

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用 .....刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析 .....任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式 .....田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO<sub>2</sub>协同效益评估 .....肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同 .....李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径 .....张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益 .....邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的多尺度驱动机制 .....张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM<sub>2.5</sub>浓度时空分布特征及影响因素分析 .....王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM<sub>2.5</sub>碳组分空间差异性来源解析 .....武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM<sub>2.5</sub>中碳质气溶胶的变化特征及来源解析 .....桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析 .....刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素特征及健康风险评估 .....杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析 .....潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析 .....罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化 .....吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源 .....卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析 .....崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价 .....张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估 .....李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算 .....丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估 .....赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估 .....高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估 .....钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析 .....马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测 .....王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例 .....代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素 .....刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应 .....张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平 .....林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制 .....廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性 .....何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析 .....傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析 .....赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP<sub>GS</sub>变化的影响 .....徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响 .....李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响 .....鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响 .....丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系 .....邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征 .....王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响 .....宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响 .....胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响 .....陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测 .....王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析 .....李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征 .....杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估 .....杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价 .....肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估 .....沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例 .....董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应 .....易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响 .....刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应 .....肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征 .....李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制 .....李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险 .....白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅志, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征 .....高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应 .....闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

## 3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性

何强<sup>1</sup>, 陈博文<sup>1</sup>, 杨雨静<sup>2</sup>, 周全<sup>3</sup>, 刘彦君<sup>3</sup>, 王志刚<sup>3</sup>, 程呈<sup>1\*</sup>

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 长沙 400012; 3. 长江重庆航道工程局, 重庆 400011)

**摘要:** 对陶粒、石英砂和砾石这 3 种人工湿地基质材料进行了氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )吸附特性研究. 通过扫描电镜和 BET 比表面积分析仪对材料进行表征分析, 发现陶粒表面相比石英砂和砾石更为粗糙, 内部孔隙也较发达, 陶粒( $18.97 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )比表面积高于石英砂和砾石. 在纯氨氮溶液和模拟污水厂出水一级 B 标准的混合溶液中, 3 种基质对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附能力均表现为: 陶粒 > 砾石 > 石英砂. 陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的饱和吸附容量在混合溶液中最大 ( $63.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ). 陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附过程符合伪二级动力学模型 (在纯氨氮溶液中  $R^2$  为 0.99、在混合溶液中  $R^2$  为 0.98). 在纯氨氮溶液中运用 Freundlich 和 Langmuir 模型对等温吸附试验结果进行拟合, 发现 Freundlich 模型 ( $R^2=0.93$ ) 描述陶粒的吸附特性比 Langmuir 模型更为精确 ( $R^2$  为 0.93), 表明陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附为多层吸附. 综上所述, 陶粒的吸附容量较强, 在混合溶液中吸附容量较纯氨氮溶液增大了 31%, 适用于作为人工湿地基质填料.

**关键词:** 人工湿地; 基质; 吸附; 氨氮; 陶粒

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1577-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202302111

## Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System

HE Qiang<sup>1</sup>, CHEN Bo-wen<sup>1</sup>, YANG Yu-jing<sup>2</sup>, ZHOU Quan<sup>3</sup>, LIU Yan-jun<sup>3</sup>, WANG Zhi-gang<sup>3</sup>, CHENG Cheng<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Hunan Provincial Architectural Design Institute, Changsha 400012, China; 3. Changjiang Chongqing Waterway Bureau, Chongqing 400011, China)

**Abstract:** The adsorption characteristics of ammonia nitrogen for constructed wetland were studied with ceramsite, quartz sand, and gravel. The material was characterized using scanning electron microscopy and a BET-specific surface area analyzer. It was found that the surface of ceramsite was coarser than that of quartz sand and gravel, and the internal pores were more developed. The specific surface area of ceramsite ( $18.97 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) was higher than that of quartz sand and gravel. In the pure ammonia nitrogen solution and Grade I B standard for the wastewater treatment plant effluent ammonia nitrogen solution of the effluent from the simulated sewage plant, the adsorption capacity of the three substrates was as follows: ceramsite > gravel > quartz sand. The saturated adsorption capacity ( $63.55 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) of ceramsites was the highest in the mixed solution. The adsorption process of ammonia nitrogen by ceramsites accorded with the pseudo-second-order kinetic model ( $R^2$  of 0.99 in the pure ammonia nitrogen solution and 0.98 in the mixed solution). The Freundlich and Langmuir models were used to fit the isothermal adsorption results in a pure ammonia nitrogen solution. It was found that the Freundlich model described the adsorption characteristics of the ceramsite more accurately than the Langmuir model ( $R^2=0.93$ ), indicating that the adsorption of ammonia nitrogen by the ceramics was multilayer adsorption. In conclusion, the adsorption capacity of ceramsite was strong, and the adsorption capacity of ceramsite in the mixed solution was 31% higher than that in the pure ammonia nitrogen solution, which was suitable to be used as the matrix filler of constructed wetland.

**Key words:** constructed wetland; materials; adsorption; ammonium; ceramsite

截至 2021 年 12 月, 我国地表水检测的考核断面中, IV 至劣 V 类水体占 15.2%, 氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )是河湖地表水恶化的关键因子<sup>[1]</sup>. 因此, 如何高效去除水环境中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  具有重要的现实意义. 为落实“碳达峰、碳中和”重大战略和“污水资源化利用”规划, 污水厂的尾水处理研究受到广泛关注. 人工湿地系统由于出水水质稳定、运行简单和费用低等优势已成为污水厂尾水处理的主要技术之一<sup>[2]</sup>. 人工湿地系统的组成包括湿地植物、基质填料和微生物, 其中基质填料作为微生物附着的载体、湿地植物的生长介质和污染物固定的吸附剂, 对于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除起到至关重要的作用<sup>[3-5]</sup>. 基质主要通过污水中的氮进行物理吸附、配位体交换或表面沉淀等反应达到去除氮的目的<sup>[6, 7]</sup>. Ouyang 等<sup>[8]</sup>研究表明, 潜流人工湿地污水处理系统中不同脱氮途径对系统总氮去除效果的

贡献中, 基质截留占 54%, 基质吸附及挥发占 22%. Maltais-Landry 等<sup>[9]</sup>通过研究人工湿地小试系统中氮的迁移转化途径发现基质蓄积可以达到 27%~63%. Zheng 等<sup>[10]</sup>研究植物与铁碳掺杂的人工湿地对氮素的去除中, 基质吸附占 25%~30%. 以上研究主要针对系统中氮素的去除, 其中基质填料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附效果是筛选湿地基质的重要依据, 有必要研究常见基质填料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附特性及机制.

