

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铨, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李颀, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素

连神海^{1,2}, 张树楠^{1*}, 刘锋^{1,2}, 邢宏霖³, 吴金水^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖南省生态环境监测中心, 国家环境保护重金属污染监测重点实验室, 长沙 410014)

摘要: 为了实现植物生物质资源化利用, 选择 5 种生物质材料制备生物炭, 通过比较 5 种生物炭材料的磷吸附能力, 筛选出了 2 种磷吸附效果较佳的材料, 并探明了筛选生物炭材料的理化性质及其对磷的吸附特征. 结果表明, 5 种生物炭材料中, 仅水稻秸秆和玉米秸秆生物炭对磷具有吸附能力. Langmuir 等温吸附曲线表明, 水稻秸秆生物炭对废水中磷的吸附能力强于玉米秸秆生物炭, 理论最大吸附量为: 水稻秸秆生物炭 ($9.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 玉米秸秆生物炭 ($0.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). 水稻秸秆生物炭的比表面积 ($148.30 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 和总孔体积 ($0.11 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 远高于玉米秸秆生物炭 $8.26 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, 同时水稻秸秆生物炭有更高的 Mg、Ca、Fe 和 Al 元素含量. 水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭对磷吸附的最佳 pH 为酸性; 在不同的 pH 范围内 (3.0 ~ 11.0), 水稻秸秆生物炭对磷的吸附容量基本保持不变, 玉米秸秆生物炭对磷的吸附容量呈现先增加后减少趋势. 综合而言, 水稻秸秆生物炭对水体磷具有更好的吸附能力, 在污水处理中具有良好应用前景.

关键词: 水稻秸秆; 生物炭; 吸附; 磷; 吸附容量; 水稻秸秆生物炭 (RSB); 玉米秸秆生物炭 (CSB)

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3692-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109156

Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors

LIAN Shen-hai^{1,2}, ZHANG Shu-nan^{1*}, LIU Feng^{1,2}, XING Hong-lin³, WU Jin-shui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Changsha Research Station for Agricultural and Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hunan Ecological Environment Monitoring Center, State Key Laboratory of Heavy Metal Pollution Monitoring for Environmental Protection, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to understand the resource utilization of plant biomass, five types of biomass materials were used to produce biochar to treat wastewater containing phosphorus. The phosphorus adsorption capacity of five materials was preliminarily compared through laboratory experiments, and two materials with strong phosphorus adsorption capacity were screened out. The physicochemical characteristics of the selected biochar were analyzed using scanning electron microscopy and a BET specific surface area analyzer, and the effects of different pH values on phosphorus adsorption of the biochar were investigated. Furthermore, the phosphorus adsorption characteristics of the selected biochar were analyzed via isothermal adsorption and adsorption kinetics models. The results showed that among the five biochar materials, only rice straw and corn straw biochar had the ability to adsorb phosphorus. The Langmuir isothermal adsorption curve showed that the adsorption capacity of rice straw biochar for phosphorus in wastewater was stronger than that of corn straw biochar, and the theoretical maximum adsorption capacity was as follows: rice straw biochar ($9.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > corn straw biochar ($0.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). The specific surface area ($148.30 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) and total pore volume ($0.11 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) of rice straw biochar were much higher than those of corn straw biochar ($8.26 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, respectively), and the contents of Mg, Ca, Fe, and Al were higher in rice straw biochar. The best pH for phosphorus adsorption of rice straw biochar and corn straw biochar, respectively, was acidic. In different pH ranges (3.0-11.0), the phosphorus adsorption capacity of rice straw and corn straw biochar decreased with the increase in pH. These results indicated that rice straw biochar has strong phosphorus adsorption capacity and has a better application prospect in wastewater treatment.

Key words: rice straw; biochar; adsorption; phosphorus; adsorption capacity; rice straw biochar (RSB); corn straw biochar (CSB)

磷(P)是重要的营养元素,同时也是水体富营养化的主要影响因素之一^[1,2].目前,国内外采用的除磷方法主要有化学沉淀法^[3]、吸附法^[4]和生物法^[5],其中吸附法因操作简单、除磷效率高和处理成本低等优点得到广泛应用^[6].目前用于吸附磷的材料主要有粉煤灰、钢渣和活性氧化铝等^[7],活性氧化铝虽可有效吸附磷,但是难以脱附;钢渣和粉煤灰尽管价格低廉,但这些工业废料会向水中溶出有害离子.因此,研发出廉价和高效的环境友好型吸附材料是近年来研究热点.

