



磷基生物炭对含 Pb^{2+} 废水的吸附特性研究

张世杰¹, 顾卫华^{1,2}, 白建峰¹, 董 滨³, 庄绪宁¹, 赵 静¹

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 浙江工业大学环境学院, 浙江杭州 310014; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

[摘要] 以污泥与含磷试剂(磷酸二氢钾、磷酸二氢钙)为原料制备磷基生物炭(BC600、BC650)并用于废水中 Pb^{2+} 的去除。通过单因素静态吸附实验分别研究了吸附剂添加量、含 Pb^{2+} 废水初始 pH、浓度和吸附时间等对 BC600 和 BC650 吸附水中 Pb^{2+} 的影响。结果表明, 含 Pb^{2+} 废水初始 pH 显著影响 BC600 和 BC650 的吸附效率, 在 pH=5 时, BC600 和 BC650 的吸附量分别为 37 mg/g 和 10 mg/g。吸附动力学和吸附等温模型拟合结果表明 BC600 符合二级动力学模型和 Langmuir 吸附等温模型, BC650 符合一级动力学模型和 Freundlich 吸附等温模型。结合 XRD 与 SEM 分析, BC600 和 BC650 对 Pb^{2+} 的吸附过程包含物理-化学吸附协同作用, 其中 BC600 以化学吸附为主, BC650 以物理吸附为主。

[关键词] 污泥; 热解; 磷基生物炭; 吸附效率; 含铅废水

[中图分类号] X703;O647.33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0111-07

Adsorption properties of phosphorus-based biochar on Pb^{2+} containing wastewater

ZHANG Shijie¹, GU Weihua^{1,2}, BAI Jianfeng¹, DONG Bin³, ZHUANG Xuning¹, ZHAO Jing¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Phosphorus-based biochars (BC600, BC650) were prepared from sludge and phosphorus containing reagents (potassium dihydrogen phosphate, calcium dihydrogen phosphate) and used to remove Pb^{2+} from wastewater. The effects of adsorbent dosage, initial pH, concentration, and adsorption time on Pb^{2+} adsorption by BC600 and BC650 were investigated using a single factor static adsorption experiment. Results indicated that the initial pH of Pb^{2+} wastewater had a significant effect on the adsorption efficiency of BC600 and BC650. When the pH was 5, the adsorption capacity of BC600 and BC650 were 37 mg/g and 10 mg/g, respectively. Adsorption kinetic and isotherm fitting models revealed that BC600 accorded with the second-order kinetic and Langmuir adsorption isotherm model, while BC650 accorded with the first-order kinetic and Freundlich adsorption isotherm model. XRD and SEM analyses indicated that the adsorption process of phosphorus-based biochar was the synergic action of physics and chemistry adsorption, of which BC600 mainly showed chemical adsorption and BC650 mainly showed physical adsorption.

Key words: sludge; pyrolysis; phosphorus-based biochar; adsorption efficiency; Pb^{2+} containing wastewater

铅(Pb)污染主要来源于电池处理、化妆品制造和油漆处理等行业^[1]。 Pb^{2+} 在人体内具有蓄积性且不易排出, 过量摄入 Pb^{2+} 会导致神经功能损伤^[2]。目前对含铅废水的处理方法主要包括化学法、生物

法和吸附法, 其中化学法极易造成二次污染, 生物法对高浓度含铅废水处理效率低下^[3-4]。由于吸附法所用材料具有成本低廉、性能稳定、无二次污染、可循环利用等优点, 近年来关于吸附材料的开发与应

用的研究成为了关注焦点。

污泥作为污水处理过程中不可避免的副产物,其产生量随着城镇污水处理量的增加而快速增加。据统计,我国在2020年的污泥产生量就超过了6 000万t^[5]。污泥中含有大量的重金属、有机污染物、微塑料、抗生素和病原体,若处理不当,极易造成严重的二次污染^[6]。然而,污泥也是一种潜在资源,关于污泥高值化利用的研究获得了研究者的青睐,通过热解技术制备的污泥基生物炭可用作土壤改良剂、吸附剂和建筑材料等。唐彩艳等^[7]研究了不同热解温度生成的生物炭对Cd²⁺的吸附性能,发现生物炭具有较好的吸附作用,且热解温度显著影响生物炭的吸附效率。

但是污泥中含有大量不稳定的重金属,这些重金属的存在又限制了污泥的高值化利用。因此,有较多研究聚焦于解决污泥中的重金属问题。污泥与含磷试剂共热解可以稳定污泥中的重金属^[8]。然而,关于污泥与含磷试剂共热解后所得残渣(磷基生物炭)的环境应用未见报道。

