

凹凸棒石改性污泥生物炭对模拟水体中重金属的吸附

陶玲, 肖易燃, 任汉儒, 李云梦, 母旭日, 朱睿, 童彩丽, 高敏, 任珺

引用本文:

陶玲, 肖易燃, 任汉儒, 等. 凹凸棒石改性污泥生物炭对模拟水体中重金属的吸附[J]. [农业环境科学学报](#), 2026, 415(1): 189-198.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2024-1129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[丝瓜络固定生物氧化锰吸附重金属离子](#)

孟佑婷

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 859-865 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1033>

[改性棕榈树纤维生物质炭的制备及其对溶液中 \$Pb^{2+}\$ 的吸附性能分析](#)

温嘉伟, 王辉, 张浩, 姜军

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1088-1096 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1252>

[凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响](#)

陶玲, 张倩, 张雪彬, 周雅琦, 孙梦洁, 任珺

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1512-1520 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1417>

[高铁酸钾/高锰酸钾改性生物炭对 \$Cd^{2+}\$ 的吸附研究](#)

蒋子昀, 徐敏, 伍钧

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 876-883 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1123>

[双孢菇菌糠生物炭吸附 \$Pb^{2+}\$ 机制及其环境应用潜力](#)

张国胜, 程红艳, 张海波, 苏龙, 何小芳, 田鑫, 宁瑞艳

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 659-667 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0961>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶玲, 肖易燃, 任汉儒, 等. 凹凸棒石改性污泥生物炭对模拟水体中重金属的吸附[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 189–198.
TAO L, XIAO Y R, REN H R, et al. Adsorption study of heavy metals in simulated water by sludge biochar modified with attapulgite materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 189–198.



开放科学 OSID

凹凸棒石改性污泥生物炭对模拟水体中重金属的吸附

陶玲^{1,2,3,4}, 肖易燃¹, 任汉儒^{1,4}, 李云梦¹, 母旭日¹, 朱睿¹, 童彩丽¹, 高敏⁵,
任珺^{1,2,3,4*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 兰州 730070; 3. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 兰州交通大学, 兰州 730070; 4. 甘肃瀚兴环保科技有限公司, 兰州 730070; 5. 宁夏师范大学, 宁夏固原 756099)

摘要: 为了正确处理城市污泥并提高生物炭吸附剂对多种重金属吸附的性能, 利用污泥与凹凸棒石黏土为原料热解制备凹凸棒石黏土改性污泥生物炭材料, 并研究了改性材料对模拟水体中 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附性能。结果表明: 在 $\text{pH}=5$ 、添加量为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、重金属浓度均为 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 污泥/凹凸棒石黏土质量比为 2:1 的改性材料对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的去除率分别为 83%、87%、89% 和 88%。改性材料对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 吸附过程均遵循准一级动力学模型和 Langmuir 模型。通过扫描电镜、X 射线衍射分析及红外光谱等表征手段确定了改性材料对重金属的吸附机理。其主要包括孔隙填充、含氧官能团的络合、重金属- π 电子作用、 Na^+ 的离子交换作用、硅酸盐和 CO_3^{2-} 的共沉淀作用。本研究制备的凹凸棒石黏土改性污泥生物炭对多种重金属的去除展现出优异吸附性, 为水体中多种重金属同步去除的研究和污泥利用提供了新思路。

关键词: 污泥; 生物炭; 凹凸棒石; 碱改性; 重金属

中图分类号: X703; X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2026)01-0189-10 doi:10.11654/jaes.2024-1129

Adsorption study of heavy metals in simulated water by sludge biochar modified with attapulgite materials

TAO Ling^{1,2,3,4}, XIAO Yiran¹, REN Hanru^{1,4}, LI Yunmeng¹, MU Xuri¹, ZHU Rui¹, TONG Caili¹, GAO Min⁵, REN Jun^{1,2,3,4*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Ministry of Education Engineering Research Center of Water Resource Comprehensive Utilization in Cold and Arid Regions, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 4. Gansu Hanxing Environmental Protection Co., Ltd., Lanzhou 730070, China; 5. Ningxia Normal University, Guyuan 756099, China)

Abstract: To properly treat municipal sludge and improve the performance of biochar adsorbent for the adsorption of various heavy metals. Sludge biochar modified with attapulgite materials was prepared by pyrolysis using sludge and attapulgite as raw materials. The adsorption performance of the modified materials for Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} and Ni^{2+} in simulated water was investigated. The results showed that when the mass ratio of sludge biochar to attapulgite was 2:1, pH was 5, the addition amount was $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, and the concentration of the four heavy metals of $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal of Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} and Ni^{2+} by the modified material was 83%, 87%, 89% and 88%, respectively. The adsorption processes of Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} and Ni^{2+} by modified materials followed the quasi first order kinetic model and Langmuir model. The adsorption mechanism of the modified materials on heavy metals was determined by characterization means such as scanning electron

收稿日期: 2024-12-24 录用日期: 2025-02-11

作者简介: 陶玲(1970—), 女, 甘肃白银人, 博士, 教授, 主要从事土壤污染控制与修复研究。E-mail: taoling@mail.lzjtu.cn

*通信作者: 任珺 E-mail: renjun@mail.lzjtu.cn

基金项目: 甘肃省教育厅: 高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-14); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-31); 甘肃省科技厅科技计划项目(22CX3GA076); 甘肃省科技专员专项(23CXGA0082); 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03319)

Project supported: Department of Education of Gansu Province: Major Cultivation Project of Scientific Research Innovation Platform in University (2024CXPT-14); Gansu Provincial Education Department Industrial Support Program (2021CYZC-31); Project of Gansu Province Science and Technology Plan (22CX3GA076); Special Project of Gansu Science and Technology Commissioner (23CXGA0082); Natural Science Foundation of Ningxia (2024AAC03319)

microscope, X-ray diffraction and infrared spectroscopy. It mainly consists of pore filling, complexation of oxygen-containing functional groups, heavy metal- π electronic interactions, ion-exchange of Na^+ and co-precipitation of silicates and CO_3^{2-} . In this study, the sludge biochar modified with attapulgite prepared presented excellent adsorption for the removal of multiple heavy metals, which provides a new idea for the study of simultaneous removal of multiple heavy metals in water bodies and the utilization of sludge.

