

# 生物质灰渣吸附脱除水中重金属的动力学研究

佟敏<sup>1</sup>, 史昌明<sup>1</sup>, 党乐<sup>1</sup>, 陈忠源<sup>1</sup>, 崔亚茹<sup>1</sup>, 王体朋<sup>2</sup>, 胡壮<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>中国华北电力大学生物质发电成套设备国家工程实验室, 北京

收稿日期: 2021年10月22日; 录用日期: 2021年11月22日; 发布日期: 2021年11月29日

## 摘要

生物质灰渣吸附剂的开发可以促进其资源化、无害化利用。本文比较了生物质灰渣对水中不同重金属离子的吸附效果, 结果发现生物质灰渣对 $Pb^{2+}$ 具有较高的吸附能力。研究了生物质灰渣在不同温度下对不同初始浓度的 $Pb^{2+}$ 吸附特性, 发现升高温度有利于生物质灰渣吸附 $Pb^{2+}$ ; 当浓度低于10 ppm时, 温度对吸附特性的影响并不明显; 当浓度超过10 ppm时, 随着温度的升高, 吸附率显著升高, 但当浓度达到50 ppm时, 温度对吸附的影响逐渐降低, 可能主要是由于生物质灰渣的吸附位点有限, 无法吸附太多的 $Pb^{2+}$ 。随着吸附过程的进行, 吸附速率逐渐降低。此外, 建立了生物质灰渣吸附 $Pb^{2+}$ 的动力学模型, 得出生物质灰渣吸附 $Pb^{2+}$ 的动力学过程更符合假二级动力学方程。本研究为生物质灰渣吸附剂的开发提供了理论依据。

## 关键词

生物质灰渣, 重金属, 吸附动力学

# Adsorption and Kinetic Characteristics of Cd Removal by Fly Ash from Biomass Power

Min Tong<sup>1</sup>, Changming Shi<sup>1</sup>, Le Dang<sup>1</sup>, Zhongyuan Chen<sup>1</sup>, Yaru Cui<sup>1</sup>, Tipeng Wang<sup>2</sup>, Zhuang Hu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Huhhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>National Engineering Laboratory for Biomass Power Generation Equipment, North China Electric Power University, Beijing

Received: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The development of biomass fly ash as adsorbent to remove the heavy metal ion in water can

\*通讯作者。

文章引用: 佟敏, 史昌明, 党乐, 陈忠源, 崔亚茹, 王体朋, 胡壮. 生物质灰渣吸附脱除水中重金属的动力学研究[J]. 化学工程与技术, 2021, 11(6): 383-390. DOI: 10.12677/hjct.2021.116049

promote its recycling and harmless. This article compared the adsorption effects of biomass fly ash in water on different heavy metal ions and found that biomass fly ash has a high adsorption capacity for  $\text{Pb}^{2+}$ . The adsorption characteristics of  $\text{Pb}^{2+}$  by biomass fly ash were studied at different temperatures or initial concentrations of  $\text{Pb}^{2+}$ . It was found that the removal rate depended significantly on the temperature and  $\text{Pb}^{2+}$  concentration. When the temperature is under 10 ppm, the effects of the temperature on the adsorption were insignificant; however, when the concentration was over 10 ppm, the adsorption increased with enhancing temperature. With adsorption, the adsorption sites and the adsorption rate gradually decreased. In addition, the kinetic model of  $\text{Pb}^{2+}$  adsorption by biomass fly ash was established. It is concluded that the kinetic process of  $\text{Pb}^{2+}$  removal by biomass fly ash accords with pseudo second-order kinetic rate equation. This study provides a theoretical basis for the development of biomass fly ash adsorbent.

