

# The Adsorption Study of Rare Earth Element Ce, Y in the Solution on Rice Husk Biochar

Lu Tang<sup>1</sup>, Dan Liu<sup>1</sup>, Zuqin Cheng<sup>1</sup>, Dan Zhou<sup>1,2\*</sup>, Xin Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of Mining & Metallurgy Environmental Pollution Control, Ganzhou Jiangxi

Email: \*liudanzlld@163.com

Received: Aug. 12<sup>th</sup>, 2017; accepted: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2017; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

The rice husk biochar (RHBC) was prepared with rice husk by pyrolysis at 550°C under nitrogen atmosphere. Adsorption isotherm and kinetics study were investigated to determine the adsorption capacities of rare earth element Ce, Y onto RHBC in solution. The adsorption results showed that the adsorption isotherm of Ce, Y onto rice husk biochar could be well described by Langmuir model, and the maximum adsorption capacities were 19.80 mg·kg<sup>-1</sup> of Ce, and 8.61 mg·kg<sup>-1</sup> of Y. The kinetics results showed that the adsorption process could be well fitted by Lagergren pseudo-second-order model, for a chemical adsorption process. In addition, in the solution pH range of 3 - 7, the removal rate of Y on RHBC enhanced significantly with the increasing pH, while the solution pH made a negligible effect on the removal rate of Ce onto RHBC, which were higher than 96%.

## Keywords

Rice Husk Biochar, Rare Earth Element, Adsorption

# 稻壳生物炭对稀土元素Ce、Y吸附效果的研究

唐璐<sup>1</sup>, 刘丹<sup>1</sup>, 程祖琴<sup>1</sup>, 周丹<sup>1,2\*</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州

<sup>2</sup>江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 江西 赣州

Email: \*liudanzlld@163.com

收稿日期: 2017年8月12日; 录用日期: 2017年8月23日; 发布日期: 2017年8月30日

\*通讯作者。

## 摘要

以稻壳为原料,在550°C,氮气气氛下热解制备生物炭(RHBC),通过吸附热力学及动力学实验,考察稻壳生物炭对稀土元素Ce、Y的吸附特性。吸附热力学实验结果表明,RHBC对Ce、Y的吸附行为符合Langmuir模型,对Ce、Y的最大吸附量分别为19.80 mg·kg<sup>-1</sup>、8.61 mg·kg<sup>-1</sup>。动力学结果表明,RHBC对Ce、Y的吸附动力学过程符合Lagergren二级动力学模型,吸附过程倾向于化学吸附。反应体系pH在3~7时,RHBC对Y的吸附效率随着pH的增大而增大,RHBC对Ce的吸附效率受溶液pH影响较小,pH3~7吸附效率均达到96%以上。

## 关键词

稻壳生物炭,稀土元素,吸附

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国稀土资源储量丰富,占全球同类资源的90%,以南方离子吸附型稀土矿和北方轻稀土矿为主[1]。南方离子吸附型稀土矿原矿中60%~90%的稀土以水合或羟基水合离子状态吸附在高岭土及云母中,稀土离子极易在电解质溶液中被交换下来[2],目前广泛使用开采方式为利用硫酸铵作为浸取,原地浸矿提取稀土母液收集率可达92%,是生态环境破坏较小的开采方式[3],然而采用硫酸铵浸矿-碳酸氢铵沉淀法[4]提取稀土后,会产生大量的氨氮废水,如果直接排放会严重污染环境,其中含有的0.02~0.05g/L稀土离子资源也被浪费。另外,矿中残留的浸矿剂随淋滤水迁移过程会将矿中残留稀土或下游矿体中的稀土带入溪水、河沟而流失,使水环境中的稀土含量增加,影响生态环境[5]。据统计,江西赣南南部稀土矿区村民饮用井水稀土平均含量为9.18 μg/L,土壤稀土平均含量为869.73 μg/g,蔬菜稀土平均含量为6370.35 ng/g(干重),是非矿区稀土含量的3.8~24.8倍以上[6]。目前,对于浸矿废水中的稀土处理和回收方法有膜分离技术[7]、化学沉淀、离子交换、吸附法[8]等,其中吸附法简单高效且应用范围广,被认为是最具前景方法[9]。有很多学者研究采用甲壳素、壳聚糖、阿拉伯树胶等高分子聚合物[10][11][12]、生物吸附剂[13]、活性炭[14]、生物炭[15]等吸附处理溶液中的稀土元素。近年来生物炭作为一种经济的新型吸附材料,已经成为国内外众多学者研究的热点[16]。

生物炭是在缺氧或无氧环境中经高温热裂解得到的一类富碳的、稳定的、高度芳香化的固态物质,原料储量丰富且再生,主要来自农业废弃物、林业废弃物、畜禽粪便、市政污泥等[17]。我国作为农业大国,稻壳原料丰富,利用稻壳制备生物炭在农业及环境领域已经取得了一定的进展,大量研究[18][19][20]表明稻壳基生物炭含有较多的碱性官能团,pH较高,纤维素、半纤维素、木质素的分解使得其孔隙结构丰富、比表面积大,能够改良酸性土壤理化性质,有效吸附固定重金属、有机物及无机物。有很多学者利用稻壳制备活性炭净化水体中污染物效果接近木质净水用活性炭一级品质标准[21][22],相比较而言,稻壳生物炭的制备不需活化过程,对污染物的去除也能达到较好的效果[23]。