目前人工湿地中常用的基质材料有砾石、石英砂和活性炭等. 砾石的来源广泛, 而且成本低廉, 是国内外实验及工程中使用最多的基质材料之

收稿日期: 2023-02-15; 修订日期: 2023-05-30

作者简介: 何强(1965~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为污水处理技术, E-mail: hq0980@126.com

\* 通信作者, E-mail: ccheng@cqu.edu.cn

—<sup>[11-13]</sup>,砾石和石英砂多用于人工湿地的基质填料,其对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率约为30%<sup>[14]</sup>.康思等<sup>[15]</sup>通过对建筑材料进行吸附平衡实验得到10 g砾石在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初始浓度下的最大吸附容量为 $0.063\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .刘国等<sup>[16]</sup>使用石英砂对猪场沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附进行Langmuir模型拟合,得到石英砂的吸附量为 $0.50\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .活性炭对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附容量大,王芳<sup>[17]</sup>对柚子皮酸改性后经过 $700^\circ\text{C}$ 炭化1 h得到的活性炭对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附容量为 $84.47\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,但因传统的活性炭制作流程容易造成流失以及筛网的堵塞,分离回收困难导致成本提高.

对于常规的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染物,卢少勇等<sup>[18]</sup>就29种湿地填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的等温吸附实验中得到天然石英砂的最大吸附容量为 $0.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,天然砾石吸附容量为 $0.19\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而瓷砂陶粒的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附容量为 $1.62\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,页岩陶粒吸附容量为 $0.57\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .靖青秀等<sup>[19]</sup>以硅藻土和工业钨渣为主要原料制备多孔陶粒,在陶粒投加量为 $0.5\text{ g}$ 的条件下对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的饱和吸附量为 $1.60\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .罗书舟等<sup>[20]</sup>使用柠檬酸钠对净水污泥改性,其改性陶粒对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附容量为 $1.84\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .由此可见陶粒的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附容量与石英砂和砾石相比是有提升潜力的.现有对于陶粒吸附剂的研究中,多选用一种吸附质,针对两种及以上吸附质的研究较少.

本文以陶粒、石英砂和砾石这3种人工湿地基质材料作为研究对象,分析了表面形貌及官能团差异,分别在只含氯化铵的纯氨氮溶液和模拟污水厂出水一级B标准的混合溶液中进行动力学实验和等温吸附实验,测试3种基质材料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附性能,以期选取人工湿地基质填料提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料的选取与氨氮溶液的制备

本实验选取的基质材料为硅酸盐陶粒、石英砂和砾石.硅酸盐陶粒购于环保公司,质地疏松、表面粗糙,直径约3~5 cm;石英砂和砾石都来自砂石厂,石英砂粒径约1 cm,通体呈乳白色,砾石直径约2~3 cm,为自然界常见的青石碎块.将基质洗净、烘干,待用.

本实验所用吸附质分为两种:纯氨氮溶液和混合溶液.第一种为纯水中加入氯化铵配置 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液;第二种是按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级B标准配置,其中 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 为 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{COD})$ 为 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 为 $12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液.

### 1.2 基质材料的表征分析

用扫描电镜观察陶粒、石英砂和砾石吸附饱和前后的结构和表面形态.用傅里叶变换红外光谱仪对吸附前的陶粒、石英砂和砾石进行观察,分析其表面官能团.

利用全自动比表面积及孔隙度分析仪,于77K分析吸附剂对 $\text{N}_2$ 的吸附/脱附等温线,计算吸附剂的比表面积和孔径分布;用t-plot法计算总孔容( $V_{\text{tot}}$ )、微孔孔容( $V_{\text{mic}}$ )和外表面积( $S_{\text{ext}}$ ),微孔表面积( $S_{\text{mic}}$ )为比表面积( $S_{\text{BET}}$ )和外表面积( $S_{\text{ext}}$ )之差,平均孔径( $D_p$ )为对应的孔体积与比表面积相除.

### 1.3 测定方法

实验仪器:美国Micromeritics ASAP 2460全自动比表面积及孔隙度分析仪、磁力搅拌器、HZ-2111KB立式双层恒温振荡器、哈希DR5000紫外分光光度计、扫描电镜(ZEISS Gemini 300)、傅里叶红外光谱仪(岛津IRPvestige-21).

实验药剂:氯化铵(阿拉丁,AR,99.5%)、葡萄糖(biosharp,99%)、磷酸氢二钾(麦克林,99.5%)、硝酸钾(麦克林,AR,97%).

分析软件:本研究图和表中的数据均采用Origin 2023及Microsoft Excel软件进行绘制和拟合.

### 1.4 吸附动力学和吸附等温线

#### 1.4.1 吸附动力学

上述3种基质材料取两组各50 g,分别放入1 000 mL烧杯中,第一组分别加入纯氨氮溶液500 mL、第二组分别加入混合溶液500 mL,置于磁力搅拌器上,转速设置为 $350\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ .在0.5、1、2、4、6、12、24、48、72、96、120、144和168 h时分别取样,经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后取上清液,在波长420 nm处测定吸光度,计算 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度.

平衡吸附量 $Q_e$ 计算公式:

$$Q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (1)$$

式中, $c_0$ 和 $c_e$ 分别为纯氨氮溶液或混合溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初始浓度和平衡浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $V$ 为溶液体积(L), $m$ 为吸附剂基质材料的质量(g).

伪一级计算公式:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (2)$$

式中, $Q_e$ 和 $Q_t$ 分别为在平衡时和时间 $t$ (h)时基质材料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), $k_1$ 为伪一级吸附速率常数( $\text{h}^{-1}$ ).

伪二级计算公式:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (3)$$

$$h_{0.2} = k_2 \cdot Q_e^2 \quad (4)$$

式中,  $k_2$  为伪二级吸附速率常数 [ $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$ ]; 由  $k_2$  可以计算初始吸附速率  $h_{0.2} = k_2 \cdot Q_e^2$ ,  $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ .

#### 1.4.2 吸附等温线模型拟合

吸附等温线可以反映吸附剂和吸附质的相互作用, 吸附等温模型能表明吸附剂的性能以及吸附基质, 本实验使用 Langmuir 和 Freundlich 模型进行拟合. Langmuir 和 Freundlich 模型分别代表单分子层的化学吸附和不限于单层吸附条件影响的多分子层吸附现象<sup>[21-23]</sup>. 称取上述 3 种基质材料各 7 份, 每份 5 g 分别放入 100 mL 样品瓶中, 向其中加入 50 mL 不同浓度 (0、2、4、6、8、12 和 16  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 纯氨氮溶液, 盖上瓶盖放入空气恒温振荡器中, 转速为  $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 振荡 120 h 后分别取样, 经  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜过滤后取上清液, 在波长 420 nm 处测定吸光度, 计算  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度.

Langmuir 计算公式:

$$\frac{c_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{1}{Q_m} c_e \quad (5)$$

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L Q_0} \quad (6)$$

式中,  $c_e$  为被吸附物的平衡浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $Q_e$  为单位质量的吸附剂的吸附量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $Q_m$  为理论最大吸附能力 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $K_L$  为 Langmuir 常数 ( $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ ), 反映吸附速率.  $R_L$  为无量纲的分离常数因子或平衡常数, 以确定吸附过程是有利的或不利的.