## Keywords

Biomass Fly Ash, Heavy Metal, Adsorption Kinetics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

灰渣是生物质直燃发电的副产物之一，处置不当会造成粉尘污染和水污染等环境问题。目前生物质灰渣的处理方法主要有堆垛、筑路填埋和土壤改良[1] [2]。然而，堆垛、筑路和填埋不仅经济效益差，还会占用大量土地资源；用于改良土壤仍处于研究示范阶段[2]。由于尚缺少高效的利用途径，致使灰渣利用率较低，已成为制约生物质电厂健康发展的问题之一。

重金属(Cu、Ni、Cr、Cd、Mn、Pb等)污染是目前最严重的水土污染问题之一[3] [4] [5]。目前比较成熟的重金属脱除方法有化学沉淀法、吸附法和离子交换法[6]，其中吸附法由于对重金属脱除效果好而广泛应用。目前，常用的吸附剂是活性炭，不同原料制备的活性炭具有不同的吸附特性[7] [8]。以山核桃壳、枣核、桉树皮和开心果壳为原料制备的活性炭对  $\text{Cu}^{2+}$  具有良好的亲和力[9] [10] [11] [12]，但对其他重金属离子的吸附能力则较弱。禽粪活性炭对水中  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  有较高的吸附能力[13]；刺竹活性炭吸附剂对  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的吸附效果最好[14]。

生物质灰渣的主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和未燃尽的炭，有较强的吸附能力，具有成为重金属吸附剂的潜力。然而，目前的研究主要集中于活性炭吸附剂的开发利用，以生物质灰渣为吸附剂的研究相对较少。因此，本文以国能通辽生物发电有限公司生产的生物质灰渣为研究对象，通过实验和吸附动力学模型的建立研究生物质灰渣对不同重金属的吸附行为、吸附容量和吸附过程。本文为生物质灰渣吸附剂的开发提供了理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 实验材料

实验中所用药品试剂如表 1 所示。

本文所使用的生物质灰渣是锅炉的底渣，来自国能通辽生物发电有限公司，生物质为玉米秸秆。

Table 1. Experimental reagents

表 1. 实验试剂

药品名称	分子式	规格	生产厂家
硝酸铅	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	分析纯	阿拉丁
硝酸铜	Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	分析纯	阿拉丁
硝酸镍	Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	分析纯	阿拉丁
硝酸铬	Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	分析纯	阿拉丁
硝酸镉	Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	分析纯	阿拉丁
硝酸锰	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	分析纯	阿拉丁

## 2.2. 生物质灰渣对不同重金属的吸附研究

首先, 制备了 50.00 ppm 的不同重金属(Cu、Ni、Cr、Cd、Mn 和 Pb)溶液; 其次, 取 1.00 g 生物质灰渣加入重金属溶液中, 充分混合后在 15°C、25°C 和 35°C 恒温下振荡 72 h 后取出; 最后, 取 10 mL 混合溶液测量其中重金属浓度。上述实验重复三次, 重金属脱除率取三次实验的平均值。

重金属脱除率的计算方法如下:

$$\alpha = \frac{C_0}{C} \times 100\% \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为重金属的脱除率,  $C_0$  为溶液中重金属离子的初始浓度, 单位为 ppm;  $C$  为吸附完成后溶液中重金属离子的浓度, 单位为 ppm。

## 2.3. 不同条件下 Pb<sup>2+</sup>的吸附研究

首先, 制备了不同浓度的 Pb<sup>2+</sup>溶液(0.10 ppm、0.50 ppm、1.00 ppm、2.50 ppm、5.00 ppm、10.00 ppm、20.00 ppm 和 50.00 ppm); 其次, 取 1.00 g 生物质灰渣加入重金属溶液中, 充分混合; 最后, 将这些混合溶液分别在恒温(15°C、25°C、35°C)下振荡 72 h 后取出, 取 10 mL 混合溶液保存待测样品。上述实验重复三次, Pb<sup>2+</sup>在不同条件下的脱除率取三次实验的平均值, 脱除率由公式(1)计算所得。

Pb<sup>2+</sup>的吸附容量计算方法如下[15]:

$$q_e = \frac{V \times (C_0 - C)}{m} \quad (2)$$

其中,  $q_e$  为平衡浓度为  $C$  时的吸附容量, 单位为 ug/g;  $V$  为 Pb<sup>2+</sup>溶液体积, 单位为 L;  $m$  为生物质灰渣的质量, 单位为 g。

