

文章编号:1674-9669(2024)03-0457-07 DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2024.03.016

引文格式:左华伟, 刘祖文, 余正旺, 等. 玉米秸秆生物炭负载羟基磷灰石对稀土钇的吸附特性研究[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(3):457-463.

## 玉米秸秆生物炭负载羟基磷灰石对稀土钇的吸附特性研究

左华伟<sup>1</sup>, 刘祖文<sup>\*1,2</sup>, 余正旺<sup>1</sup>, 罗进<sup>1</sup>, 田帅<sup>1</sup>, 李鑫鹏<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学赣州市流域污染模拟与控制重点实验室,江西 赣州 341000; 2. 南昌工程学院鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室,南昌 330099)

**摘要:** 钇作为高丰度稀土元素,广泛应用于各领域。在离子型稀土开采过程中,稀土母液会扩散至矿区周边水体,造成稀土资源浪费。为找寻高效吸附稀土钇的材料,本研究选用玉米秸秆烧制生物炭(BC),并负载羟基磷灰石制备生物炭复合材料(HAP@BC)。利用 SEM、XRD 和 FTIR 对 HAP@BC 进行表征,单因素吸附实验考察初始 Y<sup>3+</sup>浓度、生物炭投加量、pH、转速及吸附温度等因素对吸附性能的影响,吸附等温线分析其吸附特性,解吸实验考察其循环利用性能。结果表明,相比 BC, HAP@BC 的吸附量提升了 3 倍,pH 为 4.0 时有最大吸附量为 333.83 mg/g。吸附过程符合 Langmuir 单分子层吸附模型,且 HAP@BC 具有良好的循环利用性能,是一种潜在的 Y<sup>3+</sup>高效吸附剂。

**关键词:** 生物炭; 羟基磷灰石; 稀土钇; 影响因素; 吸附特性

中图分类号:X705; X712 文献标志码:A

### Study on adsorption properties of yttrium on corn straw biochar loaded hydroxyapatite

ZUO Huawei<sup>1</sup>, LIU Zuwen<sup>\*1,2</sup>, YU Zhengwang<sup>1</sup>, LUO jin<sup>1</sup>, TIAN Shuai<sup>1</sup>, LI Xinpeng<sup>1</sup>

(1.Ganzhou Key Laboratory of Basin Pollution Simulation and Control, Jiangxi University of Science and Technology , Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of the Hydraulic Engineering Safety and Efficient Utilization of Water Resources of Poyang Lake Basin(NHEP),Nanchang 330099 ,China)

**Abstract:** As a high abundance rare earth element, yttrium is widely used in various fields. In the mining process of ion-type rare earth, rare earth mother liquor will diffuse to the water body around the mining area, resulting in the waste of rare earth resources. To find an efficient material for absorbing rare earth yttrium, biochar (BC) was fired from corn straw and loaded with hydroxyapatite to prepare biochar composite material (HAP@BC). HAP@BC was characterized with SEM, XRD and FTIR. Single-factor adsorption experiments were conducted to investigate the effects of initial Y<sup>3+</sup> concentration, biochar dosage, pH, rotational speed and adsorption temperature on adsorption properties. Adsorption isotherms were used to analyze its adsorption characteristics, and desorption experiments were conducted to investigate its recycling performance. The results show that compared to BC, the adsorption capacity of HAP@BC has increased by three times, with a maximum adsorption capacity of 333.83 mg/g at pH 4.0. The adsorption process conforms to Langmuir monolayer adsorption model, and HAP@BC has good recycling

收稿日期:2023-04-24;修回日期:2023-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52160019)

通信作者:刘祖文(1969— ),教授,主要从事离子型稀土矿区土壤氮化物、重金属迁移转化规律,东江源流域水环境与水生态方面的研究。E-mail: liuzw@jxust.edu.cn

performance, which is a potential  $\text{Y}^{3+}$  high-efficiency adsorbent.

**Keywords:** biochar; hydroxyapatite; rare earth yttrium; influencing factors; adsorption characteristic

钇是高丰度稀土元素,我国每年氧化钇产量超过7 000 t。在部分南方离子型稀土矿区中钇的氧化物含量甚至达到了65%<sup>[1]</sup>。在离子型稀土开采过程中,由于防渗漏及收液系统不完善<sup>[2]</sup>,部分含钇稀土母液在降雨淋溶作用下会通过地下渗漏和地表径流等进入周边水体<sup>[3]</sup>,造成稀土资源浪费和周边环境污染。目前,对稀土的分离和富集方法(如溶剂萃取、离子交换、化学沉淀等)都存在一些缺点<sup>[4]</sup>,而近几年兴起的生物炭吸附技术在去除重金属领域显示了其巨大应用潜力。