生物炭是一种来源广泛和成本低廉的环境修复材料,它是由生物质原材料(如作物秸秆等)在无氧

或缺氧条件下,经过高温裂解制备而成^[8,9].由于生物炭比表面积较大,孔隙结构丰富,其表面蜂窝状物理结构和强化学电活性性能富集大量官能团,因此它是一种吸附性能良好的吸附剂.目前常见的生物炭材料有木炭、稻壳炭、秸秆炭和竹炭等^[10],这些生物炭材料常用作吸附水体和土壤中的氮磷^[11,12]、

收稿日期: 2021-09-17; 修订日期: 2021-11-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23020402, XDA23020502); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020SK2034, 2020NK2004); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2020JJ5636)

作者简介: 连神海(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为生物炭环境修复, E-mail: 1510903080@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhang-shu-nan@163.com

重金属^[13-15]和有机污染物^[16-18]。目前有关生物炭对水体中磷的研究多关注于单种生物炭,例如孟依柯等^[19]研究了木屑生物炭对雨水径流中磷的吸附特性,赵敏等^[20]探明了硅改性花生壳生物炭的磷吸附特征,而有关不同类型生物质材料制备的生物炭之间磷吸附特征缺乏比较。

基于此,本文以作物秸秆、水生植物、毛竹和松木等植物生物质为原材料,分别制备成水稻秸秆生物炭、玉米秸秆生物炭、绿狐尾藻生物炭、竹炭和木炭,研究不同类型生物炭材料对磷的吸附能力;利用扫描电镜(SEM)和BET比表面积仪等分析不同生物炭理化特征,同时探明不同pH值对生物炭磷吸附效果的影响;并通过等温吸附和吸附动力学模型,解析不同生物炭对磷的吸附特征及主要除磷机制,以期生物炭材料在含磷废水处理中应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究选用的生物炭原材料均取自中国科学院长沙农业环境研究所。将原材料用自来水清洗干净,再用去离子水清洗3次于通风处自然风干后,在恒温干燥箱中于55℃下烘48h,随后用粉碎机粉碎并过60目筛,将过筛的材料作为生物炭原材料。

1.2 生物炭的制备

将生物炭原材料进行冲洗烘干,然后将原料放置于刚玉舟中,并加盖密闭,放入到OTF-1200X管式炉中,恒定升温速率为5℃·min⁻¹,通入氮气保护塑造厌氧环境,热解温度500℃,热解2h,冷却至室温。然后用去离子水将制备好的生物炭清洗至中性,烘干备用。

1.3 实验方法

1.3.1 吸附材料的磷吸附特征

分别称取0.50g水稻秸秆生物炭、玉米秸秆生物炭、绿狐尾藻生物炭、竹炭和木炭样品于50mL离心管中,加入25mL初始浓度为10、50和100mg·L⁻¹(以P计)的KH₂PO₄标准溶液,恒温振荡24h(180r·min⁻¹,25℃),离心(4500r·min⁻¹,5min),取上清液采用钼酸铵分光光度法测定溶液中磷的浓度,实验设置3个重复。生物炭材料的吸附量 Q_e [式(1)]和去除率 η [式(2)]计算如下:

$$Q_e = (c_0 - c_e) \times V/m \quad (1)$$

$$\eta = (c_0 - c_e)/c_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中, Q_e 为生物炭对磷的吸附量(mg·g⁻¹); c_0 为磷的初始质量浓度(mg·L⁻¹); c_e 为吸附平衡时上清液磷浓度(mg·L⁻¹); m 为生物炭质量(g); V 为

溶液体积(L)。

1.3.2 等温吸附实验

分别称取0.50g样品于50mL离心管中,加入25mL初始质量浓度设为1、5、10、20、30、40、50、100、200和300mg·L⁻¹的KH₂PO₄标准溶液,恒温振荡24h(180r·min⁻¹,25℃),采用Freundlich[式(3)]和Langmuir[式(4)]方程来拟合等温吸附实验数据,其表达式为:

$$Q_e = kc_e^{1/n} \quad (3)$$

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{AQ_0c_e} + \frac{1}{Q_0} \quad (4)$$