本研究以含磷试剂(磷酸二氢钾和磷酸二氢钙)为添加剂,与污泥共热解制备磷基生物炭,并对其性质进行表征分析;通过单因素静态吸附实验研究生物炭添加量、含Pb²⁺溶液初始pH、初始Pb²⁺浓度对磷基生物炭吸附含铅废水的影响;并解析了磷基生物炭吸附Pb²⁺的机理,以期为污泥资源化利用及含铅废水处理提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 污泥来源及前处理

实验污泥取自广东省惠州市某城镇污水处理厂,该厂工业污水和生活污水的来水比例约为3:7。将污泥置于105℃烘箱中干燥至恒重,研磨过筛(250 μm)后置于自封袋中保存。

1.2 磷基生物炭的制备

参照本课题组前期关于磷基生物炭制备及其环境风险方面的研究^[9],选取重金属固定效果好的共热解条件作为本次实验制备磷基生物炭的条件。

添加磷酸二氢钾共热解组:将干污泥与质量分数5%的磷酸二氢钾混合均匀后置于石英舟内,放于管式炉中;热解条件为:升温速率10℃/min,热解温度600℃,停留时间60 min,氮气流速0.5 L/min;

收集热解后的磷基生物炭,标记为BC600。

添加磷酸二氢钙共热解组:将干污泥与质量分数15%的磷酸二氢钙混合均匀后置于石英舟内,放于管式炉中;热解条件为:升温速率5℃/min,热解温度650℃,停留时间60 min,氮气流速0.5 L/min;收集热解后的磷基生物炭,标记为BC650。

1.3 吸附实验

1.3.1 吸附剂添加量对吸附效果的影响

取25 mL 100 mg/L的Pb(NO₃)₂溶液,分别添加10~100 mg吸附剂,每10 mg为一个梯度,用稀硝酸和氢氧化钠调节溶液pH为5,振荡24 h后取样并测定吸附后Pb²⁺浓度。

1.3.2 pH对吸附效果的影响

分别取25 mL 100 mg/L的Pb(NO₃)₂溶液,用稀硝酸和氢氧化钠调节溶液pH为1~8,添加60 mg吸附剂,振荡24 h后取样并测定吸附后Pb²⁺浓度。

1.3.3 吸附动力学实验

取25 mL 100 mg/L pH=5的Pb²⁺溶液,投加60 mg吸附剂,振荡10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、5 h、7 h、24 h后取样并测定吸附后Pb²⁺浓度。

1.3.4 吸附等温实验

配制1 000 mg/L的Pb²⁺溶液,分别稀释至100、200、400、600、800 mg/L,并用稀硝酸和氢氧化钠调节溶液pH为5,分别将60 mg吸附剂加入25 mL上述质量浓度的Pb²⁺溶液,振荡7 h后取样并测定吸附后Pb²⁺浓度。

1.4 表征与数据分析

分别采用X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶红外光谱仪(FT-IR)和Bel-Max氮吸附仪分析磷基生物炭的晶体结构、微观形貌、表面基团和孔隙结构;利用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)分析溶液中Pb²⁺浓度。采用一级动力学和二级动力学模型对吸附动力学实验数据进行拟合分析;利用Langmuir和Freundlich吸附等温模型对吸附等温实验数据进行拟合分析;使用Excel 2010与MID Jade 6分析数据、Origin 2018制图。

2 结果与讨论

2.1 材料的表征分析

污泥与磷基生物炭的比表面积和孔容见表1。

与污泥相比,磷基生物炭的比表面积、微孔容积等

表1 污泥与磷基生物炭比表面积

Table 1 Specific surface area of sludge and phosphorus-based biochar

材料	原污泥	BC600	BC650
微孔容积 $V_m/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	4.350	10.150	18.047
比表面积 $a_{s, \text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	18.924	44.178	78.549
总孔隙体积 $V_t/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	0.063	0.096	0.140

物理性质参数显著增加。比表面积由原污泥的 $18.924 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加至 $44.178 \text{ m}^2/\text{g}$ (BC600) 和 $78.549 \text{ m}^2/\text{g}$ (BC650);微孔容积则由 $4.35 \text{ cm}^3/\text{g}$ 增加至 $10.15 \text{ cm}^3/\text{g}$ (BC600)和 $18.047 \text{ cm}^3/\text{g}$ (BC650);总孔隙体积由 $0.063 \text{ cm}^3/\text{g}$ 增加至 $0.096 \text{ cm}^3/\text{g}$ (BC600) 和 $0.140 \text{ cm}^3/\text{g}$ (BC650)。上述结果与Yongjie XUE等^[10]研究结果一致。