生物炭是一种生物质等有机材料通过高温限氧热解主要由碳元素组成的稳定难溶性固态物质<sup>[5]</sup>,具有来源广泛、制备简单、成本低廉、无二次污染、存储方便等优点<sup>[6]</sup>。同时,其含有大量碳元素,稳定性高、比表面积大,表面活性官能团较多<sup>[7]</sup>,是良好的吸附剂,已被广泛应用于污水处理过程<sup>[8]</sup>,同时也在吸附稀土离子领域有一定的应用前景<sup>[9]</sup>。然而,生物炭自身表面官能团、比表面积有限,吸附效果并不如意<sup>[10]</sup>,为充分利用生物炭的优势,众多研究者不断探索生物炭的改性技术,其中,把新型高性能材料负载于生物炭上,将所负载材料的性质与生物炭的性质结合,从而提高生物炭的理化性质和处理效果,较其他改性方式效果更好<sup>[11-13]</sup>,羟基磷灰石 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2, \text{HAP}]$ 就是其中的一种。

本文采用玉米秸秆、无水氯化钙、磷酸二氢钾等制备了玉米秸秆生物炭负载羟基磷灰石复合材料(HAP@BC),通过单因素实验考察了其对稀土钇的吸附效果,并进行了吸附等温曲线拟合,通过解吸实验探索了材料的循环利用性能,以期为HAP@BC在高效吸附稀土钇的应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

六水合硝酸钇、磷酸二氢钾、乙二胺四乙酸(EDTA)购自国药集团化学试剂有限公司,无水氯化钙、氢氧化钾、硝酸购自西陇科学股份有限公司,均为分析纯。实验所用水为去离子水,所用玉米秸秆取自当地农户。

主要实验仪器:电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP,美国Agilent,730OES),傅里叶红外光谱仪(FTIR,美国Thermo Scientific,Nicolet iS5),扫描电子显微镜(SEM,德国ZEISS,GeminiSEM300),X射

线衍射仪(XRD,德国Bruker,D8 Advance),箱式高温马弗炉(精中科技,JK1700-45Z),水热反应釜(西安仪贝尔,KH-50ML-B82),水浴恒温振荡器(常州市鑫鑫实验,SHA-B)。

### 1.2 材料制备

将玉米秸秆装入石墨坩埚中,在700 °C的马弗炉内烧制2.5 h,自然冷却用去离子水清洗3遍,放入干燥箱中调至60 °C烘干,研磨后得到原始生物炭,记为BC。

采用酸性水热法<sup>[14]</sup>负载羟基磷灰石:向100 mL离心管中加入50 mg的BC和25 mL浓度为0.2 mol/L的 $\text{CaCl}_2$ 溶液及15 mL浓度为0.2 mol/L的 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 溶液,滴加稀硝酸调节pH至3。将离心管置于超声机中超声30 min后放入水浴恒温振荡器中振荡2 h,最后在150 °C下的反应釜中反应3 h。反应结束后用去离子水洗涤3次,置于60 °C烘箱下干燥,所得产品即为负载羟基磷灰石的生物炭复合材料,记为HAP@BC。

### 1.3 材料表征

生物炭的微观形貌、元素组成和晶体结构用SEM观察,放大倍率为50 000~200 000倍;表面官能团用FTIR进行测定,波数范围:400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ;物相分析用XRD进行,以铜靶为测试靶材,X射线为 $\text{Cu-K}\alpha$ 射线, $\lambda=0.154\text{ }18\text{ nm}$ ,扫描范围为10°~80°,扫描速度为2(°)/min。

### 1.4 吸附/解吸实验

1)单因素吸附实验。向100 mL离心管中加入50 mL由六水合硝酸钇制备的 $\text{Y}^{3+}$ 模拟废水,在恒温摇床中根据表1设置的吸附实验条件进行。振荡2 h后收集离心管内上清液,过0.45  $\mu\text{m}$ 的水系滤膜后用ICP测定溶液 $\text{Y}^{3+}$ 浓度,检测波长为437.494 nm<sup>[15]</sup>。

表1 吸附实验条件

Table 1 Adsorption experiment conditions

序号	变量名称	水平取值
1	初始 $\text{Y}^{3+}$ 浓度 ( $c$ )/(mg/L)	10、20、30、50、75、100、150、200、300
2	生物炭投加量( $m$ )/mg	1、3、5、7、10、20、40、60
3	pH	2、3、4、5、6
4	转速( $v$ )/(r/min)	15、20、25、30、35、40
5	吸附温度( $T$ )/°C	0、50、100、150、200、250

2)解吸实验。将吸附 $\text{Y}^{3+}$ 后的HAP@BC烘干放入100 mL离心管中,加入50 mL浓度为0.01 mol/L的EDTA溶液,混合后置于恒温摇床中振荡。过滤收集解吸后的HAP@BC,用去离子水清洗3次以上,放入烘箱中烘干。烘干后的HAP@BC继续用于吸附实验,连续进行多次吸附-解吸实验,分别计算每次解吸后HAP@BC的吸附量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物炭的表征