Freundlich 计算公式:

$$\ln Q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln c_e \quad (7)$$

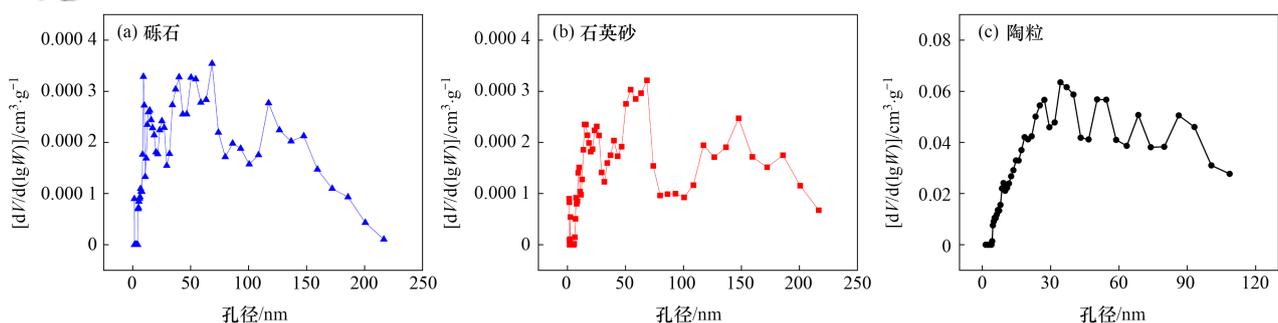


图 1 3种基质材料的孔径分布

Fig. 1 Pore size distribution of three matrix materials

表 1 3种基质材料的孔结构参数

Table 1 Porous structure parameters of three matrix materials

| 吸附剂 | $S_{\text{BET}}$<br>$/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | $S_{\text{mic}}^{\text{mic}}$<br>$/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | $S_{\text{ext}}^{\text{ext}}$<br>$/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | $V_{\text{tot}}^{\text{tot}}$<br>$/\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ | $V_{\text{mic}}^{\text{mic}}$<br>$/\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ | $V_{\text{mic}}/V_{\text{tot}}$<br>/% | $D_p$<br>/nm |
|-----|---|--|--|---|---|---------------------------------------|--------------|
| 陶粒  | 18.97   | 3.077  | 15.90  | $6.95 \times 10^{-2}$   | $1.4 \times 10^{-3}$  | 2.01                                  | 14.65        |
| 石英砂 | 0.16  | 0.046  | 0.11   | $4.04 \times 10^{-4}$   | $2.2 \times 10^{-5}$  | 5.45                                  | 10.16        |
| 砾石  | 0.30  | 0.066  | 0.23   | $7.63 \times 10^{-4}$   | $3.1 \times 10^{-5}$  | 4.06                                  | 9.99         |

#### 2.1.2 基质材料的表面化学性质

吸附材料表面官能团的种类和数量对吸附性能

具有一定的影响. 根据傅里叶红外光谱图 3 所示, 砾石的特征峰分别是: 2 511.32、1 797.66、869.90 和

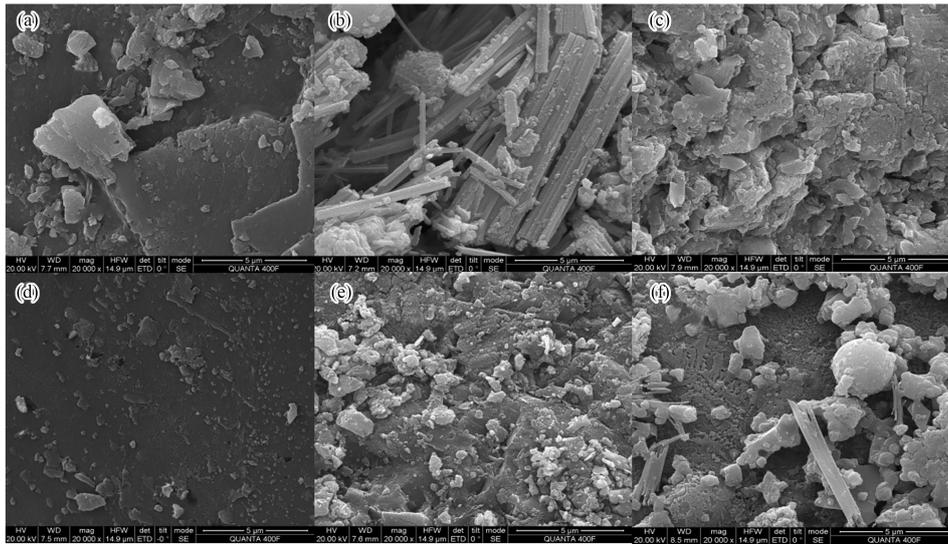
## 2 结果与讨论

### 2.1 基质材料的表征

#### 2.1.1 比表面积和表面形貌

砾石、石英砂和陶粒这 3 种材料的比表面积和孔径分布如图 1 所示. 陶粒的最可几孔径为 34.33 nm, 平均孔径为 14.65 nm, 石英砂和砾石的最可几孔径均为 68.50 nm, 而石英砂的平均孔径为 10.16 nm, 砾石平均孔径为 9.99 nm, 最可几孔径与平均孔径相差较大说明 3 种材料的孔大小不均匀<sup>[25,26]</sup>. 3 种材料的孔径参数如表 1 所示. 根据 3 种材料的平均孔径, 3 种材料均属于中孔材料. 陶粒的 BET 面积为  $18.97 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 总孔容为  $0.07 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . 李子木等<sup>[27]</sup>将钢渣和锰渣等比例掺混后得到的复合陶粒 BET 面积为  $22.23 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 总孔容为  $0.054 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , 与本实验所使用陶粒的比表面积和孔容相似. 陶粒相比石英砂和砾石有着较高的比表面积和较大的孔容, 增加了陶粒表面的吸附位点, 使得陶粒的吸附能力有所增强. 陶粒的微孔与总孔比例为 2.01%, 说明中孔占主导.

砾石、石英砂和陶粒这 3 种材料吸附前后的表面形貌如图 2 所示. 陶粒表面相比石英砂和砾石更为粗糙, 内部孔隙也较发达, 呈不规则状, 附有细小颗粒, 以上细粒子分布于陶粒表面或嵌入在孔隙中, 使得陶粒的表面积及总孔体积均有增大, 可为污染物的吸附截留提供空间, 有利于对污染物的吸附.



(a) 砾石吸附前, (b) 石英砂吸附前, (c) 陶粒吸附前, (d) 砾石吸附后, (e) 石英砂吸附后, (f) 陶粒吸附后  
图 2 3 种基质材料吸附前后的表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of three substrates before and after adsorption

711.73  $\text{cm}^{-1}$ ; 石英砂的特征峰分别是: 796.60、694.37 和 511.14  $\text{cm}^{-1}$ ; 陶粒的特征峰分别是: 1473.62、873.85 和 455.20  $\text{cm}^{-1}$ . 三者共有的特征是在 950~690  $\text{cm}^{-1}$  处的含 Si 基特征峰, 张玉妹等<sup>[28]</sup>通过氢氧化钠浸渍法改性净水污泥, 在 1028.6  $\text{cm}^{-1}$  附近的 Si—O 伸缩振动峰在吸附  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  后有所增强, 说明 Si—O 对吸附  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  发挥作用, 而本实验所用材料均含有相应峰. 砾石在 1797.66  $\text{cm}^{-1}$  处为 —OH 的伸缩振动峰. 石英砂与陶粒在 450  $\text{cm}^{-1}$  与 520  $\text{cm}^{-1}$  之间有 Si—O—Si 特征峰. 桑瑶等<sup>[29]</sup>对以净水污泥、高岭土和碳酸氢钠为原料制备的颗粒吸附剂进行傅里叶红外表征发现, —OH、Si—O 和 Si—O—Si 官能团对吸附  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  发挥重要作用.