生物炭对重金属等物质的吸附能力主要取决于原料的类型和制备条件,其中原料是直接影响生物炭

的吸附能力的重要因素[24] [25], 制备温度影响生物炭的孔径分布、官能团数量、元素组成以及其 pH 值 [26] [27], 本研究利用 550°C 下热解制备的稻壳生物炭, 考察其对稀土元素(Ce 和 Y)的吸附行为与吸附机理, 为生物炭应用于稀土废水处理及稀土资源回收提供科学依据。

## 2. 材料与方 法

### 2.1. 稻壳生物炭的制备与表征

稻壳(RH)来自赣州大米加工厂, 自然条件下风干后, 置于气氛马弗炉, 氮气气氛下, 升温速率 10°C/min, 热解温度 550°C, 保持 2 h, 得到 550°C 的稻壳生物炭(记作 RHBC), 碾磨过 60 目筛, 去离子水洗净后, 105°C 条件下烘干后备用[28]。

将稻壳生物炭与去离子水以 1:10 (w/v)比例混合后的悬浮液置于恒温振荡器中震荡 30 min 后采用数显 pH 计(PHS-3C)测定其 pH [29], 含水率和灰分的测定根据 ASTM D2867-09(2014) [30]和 ASTM D2866-11 [31]方法。元素分析仪(MicroCube, Elementar, 德国)测定稻壳生物炭中的 C, H, N 元素。比表面仪(ASAP 2460, micromeritics, 美国)上测定生物炭比表面积及孔隙结构。扫描电镜图(SEM, KYKY-1000B, 中国)分析生物炭的表面形貌, 傅里叶红外光谱仪(IRPrestige-21, 日本)分析生物炭表面官能团[32]。

### 2.2. 吸附试验

#### 2.2.1. 吸附等温线

配置浓度梯度分别为 1~100 mg·L<sup>-1</sup> 的 Ce(III)和 Y(III)溶液, 分别取 100 ml 置于 250 ml 的锥形瓶中, 称取 1 g 稻壳生物炭(RHBC)与之混合均匀。置于水浴恒温振荡器中, 温度 25°C ± 1°C, 振荡 24 h 后 3000 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 取上清液过 0.45 μm 的针孔滤膜, 用 ICP-AES(Ultima2, Horiba, Japan)测定溶液中 Ce(III)和 Y(III)浓度。

生物炭对重金属的最大吸附量及固定效率根据公式(1)和公式(2)计算[33]:

$$q_t = (c_0 - c_t) \times V / m \quad (1)$$

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

$q_t$ : 在  $t_{\min}$  时生物炭吸附的重金属的含量(mg·g<sup>-1</sup>);

$m$ : 加入的生物炭的质量(g);

$V$ : 溶液的体积(L);

$c_0$ : 溶液中重金属的初始浓度(mg·L<sup>-1</sup>);

$c_t$ :  $t_{\min}$  时溶液中重金属的浓度(mg·L<sup>-1</sup>);

$r$ : 生物炭对重金属的吸附效率(%)。

污泥生物炭对 Ce(III)和 Y(III)的等温吸附数据采用 Langmuir 模型(LM)、Freundlich 模型(FM)以及 Temkin 模型拟合[34], 见公式(3)、(4)、(5):

$$q_e = \frac{b q_m c_e}{1 + b c_e} \quad (3)$$

$$q_e = k_F c_e^{(1/n)} \quad (4)$$

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (5)$$

$c_e$ : 平衡时溶液中重金属的浓度(mg·L<sup>-1</sup>);

- $q_e$ : 平衡时生物炭对重金属的吸附量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );  
 $b$ : LM 的吸附平衡常数( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ );  
 $k_F$ : FM 的吸附平衡常数( $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})^{-n}$ );  
 $q_m$ : 生物炭对重金属的最大吸附量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );  
 $n$ : 生物炭吸附强度和吸附率的代表, 与吸附剂和吸附质之间的亲和力有关;  
 $A$ : Temkin 方程平衡结合常数( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  
 $B$ : Temkin 方程系数, 与吸附热有关。

### 2.2.2. 吸附动力学

分别取浓度为  $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Ce(III)、Y(III)溶液 100 ml 置于 250 ml 的锥形瓶中, 称取 1 g 稻壳生物炭 (RHBC) 加入瓶中与之混合均匀。置于水浴恒温振荡器中, 设置温度为  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 振荡, 在 1、10、20、60、180、120、240、480、720、1440、2880 min 时分别取 5 ml 上清液, 过  $0.45\ \mu\text{m}$  的针孔滤膜, 采用 ICP-AES (Ultima2, Horiba, Japan) 测定溶液中 Ce(III) 和 Y(III) 浓度。

生物炭的吸附动力学采用 Lagergren 准一级动力学(PF), Lagergren 准二级动力学(PS) [25] 以及 Elovich 模型拟合[34], 见公式(6)、(7)、(8):