#### 2.1.1 SEM-EDS分析

从BC和HAP@BC SEM-EDS图(图1)可以看出,BC表面光滑且呈蜂窝状多孔结构,HAP@BC表面相比BC更加粗糙,且出现了大量白色团聚物。通

过EDS能谱分析,白色团聚物主要含Ca、P、O,且Ca与P的重量百分比为2.00,原子百分比为1.55,这与HAP的化学特征基本一致<sup>[16]</sup>,表明HAP成功负载于BC上,证实HAP@BC制备成功。

#### 2.1.2 XRD及FTIR分析

BC和HAP@BC的XRD及FTIR表征如图2所示。XRD图谱显示HAP@BC有多个衍射峰,其中在 $2\theta=26.51^\circ$ 、 $28.66^\circ$ 、 $30.32^\circ$ 、 $32.94^\circ$ 、 $47.57^\circ$ 和 $49.49^\circ$ 等附近出现了强且窄的衍射峰,其为六方晶体HAP的特征峰,分别归属于HAP的(002)、(210)、(211)、(202)、(222)和(213)晶面<sup>[17]</sup>。与标准卡片进行比对,发现其出峰位置和峰形比较吻合,再次证实HAP成功负载到了BC表面。从FTIR图谱中可以看出,在波长约为 $3434 \text{ cm}^{-1}$ ,BC和HAP@BC均有伸缩振动,这个为-OH的特征吸收峰<sup>[18]</sup>。与BC相比,