图1显示了污泥和磷基生物炭的SEM图。

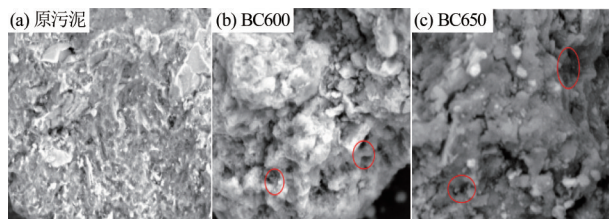


图1 污泥与磷基生物炭的SEM

Fig. 1 SEM of sludge and phosphorus-based biochar

由图1可知,磷基生物炭表面均出现了孔洞,且BC600的微孔多于BC650。孔洞产生的原因一方面是污泥中含有的挥发性有机物在高温条件下迅速分解,产生大量气体引起孔洞大量生成^[11];另一方面磷酸二氢盐在高温条件下发生脱水缩合反应,产生的水汽挥发也进一步导致孔洞的生成。磷基生物炭比表面积和孔洞的增加有利于 Pb^{2+} 扩散到内部,增加吸附量^[12]。

图2为污泥与磷基生物炭的红外光谱扫描结果。

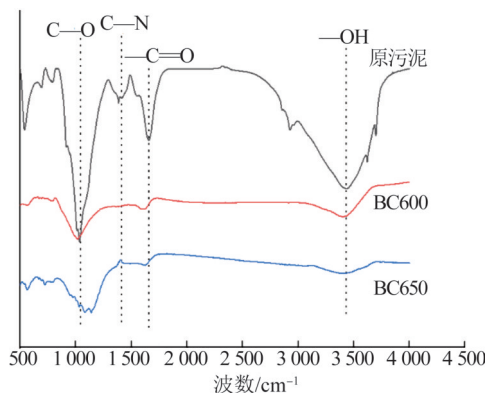


图2 污泥与磷基生物炭的红外光谱

Fig. 2 FT-IR spectra of sludge and phosphorus-based biochar

由图2可知,与污泥相比,磷基生物炭的峰值强度降低。 1042 cm^{-1} 处为醇类C—O伸缩振动峰,高温热解造成污泥中大量含氧化合物挥发,磷基生物炭此处的峰值强度较弱^[13]。 1410 cm^{-1} 为C—N伸缩振动峰,磷基生物炭未发现该峰,张伟等^[14]用磷酸活化-微波热解制备的生物炭也有类似的现象,说明高温热解使含C—N基团的有机物发生了分解。 3440 cm^{-1} 为一OH的伸缩振动峰,磷基生物炭此处的峰值强度较弱,表明污泥热解过程中发生了脱水反应,一OH含量减少^[15]。 1657 cm^{-1} 处为酮类—C=O的伸缩振动峰,由于热解过程中发生脱羧反应,磷基生物炭在此处的峰值降低^[16]。

