

# 改性生物质炭对水溶液中 $\text{Hg}^{2+}$ 的吸附性能研究

赫 斌<sup>1</sup>, 陈亚君<sup>2</sup>, 林 军<sup>1,3</sup>, 王风贺<sup>2</sup>, 李明海<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学化学与材料科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学环境学院, 江苏 南京 210023)

(3. 南京师范大学常州创新发展研究院, 江苏 常州 213000)

**[摘要]** 制备了 KOH 改性低温生物质炭(low temperature biochar modified by potassium hydroxide, BC-P)、KOH 改性高温生物质炭(high temperature biochar modified by potassium hydroxide, HC-P)、NaHS 改性低温生物质炭(low temperature biochar modified by sodium hydrosulfide, BC-S)、NaHS 改性高温生物质炭(high temperature biochar modified by sodium hydrosulfide, HC-S), 并研究了溶液 pH、吸附剂投加量、吸附温度和  $\text{Hg}^{2+}$  浓度等因素对上述 4 种改性生物质炭吸附水溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  的影响. 结果表明, BC-S 对  $\text{Hg}^{2+}$  吸附效果最好, 在 pH 为 4、温度为 298 K、投加量为 1.2 g/L 时, 对 10.0 mg/L 的  $\text{Hg}^{2+}$  溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  吸附量为 8.48 mg/g, 去除率达到 97.89%. 准二级动力学能很好地描述 BC-S 对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附动力学过程, 其等温吸附过程符合 Langmuir 吸附等温线, 吸附热力学表明 298 K 最有利于 BC-S 吸附  $\text{Hg}^{2+}$ .

**[关键词]** 生物质炭, 改性,  $\text{Hg}^{2+}$ , 吸附

**[中图分类号]** X703 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2018)01-0086-07

## The Investigation of Modified Biochar's Adsorption Performance on $\text{Hg}^{2+}$ in Solution

He Bin<sup>1</sup>, Chen Yajun<sup>2</sup>, Lin Jun<sup>1,3</sup>, Wang Fenghe<sup>2</sup>, Li Minghai<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Materials Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3. Changzhou Institute of Innovation and Development, Nanjing Normal University, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** The low temperature biomass carbon modified by KOH (BC-P), high temperature biomass carbon modified by KOH (HC-P), low temperature biomass carbon modified by NaHS (BC-S) and high temperature biomass carbon modified by NaHS (HC-S) are prepared respectively. The influence of solution pH, adsorbents dosage, temperature and initial concentration of  $\text{Hg}^{2+}$  on the adsorption of  $\text{Hg}^{2+}$  of the four modified adsorbents are discussed. The results show that the adsorption capacity of BC-S is better than the other adsorbents. The maximum adsorption amounts is 8.48 mg/g and the removal percentage is 97.89% at the condition of pH 4, dosage 1.2 g/L and temperature 298 K. The pseudo-second-order model can describe the adsorption kinetic of BC-S on  $\text{Hg}^{2+}$  well and the adsorption behavior follows Langmuir model. Adsorption thermodynamics show that 298 K is the most favorable temperature to adsorb  $\text{Hg}^{2+}$ .

**Key words:** biomass carbon, modified,  $\text{Hg}^{2+}$ , adsorb

汞在氯碱、塑料、冶金、农药、电子和油漆等领域有广泛应用. 与其他重金属污染不同, 汞污染具有持久性、易迁移性、高度的生物富集性、强毒性等特点. 环境中的汞可在一定条件下转化为剧毒的甲基汞, 对人体健康造成极大的危害<sup>[1]</sup>. 因此, 必须对含  $\text{Hg}^{2+}$  废水进行处理, 以达到排放标准. 常见的去除  $\text{Hg}^{2+}$  的方法有化学沉淀法<sup>[2]</sup>、吸附法<sup>[3]</sup>、离子交换法<sup>[4]</sup>、微生物法<sup>[5]</sup>和萃取法<sup>[6]</sup>等. 目前工业中常使用吸附法去除水溶液中的  $\text{Hg}^{2+}$ , 其中利用生物质炭去除水溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  已成为众多学者的研究热点. 董亚文等人<sup>[7]</sup>用稻壳在 773 K 条件下制备出生物质炭, 对初始浓度为 3.0 mg/L 的汞离子溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  去除率到达 92.66%;

收稿日期: 2018-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金(41473071)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016001-03)、江苏省高校自然科学研究重大项目(16KJA610001).

