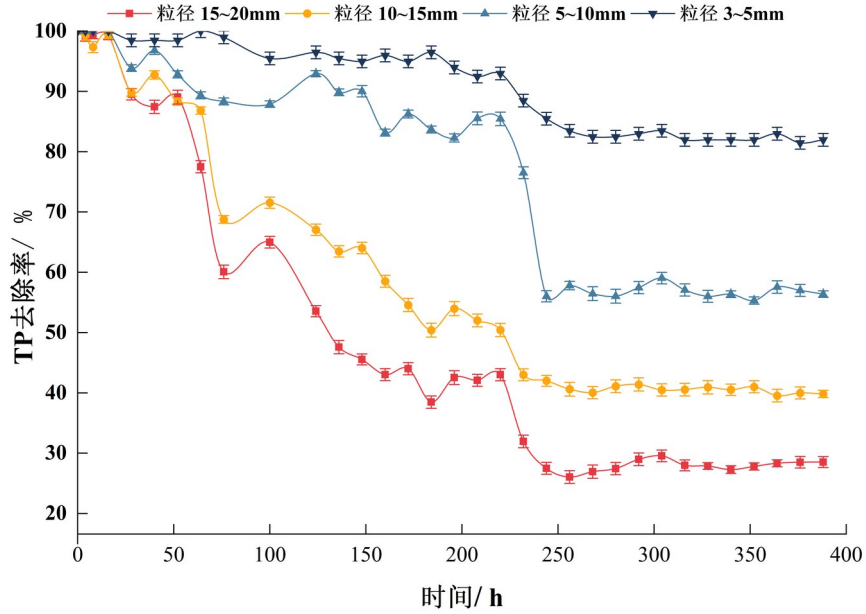


图6 不同粒径碱改性钢渣复合填料滤柱的TP去除率变化

Fig. 6 Variation in TP removal efficiency of filter columns packed with alkali-modified steel slag composite fillers of different particle sizes

2.4.2 HRT 对填料除磷效果的影响

碱改性钢渣复合填料粒径为 5~10 mm 条件下, 不同 HRT 显著影响填料对磷酸盐的动态吸附性能 (图 7)。当 HRT 为 0.5 h 时, 初始出水 TP 浓度达 0.90 mg/L, 经 48 h 运行后稳定在 0.89 mg/L, 对应 TP 去除率仅为 7.5%, 表明过短的 HRT 导致吸附反应未充分进行。增大 HRT 至 1.0 h 后, 出水 TP 浓度下降至 0.82 mg/L, 去除率提升至 17.0%, 反映出吸附动力学与传质效率的改善。进一步延长 HRT 至 2.5 h 时, 出水 TP 浓度呈现持续降低趋势, 稳定后达 0.30 mg/L, 对应去除率为 68.0%, 满足河北省《农村生活污水排放标准》(DB13/2171—2020) 一级排放标准 (≤ 0.5 mg/L)。当 HRT 增至 5.0 h 时, 出水 TP 浓度降至 0.01 mg/L, 去除率高达 99.0%, 表明延长 HRT 可显著增强填料对磷的化学沉淀与表面配位作用。此现象与何敏贞等^[24]在动态柱试验中观察到的规律一致: 当流量从 6.0 mL/min 降至 1.5 mL/min (HRT 延长 4 倍) 时, 海水改性生物炭的穿透时间从 144 min 显著延长至 1112 min (增幅 672%), 证实 HRT 增大可通过降低水力剪切力、延长吸附质在填料界面的有效接触时间, 进而强化内扩散传质效率。需要指出的是, 不同 HRT 条件下的滤柱处理流量和累计磷负荷并不相同。在相同运行时间内, HRT 为 5.0 h 的滤柱处理水量及累计进磷负荷低于其他滤柱, 因此, 其长期维持较高去除率并不意味着累计吸附量最大。各滤柱运行期间均未出现出水 TP 浓度持续升高并接近进水浓度的典型穿透现象, 表明本试验周期内填料尚未达到吸附饱和。0.5 h、1.0 h 和 2.5 h 滤柱后期形成的不同去除率平台, 主要反映了不同水力负荷和接触时间条件下