## 2.4. Pb<sup>2+</sup>的吸附动力学研究

通过对吸附平衡反应前后的参数进行拟合, 研究不同条件下 Pb<sup>2+</sup>的吸附过程。吸附动力学数据分别用准一级动力学公式和假二级动力学速率方程进行拟合[16] [17]:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 \times q_e^2} \quad (4)$$

其中,  $q_t$  为单位质量吸附剂在  $t$  时刻吸附的重金属含量, 单位为  $\mu\text{g/g}$ ;  $K_1$  和  $K_2$  分别表示准一级和假二级吸附速率常数, 单位为  $\text{min}^{-1}$ 。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 生物质灰渣对不同重金属的吸附能力

图 1 为生物质灰渣在不同温度下对不同重金属的脱除率。从图 1 中可以看出, 生物质灰渣对不同金属离子的吸附能力差异明显。对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附能力最高, 在  $35^\circ\text{C}$  时的脱除率超过 45%; 对  $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  的吸附能力最弱, 对  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  有一定的吸附能力。温度对生物质灰渣吸附不同重金属的影响是相似的, 均是随着温度的升高, 脱除率增加, 但是太高的温度并不利于金属离子的脱除。对于该吸附的选择性, 可能与生物质灰渣的孔径有关。后续以  $\text{Pb}^{2+}$  为研究对象, 分析生物质灰渣对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附容量、吸附行为以及吸附动力学。

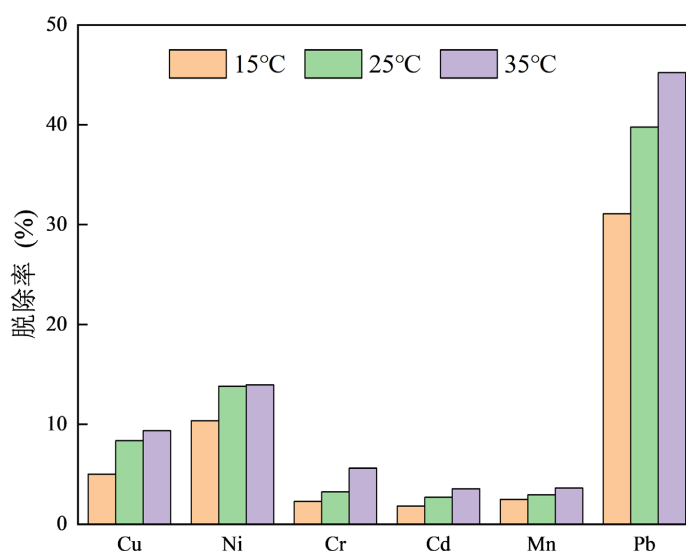


Figure 1. Adsorption capacity of biomass fly ash to different heavy metals  
图 1. 生物质灰渣对不同重金属的吸附能力

#### 3.2. 不同条件下 $\text{Pb}^{2+}$ 的吸附研究

研究了不同温度或  $\text{Pb}^{2+}$  浓度对生物质灰渣吸附容量的影响, 如表 2 所示。当温度为  $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$  和  $35^\circ\text{C}$  时,  $\text{Pb}^{2+}$  的最大吸附量分别为  $777.5 \mu\text{g/g}$ ,  $994.5 \mu\text{g/g}$ ,  $1130.5 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除率分别为 31.1%, 39.8% 和 45.22%。这表明, 升高温度可以提高生物质灰渣的吸附能力。其原因在于, 生物质灰渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的过程为物理吸附过程, 是吸热反应, 温度升高会使吸附平衡向着吸热反应方向移动。因此, 升温导致生物质灰渣的  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除率和吸附容量增加。