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (6)$$

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e^2 t} \quad (7)$$

$$q_t = \frac{1}{b} \ln ab + \frac{1}{b} \ln t \quad (8)$$

- $k_1$ : 一级动力学速率常数, ( $\text{h}^{-1}$ );  
 $k_2$ : 二级动力学速率常数, ( $\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )  
 $a, b$ : Elovich 方程常数, 分别表示初始吸附速率( $\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ )及解吸常数( $\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ )

### 2.2.3. pH 对吸附效率的影响

将 100 ml  $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Ce(III)、Y(III)溶液加入到 250 ml 锥形瓶中, 用  $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$  或 NaOH 分别调为 3、4、5、6、7, 分别称取 1 g 稻壳生物炭与之混合均匀, 置于水浴恒温振荡器中, 温度设置为  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 振荡 24 h 后, 过  $0.45\ \mu\text{m}$  的针孔滤膜, 采用 ICP-AES(Ultima2, Horiba, Japan)测定溶液中 Ce(III) 和 Y(III)浓度。

## 2.3. 数据分析

本实验所有样品均设置 3 个平行样分析, 并做空白样对照, 相对偏差控制在 5% 以内。所用试剂均为优级纯, 水为超纯水。数据分析使用 SPSS19.0, 吸附数据通过 Origin8.5 软件拟合。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 稻壳生物炭的理化特性

稻壳 RH 及其生物炭 RHBC 的物理化学性质见表 1。相比与 RH,  $550^\circ\text{C}$  条件下热裂解后, RHBC 含水率与灰分明显减少, 比表面积增大到 6.64 倍, 元素 C、H、N 比例(质量百分比)也有所减少, 主要是因为稻壳中的木质素、纤维素等有机物质在热解过程中大量分解挥发[35]。

### 3.2. 电镜扫描图分析

电镜扫描图更加直观的表现了生物炭表面的孔隙结构, 为了考察稻壳及稻壳生物炭表面孔隙形貌, 对其进行了 SEM 分析, 结果如图 1 所示, RH 表面成片状结构, 有较大孔, 而 RHBC 表面形成明显的蜂窝结构, 微孔有所发展, 说明 550℃ 条件下热裂解后稻壳中的纤维素、半纤维素和木质素分解, 有利于稻壳生物炭孔隙的形成[35]。

### 3.3. 红外光谱图分析

稻壳 RH 及其生物炭 RHBC 的红外光谱图如图 2 所示, RH 和 RHBC 均在波长 3425.90、1611.4、1103.23、799.21  $\text{cm}^{-1}$  处有明显的吸收峰, 3425.90  $\text{cm}^{-1}$  处主要为分子间氢键缔合的醇类、酚类的 -OH 伸缩振动产生的, 1611.4  $\text{cm}^{-1}$  处于 1680~1450  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰区间处为羧酸酯类、酮类、酞及芳香族化合物的 C=O 伸缩振动产生[36] [37], 1101.23  $\text{cm}^{-1}$  处被认为是氢氧基团和酚类芳香族化合物中的 C-H 伸缩振动产生, 而 799.21  $\text{cm}^{-1}$  为芳香族化合物中的 C-H 弯曲振动产生, 说明 RH 和 RHBC 表面含有 -OH, -COOH 等有机官能团。另外, RH 在波长 1430.08  $\text{cm}^{-1}$  处有明显吸收峰主要是由芳环的 C-C 伸缩振动引起, 而 RHBC 在波长 1383.57  $\text{cm}^{-1}$  处有一个较为微弱的峰, 主要由烷烃的 C-H 或 -CH<sub>3</sub> 弯曲振动引起[18], 表明 550℃ 热裂解后稻壳生物炭的烷烃基团缺失, 芳香化程度提高。

