

# 磷酸盐改性生物炭去除水中 U(VI) 的 机制研究

刘政<sup>1</sup>, 陈雨秋<sup>2</sup>, 王紫瑶<sup>2</sup>, 邓琪琪<sup>1</sup>, 曾涛涛<sup>1\*</sup>

(1. 南华大学污染控制与资源化技术湖南省高校重点实验室, 湖南 衡阳 421001;

2. 广州大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**采用玉米秸秆为原料制备磷酸二氢钾改性的生物炭(PBC),并用于去除水中的U(VI)。对改性前后生物炭进行了扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和比表面积分析(BET)表征,结果显示,改性后的生物炭发生了显著的结构和化学变化。考察了溶液pH、生物炭投加量、吸附时间、共存离子等因素对PBC去除U(VI)效果的影响。结果表明,当PBC投加量为0.2 g/L、溶液初始pH=3、温度40℃、吸附时间为240 min时,PBC对U(VI)的去除效果最佳,吸附量可以达到228.87 mg/g。PBC对U(VI)的吸附过程符合准二级动力学方程及Langmuir等温吸附模型( $R^2 > 0.99$ ),表明吸附过程是化学单分子层吸附;X射线光电子能谱(XPS)分析证实磷酸基团与含碳官能团参与了U(VI)的吸附固定,这些发现表明PBC具有修复铀污染的潜力。

**关键词:**铀;生物炭;吸附;磷酸二氢钾

**中图分类号:**X591

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2025)S2-0128-06

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.024

## Research on mechanism of U(VI) removal from water by phosphate-modified biochar

LIU Zheng<sup>1</sup>, CHEN Yu-qiu<sup>2</sup>, WANG Zi-yao<sup>2</sup>, DENG Qi-qi<sup>1</sup>, ZENG Tao-tao<sup>1\*</sup>

(1. Hunan Provincial Universities' Key Laboratory of Pollution Control and Resource Technology,

University of South China, Hengyang 421001, China; 2. School of Environmental Science and Engineering,

Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-modified biochar (PBC) derived from corn straw is prepared, and applied for U(VI) removal from water. The biochar before and after modification is characterized by means of scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis, revealing significant structural and chemical alterations in the modified biochar. The influences of solution pH, biochar dosage, contact time, and coexisting ions on U(VI) removal efficiency are systematically investigated. Results indicate that the optimal U(VI) removal performance by PBC can be achieved with a maximum adsorption capacity of 228.87 mg/g when PBC dosage is 0.2 g/L, initial pH is 3, the temperature is 40°C, and contact time is 240 min. The adsorption process of U(VI) by PBC follows the quasi second-order kinetic equation and Langmuir isotherm adsorption model ( $R^2 > 0.99$ ), suggesting a chemisorption-dominated monolayer adsorption mechanism. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis confirms that phosphate groups and carbon-containing functional groups involves in the adsorption of U(VI). These findings demonstrate the potential of PBC for uranium pollution remediation.

**Key words:** uranium; biochar; adsorption; potassium dihydrogen phosphate

U(VI)作为铀元素最常见的氧化态,因其在地质环境中的高迁移性、化学放射性、非生物降解性及毒性而备受关注<sup>[1]</sup>。铀尾矿的不当处置会导致水溶性U(VI)进入地下水系统并长期滞留,进而引发严重的生态环境问题<sup>[2]</sup>。更为严重的是,水体中的U(VI)可通过食物链在人体内累积,诱发癌症、白血病等致命疾病<sup>[3]</sup>。因此,开发高效处理含铀废水的方法已成为当务之急。

目前,吸附法因其经济效益显著、去除效率高、

操作简便等优势,从化学沉淀法、膜分离法、离子交换、电化学等众多方法中脱颖而出<sup>[4-6]</sup>。尽管研究人员已开发出零价铁材料<sup>[7]</sup>、金属有机框架材料<sup>[8]</sup>、石墨烯材料<sup>[9]</sup>等多种优异的U(VI)吸附剂,但这些材料普遍存在制备流程复杂、选择性差或反应条件苛刻等不足,限制了其在实际U(VI)污染修复中的应用。