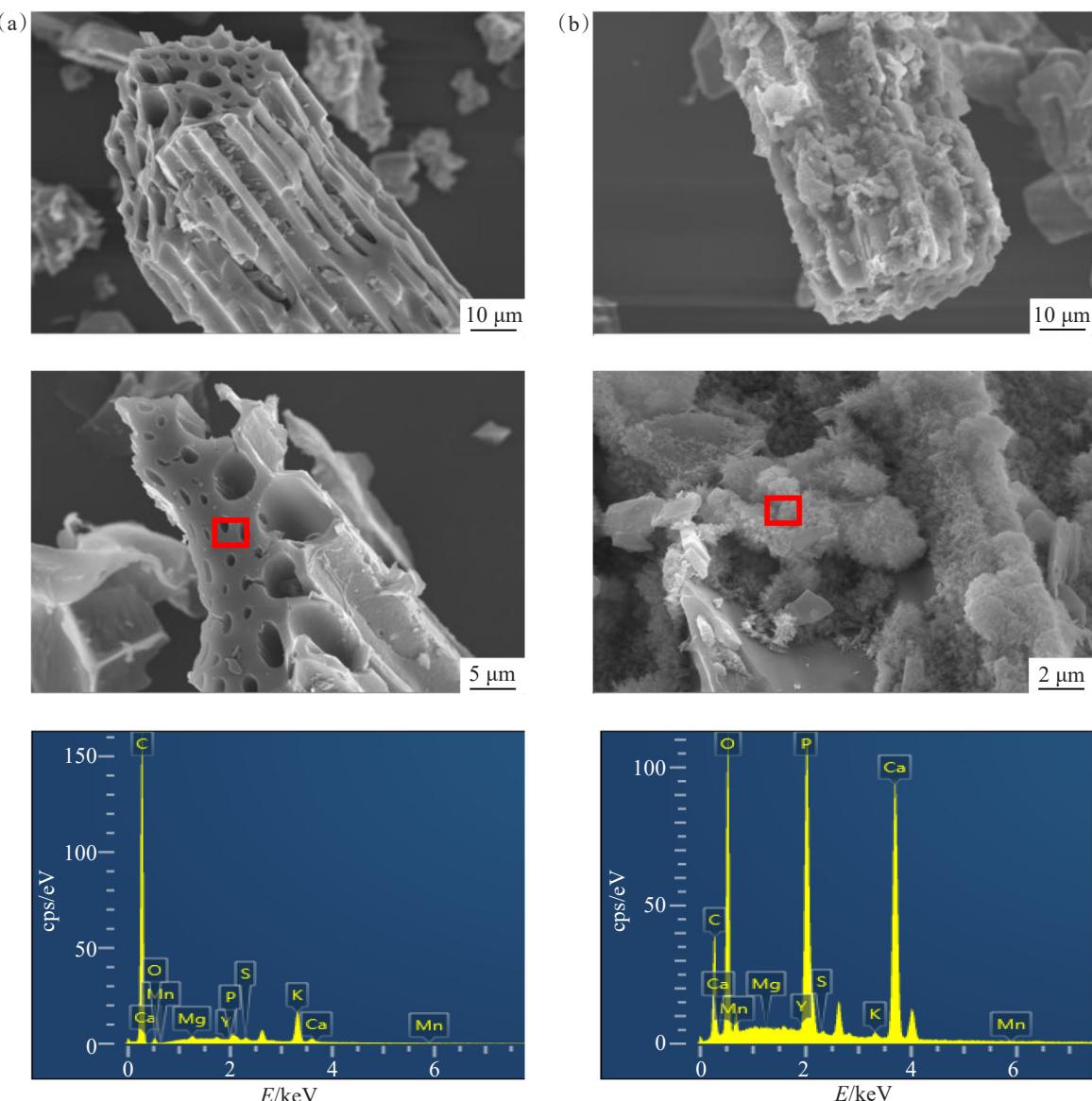


图1 改性前后的生物炭的SEM-EDS图:(a)BC的SEM-EDS像;(b)HAP@BC的SEM-EDS像

Fig.1 SEM-EDS of biochar before and after modification: (a) SEM-EDS mages of BC; (b) SEM-EDS mages of HAP@BC

HAP@BC有更多的特征吸收峰,431、564 cm<sup>-1</sup>对应PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的v<sub>4</sub>振动吸收峰(O—P—O键的弯曲振动峰);892、997 cm<sup>-1</sup>对应PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的v<sub>1</sub>振动吸收峰;1 069 cm<sup>-1</sup>对应PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的v<sub>3</sub>振动吸收峰(P—O键反对称伸缩振动峰),这些均为HAP的典型特征

峰<sup>[19-21]</sup>,说明HAP成功负载到了BC上。同时,HAP@BC还在1 355~1 700 cm<sup>-1</sup>之间有较多吸收峰的波动,说明其中含有烷基、芳香基和含氧基团<sup>[22]</sup>,研究表明<sup>[17, 23]</sup>,这些基团也能提供大量的有效吸附点位,提高吸附性能。

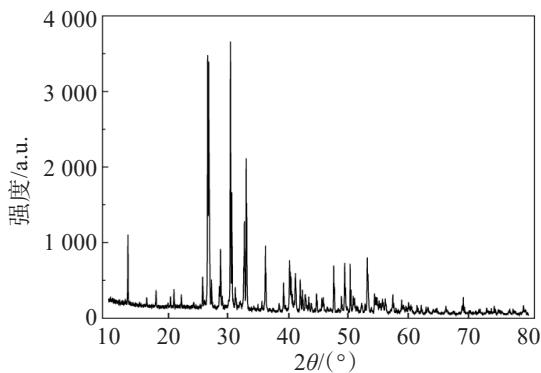
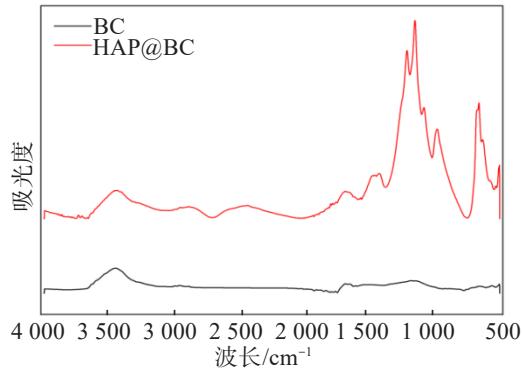


图2 BC和HAP@BC的表征图谱:(a) HAP@BC的XRD图谱

Fig.2 Characterization patterns of BC and HAP@BC:(a) XRD patterns of HAP@BC;

(b) FTIR spectra of BC and HAP@BC



## 2.2 单因素吸附实验分析

### 2.2.1 初始Y<sup>3+</sup>浓度对吸附效果的影响

初始Y<sup>3+</sup>浓度对BC和HAP@BC的吸附效果影响如图3(a)所示。随着初始Y<sup>3+</sup>浓度的增加,BC的吸附量从47.50 mg/g增加至80.01 mg/g,随后基本维持在82.70 mg/g,而HAP@BC的吸附量由50 mg/g增加至331.27 mg/g。当初始Y<sup>3+</sup>浓度超过100 mg/L之后,HAP@BC的吸附量在331 mg/g附近呈现波动状态,这与吸附剂表面的活性点位有限有关<sup>[24]</sup>。当初始Y<sup>3+</sup>浓度较低时,溶液中的Y<sup>3+</sup>可被BC和HAP@BC全部吸附。而随着初始Y<sup>3+</sup>浓度的不断升高,吸附剂表面的活性点位逐渐被Y<sup>3+</sup>占据,当达到吸附饱和之后,吸附量将不再增加。通过实验可得,当达到吸附饱和时,HAP@BC对Y<sup>3+</sup>的吸附量比BC提高了3倍。