Keywords: sludge; biochar; attapulgite; alkali modification; heavy metals

电镀、采矿和电池制造行业的快速发展,致使大量含 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 等重金属离子的废水排放^[1-2]。其中, Cr^{3+} 很容易被氧化成更具致癌性和致突变性的 Cr^{6+} ^[3]。由于重金属离子具有不可降解和生物累积的特性,若其释放到周边水体中,将通过食物链直接或间接危害人类的健康^[4-5]。因此,从天然水和工业废水中有效捕获和去除重金属离子具有重要意义。目前,为治理重金属造成的环境污染问题,已开发多种处理技术,如化学沉淀法、膜过滤法以及电化学法等^[6-7]。然而,这些技术的使用受到诸如大量化学试剂易造成环境二次污染、能耗较高和操作复杂等因素限制^[8]。采用吸附技术去除水环境中的重金属,是一种有效且简单的策略^[9-10]。

包括碳纳米管、氧化石墨烯和生物炭等的碳质材料已被广泛应用于吸附去除水溶液中的重金属^[11]。其中,生物炭是碳基生物质经高温热解转化形成的固态产物,其来源广泛,具备比表面积大、多孔和结构稳定性高等特性,近年来引起了研究者的广泛关注^[12]。任珺等^[13]利用污泥生物炭材料处理含 Cu^{2+} 废水,测得该材料对 Cu^{2+} 的最大吸附容量为 $2.055 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Aktas 等^[14]采用在 $450\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内热解生产的木质衍生生物炭对废水副产物进行吸附,结果表明其吸附效果较差。上述研究表明,原始生物炭的吸附能力不足,制约了其在实际水处理中的应用。

改性生物炭材料是赋予生物炭所需特性(如增加比表面积和官能团的富集等)的一种简单且有效的策略^[15]。Li 等^[16]使用水凝胶改性生物炭吸附剂,实现了对阳离子染料的高效吸附。Khan 等^[17]开发了一种锰-镁共掺生物炭改性材料用于对 $\text{As}(\text{III})$ 和 $\text{Cd}(\text{II})$ 的吸附,利用锰、镁与重金属的协同作用,实现了高效同步去除 $\text{As}(\text{III})$ 和 $\text{Cd}(\text{II})$ 。然而,这些改性材料成本高昂且不易获得。凹凸棒土(Attapulgite, ATP)是一种具有 2:1 链状结构的黏土矿物,来源广泛。其独特的晶体通道结构,使其具有优异的阳离子交换性能、高比表面积与更多的催化活性吸附位点^[18]。利用黏度高的凹凸棒石黏土改性生物炭,不仅是一种绿色高效的方案,也解决了生物炭因颗粒大难以造粒的问题^[19]。

污泥是城市污水处理厂的主要副产品,在世界范围内大量产生,其富含碳、氢、氮、磷等多种元素,可为重金属的吸附提供丰富官能团^[20]。此外,污泥含有潜在毒性元素,若处置不当,可能会造成严重的环境风险^[21]。因此,探寻安全高效的污泥资源利用途径,不仅能够降低环境污染,还将有力推动可持续发展战略的实施。从绿色经济角度考虑,将污泥转化为凹凸棒石黏土改性污泥生物炭,是一种潜在的可行策略。

本研究选用具有成本效益的市政污泥和凹凸棒石黏土作为主要材料。将污泥生物炭与凹凸棒石黏土分散在 NaOH 中,经共热解制备出的凹凸棒石黏土改性污泥生物炭(SBA),并将其用于多种重金属(Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+})的吸附研究。采用扫描电镜、X射线衍射和傅里叶红外变换光谱等表征手段,系统分析了凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的微观形貌与化学结构的影响。结合批量吸附实验,系统探究了改性材料对上述 4 种重金属的吸附功能与作用机理。本研究不仅为处理多种重金属污染的水体提供新方法新思路,也为实现污泥与凹凸棒石黏土的资源化利用提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 材料制备

凹凸棒石黏土由甘肃瀚兴环保科技有限公司提供,经 50 目筛去除大颗粒杂质,粉碎过 200 目筛备用。其化学组成主要包括 SiO_2 (54.6%)、 Fe_2O_3 (6.87%)、 MgO (6.32%) 和 CaO (5.73%) 等,矿物组成主要包括凹凸棒石 (29.7%)、石英 (21.8%) 和白云石 (6.3%) 等^[22]。污泥采自兰州市七里河安宁污水处理厂,经自然风干,破碎过 200 目筛备用。其主要成分包括 Cu ($96.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 Cd ($1.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 Cr ($110.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 Zn ($296.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Ni ($19.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

将风干污泥置于真空热解炉内,于 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下高温煅烧 4 h 制得污泥生物炭。经筛后的凹凸棒石黏土采用去离子水洗涤,静置后可观察到固液分层,弃去上清液后收集上层橙色的固体烘干。按照固液比

1:10加入10%的硫酸,使之充分反应24 h以除去部分碳酸盐和杂质。水洗至中性后,经干燥、粉碎备用。将污泥生物炭和凹凸棒石黏土按照7种质量比例(0:1、1:0、1:1、1:2、1:3、2:1、3:1)分散于0.1 mol·L⁻¹的NaOH溶液中,密封悬浮液,在室温下以400 r·min⁻¹搅拌72 h;将上一步溶液于105 ℃真空干燥箱中烘干,再将烘干的样品转移到真空热解炉,于350 ℃条件下高温煅烧2.5 h后冷却至室温。研磨所得产物并反复洗涤,直至洗涤液无色且pH值处于中性范围内,最终制得7种凹凸棒石黏土改性污泥生物炭材料(SBA)。依据污泥生物炭与纯化凹凸棒石黏土的质量比(0:1、1:0、1:1、1:2、1:3、2:1和3:1),产物分别命名为SBA01、SBA10、SBA11、SBA12、SBA13、SBA21和SBA31,研磨过100目筛备用。此外,保持其他条件不变,制备污泥生物炭与凹凸棒石黏土质量比为2:1且未添加NaOH的改性材料(WSBA)。

1.2 材料表征方法

采用扫描电镜(SEM, KYKY-EM8100, 广州智汇科学仪器有限公司)分析凹凸棒石黏土改性污泥生物炭材料表面结构特征。将样品过200目筛,喷金后在20 kV电压下利用扫描电镜在30 000的放大倍数下对样品表面形貌和表面结构进行观察和分析。利用傅里叶红外变换光谱(FT-IR, VIR9000, 北京锦坤科技有限公司)分析凹凸棒石黏土改性污泥生物炭材料的组成和晶体结构。仪器扫描范围为4 000~400 cm⁻¹。利用X射线衍射分析仪(XRD-7000, 苏州赛力威仪器设备有限公司)分析凹凸棒石黏土改性污泥生物炭材料的物相组成^[23]。采用X射线光电子能谱仪(XPS, ESCALAB 250Xi, 美国Thermo Fisher公司)对改性材料的碳元素进行检测^[24]。

1.3 等温吸附实验

精确称取0.050 g的改性材料置于50 mL的离心管中,准确移取25 mL浓度为1.0、2.0、4.0、6.0、8.0 mg·L⁻¹和10.0 mg·L⁻¹的重金属(Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺)溶液加入离心管,用NaOH或HNO₃溶液调节pH值为5。将离心管放置于恒温振荡器中,设置振荡器参数为180 r·min⁻¹、(25±1) ℃,振荡240 min。振荡停止后,使用离心机离心10 min,接着用0.22 μm的针头过滤器移取上清液至洁净的玻璃试管中,采用原子吸收分光光度计(TAS-990)测定溶液中重金属离子浓度,各个实验组重复3次。

