

刘海燕, 岳帅豪, 施旭洋, 等. 5 种典型生物滤池填料氮磷吸附效果及特征[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 106–112, 134.

LIU H Y, YUE S H, SHI X Y, et al. Effect and characteristics of 5 kinds typical biofilter packings on nitrogen and phosphorus adsorption[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 106–112, 134.

5 种典型生物滤池填料氮磷吸附效果及特征

刘海燕, 岳帅豪, 施旭洋, 王彦菲, 刘晒哲, 吴慧芳*

(南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816)

摘 要 【目的】 吸附填料作为生物滤池的重要组成部分, 研究其吸附特性对于生物滤池吸附填料的选择具有重要意义。【方法】 此研究选取生物滤池中具有典型代表的 5 种填料(核桃壳、火山岩、沸石、绿辉石、陶粒)进行氮磷吸附试验, 包括等温吸附试验和动力学吸附试验, 基于等温吸附拟合和动力学吸附拟合结果考察填料吸附特性, 以此探究填料吸附效果及特征。【结果】 试验结果表明, 5 种填料中沸石对氮磷吸附量分别为 0.335 7、0.004 5 mg/g, 陶粒对氮磷吸附量分别为 0.107 4、0.019 7 mg/g, 综合而言, 在 5 种典型生物滤池填料中沸石和陶粒表现出对氮磷有较优的吸附效果, 准二级动力学模型可以更准确地描述陶粒对水中氨氮和总磷(TP)的吸附过程, 陶粒和沸石吸附数据均与 Freundlich 模型有较好的符合性, 说明吸附以化学吸附为主。【结论】 文章通过对核桃壳、火山岩、沸石、绿辉石和陶粒进行吸附性能探究试验, 试验得出, 沸石和陶粒吸附性能较高, 根据吸附模型进行线性拟合, 得出沸石和陶粒吸附结果更符合 Freundlich 等温模型, 吸附动力学特征更符合准二级动力学模型, 结合扫描电镜分析(SEM)和比表面积分析(BET)表征结构最终筛选出沸石与陶粒作为优质氮磷吸附填料。

关键词 填料 氮氮 总磷(TP) 吸附特征 结构表征

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0106-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.013

Effect and Characteristics of 5 Kinds Typical Biofilter Packings on Nitrogen and Phosphorus Adsorption

LIU Haiyan, YUE Shuaihao, SHI Xuyang, WANG Yanfei, LIU Shenzhe, WU Huifang*

(College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract [Objective] As an important part of the biofilter tank, the study of its adsorption characteristics is of great significance to selection of adsorption filler of biological filter tank. [Methods] This study selects 5 typical fillers (walnut shell, volcanic rock, zeolite, omphacite and ceramicsite) with typical representatives in biofilter tank for nitrogen and phosphorus adsorption experiments, including isothermal adsorption tests and kinetic adsorption tests. Based on the result of isothermal adsorption fitting and kinetic adsorption fitting, the adsorption characteristics of fillers are investigated to explore Adsorption effect and characteristics of filler. [Results] The test result showed that the adsorption of zeolite to nitrogen and phosphorus in 5 types of fillers were 0.335 7 mg/g and 0.004 5 mg/g respectively, and the adsorption of ceramic particles to nitrogen and phosphorus were 0.107 4 mg/g and 0.019 7 mg/g respectively. Overall, in 5 typical organisms zeolite and ceramic particles in filter tank filler showed a better adsorption effect on nitrogen and phosphorus. The quasi-secondary kinetic model can more accurately describe the adsorption process of ceramic particles on ammonia nitrogen and total phosphorus (TP) in water. The adsorption data of ceramic particles and zeolite were well consistent with the Freundlich model, indicating that the adsorption was mainly chemical adsorption. [Conclusion] This paper explores the adsorption performance of walnut shell, volcanic rock, zeolite, green pyrolite and ceramic particles. The experiment shows that zeolite and ceramic particles have high adsorption performance. According to the adsorption model, the adsorption result of zeolite and ceramic particles are more in line with the Freundlich isothermal model, and the adsorption power The scientific characteristics are more in line

[收稿日期] 2024-01-10

[基金项目] 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23_0488)

[作者简介] 刘海燕(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术, E-mail: 295510633@qq.com。

[通信作者] 吴慧芳, 女, 教授, E-mail: whfkl@sina.com。

with the quasi-secondary dynamic model. Combined with scanning electron microscope (SEM) and brunner emmet teller (BET) characterization structure, zeolite and ceramic particles are finally screened out as high-quality nitrogen and phosphorus adsorption fillers.