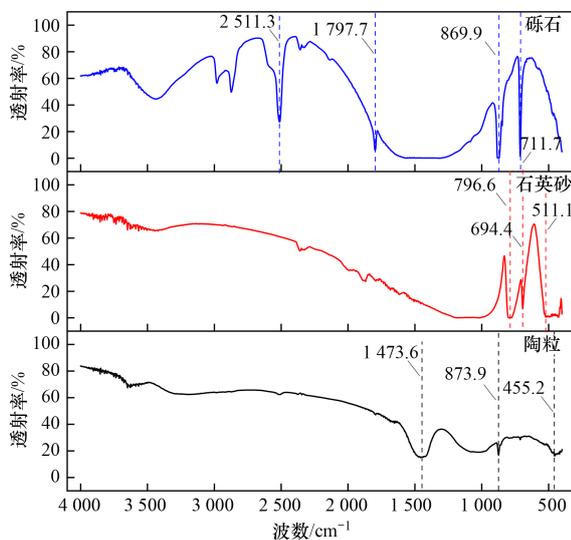


图 3 3 种基质材料的傅里叶红外光谱图

Fig. 3 Fourier infrared spectra of three matrix materials

## 2.2 基质材料的吸附动力学实验

### 2.2.1 基质材料对氨氮吸附效果

为了研究陶粒、石英砂和砾石在仅一种吸附质的条件下以及在其它常规污染物共存的条件下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附效果, 使用陶粒、石英砂和砾石分别对纯氨氮溶液和混合溶液进行了吸附实验. 本研究中的 3 种基质在纯氨氮溶液中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸附效果随时间变化见图 4(a), 陶粒和砾石对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附速率先较大, 随着时间增长逐渐稳定, 在 120 h 左右趋于平衡, 说明空余吸附点位减少至逐渐饱和, 是复合过程<sup>[30]</sup>. 陶粒和砾石对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附量分别达到了 48.50  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 26.96  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 而石英砂对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附在 4 h 时就达到了最大, 为 13.49  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 之后开始剧烈解吸  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 在 24 h 后解吸速率减缓, 并持续解吸. 3 种基质对混合溶液中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸附效果随时间变化见图 4(b), 3 种材料均在 72 h 左右达到平衡状态, 陶粒的饱和吸附量高达 63.55  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 砾石的饱和吸附量为 31.77  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 石英砂饱和吸附量为 26.92  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 随后砾石和石英砂材料出现解吸现象. 在两种溶液中, 陶粒的吸附容量都高于其余两种材料, 且在混合溶液中陶粒的吸附效果更好, 可能是与陶粒的表面形貌粗糙、内部孔隙更发达有关.

此外, 每种基质材料在混合溶液中的饱和吸附量均大于在纯氨氮溶液中的吸附量. 本研究中的纯氨氮溶液呈弱酸性, 导致材料表面所带正电荷较多,  $\text{H}^+$  对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的静电排斥作用增强<sup>[31-33]</sup>,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附效果下降, 混合溶液中存在  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  等离子, 混合后呈中性, 更有利于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附<sup>[23,34,35]</sup>. 材料对于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附主要是物理吸附和离子交换,

材料的物理吸附是吸附剂与吸附质之间通过分子作用力产生的吸附,如静电力和毛细力;离子交换法去除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,是材料晶体内部阳离子与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  交换作用<sup>[36]</sup>.

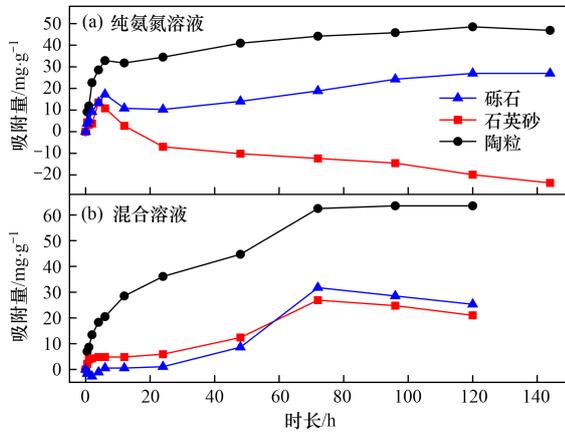


图4 3种基质材料的氨氮吸附量

Fig. 4 Ammonia nitrogen adsorption capacity of three matrix materials

### 2.2.2 基质材料的动力学模型拟合

无论是在混合溶液中还是纯氨氮溶液中,3种基质材料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附量都是先随时间的增加而提高,然后趋于稳定,呈现“先快速吸附,后缓慢平衡”的特点(图4).本研究通过伪一级与伪二级动力学模型对数据进行拟合,从而探讨3种材料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附速率.图5分别展示了在纯氨氮溶液和混合溶液中基质材料伪一级与伪二级动力学模型拟合的情况,且通过拟合的斜率和截距计算得到的动力学参数,其中表2和表3分别为3种基质材料在纯氨氮溶液和混合溶液中的动力学拟合参数.

对于陶粒而言,伪二级动力学模型在两种溶液中的拟合情况都优于伪一级动力学模型<sup>[20,23,37]</sup>,在纯氨氮溶液中  $R^2$  为 0.99,在混合溶液中  $R^2$  为 0.98.伪二级动力学在纯氨氮溶液中拟合的计算得出吸附容量 ( $Q_{2(\text{cal})}=48.31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 和实验得出的吸附容量 ( $Q_{e(\text{exp})}=48.50 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 表现出了较好的一致性,因此伪二级动力学方程适用于陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附过程,也能较好反映  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸附到陶粒的扩散过程和表面吸附过程受到物理、化学过程控制.石英砂在纯氨氮溶液中的伪一级动力学模型拟合结果  $R^2$  为 0.81,其伪二级模型的相关系数  $R^2$  无法拟合得出.但其在混合溶

液中两种模型拟合得到的  $R^2$  均在 0.95 以上,拟合后的伪一级动力学模型的计算值 ( $Q_{e(\text{cal})}=24.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 与实验值 ( $Q_{e(\text{exp})}=26.92 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 相比相差较小,更符合实际情况,这说明伪一级动力学更符合本研究中石英砂的实际情况.砾石在两种溶液中的动力学模型拟合程度均不理想,仅在混合溶液中的伪一级模型拟合得到的  $R^2$  为 0.89,说明砾石更符合伪一级动力学模型.结合吸附容量与两种动力学模型拟合结果可知,陶粒吸附  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的效果优于石英砂和砾石,可作为更优的吸附剂.