生物炭(BC)作为一种以生物质为原料、经高温热解制得的富含碳素的固体材料,具有内部疏松多

收稿日期:2025-03-04;修回日期:2025-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52170164);湖南省研究生科研创新项目资助(CX20240823)

作者简介:刘政(2000-),男,硕士生,研究方向为污水处理,2324363646@qq.com;曾涛涛(1985-),男,博士,教授,研究方向为污水生物处理与资源化,通讯联系人,zengtaotao@usc.edu.cn。

孔,比表面积大,吸附能力、氧化能力和阳离子交换能力强等特点<sup>[10]</sup>。它可通过物理吸附、静电吸引、离子交换和络合作用有效去除废水中带正电的重金属离子,被视为极具潜力的吸附材料<sup>[11]</sup>。鉴于生物炭表面的官能团可与铀发生特定配位以发挥吸附作用,开发具有良好比表面积和丰富表面官能团的生物炭成为提高其除铀效率的重要改性方向。

玉米秸秆因其生长周期短、产量高、分布广、碳源丰富等优势,被广泛用于制备生物炭,并在处理重金属废水领域得到了深入研究<sup>[12]</sup>。然而,玉米秸秆生物炭在高温碳化过程中会丧失部分对铀结合能力强的官能团,导致其对 U(VI) 吸附能力下降。因此,对玉米秸秆生物炭进行适当改性以提升其 U(VI) 吸附容量显得尤为重要<sup>[13]</sup>。磷酸盐改性可以引入含磷官能团,这些官能团能与铀反应生成高度稳定的铀酰化合物<sup>[14]</sup>。同时,磷酸盐还可通过脱水、环化和缩合促进生物炭生成新的微孔,从而增加其比表面积<sup>[15]</sup>。

基于此,本研究以农业废弃物玉米秸秆为原料,采用  $K_2HPO_4$  预浸渍热解法合成富含磷酸基团和高比表面积的磷改性生物炭(PBC)。通过考察不同接触时间、投加量、溶液 pH、温度、离子强度、竞争干扰金属离子等物理化学条件下 BC、PBC 对 U(VI) 的吸附特性,拟合动力学和热力学模型以分析反应机理。此外,采用 SEM、FT-IR、BET、XPS 等手段探究 PBC 的结构和表面成分及其与 U(VI) 反应的微观机理,旨在为含铀废水处理提供一种高效可行的方法。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

实验所用玉米秸秆采自江苏省连云港农田。磷酸二氢钾、偶氮砷(Ⅲ)、氢氧化钠、硝酸、硝酸铀酰、硝酸铜、硝酸铁等主要化学试剂均购自上海麦克林生化科技有限公司,纯度均为分析纯及以上。

### 1.2 生物炭(BC)和磷改性生物炭(PBC)的制备

将收集的玉米秸秆洗净风干,粉碎至 1 mm 大小,于 60℃ 下干燥 12 h。随后,在马弗炉中以 10℃/min 的速率升温至 550℃,持续热解 2 h 后自然冷却。研磨后过 80 目筛,用蒸馏水洗去炭化物表面灰分并烘干,得到纯净的玉米秸秆生物炭(简称 BC)。

将干燥的玉米秸秆粉末浸渍于 100 mL 0.294 M  $K_2HPO_4$  溶液中(生物质颗粒与  $K_2HPO_4$  固体质量比为 1:2)<sup>[16]</sup>。混合物在常温下以 150 r/min 磁力

搅拌 24 h 后,于 60℃ 下干燥 12 h,抽滤水洗并干燥。随后的热解和研磨条件和步骤与 BC 相同,所得样品为 PBC。

### 1.3 吸附实验方法

系统考察 pH、接触时间、生物炭投加量、离子强度、离子种类对生物炭吸附 U(VI) 的影响,并进行吸附/解吸循环实验。除变量实验外,每组实验的固液比均为 0.2 g/L, U(VI) 溶液初始浓度为 30 mg/L。通过加入少量  $HNO_3$  和  $NaOH$  调节溶液 pH;通过改变生物炭投加量并在 4 h 内定时取样测定 U(VI) 浓度,研究反应时间和投加量的影响;通过设置不同浓度和种类的钠盐与硝酸盐,研究离子强度和干扰离子种类的影响;利用 0.1 mol/L  $Na_2CO_3$  对吸附铀后的 PBC 进行脱附,洗净烘干后再次使用,完成循环实验。反应完成后用聚醚砜膜(0.22 μm)分离固相,以偶氮砷(Ⅲ)为显色剂,采用紫外-可见分光光度计(UV)测定 U(VI) 浓度。平衡吸附量( $Q_e$ )及去除率( $R_e$ )计算方法如式(1)、式(2)。