通讯联系人: 林军, 博士, 教授, 研究方向: 化工分离、废弃资源综合利用. E-mail: linjun@njnu.edu.cn

Mohsen Ghorbani 等人<sup>[8]</sup>在 773 K 条件下用稻壳制备生物质炭,在 pH 为 9 时,对初始浓度为 10 mg/L 的  $\text{Hg}^{2+}$  溶液中的  $\text{Hg}^{2+}$  去除率达到了 95%.

为增加生物质炭的吸附性能,可对吸附剂进行改性.刘明灯等人<sup>[9]</sup>使用氨气对制备的生物质炭进行改性,发现氨气改性后的生物质炭对水溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附能力从 28 mg/g 上升到 91 mg/g;谢新平<sup>[10]</sup>等人使用溴化钾溶液对生物质炭进行改性,发现改性后的生物质炭对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率达到 90%,高于改性前的 77%.本课题组以稻壳为原料制备得到低温生物质炭 BC<sup>[11]</sup>,本文在此基础上使用 KOH、NaHS 对低温生物质炭和高温生物质炭 HC<sup>[12]</sup>进行改性<sup>[13]</sup>,分别制备出 KOH 改性的低温生物质炭(BC-P)、KOH 改性的高温生物质炭(HC-P)、NaHS 改性的低温生物质炭(BC-S)和 NaHS 改性的高温生物质炭(HC-S),并将其应用于吸附水溶液中的  $\text{Hg}^{2+}$ .

## 1 材料及方法

### 1.1 实验材料

主要仪器:SHZ-88 型台式水浴恒温振荡器(江苏太仓市实验设备厂),DGG-9070A 型热恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司),SHB-Ⅲ型循环水式多用真空泵(南京文尔仪器设备有限公司),Vario EL Ⅲ型元素分析仪(德国 Elementar 公司).

主要试剂:BC-P、BC-S、HC-P、HC-S(自制), $\text{H}_2\text{HgN}_2\text{O}_7$ (贵州铜仁试剂厂),KOH、HCl(国药集团化学试剂有限公司).各化学试剂均为分析纯.

### 1.2 实验方法

实验过程中  $\text{Hg}^{2+}$  去除率  $w$  和吸附剂吸附量  $q$  由式(1)和(2)计算:

$$w = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$q = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}. \quad (2)$$

式中, $w$  为吸附剂对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率; $C_0$  为  $\text{Hg}^{2+}$  的初始浓度,mg/L; $C_t$  为  $t$  时刻  $\text{Hg}^{2+}$  的浓度,mg/L; $q$  为吸附剂的吸附量,mg/g; $m$  为吸附剂的投加量,g; $V$  为  $\text{Hg}^{2+}$  溶液的体积,mL.

分别取一定量的吸附剂于 50 mL 的离心管中,加入 25 mL 不同浓度的  $\text{Hg}^{2+}$  溶液,用 NaOH 和 HCl 调节溶液 pH,控制吸附温度,振荡吸附 4 h,0.45  $\mu\text{m}$  滤纸过滤检测  $\text{Hg}^{2+}$  浓度<sup>[14]</sup>,计算各热力学参数.

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附剂元素含量及等电荷点分析

吸附剂各元素含量及等电荷点如表 1 所示.

表 1 各元素含量及吸附剂等电荷点

Table 1 Contents of elements and iso-charge point of adsorbents

吸附剂	元素含量/%					元素比		等电荷点
	C	H	O	N	S	(N+O)/C	H/C	
BC-S	73.06	5.18	17.92	3.67	0.17	0.30	0.071	3.89
HC-S	77.63	3.44	16.23	2.54	0.16	0.24	0.046	4.15
BC-P	71.79	5.66	18.57	3.56	0.12	0.29	0.074	5.86
HC-P	76.66	3.79	16.65	2.81	0.09	0.25	0.049	6.21

由表 1 可知,HC-P 和 HC-S 的碳含量高于 BC-S 和 BC-P,其余元素含量均低于 BC-S 和 BC-P,这可能是由于高温制备过程中有机物不断分解富炭<sup>[14]</sup>,O、N、H、S 不断挥发,(N+O)/C 和 H/C 比值减小,吸附剂的不饱和基团减少;BC-S 和 HC-S 的含硫量多于 BC-P 和 HC-P,等电荷点小于 BC-P 和 HC-P.