传质与吸附反应达到的动态平衡状态^[37]。

然而，尽管 HRT 为 5.0 h 时去除效能最优，但其单位处理能耗与时间成本大幅增加。基于经济性与技术可行性综合考虑，本研究推荐 2.5 h 为最佳 HRT，其出水 TP 浓度能稳定达标且运行效率较优，为后续工程化应用提供了理论依据。

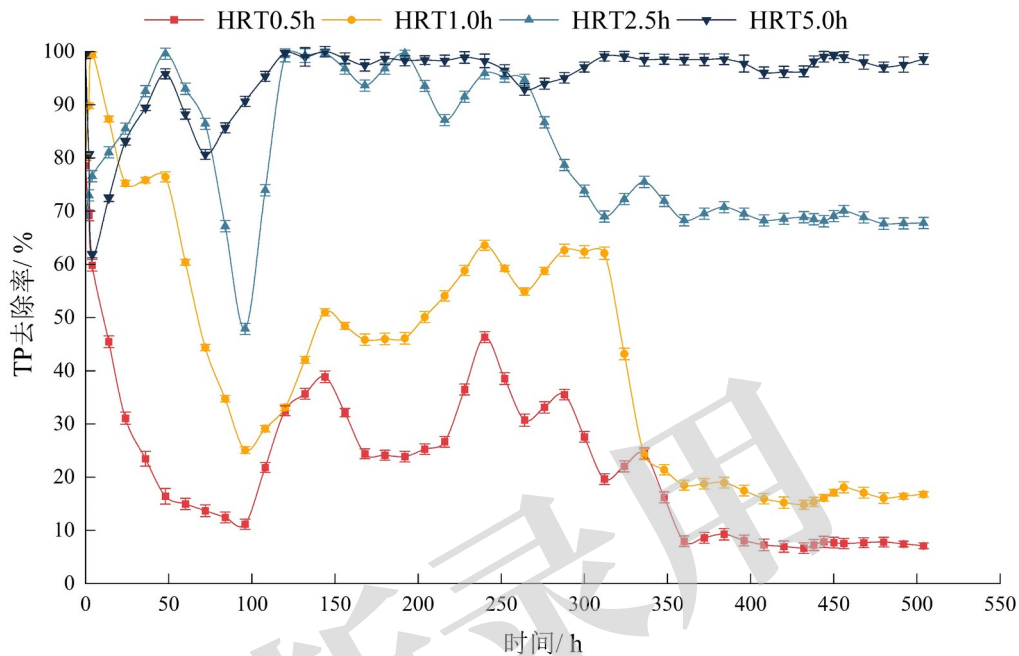


图7 不同HRT下碱改性钢渣复合填料滤柱的TP去除率变化

Fig. 7 Variation in TP removal efficiency of filter columns packed with alkali-modified steel slag composite fillers at different HRTs

2.5 应用可行性与经济性分析

在粒径为 5~10 mm、HRT 为 2.5 h 的条件下，滤柱连续运行 500 h 后仍未出现明显穿透，表明填料尚未达到动态吸附饱和。动力学模型拟合得到的 3.98 mg/g 为平衡吸附量，并非最大吸附容量。为初步预测工程寿命，假设动态有效吸附容量为该平衡吸附量的 20%~50%，则动态有效容量约为 0.80~1.99 mg/g。按单柱装填 1 000 kg 填料、日处理 10 m³ 模拟农村生活污水生物处理出水、进水 TP 浓度 0.8 mg/L、出水 TP 控制为 0.5 mg/L 计算，年去除 TP 约 1.095 kg，单柱理论运行周期约为 0.73~1.82 年。该结果为情景预测，实际寿命仍需通过长期穿透试验验证。

以制备 1 kg 干基填料为核算基准，钢渣、水泥、硅藻土和海藻酸钠的消耗量分别为 0.609、0.261、0.130 和 0.0024 kg，对应原料费用分别为 0.15、0.18、5.85 和 0.79 元，合计 6.97 元；加上碱改性及造粒费用 0.50 元，填料制备成本约为 7.47 元/kg，若计入 0.20 元/kg 的滤柱填装费用，总费用为 7.67 元/kg（表 4）。规模化生产中，采用工业级原料（硅藻土 1.8~4.0 元/kg、散装水泥 0.5~0.7 元/kg）并