Keywords packing ammonia nitrogen total phosphorus (TP) adsorption characteristics characterization of structure

随着经济社会持续发展^[1],环境问题日益严重,大量的氮、磷排放会导致水体富营养化,进一步危害生态环境及人类健康,引起水质污染^[2]。因此,为了保障我国的饮用水安全,对微污染水进行综合治理,有效减少水源污染已成为水环境安全^[3]研究的重点。

微污染水是指作为饮用水源水不能满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水体规定标准的水质要求,但其经过特殊处理后仍能使用的水体。微污染水的主要来源包括城市地表径流^[4]、城市污水处理厂尾水^[5]、农业径流^[6]和农村分散污水^[7]。传统的物理化学处理方法如沉淀、吸附、氧化等虽然可以有效去除部分污染物,但对于某些难以降解或转化的有害物质效果不佳,且处理过程中可能会产生二次污染。因此,寻找一种既能有效去除微污染物,又能实现资源化利用的处理技术成为了当前的研究热点。

生物滤池作为一种典型的生物处理技术,具有处理效果好、运行成本低、操作管理简单等优点,逐渐受到了研究者的关注。生物滤池通过模拟自然生态系统中的微生物共生关系,利用微生物对有机物质的降解作用,将水中的有害物质转化为无害或低毒的物质,从而实现水质的净化。在生物滤池中,微生物与填料共同构成了一个复杂的生态体系,填料

为微生物提供了附着生长的表面和栖息的空间,而微生物则通过分解有机物为填料提供营养,形成了一个相互依赖、共生共荣的关系。滤池运行的核心要素是填料的选取,填料表面微生物附着生长繁殖,从而吸附和降解污染物,因而填料的重要性显而易见^[8]。近年来,由于生物滤池可以较为全面且有效地去除各类污染物质,因此在微污染水源水处理领域填料应用有很大的研究进展^[9]。微生物的生物代谢^[10]和絮凝^[11]在填料表面得到充分发挥。因此,选取合适的填料投入生物滤池使用具有重要意义。

本研究通过填料对氮磷的等温吸附试验和动力学吸附试验,基于等温吸附拟合和动力学吸附拟合考察填料的氮磷去除特性,结合扫描电镜分析(SEM)和比表面积分析(BET)表征分析筛选出氮磷吸附性能较优的填料,为解决微污染水污染的现状和选择合适的吸附填料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验填料挑选目前生物滤池常用填料,包括天然填料和人工填料,分别是核桃壳、火山岩、沸石、绿辉石、陶粒,图1为试验填料。所用试剂如氯化铵、磷酸二氢钾等均为分析纯。试验用水为根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水配置的实验室自配水。



图1 试验填料

Fig. 1 Packings for Test

试验仪器与方法:紫外可见分光光度计(UV-5500PC)、电子天平(FA2104)、气浴恒温振荡器(SHZ-82)、烘箱(DHG-9070A)、超纯水机(PLUS-E2-10TJ)。总磷(TP)采用钼酸铵分

光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法。

1.2 试验方法

1.2.1 填料对氮磷的等温吸附

称取在100℃下干燥2h的填料各10g加入到

100 mL 质量浓度分别为 1、2、5、10、15、20 mg/L (按 N 计)的 NH_4Cl 溶液,各 10 g 加入到 100 mL 质量浓度分别为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0 mg/L (按 P 计)的 KH_2PO_4 溶液中(每组设置 3 个平行样)。将温度保持在 25 ℃、转速 125 r/min 的条件下,使用振荡器振荡 12 h。经 0.45 μm 滤头过滤后测定平衡浓度以及填料的平衡吸附量。

1.2.2 填料对氮磷的动力学吸附

在 100 ℃ 下干燥 2 h 后,取出 10 g 填料加入 250 mL 的锥形瓶中。每个瓶中分别加入 100 mL, 10 mg/L 的 NH_4Cl 溶液和 100 mL, 1 mg/L 的 KH_2PO_4 溶液(每个组有 3 个平行样本)。在温度为 25 ℃、振荡器转速为 125 r/min 的条件下,进行振荡处理。在 30、60、120、240、360、540、960 min 后,取上清液并通过 0.45 μm 过滤,测定平衡浓度以及填料的平衡吸附量。

1.3 数据分析方法

1.3.1 等温吸附模型

Langmuir 等温模型和 Freundlich 等温模型方程分别如式(1)和式(2)。

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{QK_L} + \frac{C_e}{Q} \quad (1)$$