式中, Q_0 为理论最大吸附量(mg·g⁻¹); A 为Langmuir吸附平衡常数; k 和 n 为Freundlich常数,分别代表吸附剂的吸附能力和吸附强度。

1.3.3 吸附动力学实验

分别称取0.50g样品于50mL离心管中,加入25mL初始质量浓度10mg·L⁻¹的KH₂PO₄标准溶液,吸附时间分别设置为1、2、5、10、20、30、60、120、180、240、480、720、1440和2160min。采用4个典型动力学方程[式(5)~(8)]拟合吸附动力学方程。

准一级动力学方程:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (5)$$

颗粒内扩散模型:

$$Q_t = k_i t^{1/2} + c \quad (6)$$

Elovich动力学方程:

$$Q_t = a + b \ln t \quad (7)$$

准二级动力学方程:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (8)$$

式中, Q_t 为任意时刻 t 的吸附量(mg·g⁻¹); k_1 和 k_2 分别为准一级动力学和准二级动力学方程的速率常数; t 为吸附时间(min); a 和 b 为Elovich动力学参数; c 为吸附剂边界层数的常数, k_i 为颗粒内扩散速率常数[g·(mg·min^{0.5})⁻¹]。

1.3.4 初始pH对磷吸附效果的影响

溶液初始质量浓度设为10mg·L⁻¹,用1mol·L⁻¹的HCl和NaOH调节溶液pH值依次为3、5、7、9和11。分别称取0.50g制成的生物炭置于50mL离心管中,加入25mL初始浓度KH₂PO₄溶液,于恒温振荡器(180r·min⁻¹,25℃)振荡24h,然后离心(4000r·min⁻¹,5min)分离,取上清液采用钼锑抗分光光度法测定溶液中磷酸盐的质量浓度。

1.4 分析方法

1.4.1 生物炭材料的表征

利用扫描电子显微镜(SU8010,日本日立公司)

扫描获取材料的表面形貌特征;生物炭的主要化学成分采用元素分析仪(Vario MAX, Elementar)与 ICP-OES-5110(美国安捷伦公司)测定;比表面积、总孔体积(孔容)和孔径特征采用 BET 比表面仪(美国康塔仪器公司)进行测定;通过纳米粒度及 Zeta 电位分析仪(Malvern Zetasizer Nano ZS90)测定不同 pH 条件下的 Zeta 电位,进而确定吸附剂的等电点.

1.4.2 磷浓度测定

采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定磷酸盐浓度.

2 结果与讨论

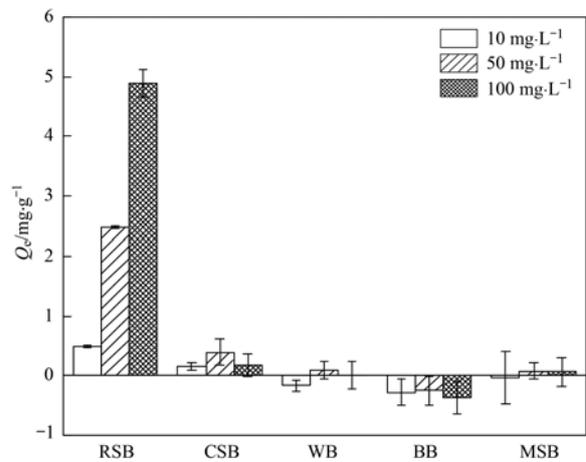
2.1 不同生物炭材料的磷吸附能力比较

5 种生物炭材料对不同磷初始浓度的吸附性能如图 1 所示. 初始浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水稻秸秆和玉米秸秆烧制的生物炭磷吸附容量分别为 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;而木炭、竹炭和绿狐尾藻生物炭反而释放出了磷. 当初始浓度增加到 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水稻秸秆生物炭对磷有较好吸附效果,磷吸附容量高达 $4.89 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;玉米秸秆生物炭磷吸附容量变化不大,为 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 而随着磷初始浓度的增加,木炭、竹炭和绿狐尾藻生物炭对磷吸附效果均不佳.

基于 5 种材料对磷的吸附性能比较,最终筛选出水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭进行后续实验.