改性材料对重金属(Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺)的吸附量用公式(1)计算^[25]:

$$q = \frac{(c_0 - c_e) \times V}{m} \quad (1)$$

式中: q 为吸附剂对重金属离子的吸附容量,mg·g⁻¹; c_0 和 c_e 分别为吸附前后溶液中重金属离子浓度,mg·L⁻¹; m 为吸附剂的量,g; V 为溶液体积,L。

采用准一级动力学模型[公式(2)]和准二级动力学模型[公式(3)]模拟吸附动力学过程^[26]:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (3)$$

式中: q_t 为 t 时刻平衡吸附容量,mg·g⁻¹; t 为吸附反应时间,min; k_1 为准一级动力学反应速率常数,min⁻¹; k_2 为准二级动力学反应速率常数,g·min⁻¹·mg⁻¹。

采用Langmuir吸附等温线模型[公式(4)]和Freundlich吸附等温线模型[公式(5)]模拟等温吸附过程^[27]:

$$q_e = \frac{q_m K_L c_e}{1 + K_L c_e} \quad (4)$$

$$q_e = K_F c_e^{1/n} \quad (5)$$

式中: c_e 为溶液平衡浓度,mg·L⁻¹; q_e 为平衡吸附容量,mg·g⁻¹; q_m 为最大吸附容量,mg·g⁻¹; K_L 为Langmuir吸附平衡常数,L·mg⁻¹; K_F 为Freundlich吸附平衡常数,mg¹⁻ⁿ·Lⁿ·g⁻¹; $1/n$ 是反映吸附亲和力的常数。

1.4 数据处理与统计方法

所有数据采用Excel 2021汇总并利用Origin 2022绘图。使用SPSS 27.0进行双因素方差分析(Two-way ANOVA),采用Duncan法进行差异显著性检验,利用Origin 2022进行吸附动力学及等温吸附模型拟合。

2 结果与分析

2.1 重金属的去除

针对重金属、改性材料以及重金属与改性材料的交互作用进行方差分析。重金属与改性材料的 F 值分别为11.986和58.891, P 值则均<0.001。重金属与改性材料的主效应存在,且对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的去除率具有显著影响。此外,重金属与改性材料的交互作用对重金属去除率的影响亦显著($F=19.179, P<0.001$)。

SBA10与SBA01对Cr³⁺、Zn²⁺、Ni²⁺的去除率均无显著差异,且去除效果低于SBA11、SBA12、SBA13、SBA21和SBA31。SBA21对Cr³⁺、Zn²⁺、Ni²⁺的去除效果最好,去除率分别达87%、89%、88%,且三者间无显著差异。SBA11对Cd²⁺去除率略微高于对Ni²⁺、Cr³⁺和Zn²⁺的去除。SBA12对Cd²⁺的去除效果弱于其对Cr³⁺、Zn²⁺、Ni²⁺的去除效果,SBA13和SBA31对Cd²⁺、Cr³⁺和

Ni 的去除效果无显著差异(图1)。改性材料对不同重金属的去除性能差异,可能受水解常数、原子量、离子半径和电负性影响^[28]。

SBA13、SBA21 与 SBA31 对 Cd^{2+} 的去除率无显著差异,但三者与其他改性材料均存在显著性差异。其中,SBA11 对 Cd^{2+} 的去除效果最好,较单一材料去除效率提升了 3%~5%。改性材料对 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 去除率较单一材料分别提升了 5%~11%、7%~17%、4%~14%。SBA11、SBA12 对 Cr^{3+} 的去除效果无明显差异,但两者与其他改性材料存在显著性差异。SBA12 与 SBA31 对 Zn^{2+} 的去除存在显著差异,SBA01 与 SBA13 对 Zn^{2+} 的去除效果无显著差异,但与其他材料存在显著性差异。SBA21 与 SBA31 对 Ni^{2+} 的去除无显著差异,SBA10 与 SBA11 之间也无显著差异,但与其他改性材料之间存在显著性差异。值得注意的是,对 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 去除率最高均为 SBA21(图1)。改性材料对多种重金属去除具有适用性,因此凹凸棒石黏土改性污泥生物炭策略在对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的去除上具有一定应用潜力。

2.2 吸附动力学

准一级和准二级动力学模型均较好地拟合了 SBA 对 Cr^{3+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附过程。通过比较拟合吸附容量发现,准一级动力学拟合吸附容量更接近于实测值,表明改性材料对 Cr^{3+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附以物理吸附为主(表1),这与前人研究^[29]一致。

2.3 等温吸附模型

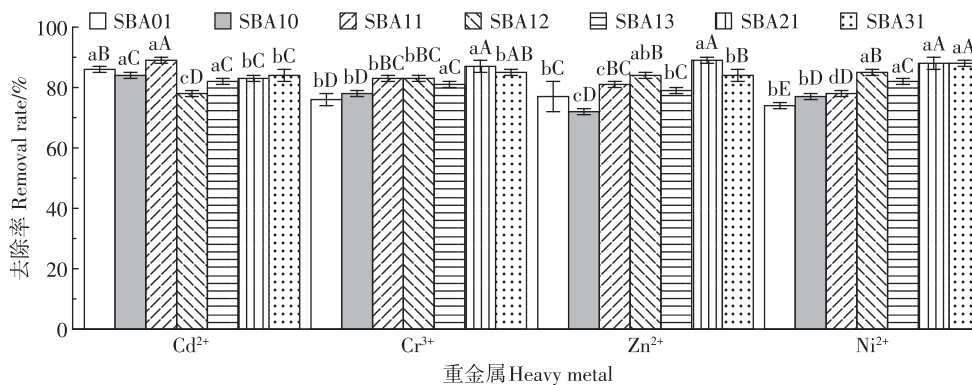
不同改性生物炭吸附 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的 Langmuir 模型的相关性系数(R^2)分别为 0.885 1~0.990 2、0.854 1~0.998 4、0.982 8~0.996 5 和 0.989 1~

0.998 3, Freundlich 模型的 R^2 分别为 0.740 0~0.885 0、0.817 8~0.963 9、0.906 7~0.990 1 和 0.896 2~0.997 3(表2)。Langmuir 模型的 R^2 均高于 Freundlich 模型,表明其拟合程度更佳,改性材料对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附过程以单层吸附为主。此外, K_L 表示溶液中重金属离子与改性材料的吸附强度,改性后材料的 K_L 值显著高于 SBA01 和 SBA10,特别是针对 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附^[30]。对 Cd^{2+} 的吸附中,SBA01 的 K_L 值高于 SBA11、SBA12、SBA21、SBA31。综合考虑对多种金属吸附的适用性,改性材料对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附性能优于单一材料,该结果与重金属去除率的结果一致。