叠加规模效应，可显著降低材料总成本（预计 1.99~2.33 元/kg），展现出良好的工程经济性。

农村生活污水处理中常用的除磷材料价格：天然沸石约 0.5~1.0 元/kg，但其对正磷酸盐阴离子的直接吸附能力相对有限，通常需经金属盐或碱等方式改性后才能显著提高除磷性能；陶粒约 1.5~3.0 元/kg，但需高温烧结（900~1 200 °C），能耗相对较高。与常用除磷材料相比，本填料以钢渣为原料、无需高温烧结，参考 Ospina-Montoya 等^[38]以生物质废物制备 Ca-生物复合材料的经济分析思路，实验室成本虽高于市售材料，但规模化后总成本预期将有大幅下降，同时兼具“以废治废”优势，能够进一步降低制备成本。需要说明的是，本研究采用模拟配水，未考虑实际生物单元出水中悬浮微生物对滤柱填料堵塞及吸附容量的影响，这在工程推广时需进一步验证。

表 4 碱改性钢渣复合填料实验室制备成本核算

Table 4 Cost estimation for the alkali-modified steel slag composite filler prepared in the laboratory			
成本项	单价/（元/kg）	单位填料原料消耗量/（kg/kg）	单位填料成本/（元/kg）
钢渣	0.24	0.6090	0.15
水泥	0.7	0.2610	0.18
硅藻土	45	0.1300	5.85
海藻酸钠	324	0.0024	0.79
碱改性及颗粒制备	-	-	0.50
填装施工成本	-	-	0.20
合计	-	-	7.67

3 结论

（1）碱改性钢渣复合除磷填料的最优制备配方：钢渣、水泥与硅藻土的质量比为 70:30:15（即质量分数 60.9%:26.1%:13.0%），并以 2%海藻酸钠为黏结剂。该配比下制备的填料在保证机械强度的同时，具有最佳的孔隙结构与除磷性能。

（2）SEM、XRD 及 FTIR 表征表明，碱改性钢渣复合除磷填料表面的粗糙多孔结构及稳定的晶体框架（XRD 峰位无偏移）为磷吸附提供物理位点与化学活性界面。改性引入的 CaO 等活性组分通过表面化学沉淀实现磷的固定，同时 FTIR 监测到 1 429 cm⁻¹ 及 1 083 cm⁻¹ 处特征峰的显著位移，揭示了碳酸盐基团 C=O 及硅氧官能团—Si—O—通过配位交换作用参与了磷酸盐的化学吸附过程。

（3）采用碱改性钢渣复合除磷填料填充的滤柱处理农村生活污水生物处理单元出水，填料粒径减小（从 15~20 mm 减至 3~5 mm）可提升 TP 去除率至 80.0%，考虑粒径太小时易引发堵塞，推荐采用 5~10 mm 粒径，其 TP 去除率（57.5%）与抗压强度平衡能够保障系统长期稳定性。HRT 增加能提升 TP 的去除效率，HRT 从 0.5 h 增至 5.0 h 时，TP 去除率由 7.5%提升至 99.0%。HRT 为 2.5 h 时出水 TP 浓度稳定低于 0.30 mg/L（去除率 68%），满足河北省《农村生活污水排放标准》（DB13/2171—2020）一级排放标准（≤0.5 mg/L）。考虑经济性，推荐最佳 HRT 为 2.5 h。

(4) 成本核算显示, 碱改性钢渣复合填料的实验室制备成本约 7.67 元/kg, 主要受分析纯等试剂成本影响。采用工业级原料替代并规模化生产后, 总成本有望大幅下降。与天然沸石 (0.5~1.0 元/kg, 除磷率 10%~20%) 和陶粒 (1.5~3.0 元/kg, 需高温烧结) 等常用除磷材料相比, 本填料以固废钢渣为原料、免烧成型, 兼具“以废治废”优势, 具有良好的工程推广潜力。