### 2.2 吸附条件对去除率的影响

#### 2.2.1 pH 值对 $\text{Hg}^{2+}$ 去除率的影响

溶液的 pH 值会影响  $\text{Hg}^{2+}$  在溶液中的存在形式以及吸附剂的表面电荷<sup>[8]</sup>,是影响  $\text{Hg}^{2+}$  去除率的重要因素.图 1 所示为不同 pH 值下  $\text{Hg}^{2+}$  去除率的影响曲线.

由图 1 可知,去除率曲线呈马鞍形,BC-S 和 HC-S 的最佳吸附 pH 为 4,BC-P 和 HC-P 的最佳吸附 pH 为 6,与各吸附剂等电荷点接近.当溶液 pH 值低于吸附剂等电荷点时,吸附剂质子化,对  $\text{Hg}^{2+}$  有静电排斥作用<sup>[15]</sup>,导致  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率较低,此时吸附剂质子化是影响去除率的主要因素;当溶液 pH 值高于吸附剂等电荷点时,溶液中  $\text{OH}^-$  较多, $\text{Hg}^{2+}$  与  $\text{OH}^-$  结合生成  $\text{Hg}(\text{OH})_2$ ,溶液中游离的  $\text{Hg}^{2+}$  减少,导致去除率降低<sup>[16]</sup>,此时游离的  $\text{Hg}^{2+}$  减少是影响去除率的主要因素.

### 2.2.2 吸附剂投加量对 $\text{Hg}^{2+}$ 去除率的影响

图 2 所示为吸附剂投加量对  $\text{Hg}^{2+}$  去除率的影响.

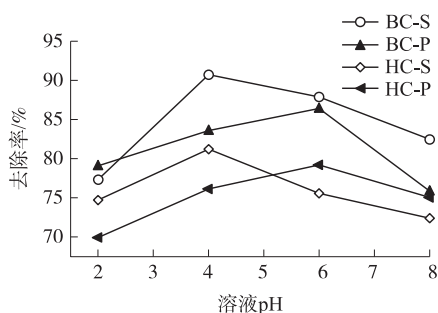


图 1 pH 值对去除率的影响

Fig. 1 The influence on the sorption percentage of pH

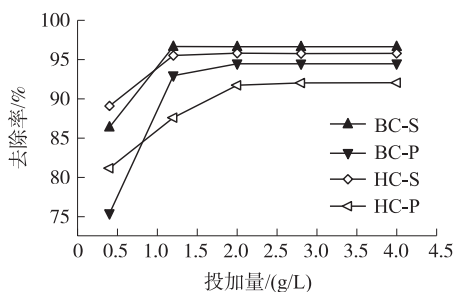


图 2 投加量对去除率的影响

Fig. 2 The influence on the removal percentage of dosage

图 2 显示,随着吸附剂投加量增加,吸附剂对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附率先升高后基本稳持稳定.其中 BC-P 和 HC-P 在吸附剂投加量为 2.0 g/L 时,去除率接近最大,分别达到 94.46% 和 91.71%;对于 BC-S 和 HC-S,在吸附剂投加量为 1.2 g/L 时去除率接近最大,分别为 96.65% 和 95.51%.究其原因,当投加量较少时,吸附位点较少,去除率较低;随着投加量增加,吸附位点增多, $\text{Hg}^{2+}$  进入吸附位点较多,去除率增加;当投加量继续增大时,吸附位点发生竞争吸附,解吸位点增加,最终吸附、解吸过程达到平衡,吸附达到饱和<sup>[17]</sup>.因此 BC-P 和 HC-P 的最佳投加量为 2.0 g/L,BC-S 和 HC-S 的最佳投加量为 1.2 g/L.

此外还发现,同等条件下 BC-S 和 HC-S 的去除率高于 BC-P 和 HC-P,这可能是因为经 NaHS 改性后,吸附剂含硫量增加(见表 1),对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附能力增强,因而  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率较高,与图 2 实验结果吻合.

## 2.3 吸附机理分析

### 2.3.1 吸附动力学

吸附动力学研究吸附剂对吸附质吸附速率的快慢.本文用准一级动力学方程和准二级动力学方程模拟对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附机制:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t, \quad (3)$$

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

式中,  $q_t$  为  $t$  时刻的吸附量, mg/g;  $q_e$  为平衡吸附量, mg/g;  $k_1$  为准一级动力学吸附速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $k_2$  为准二级动力学吸附速率常数,  $\text{g}/(\text{min} \cdot \text{mg})$ .  $\text{Hg}^{2+}$  在不同吸附剂上的吸附动力学拟合曲线见图 3, 具体吸附参数见表 2.