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

其中: q_e ——平衡吸附量, mg/g;

C_e ——吸附质的平衡质量浓度, mg/L;

Q ——吸附剂的单分子层饱和吸附量, mg/g;

K_L 、 K_F ——吸附因素相关常数, mg^{-1} ;

$1/n$ ——组分因数。

1.3.2 动力学吸附模型

准一级动力学模型和准二级动力学模型如式(3)和式(4)。

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

其中: q_t —— t 时刻吸附量, mg/g;

k_1 、 k_2 ——吸附速率常数, min^{-1} 。

1.3.3 填料性能分析

扫描电镜分析(SEM):采用 Quanta250FEG 在

加速电压(20 kV)下扫描电镜拍摄 SEM 图像。

比表面积测定(BET):采用 NOVA 仪器,在液氮温度(273 K)下由 N_2 吸附法测得填料比表面积。

2 结果与讨论

2.1 填料对氮磷的等温吸附特征

根据不同氮磷溶液平衡浓度下各填料对氮磷的去除率,绘制图 2 和图 3。可知,沸石、核桃壳、陶粒、火山岩和绿辉石分别对氨氮的去除率由大至小,其中,沸石与核桃壳在去除氨氮方面显示出一定的优势。氨氮在低质量浓度为 5 mg/L 时,沸石显示出较核桃壳更优的氨氮去除率,前期试验得出核桃壳在废水中性能不稳定会释碳,综合分析得出沸石更适于处理氨氮。陶粒、火山岩、沸石、核桃壳和绿辉石分别对 TP 的去除率由大至小,可知,陶粒在去除 TP 方面存在着明显的优势,而核桃壳和绿辉石对 TP 的去除能力较差。当溶液平衡质量浓度超过 1 mg/L 时,各填料对 TP 的去除率基本持平,无明显变化。

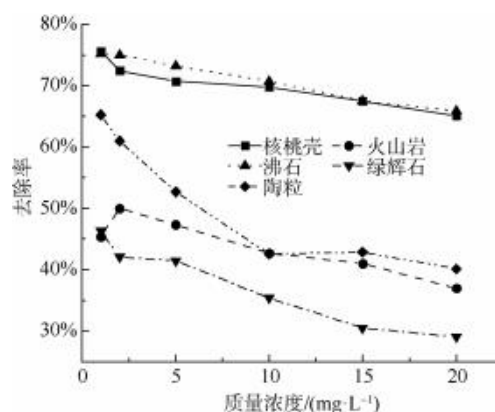


图 2 不同浓度下各填料对氨氮的去除率

Fig. 2 Ammonia Nitrogen Removal Rates of Each Packing under Different Concentrations

(1) 填料对氨氮的等温吸附

用 Langmuir 和 Freundlich 2 种等温模型拟填料对氨氮的等温吸附特性,相关拟合参数如表 1 所示。

从表 1 的吸附拟合参数可以明显看出,5 种填料在 Langmuir 方程的相关拟合参数值 (R^2) 小于 Freundlich 方程, Freundlich 方程的 R^2 值分别为 0.998 9、0.989 5、0.997 5、0.993 5、0.978 8,这说明氨氮在 5 种填料表面的吸附主要是化学吸附,这是一种多分子层的吸附过程^[12-13]。

利用 Langmuir 等温模型得到填料对氨氮的理

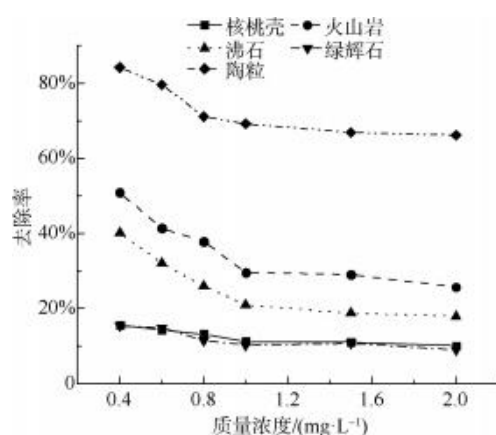


图3 不同浓度下各填料对TP的去除率

Fig. 3 Removal Rates of TP by Each Packing under Different Concentrations

表1 填料对氨氮等温吸附拟合参数

Tab. 1 Fitting Parameters of Packing for Ammonia Nitrogen Isothermal Adsorption

填料	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	b	q_m	R^2	K	n	R^2
核桃壳	0.077 8	0.367 1	0.929 0	0.025 3	1.477 5	0.998 9
火山岩	0.048 2	0.199 7	0.895 2	0.009 0	1.141 8	0.989 5
沸石	0.091 8	0.335 7	0.990 9	0.026 6	1.160 5	0.997 5
绿辉石	0.079 7	0.105 7	0.974 6	0.007 8	1.288 8	0.993 5
陶粒	0.173 8	0.107 4	0.818 9	0.016 9	1.712 6	0.978 8