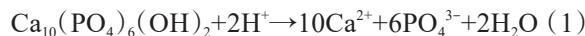
### 2.2.2 生物炭投加量对吸附效果的影响

BC和HAP@BC在不同生物炭投加量下对Y<sup>3+</sup>的吸附效果如图3(b)所示。随着生物炭投加量的增加,吸附量呈先增加后减少的趋势。当投加量由1 mg增加到10 mg时,BC的吸附量由10.09 mg/g增加到81.47 mg/g,HAP@BC的吸附量由40.09 mg/g增加到331.96 mg/g,两者虽都呈现增长趋势,但HAP@BC的增长幅度要高于BC。当生物炭投加量超过10 mg时,BC和HAP@BC的吸附量开始下降,这主要因为在初始Y<sup>3+</sup>浓度与溶液容量相同的情况下,随着吸附剂投加量的增加,吸附剂中没有被完全利用的活性点增多,造成活性部位的堆积与重合,从而导致Y<sup>3+</sup>的吸附量降低<sup>[25]</sup>。

而导致Y<sup>3+</sup>的吸附量降低<sup>[25]</sup>。

### 2.2.3 pH对吸附效果的影响

pH对于金属离子的吸附有着至关重要的作用,溶液中的氢离子会将吸附剂的活性点位质子化,使得它们带正电,抑制与金属离子之间的静电作用;而溶液中的氢氧根离子会与金属离子生成沉淀,从而降低吸附剂的实际吸附量<sup>[26]</sup>。本研究将pH范围设定在2~6之间,具体吸附效果如图3(c)所示,可以看出,溶液pH对吸附效果影响显著。当pH=2.0时,HAP@BC的吸附量(12.75 mg/g)低于BC(22.12 mg/g)。而当pH升高到3.0时,HAP@BC的吸附量迅速增加,在pH=4.0时达到最大吸附量333.83 mg/g,在pH=6.0时又有所降低。结合HAP的理化性质分析,HAP会在强酸条件下发生溶解<sup>[27]</sup>,如式(1)、式(2)、式(3)所示。MOUSA等<sup>[28]</sup>研究显示,当pH降至1.0时,约有16%的HAP会发生溶解,其表面的≡PO<sup>-</sup>与≡CaOH发生质子化,使得HAP表面带正电,大大降低了吸附能力。当pH的升高时,HAP的溶解性会下降,吸附能力提升。同时,HAP@BC表面存在的羟基、羧基等官能团也会增强吸附效果。但当pH过高时,溶液中的Y<sup>3+</sup>开始沉淀<sup>[29]</sup>,导致实际吸附量下降。



### 2.2.4 转速对吸附效果的影响

不同转速条件下吸附效果如图3(d)所示。从图3(d)

中可以看出,转速在 150 r/min 时,HAP@BC 和 BC 的吸附效果较优,HAP@BC 的吸附量为 336.96 mg/g,BC 为 83.97 mg/g。而在转速较低或转速较高的情况下,吸附效果均有所降低,这可能是因为随着转速的升高,Y<sup>3+</sup>在溶液中的扩散速率加快,与吸附剂发生有效碰撞的频率提高,从而促进了吸附效果<sup>[30]</sup>。但当

转速达到 150 r/min 后,在水力剪切作用下,已经被吸附的 Y<sup>3+</sup>会被扰动而脱离 HAP@BC 的有效点位,同时 Y<sup>3+</sup>与 HAP@BC 的碰撞时间较短,还未完成吸附就被水流给带走,从而导致吸附量下降<sup>[31]</sup>。而在转速较低的情况下,Y<sup>3+</sup>在溶液中的扩散速率较低,与吸附剂的有效碰撞频率不高,使得吸附量偏低。