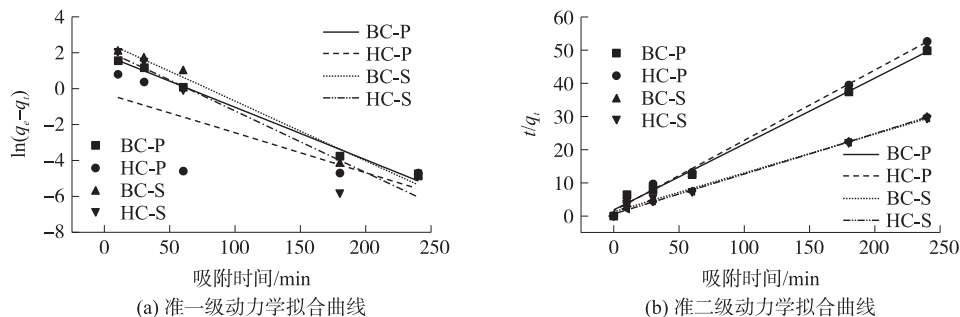


图 3 准一级和准二级动力学拟合曲线

Fig. 3 Pseudo-first-order and pseudo-second-order fitting curve

表 2 吸附动力学模型参数  
Table 2 Parameters of kinetic model of adsorption

吸附剂	准一级动力学方程				准二级动力学方程			
	$k_1$	$q_{e \text{ exp}}$	$q_{e \text{ cal}}$	$r^2$	$k_2$	$q_{e \text{ exp}}$	$q_{e \text{ cal}}$	$r^2$
BC-S	0.039 4	8.48	3.93	0.634 8	0.010 6	8.48	8.57	0.990 7
HC-S	0.037 2	7.96	2.00	0.409 5	0.022 2	7.96	8.22	0.996 8
BC-P	0.035 7	4.81	2.34	0.706 5	0.021 8	4.81	5.03	0.992 5
HC-P	0.037 1	4.59	2.21	0.519 9	0.027 5	4.59	4.89	0.998 4

由图 3 可知,  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附过程可分为 3 个阶段<sup>[18]</sup>: (1) 快速吸附阶段, 此时  $\text{Hg}^{2+}$  快速进入吸附位点发生吸附作用; (2) 缓慢吸附阶段, 此时由于吸附位点被大量占据,  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率减小, 吸附速率快速下降; (3) 吸附平衡阶段, 此时  $\text{Hg}^{2+}$  吸附和脱附速率相等, 溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  处于动态平衡, 吸附达到平衡。

由表 2 可知, 准一级动力学方程拟合线性相关系数较差, 在 0.409 5~0.706 5 之间, 不适合描述  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附过程, 这是因为准一级动力学方程仅适合吸附初始阶段, 不适用于整个吸附过程; 准二级动力学拟合的线性相关系数大于 0.99, 拟合效果较好, 实际吸附量 ( $q_{e \text{ exp}}$ ) 和拟合计算所得吸附量 ( $q_{e \text{ cal}}$ ) 接近, 说明  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附过程是受化学吸附控制的<sup>[17]</sup>。

2.3.2 吸附等温线分析

吸附等温线是反映吸附剂与吸附质亲和力强弱的重要依据。本文使用 Langmuir<sup>[19]</sup> 和 Freundlich<sup>[20]</sup> 吸附等温线模型来分析吸附剂对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附机理:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{K_L C_e + 1}, \quad (5)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n}. \quad (6)$$

式中,  $q_e$  为平衡吸附量, mg/g;  $C_e$  为平衡溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  的浓度, mg/L;  $q_m$  为饱和吸附量, mg/g;  $K_L$  为 Langmuir 吸附等温线常数;  $K_F$  为 Freundlich 吸附等温线常数;  $n$  是与吸附材料有关的吸附强度参数。吸附等温线如图 4 所示, 具体吸附参数如表 3 所示。