内扩散模型可以用来预测粒子内扩散是否是限速步骤,适合多种反应机制但更适用于反应过程中活化能变化较大的反应机制<sup>[34,38-40]</sup>.为了探究陶粒的吸附过程以及该过程的速率控制步骤,采用颗粒内扩散方程模型对数据进行拟合.图6中  $Q_t$  关于  $t^{1/2}$  呈直线形式,说明吸附过程由颗粒内扩散控制.图6显示了颗粒内扩散模型对吸附的拟合曲线和相关参数.由于参数  $k$  对应的  $R^2$  较高,说明颗粒内扩散模型对陶粒的吸附模拟较好.图6为二段式多线图,符合陶粒在表1中微孔容占比小,微孔扩散不明显,因而陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附过程可用液膜扩散和粒子扩散两个过程来描述,第一个阶段为表面快速吸附阶段,第二个阶段为逐步吸附阶段<sup>[36,41]</sup>.陶粒在纯氨氮溶液中  $R^2$  均高于混合溶液中,但在图6(b)中可以看到陶粒通过吸附剂上的吸附位点进行表面吸附的容量大于纯氨氮溶液中,说明在混合溶液中对于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附具有促进效果.曲线不通过原点,说明吸附速率由内、外扩散共同控制.

### 2.3 基质材料的Langmuir和Freundlich模型拟合

本研究在纯氨氮溶液中分别用Langmuir和Freundlich模型进行拟合,结果如图7所示,等温吸附模型拟合参数见表4.

根据实验数据结合表4,计算3种基质材料的Langmuir模型中,由于3种材料的相关系数  $R^2$  均低于 0.70,说明本研究的吸附反应用Langmuir模型拟合并不理想.陶粒的Freundlich模型拟合相关系数  $R^2$  为 0.93,高于Langmuir模型,说明Freundlich模型更适合描述陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附<sup>[42,43]</sup>.石英砂的Freundlich模型拟合相关系数  $R^2$  为 0.91,高于Langmuir模型,则

表2 3种基质材料在纯氨氮溶液中的动力学拟合参数

Table 2 Kinetic fitting parameters of three matrix materials in pure ammonia nitrogen solution

| 材料  | $Q_{e(\text{exp})}$<br>/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | 伪一级动力学模型                   |  |       | 伪二级动力学模型  |  |   |       |
|-----|--|----------------------------|--|-------|---|--|---|-------|
|     |  | $k_1$<br>/ $\text{h}^{-1}$ | $Q_{1(\text{cal})}$<br>/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $R^2$ | $k_2\times 10^{-3}$<br>/ $\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{h})^{-1}$ | $Q_{2(\text{cal})}$<br>/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $h_{0.2}$<br>/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ | $R^2$ |
| 陶粒  | 48.5   | 0.026                      | 29.03  | 0.91  | 4.59  | 48.31  | 10.71   | 0.99  |
| 石英砂 | 10.8   | 0.120                      | 11.68  | 0.81  | 5.79  | 26.74  | 4.14  | —     |
| 砾石  | 27.0   | 0.015                      | 18.30  | 0.62  | 3.19  | 25.64  | 2.09  | 0.50  |

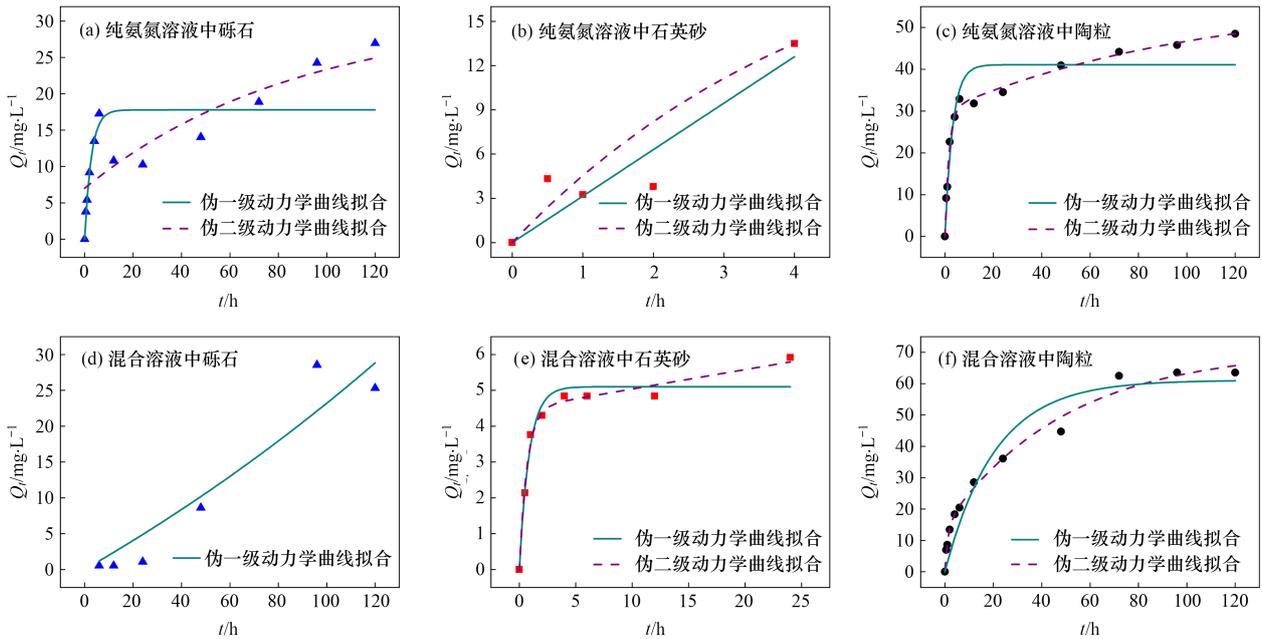


图 5 3 种基质材料在两种不同溶液中的动力学曲线拟合

Fig. 5 Kinetic curve fitting of three matrix materials in two different solutions

表 3 3 种基质材料在混合溶液中的动力学拟合参数

Table 3 Kinetic fitting parameters of three matrix materials in mixed solution

| 材料  | $Q_{e(\text{exp})}$<br>/mg·g <sup>-1</sup> | 伪一级动力学模型                  |  |       | 伪二级动力学模型  |  |                                      |       |
|-----|--|---------------------------|--|-------|---|--|--------------------------------------|-------|
|     |  | $k_1$<br>/h <sup>-1</sup> | $Q_{1(\text{cal})}$<br>/mg·g <sup>-1</sup> | $R^2$ | $k_2 \times 10^{-3}$<br>/g·(mg·h) <sup>-1</sup> | $Q_{2(\text{cal})}$<br>/mg·g <sup>-1</sup> | $h_{0.2}$<br>/mg·(g·h) <sup>-1</sup> | $R^2$ |
| 陶粒  | 63.55                                      | 0.044                     | 61.20                                      | 0.93  | 0.001   | 68.03                                      | 0.006                                | 0.98  |
| 石英砂 | 26.92                                      | 0.010                     | 24.38                                      | 0.95  | 1.790   | 23.70                                      | 1.004                                | 0.97  |
| 砾石  | 31.77                                      | 0.007                     | 33.62                                      | 0.89  | 0.220   | 27.86                                      | 0.170                                | —     |