2.4 吸附机理

图2为凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的 SEM 表征结果。SBA01 样品中可见大量凹凸棒石棒状晶束和少量层状、颗粒状结构(图2a)。SBA10 样品可见丰富的孔道结构,为凹凸棒石黏土提供更多的负载空间(图2b)。在 SBA11、SBA12、SBA13、SBA21 和 SBA31 样品中,污泥生物炭表面及孔洞中均附着典型的凹凸棒石的棒状晶束结构(图2d~图2h)。与 WSBA 相比(图2c),改性材料团聚现象显著削弱,这可能得益于 NaOH 的腐蚀作用。结果表明,凹凸棒石黏土与碱处理均改善了污泥生物炭的孔隙结构并减轻了改性材料的团聚效应,这有利于加强孔隙填充吸附机制对重金属的去除^[31-32]。

图3a展示了凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的 XRD 图谱。在 SBA10 样品中未明显观察到强烈的特征衍射峰,表明生物炭在热解过程中形成了非晶态石墨结构^[33]。在 SBA01、SBA11、SBA12、SBA13、SBA21



不同小写字母表示同种材料对不同重金属去除率差异显著,不同大写字母表示不同材料对同种重金属去除率差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences in the removal rates of different heavy metals by the same material. Different uppercase letters significant differences in the removal rates of the same heavy metal by different materials.

图1 凹凸棒石黏土改性污泥生物炭对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的去除率

Figure 1 Removal rate of Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} and Ni^{2+} by sludge biochar modified with attapulgite

表1 改性生物炭吸附 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的准一级动力学模型和准二级动力学模型的吸附速率常数
Table 1 Adsorption rate constants of quasi first order kinetic model and quasi second order kinetic model for Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} and Ni^{2+} adsorbed by modified biochar

重金属 Heavy metal	材料 Material	准一级动力学模型 The quasi first order kinetic model			准二级动力学模型 The quasi second order kinetic model			
		k_1	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2	k_2	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2	
Cd^{2+}	SBA01	0.042 30	8.56	0.986 5	0.005 89	9.45	0.979 0	
	SBA10	0.025 61	8.50	0.990 8	0.003 21	9.72	0.990 6	
	SBA11	0.030 25	8.66	0.970 0	0.004 79	9.56	0.960 4	
	SBA12	0.021 01	8.81	0.995 4	0.002 49	9.17	0.981 2	
	SBA13	0.021 92	8.89	0.993 9	0.002 96	9.07	0.977 4	
	SBA21	0.020 86	8.42	0.982 7	0.002 65	9.75	0.980 1	
	SBA31	0.033 12	8.49	0.984 0	0.001 45	9.95	0.940 4	
	Cr^{3+}	SBA01	0.031 25	8.46	0.993 9	0.005 05	9.32	0.970 1
		SBA10	0.040 17	8.42	0.982 0	0.005 92	9.32	0.983 5
SBA11		0.030 84	8.59	0.994 3	0.003 86	9.85	0.990 9	
SBA12		0.023 52	9.07	0.983 8	0.002 44	9.80	0.975 0	
SBA13		0.014 25	8.68	0.983 7	0.001 62	9.31	0.992 6	
SBA21		0.019 86	8.70	0.995 9	0.002 18	9.37	0.984 3	
SBA31		0.019 05	8.55	0.987 9	0.005 26	9.50	0.955 5	
Zn^{2+}	SBA01	0.024 36	7.44	0.991 3	0.003 24	8.76	0.995 1	
	SBA10	0.034 68	7.20	0.998 0	0.002 37	9.13	0.995 1	
	SBA11	0.022 24	8.23	0.989 4	0.002 58	9.79	0.988 7	
	SBA12	0.027 89	8.10	0.981 0	0.002 03	9.18	0.994 6	
	SBA13	0.028 88	7.49	0.988 9	0.002 28	8.54	0.997 2	
	SBA21	0.032 51	8.71	0.987 1	0.003 96	9.96	0.994 2	
	SBA31	0.025 11	8.41	0.997 2	0.002 95	9.91	0.995 6	
	Ni^{2+}	SBA01	0.036 19	7.30	0.987 3	0.005 64	7.63	0.991 9
SBA10		0.023 25	7.34	0.972 5	0.003 61	7.96	0.991 8	
SBA11		0.055 78	7.50	0.964 8	0.009 53	8.17	0.990 3	
SBA12		0.040 29	8.18	0.967 9	0.006 49	8.64	0.990 0	
SBA13		0.023 13	8.12	0.974 3	0.002 87	8.21	0.992 0	
SBA21		0.018 38	8.57	0.973 1	0.001 89	8.65	0.994 2	
SBA31		0.051 79	8.58	0.976 1	0.007 62	9.21	0.991 0	

和SBA31样品中, 20.85° 和 126.87° 出现 SiO_2 特征衍射峰并伴生有白云石特征峰($2\theta=50.28^\circ$)。此外,发现SBA21具有最强烈的峰,这解释了SBA21对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 吸附效果优异的原因。 Na_2CO_3 的出现推测可能是因为 NaOH 与空气中的 CO_2 反应,导致 Na^+ 置换到改性材料中并引入 CO_3^{2-} 。以上结果不仅证明凹凸棒石黏土改性污泥生物炭材料制备成功,同时表明改性后出现的新结构有利于促进离子交换和共沉淀作用,显著增强了生物炭对重金属的吸附效果^[34-35]。

图3b展示了凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的FT-IR结果。在样品SBA11、SBA12、SBA13、SBA21和SBA31中, 775 cm^{-1} 和 908 cm^{-1} 处出现了的特征吸

收峰归属于凹凸棒石结构中 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 与 $\text{Si}-\text{O}$ 的弯曲振动, 1347 cm^{-1} 处的特征红外吸收峰源自 $\text{C}-\text{O}$ 键的伸缩振动。该结果进一步证明凹凸棒石黏土改性污泥生物炭制备成功。硅酸盐可与金属离子形成硅酸盐沉淀^[36]。含氧基团能通过其O原子配位键与金属离子共享电子发生金属络合反应,提高吸附性能^[24]。此外, 653 cm^{-1} (吸附水、沸石水和结晶水的 $\text{O}-\text{H}$ 伸缩振动)出现特征红外吸收峰表明高温处理脱除了部分游离水及结构水。改性材料的 1542 cm^{-1} 处出现芳香烃的 $\text{C}=\text{C}$ 骨架振动峰,表明其与重金属之间存在强烈的 $\pi-\pi$ 相互作用,促进重金属的吸附^[37]。上述结果表明,丰富的官能团能为 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附提供更多的吸附位点。

表2 改性生物炭吸附 Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和 Ni²⁺的吸附等温线参数

Table 2 Adsorption isotherm parameters for Cd²⁺, Cr³⁺, Zn²⁺ and Ni²⁺ adsorbed by modified biochar