同时, 生物质灰渣的吸附能力随着  $\text{Pb}^{2+}$  浓度的增加而降低, 当温度为  $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$  和  $35^\circ\text{C}$  时,  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除率由 100% 分别降低到 31.1%、39.8% 和 45.22%。 $\text{Pb}^{2+}$  脱除率随  $\text{Pb}^{2+}$  浓度的增加而降低。这与生物质灰渣的吸附位点存在联系, 当  $\text{Pb}^{2+}$  浓度较低时, 生物质灰渣表面吸附点充足, 导致大部分  $\text{Pb}^{2+}$  被吸附固定。然而, 当  $\text{Pb}^{2+}$  的数量过高时, 生物质灰渣的吸附点不足, 部分  $\text{Pb}^{2+}$  不能被吸附, 导致  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除率的降低。生物质灰渣的吸附位点由其自身结构特征所决定的, 因此, 提高温度并不能显著提高生物质灰渣的吸附能力。

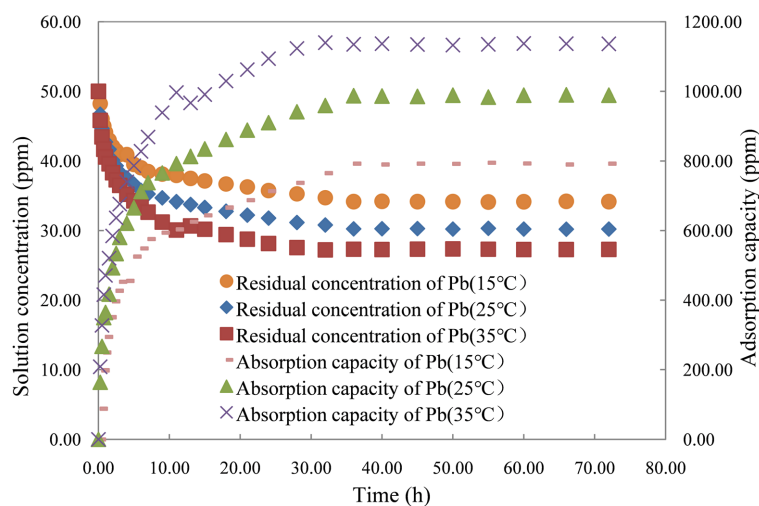
**Table 2.** Adsorption capacity of the biomass fly ash to solutions with  $Pb^{2+}$   
**表 2.** 生物质灰渣对不同浓度铅溶液的吸附量

15°C		25°C		35°C					
$C_0$ (ppm)	$C$ (ppm)	Removal Rate (%)	Adsorption (ug/g)	$C$ (ppm)	Removal Rate (%)	Adsorption (ug/g)	$C$ (ppm)	Removal Rate (%)	Adsorption (ug/g)
0.10	0.00	100.00	5.00	0.00	100.00	5.0	0.00	100.00	5.0
0.50	0.01	98.00	24.50	0.01	98.00	24.5	0.01	98.00	24.5
1.00	0.01	99.00	49.50	0.01	99.00	49.5	0.01	99.00	49.5
2.50	0.05	98.00	122.50	0.08	96.80	121.0	0.05	98.00	122.5
5.00	0.06	98.80	247.00	0.07	98.60	246.5	0.08	99.84	246.0
10.00	0.20	98.00	490.0	0.14	98.60	493.0	0.06	99.40	497.0
20.00	10.03	49.85	748.50	5.13	74.35	993.5	3.56	82.20	1072.0
50.00	34.45	31.10	777.50	30.11	39.78	994.5	27.39	45.22	1130.5