2.2 生物炭材料的理化性质分析

SEM 分析结果如图 2 所示,2 种材料的表面形貌差异明显. 水稻秸秆生物炭表面疏松,粗糙多孔,形似蜂窝状,孔径较小,因而导致其比表面积相对较大;玉米秸秆生物炭表面孔隙较少,表面较为光滑,导致其比表面积小. 2 种生物炭的样貌差异明显,比表面积、孔径差异明显,导致生物炭表面吸附磷的



RSB、CSB、WB、BB 和 MSB 分别表示水稻秸秆生物炭、玉米秸秆生物炭、木炭、竹炭和绿狐尾藻生物炭

图 1 供试材料对磷的吸附效果

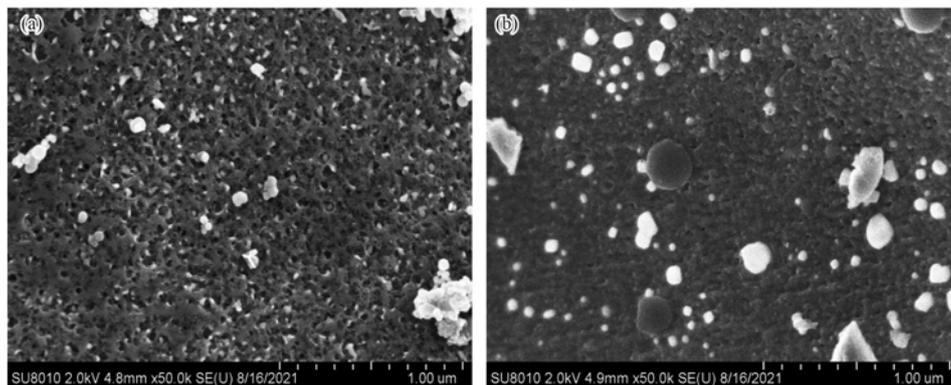
Fig. 1 Adsorption of tested materials on phosphorus

吸附位点数量有所差异,从而导致其吸附性能也有所差异. 元素分析仪和 ICP-OES-5110 结果表明,2 种生物炭材料的主要化学成分差异明显,如表 1 所示. 水稻秸秆生物炭的 Mg、Ca、Fe 和 Al 元素含量均高于玉米秸秆生物炭. BET 比表面仪测定结果显示,水稻秸秆生物炭的比表面积($148.30 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)远大于玉米秸秆生物炭($8.26 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$). 2 种生物炭的总孔体积的差异也明显,水稻秸秆生物炭的总孔体

表 1 生物炭材料部分物理化学特征

Table 1 Physical and chemical characteristics of biochar materials

项目	吸附材料	水稻秸秆生物炭	玉米秸秆生物炭
主要化学成分/%	C	65.76	69.16
	Ca	2.53	2.50
	Mg	2.80	2.40
	Fe	1.47	0.64
	Al	0.91	0.88
物理结构	比表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	148.30	8.26
	总孔体积/ $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$	0.11	0.03
	平均孔径/nm	2.90	16.55



(a) 水稻秸秆生物炭, (b) 玉米秸秆生物炭

图 2 生物炭 SEM 图

Fig. 2 SEM image of biochar

积为 $(0.11 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$, 而玉米秸秆生物炭的仅为 $(0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$.

2.3 生物炭材料对磷的吸附特征

2.3.1 等温吸附过程

2 种生物炭材料的等温吸附特征如图 3 所示, 当磷初始浓度小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着磷初始浓度的增加, 水稻秸秆和玉米秸秆生物炭对磷的吸附量均呈快速增加趋势; 当初始浓度大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水稻和玉米秸秆生物炭的磷吸附量增长变缓, 说明随着磷浓度的增加, 两种生物炭材料逐渐达到磷吸附饱和状态.

等温吸附曲线拟合的结果如表 2 所示, Langmuir 模型能够更好地描述 2 种生物炭材料对磷的等温吸附过程 (R^2 为 0.98 和 0.95), Langmuir 模

型拟合效果好, 表明 2 种生物炭材料对磷的吸附以同质单层吸附为主^[21,22]. 水稻秸秆生物炭的理论最大磷吸附量为 $9.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于玉米秸秆生物炭的 $0.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 这可能与水稻秸秆生物炭理化性质有关. 水稻秸秆生物炭表面粗糙多孔, 孔径较小, 比表面积较大; 而玉米秸秆生物炭表面孔隙较少, 比表面积较小. 2 种生物炭比表面积、孔径差异明显, 导致生物炭表面磷吸附位点数量有差异, 因而导致其吸附性能不同^[23]. 另外, 材料的磷吸附能力也与所含的 Ca、Fe、Mg 和 Al 等金属氧化物有关^[24]. 由于本研究中水稻秸秆生物炭的 Ca、Fe、Mg 和 Al 含量均高于玉米秸秆生物炭, 水体中磷素可以与生物炭中 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 离子以及水合物或氧化物反应形成难溶性化合物, 从而使磷得以去除^[25,26].