重金属 Heavy metal	材料 Material	Langmuir模型 Langmuir model			Freundlich模型 Freundlich model		
		$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	R^2	$1/n$	$K_F/(mg^{1-n} \cdot L^n \cdot g^{-1})$	R^2
Cd ²⁺	SBA01	9.03	0.829 17	0.967 6	0.021 48	8.466 64	0.871 2
	SBA10	9.93	0.917 74	0.885 1	0.136 82	7.778 85	0.768 4
	SBA11	9.67	0.719 12	0.973 5	0.022 08	6.367 69	0.752 1
	SBA12	9.14	0.972 85	0.990 2	0.071 68	7.291 51	0.885 0
	SBA13	9.11	0.985 54	0.963 0	0.055 12	7.556 33	0.840 4
	SBA21	9.87	0.940 83	0.966 2	0.022 65	8.147 27	0.747 5
	SBA31	9.37	0.952 33	0.961 7	0.027 35	8.039 97	0.740 0
Cr ³⁺	SBA01	6.81	0.519 76	0.993 7	0.067 10	4.490 17	0.963 9
	SBA10	7.77	1.196 07	0.854 1	0.441 72	6.757 64	0.817 8
	SBA11	8.84	0.971 64	0.922 0	0.080 84	7.740 98	0.845 6
	SBA12	9.43	0.399 79	0.998 4	0.040 23	7.238 33	0.957 3
	SBA13	9.72	1.768 88	0.983 0	0.044 76	7.347 24	0.955 4
	SBA21	8.99	0.576 77	0.983 9	0.066 54	7.420 58	0.900 6
	SBA31	8.45	0.870 77	0.951 6	0.092 83	7.660 97	0.842 7
Zn ²⁺	SBA01	7.38	4.247 34	0.996 3	0.447 65	5.247 31	0.973 2
	SBA10	7.00	6.021 45	0.992 6	0.615 94	6.193 32	0.987 9
	SBA11	9.08	6.126 75	0.984 2	0.477 88	6.453 53	0.965 3
	SBA12	8.08	6.667 53	0.994 1	0.544 01	6.637 24	0.971 2
	SBA13	7.70	6.236 12	0.982 8	0.466 25	6.403 33	0.906 7
	SBA21	9.30	7.958 75	0.996 5	0.605 31	8.988 70	0.990 1
	SBA31	8.51	7.036 84	0.995 4	0.654 03	7.245 64	0.988 7
Ni ²⁺	SBA01	8.20	4.138 94	0.989 1	0.483 94	4.898 94	0.957 2
	SBA10	8.31	6.600 69	0.989 8	0.389 11	6.016 57	0.896 2
	SBA11	8.12	6.022 72	0.978 4	0.507 13	6.722 75	0.947 2
	SBA12	8.90	7.358 14	0.998 1	0.585 25	7.123 42	0.979 2
	SBA13	8.72	6.684 10	0.995 5	0.402 40	6.810 67	0.910 4
	SBA21	9.05	7.106 26	0.991 1	0.652 31	7.476 43	0.997 3
	SBA31	9.50	8.536 87	0.998 3	0.576 82	8.651 70	0.994 2

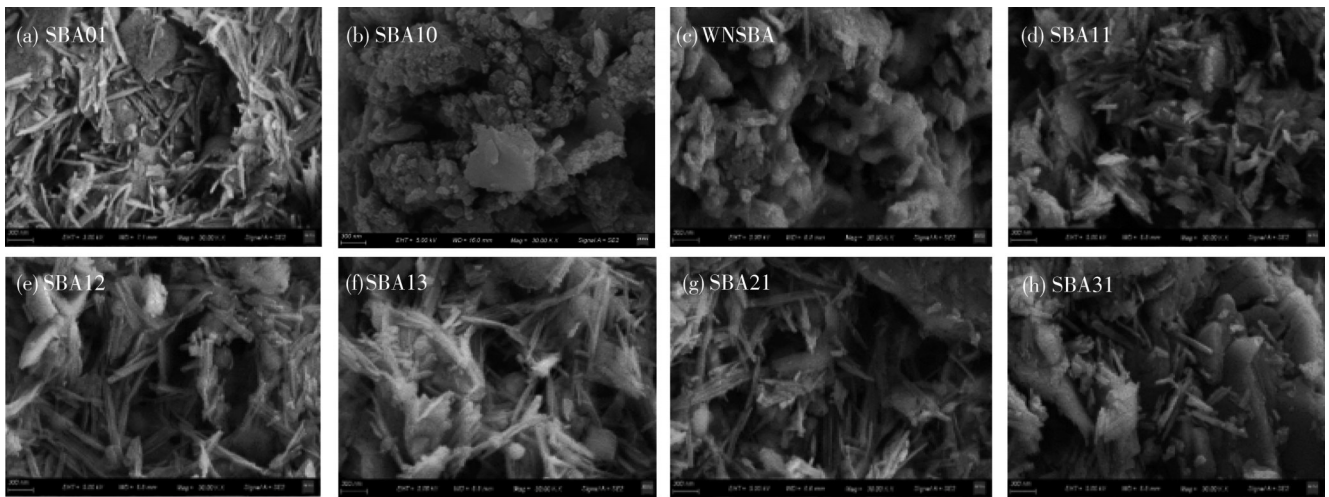


图2 凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的扫描电镜图(×30 000倍)

Figure 2 Scanning electron microscopy of sludge biochar modified with attapulgite (×30 000 times)

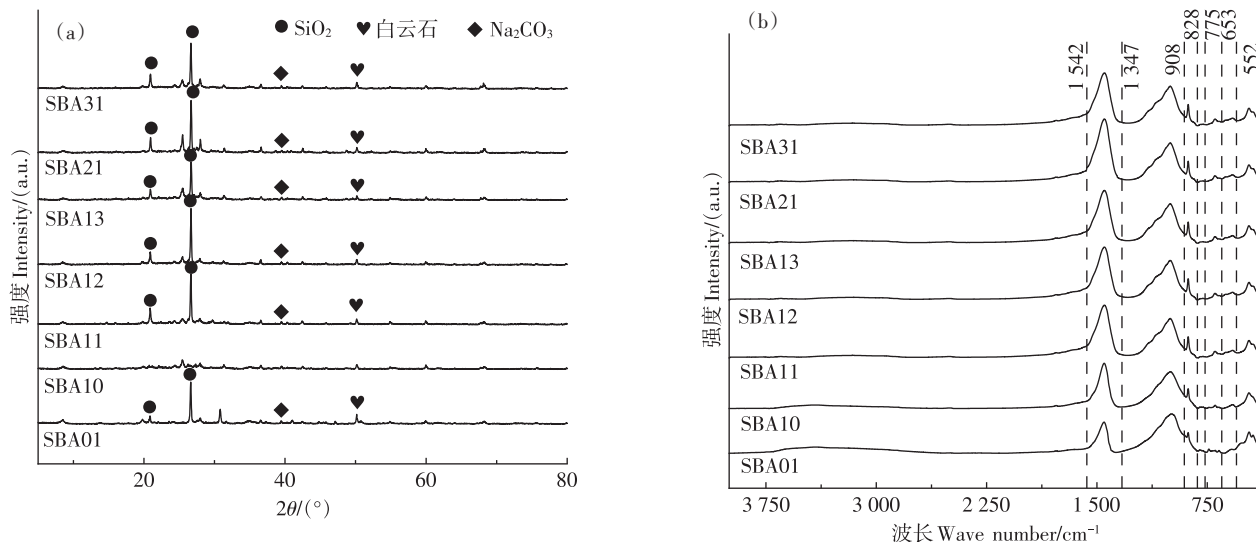


图3 凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的X射线衍射图谱和红外光谱图

Figure 3 X-ray diffraction pattern and infrared spectra of sludge biochar modified with attapulgite