### 3.3. 吸附动力学分析

#### 3.3.1. 生物质灰渣对 $Pb^{2+}$ 的吸附行为

为了研究生物质灰渣对  $Pb^{2+}$  的吸附过程，测量了吸附过程中不同时间点的  $Pb^{2+}$  浓度，如图 2 所示。



**Figure 2.** Adsorption performance of biomass fly ash to  $Pb^{2+}$   
**图 2.** 生物质灰渣对  $Pb^{2+}$  溶液的吸附性能

由图 2 可以看出， $Pb^{2+}$  的脱除率随着吸附时间的增加而增加。在吸附初期(0~15 h)，随着吸附时间增长，脱除率会急剧升高；当吸附时间超过 15 h 时，溶液中  $Pb^{2+}$  浓度趋于稳定，此时，生物质灰渣的吸附能力已经达到饱和。这一现象可以归因于生物质灰渣吸附位点的数量和  $Pb^{2+}$  浓度之间的差异。吸附初期，吸附发生在生物质灰渣表面的吸附位点，较为充足，有利于  $Pb^{2+}$  的吸附，溶液与生物质灰渣表面的高浓度差导致吸附速率加快。随着吸附过程的进行， $Pb^{2+}$  浓度降低，表面吸附趋于饱和， $Pb^{2+}$  会逐渐扩散至生物质灰渣内部，扩散阻力大，吸附速率减慢。最后，内表面的吸附位点逐渐完成吸附，由浓度差产生的推力越来越小，吸附行为达到平衡。

### 3.3.2. 生物质灰渣对 $\text{Pb}^{2+}$ 吸附动力学分析

结合图 2 中的实验数据, 对不同温度下生物质灰渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的动力学进行了分析。同时, 为了更加准确地分析生物质灰渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$  过程的原理, 通过准一级和假二级动力学方程对  $\text{Pb}^{2+}$  吸附过程进行拟合, 结果如图 3 和图 4 所示, 拟合参数如表 3 所示。从拟合动力学模型的曲线和参数来看, 生物质灰渣脱除  $\text{Pb}^{2+}$  的准一级和假二级动力学方程的相关系数均较高。通过与实验所得的平衡吸附容量相比, 假二级动力学速率方程优于准一级动力学方程, 假二级吸附速率方程得到的参数更接近实验数据。

综合相关系数与平衡吸附容量两方面可知, 生物质灰渣在不同温度下脱除  $\text{Pb}^{2+}$  的动力学过程更符合假二级动力学速率方程。其原因在于, 准一级动力学方程有一定的局限性, 准一级动力学认为  $\text{Pb}^{2+}$  浓度决定了生物质灰渣的吸附速率, 仅适用于描述吸附动力学的初始阶段, 不能准确描述整个吸附过程。而假二级动力学方程包含了吸附的全部过程, 如表面吸附以及颗粒内扩散[18]。因此, 假二级动力学方程能更全面更真实地反映  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附过程。

其中,  $q_{e1}(\text{cal})$  为准一级模型平衡吸附量;  $q_{e2}(\text{cal})$  为假二级模型平衡吸附量;  $h$  为吸附模型初始吸附速率。

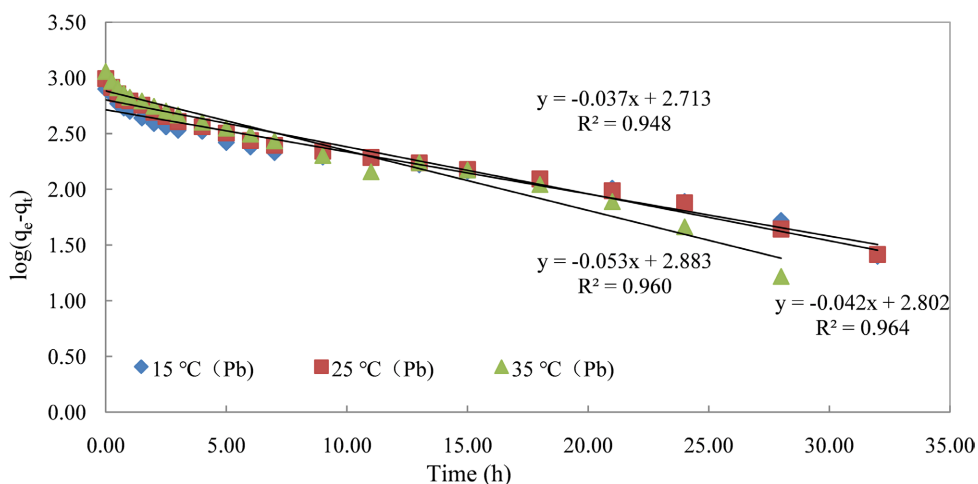


Figure 3. Quasi first-order kinetic equation of  $\text{Pb}^{2+}$  adsorption by biomass fly ash