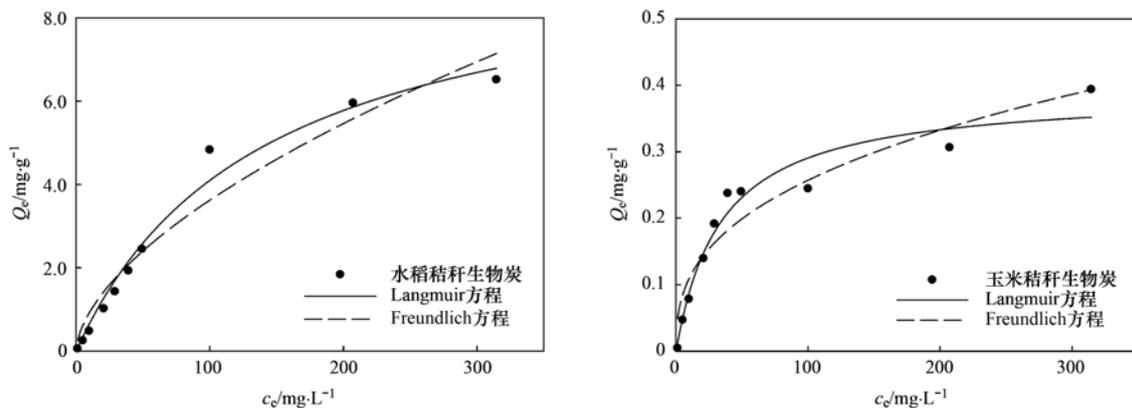


图 3 2 种生物炭材料对磷的等温吸附拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of isothermal adsorption of phosphorus by two biochar materials

表 2 2 种生物炭材料对磷的等温吸附模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of isothermal adsorption model for phosphorus of two biochar materials

吸附材料	Freundlich 方程			Langmuir 方程		
	k	n	R^2	$Q_c/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	A	R^2
水稻秸秆生物炭	0.24	1.69	0.95	9.78	0.007	0.98
玉米秸秆生物炭	0.05	2.70	0.92	0.39	0.029	0.95

2.3.2 吸附动力学

2 种生物炭材料的磷吸附动力学特征曲线如图 4 所示, 随着吸附时间的增加, 水稻秸秆生物炭对磷的吸附量也随之增加, 30 min 后基本达到吸附平衡; 而玉米秸秆生物炭的吸附量增加趋势较为缓慢, 在 12 h 才达到吸附平衡. 水稻秸秆生物炭在 30 min 便达到磷吸附平衡, 可能是由于水稻秸秆生物炭表面的正电荷与磷酸根负电荷之间的静电引力作用^[27].

为了分析 2 种生物炭材料的吸附动力学特征, 本文采用准一级动力学、准二级动力学、颗粒内扩散模型和 Elovich 方程拟合吸附动力学参数, 结果如表 3 所示. 结果表明在浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷溶液

里, 水稻秸秆生物炭的准二级动力学 ($R^2 = 0.84$) > Elovich 模型 ($R^2 = 0.75$) > 准一级动力学 ($R^2 = 0.61$) > 颗粒内扩散 ($R^2 = 0.35$); 玉米秸秆生物炭的准二级动力学 ($R^2 = 0.96$) > 准一级动力学 ($R^2 = 0.94$) > Elovich 模型 ($R^2 = 0.88$) > 颗粒内扩散 ($R^2 = 0.82$). 与其他吸附动力学方程相比, 准二级动力学方程更适合描述水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭的磷吸附动力学特征, 表明这 2 种生物炭材料对磷的吸附过程主要是化学反应^[28,29].