基于以上结果,综合考虑到对多种重金属的吸附适用性,本研究选取SBA21作为最优材料,并基于XPS图谱分析吸附4种金属后C1s的结合能变化,以深入分析吸附机理(图4)。SBA21吸附前的C1s谱图中,C—C/C=C、C—O、C=O和O—C=O分别对应于284.8、286.46、287.92 eV和289.61 eV,吸附Cd²⁺(图4b)、Cr³⁺(图4c)、Zn²⁺(图4d)、Ni²⁺(图4e)后,其C1s光谱中C=O和O—C=O的峰总面积由22.56%分别下降至20.71%、20.21%、18.11%和19.94%。而C—O峰总面积则由26.30%分别上升至30.44%、36.53%、36.96%和31.58%。该现象表明重金属和含氧官能团之间发生了络合反应^[38]。此外,C=C峰总面积随着对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的吸附,均呈现下降趋势,由33.46%分别下降至26.51%、26.25%、28.04%和23.01%。说明环状芳香族结构可以在吸附过程中充当π电子供体,增强π电子络合^[39]。

综合上述表征分析,推断出SBA21对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺4种重金属吸附的主要机制(图5),可概述为:孔隙填充、离子交换导致的沉淀作用、含氧基团与金属离子的络合反应以及重金属-π电子的共同作用,促进了改性生物炭对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的吸附性能。

3 结论

(1)吸附实验表明,污泥与凹凸棒石黏土最佳质量比为2:1,在此条件下,凹凸棒石黏土改性污泥生物炭对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的去除率分别达到83%、

87%、89%和88%。

(2)吸附动力学与等温吸附模型拟合表明,准一级动力学模型和Langmuir模型能更好地描述凹凸棒石黏土改性污泥生物炭对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的吸附过程,表明改性材料对4种重金属吸附以单分子层物理吸附为主。

(3)表征分析表明,凹凸棒石黏土的引入不仅改善了污泥生物炭的孔隙结构,同时也增加了含氧官能团、芳香族结构并引入了硅酸盐。NaOH的添加不仅削弱了凹凸棒石黏土改性污泥生物炭的团聚效应,同时还促进了Na₂CO₃的形成。以上结构有利于促进孔隙填充、离子交换、共沉淀、络合以及重金属-π电子作用,从而协同提升了该材料对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的吸附性能。

参考文献:

- [1] 袁孝康,周江敏,陶月良,等.蒙脱石/氧化石墨烯对Cr(VI)的吸附[J].水处理技术,2022,48(2):108-113. YUAN X K, ZHOU J M, TAO Y L, et al. Adsorption of Cr(VI) on montmorillonite/graphene oxide[J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(2):108-113.
- [2] GARCÍA-CHIRINO J, VAN EYGEN G, TODD R, et al. Wastewater-treating-waste: effective heavy metals removal from electroplating wastewater by ladle slag[J]. *Chemosphere*, 2024, 361:142532.
- [3] 林春岭,钟来元,钟晓岚,等.甘蔗渣生物炭吸附-还原Cr(VI)的反应研究[J].农业环境科学学报,2023,42(10):2335-2345. LIN C L, ZHONG L Y, ZHONG X L, et al. Adsorption-reduction reaction between bagasse-prepared biochar and Cr(VI)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10):2335-2345.
- [4] 廖晓峰,钟静萍,陈云嫩,等.功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对

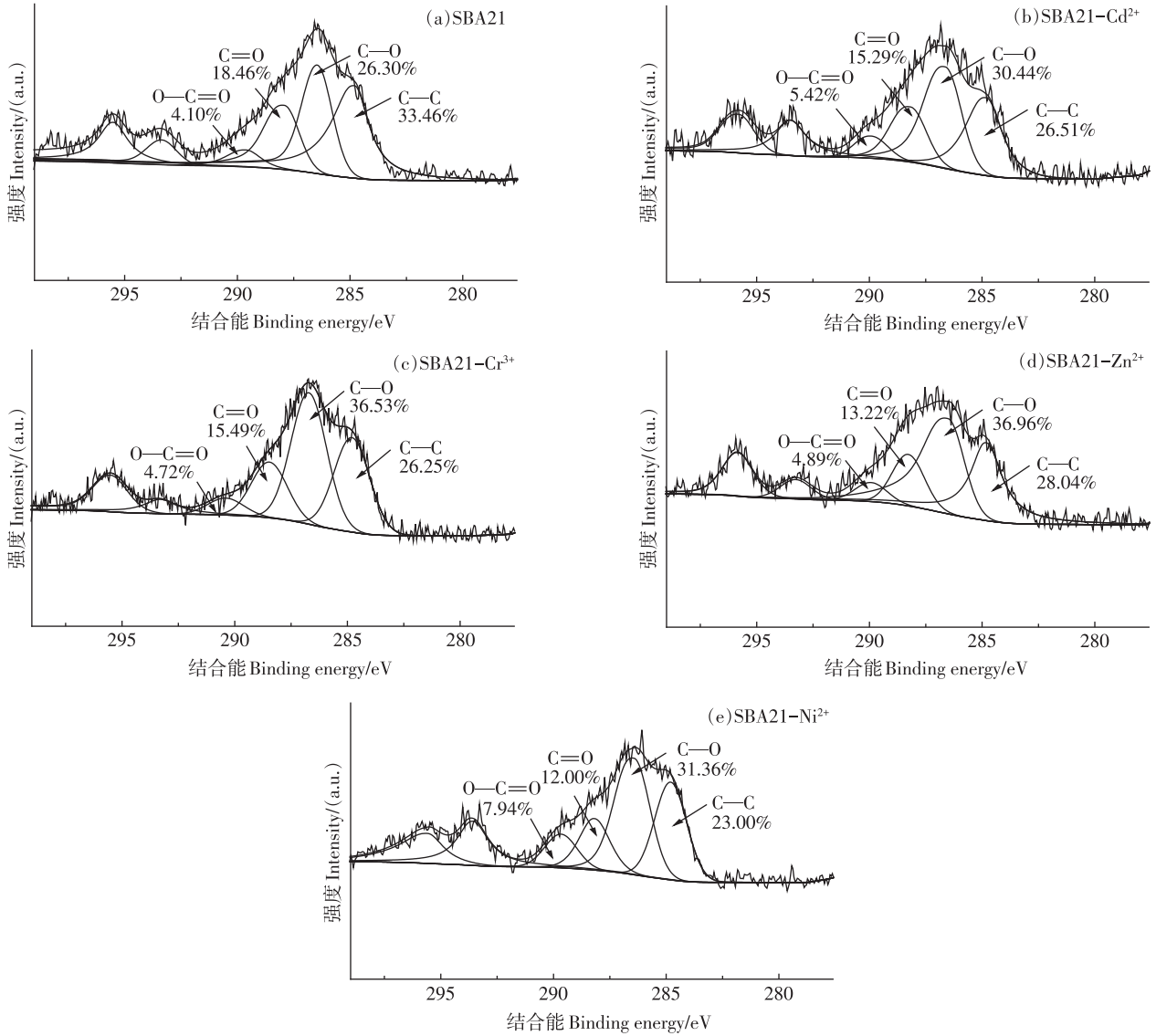


图4 重金属(Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺)吸附前后SBA21的高分辨C1 s光谱

