

# Study on the adsorption efficiency and mechanism of heavy metals in industrial wastewater based on biochar

Jianxia Yao Liang Jin Chuang Wang Bosheng Yu

Zhejiang Huanke Environmental Research Institute Co., Ltd. Quzhou Branch, Quzhou, Zhejiang, 324000, China

## Abstract

Biomass waste has a wide range of sources, low cost, and is environmentally friendly and renewable. Biochar materials prepared by biomass carbonization show great potential in controlling pollutants in water. The heavy metal pollution in industrial wastewater poses a serious threat to the ecological environment and human health. Biochar, as a new type of adsorbent material, has shown great potential in the treatment of heavy metal wastewater. This study systematically explores the adsorption efficiency and mechanism of biochar for heavy metals such as  $Pb^{2+}/Cd^{2+}$ . Through a series of studies including material preparation and characterization, optimization of adsorption conditions, competitive adsorption experiments, and mechanism analysis, the main mechanism of biochar adsorption of heavy metals is revealed. The research results indicate that biochar has excellent adsorption performance and regeneration ability, providing theoretical basis and technical support for the treatment of heavy metals in industrial wastewater.

## Keywords

biochar; Heavy metal adsorption; Industrial wastewater; Adsorption mechanism; wastewater treatment

## 基于生物炭的工业废水重金属吸附效能及机理研究

姚建霞 金亮 王闯 余博晟

浙江环科环境研究院有限公司衢州分公司, 中国·浙江 衢州 324000

## 摘要

生物质废弃物来源广, 成本低, 环保可再生。由生物质炭化制备的生物炭材料在水中污染物控制过程中表现出极大潜力。工业废水中的重金属污染对生态环境和人类健康构成严重威胁。生物炭作为一种新型吸附材料, 在处理重金属废水方面展现出巨大潜力。本研究系统探讨生物炭对 $Pb^{2+}/Cd^{2+}$ 等重金属的吸附效能及作用机理, 通过材料制备与表征、吸附条件优化、竞争吸附实验及机理分析等系列研究, 揭示生物炭吸附重金属的主要作用机制。研究结果表明生物炭具有优异的吸附性能和再生能力, 为工业废水重金属治理提供理论依据和技术支持。

## 关键词

生物炭; 重金属吸附; 工业废水; 吸附机理; 废水处理

## 1 引言

21世纪以来有关重金属污染和引发的危害事件层出不穷, 特别是铅污染尤为严重, 我国存在一部分企业工业, 例如印染、电镀、电池等行业, 由于长期没有进行技术升级改造, 其设备老旧、技术落后, 甚至存在偷排漏排等问题, 导致一些环境中的铅污染严重, 亟须治理。除此之外, 根据统计计算, 我国每年约产生五千万余吨的80%含水率污泥, 市政污泥本身属于危险固废, 其中含有一定量的重金属和病原体, 必须对其进行减量化和无害化处理<sup>[1]</sup>。本研究以典型重金属 $Pb^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 为目标污染物, 系统研究生物炭的吸附特性与作用机制, 为生物炭在工业废水处理中的实际应用提供科学依据。研究成果对推进废水治理技术进步具有重要理

论价值和实践意义。

## 2 生物炭材料制备与表征

### 2.1 生物炭原料选择与处理

生物炭原料的选择直接影响最终产品的吸附性能。农业废弃物如稻壳、秸秆等因其来源广泛且成本低廉成为理想原料, 这些原料含有丰富的纤维素和木质素, 能够在热解过程中形成多孔结构<sup>[2]</sup>。原料预处理过程包括清洗、干燥和粉碎等步骤, 清洗去除表面杂质, 干燥操作控制水分含量, 粉碎处理保证原料粒度均匀, 热解工艺参数如温度、升温速率和保持时间对生物炭性质产生重要影响, 较高热解温度有利于形成发达孔隙结构, 适当升温速率保证热解过程均匀进行, 合理保持时间确保碳化反应完全。制备过程的标准化操作保证生物炭产品质量的稳定性, 原料特性与工艺参数的优化组合为后续吸附实验提供材料基础。