图3为污泥与磷基生物炭的XRD谱图。

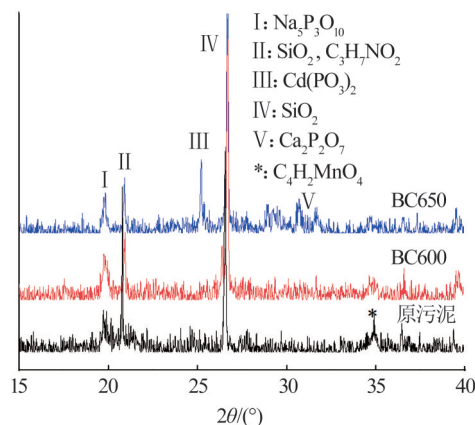


图3 污泥与磷基生物炭的XRD

Fig. 3 XRD spectra of sludge and phosphorus-based biochar

由图3可知,污泥与磷基生物炭在 26.4° (SiO_2)处都有最强的峰^[17], 19.7° 处为三聚磷酸钠($\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$)的衍射峰。污泥在 20.7° 处衍射峰较强,由 SiO_2 与2-硝基丙烷($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$)共同衍射构成,磷基生物炭峰值降低,原因是 $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ 高温分解,此处峰变为 SiO_2 晶体的单独衍射峰。BC650在 25° 处出现 $\text{Cd}(\text{PO}_3)_2$ 衍射峰,磷酸二氢钙与 Cd^{2+} 发生了阳离子交换,证明了含磷材料对重金属有较好的稳定性。BC650在 $28^\circ \sim 32^\circ$ 范围内的衍射峰是磷酸与钙形成的多种化合物($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Ca}_4\text{P}_6\text{O}_{19}$ 等)的晶体衍射峰,原因可能是磷酸二氢钙添加量过大,形成了磷酸钙盐的晶体。污泥在 34.9° 处的峰是由有机物 $\text{C}_4\text{H}_2\text{MnO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 衍射导致,制备生物炭时经过高温热解,有机物挥发,该峰减弱。

2.2 吸附影响因素

2.2.1 吸附剂投加量对吸附效率的影响

磷基生物炭吸附剂投加量对吸附效率的影响见图4。

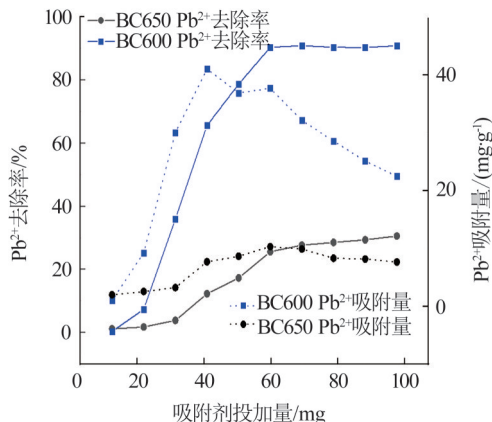


图4 磷基生物炭添加量对吸附效率的影响

Fig. 4 Effect of the dosage of phosphorus-based biochar on adsorption efficiency

由图4可知,当2种吸附剂的投加量为10~20 mg时,Pb²⁺去除率上升缓慢;当BC600吸附剂投加量超过20 mg、BC650投加量超过30 mg时,Pb²⁺去除率明显上升;溶液中Pb²⁺的去除率随磷基生物炭添加量的增加而上升,最后趋于平缓。该结果与杨青等^[18]研究结果一致。可能的原因是吸附剂投加量的增加会增大吸附剂的总比表面积,为Pb²⁺提供更多吸附点位,使得Pb²⁺的去除率增大^[19]。BC600对Pb²⁺吸附量在投加量大于40 mg时呈下降趋势,因为吸附剂投加量增多,表面的吸附点位增多,但Pb²⁺浓度较低,吸附点位剩余,从而导致吸附量下降^[20]。BC650吸附剂投加量为60 mg时,吸附量达到峰值,此时,吸附量与去除率均达到最优。综合考虑去除率和吸附量,后续实验BC600和BC650的投加量均选择60 mg。

2.2.2 pH对吸附效率的影响

pH会影响Pb²⁺的存在状态、电离程度、吸附剂表面电荷,从而影响Pb²⁺去除效率。图5为溶液pH对Pb²⁺去除效率的影响。

由图5可知,当pH<3时,BC600对Pb²⁺有微弱的吸附作用,因为pH较低时,溶液中存在的大量H⁺和Pb²⁺竞争吸附点位,影响了对Pb²⁺的去除效果^[21-22]。随着溶液pH增加,H⁺浓度降低,竞争能力减弱。在pH<6时,pH对BC650的影响和BC600大致相同,均

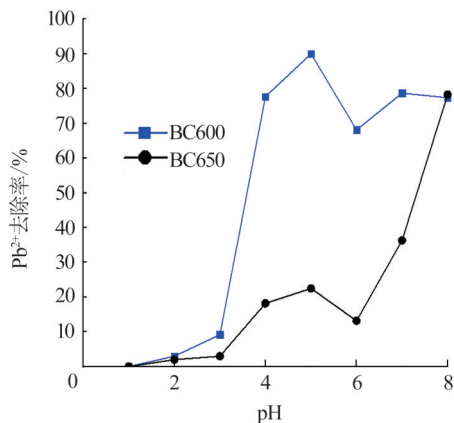


图5 pH对吸附效率的影响

Fig. 5 Effect of pH on adsorption efficiency

在pH>3后Pb²⁺去除率逐渐升高并且在pH=5时有较高的吸附效率。虽然2种吸附剂对Pb²⁺的去除率在pH>6时有明显上升,但根据汪爱河等^[23]对不同pH条件下Pb²⁺存在形式的研究,当pH>6时,溶液中Pb²⁺主要以Pb(OH)₂的形式存在,生成氢氧化物沉淀,直接导致溶液中剩余Pb²⁺浓度降低,并非发生吸附反应。因此,在pH为5时,吸附效率最高。后续实验中溶液初始pH均调至5.0。