2.4 初始 pH 对磷吸附效果的影响

初始 pH 值对 2 种生物炭材料吸附磷的效果如图 5 所示, 随着初始 pH 的增加, 水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭对磷的吸附容量和去除率均呈现降

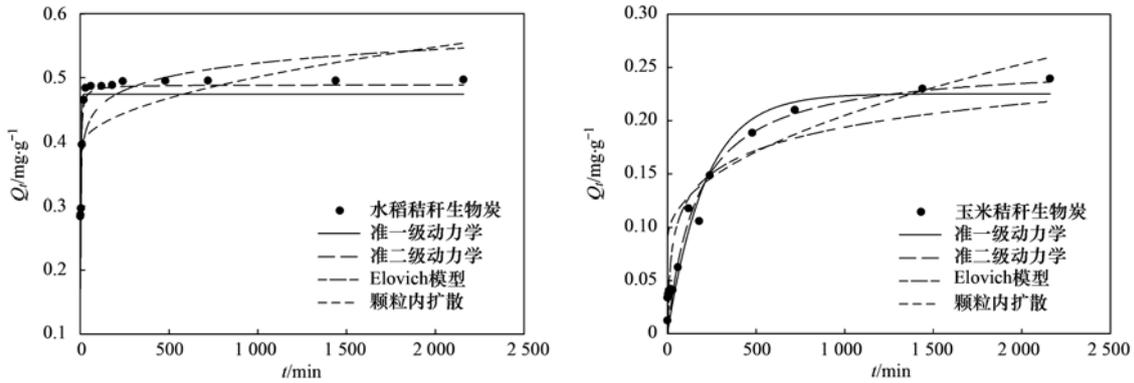


图 4 2 种生物炭材料对磷的吸附动力学拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of phosphorus adsorption kinetics of two biochar materials

表 3 2 种生物炭材料对磷吸附动力学模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of the phosphorus adsorption kinetic model for the two biochar materials

吸附材料	准一级动力学			准二级动力学			Elovich 模型			颗粒内扩散		
	$Q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_1	R^2	$Q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_2	R^2	a	b	R^2	k_i	c	R^2
水稻秸秆生物炭	0.47	0.447	0.61	0.49	1.511	0.84	0.312	0.031	0.75	0.004	0.388	0.35
玉米秸秆生物炭	0.23	0.005	0.94	0.25	0.023	0.96	0.023	0.003	0.88	0.004	0.088	0.82

低趋势. 当 pH 为 3 ~ 11 时, 水稻秸秆生物炭的磷吸附容量范围为 0.32 ~ 0.34 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和去除率范围为 79.3% ~ 85.6%, 远高于玉米秸秆生物炭的 0.02 ~ 0.07 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 4.62% ~ 18.94%. 2 种生物炭最大磷吸附容量和去除率均出现在 pH = 5 时, 即水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭对磷吸附的最佳 pH 为酸性条件. 唐登勇等^[30]的研究也发现类似结果, 这是由于两种生物炭材料的零电荷点 (pH_{pzc}) 分别为 4.4 和 5.0 (图 6); 当 $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ 时, 生物炭表面带负电, 磷酸盐和生物炭之间会产生静电斥力, 导致磷酸盐在高 pH 下难以结合到生物炭材料上^[31]. 另外, 当初始浓度 pH 值较高时, 大量的 OH^- 与 PO_4^{3-} 同时存在, 加剧了对吸附剂表面相同活性位点的竞争, 进而导致高 pH 下磷酸盐吸附量减少^[32].