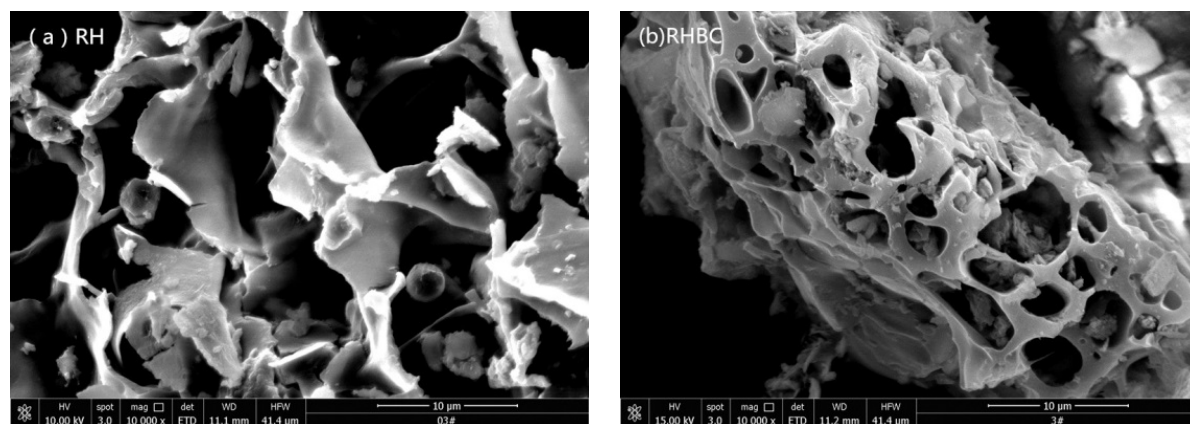
### 3.4. 等温吸附分析

采用 Langmuir、Freundlich 模型以及 Temkin 模型拟合稻壳生物炭 RHBC 对两种稀土元素 Ce、Y 的吸附曲线分别见图 3, 拟合参数见表 2。结果表明, RHBC 对 Ce、Y 的吸附曲线均更符合 LM 模型, R<sup>2</sup> 分别为 0.916 和 0.967, 说明 RHBC 对 Ce、Y 的吸附是单分子层吸附[38], Boraia 等[39]研究活性炭吸附 Ce(III)时也得到相似的结果。RHBC 对 Ce 和 Y 的最大吸附量分别为 19.80  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、8.61  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。RHBC

**Table 1.** Physicochemical characteristics of RH and RHBC

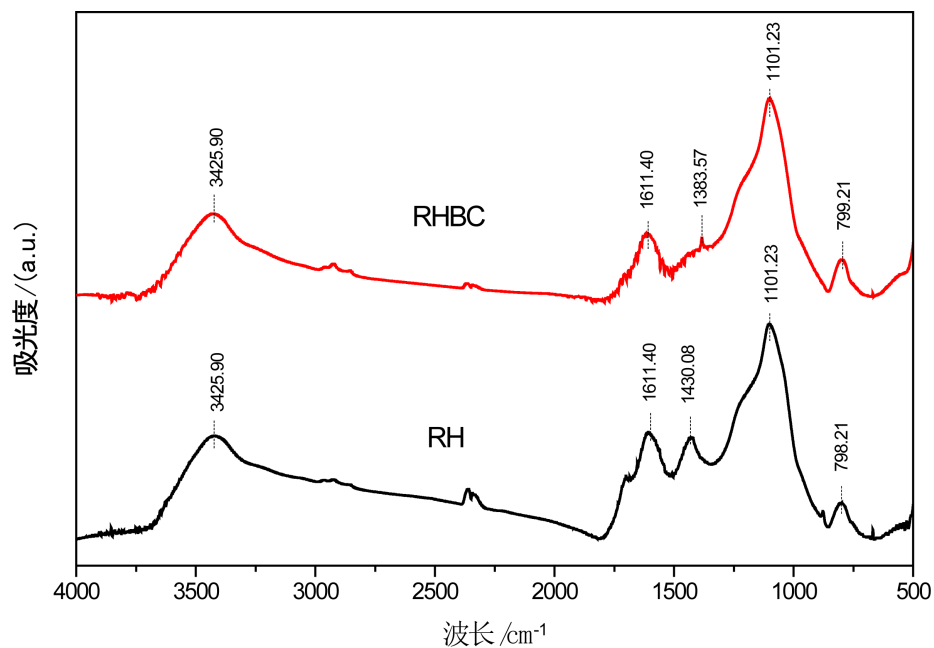
**表 1.** 稻壳 RH 及其生物炭 RHBC 的理化性质

生物炭	含水率/wt. %	灰分/wt. %	CEC/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH	C[%]	H[%]	N[%]	S <sub>BET</sub> /( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )
RH	17.37	11.50	-	6.46	40.23	5.503	0.72	15.38
RHBC	7.12	52.01	27.4	8.36	31.04	2.271	0.37	102.11