2.3 吸附动力学实验

图6为磷基生物炭对Pb²⁺吸附量随时间的变化曲线。

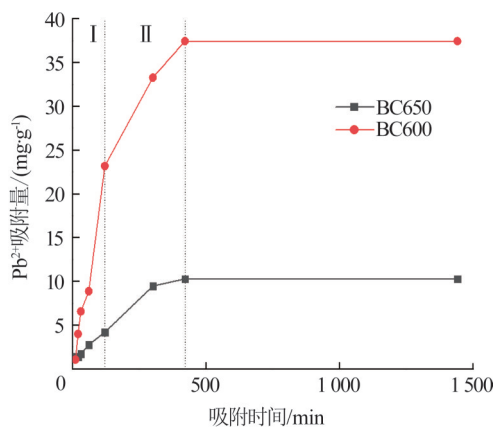


图6 吸附时间对Pb²⁺吸附量的影响

Fig. 6 Effect of time on adsorption capacity

由图6可知,在吸附实验的第一阶段(前60 min),Pb²⁺吸附量随时间的增加呈上升趋势并且上升速率较快,原因是吸附点位较多,重金属与吸附点位迅速结合^[24];在吸附实验第二阶段(60~400 min),随着吸附点位逐渐饱和,吸附效率上升速率较慢,与

饶清华等^[25]提到的吸附过程的两段吸附相似,在400 min后吸附达到平衡,BC600对Pb²⁺的吸附量为37 mg/g,BC650对Pb²⁺的吸附量为10 mg/g。

对磷基生物炭分别进行了一级动力学与二级动力学模型拟合,结果见表2。

表2 吸附动力学参数

Table 2 Adsorption kinetic parameters						
材料	拟一级动力学			拟二级动力学		
	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	k_1/min^{-1}	R^2	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	R^2
BC650	10.60	0.005 00	0.974	12.30	0.000 527	0.945
BC600	38.75	0.006 44	0.953	45.27	0.000 157	0.986

由表2可知,BC600符合二级动力学模型,证明了BC600吸附Pb²⁺是以化学吸附为主,吸附过程中物理、化学吸附并存^[26]。BC650符合一级动力学模型,吸附过程中以物理吸附为主^[27]。物理吸附为可逆过程,且吸附较慢,因此BC650的吸附量低于BC600。

2.4 吸附等温实验

图7为Pb²⁺初始质量浓度对Pb²⁺去除率的影响。

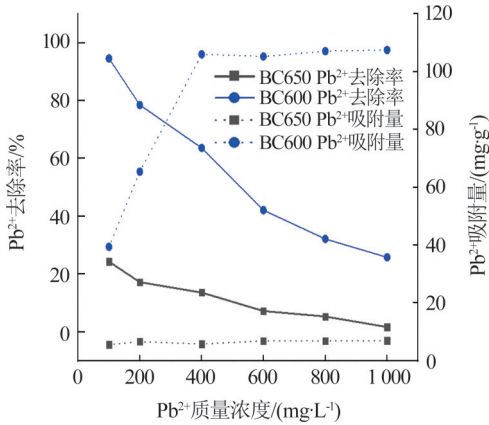


图7 Pb²⁺质量浓度对吸附效率的影响
Fig. 7 Effect of Pb²⁺ mass concentration on adsorption efficiency

由图7可见,BC600去除率随着Pb²⁺质量浓度增加呈下降趋势。当Pb²⁺初始质量浓度较低时,吸附量较低,吸附点位未达到饱和;当Pb²⁺初始质量浓度升高时,吸附剂表面吸附点位逐渐被占满,吸附量逐渐增大并趋于饱和,同时由于静电作用和基团间相互干扰等原因,Pb²⁺的去除率降低^[28]。与BC600相似,随着Pb²⁺初始质量浓度增大,BC650对Pb²⁺的去

除率降低,但吸附量只有小幅度上升,随后趋于平衡。

对2种磷基生物炭进行吸附等温模型拟合,结果见表3。

表3 吸附等温模型参数

Table 3 Adsorption isotherm model parameters						
材料	Langmuir吸附等温模型			Freundlich吸附等温模型		
	R^2	K_L	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2	K_F	n
BC600	0.970	0.004 48	138.5	0.822	10.588	2.94
BC650	0.837	0.102	11.76	0.930	0.085	27