注: b 是吸附因素相关常数; q_m 是吸附剂最大理论吸附量, mg/g ; K 是判断填料对污染物吸附能力的参数; n 是填料对污染物吸附强度; R^2 是方程的相关拟合参数值。

0.993 5、0.078 8, 根据线性相关系数可知: Freundlich 等温模型更适合描述 5 种填料对氨氮的吸附反应。

(2) 填料对 TP 的等温吸附

用 Langmuir 和 Freundlich 2 种等温模型拟填料对 TP 的等温吸附特性, 相关拟合参数如表 2 所示。

表2 填料对 TP 等温吸附拟合参数

Tab. 2 Fitting Parameters of Packings for TP Isothermal Adsorption

填料	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	b	q_m	R^2	K	n	R^2
核桃壳	0.474 0	0.004 2	0.890 8	0.001 3	1.446 1	0.989 3
火山岩	1.528 6	0.007 0	0.893 0	0.003 9	2.198 8	0.945 3
沸石	1.589 1	0.004 5	0.882 9	0.002 6	2.568 7	0.908 1
绿辉石	0.602 3	0.003 4	0.821 2	0.001 2	1.589 3	0.953 0
陶粒	2.285 8	0.019 7	0.800 6	0.014 6	1.808 0	0.962 7

由表 2 可知, 2 种等温模型均可较好地描述 5 种填料对 TP 的吸附行为, 其中 5 种填料 Freundlich 方程的 R^2 值均略大于 Langmuir 方程, 这说明 TP 在 5 种填料表面的吸附是多分子层的化学吸附过程^[14]。

利用 Langmuir 等温模型参数得出理论饱和吸附分别为: 陶粒 ($q_m = 0.019 7 \text{ mg/g}$) > 火山岩 ($q_m = 0.007 0 \text{ mg/g}$) > 沸石 ($q_m = 0.004 5 \text{ mg/g}$) > 核桃壳 ($q_m = 0.004 2 \text{ mg/g}$) > 绿辉石 ($q_m = 0.003 4 \text{ mg/g}$), 反映出填料对 TP 有强吸附能力。由表 2 可知, K 的

大小顺序为: 陶粒 ($K = 0.014\ 6$) > 火山岩 ($K = 0.003\ 9$) > 沸石 ($K = 0.002\ 6$) > 核桃壳 ($K = 0.001\ 3$) > 绿辉石 ($K = 0.001\ 2$)。由表 2 可知, Langmuir 和 Freundlich 等温模拟的 R^2 分别为 0.890 8、0.893 0、0.882 9、0.821 2、0.800 6 和 0.989 3、0.945 3、0.098 1、0.953 0、0.962 7, 可见 Freundlich 模型更适合描述 5 种填料对 TP 的吸附过程。

2.2 填料对氮磷的吸附动力学特征

由图 4 和图 5 可知, 填料吸附氮磷速率由快变慢, 5 种填料对氨氮的去除率最高的为沸石, 对 TP 的去除率依次为陶粒 > 火山岩 > 沸石 > 核桃壳 > 绿辉石。由图 4 可知, 氨氮在 5 种填料上的吸附过程可以分为 2 个阶段, 在吸附的最初阶段 (0~60 min), 为氨氮扩散到吸附剂表面和内部, 吸附曲线呈现上升趋势, 吸附量迅速增加的现象表明扩散过程快速进行, 吸附中后期, 填料中氨氮的吸附点位被占用, 导致吸附曲线趋于平稳, 并达到吸附平衡状态^[15]。由图 5 可知, 初期吸附曲线上升迅速, 吸附速率较快。随着吸附的进行, 在中后期吸附达到平衡。整个吸附试验过程中, 陶粒对 TP 呈现出较高的吸附能力。对于陶粒而言, 可能是其中的无定形铝、铁、钙等物质^[16-18]与磷酸根发生表面吸附并形成络合物所致^[19-20]。