Figure 4 High resolution C1 s spectra of SBA21 before and after heavy metal adsorption (Cd²⁺, Cr³⁺, Zn²⁺ and Ni²⁺)

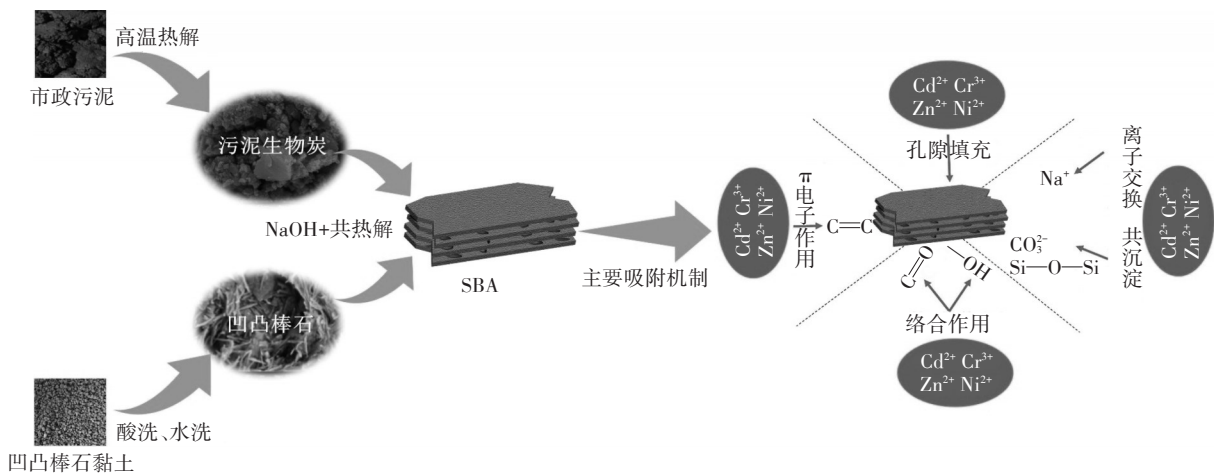


图5 凹凸棒石黏土改性污泥生物炭对Cd²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺和Ni²⁺的吸附机理

Figure 5 Mechanism of adsorption of Cd²⁺, Cr³⁺, Zn²⁺ and Ni²⁺ by sludge biochar modified with attapulgite

- 重金属废水中 Pb^{2+} 的吸附行为[J]. 环境科学, 2022, 43(1):387-397. LIAO X F, ZHONG J P, CHEN Y N, et al. Preparation of functional attapulgite composite and its adsorption behaviors for Congo red[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(1):387-397.
- [5] MA B, YAO J, CHEN Z H, et al. Superior elimination of $Cr(VI)$ using polydopamine functionalized attapulgite supported nZVI composite: behavior and mechanism[J]. *Chemosphere*, 2022, 287(Pt 1):131970.
- [6] 马林峰, 欧爱彤, 李志远, 等. Na_2S 改性生物炭高效吸附重金属离子: 制备及吸附机理[J]. 化工学报, 2024, 75(7):2594-2603. MA L F, OU A T, LI Z Y, et al. High-efficiency adsorption of heavy metal ions by Na_2S modified biochar: preparation and adsorption mechanism [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(7):2594-2603.
- [7] WANG Z W, NIE Q, LEI Z F, et al. Enhanced $Pb(II)$ removal from wastewater by co-pyrolysis biochar derived from sewage sludge and calcium sulfate: performance evaluation and quantitative mechanism analysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 329: 125124.
- [8] LIU B X, ZHANG Z H, GUAN D X, et al. Qualitative and quantitative analysis for Cd^{2+} removal mechanisms by biochar composites from co-pyrolysis of corn straw and fly ash[J]. *Chemosphere*, 2023, 330:138701.
- [9] TIAN L, FU K B, CHEN S, et al. Comparison of microscopic adsorption characteristics of $Zn(II)$, $Pb(II)$, and $Cu(II)$ on kaolinite[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:15936.
- [10] 周细霞, 刘朝淑, 孙荣国. $Fe(II)$ 改性蒙脱石对土壤汞的吸附固定机理探究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(4):63-74. ZHOU X X, LIU C S, SUN R G. Investigation of the adsorption and immobilization mechanism of $Fe(II)$ -modified montmorillonite on soil mercury[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(4):63-74.
- [11] 李秋爽, 李芬, 杨莹, 等. 碳材料纳米结构的调控及吸附水中有毒污染物研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(10):57-69. LI Q S, LI F, YANG Y, et al. Research progress in regulation of nanostructure of carbon materials and adsorption of toxic pollutants in water[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(10):57-69.
- [12] 苏旭, 王宣茗, 王思宇, 等. 壳聚糖-生物炭对典型抗生素在单一和复合溶液中的吸附行为与机理[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9):2080-2092. SU X, WANG X M, WANG S Y, et al. Adsorption behavior and mechanism of typical antibiotics by chitosan and biochar in single and complex solutions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(9):2080-2092.
- [13] 任珺, 孙新妮, 任汉儒, 等. 钠化污泥生物炭复合凹凸棒石对水体中 Cu^{2+} 的吸附效果研究[J]. 功能材料, 2024, 55(5):5152-5160. REN J, SUN X N, REN H R, et al. Adsorption effect on Cu^{2+} in water treated by sodium-modified sludge biochar combined with attapulgite [J]. *Journal of Functional Materials*, 2024, 55(5):5152-5160.
- [14] AKTAS K, LIU H, ESKICIOGLU C. Treatment of aqueous phase from hydrothermal liquefaction of municipal sludge by adsorption: comparison of biochar, hydrochar, and granular activated carbon[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356:120619.
- [15] 陈超, 刘建国, 赵光琪, 等. 木质垃圾与废铁泥制备 Fe^0 -BC材料及其对水中 $Cr(VI)$ 的去除行为[J]. 环境科学研究, 2023, 36(5):995-1005. CHEN C, LIU J G, ZHAO G Q, et al. Preparation of Fe^0 -BC using wood waste and iron sludge and its application for removing $Cr(VI)$ [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(5):995-1005.
- [16] LI K R, WU J, LI X, et al. Preparation of porous composite hydrogel with ultra-high dye adsorption capacity based on biochar: adsorption behaviors and mechanisms[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 295:120115.
- [17] KHAN Z H, LI Z Y, GAO M L, et al. Simultaneous and efficient removal of $Cd(II)$ and $As(III)$ by a magnesium-manganese codoped biochar composite: sorption performance and governing mechanisms [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109919.
- [18] CHEN H P, AI Y L, JIA Y F, et al. Effective and simultaneous removal of heavy metals and neutralization of acid mine drainage using an attapulgite-soda residue based adsorbent[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843:157120.
- [19] YIN H B, ZHANG M, HUO L, et al. Efficient removal of phosphorus from constructed wetlands using solidified lanthanum / aluminum amended attapulgite/biochar composite as a novel phosphorus filter [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833:155233.
- [20] XU Z Y, LIN Y Q, LIN Y J, et al. Adsorption behaviors of paper mill sludge biochar to remove Cu, Zn and as in wastewater[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23:101616.
- [21] QIU X J, ZHAO Y X, ZHAO C L, et al. Physicochemical and adsorptive properties of biochar derived from municipal sludge: sulfamethoxazole adsorption and underlying mechanism[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11:1275087.
- [22] 任珺, 刘丽莉, 陶玲, 等. 甘肃地区凹凸棒石的矿物组成分析[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(11):2362-2365. REN J, LIU L L, TAO L, et al. Mineral composition analysis of attapulgite from Gansu area[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(11):2362-2365.
- [23] 张国胜, 程红艳, 张海波, 等. 双孢菇菌糠生物炭吸附 Pb^{2+} 机制及其环境应用潜力[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3):659-667. ZHANG G S, CHENG H Y, ZHANG H B, et al. Adsorption mechanism of Pb in water by biochar derived from spent *Agaricus bisporus* substrate and its environmental application potential[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3):659-667.
- [24] 高亮, 李志合, 易维明, 等. 棉秆生物炭去除水中 $Pb(II)$ 吸附机理的量化分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3):230-238. GAO L, LI Z H, YI W M, et al. Quantifying the adsorption mechanisms of $Pb(II)$ in aqueous solution by cotton stalk biochar[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(3):230-238.
- [25] 孙兆楠, 张永波, 赵鹏, 等. 玉米秸秆生物炭制备、表征及吸附性能研究[J]. 可再生能源, 2024, 42(12):1587-1593. SUN Z N, ZHANG Y B, ZHAO P, et al. Preparation, characterization and adsorption performance of corn straw biochar[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(12):1587-1593.
- [26] 范拴喜, 侯宪东, 张楠, 等. 改性玉米芯磁性重金属吸附剂的制备与吸附性能研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(8):62-69. FAN S X, HOU X D, ZHANG N, et al. Study on preparation and its adsorption