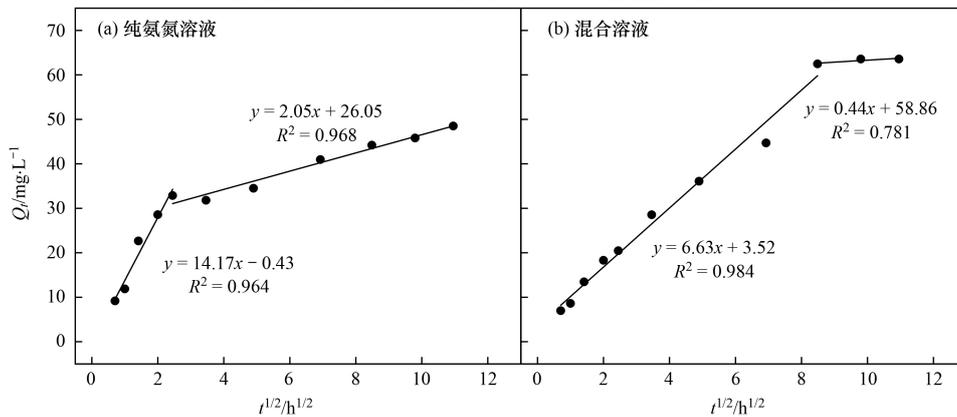


图 6 陶粒材料的内扩散方程拟合

Fig. 6 Internal diffusion equation fitting for ceramsite

表 4 3 种基质材料 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合的参数

Table 4 Langmuir and Freundlich model fitting parameters for three matrix materials

| 材料  | Langmuir 模型               |                           |       | Freundlich 模型  |     |       |
|-----|---------------------------|---------------------------|-------|--|-----|-------|
|     | $Q_m$ /mg·g <sup>-1</sup> | $K_L$ /L·mg <sup>-1</sup> | $R^2$ | $K_F$ /(mg·g <sup>-1</sup> )·(mg·L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/n</sup> | $n$ | $R^2$ |
| 陶粒  | 40.32                     | 0.28                      | 0.67  | 7.4  | 1.4 | 0.93  |
| 石英砂 | 142.05                    | 0.10                      | 0.34  | 1.0  | 1.2 | 0.91  |
| 砾石  | 5.58                      | 1.31                      | 0.54  | 1.2  | 1.3 | 0.41  |

Freundlich 模型更适合描述石英砂对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的吸附。砾石的 Freundlich 模型拟合相关系数 R<sup>2</sup> 为 0.41, 说明

本实验中 Langmuir 和 Freundlich 模型均不适合描述砾石的吸附。陶粒的吸附系数 K<sub>F</sub> 远高于石英砂, 为 7.4,

实验结果也表明陶粒的吸附高于石英砂,说明陶粒对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  具有更高的亲和力<sup>[43,44]</sup>. 陶粒和石英砂材料的  $1/n$  值均小于 1,表明陶粒和石英砂的吸附可能主要为化学吸附<sup>[45]</sup>. 陶粒和石英砂的吸附模型更适合 Freundlich 模型拟合说明吸附作用为多层吸附.

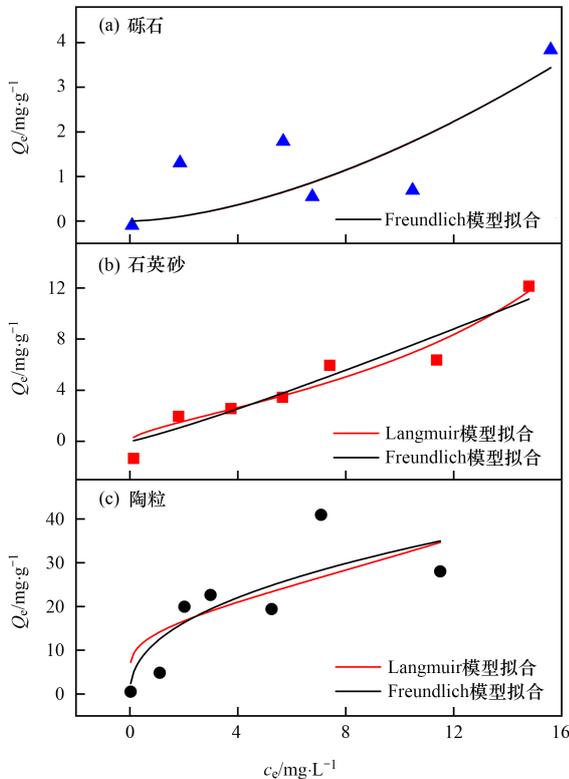


图 7 3种基质材料的 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合

Fig. 7 Langmuir and Freundlich model fitting for three matrix materials

### 3 结论

本研究用陶粒、石英砂和砾石进行吸附实验,结果表明,在纯氨氮溶液、混合溶液两种被吸附溶液中,3种基质材料中对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的理论饱和吸附量均为:陶粒>砾石>石英砂,且在混合溶液中对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的饱和吸附容量更大. 陶粒和石英砂对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附过程用伪二级动力学方程拟合更准确,说明陶粒和石英砂吸附  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的过程受到物理和化学作用影响. 对比选出陶粒为更优吸附剂后,利用内扩散模型在混合溶液中拟合的结果说明溶液中含多种污染物更易发生颗粒内扩散进入陶粒内部. Freundlich 模型对陶粒和石英砂的吸附等温特性的描述比 Langmuir 模型更为准确,而砾石用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型拟合效果都不好. 说明陶粒和石英砂两种基质材料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附都为多层吸附. 综上所述,本文筛选出陶粒作为有利于吸附作用的人工湿地的基质材料,在纯氨氮溶液和混合溶液两种被吸附溶液中的饱和吸附容量为  $48.50 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $63.55 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,均高于砾石和石英砂,且陶粒作为人工湿地基质也能

更有效地利用废弃资源.