【作者简介】姚建霞(1987-), 女, 中国浙江衢州人, 硕士, 工程师, 从事水污染控制工程研究。

## 2.2 材料理化性质表征

生物炭材料的理化性质表征包括表面特性和结构特征分析。比表面积和孔隙结构测定采用氮气吸附-脱附法,该分析提供材料比表面积、孔容积和孔径分布等关键参数。表面官能团鉴定使用傅里叶变换红外光谱技术,光谱特征峰揭示材料表面含氧官能团的种类和数量,晶体结构分析采用X射线衍射方法,衍射图谱反映材料的石墨化程度和晶体结构特征。元素组成分析通过元素分析仪完成,该测试提供碳、氢、氧、氮等主要元素的含量数据。表面形貌观察使用扫描电子显微镜,图像显示材料表面的微观结构和孔隙形态。

## 3 重金属吸附效能实验设计

### 3.1 单因素吸附条件优化

#### 3.1.1 pH 值对 $Pb^{2+}/Cd^{2+}$ 吸附效率的影响

溶液 pH 值对重金属吸附效率产生显著影响(如图1)。pH 值变化改变重金属离子存在形态和生物炭表面电荷特性,较低 pH 条件下大量氢离子与重金属离子竞争吸附位点,同时生物炭表面质子化减少有效吸附位点<sup>[3]</sup>。随着 pH 值升高生物炭表面去质子化程度增加,表面负电荷吸引带正电的重金属离子,特定 pH 范围内重金属离子水解反应生成羟基配合物,这些配合物与生物炭表面产生不同相互作用。过高 pH 值导致重金属离子形成沉淀物,这种沉淀作用与吸附作用共同影响去除效率。pH 值优化实验需要确定最佳吸附 pH 范围,该范围保证吸附作用占主导地位,pH 值调节使用稀酸或稀碱溶液,精确控制 pH 值变化幅度。

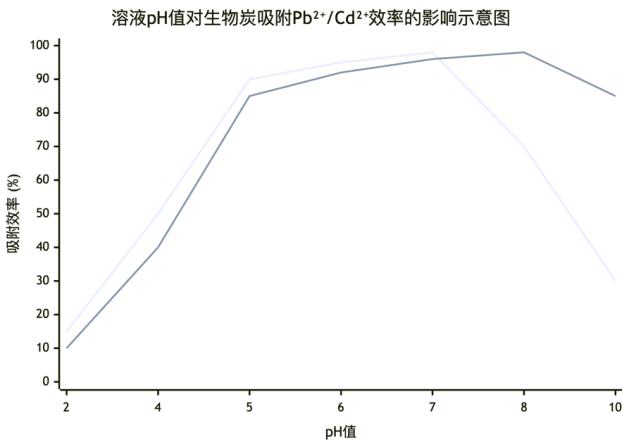


图1 溶液 pH 值对生物炭吸附  $Pb^{2+}/Cd^{2+}$  效率的影响示意图

#### 3.1.2 投加量 (0.5-5g/L) 与接触时间 (10-300min) 梯度测试

生物炭投加量直接影响吸附容量和处理成本。较低投加量条件下吸附位点不足限制吸附效率,适当增加投加量提供更多吸附位点,过高投加量可能导致颗粒聚集现象,聚集效应减少有效比表面积。接触时间决定吸附过程达到平衡所需时长。初始阶段吸附速率较快,该阶段表面吸附位点充足,

随着时间推移吸附速率逐渐降低,这个阶段颗粒内扩散成为控制步骤,梯度测试设置多个投加量和时间水平,实验数据绘制吸附容量随时间变化曲线。投加量优化实验确定经济有效的投加范围,该范围在保证吸附效果的同时控制材料成本,接触时间实验确定吸附动力学特征,时间参数为实际应用提供操作依据。