图 3. 生物质灰渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的准一级动力学方程

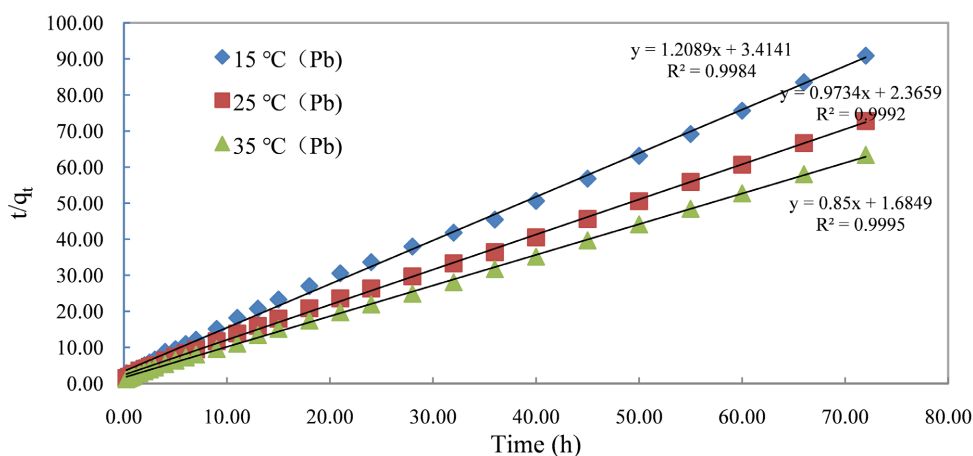


Figure 4. Pseudosecond-order kinetic equation of  $\text{Pb}^{2+}$  adsorption by biomass fly ash

图 4. 生物质灰渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的假二级动力学方程

**Table 3.** Fitting parameters of dynamic model (Lagergren)  
**表 3.** 动态模型拟合参数(Lagergren)

		准一级动力学模型			假二级动力学模型			$q_{e1}(\text{exp})$	
		$R^2$	$K_1$	$q_{e1}(\text{cal})$	$R^2$	$K_2$	$q_{e2}(\text{cal})$		$h$
			$\text{h}^{-1}$	$\text{mg/g}$		$\text{h}^{-1}$	$\text{mg/g}$		
	15°C	0.9825	0.22	0.35	0.9979	1.19	0.50	0.30	0.47
Pb	25°C	0.9882	0.28	0.38	0.9984	1.49	0.47	0.33	0.51
	35°C	0.9746	0.33	0.43	0.9995	1.44	0.60	0.52	0.57

#### 4. 结论

本研究揭示了生物质灰渣对不同重金属的吸附作用, 以及生物质灰渣在不同温度或不同  $\text{Pb}^{2+}$  初始浓度下对溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附作用。结果表明, 生物质灰渣对溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  有较好的脱除效果, 但  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除率随着溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  浓度的增加而降低, 提高温度和延长吸附时间能够提高  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除效率。但由于生物质灰渣自身吸附点的限制, 仅提高温度和延长脱除时间并不能显著提高对  $\text{Pb}^{2+}$  的脱除能力。同时, 对生物质灰渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的动力学进行了分析, 并用准一级和假二级动力学方程对实验数据进行了拟合, 发现生物质灰渣吸附脱除  $\text{Pb}^{2+}$  的动力学过程更符合假二级动力学速率方程。