$$Q_e = [(C_0 - C_e)V]/m \quad (1)$$

$$R_e = (1 - C_e/C_0) \times 100 \quad (2)$$

式中: $Q_e$  为平衡吸附量,mg/g; $C_0$  为溶液中初始铀质量浓度,mg/L; $C_e$  为吸附平衡时铀质量浓度,mg/L; $V$  为反应溶液体积,mL; $m$  为生物炭投加量,g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料表征

BC 和 PBC 的 SEM 分析结果如图 1 所示。BC 呈现不规则碎裂的管状形态,其粗糙表面及孔隙结构可能源于高温下水蒸气和挥发性化合物从内向外

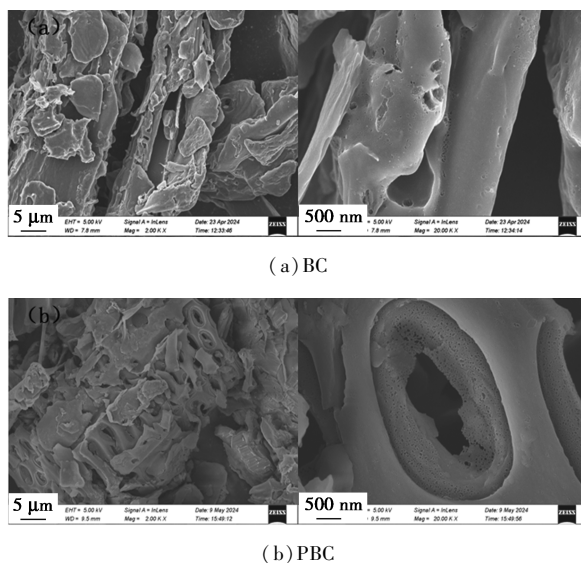


图 1 不同放大倍数下 BC 和 PBC 的 SEM 图像

输送形成的通道<sup>[14]</sup>。与 BC 相比,PBC 表面孔结构显著增加,可见更多大孔和微孔。这可能是由于玉米秸秆在热解前经磷酸盐预活化,有效催化并加速了生物质的分解与脱水过程。

如表 1 所示,PBC 的比表面积为 148.45 m<sup>2</sup>/g,接近 BC(78.57 m<sup>2</sup>/g)的 2 倍。同时,PBC 具有更大的平均孔径和孔体积,表明 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 改性优化了玉米秸秆生物炭的孔隙结构。PBC 更大的比表面积和更发达的多孔结构可提供更多活性结合位点,从而有效捕获水溶液中的 U(VI)。

表 1 BET 分析结果

样品名称	BET 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/ nm	孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )
BC	78.57	2.53	0.05
PBC	148.45	2.84	0.11

BC 和 PBC 的 FT-IR 光谱如图 2 所示。BC 红外谱图中 3 426 cm<sup>-1</sup>附近的吸收峰对应于—OH 的伸缩振动,1 574 cm<sup>-1</sup>处的谱带归因于 C=O 的伸缩振动,表明可能存在羧酸<sup>[17-18]</sup>。经 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 改性后,羟基和羧基的特征峰发生轻微偏移,且 PBC 负载了大量磷酸基团。1 284 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰归因于 P=O 伸缩振动;1 098 cm<sup>-1</sup>和 1 011 cm<sup>-1</sup>对应于 O—C—P 伸缩振动;863、764、683 cm<sup>-1</sup>和 596 cm<sup>-1</sup>的低波数吸收峰通常与 P—O 伸缩振动或 P—O—H 弯曲振动相关<sup>[19-20]</sup>。1 370 cm<sup>-1</sup>和 1 089 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰分别属于脂肪族 C—H 弯曲振动和醇类 C—O 伸缩振动<sup>[21]</sup>。磷酸盐的引入促进了 BC 中化学键的断裂,生物质中的磷酸盐通过环化或脱水缩合与有机物交联,形成磷酸盐和磷酸桥,并以含 P 键的形式结合到玉米秸秆生物炭上。