#### 3.1.3 初始浓度 (10-500mg/L) 与温度 (25-45°C) 变量控制

初始浓度梯度实验模拟不同污染程度废水处理需求。低浓度条件下吸附位点利用率较低,高浓度条件下吸附位点逐渐饱和,浓度梯度测试揭示吸附容量随浓度变化规律,该规律反映材料的吸附潜力。温度变化影响吸附过程的热力学特性,升温通常促进扩散速率提高吸附效率,但过高温可能影响吸附稳定性,温度实验考察吸附过程的自发性与放热特性,这些特性通过热力学参数定量描述。变量控制实验采用恒温振荡装置,该装置保证温度均匀性和混合效果,初始浓度设置覆盖常见工业废水浓度范围,该范围测试结果具有实际参考价值,温度选择考虑常规处理环境条件和可能的高温废水场景。

### 3.2 竞争吸附体系构建

#### 3.2.1 多金属离子 ( $Cu^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$ ) 共存吸附实验

实际工业废水通常含有多种重金属离子,这些离子在吸附过程中产生竞争效应。竞争吸附实验模拟真实废水条件,测试生物炭对混合金属离子的吸附选择性,不同金属离子由于理化性质差异展现不同吸附亲和力,离子半径、水合能和电负性等因素影响竞争吸附行为,三组分体系实验考察离子间的相互影响程度,这种影响可能表现为协同作用或拮抗作用<sup>[4]</sup>。实验设计采用等摩尔浓度配比方法,该方法保证各离子初始条件一致,采样分析使用原子吸收光谱仪,该仪器能够同时测定多种金属离子浓度,竞争吸附数据反映生物炭的选择性吸附特性,这种特性对实际应用具有重要意义。实验结果指导预处理工艺的选择和操作条件的优化。

#### 3.2.2 吸附等温线 (Langmuir/Freundlich) 模型拟合

吸附等温线描述平衡时吸附量与浓度之间的关系(如图2所示),该关系反映吸附作用的内在机制。Langmuir 模型假设表面均匀且形成单分子层吸附,该模型适用化学吸附主导的过程。Freundlich 模型适用于非均匀表面的多层吸附,该模型描述物理吸附特征。模型拟合通过线性回归方法进行,拟合优度评价采用决定系数和误差分析。等温线参数提供最大吸附容量和吸附强度信息,这些参数用于比较不同材料的吸附性能。模型选择指导吸附机理的推断,不同模型反映不同的吸附作用机制。实验数据通常同时用两种模型进行拟合,比较结果确定最适模型。等温线研究为吸附工艺设计提供基础数据,这些数据用于预测处理效果和优化操作条件。

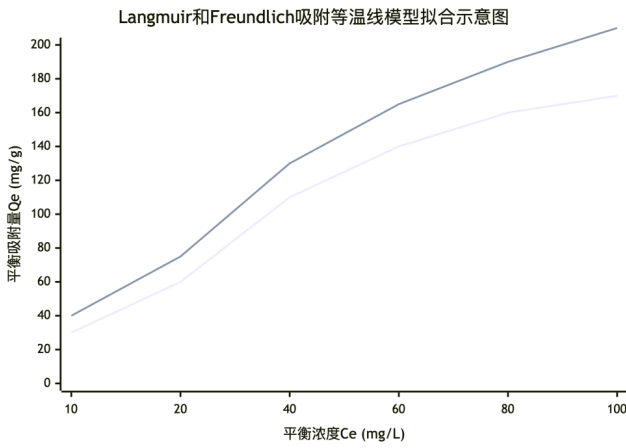


图2 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线模型拟合示意图

## 4 吸附机理多维度分析

### 4.1 宏观作用机制验证

#### 4.1.1 吸附动力学（准一级/准二级）分析

吸附动力学研究吸附量随时间变化规律，该规律揭示吸附过程的控制步骤。准一级动力学模型描述扩散控制的吸附过程，该模型适用物理吸附主导的体系；准二级动力学模型基于吸附位点占据假设，该模型适用化学吸附主导的过程。动力学分析通过模型拟合实验数据完成，拟合结果判断吸附速率控制机制。模型参数提供吸附速率常数和平衡吸附量等信息，这些参数用于评价吸附速率和效率，动力学研究帮助优化接触时间设计，该设计保证吸附过程达到理想效果。