由表3可知,BC600更符合Langmuir吸附等温模型,证明BC600为单分子层表面吸附^[29],而BC650更符合Freundlich吸附等温模型,证明BC650为多分子层吸附。单分子层一般是化学吸附,具有较强选择性,不可逆;物理吸附一般是单层或多层吸附,可逆,选择性小,因此BC650的吸附量较低。

2.5 吸附机理

磷基生物炭吸附Pb²⁺前后的SEM和XRD表征见图8。

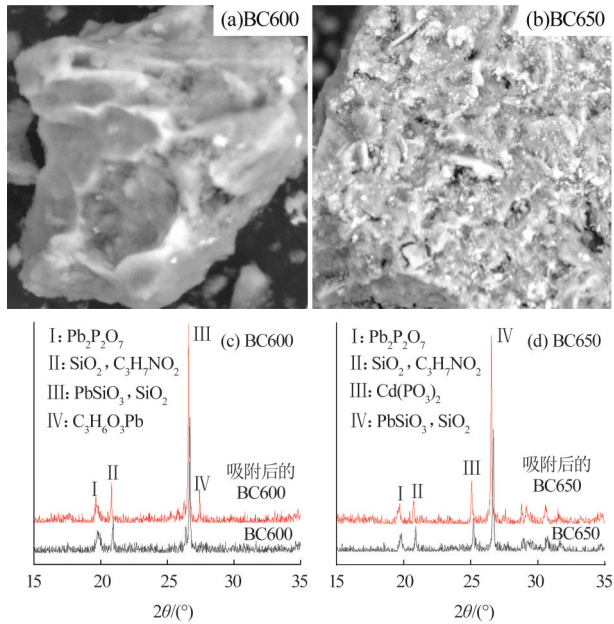


图8 磷基生物炭吸附后表征
Fig. 8 Characterization of phosphorus-based biochar after adsorption

图8(a)和(b)分别为BC600、BC650吸附Pb²⁺之后的SEM结果。与吸附前相比,表面微孔消失,较为平整,说明磷基生物炭发生了物理吸附。图8(c)和(d)分别为BC600与BC650吸附Pb²⁺前后的XRD

结果, BC600与BC650在 26.6° 处的峰值增强, 经分析是形成了 PbSiO_3 。 19.7° 处的特征峰出现了微弱的偏移, 是 Pb^{2+} 与聚磷酸钠发生阳离子交换, 形成了 $\text{Pb}_2\text{P}_2\text{O}_7$, 并且BC600在此处的峰值强度略高于BC650。吸附后的BC600在 27.4° 处有特征峰, 是因为 Pb^{2+} 取代了碱性基团上的 H^+ , 形成了 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3\text{Pb}$ 。XRD分析也可以证明BC650化学吸附参与较少。2种材料在吸附过程中均发生了物理与化学吸附。其中BC600主要为化学吸附, BC650主要为物理吸附。

根据王路星等^[30]的研究, 生物炭吸附涉及多过程协同。由XRD和FT-IR表征可知, 磷基生物炭存在羟基、羧基等基团, 并且存在磷酸盐及硅酸盐化合物。 Pb^{2+} 可以取代基团上的氢原子以及和磷酸或硅酸盐化合物发生阳离子交换。随着吸附的进行, Pb^{2+} 也会在生物炭表面形成沉淀。

3 结论

(1) 含 Pb^{2+} 溶液初始pH对BC600和BC650的吸附效率有显著影响。

(2) 当100 mg/L的含 Pb^{2+} 废水pH=5, 吸附剂添加量为60 mg, 吸附平衡时间为400 min时, BC600和BC650的吸附量最高, 分别达37 mg/g和10 mg/g。

(3) BC600符合Langmuir吸附等温模型, 为单分子层吸附, 以化学吸附为主, 且符合二级动力学模型; BC650符合Freundlich吸附等温模型, 为多分子层吸附, 以物理吸附为主, 且符合一级动力学模型。