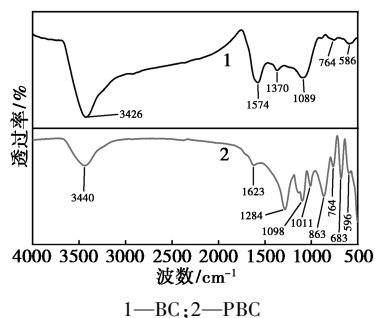
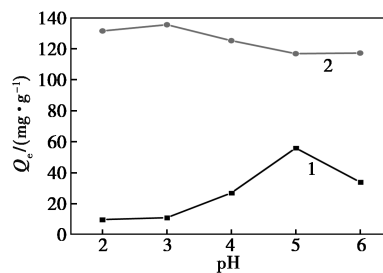


图 2 BC/PBC 的 FT-IR 图像

## 2.2 pH、投加量的影响作用

溶液 pH 对生物炭吸附性能具有重要影响。如图 3 所示,在 pH=2~6 范围内,PBC 对 U(VI) 的去

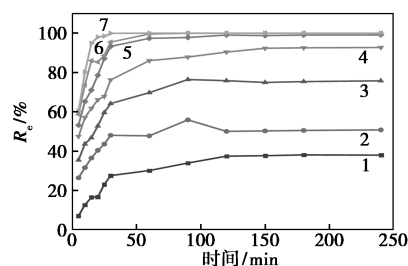
除效果显著优于 BC。特别是在 pH=3 的强酸性条件下,PBC 对 U(VI) 的吸附容量高达 135.52 mg/g,远高于相同条件下 BC 的吸附量。PBC 优异性能归因于磷酸基团的引入有效降低了玉米秸秆生物炭表面的正电荷,使其在 pH 为 2~6 范围内带负电。然而,PBC 对 U(VI) 的去除率随 pH 变化而有所差异。在 pH<3 条件下,高电荷态氢离子与铀酰竞争吸附位点,限制了 PBC 对 U(VI) 的吸附能力。随着溶液 pH 升高至 3,氢离子浓度降低,更多铀酰离子与 PBC 表面的含氧基团形成络合。当 pH>3 时,溶液中 OH<sup>-</sup>浓度升高,UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> 与 OH<sup>-</sup> 水解生成 UO<sub>2</sub>(OH)<sup>+</sup>、(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub><sup>2+</sup>、(UO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>5</sub><sup>+</sup>、(UO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>7</sub><sup>-</sup> 等,但 PBC 不易捕获多羟基络合状态的 U(VI),导致其吸附性能下降<sup>[22]</sup>。因此,pH=3 为最适宜值。



1—BC;2—PBC

图 3 pH 对 BC 和 PBC 吸附 U(VI) 的影响

考察了生物炭投加量对其吸附 U(VI) 效果的影响,如图 4 所示。PBC 对 U(VI) 的吸附速率高于 BC。PBC 对 U(VI) 的吸附过程可分为三个阶段:0~15 min 的快速吸附阶段,主要依赖于其较大的比表面积和丰富的磷酸基团;15~120 min 的缓慢吸附阶段,随着 U(VI) 浓度降低和吸附位点减少,吸附速率下降;120 min 后达到吸附平衡。随着投加量从 0.1~0.25 g/L 增大,PBC 对 U(VI) 的去除率从 50.73% 升至 99.12%。继续增加投加量,去除率可



1—0.2 g/L BC;2—0.1 g/L PBC;3—0.15 g/L PBC;  
4—0.2 g/L PBC;5—0.25 g/L PBC;6—0.3 g/L PBC;  
7—0.4 g/L PBC