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202105/P020210526572756184785.pdf>, 2021-05-24.
- [2] 马权, 王东麟, 林慧, 等. 锰砂人工湿地对污染物的强化去除 [J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4304-4310.  
Ma Q, Wang D L, Lin H, et al. Enhanced removal of pollutants in constructed wetlands with manganese sands [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4304-4310.
- [3] 尹楚杰, 吕源财, 潘文斌. 人工湿地填料在废水中脱氮除磷的应用研究进展 [J]. 现代化工, 2021, **41**(7): 68-71.  
Yin C J, Lv Y C, Pan W B. Research progress on application of constructed wetland fillers in removing nitrogen and phosphorus from wastewater [J]. Modern Chemical Industry, 2021, **41**(7): 68-71.
- [4] 刘竞依, 孙耀胜, 么强, 等. 人工湿地技术在工业废水处理中的应用 [J]. 给水排水, 2021, **57**(S1): 509-516.  
Liu J Y, Sun Y S, Yao Q, et al. Review on the application of constructed wetland technology in industrial wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, **57**(S1): 509-516.
- [5] Lu S B, Zhang X L, Wang J H, et al. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **127**: 325-330.
- [6] 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 等. 多种材料对水中氨氮的吸附特性 [J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3633-3641.  
Jiao J L, Yang S W, Xie Y, et al. Adsorption properties of ammonia nitrogen in aqueous solution by various materials [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3633-3641.
- [7] 张楠. 铝锰沸石复合吸附材料强化去除水中氨氮与磷酸盐 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [8] Ouyang Y, Luo S M, Cui L H. Estimation of nitrogen dynamics in a vertical-flow constructed wetland [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(3): 453-459.
- [9] Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J, et al. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands [J]. Water Research, 2009, **43**(2): 535-545.
- [10] Zheng X Y, Jin M Q, Zhou X, et al. Enhanced removal mechanism of iron carbon micro-electrolysis constructed wetland on C, N, and P in salty permitted effluent of wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 21-30.
- [11] 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 等. 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 [J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2875-2884.  
Zhao Z J, Hao Q J, Zhang Y Y, et al. Wastewater treatment effects of ferric-carbon micro-electrolysis and zeolite in constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2875-2884.
- [12] 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 等. 铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 [J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1492-1499.  
Chen X T, He Q J, Xiong Y F, et al. Effects of hematite and biochar addition on wastewater treatment efficiency, greenhouse gas emission, and microbial community in subsurface flow constructed wetland [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1492-1499.
- [13] 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. Nitrogen and phosphorus adsorption capacity of different substrate combinations [J].

- Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(5): 1277-1287.
- [14] 白少元, 徐嫚嫚, 钱朝文, 等. 碳质填料的导电特征及其对人工湿地净化效能的提升[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(5): 1773-1782.
- Bai S Y, Xu M M, Qian C W, *et al.* Electro-conductivity of carbonaceous materials and their improvement in the purifying performance of the constructed wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(5): 1773-1782.
- [15] 康思, 伍昌友. 三种建筑材料对氨氮和磷的吸附解析性能[J]. 武汉理工大学学报, 2017, **39**(10): 70-74.
- Kang S, Wu C Y. Adsorption properties of three building materials to ammonia nitrogen and phosphorus [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, **39**(10): 70-74.
- [16] 刘国, 刘国, 胡凤妹, 等. 不同基质人工湿地去除猪场沼液中氨氮性能[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(1): 13-18.
- Liu G, Liu G, Hu F M, *et al.* Artificial wetlands filled with different packing materials to remove ammonia nitrogen from biogas slurry of pig farm [J]. Environmental Pollution & Control, 2014, **36**(1): 13-18.
- [17] 王芳. 磁性活性炭的制备及其氨氮吸附机理[J]. 化工新型材料, 2018, **46**(6): 210-213, 217.
- Wang F. Preparation of magnetic activated carbon and its adsorption mechanism for ammonia-nitrogen [J]. New Chemical Materials, 2018, **46**(6): 210-213, 217.
- [18] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(8): 1187-1194.
- Lu S Y, Wang Z F, Li F M, *et al.* Ammonia nitrogen adsorption and desorption characteristics of twenty-nine kinds of constructed wetland substrates [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(8): 1187-1194.
- [19] 靖青秀, 王云燕, 柴立元, 等. 硅藻土-钨渣基多孔陶粒对离子型稀土矿区土壤氨氮淋滤液的吸附[J]. 中国有色金属学报, 2018, **28**(5): 1033-1042.
- Jing Q X, Wang Y Y, Chai L Y, *et al.* Adsorption behavior of ammonium in leachate from ionic rare earth mining area soil by diatomite and tungsten residue based porous ceramics [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, **28**(5): 1033-1042.
- [20] 罗书舟, 王东田. 净水污泥柠檬酸钠改性焙烧制备陶粒吸附剂及其对废水中氨氮吸附性能的研究[J]. 安全与环境工程, 2021, **28**(5): 230-239.
- Luo S Z, Wang D T. Preparation of ceramics adsorbent by trisodium citrate dihydrate modified and baking drinking water treatment sludge for ammonia nitrogen removal from wastewater [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, **28**(5): 230-239.
- [21] 王兴权, 程金莲, 刘宏, 等. 有机肥腐殖酸对Pb<sup>2+</sup>的吸附性能[J]. 江苏农业科学, 2021, **49**(13): 202-206.
- [22] 邢明超, 谢强, 陈守慧, 等. 单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 310-317.
- Xing M C, Xie Q, Chen S H, *et al.* Preparation of the silane monolayer on magnetite nanoparticles and its performance with respect to phosphate removal from water [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 310-317.
- [23] 蒋楠, 李彬, 赵明星, 等. 复合陶粒对水中氨氮和磷的吸附研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, **53**(5): 600-610.
- Jiang N, Li B, Zhao M X, *et al.* Study on adsorption of ammonia nitrogen and phosphorus in water by composite ceramics [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, **53**(5): 600-610.
- [24] 王国贺, 林丛, 林方聪, 等. 不同矿物基吸附材料对餐饮废水中氮、磷的去除效果研究[J]. 化工新型材料, 2022, **50**(4): 291-296.
- Wang G H, Lin C, Lin F C, *et al.* Research on the removal effect of different mineral based adsorption materials on nitrogen and phosphorus in restaurant wastewater [J]. New Chemical Materials, 2022, **50**(4): 291-296.
- [25] 关钺灏, 王海, 金劭, 等. 压汞法总孔容和孔径标准物质的研制[J]. 化学试剂, 2014, **36**(9): 824-828.
- Guan C H, Wang H, Jin S, *et al.* Development of certified reference materials for total pore volume and pore size by mercury porosimetry [J]. Chemical Reagents, 2014, **36**(9): 824-828.
- [26] 王尧, 王传格, 曾凡桂, 等. 中低阶煤纳米孔隙结构的小角X射线散射研究[J]. 煤炭转化, 2022, **45**(4): 10-18.
- Wang Y, Wang C G, Zeng F G, *et al.* Small angle X-ray scattering study on Nano-pore structure of medium and low rank coal [J]. Coal Conversion, 2022, **45**(4): 10-18.
- [27] 李子木, 李灿华, 查雨虹, 等. 钢渣-锰渣复合陶粒对Cu<sup>2+</sup>的吸附机理研究[J]. 工业水处理, 2022, **42**(8): 113-119.
- Li Z M, Li C H, Zha Y H, *et al.* Study on the adsorption mechanism of Cu<sup>2+</sup> by steel slag-manganese slag composite ceramics [J]. Industrial Water Treatment, 2022, **42**(8): 113-119.
- [28] 张玉妹, 韩乙萱, 魏杰, 等. 碱改性净水污泥对水中氨氮的吸附效能研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2484-2490.
- Zhang Y M, Han Y X, Wei J, *et al.* Adsorption efficiency of alkali-modified water treatment sludge for ammonia nitrogen in water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(10): 2484-2490.
- [29] 桑瑶, 魏杰, 王东田. 净水污泥复合颗粒吸附剂对氨氮的吸附性能[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(12): 14-20.
- Sang Y, Wei J, Wang D T. Adsorption performance of drinking water treatment sludge composite particle adsorbent on ammonia nitrogen [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(12): 14-20.
- [30] 李政. 沙颖河中游潜流带沉积物中氨氮的吸附解吸及迁移转化的实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [31] 何李文泽, 陈钰, 赵玉婷, 等. 碱水热净水污泥吸附剂对氨氮的吸附性能[J]. 水处理技术, 2022, **48**(10): 82-87.
- He L W Z, Chen Y, Zhao Y T, *et al.* Adsorption properties of ammonia nitrogen by alkali-hydrothermal water treatment sludge adsorbent [J]. Technology of Water Treatment, 2022, **48**(10): 82-87.
- [32] 邓振乡, 秦磊, 王观石, 等. 氨氮在高岭土上的吸附解吸规律研究[J]. 稀土, 2022, **43**(2): 32-41.
- Deng Z X, Qin L, Wang G S, *et al.* Study on behaviors of adsorption and desorption of ammonia-nitrogen in Kaolin [J]. Chinese Rare Earths, 2022, **43**(2): 32-41.
- [33] Cheng H M, Zhu Q, Xing Z P. Adsorption of ammonia nitrogen in low temperature domestic wastewater by modification bentonite [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **233**: 720-730.
- [34] 李杰, 潘兰佳, 余广炜, 等. 污泥生物炭制备吸附陶粒[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3970-3978.
- Li J, Pan L J, Yu G W, *et al.* Preparation of adsorption ceramics derived from sludge biochar [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3970-3978.
- [35] Azreen I, Lija Y, Zahrim A Y. Ammonia nitrogen removal from aqueous solution by local agricultural wastes [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, **206**: 01207.
- [36] 高惠子, 田伟君, 张子钰, 等. 锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用[J]. 环