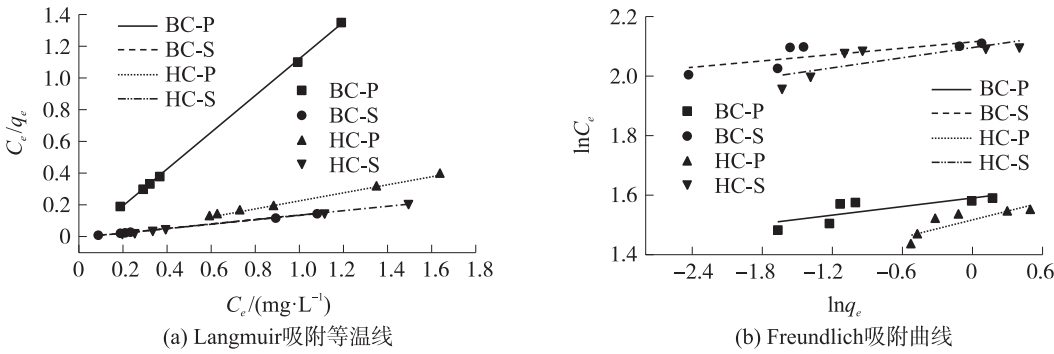


图 4 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线  
Fig. 4 Langmuir and Freundlich adsorption isotherms

表 3 吸附等温线参数  
Table 3 Adsorption isotherm parameters

吸附剂	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$q_m$	$K_L$	$r^2$	$1/n$	$K_F$	$r^2$
BC-S	8.48	47.32	0.999 2	0.039 8	8.27	0.395 0
HC-S	7.96	24.71	0.999 0	0.056 0	8.13	0.513 7
BC-P	3.95	9.52	0.999 1	0.065 3	4.81	0.554 8
HC-P	3.96	31.43	0.999 6	0.097 2	4.56	0.642 2

由表 3 可知,与 Freundlich 模型拟合相比,Langmuir 模型拟合效果较好,线性相关系数超过 0.99,说明吸附过程为单分子层吸附<sup>[13]</sup>. BC-S 吸附量(8.48 mg/g)高于 HC-S 吸附量(7.96 mg/g),远高于 BC-P(4.81 mg/g)和 HC-P(4.59 mg/g)吸附量. 相比其他生物质炭(见表 4),本文制备的 BC-S 的最大吸附量高于其他吸附材料. 因此,本文制备的 BC-S 在 Hg<sup>2+</sup>去除方面具有较好的应用前景.

2.3.3 吸附热力学分析

吸附热力学参数可通过 van't Hoff 方程来计算<sup>[23]</sup>:

$$K_c = \frac{C_0 - C_e}{C_0},$$

(7)

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_c,$$

(8)

$$\Delta H^0 = \Delta G^0 + T \Delta S^0.$$

(9)

式中, $K_c$  为分配系数,mL/g; $R$  为气体常数,为 8.314 J/(mol·K); $C_e$  为溶液的平衡浓度,mg/L; $C_0$  为溶液的初始浓度,mg/L; $\Delta G^0$  为吉布斯自由能,kJ/mol; $\Delta H^0$  为焓变,kJ/mol; $\Delta S^0$  为熵变,kJ/mol.

不同温度下各吸附剂对 Hg<sup>2+</sup>吸附热力学参数见表 5、表 6.

表 5 288~298 K 热力学数据

Table 5 Thermodynamic parameters between 288 K and 298 K

吸附剂	温度/K	去除率/%	$K_c$	$\Delta G^0/(kJ/mol)$	$\Delta H^0/(kJ/mol)$	$\Delta S^0/(kJ/mol)$
BC-P	288	92.44	12.20	-5.99	49.92	0.19
	293	94.01	16.56	-6.84		
	298	96.24	24.56	-7.93		
BC-S	288	93.58	9.36	-6.42	88.61	0.33
	293	96.77	9.65	-8.08		
	298	98.03	9.81	-9.72		
HC-P	288	89.20	8.32	-5.02	35.56	0.14
	293	91.20	10.51	-5.73		
	298	93.43	13.56	-6.46		
HC-S	288	92.37	12.16	-5.98	57.13	0.22
	293	94.33	17.34	-6.95		
	298	96.45	27.07	-8.17		

表 6 298~308 K 热力学数据

Table 6 Thermodynamic parameters between 298 K and 308 K

吸附剂	温度/K	去除率/%	$K_c$	$\Delta G^0/(kJ/mol)$	$\Delta H^0/(kJ/mol)$	$\Delta S^0/(kJ/mol)$
BC-P	298	96.24	24.56	-7.93	-25.53	-0.06
	303	95.55	21.34	-7.71		
	308	94.86	17.58	-7.34		
BC-S	298	98.03	9.81	-9.72	-65.24	-0.19
	303	97.24	9.73	-9.07		
	308	95.87	9.56	-7.86		
HC-P	298	93.43	13.56	-6.46	-22.55	-0.05
	303	92.22	11.68	-6.19		
	308	90.97	10.08	-5.92		
HC-S	298	96.45	27.07	-8.17	-59.35	-0.17
	303	94.36	16.52	-7.07		
	308	92.52	12.42	-6.45		