#### 4.1.2 热力学参数（ $\Delta G/\Delta H/\Delta S$ ）计算

热力学参数揭示吸附过程的自发性和能量变化特征。吉布斯自由能变（ $\Delta G$ ）负值表明过程自发进行，该值大小反映过程自发程度。焓变（ $\Delta H$ ）负值表示放热过程，正值表示吸热过程。熵变（ $\Delta S$ ）反映体系混乱度变化，该变化与吸附过程有序性相关。参数计算基于不同温度下的平衡实验数据，Van'tHoff 方程用于计算热力学参数。热力学研究帮助理解温度对吸附的影响机制，该机制指导实际应用中温度控制策略。参数分析区分物理吸附和化学吸附特征，这种区分深化对吸附本质的认识。热力学研究为工艺设计提供理论指导，这些指导包括温度控制范围和能量消耗评估。

#### 4.1.3 解吸再生循环实验（EDTA/盐酸洗脱）

解吸再生实验评估吸附材料的重复使用性能，该性能影响处理成本和经济可行性。EDTA 作为强络合剂能够有效解吸重金属，该试剂通过形成稳定络合物实现脱附。盐酸通过酸化作用破坏表面结合实现解吸，低 pH 条件促进重金属离子释放。解吸实验优化洗脱剂浓度和接触时间等参数，这些参数影响解吸效率和材料损伤程度。再生循环测试考察材料性能的稳定性，多次循环后吸附容量变化反映材料耐久

性。解吸液处理考虑重金属回收可能性，这种回收实现资源循环利用。再生实验为工艺设计提供重要参数，这些参数包括再生周期和材料寿命预测。循环使用性能决定技术的经济性和可持续性。

### 4.2 微观作用机理探究

#### 4.2.1 吸附前后 SEM-EDS 表面元素分布对比

扫描电子显微镜观察提供表面形貌变化的直观证据。吸附前后样品表面形貌对比显示可能的结构变化，这些变化包括孔隙堵塞或表面沉积。EDS 元素分析定量检测表面元素组成变化，重金属特征峰出现证实吸附发生。元素分布 mapping 显示重金属在表面的分布均匀性，该分布反映吸附作用的均匀程度。表面元素定量分析计算吸附量并与溶液测试结果对照，这种对照验证测试结果的准确性。微观观察帮助理解表面结构对吸附的影响，这种影响指导材料改性方向。表面分析为吸附机理提供直接证据，这些证据支持机理推断的可靠性。微观表征技术与宏观测试结果相互印证，这种印证增强研究结论的说服力。

#### 4.2.2 XPS 价态分析结合能位移验证

X 射线光电子能谱分析提供元素价态和化学环境信息。吸附前后特征峰位移揭示化学键合方式变化，这种变化反映表面化学反应的发生。重金属元素特征峰出现证实化学吸附作用，峰位移动表明电子转移或配位键形成。氧元素谱图变化反映含氧官能团参与吸附过程，这些官能团包括羧基、羟基等。碳元素谱图变化表明  $\pi$  电子参与相互作用，这种作用属于物理吸附机制。XPS 定量分析计算表面元素相对含量，该含量与 EDS 结果相互补充。价态分析区分不同吸附机制的贡献程度，这种区分深化对吸附本质的认识。

## 5 总结

生物炭对重金属吸附涉及多种机制协同作用，包括表面络合、离子交换和物理吸附等。材料特性与吸附条件共同决定吸附效能，优化操作参数可显著提高处理效率。竞争吸附研究表明生物炭具有良好的选择性，实际废水测试验证技术的可行性。机理研究从宏观和微观层面揭示吸附本质，为材料改性和工艺优化提供方向。生物炭技术在工业废水重金属治理领域具有广阔应用前景。

### 参考文献

- [1] 杨艺轩. 活性污泥EPS基水凝胶制备及吸附水中重金属效能研究[D]. 兰州大学, 2024.
- [2] 高宗玉. 富硒秸秆生物炭对重金属镉的吸附效能[D]. 重庆三峡学院, 2023.
- [3] 邱彪, 唐恒军, 唐建, 等. 磁性生物炭对水体中重金属的吸附效能及机理研究进展[J]. 能源环境保护, 2022, 36(05): 38-45.
- [4] 蒋孝鑫. 改性污泥基生物炭的制备及其对水中重金属铅的吸附效能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.