#### 致 谢

本研究受国家电网有限公司总部科技项目资助(基于生物质电热气耦合的农村综合能源循环利用技术研究及应用)资助, 在此表示感谢。

#### 参考文献

- [1] Dahl, O., Nurmesniemi, H., Pöykiö, R., *et al.* (2009) Comparison of the Characteristics of Bottom Ash and Fly Ash from a Medium-Size (32 MW) Municipal District Heating Plant Incinerating Forest Residues and Peat in a Fluidized-Bed Boiler. *Fuel Processing Technology*, **90**, 871-878.
- [2] Grau, F., Choo, H., Hu, J.W., *et al.* (2015) Engineering Behavior and Characteristics of Wood Ash and Sugarcane Bagasse Ash. *Materials*, **8**, 6962-6977.
- [3] Guan, X. and Sun, L.N. (2014) Current Situation and the Harm of Soil Heavy Metal Pollution and Food Safety. *Applied Mechanics and Materials*, **675-677**, 612-614.
- [4] Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., *et al.* (2017) Foliar Heavy Metal Uptake, Toxicity and Detoxification in Plants: A Comparison of Foliar and Root Metal Uptake. *J Hazard Mater*, **325**, 36-58.
- [5] Popoola, L.T., Adebajo, S.A. and Adeoye, B.K. (2018) Assessment of Atmospheric Particulate Matter and Heavy Metals: A Critical Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **15**, 935-948.
- [6] 陈宏, 刘旭, 李亚男, 张居里, 励建荣. 应用海藻酸钠脱除重金属研究进展[J]. 化学通报, 2017, 80(3): 241-245.
- [7] Sato, S., Yoshihara, K., Moriyama, K., *et al.* (2007) Influence of Activated Carbon Surface Acidity on Adsorption of Heavy Metal Ions and Aromatics from Aqueous Solution. *Applied Surface Science*, **253**, 8554-8559.
- [8] Lo, S.-F., Wang, S.-Y., Tsai, M.-J., *et al.* (2012) Adsorption Capacity and Removal Efficiency of Heavy Metal Ions by Moso and Ma Bamboo Activated Carbons. *Chemical Engineering Research and Design*, **90**, 1397-1406.
- [9] Aguayo-Villarreal, I.A., Bonilla-Petriciolet, A. and Muñoz-Valencia, R. (2017) Preparation of Activated Carbons from Pecan Nutshell and Their Application in the Antagonistic Adsorption of Heavy Metal Ions. *Journal of Molecular Liquids*, **230**, 686-695.
- [10] Bouhamed, F., Elouear, Z., Bouzid, J., *et al.* (2016) Multi-Component Adsorption of Copper, Nickel and Zinc from Aqueous Solutions onto Activated Carbon Prepared from Date Stones. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 15801-15806.

- 
- [11] Kongsuwan, A., Patnukao, P. and Pavasant, P. (2009) Binary Component Sorption of Cu(II) and Pb(II) with Activated Carbon from Eucalyptus *Camaldulensis* Dehn Bark. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **15**, 465-470.
- [12] Nejadshafiee, V. and Islami, M.R. (2020) Intelligent-Activated Carbon Prepared from Pistachio Shells Precursor for Effective Adsorption of Heavy Metals from Industrial Waste of Copper Mine. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 1625-1639.
- [13] Guo, M., Qiu, G. and Song, W. (2010) Poultry Litter-Based Activated Carbon for Removing Heavy Metal Ions in Water. *Waste Management*, **30**, 308-315.
- [14] Huang, P.H. and Wen, J.T. (2014) Study on Thorny Bamboo Activated Carbon for Capturing Heavy Metals in Groundwater. *Applied Mechanics and Materials*, **535**, 427-431.
- [15] Ahn, C.K., Park, D., Woo, S.H., *et al.* (2009) Removal of Cationic Heavy Metal From Aqueous Solution by Activated Carbon Impregnated with Anionic Surfactants. *Journal of Hazardous Materials*, **164**, 1130-1136.
- [16] Zhao, D., Wang, Z., Lu, S., *et al.* (2020) An Amidoxime-Functionalized Polypropylene Fiber: Competitive Removal of Cu(II), Pb(II) and Zn(II) from Wastewater and Subsequent Sequestration in Cement Mortar. *Journal of Cleaner Production*, **274**, Article ID: 123049.
- [17] Kieling, A.G., Mendel, T. and Caetano, M.O. (2019) Efficiency of Rice Husk Ash to Adsorb Chromium(VI) Using the *Allium Cepa* Toxicity Test. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 28491-28499.
- [18] 鲍超, 凌琪, 伍昌年, 方涛, 赵秋燕, 孙冰香, 张睿, 孔张成, 杨浩. 改性煤气化灰渣吸附重金属离子的研究[J]. *应用化工*, 2016, 45(4): 630-633.