由表 5 和表 6 可知,298 K 时 4 种吸附剂对 Hg<sup>2+</sup>的去除率最大;不同温度下 Hg<sup>2+</sup>在不同吸附剂上的吉布斯自由能均小于零,表明 Hg<sup>2+</sup>的吸附过程自发进行,在 298 K 时吉布斯自由能最大,吸附势最大,吸附能力最强. 由表 5 可知,在 288 K~298 K 之间, $\Delta H^0$  大于零,吸附过程为吸热反应,升温有利于吸附 Hg<sup>2+</sup>. 由表 6 可知,在 298 K~308 K 之间, $\Delta H^0$  小于零,吸附过程为放热反应,降温有利于吸附 Hg<sup>2+</sup>;298 K 时 Hg<sup>2+</sup>去除率最高,分析结果与温度对去除率的影响实验结果吻合.

### 3 结论

使用 BC-S、BC-P、HC-S 和 HC-P 4 种改性生物质炭吸附剂对水溶液中的  $\text{Hg}^{2+}$  进行吸附,研究结果表明 BC-S(98.03%)和 HC-S(96.45%)对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率比 BC-P(96.24%)和 HC-P(93.43%)对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率高;BC-S 对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率高于 HC-S;BC-S 在投加量为 1.2 g/L、溶液 pH 值为 4 时对 10.0 mg/L 的  $\text{Hg}^{2+}$  溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率达到 98.03%,吸附量达到 8.48 mg/g,在  $\text{Hg}^{2+}$  去除方面具有良好的应用前景. 进一步理论分析表明,BC-S 对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附过程符合准二级动力学模型和 Langmuir 等温吸附模型.

### [参考文献](References)

- [1] 冯新斌,仇广乐,付学吾,等. 环境汞污染[J]. 化学进展,2009,21:436-457.  
FENG X B, QIU G L, FU X W, et al. Mercury pollution in the environment[J]. Progress in chemistry, 2009, 21: 436-457. (in Chinese)
- [2] 张晓嘉,谢海英,陈鹤文,等. 化学沉淀法去除水中汞的试验研究[J]. 供水技术,2011,5(2):25-28.  
ZHANG X J, XIE H Y, CHEN H W, et al. Chemical precipitation method for removal of mercury in water[J]. Water supply technology, 2011, 5(2): 25-28. (in Chinese)
- [3] LAU R I, CHEN W C, YUAN C S, et al. Enhancing the adsorption of vapor-phase mercury chloride with an innovative composite sulfur-impregnated activated carbon[J]. Journal of hazardous materials, 2012(S217/218): 43-50.
- [4] CLERCQ J D. Removal of mercury from aqueous solutions by adsorption on a new ultra stable mesoporous adsorbent and on a commercial ion exchange resin[J]. International journal of industrial chemistry, 2012, 3(1): 1.
- [5] ESBRI J M, BERNAUS A, AVILA M, et al. XANES speciation of mercury in three mining districts-Almadén, Asturias (Spain), Idria (Slovenia)[J]. Journal of synchrotron radiation, 2010, 17(2): 179-186.
- [6] 王晓伟,陈莎. 1-辛基-3-甲基咪唑离子液体作为可循环溶剂萃取/去除水中二价汞研究[J]. 化学学报,2014,72(11): 1 147-1 151.  
WANG X W, CHEN S. Use of ionic 1-octyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate as a recyclable solvent for extraction/removal of  $\text{Hg}(\text{II})$  from water[J]. Acta chimica sinica, 2014, 72(11): 1 147-1 151. (in Chinese)
- [7] 董亚文. 改性稻壳灰对水中重金属铬和汞的吸附作用[D]. 哈尔滨:哈尔滨商业大学,2016.  
DONG Y W. Adsorption of heavy metals Cr and Hg in water by modified rice husk ash[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016. (in Chinese)
- [8] GHORBANI M, LASHKENARI M S, EISAZADEH H. Application of polyaniline nanocomposite coated on rice husk ash for removal of  $\text{Hg}(\text{II})$  from aqueous media[J]. Synthetic metals, 2011, 161(13-14): 1 430-1 433.
- [9] 刘明灯,王传义. 氨基化生物质炭吸附水中汞离子性能研究[J]. 应用化工,2013,42(6): 1 035-1 038.  
LIU M D, WANG C Y. Study on adsorption of mercury ion in water by aminated biomass carbon[J]. Applied chemical industry, 2013, 42(6): 1 035-1 038. (in Chinese)
- [10] 谢新苹,蒋剑春,孙康,等. 改性竹活性炭去除汞离子[J]. 环境工程学报,2014,8(4): 1 285-1 289.  
XIE X P, JIANG J C, SUN K, et al. Removal of mercury ion by modified bamboo activated carbon[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2014, 8(4): 1 285-1 289. (in Chinese)
- [11] 林军,赫斌,苏佳伟,等. 低温条件下利用稻壳制备生物质吸附材料的方法, CN106984283A[P/OL]. [2017-05-25]  
[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Patent\\_CN201710376148.9.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Patent_CN201710376148.9.aspx).  
LIN J, HE B, SU J W, et al. Preparation of biomass adsorption material from rice husk at low temperature, CN106984283A[P/OL]. [2017-05-25] [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Patent\\_CN201710376148.9.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Patent_CN201710376148.9.aspx). (in Chinese)
- [12] TAN G, SUN W, XU Y, et al. Sorption of mercury(II) and atrazine by biochar, modified biochars and biochar based activated carbon in aqueous solution[J]. Bioresource technology, 2016, 211: 727-735.
- [13] REGMI P, GARCIA MOSCOSO J L, KUMAR S, et al. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switch-grass biochar produced via hydrothermal carbonization process[J]. Journal of environmental management, 2012, 109(17): 61-69.
- [14] JIANG T Y, JIANG J, XU R K, et al. Adsorption of  $\text{Pb}(\text{II})$  on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar[J]. Chemosphere, 2012, 89(3): 249-256.