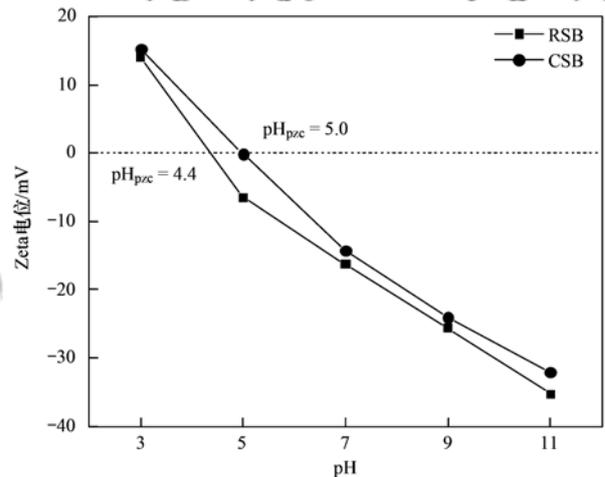


图 6 pH 对生物炭表面 Zeta 电位的影响

Fig. 6 Effect of pH on Zeta potential on biochar surface

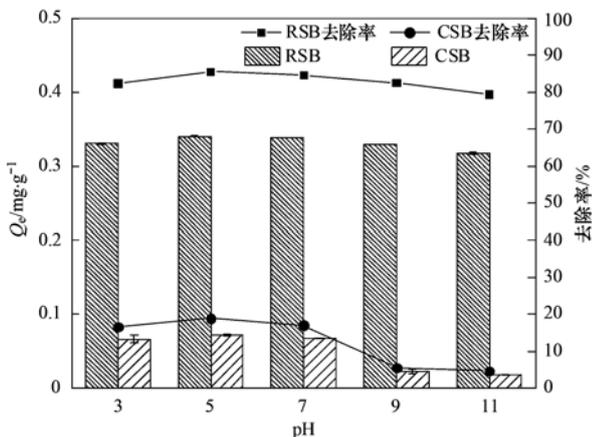


图 5 溶液初始 pH 值对磷吸附效果的影响

Fig. 5 Influence of the initial pH value of the solution on phosphorus adsorption

3 结论

(1) 在制备的水稻秸秆生物炭、玉米秸秆生物炭、绿狐尾藻生物炭、竹炭和木炭中, 仅水稻秸秆和玉米秸秆生物炭对磷具有吸附能力.

(2) 水稻秸秆生物炭对废水磷的吸附能力强于玉米秸秆生物炭, 理论最大吸附量为: 水稻秸秆生物炭 ($9.78 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 玉米秸秆生物炭 ($0.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

(3) 水稻秸秆生物炭的 Mg、Ca、Fe 和 Al 元素含量高于玉米秸秆生物炭的. 水稻秸秆生物炭的比表面积 ($148.30 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) 和总孔体积 ($0.11 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$) 远高于玉米秸秆生物炭的 ($8.26 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$).

(4) 水稻秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭对磷吸

附的最佳 pH 为酸性. 在不同的 pH 范围内 (3.0 ~ 11.0), 水稻秸秆和玉米秸秆生物炭对磷的吸附容量随 pH 增加而呈现降低趋势.

(5) 综合而言, 水稻秸秆生物炭对水体磷具有更强吸附能力, 在污水处理中具有良好应用前景.

参考文献:

- [1] Yin H B, Yan X W, Gu X H. Evaluation of thermally-modified calcium-rich attapulgite as a low-cost substrate for rapid phosphorus removal in constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2017, **115**: 329-338.
- [2] 范艺, 王哲, 赵连勤, 等. 锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1490-1496.
Fan Y, Wang Z, Zhao L Q, *et al.* Modification of diatomite by zirconium and its performance in phosphate removal from water [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1490-1496.
- [3] 林建伟, 王虹, 詹艳慧, 等. 氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 208-219.
Lin J W, Wang H, Zhan Y H, *et al.* Adsorption of phosphate by lanthanum hydroxide/natural zeolite composites from low concentration phosphate solution [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 208-219.
- [4] Singh M, Srivastava R K. Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2011, **6**(1): 3-13.
- [5] Zou H M, Wang Y. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **211**: 87-92.
- [6] Tong D L, Zhuang J, Lee J, *et al.* Concurrent transport and removal of nitrate, phosphate and pesticides in low-cost metal- and carbon-based materials [J]. *Chemosphere*, 2019, **230**: 84-91.
- [7] 孟文娜, 谢杰, 吴德意, 等. 活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 231-236.
Meng W N, Xie J, Wu D Y, *et al.* Study on phosphate removal and recovery by activated alumina [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 231-236.
- [8] Chen B L, Chen Z M, Lv S F. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 716-723.
- [9] Tan X F, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions [J]. *Chemosphere*, 2015, **125**: 70-85.
- [10] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景 [J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(16): 3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(16): 3324-3333.
- [11] 马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 等. 牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1678-1685.
Ma F F, Zhao B W, Diao J R, *et al.* Ammonium adsorption characteristics in aqueous solution by dairy manure biochar [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1678-1685.
- [12] Yao Y, Gao B, Chen J J, *et al.* Engineered carbon (biochar) prepared by direct pyrolysis of Mg-accumulated tomato tissues: Characterization and phosphate removal potential [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **138**: 8-13.
- [13] 于志红, 谢丽坤, 刘爽, 等. 生物炭-锰氧化物复合材料对红壤吸附铜特性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(5): 897-903.
Yu Z H, Xie L K, Liu S, *et al.* Effects of biochar-manganese oxides composite on adsorption characteristics of Cu in red soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(5): 897-903.
- [14] 杨慧敏, 李云桂, 孙权, 等. 颗粒粒径对玉米秸秆生物炭吸附镉的影响 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(6): 2190-2202.
Yang H M, Li Y G, Sun Q, *et al.* Effects of particle size on adsorption of strontium by biochar derived from maize straw [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(6): 2190-2202.
- [15] Meier S, Curaqueo G, Khan N, *et al.* Effects of biochar on copper immobilization and soil microbial communities in a metal-contaminated soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(5): 1237-1250.
- [16] Peng P, Lang Y H, Wang X M. Adsorption behavior and mechanism of pentachlorophenol on reed biochars: pH effect, pyrolysis temperature, hydrochloric acid treatment and isotherms [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **90**: 225-233.
- [17] 马锋锋, 赵保卫. 不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 837-844.
Ma F F, Zhao B W. Sorption of *p*-Nitrophenol by Biochars of corn cob prepared at different pyrolysis temperatures [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 837-844.
- [18] Arun J, Varshini P, Prithvinath P K, *et al.* Enrichment of bio-oil after hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae *C. vulgaris* grown in wastewater: Bio-char and post HTL wastewater utilization studies [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **261**: 182-187.
- [19] 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 等. 木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5876-5883.
Meng Y K, Wang Y, Wang C Y, *et al.* Improvement of nitrogen and phosphorus adsorption and stormwater retention capacity by hardwood biochar as an additive material in filler soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5876-5883.
- [20] 赵敏, 张小平, 王梁嵘. 硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5433-5439.
Zhao M, Zhang X P, Wang L R. Characteristics of phosphorus adsorption in aqueous solution by Si-modified peanut shell biochar [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5433-5439.
- [21] Yin H B, Han M X, Tang W Y. Phosphorus sorption and supply from eutrophic lake sediment amended with thermally-treated calcium-rich attapulgite and a safety evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **285**: 671-678.
- [22] Javadian H. Application of kinetic, isotherm and thermodynamic models for the adsorption of Co (II) ions on polyaniline/polypyrrole copolymer nanofibers from aqueous solution [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, **20**(6): 4233-4241.
- [23] Tang Q, Shi C H, Shi W M, *et al.* Preferable phosphate removal by nano-La (III) hydroxides modified mesoporous rice husk biochars: role of the host pore structure and point of zero charge [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **662**: 511-520.
- [24] 王伟, 杭小帅, 张毅敏, 等. 红色黏土对磷的吸附性能及其机理初探 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011, **27**(2): 109-112.
Wang W, Hang X S, Zhang Y M, *et al.* Phosphorus adsorption of red clay and its mechanism [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, **27**(2): 109-112.

- [25] Ashekuzzaman S M, Jiang J Q. Study on the sorption-desorption-regeneration performance of Ca-, Mg- and CaMg-based layered double hydroxides for removing phosphate from water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **246**: 97-105.
- [26] Shin H, Tiwari D, Kim D J. Phosphate adsorption/desorption kinetics and P bioavailability of Mg-biochar from ground coffee waste [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, **37**, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101484.
- [27] Lü J B, Liu H J, Liu R P, *et al.* Adsorptive removal of phosphate by a nanostructured Fe-Al-Mn trimetal oxide adsorbent [J]. *Powder Technology*, 2013, **233**: 146-154.
- [28] Bulut E, Özacar M, Şengil I A. Equilibrium and kinetic data and process design for adsorption of Congo Red onto bentonite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154** (1-3): 613-622.
- [29] Shepherd J G, Joseph S, Sohi S P, *et al.* Biochar and enhanced phosphate capture: mapping mechanisms to functional properties [J]. *Chemosphere*, 2017, **179**: 57-74.
- [30] 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 等. 改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (6): 2195-2201.
Tang D Y, Huang Y, Xu R C, *et al.* Adsorption behavior of low concentration phosphorus from water onto modified reed biochar [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (6): 2195-2201.
- [31] Yang Q, Wang X L, Luo W, *et al.* Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **247**: 537-544.
- [32] Lin J W, Zhan Y H, Wang H, *et al.* Effect of calcium ion on phosphate adsorption onto hydrous zirconium oxide [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **309**: 118-129.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)