(1) 填料对氨氮的动力学吸附

氨氮吸附结果和拟合相关参数如表 3 所示。

表 3 填料对氨氮动力学吸附拟合参数

Tab. 3 Fitting Parameters of Packing for Ammonia Nitrogen Kinetic Adsorption

填料	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	q_e	k_1	R^2	q_e	k_2	R^2
核桃壳	0.034 1	0.005 0	0.845 0	0.071 5	0.013 0	0.995 3
火山岩	0.014 2	0.004 9	0.839 9	0.043 6	0.031 4	0.998 8
沸石	0.023 7	0.006 6	0.821 3	0.071 6	0.037 7	0.999 6
绿辉石	0.003 2	0.003 6	0.910 7	0.035 7	0.077 6	0.999 5
陶粒	0.016 8	0.007 5	0.859 1	0.043 2	0.033 5	0.999 6

参数 q_e 、 k_1 、 k_2 和 R^2 列于表 3。由表 3 可知, 2 种动力学方程对核桃壳吸附氨氮的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2 = 0.995\ 3$) > 准一级 ($R^2 = 0.845\ 0$); 对火山岩吸附氨氮的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2 = 0.998\ 8$) > 准一级 ($R^2 = 0.839\ 9$); 对沸石吸附氨氮的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2 = 0.999\ 6$) > 准一级 ($R^2 = 0.821\ 3$); 对绿辉石吸附氨氮的 R^2 大小顺

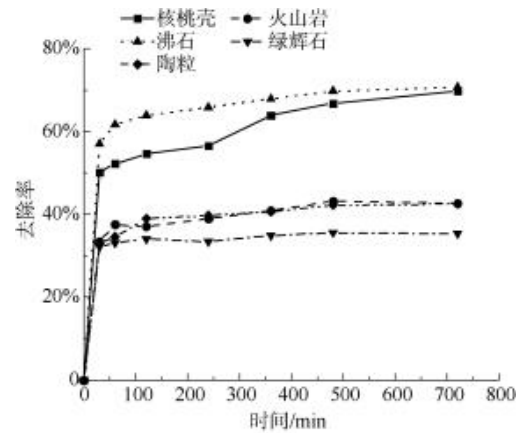


图 4 各填料对氨氮的动力学吸附

Fig. 4 Kinetic Adsorption of Ammonia Nitrogen by Each Packing

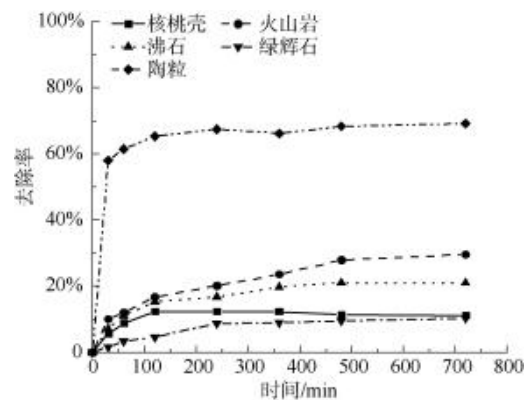


图 5 各填料对 TP 的动力学吸附

Fig. 5 Kinetic Adsorption of TP by Each Packing

序为准二级 ($R^2 = 0.999\ 5$) > 准一级 ($R^2 = 0.910\ 7$); 对陶粒吸附氨氮的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2 = 0.999\ 6$) > 准一级 ($R^2 = 0.859\ 1$)。可以看出, 2 种动力学模型对氨氮的吸附动力拟合极显著。由表 3 可知, 5 种填料对氨氮的吸附动力学特征更符合准二级动力学模型, 其 R^2 更接近 1, 且拟合得到的 q_e 与试验所得的结果基本一致, 说明化学吸附机制对这

5 种填料吸附氨氮的控制能力更强,即吸附以化学吸附为主。

(2)填料对 TP 的动力学吸附
TP 吸附结果和拟合相关参数如表 4 所示。

表 4 填料对 TP 动力学吸附拟合参数
Tab. 4 Fitting Parameters of Packing for TP Kinetic Adsorption

填料	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	q_e	k_1	R^2	q_e	k_2	R^2
核桃壳	0.000 6	0.004 1	0.804 0	0.001 2	0.081 9	0.993 6
火山岩	0.002 6	0.004 7	0.951 2	0.001 2	0.081 9	0.984 1
绿沸石	0.088 7	0.043 7	0.810 7	0.002 3	0.007 8	0.997 7
绿辉石	0.001 0	0.006 5	0.967 4	0.001 3	0.002 7	0.982 2
陶粒	0.000 9	0.005 1	0.811 2	0.008 5	0.127 3	0.999 1