参考文献

- [1] NI Bingjie, HUANG Qisu, WANG Chen, et al. Competitive adsorption of heavy metals in aqueous solution onto biochar derived from anaerobically digested sludge[J]. *Chemosphere*, 2018, 219: 351-357.
- [2] LEE X J, LEE L Y, HIEW B Y Z, et al. Multistage optimizations of slow pyrolysis synthesis of biochar from palm oil sludge for adsorption of lead[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245 (Part A): 944-953.
- [3] 余守宽, 潘欢, 梁莉莉. 二氧化锰改性沸石对废水中 Pb^{2+} 的吸附性能及其影响因素研究[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(2): 204-212.
YU Shoukuan, PAN Huanying, LIANG Lili. Adsorption of Pb^{2+} in wastewater by manganese dioxide-modified zeolite and influencing factors[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(2): 204-212.
- [4] 杨晶, 李丽, 季必霄, 等. 生物炭吸附废水中重金属研究进展[J]. *能源环境保护*, 2020, 34(6): 1-7.
- [5] YANG Jing, LI Li, JI Bixiao, et al. Research progress on adsorption of heavy metals in wastewater by biochar[J]. *Energy Environmental Protection*, 2020, 34(6): 1-7.
- [6] 罗宿星, 陈华仕, 罗肖雪, 等. 磁性纳米粒子/污泥基复合材料吸附性能研究进展[J]. *工业水处理*, 2021, 41(4): 25-30.
LUO Suxing, CHEN Huashi, LUO Xiaoxue, et al. Research progress on adsorption characteristics of magnetic nanoparticles/sludge composites[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(4): 25-30.
- [7] ZHOU Guangli, GU Yifan, YUAN Haoran, et al. Selecting sustainable technologies for disposal of municipal sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104881.
- [8] 康彩艳, 李秋燕, 刘金玉, 等. 不同热解温度生物炭对 Cd^{2+} 的吸附影响[J]. *工业水处理*, 2021, 41(5): 68-72.
KANG Caiyan, LI Qiuyan, LIU Jinyu, et al. Effect of biochar at different pyrolysis temperatures on the adsorption of Cd^{2+} [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(5): 68-72.
- [9] GU Weihua, GUO Jiangshan, BAI Jianfeng, et al. Co-pyrolysis of monobasic potassium phosphate and plastic processing sludge: Characteristics and environmental risks of potentially toxic elements[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111434.
- [10] GU Weihua, BAI Jianfeng, DONG Bin, et al. Heavy metals speciation and its bioavailability in sewage sludge pyrolysis residue[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1: 1107.
- [11] XUE Yongjie, WANG Chen, HU Zhenhua, et al. Pyrolysis of sewage sludge by electromagnetic induction: Biochar properties and application in adsorption removal of Pb(I), Cd(II) from aqueous solution[J]. *Waste Management*, 2019, 89: 48-56.
- [12] 李艳春, 张鹏会, 张强, 等. 4种生物炭对阳离子染料吸附性能[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(7): 101-110.
LI Yanchun, ZHANG Penghui, ZHANG Qiang, et al. Adsorption of dye in aqueous solution by four biochar[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 43(7): 101-110.
- [13] PAN Xuqin, GU Zhepei, CHEN Weiming, et al. Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142104.
- [14] ZHAO Yijun, FENG Dongdong, ZHANG Yu, et al. Effect of pyrolysis temperature on char structure and chemical speciation of alkali and alkaline earth metallic species in biochar[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 141: 54-60.
- [15] 张伟, 杨柳, 蒋海燕, 等. 污泥活性炭的表征及其对Cr(VI)的吸附特性[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(4): 1439-1446.
ZHANG Wei, YANG Liu, JIANG Haiyan, et al. Characterization of sludge-based activated carbon and its adsorption properties on Cr(VI)[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(4): 1439-1446.
- [16] 杨艳琴, 崔敏华, 任屹罡, 等. 热解温度诱导下污泥生物炭特性和吸附能力相关性[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2020, 37(2):