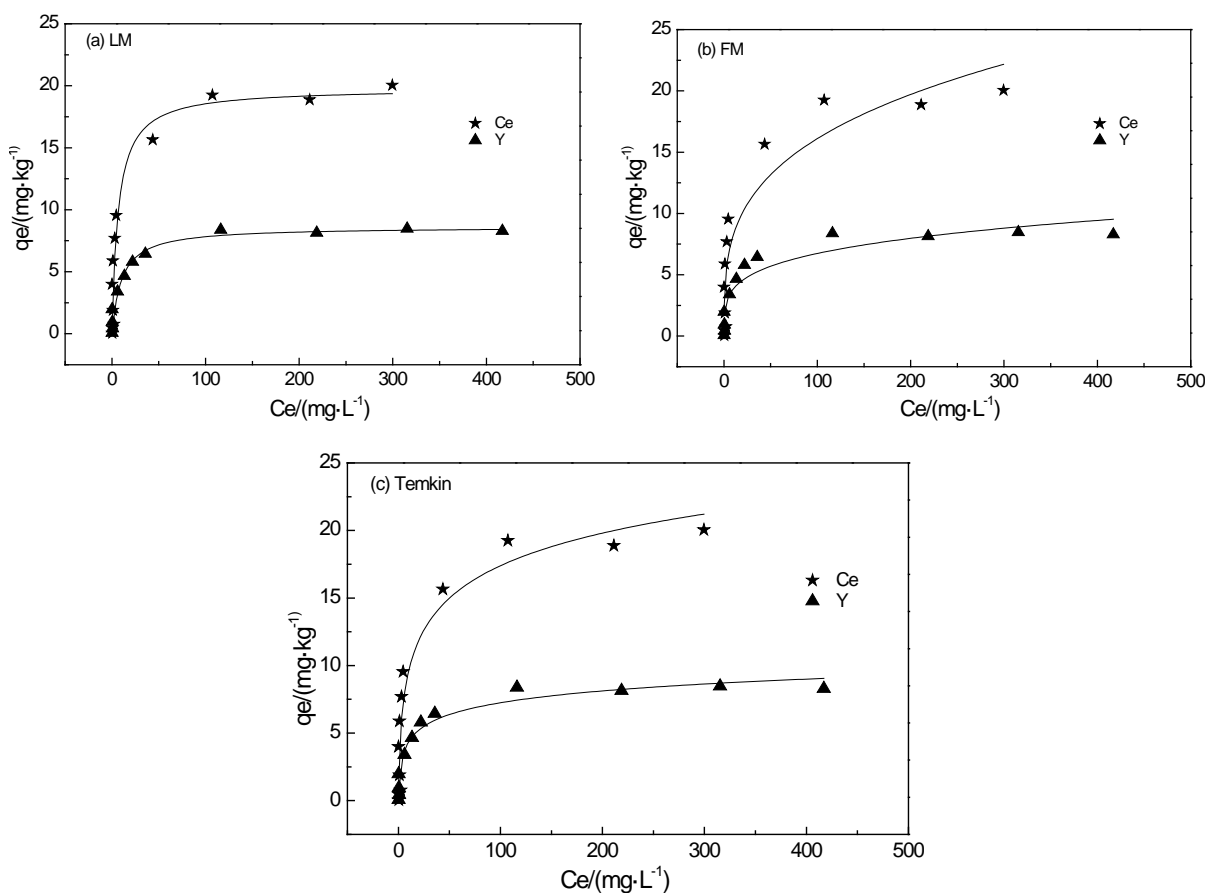


**Figure 1.** The scanning electron microscope images of RH and RHBC

**图 1.** 稻壳 RH 及其生物炭 RHBC 电镜扫描图



**Figure 2.** Fourier-transformed infrared spectra (FTIR) of RH and RHBC  
**图 2.** 稻壳及其生物炭 RHBC 的红外光谱图



**Figure 3.** Sorption isotherms of rare earth Ce and Y onto RHBC  
**图 3.** 稻壳生物炭 RHBC 对稀土元素 Ce、Y 的吸附曲线



**Table 2.** Parameters of the Langmuir, Freundlich and Temkin isotherm models for rare earth Ce and Y adsorption onto RHBC**表 2.** 稻壳生物炭 RHBC 对 Ce、Y 的等温吸附模型参数

生物炭	吸附模型	参数	稀土元素	
			Ce	Y
RHBC	Langmuir	$b(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	0.15	0.1
		$q_m(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	19.80	8.61
		$R^2$	0.916	0.967
	Freundlich	$k_F(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})^{-n}$	4.21	2.2
		$n$	3.43	4.12
		$R^2$	0.859	0.882
	Temkin	$A(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.421	3.09
		$B$	3.5	1.26
		$R^2$	0.894	0.949

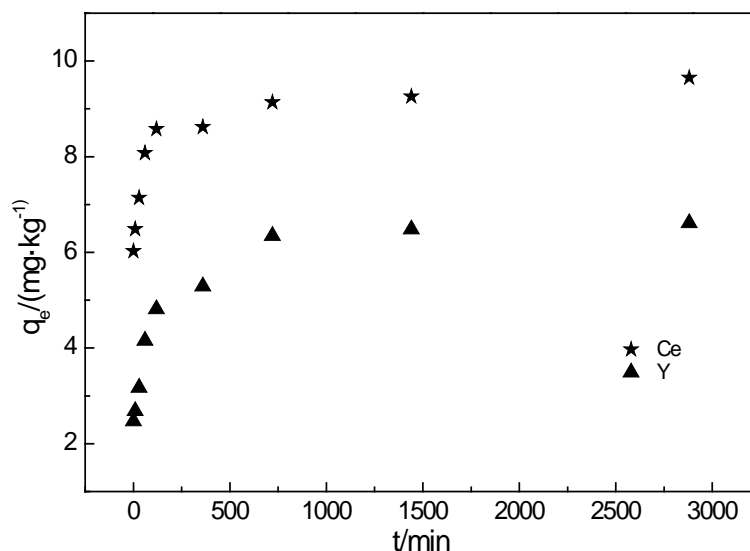
的 Freundlich 常数  $n$  值均大于 1, 说明 Ce、Y 首先占据稻壳生物炭 RHBC 高能量位点, 然后是低能量位点[40]。热裂解增大了稻壳生物炭的比表面积, 丰富了其表面官能团数量, 提高了其 pH 值[18] [27] [41], 从而有利于对稀土元素的吸附, RHBC 对 Ce 的吸附效果比 Y 好。