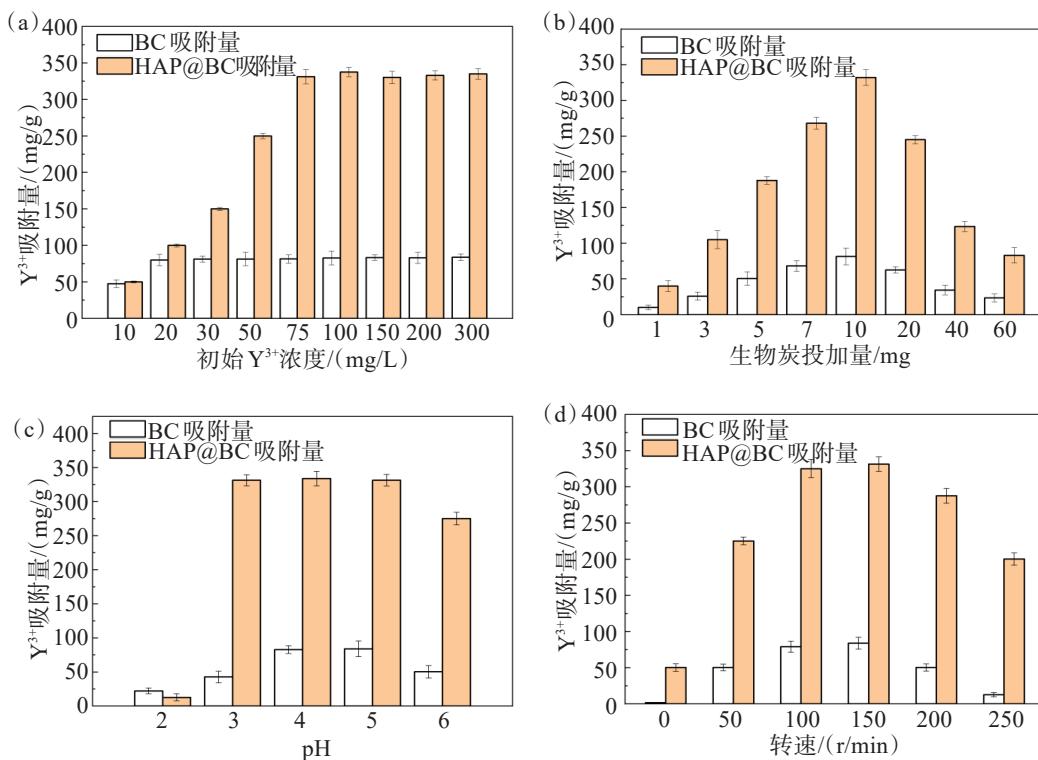


图 3 各因素对吸附效果的影响:(a) 初始 Y<sup>3+</sup>浓度对吸附效果的影响;(b) 生物炭投加量对吸附效果的影响;(c) pH 对吸附效果的影响;(d) 转速对吸附效果的影响

Fig.3 Influence of various factors on adsorption effect:(a) effect of initial Y<sup>3+</sup> concentration on the adsorption;(b) effect of the biochar dosage on adsorption;(c) effect of solution pH on the adsorption;(d) effect of the rotational speed on the adsorption

### 2.3 吸附等温拟合

温度会影响分子之间的热运动和扩散运动,从而影响溶液中 Y<sup>3+</sup>与吸附剂之间的碰撞,导致吸附效果的变化<sup>[32]</sup>。图 4(a)所示为不同温度对吸附效果的影响,可以看出,随着吸附温度的升高,吸附量均呈增加趋势。在 15~30 °C 之间时,吸附量增长迅速,HAP@BC 的吸附量从 112.71 mg/g 增至 325.01 mg/g;BC 的吸附量从 3.38 mg/g 增至 81.46 mg/g。当温度超过 30 °C 之后,两者的吸附量增长幅度开始变缓,到 40 °C 时,HAP@BC 的吸附量增长了 18.74 mg/g,而 BC 的吸附量仅增长了 3.75 mg/g。采用经典等温模型 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温方程进行拟合,结果如图 4(b)—图 4(d)。可以看出,Langmuir 拟合曲线与实验值最为接近,而 Freundlich 和 Temkin 拟合曲线与实验值存在较大的偏差,同时,Langmuir 模

型在不同温度下拟合的相关系数 R<sup>2</sup>均大于 0.999,残差平方和 RSS 非常小,而 Freundlich 和 Temkin 的相关系数均小于 0.900,残差平方和大于 0.5,说明 HAP@BC 对 Y<sup>3+</sup>的吸附更符合 Langmuir 模型,由此猜测,HAP@BC 对 Y<sup>3+</sup>的吸附过程以单分子层吸附为主导,吸附剂表面均匀同质且吸附点位之间不存在相互作用<sup>[33]</sup>。

### 2.4 改性生物炭的循环利用性能

由解吸实验得出的解吸次数与吸附量关系如图 5 所示。结果表明,经 EDTA 解吸 1 次后,HAP@BC 的吸附量直线下降,从 337.51 mg/g 降至 255.45 mg/g,随后下降幅度变缓,第 5 次之后稳定在 152 mg/g。虽然解吸后 HAP@BC 的吸附量有所下降,但其吸附量仍较 BC 高 2 倍,具有良好的循环利用性能。