- 194-201.
- YANG Yanqin, CUI Minhua, REN Yigang, et al. Correlations between the physicochemical characteristics and adsorption capacity of sludge-based biochar induced at pyrolysis temperature[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2020, 37(2):194-201.
- [16] 王兴栋,张斌,余广伟,等.不同粒径污泥热解制备生物炭及其特性分析[J].化工学报,2016,67(11):4808-4816.
- WANG Xingdong, ZHANG Bin, YU Guangwei, et al. Preparation of biochar with different particle sized sewage sludge and its characteristics[J]. CIESE Journal, 2016, 67(11):4808-4816.
- [17] ZHANG He, XUE Gang, CHEN Hong, et al. Magnetic biochar catalyst derived from biological sludge and ferric sludge using hydrothermal carbonization: Preparation, characterization and its circulation in Fenton process for dyeing wastewater treatment [J]. Chemosphere, 2018, 191:64-71.
- [18] 杨青,龙云川,朱明石,等.改性燃煤废弃物吸附剂对水中 Pb^{2+} 的去除[J].工业水处理,2020,40(9):44-48.
- YANG Qing, LONG Yunchuan, ZHU Mingshi, et al. Removal of lead ions in solution by modified coal waste adsorbent[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9):44-48.
- [19] AMEN R, YASEEN M, MUKHTAR A, et al. Lead and cadmium removal from wastewater using eco-friendly biochar adsorbent derived from rice husk, wheat straw, and corn cob[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2020, 1:100006.
- [20] LONG Yunchuan, JIANG Juan, HU Jing, et al. Removal of $Pb(II)$ from aqueous solution by hydroxyapatite/carbon composite: Preparation and adsorption behavior[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 577:471-479.
- [21] ZHANG Junjie, SHAO Jingai, JIN Qianzheng, et al. Effect of deashing on activation process and lead adsorption capacities of sludge-based biochar[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716:137016.
- [22] 伍荣军,张军,王晟亦,等.生物沥浸改性后污泥基生物炭对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附[J].中国给水排水,2020,36(1):80-86.
- WU Rongjun, ZHANG Jun, WANG Shengyi, et al. Adsorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} by bioleaching modified sludge-based biochar[J]. China Water and Wastewater, 2020, 36(1):80-86.
- [23] 汪爱河,张纯,张伟,等.硫酸活化市政污泥吸附 Pb^{2+} [J].环境工程学报,2015,9(6):2887-2892.
- WANG Aihe, ZHANG Chun, ZHANG Wei, et al. Adsorption of Pb^{2+} ions by activated municipal sludge with sulfuric acid[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6):2887-2892.
- [24] 汪怡,李莉,宋豆豆,等.玉米秸秆改性生物炭对铜、铅离子的吸附特性[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1303-1313.
- WANG Yi, LI Li, SONG Doudou, et al. Copper and lead ion adsorption characteristics of modified corn stalk biochar[J]. Journal of Agro-Environment Sciences, 2020, 39(6):1303-1313.
- [25] 饶清华,林秀珠,邱宇,等.活性污泥对 Pb^{2+} 的生物吸附特征研究[J].工业用水与废水,2009,40(6):53-56.
- RAO Qinghua, LIN Xiuzhu, QIU Yu, et al. Character of Pb^{2+} bio-adsorption by activated sludge[J]. Industrial Water and Wastewater, 2009, 40(6):53-56.
- [26] 张娟香,赵保卫,马锋锋,等.造纸污泥生物炭对四环素的吸附特性及机理[J].中国环境科学,2020,40(9):3821-3828.
- ZHANG Juanxiang, ZHAO Baowei, MA Fengfeng, et al. Adsorption characteristics and mechanism of tetracycline by biochars derived from paper industry sludge [J]. China Environmental Science, 2020, 40(9):3821-3828.
- [27] 蔡伟成,郭牧林.壳聚糖基印迹水凝胶微球对 $Cr(VI)$ 的选择性吸附研究[J].水利水运工程学报,2021,2:130-137.
- CAI Weicheng, GUO Mulin. Selective adsorption of $Cr(VI)$ on ion-imprinted chitosan gel microspheres[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021, 2:130-137.
- [28] 江孟,胡学伟,TRUNG N D,等.好氧颗粒污泥对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附[J].水处理技术,2013,39(2):53-56.
- JIANG Meng, HU Xuewei, TRUNG N D, et al. Adsorption of Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} by aerobic granular sludge and the influencing factors[J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(2):53-56.
- [29] 芦文城,葛绍亮,纪丽丽.紫菜制备生物炭对对二甲苯的吸附性能研究[J].环境科学与技术,2020,43(12):21-28.
- LU Wencheng, GE Shaoliang, JI Lili. Study on the adsorption properties of *p*-xylene on biochar prepared from laver[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43(12):21-28.
- [30] 王路星,周新涛,罗中秋,等.农林废弃物吸附废水中重金属 Pb^{2+} 的性能及机理研究进展[J].材料导报,2020,34(17):17115-17123.
- WANG Luxing, ZHOU Xintao, LUO Zhongqiu, et al. Research progress of the properties and mechanism of heavy metal Pb^{2+} absorbed by agricultural and forestry waste in wastewater[J]. Materials Reports, 2020, 34(17):17115-17123.

[作者简介] 张世杰(1998—),硕士研究生。E-mail:1878666179@qq.com。通讯作者:白建峰,博士,教授。E-mail:jfbai@sspu.edu.cn。

[收稿日期] 2021-12-16(修改稿)