图 4 PBC 投加量对其吸附 U(VI) 的影响

达100%。这是因为投加量增大增加了PBC颗粒碰撞几率,使其能充分吸附溶液中的U(VI)。综合考虑,选择0.2 g/L作为后续实验的投加量。

### 2.3 共存离子影响作用

如图5所示,不同浓度的NaNO<sub>3</sub>对PBC吸附U(VI)效率影响较小,表明在pH为3时,PBC和U(VI)之间发生了球内表面络合。图6考察了共存阴离子(150 mg/L)和阳离子(150 mg/L)对PBC去除U(VI)的影响。共存CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子与U(VI)形成稳定的可溶性络合物,如UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup>、UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、UO<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup>和UO<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,对PBC去除U(VI)有轻微抑制作用。金属离子Cu<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>抑制了PBC对U(VI)的去除,这可能是因为这些离子的电荷高于U(VI)。价态越高,对PBC表面的竞争配位越强,导致U(VI)去除率明显下降<sup>[23-26]</sup>。综合以上数据,PBC对U(VI)表现出良好的吸附选择性,可能归因于改性后PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>与U(VI)的亲合力高于其他竞争金属离子。因此,PBC可被视为一种有效从废水中分离铀(VI)的吸附剂,并可作为共分离材料。

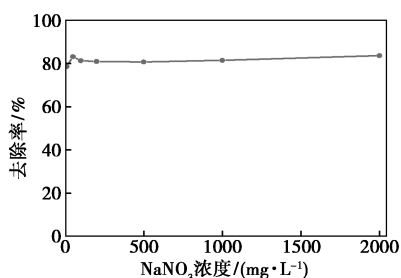


图5 离子强度对PBC除U(VI)性能的影响

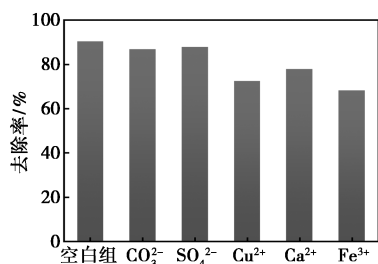
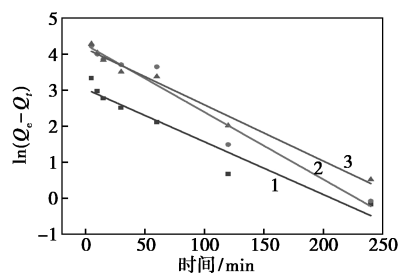


图6 干扰离子对PBC除U(VI)性能的影响

### 2.4 反应动力学研究

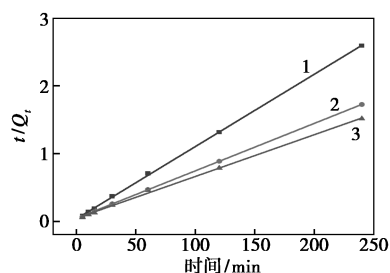
为进一步了解吸附机理,利用准一级和准二级动力学模型对PBC吸附U(VI)的过程进行模拟分析。图7、图8为不同初始U(VI)浓度下的吸附动力学拟合结果,结合表2中的相关拟合参数可知,PBC的准二级动力学模型相关系数 $R^2$ 均大于0.990,明显高于准一级动力学模型拟合结果( $R^2 <$

0.980),说明吸附过程主要为化学吸附<sup>[27]</sup>。



1—20 mg/L; 2—30 mg/L; 3—40 mg/L

图7 PBC吸附U(VI)准一级动力学模型



1—20 mg/L; 2—30 mg/L; 3—40 mg/L

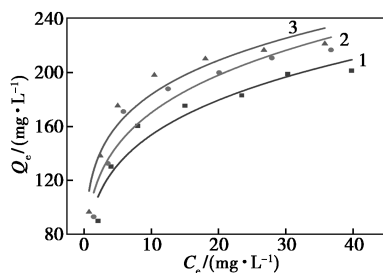
图8 PBC吸附U(VI)准二级动力学模型

表2 PBC吸附U(VI)的动力学模型参数

U(VI) 初始浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	准一级动力学模型拟合			准二级动力学模型拟合		
	$k_1$	$Q_e /$ (mg·g <sup>-1</sup> )	$R_1^2$	$k_2$	$Q_e /$ (mg·g <sup>-1</sup> )	$R_2^2$
20	0.015	20.732	0.926	0.0029	93.545	0.999
30	0.019	70.955	0.956	0.0010	142.450	0.999
40	0.016	63.878	0.979	0.0008	161.812	0.998