- performance for modified corncob magnetic adsorbent of heavy metals [J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(8):62-69.
- [27] 肖小兰, 潘亭羽, 王雄敏, 等. MgCl₂改性制备酒糟稻壳生物炭及对沼液氨氮吸附性能研究[J]. *环境科学与技术*, 2024, 47(12):33-40. XIAO X L, PAN T Y, WANG X M, et al. MgCl₂ modification-preparation of biochar from distiller's grains rice husk and its adsorption performance to ammonia nitrogen in fermented liquid[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 47(12):33-40.
- [28] LEE H S, SHIN H S. Competitive adsorption of heavy metals onto modified biochars: comparison of biochar properties and modification methods[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 299: 113651.
- [29] 李贝贝, 张亚平, 郭炳跃, 等. 生物炭/凹凸棒石复合材料对铅镉的吸附[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(5):1116-1127. LI B B, ZHANG Y P, GUO B Y, et al. Adsorption characteristics of Cd²⁺ and Pb²⁺ on biochar / attapulgite composites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5):1116-1127.
- [30] 郭森, 李贝贝, 许琳玥, 等. 氢氧化钠改性生物炭/凹凸棒石复合材料对铅、镉的吸附机理研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(1):119-129. GUO M, LI B B, XU L Y, et al. Study on the adsorption mechanism of sodium hydroxide modified biochar / attapulgite composites for lead and cadmium[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(1):119-129.
- [31] 苏天鹅, 罗鹏, 赵基鑫, 等. KOH活化瓜子壳活性炭的制备及吸附性能研究[J]. *化学研究与应用*, 2022, 34(12):2864-2871. SU T E, LUO P, ZHAO J X, et al. Preparation and adsorption properties of KOH-activated melon seed shell carbon[J]. *Chemical Research and Application*, 2022, 34(12):2864-2871.
- [32] 马锋锋, 薛之一, 赵保卫. 紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制[J]. *环境科学*, 2024, 45(4):2203-2210. MA F F, XUE Z Y, ZHAO B W. Mechanism of ultraviolet aging effect on the adsorption of ciprofloxacin by nano-biochar[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4):2203-2210.
- [33] 董良飞, 郜飞, 刘会东, 等. 凹凸棒土/玉米秸秆生物炭制备及对四环素的吸附[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2023, 35(2):46-58. DONG L F, GAO F, LIU H D, et al. Preparation of attapulgite/corn straw biochar and its adsorption on tetracycline[J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2023, 35(2):46-58.
- [34] SHAN R, SHI Y Y, GU J, et al. Single and competitive adsorption affinity of heavy metals toward peanut shell-derived biochar and its mechanisms in aqueous systems[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(5):1375-1383.
- [35] 龚冲云, 孙丽娟, 宋科, 等. 农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制[J]. *环境科学*, 2022, 43(6):3211-3220. GONG P Y, SUN L J, SONG K, et al. Adsorption capacity and mechanism of biochar derived from typical agricultural wastes for cadmium in aqueous solutions[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3211-3220.
- [36] 马凯悦, 张浩, 宋宁宁, 等. 氧化老化玉米秸秆生物炭吸附镉机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(6):1230-1240. MA K Y, ZHANG H, SONG N N, et al. Mechanism of cadmium adsorption by oxidative aging corn straw biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6):1230-1240.
- [37] ZHANG Z X, ZHANG M C, ZHAO X Q, et al. High-efficient removal and adsorption mechanism of organic dyes in wastewater by KOH-activated biochar from phenol-formaldehyde resin modified wood[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330:125542.
- [38] LIU B, ZHANG L J, NING K, et al. Biochar with nanoparticle incorporation and pore engineering enables enhanced heavy metals removal[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5):111056.
- [39] TIAN H R, PENG S C, ZHAO L, et al. Simultaneous adsorption of Cd(II) and degradation of OTC by activated biochar with ferrate: efficiency and mechanism[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 447:130711.

(责任编辑:宋潇)