### 3.5. 吸附动力学分析

采用 Lagergren 准一级动力学、Lagergren 准二级动力学和 Elovich 模型对吸附结果进行拟合, 见图 4, 表 3 列出了稻壳生物炭 RHBC 对 Ce、Y 的动力学参数。由图 4 可知, RHBC 对稀土元素 Ce、Y 的吸附在初始阶段迅速增加, 250 min 后减缓直至吸附平衡, 这是由于反应初期, 生物炭表面的活性位点较多, 稀土离子迅速吸附到活性位点上, 250 min 后随着活性位点的减少, 稀土离子向生物炭孔隙内部扩散, 阻力增大, 吸附速率逐渐减缓, 最终接近吸附平衡状态。由表 3 可知, 准一级动力学方程对 RHBC 吸附两种稀土元素的拟合效果不佳, 相关系数  $R^2$  不高, 且拟合得出的饱和吸附量与实验值相差很大, 主要是因为一级动力学只适合描述初始阶段的吸附, 无法较好拟合稻壳生物炭对 Ce、Y 吸附的整个过程。相比于准一级动力学和 Elovich 模型, 二级动力学能够较好的描述该吸附全过程, 包括外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散等, 更加真实地反映稻壳生物炭对 Ce、Y 的吸附动力学机制[42]。二级动力学模型拟合 RHBC 对 Ce、Y 的吸附曲线,  $R^2$  大于 0.94, 表明 RHBC 对两种稀土元素的吸附更接近于化学吸附[25]。York 等[43]利用废轮胎制备的黑炭吸附稀土元素 La、Ce、Y 的研究中也得出二级动力学能够较好地拟合吸附曲线, 稀土元素可能与生物炭表面的  $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$  官能团上的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子发生离子交换。另外, 生物炭表面官能团上的孤对电子与稀土离子可能发生配位成键[44]。

### 3.6. pH 对吸附的影响研究

溶液 pH 是影响生物炭吸附特性的一个重要因素, 很多研究表明溶液 pH 影响生物炭吸附剂表面电荷、金属离子水平以及金属存在形式[45] [46]。研究溶液 pH 从 3 到 7 变化对稻壳生物炭 RHBC 吸附稀土元素 Ce 和 Y 效果的影响, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, RHBC 对 Ce 的吸附效率高于 96%, 受溶液 pH 影响较小。而对 Y 的吸附效率表现出随着 pH 增大而逐渐增大的趋势, 在 pH 为 7 时达到最大, 为 73.75%。结果表明 pH 能显著影响 RHBC 对 Y 的吸附。



**Figure 4.** Sorption kinetic of rare earth Ce and Y on RHBC  
**图 4.** 稻壳生物炭 RHBC 对稀土元素 Ce、Y 的动力学曲线

**Table 3.** Kinetic parameters of Ce and Y onto RHBC obtained from the pseudo-first-order, pseudo-second-order and Elovich models  
**表 3.** 稻壳生物炭 RHBC 对 Ce、Y 的等温吸附模型参数

生物炭	拟合模型	参数	稀土元素	
			Ce	Y
RHBC	PF-order model	$q_{e1}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	8.369	5.9430.1
		$k_1(\text{min}^{-1})$	1.274	0.026
		$R^2$	0.281	0.497
	PS-order model	$q_{e2}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	15.457	13.718
		$k_2(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	0.602	0.171
		$R^2$	0.947	0.958
	Elovich 模型	$a(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	19429.6	1.868
		$b(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1})$	1.887	1.266
		$R^2$	0.931	0.939

#### 4. 结论

(1) 稻壳生物炭 RHBC 表面含有丰富的孔隙结构,  $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$  等化学官能团, 热裂解有助于其微孔的生成以及芳香化;

(2) RHBC 对两种稀土元素 Ce、Y 的吸附曲线均更符合 Langmuir 模型, 对 Ce 和 Y 的最大吸附量分别为  $19.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(3) RHBC 对稀土元素 Ce、Y 的吸附均表现为在初始阶段迅速增加, 随后逐渐趋于平衡, 且吸附动力学曲线能用 Lagergren 二级动力学模型很好的拟合,  $R^2$  大于 0.94。