由表 4 可知,2 种动力学方程对核桃壳吸附 TP 的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2=0.993\ 6$)>准一级 ($R^2=0.804\ 0$);对火山岩吸附 TP 的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2=0.984\ 1$)>准一级 ($R^2=0.951\ 2$);对沸石吸附 TP 的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2=0.997\ 7$)>准一级 ($R^2=0.810\ 7$);对绿辉石吸附 TP 的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2=0.982\ 2$)>准一级 ($R^2=0.967\ 4$);对陶粒吸附 TP 的 R^2 大小顺序为准二级 ($R^2=0.999\ 1$)>准一级 ($R^2=0.811\ 2$)。可以看出,准一级动力学模型和准二级动力学模型对填料吸附 TP 的动力学特征都能很好的进行描述,达到了极显著水平 ($R^2>0.85$)。

2.3 沸石和陶粒结构表征分析

2.3.1 SEM

用 SEM 扫描样品的晶体结构图像,结果如图 6

所示。由图 6(a)可知,沸石表面呈现许多絮状物,絮状物下分布较多孔道,为吸附氨氮提供较大的吸附通道,由此显示出较高的吸附氨氮能力,这与沸石吸附氨氮试验结果吻合。其吸附机理主要为沸石的结构单元是硅铝酸盐四面体,每个四面体由 1 个中心的硅离子和 4 个周围的氧离子组成,形成一个四面体结构,沸石中硅铝酸盐四面体之间的连接是通过共享氧离子(桥氧)实现的,桥氧的数目和分布方式会影响孔道的连通性和孔道的大小。较多的桥氧可以提供更多的吸附位点,增加沸石对氨氮吸附效果。由图 6(b)可知,电镜下陶粒表面粗糙,形状大小不同且高低凸起,这些孔隙为磷提供了大量的吸附区域和吸附位点,增强了磷与陶粒的接触机会,同时孔隙结构还提供较大的比表面积,提高了吸附 TP 效率,从而使得陶粒具有较好的 TP 吸附性能。

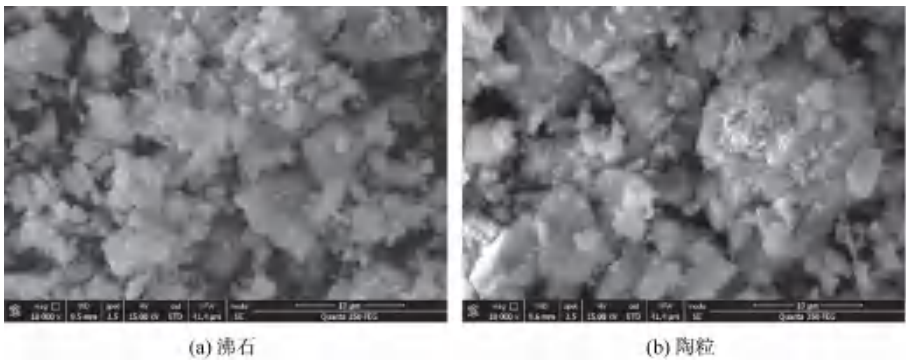


图 6 沸石和陶粒的 SEM 图
Fig. 6 SEM Images of Zeolite and Ceramsite

2.3.2 BET

根据 BET 测定结果得出,沸石的比表面积为 $31.24\text{ m}^2/\text{g}$,陶粒的比表面积为 $36.78\text{ m}^2/\text{g}$ 。较大的比表面积决定了沸石和陶粒是具有较强吸附能力

的天然材料,当沸石和陶粒具有较大的比表面积时,可以提供更多的吸附活性位点,使得氮磷污染物能够与填料表面进行相互作用,这不仅可以提高沸石和陶粒的吸附容量,还能增强沸石和陶粒的吸附效

果和吸附速率。

对沸石和陶粒分别进行比表面积分析,如图 7 和图 8 所示。根据吸脱附曲线分类,吸附等温线显示出典型的Ⅳ吸附行为并具有 H_3 型滞回线。典型特征是吸附曲线与脱吸曲线不一致,出现滞后循环。图中的等温线向右的滞后循环显示较多的中孔和大孔。孔径分布曲线在原点附表微孔。