- 境科学, 2022, **43**(12): 5627-5634.
- Gao H Z, Tian W J, Zhang Z Y, *et al.* Adsorption of typical quinolone antibiotics by manganese oxide-modified biochar substrate and its application in CWs[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5627-5634.
- [37] 莫文锐, 黄建洪, 田森林, 等. 氨氮与磷在三种人工湿地填料上的吸附动力学[J]. *化学研究*, 2012, **23**(1): 21-23.
- Mo W R, Huang J H, Tian S L, *et al.* Adsorption kinetics of ammonium nitrogen and phosphorus on three kinds of artificial wetland fillers[J]. *Chemical Research*, 2012, **23**(1): 21-23.
- [38] 张连科, 王洋, 王维大, 等. 磁性羟基磷灰石/生物炭复合材料的制备及对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附性能[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4360-4370.
- Zhang L K, Wang Y, Wang W D, *et al.* Preparation of magnetic hydroxyapatite/biochar composite and its adsorption behavior of Pb<sup>2+</sup> and recycling performance [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4360-4370.
- [39] Amar M B, Walha K, Salvadó V. Evaluation of olive stones for Cd(II), Cu(II), Pb(II) and Cr(VI) biosorption from aqueous solution: equilibrium and kinetics [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2020, **14**(2): 193-204.
- [40] 周润娟, 张明. 水葫芦生物炭对水中重金属离子的吸附特征研究[J]. *安全与环境工程*, 2022, **29**(3): 168-177.
- Zhou R J, Zhang M. Adsorption characteristics of heavy metal ions in water by water hyacinth biochar[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, **29**(3): 168-177.
- [41] Gupta V K, Nayak A, Agarwal S, *et al.* Potential of activated carbon from waste rubber tire for the adsorption of phenolics: effect of pre-treatment conditions [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, **417**: 420-430.
- [42] 朱龙龙, 邱立平, 张媛媛, 等. 低温条件下 3 种填料吸附氨氮的研究[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2016, **30**(4): 287-292.
- Zhu L L, Qiu L P, Zhang Y Y, *et al.* Ammonia nitrogen adsorption onto volcanic rocks, haydites and zeolites at low temperatures [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2016, **30**(4): 287-292.
- [43] 刘莹, 刘晓晖, 张亚茹, 等. 三种人工湿地填料对低浓度氨氮废水的吸附特性[J]. *环境化学*, 2018, **37**(5): 1118-1127.
- Liu Y, Liu X H, Zhang Y R, *et al.* Adsorption properties of low concentration ammonia nitrogen wastewater by three constructed wetland fillers[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(5): 1118-1127.
- [44] Xie P P, Deng J W, Zhang H M, *et al.* Effects of cadmium on bioaccumulation and biochemical stress response in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 392-398.
- [45] 王志强, 张俊杰, 刘相成, 等. 改性活性炭对低浓度二氧化硫吸附动力学模型研究[J]. *无机盐工业*, 2022, **54**(9): 69-76.
- Wang Z Q, Zhang J J, Liu X C, *et al.* Study on adsorption kinetics model of modified activated carbon on SO<sub>2</sub> with low-concentration [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022, **54**(9): 69-76.



## CONTENTS

|   |   |
|---|---|
| Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China .....  | LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)        |
| Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle .....                                      | REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)                                  |
| Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                      | TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)                   |
| Assessment of CO <sub>2</sub> Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan .....  | XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)               |
| Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province .....   | LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)            |
| Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study .....                                | ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)            |
| Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou .....  | ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)               |
| Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River .....                                      | ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)  |
| Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains ..... | WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)                   |
| Spatial Variability and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Carbon Components in Tianjin .....  | WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)         |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> in Huaxi District, Guiyang .....  | GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)       |
| Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Xinxiang, North China .....  | LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)       |
| Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018 .....  | DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)  |
| Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing .....   | PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)       |
| Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer .....   | LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)       |
| Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation .....  | WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)              |
| Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River .....               | LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)         |
| Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model .....  | CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)  |
| Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing .....   | ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)      |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin .....  | LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)          |
| Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City .....   | DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)     |
| Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section) .....   | ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)         |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia .....                           | GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)        |
| Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province .....  | ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)           |
| Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake .....   | MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)                 |
| Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years .....   | WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)  |
| Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example .....   | DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)      |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin .....   | LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)            |
| Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes .....   | ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)     |
| Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process .....   | LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)                                       |
| Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water .....   | LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)          |
| Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System .....  | HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)   |
| Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index .....                 | FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)     |
| Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI .....   | ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)                             |
| Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River .....             | XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)               |
| Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis .....   | LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)    |
| Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon .....  | LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)     |
| Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil .....   | DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)    |
| Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages .....  | SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)               |
| Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River .....   | WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674) |
| Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field .....                                       | SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)   |
| Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China .....          | HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)          |
| Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland .....   | CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)       |
| Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model .....   | WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)     |
| Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin .....  | LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)                  |
| Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi .....   | YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)       |
| Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model .....   | YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)                           |
| Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province .....   | XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)           |
| Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil .....   | SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)     |
| Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province .....   | DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)          |
| Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice .....  | YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)       |
| Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor .....  | LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)                        |
| Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland .....   | XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)        |
| Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis .....   | LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)           |
| Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis .....   | LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)                 |
| Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms .....  | BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)     |
| Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River .....   | GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)      |
| Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish ( <i>Danio rerio</i> ) Embryos .....                    | YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)         |