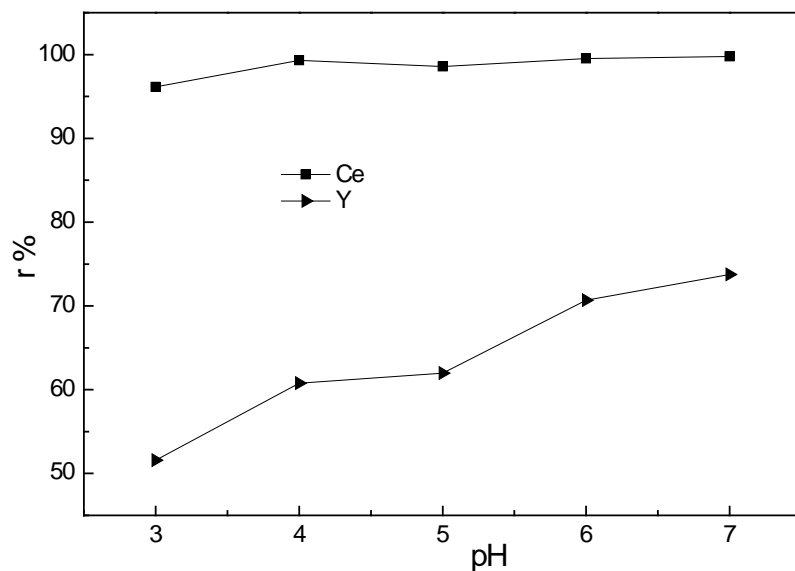


Figure 5. The effect of solution pH on sorption of Ce and Y by RHBC

图 5. pH 对稻壳生物炭 RHBC 吸附 Ce 和 Y 的影响

(4) 溶液 pH 对 RHBC 吸附 Y 影响较大, 吸附效率表现为随着溶液 pH 的升高而增大, 而对 RHBC 吸附 Ce 影响并不大, 主要是因为 RHBC 对 Ce 的吸附效率较高, 为 96% 以上。

### 参考文献 (References)

- [1] U.S.G.Survey (2014) Mineral Commodity Summaries. Rare Earths, 128-129.
- [2] 池汝安, 田君. 风化壳淋积型稀土矿化工冶金[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 罗才贵, 罗仙平, 苏佳, 等. 离子型稀土矿山环境问题及其治理方法[J]. 金属矿山, 2014, (6): 91-96.
- [4] 池汝安, 田君, 罗仙平, 等. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 1-13.
- [5] 李永绣, 张玲, 周新木. 南方离子型稀土的资源 and 环境保护性开采模式[J]. 稀土, 2010, 31(2): 80-85.
- [6] 朱建华, 袁兆康, 胡敏. 稀土矿区生态环境稀土含量检测[J]. 中国公共卫生, 2006, 22(8): 950-951.
- [7] 王志高, 王金荣, 彭文博, 等. 膜分离技术处理离子型稀土矿稀土开采废水[J]. 稀土, 2017, 38(1): 102-107.
- [8] Zhu, Y., Zheng, Y. and Wang, A. (2015) A Simple Approach to Fabricate Granular Adsorbent for Adsorption of Rare Elements. *International Journal of Biological Macromolecules*, **72**, 410-420. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.039>
- [9] Anastopoulos, I., Bhatnagar, A. and Lima, E.C. (2016) Adsorption of Rare Earth Metals: A Review of Recent Literature. *Journal of Molecular Liquids*, **221**, 954-962. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.076>
- [10] Galhoum, A.A., Mafhouz, M.G., Abdel-Rehem, S.T., et al. (2015) Cysteine-Functionalized Chitosan Magnetic Nano-Based Particles for the Recovery of Light and Heavy Rare Earth Metals: Uptake Kinetics and Sorption Isotherms. *Nanomaterials*, **5**, 154-179. <https://doi.org/10.3390/nano5010154>
- [11] Xu, S., Zhang, S., Chen, K., et al. (2011) Biosorption of La<sup>3+</sup> and Ce<sup>3+</sup> by *Agrobacterium* sp. HN1. *Journal of Rare Earths*, **29**, 265-270.
- [12] Chunhua, X., Xinyi, C. and Caiping, Y. (2011) Enhanced Adsorption Behavior of Nd(III) onto D113-III Resin from Aqueous Solution. *Journal of Rare Earths*, **29**, 979-985.
- [13] Das, D., Jaya Sre Varshini, C. and Das, N. (2014) Recovery of Lanthanum(III) from Aqueous Solution using Biosorbents of Plant and Animal Origin: Batch and Column Studies. *Minerals Engineering*, **69**, 40-56.
- [14] Anagnostopoulos, V.A. and Symeopoulos, B.D. (2012) Sorption of Europium by Malt Spent Rootlets, a Low Cost Biosorbent: Effect of pH, Kinetics and Equilibrium Studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **295**, 7-13. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1956-y>
- [15] Wang, Y.-Y., Lu, H.-H., Liu, Y.-X., et al. (2016) Ammonium Citrate-Modified Biochar: An Adsorbent for La(III) Ions

