

引用:胡跃希,杨鸿宇,程文博,等. 艾草生物炭的制备及其吸附性能研究 [J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(6): 891-899.

Citation: HU Yuexi, YANG Hongyu, CHENG Wenbo, CHANG Fei, HU Jian, WANG Maoxu, XU Qinghui, XU Yuxuan. Preparation and adsorption performance of Artemisia argyi biochar[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(6): 891-899.

文章编号 1672-6634(2025)06-0891-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025070007

## 艾草生物炭的制备及其吸附性能研究

胡跃希<sup>1</sup>, 杨鸿宇<sup>1</sup>, 程文博<sup>2</sup>, 常飞<sup>1</sup>, 胡健<sup>1</sup>, 王茂旭<sup>1</sup>, 许清惠<sup>3</sup>, 徐宇轩<sup>3</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 苏州中晟环境修复有限公司, 江苏 苏州 215128;

3. 上海理工大学 材料与化学学院, 上海 200093)

**摘要** 为实现艾草精油萃取废渣的资源化利用, 分别以废渣和其磷酸改性产物为前驱体, 在不同的碳化温度下制备了生物炭(WBC)和改性生物炭(WAC), 系统考察两者对三种有机小分子[甲基橙(MO)、罗丹明 B(RhB)和盐酸四环素(TC)]的吸附性能, 并通过三种动力学模型对吸附过程进行分析。结果表明, 磷酸活化显著增强空隙结构, WAC 样品表面具有更多的褶皱及孔洞, 其中 WAC800 比表面积最大, 可达 667 m<sup>2</sup>/g。相应地, WAC 的吸附性能全面优于 WBC, 其中 WAC800 对 MO、RhB、TC 的平衡吸附量分别为 40.1、19.1、38.7 mg/g。三种有机分子的吸附均遵循准二级动力学模型, 表明吸附类型为化学吸附, 主要源于吸附材料与目标分子之间氢键和静电  $\pi$ - $\pi$  相互作用等诱导的表面络合。

**关键词** 艾草生物炭; 改性生物炭; 吸附; 吸附动力学

中图分类号 TQ424

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



## Preparation and adsorption performance of Artemisia argyi biochar

HU Yuexi<sup>1</sup>, YANG Hongyu<sup>1</sup>, CHENG Wenbo<sup>2</sup>, CHANG Fei<sup>1</sup>, HU Jian<sup>1</sup>,  
WANG Maoxu<sup>1</sup>, XU Qinghui<sup>3</sup>, XU Yuxuan<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Suzhou Sentech Environmental Remediation Co., Ltd., Suzhou 215104, China; 3. School of Materials and Chemistry,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract** To achieve the resource utilization of the waste residue from the extraction of Artemisia argyi essential oil, the residue and its phosphoric acid-modified derivative were used as precursors to prepare biochar (WBC) and modified biochar (WAC) at different carbonization temperatures in this study. The adsorption performance of both kinds of samples towards three organic small molecules (methyl orange (MO), Rhodamine B (RhB), and tetracycline hydrochloride (TC)) was systematically investigated, and

收稿日期: 2025-07-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFE0211700); 上海理工大学大学生创新创业项目(SH2025209; XJ2025446)资助

通信作者: 常飞, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 环境催化材料, E-mail: feichang@usst.edu.cn.

corresponding processes were analyzed using three kinetic models. It was indicated that phosphoric acid activation significantly improved the porosity. The samples WAC exhibited more wrinkles and holes on the surface than the samples WBC, with the sample WAC800 having the largest specific surface area of  $667 \text{ m}^2/\text{g}$  among all candidates. Correspondingly, the adsorption performance of samples WAC was superior to that of WBC, with the equilibrium adsorption capacities of sample WAC800 for MO, RhB, and TC being 40.1, 19.1, and 38.7 mg/g, respectively. The corresponding adsorptions of three organic molecules followed a quasi-second-order kinetic model, revealing that the adsorption processes were chemical adsorption, primarily driven by the surface complexation induced by hydrogen bonding and electrostatic  $\pi$ - $\pi$  interaction between the adsorbents and target adsorbates.