### 2.5 反应热力学研究

分别用Freundlich和Langmuir等温吸附模型对不同温度下PBC吸附U(VI)数据进行拟合,以探究具体反应过程机理。如图9、图10中拟合曲线所示,温度较高时,PBC的吸附量更好,性能更优异。在40℃时,最大吸附量 $Q_{max}$ 可达228.87 mg/g,表明



1—20℃; 2—30℃; 3—40℃

图9 PBC吸附U(VI)的Freundlich拟合曲线

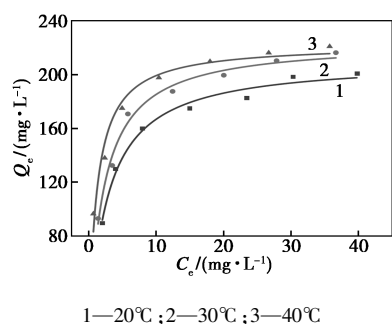


图 10 PBC 吸附 U(VI) 的 Langmuir 拟合曲线

在一定范围内,升温可提高 PBC 的吸附性能。等温线拟合数据见表 3,三种温度下 PBC 吸附 U(VI) 行为的 Langmuir 模型相关系数  $R^2$  均高于 Freundlich 模型的  $R^2$ ,表明 PBC 对 U(VI) 的吸附为单分子层吸附,这可能归因于分布在 PBC 表面的官能团<sup>[28]</sup>。

表 3 PBC 吸附 U(VI) 的 Freundlich 和 Langmuir 模型拟合相关参数

温度/ ℃	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
	$K_F / (mg^{1-n} \cdot L^n \cdot g^{-1})$	$n$	$R^2$	$Q_{max} / (mg \cdot L^{-1})$	$K_L / (L \cdot mg^{-1})$	$R^2$
20	91.80	4.47	0.92	211.01	0.38	0.98
30	102.93	4.58	0.91	225.08	0.47	0.98
40	119.67	5.38	0.93	228.87	0.62	0.99

### 2.6 XPS 分析

为了进一步确定 PBC 固定铀后的化学状态,采用 XPS 对吸附前后的 PBC 进行了分析,如图 11。

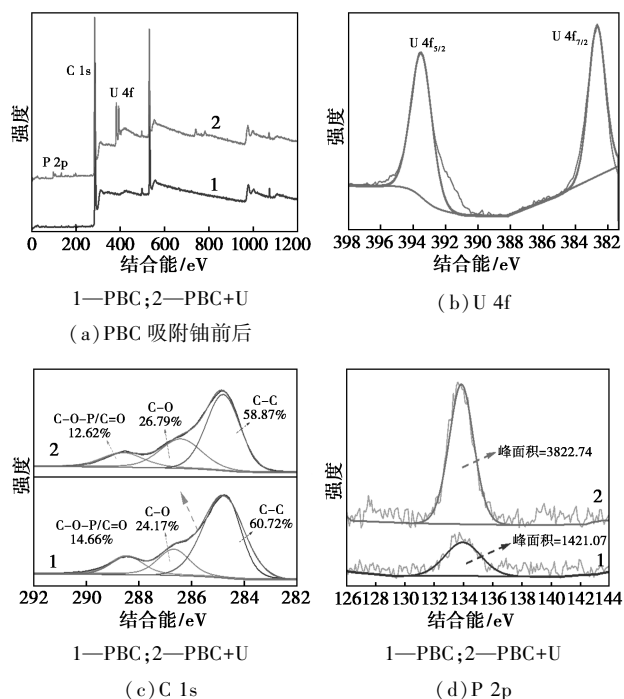


图 11 PBC 吸附铀前后的 XPS 谱图

在固定铀的精细 XPS 光谱中观察到碳、氧、磷和铀元素的峰。铀的特征峰含有两个独立的 U4 f7/2 (382.67 eV) 和 U4 f5/2 (393.48 eV) U(VI) 峰<sup>[29]</sup>。碳(C 1s)的 XPS 谱可以分为 3 个峰:284.80 eV 的 C—C,286.42 eV 的 C—O 和 288.51 eV 的 C—O—P/C=O。吸附后,O=C—O/C=O 键的比例从 17.03% 下降到 6.93%。C 1s 谱的变化表明,主要是 CO—P/C=O 键参与了吸附过程<sup>[30]</sup>。对 P 2p 的位置分析表明,铀的积累使 P 2p 峰从 133.94 eV 移动到 133.51 eV,表明铀的积累改变了磷酸盐的形态。此外,与未处理铀的 PBC 相比,P 2p 的峰面积增加,这是由于伴随着固定铀产生了磷酸盐的积累<sup>[31-32]</sup>。因此,磷酸基团与含碳官能团参与了 U(VI) 的吸附固定。