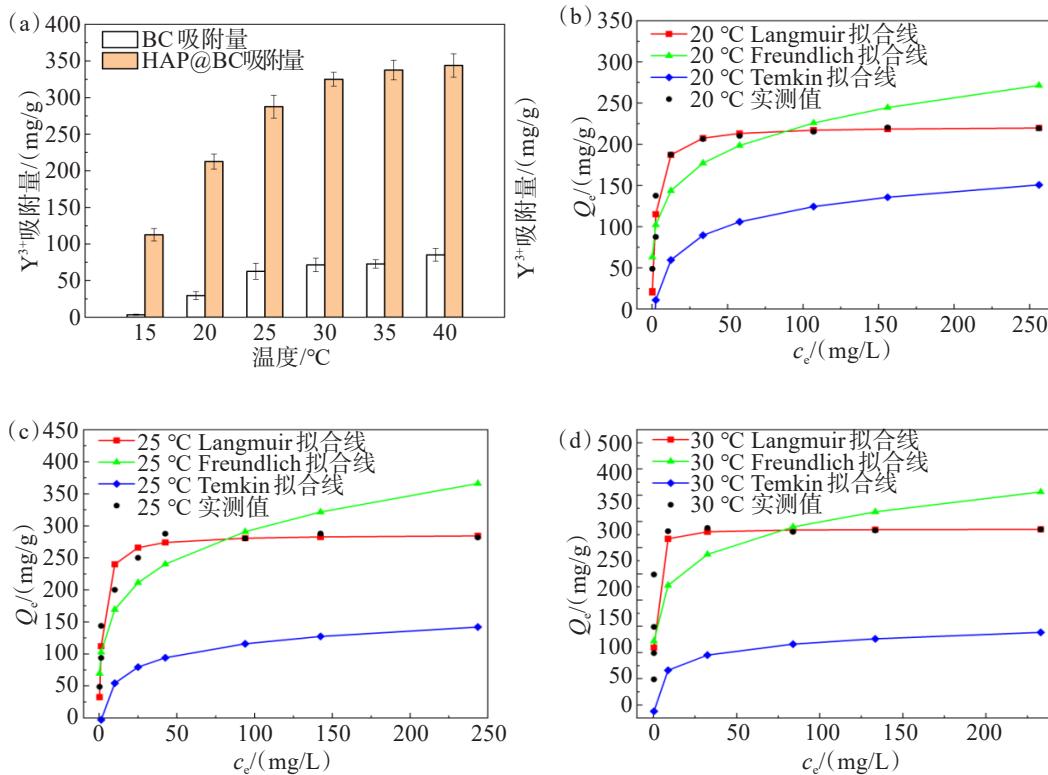
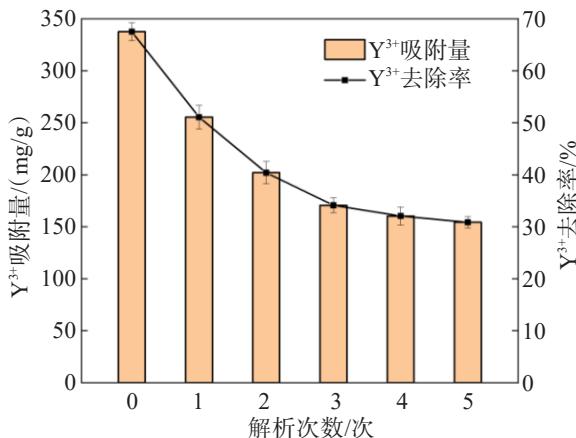


图4 温度对吸附的影响及等温方程拟合曲线:(a) 温度的影响效果;(b) 20 °C下拟合曲线;

(c) 25 °C下拟合曲线;(d) 30 °C下拟合曲线

**Fig.4 Influence of temperature on adsorption and fitting curve of isothermal equation:(a) effect of the temperature on the adsorption;(b) Adsorption isotherm fitting curve at 20 °C;(c) adsorption isotherm fitting curve at 25 °C;(d) adsorption isotherm fitting curve at 30 °C**



**Fig.5 Desorption times and adsorption capacity of HAP@BC adsorbed Y<sup>3+</sup>**

### 3 结论

1)以玉米秸秆为原材料高温热解烧制生物炭,通过水热改性负载羟基磷灰石,成功制备出负载羟基磷灰石的玉米秸秆生物炭复合材料(HAP@BC)。

相比BC,HAP@BC对Y<sup>3+</sup>的吸附量提升了3倍,具有更好的吸附效果。

2)pH对HAP@BC的吸附影响作用显著,在pH为4.0时有最大吸附量,为333.83 mg/g,而pH过低时会使负载的HAP发生溶解,从而降低吸附效果。初始Y<sup>3+</sup>浓度对吸附效果的影响随着Y<sup>3+</sup>浓度增加呈现出先增加后不变趋势,而生物炭投加量和转速则呈现出先增加后减少的趋势。

3)HAP@BC吸附更符合Langmuir单分子层吸附模型。经EDTA解吸5次后,HAP@BC仍然具有较高的吸附能力,吸附量为152 mg/g,是BC的2倍,表现出良好的循环利用性能。本研究为羟基磷灰石和生物炭在吸附稀土离子领域中的应用以及离子型稀土矿区稀土废水的处理提供了思路。