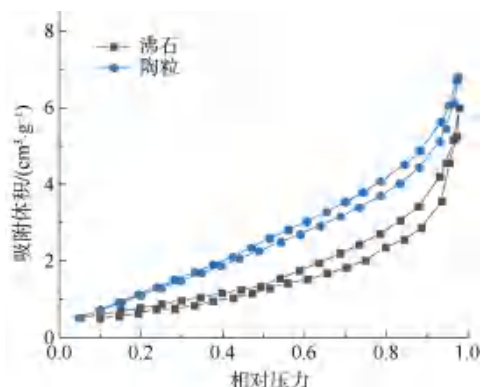
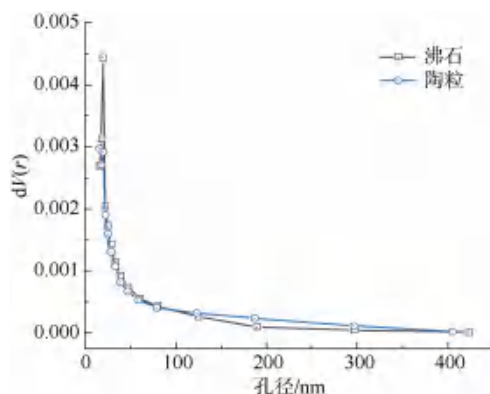


图 7 填料 N_2 等温吸附-脱附曲线

Fig. 7 Isothermal Adsorption-Desorption Curves of Packing N_2



注: r 为参数, dV 为系数。

图 8 填料孔径分布

Fig. 8 Pore Size Distribution of Packings

3 结论

(1) 本研究为更好解决微污染水污染的现状通过吸附试验得出 5 种填料对氨氮的去除率依次为沸石>核桃壳>陶粒>火山岩>绿辉石;填料对 TP 的去除率依次为陶粒>火山岩>沸石>核桃壳>绿辉石。

(2) 准二级动力学模型可以更准确地描述陶粒对水中氨氮和 TP 的吸附过程,化学吸附为主控步,准一级动力学方程在一定程度上可描述陶粒吸附 TP 的过程,说明可能含有一定的物理吸附过程。陶

粒和沸石吸附数据均与 Freundlich 模型有较好的符合性。

(3) 结构表征分析 SEM 和 BET 得出,沸石和陶粒有较大比表面积和孔隙通道,这为污染物提供更多吸附活性位点,因此沸石和陶粒较其他同种填料有更优的去除氮磷效果,为选择优质吸附填料提供理论依据。

参考文献

- [1] 李跃平,刘玉香. 我国微污染水源地污染现状及其处理技术研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(10): 42-46.
LI Y P, LIU Y X, et al. Research progress on pollution situation and treatment technology of micro-polluted water sources in China [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(10): 42-46.
- [2] 姚晨澈,何勇,刘鹤,等. 鸟粪石结晶法回收污水中氮磷的研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(15): 8-10.
YAO C C, HE Y, LIU H, et al. Research progress on nitrogen and phosphorus recovery from sewage by struvite crystallization [J]. Modern Chemical Research, 2023(15): 8-10.
- [3] XU J, XU M, ZHAO Y, et al. Spatial-temporal distribution and evolutionary characteristics of water environment sudden pollution incidents in China from 2006 to 2018 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149677. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149677.
- [4] ZHAO H, MA Y, FANG J, et al. Particle size distribution and total suspended solid concentrations in urban surface runoff [J]. Science of the Total Environment, 2022, 815: 152533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152533.
- [5] ZHANG Y, LU S, FANG Y, et al. Technology for upgrading the tailwater of municipal sewage treatment plants: The efficacy and mechanism of microbial coupling for nitrogen and carbon removal [J]. Water, 2021, 13(20): 2850. DOI: 10.3390/w13202850.
- [6] SINGH N K, SANGHVI G, YADAV M, et al. Fate of pesticides in agricultural runoff treatment systems: Occurrence, impacts and technological progress [J]. Environmental Research 2023, 237: 117100. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117100.
- [7] YANG F, ZHANG H, ZHANG X, et al. Performance analysis and evaluation of the 146 rural decentralized wastewater treatment facilities surrounding the Erhai Lake [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 128159. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128159.
- [8] 闫高俊,杨治广,庄国强,等. 生物滤池在污水深度处理中的研究进展[J]. 环境科技, 2021, 34(3): 73-78.
YAN G J, YANG Z G, ZHUANG G Q, et al. Research progress of biofilter in advanced sewage treatment [J]. Environmental Science and Technology, 2021, 34(3): 73-78.