### 2.7 循环再生性能

PBC 的循环吸附/解吸实验通过高浓度  $Na_2CO_3$  完成,结果如图 12 所示。在第一次和第二次循环中,去除率下降,但从第三次循环开始逐渐稳定,且吸附效果保持在原始 PBC 吸附性能的 70% 以上,证明了 PBC 具有良好的重复利用性能。

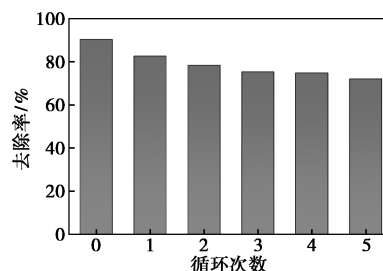


图 12 循环利用次数对 PBC 除铀性能的影响

### 3 结论

(1) 利用磷酸二氢钾浸渍处理玉米秸秆后热解得到富含磷酸基团的生物炭(PBC)。在投加量为 0.2 g/L、溶液 pH=3、40℃、吸附反应时间为 240 min 的条件下 PBC 对 U(VI) 的吸附容量最高,达到 228.87 mg/g。

(2) PBC 对 U(VI) 的吸附行为符合准二级吸附动力学模型,吸附过程用 Langmuir 等温式的拟合效果优于 Freundlich 吸附等温式,表明该吸附为化学单分子层吸附。磷酸基团与含碳官能团参与了 U(VI) 的吸附固定。

(3) PBC 在其他离子干扰下对 U(VI) 仍然有较好的吸附效果;经过 5 次循环回用后,仍保留原始 PBC 吸附效率的 70% 以上,表明其具有较好的循环吸附性能。