- [15] SARI A, TUZEN M. Removal of mercury(II) from aqueous solution using moss (*drepanocladus revolvens*) biomass: equilibrium, thermodynamic and kinetic studies[J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, 171(1): 500–507.
- [16] 丁世敏, 封享华, 汪玉庭, 等. 交联壳聚糖多孔微球对染料的吸附平衡及吸附动力学分析[J]. *分析科学学报*, 2005, 21(2): 127–130.
- DING S M, FENG X H, WANG Y T, et al. Adsorption equilibrium and adsorption kinetics of crosslinked chitosan porous microspheres[J]. *Journal of analytical science*, 2005, 21(2): 127–130. (in Chinese)
- [17] PRASAD A G D, ABDULLAH M A. Biosorption potential of potato peel waste for the removal of nickel from aqueous solutions: equilibrium and kinetic studies[J]. *International journal of chemical engineering research*, 2009, 1(2): 77–78.
- [18] 仇欢, 王风贺, 李卉, 等. 不同膨润土对含镉废水的吸附性能[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11): 6 513–6 518.
- QIU H, WANG F H, LI H, et al. Adsorption properties of different bentonites for wastewater containing cadmium[J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2016, 10(11): 6 513–6 518. (in Chinese)
- [19] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. *Jamchemsoc*, 1918, 143(9): 1 361–1 403.
- [20] FREUNDLICH H. Über die adsorption in Lösungen[J]. *Zeitschrift Für physikalische chemie*, 1907, 57(1): 385–470.
- [21] 赵凌宇, 王延华, 杨浩, 等. 木屑和稻秆基生物质炭对汞的吸附特性比较[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 556–562.
- ZHAO L Y, WANG Y H, YANG H, et al. Comparison of adsorption characteristics of Hg by wood and rice straw based biomass charcoal[J]. *Journal of agro-environment science*, 2015, 34(3): 556–562. (in Chinese)
- [22] LIANG X, XU Y, WANG L, et al. Sorption of  $Pb^{2+}$  on mercapto functionalized sepiolite[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(2): 548–556.
- [23] KUSHWAHA S, SREEDHAR B, SUDHAKAR P P. Adsorption of  $Hg^{2+}$  onto *borassus flabellifer*; a redox mechanism[J]. *Chemical engineering journal*, 2012, s 193–194(12): 328–338.

[责任编辑: 严海琳]