- from Aqueous Solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **509**, 550-563.
- [16] Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., *et al.* (2014) Biochar as a Sorbent for Contaminant Management in Soil and Water a Review. *Chemosphere*, **99**, 19-33.
- [17] 吴伟祥, 孙雪, 董达, 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] 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.
- [19] Masulili, A., Utomo, W.H. and Ms, S. (2010) Rice Husk Biochar for Rice Based Cropping System in Acid Soil 1. The Characteristics of Rice Husk Biochar and Its Influence on the Properties of Acid Sulfate Soils and Rice Growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, **2**, 39-47. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n1p39>
- [20] 李飞跃, 谢越, 石磊, 等. 稻壳生物炭对水中氨氮的吸附[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1221-1226.
- [21] 张蕊, 葛滢. 稻壳基活性炭制备及其对重金属吸附研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(2): 41-46.
- [22] 廖钦洪, 刘庆业, 蒙冕武, 等. 稻壳基活性炭的制备及其对亚甲基蓝吸附的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(11): 2447-2452.
- [23] 金俊伟, 黄晓惠. 稻壳、花生壳、大豆中生物炭去除水体中重金属离子的效果比较研究[J]. 农民致富之友, 2016(18).
- [24] Komnitsas, K., Zaharaki, D., Bartzas, G., *et al.* (2014) Efficiency of Pecan Shells and Sawdust Biochar on Pb and Cu Adsorption. *Desalination and Water Treatment*, **57**, 3237-3246. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.981227>
- [25] Wang, Z., Liu, G., Zheng, H., *et al.* (2015) Investigating the Mechanisms of Biochar's Removal of Lead from Solution. *Bioresource Technology*, **177**, 308-317.
- [26] Fu, P., Hu, S., Xiang, J., *et al.* (2012) Evaluation of the Porous Structure Development of Chars from Pyrolysis of Rice Straw: Effects of Pyrolysis Temperature and Heating Rate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **98**, 177-183.
- [27] Yuan, H., Lu, T., Huang, H., *et al.* (2015) Influence of Pyrolysis Temperature on Physical and Chemical Properties of Biochar Made from Sewage Sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **112**, 284-289.
- [28] Melo, L.C.A., Coscione, A.R., Abreu, C.A., *et al.* (2013) Influence of Pyrolysis Temperature on Cadmium and Zinc Sorption Capacity of Sugar Cane Straw Derived Biochar. *Bioresources*, **8**, 4992-5004. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.4992-5004>
- [29] Gusiatin, Z.M., Kurkowski, R., Brym, S., *et al.* (2016) Properties of Biochars from Conventional and Alternative Feedstocks and Their Suitability for Metal Immobilization in Industrial Soil. *Environmental Science and Pollution Research International*, **23**, 21249-21261. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7335-4>
- [30] American Society for Testing and Materials (ASTM) (2014) ASTM D2867-09: Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon. ASTM, West Conshohocken.
- [31] American Society for Testing and Materials (ASTM) (2011) ASTM D2866-11: Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon. ASTM, West Conshohocken.
- [32] Luo, L., Xu, C., Chen, Z., *et al.* (2015) Properties of Biomass-Derived Biochars: Combined Effects of Operating Conditions and Biomass Types. *Bioresource Technology*, **192**, 83-89.
- [33] Chen, T., Zhou, Z., Han, R., *et al.* (2015) Adsorption of Cadmium by Biochar Derived from Municipal Sewage Sludge: Impact Factors and Adsorption Mechanism. *Chemosphere*, **134**, 286-293.
- [34] 王彤彤, 马江波, 曲东, 等. 两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 2161-2171.
- [35] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1757-1765.
- [36] 郑庆福, 王永和, 孙月光, 等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 962-966.
- [37] Chia, C.H., Gong, B., Joseph, S.D., *et al.* (2012) Imaging of Mineral-Enriched Biochar by FTIR, Raman and SEM-EDX. *Vibrational Spectroscopy*, **62**, 248-257.
- [38] Chen, X., Chen, G., Chen, L., *et al.* (2011) Adsorption of Copper and Zinc by Biochars Produced from Pyrolysis of Hardwood and Corn Straw in Aqueous Solution. *Bioresource Technology*, **102**, 8877-8884.
- [39] Boraia, E.H., Hamed, M.G., El-kamasha, A.M., *et al.* (2015) Template Polymerization Synthesis of Hydrogel and Silica Composite for Sorption of Some Rare Earth Elements. *Journal of Colloid and Interface Science*, **456**, 228-240.
- [40] Peruchi, L.M., Fostier, A.H. and Rath, S. (2015) Sorption of Norfloxacin in Soils: Analytical Method, Kinetics and Freundlich Isotherms. *Chemosphere*, **119C**, 310-317.

- [41] Shaaban, A., Se, S.-M., Mitan, N.M.M., *et al.* (2013) Characterization of Biochar Derived from Rubber Wood Sawdust through Slow Pyrolysis on Surface Porosities and Functional Groups. *Procedia Engineering*, **68**, 365-371.
- [42] 薛杨, 邱素芬, 许端平, 等. 不同粒级的煤胶体对汞的吸附动力学[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3187-3194.
- [43] Smith, Y.R., Bhattacharyya, D., Willhard, T., *et al.* (2016) Adsorption of Aqueous Rare Earth Elements Using Carbon Black Derived from Recycled Tires. *Chemical Engineering Journal*, **296**, 102-111.
- [44] 张红云, 杨慧珠, 薛印, 等. 改性蔗渣纤维对稀土离子吸附特性研究[J]. 中国稀土学报, 2017, 35(2): 231-237.
- [45] Peng, P., Lang, Y.-H. and Wang, X.-M. (2016) Adsorption Behavior and Mechanism of Pentachlorophenol on Reed Biochars: pH Effect, Pyrolysis Temperature, Hydrochloric Acid Treatment and Isotherms. *Ecological Engineering*, **90**, 225-233.
- [46] Fristak, V., Pipiska, M., Lesny, J., *et al.* (2015) Utilization of Biochar Sorbents for Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, and Cu<sup>2+</sup> Ions Separation from Aqueous Solutions: Comparative Study. *Environmental Monitoring and Assessment*, **187**, 4093.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-014-4093-y>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8844, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [hjctet@hanspub.org](mailto:hjctet@hanspub.org)