参考文献

- [1] SCHINDLER D W,CARPENTER S R,CHAPRA S C,et al.Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success[J].Environmental Science & Technology,2016,50(17):8923-8929.
- [2] LI P Y,ZHENG T L,LI L,et al.An appropriate technique for treating rural wastewater by a flow step feed system driven by wind-solar hybrid power[J].Environmental Research,2020,187:109651.
- [3] ZHANG J,JIANG Y G,ZHANG H Y,et al.A critical review of characteristics of domestic wastewater and key treatment techniques in Chinese villages[J].Science of the Total Environment,2024,927:172155.
- [4] SUN H J,LIU Z H,HE C X,et al.Rural domestic sewage treatment and CO₂ flux from the perspective of landscape design[J].Ecological Engineering,2026,225:107906.
- [5] SUN Y,GU Y P,XIAO S Y.Adsorption behaviors and mechanisms of Al-Fe dual-decorated biochar adsorbent for phosphate removal from rural wastewater[J].Journal of Dispersion Science and Technology,2023,44(13):2520-2531.
- [6] WU L Y,LI P,WANG G D,et al.High-efficiency nitrogen and phosphorus removal for low C/N rural wastewater using a full-scale multi-stage A2O biofilm reactor combined with horizontal-vertical flow constructed wetlands system[J].Journal of Environmental Management,2025,380:125023.
- [7] BO Y,WEN W.Treatment and technology of domestic sewage for improvement of rural environment in China[J].Journal of King Saud University - Science,2022,34(7):102181.
- [8] CHENG S Y,LIU J D,LIU H J,et al.Performance and bacterial community analysis of multi-stage A/O biofilm system for nitrogen removal of rural domestic sewage[J].Journal of Water Process Engineering,2023,56:104485.
- [9] ZHENG T L,XIONG R,LI W K,et al.An enhanced rural anoxic/oxic biological contact oxidation process with air-lift reflux technique to strengthen total nitrogen removal and reduce sludge generation[J].Journal of Cleaner Production,2022,348:131371.
- [10] GENZ A,KORN MÜLLER A,JEKEL M.Advanced phosphorus removal from membrane filtrates by adsorption on activated aluminium oxide and granulated ferric hydroxide[J].Water Research,2004,38(16):3523-3530.
- [11] NILSSON C,LAKSHMANAN R,RENMAN G,et al.Efficacy of reactive mineral-based sorbents for phosphate,bacteria,nitrogen and TOC removal-Column experiment in recirculation batch mode[J].Water Research,2013,47(14):5165-5175.
- [12] PAP S,KIRK C,BREMNER B,et al.Low-cost chitosan-calcite adsorbent development for potential phosphate removal and recovery from wastewater effluent[J].Water Research,2020,173:115573.
- [13] SCOTT I S P C,PENN C J.Estimating the variability of steel slag properties and their influence in phosphorus removal ability[J].Chemosphere,2021,276:130205.
- [14] MAŽEIKIENĖ A,ŠARKO J.Additional treatment of nitrogen and phosphorus using natural materials in small-scale domestic wastewater treatment unit[J].Water,2023,15(14):2607.
- [15] YU J,LIANG W Y,WANG L,et al.Phosphate removal from domestic wastewater using thermally modified steel slag[J].Journal of Environmental Sciences,2015,31:81-88.
- [16] LIU X,YANG S,LIU S B,et al.Performance and mechanism of phosphorus removal by slag ceramsite filler[J].Process Safety and Environmental Protection,2021,148:858-866.
- [17] 田梓扬,常洋,王林洁,等.新型强化生态砾石床应用于污水厂尾水脱氮除磷效能[J].环境工程技术学报,2026,16(3):900-

TIAN Z Y, CHANG Y, WANG L J, et al. Study on the efficiency of denitrification and phosphorus removal from the effluent of wastewater treatment plants by novel enhanced ecological gravel beds[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2026, 16(3): 900-910.

[18] MOHD ARSHAD N A N, HAMDAN R, RIMIN W, et al. Aerated and unaerated steel slag filter systems as polishing unit for phosphorus removal from textile industrial effluent[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 31: 372-377.

[19] ZHANG S N, LIU F, ZHU H X, et al. Simultaneous nitrate and phosphorus removal in novel steel slag biofilters: optimization and mechanism study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119558.

[20] 郭林睿, 顾佳艳, 何国富, 等. 基于碳足迹核算的农村生活污水处理工艺比选[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(2): 454-464.