(下转第 134 页)

- [34] GENKIN G, WAITE T D, FANE A G, et al. The effect of vibration and coagulant addition on the filtration performance of submerged hollow fibre membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 281 (1/2): 726–734. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.04.048.
- [35] 李都望, 黄有文, 管浩. 基于 RSM 法对净水厂超滤工艺运行参数的优化[J]. *给水排水*, 2019, 55(11): 18–23.
- LI D W, HUANG Y W, GUAN H. Optimization of operating parameters of flow split SMF in water treatment plant based on RSM method [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55 (11): 18–23.
- [36] 邓良. 超滤处理高藻水中膜污染特性及预处理和反冲洗优化调控研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- DENG L. Research on membrane contamination characteristics of high algal water treated by ultrafiltration and optimized regulation of pretreatment and backwashing [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [37] 白鹤, 林亚凯, 李宁宁, 等. 面向市政污水深度处理用压力式超滤膜组件的设计与运行参数优化研究[J]. *膜科学与技术*, 2021, 41(5): 146–154.
- BAI H, LIN Y K, LI N N, et al. Study on the design and optimization of operating parameters of pressure-type ultrafiltration membrane modules for advanced municipal wastewater treatment [J]. *Membrane Science and Technology*, 2021, 41(5): 146–154.
-
- (上接第 112 页)
- [9] LIU Y, WANG H C, SUN Y L, et al. Application of the sulfur-siderite composite filler: A case study of augmented performance and synergistic mechanism for low C/N wastewater treatment in constructed wetland [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146376. DOI: 10.1016/j.cej.2023.146376.
- [10] GUO D, WANG M, ZHANG J, et al. Simultaneous removal of macromolecular microbial metabolites and nitrogen in a receiving river of wastewater treatment plants lacking ecological base flow via the combination of anaerobic and aerobic biofilters [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 427: 139242. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139242.
- [11] LIU T, ZHANG X, DING G, et al. Improvement of waste sludge dewaterability by a novel co-conditioning approach with polyaluminum chloride-sludge based carbon-polyacrylamide [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125449. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125449.
- [12] CHENXI W, GANG L, YUNQIANG L, et al. Selective catalytic reduction of NO_x with CH₄ over In/SSZ-13 zeolites: The enhancement of high-temperature catalytic activity by Ce modification [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(1): 111830. DOI: 10.1016/j.jece.2023.111830.
- [13] 谢欣汝. 三种典型填料对生物滴滤池处理生活污水脱氮除磷作用的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- XIE X R. Effects of three typical fillers on nitrogen and phosphorus removal of domestic sewage treated by biological drop filter [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [14] YU G, ZHUOLIN Y, JINLING W, et al. Interpretation of the adsorption process of toxic Cd²⁺ removal by modified sweet potato residue [J]. *RSC Advances*, 2024, 14(1): 433–444.
- [15] 练建军, 谢诗婷, 吴培, 等. 微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制[J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2195–2202.
- LIAN J J, XIE S T, WU P, et al. Effect of microplastics on ammonia nitrogen adsorption by zeolite in water and its mechanism [J]. *Environmental Sciences*, 2024, 45(4): 2195–2202.
- [16] 肖其亮, 熊丽萍, 彭华, 等. 不同基质组合对氮磷吸附能力的研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(5): 1277–1287.
- XIAO Q L, XIONG L P, PENG H, et al. Study on N and P adsorption capacity of different matrix combinations [J]. *Environmental Science Research*, 2022, 35(5): 1277–1287.
- [17] 王俊钦, 赵媛媛, 陈跃辉, 等. 给水厂残泥免烧陶粒对铅、镉解吸再生性能研究[J]. *湘潭大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 69–75.
- WANG J Q, ZHAO Y Y, CHEN Y H, et al. Study on the desorption and regeneration performance of Pb and Cd by non-fired ceramicite from residual mud of water plant [J]. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(1): 69–75.
- [18] 王丽芳, 黄健平, 陈泓烨, 等. 硅藻土基多孔陶粒的制备及其对 Cu²⁺ 的吸附机制研究[J]. *河南化工*, 2023, 40(8): 12–15.
- WANG L F, HUANG J P, CHEN H Y, et al. Preparation of diatomite based porous ceramics and its adsorption mechanism of Cu²⁺ [J]. *Henan Chemical Industry*, 2023, 40(8): 12–15.
- [19] 范洪勇, 王华伟, 潘玲阳, 等. 填料对电极氨氧化型 CW-MFC 耦合系统运行性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(11): 5833–5844.
- FAN H Y, WANG H W, PAN L Y, et al. Effect of filler on the operating performance of electrode ammonification CW-MFC coupling system [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43 (11): 5833–5844.
- [20] 石文智, 江昊飞, 李慷, 等. 一种新型生物质炭填料的脱氮除磷性能[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(2): 429–440.
- SHI W Z, JIANG H F, LI K, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance of a novel biochar filler [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(2): 429–440.