### 参考文献:

- [1] 张臻悦,何正艳,徐志高,等.中国稀土矿稀土配分特征[J].稀土,2016,37(1):121-127.
- [2] 刘斯文,黄园英,朱晓华,等.离子型稀土采矿对矿山及周边水土环境的影响[J].环境科学与技术,2015,38(6):25-32.
- [3] 郭钟群,金解放,赵奎,等.离子吸附型稀土开采工艺与理论

- 研究现状[J]. 稀土, 2018, 39(1): 132-141.
- [4] 张文杰, 童雄, 谢贤, 等. 稀土分离纯化技术研究现状[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(1): 24-37.
- [5] 何选明, 冯东征, 敖福禄, 等. 生物炭的特性及其应用研究进展[J]. 燃料与化工, 2015, 46(4): 1-3, 7.
- [6] 吕宏虹, 宫艳艳, 唐景春, 等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1429-1440.
- [7] 魏思洁, 王寿兵. 生物炭制备技术及生物炭在生态环境领域的应用新进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2022, 61(3): 365-374.
- [8] 王苗苗, 陈明, 郑小俊, 等. 生物炭在土壤重金属污染修复的应用研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(6): 1729-1735, 1740.
- [9] 田长顺, 石亮. 农业废弃物吸附稀土离子的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(4): 113-122.
- [10] 钟文晶, 符帝俊, 齐丹, 等. 生物炭制备及其在水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2023, 49(1): 26-30.
- [11] 张倩茹, 冀琳宇, 高程程, 等. 改性生物炭的制备及其在环境修复中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 913-925.
- [12] 李宇轩, 张纯, 刘辉, 等. 微波辅助热解制备铁氮/生物炭及其芬顿催化活性[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(6): 34-41.
- [13] 马啸, 潘雨珂, 杨杰, 等. 生物炭改性及其应用研究进展[J]. 化工环保, 2022, 42(4): 386-393.
- [14] 崔青青, 吴官正, 孔令涛, 等. 羟基磷灰石的制备及表征[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2017, 33(1): 35-39.
- [15] 李杰, 张真铭, 王长青, 等. 钢中稀土镧、铈、钇分析检测研究[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(6): 105-112.
- [16] 黄敏, 王彬, 周明罗, 等. 钇/羟基磷灰石的制备及对含磷废水的净化[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2778-2787.
- [17] YANG Z M, FANG Z, TSANG P E, et al. In situ remediation and phytotoxicity assessment of lead-contaminated soil by biochar-supported nHAP[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182: 247-251.
- [18] 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 等. 不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2770-2778.
- [19] 何豪, 朱宗强, 刘杰, 等. 镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中  $Pb^{2+}$  的去除[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4081-4090.
- [20] 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  $Pb^{2+}$  的吸附性能[J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4360-4370.
- [21] 李丹, 秦冬玲, 杨刚. 羟基磷灰石的制备及对  $Pb^{2+}$  的选择性吸附[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 52-57.
- [22] 高凯芳, 简敏菲, 余厚平, 等. 裂解温度对稻秆与稻壳制备生物炭表面官能团的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1663-1669.
- [23] 杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 等. 牛粪源蚓粪及其生物炭对  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附特性[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 2172-2181.
- [24] 孙婷婷, 高菲, 林莉, 等. 复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 784-791.
- [25] 任树鹏, 齐宇彤, 石瑶, 等. 层状双氢氧化物负载生物炭对磷酸盐的吸附性能研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(2): 575-584.
- [26] 尹茜艳, 文嘉, 薛壮壮, 等. 不同 pH 值和  $O_2$  条件下硝酸改性生物炭去除六价铬机理[J]. 环境科学学报, 2022, 42(10): 274-283.
- [27] 刘纯玮, 冯莉, 刘忆玲, 等. 制备条件对掺镁羟基磷灰石结构及除氟性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 933-941.
- [28] MOUSA S M, AMMAR N S, IBRAHIM H A. Removal of lead ions using hydroxyapatite nano-material prepared from phosphogypsum waste[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2016, 20(3): 357-365.
- [29] 高国华, 赖安邦, 周小芳, 等. 碳酸钇沉淀结晶过程及其影响因素[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2457-2474.
- [30] 肖利萍, 李嘉欣, 王涛, 等. 硼泥对含铜酸性废水的吸附性能[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 94-100.
- [31] 陈渐锐, 洪志鑫, 邱鸿鑫, 等. 炭吸附剂吸附水中残余浮选捕收剂煤油研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(1): 43-47.
- [32] 邓玲芳, 张纯, 刘辉, 等. 基于正交实验的凹凸棒/生物炭复合材料镉吸附性能[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(1): 67-75.
- [33] 张连科, 王洋, 王维大, 等. 生物炭负载纳米羟基磷灰石复合材料的制备及对铅离子的吸附特性[J]. 化工进展, 2018, 37(9): 3492-3501.

(责任编辑: 王庆龙)