## 参考文献

- [1] Cheng L, Liang C, Liu W, *et al.* Three-dimensional polycatenation of a uranium-based metal-organic cage: Structural complexity and radiation detection [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, 142(38): 16218–16222.
- [2] 景称心, 孔秋梅, 冯志刚. 中国南方某铀尾矿库周缘土壤重金属污染研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 338–349.
- [3] 李峰, 丁德馨, 周函, 等. 鼠李糖脂改性纳米零价铁去除地浸采铀矿山污染地下水中 U(VI) 的试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1): 190–199.
- [4] 柯平超, 吴天楠, 刘亚洁, 等. 含铀废水处理技术进展 [J]. *工业水处理*, 2023, 43(9): 20–31.
- [5] Raj S K, Carrier A J, Youden B C, *et al.* Electrochemical techniques for uranium extraction from water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 492: 152341.
- [6] Wang J, He B, Wei X, *et al.* Sorption of uranyl ions on TiO<sub>2</sub>: Effects of pH, contact time, ionic strength, temperature and HA [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 75: 115–123.
- [7] Zhu Y, Chen S, Li Z, *et al.* Nanoscale zero-valent iron composites for uranium-contaminated water treatment and environmental remediation: A review [J]. *Environmental Science: Nano*, 2024, 12: 20–40.
- [8] Zhao Y G, Wang E J, Zheng J J, *et al.* Modeling and spectroscopic investigation of U(VI) removal on porous amidoxime-functionalized metal organic framework derived from macromolecular carbohydrate [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 125043.
- [9] Shao K, Xu G, Li X, *et al.* Efficient removal of U(VI) by graphene-based electrode modified with amidoxime: Performance and mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354: 128822.
- [10] 王丽, 蔡景行, 邵代兴, 等. 改性生物炭对重金属污染修复研究进展及其机制分析 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023, (6): 232–238.
- [11] Hu R, Xiao J, Wang T, *et al.* Engineering of phosphate-functionalized biochars with highly developed surface area and porosity for efficient and selective extraction of uranium [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 379: 122388.
- [12] 赵雪, 赵欣鑫, 赵佐平, 等. 秸秆生物质炭处理重金属废水研究现状及展望 [J]. *生态毒理学报*, 2024, 19(1): 31–39.
- [13] 夏燕, 雷兰, 石铁应, 等. 羟基磷灰石改性竹笋壳生物炭的合成及吸附性能研究 [J]. *分析测试学报*, 2025, 44(1): 126–134.
- [14] Lyu P, Wang G, Cao Y, *et al.* Phosphorus-modified biochar cross-linked Mg-Al layered double-hydroxide composite for immobilizing uranium in mining contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130116.
- [15] Cheng C, Zhang J, Mu Y, *et al.* Preparation and evaluation of activated carbon with different polycondensed phosphorus oxyacids (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, H<sub>6</sub>P<sub>4</sub>O<sub>13</sub> and C<sub>6</sub>H<sub>18</sub>O<sub>24</sub>P<sub>6</sub>) activation employing mushroom roots as precursor [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 67: 532–537.
- [16] Sha H, Li J, Wang L, *et al.* Preparation of phosphorus-modified biochar for the immobilization of heavy metals in typical lead-zinc contaminated mining soil: Performance, mechanism and microbial community [J]. *Environmental Research*, 2022, 218: 114769.
- [17] Dai L, Li L, Zhu W, *et al.* Post-engineering of biochar via thermal air treatment for highly efficient promotion of uranium(VI) adsorption [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 298: 122576.
- [18] Ahmed M B, Zhou J L, Ngo H H, *et al.* Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 836–851.
- [19] Sekulic M T, Boskovic N, Slavkovic A, *et al.* Surface functionalised adsorbent for emerging pharmaceutical removal: Adsorption performance and mechanisms [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 50–63.
- [20] Peng H, Gao P, Chu G, *et al.* Enhanced adsorption of Cu(II) and Cd(II) by phosphoric acid-modified biochars [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229: 846–853.
- [21] Li H, Hu J, Yao L, *et al.* Ultrahigh adsorbability towards different antibiotic residues on fore-modified self-functionalized biochar: Competitive adsorption and mechanism studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 122127.
- [22] 王晨旭. 植酸改性芦荟生物炭的制备及其对水中 U(VI) 的吸附机制试验 [D]. 衡阳: 南华大学, 2022.
- [23] Li L, Ma R, Wen T, *et al.* Functionalization of carbon nanomaterials by means of phytic acid for uranium enrichment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133697.
- [24] Han B, Zhang E, Cheng G, *et al.* Hydrothermal carbon superstructures enriched with carboxyl groups for highly efficient uranium removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 388: 734–744.
- [25] Liao J, Zhang Y. Effective removal of uranium from aqueous solution by using novel sustainable porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials derived from different precursors of aluminum [J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2019, 7(3): 765–776.
- [26] Li X, Pan H, Yu M, *et al.* Macroscopic and molecular investigations of immobilization mechanism of uranium on biochar: EXAFS spectroscopy and static batch [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 269: 64–71.
- [27] 魏国, 白子昂, 庞宏伟, 等. 聚苯胺改性柚子皮生物炭复合材料对铀的去除性能和机理研究 [J]. *中国科学: 化学*, 2024, 54(12): 2580–2589.
- [28] 肖权津, 田婕, 罗旭, 等. 钙改性虾壳生物炭处理高磷溶液后对铀的去除影响 [J]. *有色金属工程*, 2024, 14(7): 163–172.
- [29] Li S, Hu Y, Shen Z, *et al.* Rapid and selective uranium extraction from aqueous solution under visible light in the absence of solid photocatalyst [J]. *Science China Chemistry*, 2021, 64: 1323–1331.
- [30] Cao R, Kang G, Zhang W, *et al.* Biochar loaded with ferrihydrite and *Bacillus pseudomycoloides* enhances remediation of co-existed Cd(II) and As(III) in solution [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 395: 130323.
- [31] Yu Q, Yuan Y, Feng L, *et al.* Highly efficient immobilization of environmental uranium contamination with *Pseudomonas stutzeri* by biosorption, biomineralization, and bioreduction [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127758.
- [32] Yang F, Zhang S, Sun Y, *et al.* Assembling biochar with various layered double hydroxides for enhancement of phosphorus recovery [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 365: 665–673. ■