GUO L R, GU J Y, HE G F, et al. Comparison and selection of rural domestic sewage treatment processes based on carbon footprint accounting[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(2): 454-464.

[21] WU D D, LIU S X, LU Y L, et al. Recycle of Fe/Ca-rich fly ash in preparation of modified porous ceramsite for selective and efficient phosphate recovery[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 356: 129860.

[22] 沈鑫宇, 闫肖雅, 林杨, 等. 一种新型钢渣基免烧陶粒滤料的制备及其性能研究[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1525-1534.

SHEN X Y, YAN X Y, LIN Y, et al. Preparation and performance study of a new type of steel slag-based non-fired ceramsite filter media[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1525-1534.

[23] XU C L, ZHU C F, LI Y H, et al. Palygorskite-mediated simultaneous nutrient removal and antibiotic degradation from aquaculture wastewater in lab-scale constructed wetlands[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156568.

[24] 何敏贞, 张铭栋, 陈钦鹏, 等. 低成本海水改性生物炭颗粒的制备及其对水中磷的动态吸附性能[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(2): 380-389.

HE M Z, ZHANG M D, CHEN Q P, et al. Fabrication of low-cost seawater-modified biochar granule and its dynamic adsorption performance for phosphate in aqueous solution[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(2): 380-389.

[25] XUE Y J, HOU H B, ZHU S J. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption onto basic oxygen furnace slag[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2/3): 973-980.

[26] 应虹, 罗艳, 王明湖, 等. 6种矿物基填料的氨氮和磷吸附性能比较与作用机制[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(5): 1646-1654.

YING H, LUO Y, WANG M H, et al. Comparison and mechanism of ammonia nitrogen and phosphorus adsorption properties of six mineral-based fillers[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(5): 1646-1654.

[27] ZHANG Q, ZHANG Z H, SANG X S, et al. Lanthanum chloride/eggshells modified diatomite for phosphorus recovery: advanced performance and mechanisms study[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5): 114062.

[28] BARCA C, MEYER D, LIIRA M, et al. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants: removal mechanisms and performance[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 68: 214-222.

[29] SHI C H, WANG X C, ZHOU S, et al. Mechanism, application, influencing factors and environmental benefit assessment of steel slag in removing pollutants from water: a review[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 47: 102666.

[30] SHI C H, GAO M C, HUANG X Y, et al. Preparation of magnesium-modified steel slag and its adsorption performance for simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from water[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 702: 135068.

[31] 唐婧, 罗胜元. 碱浸和污泥强化对钢渣陶粒除磷效果的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2024, 45(1): 96-103.

TANG J, LUO S Y. Effect of alkali leaching and sludge strengthening on phosphorus removal of steel slag ceramics[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2024, 45(1): 96-103.

[32] TRAN H N, YOU S J, HOSSEINI-BANDEGHARAEI A, et al. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review[J]. *Water Research*, 2017, 120: 88-116.

[33] LIU D S, ZHU H Z, WU K M, et al. Understanding the effect of particle size of waste concrete powder on phosphorus removal efficiency[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117526.

- [34] VOHLA C,KÖIV M,BAVOR H J,et al.Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands:a review[J].Ecological Engineering,2011,37(1):70-89.
- [35] DELGADO-GONZÁLEZ L,PROST-BOUCLE S,TROESCH S,et al.Granulated apatite filters for phosphorous retention in treatment wetlands:experience from full-scale applications[J].Journal of Water Process Engineering,2021,40:101927.
- [36] TABATABAEFAR A,PENN C,COMEAU Y,et al.Clogging of reactive filters for phosphorus removal–A review[J].Journal of Environmental Management,2025,376:124386.
- [37] VU M T,NGUYEN L N,ABU HASAN JOHIR M,et al.Phosphorus removal from aqueous solution by steel making slag–Mechanisms and performance optimisation[J].Journal of Cleaner Production,2021,284:124753.
- [38] OSPINA-MONTOYA V,PÉREZ S,MUÑOZ-SALDAÑA J,et al.Performance of novel Ca-biocomposites produced from banana peel and eggshell for highly efficient removal and recovery of phosphate from domestic wastewater[J].Journal of Environmental Management,2024,352:120029.

最新录用