**Keywords** Artemisia argyi biochar; modified biochar; adsorption; adsorption kinetics

## 0 引言

众所周知,工业染料与制药废水通常以高毒、高色度、多组分和难生物降解著称,对生态安全和公众健康构成双重威胁<sup>[1]</sup>。吸附技术因操作简便、能耗低,已成为快速消减此类有机污染物的主流手段。其中,来源广泛、蕴藏丰富和价格低廉的生物质衍生活性炭因其经济性和高效性,尤其受到学术界和工程界青睐<sup>[2-4]</sup>。

然而,商用活性炭吸附存在前驱体成本较高等问题,研究人员正在探索储量丰富和成本低廉的天然生物质进行替代<sup>[5-7]</sup>。Zhao 等人以浓硫酸一步碳化大蒜皮制备了富含含氧官能团的生物炭,对恩诺沙星的吸附容量显著提升<sup>[8]</sup>。Cai 等人利用甘蔗渣生物质为原料,经同步热解-掺氮改性工艺制备的氮掺杂生物炭对亚甲基蓝表现出优异的吸附性能<sup>[9]</sup>。另外, Saranya 等人采用磷酸活化紫檀皮制备了改性生物炭,显著扩孔并增加表面酸性位点,可有效吸附去除亚甲基蓝<sup>[10]</sup>。

艾草为菊科蒿属芳香草本,药用价值极高<sup>[11-12]</sup>。研究表明,艾草精油兼具抑制细菌真菌、驱虫以及镇痛活性,已被证实可替代商业化药剂用于羊胃肠道线虫防控<sup>[13]</sup>。随着艾草精油产业规模不断扩大,精油提取后的艾草废渣量急剧攀升。若沿用垃圾焚烧或填埋等传统手段,不仅排放温室气体,也会造成土地资源浪费<sup>[14]</sup>。因此,将精油提取之后的废渣热解转化为生物炭,既可固碳减废,又能获得高附加值吸附材料,成为兼顾环保与经济效益的首选路径。

本文以艾草精油提取废渣为原料,分别在未改性及磷酸活化条件下经不同碳化温度热解制得生物炭及改性生物炭。选用兼具芳香单元和各种含氧官能团的偶氮类染料甲基橙(MO)、异佛尔酮环染料罗丹明 B(RhB)以及四环素类抗生素盐酸四环素(TC)为模拟污染物,系统评估两类材料对三种典型有机小分子的吸附能力,构建微观结构-吸附性能之间的关系,并通过三种动力学模型对吸附过程进行分析。

## 1 试验方法

### 1.1 试剂

MO(分析纯)购自济宁市化工研究所试剂厂;RhB(分析纯)和 TC(分析纯)均购自上海试剂三厂;磷酸( $\geq 85\%$ ,分析纯)和盐酸( $36.0\% \sim 38.0\%$ ,分析纯)由国药集团化学试剂有限公司提供;艾草废渣由上海理工大学医疗与食品学院实验室提供。

### 1.2 材料制备

WBC 生物炭的制备:将超临界萃取精油后的艾草废渣于  $60^\circ\text{C}$  鼓风干燥箱中干燥 24 h 得到渣粉。称取 8.5 g 渣粉装入 50 mL 带盖坩埚中,压实后置于马弗炉中以  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率升温至  $(500 \sim 800^\circ\text{C})$  碳化 3 h。自然冷却至室温后研磨并过 100 目筛,将样品加入 1 mol/L 盐酸溶液中反应 2 h 后,用超纯水反复洗涤直至滤液  $\text{pH} \approx 7$ 。在  $60^\circ\text{C}$  下干燥过夜,所得样品根据碳化温度分别标记为 WBC500、WBC600、WBC700 和 WBC800。

WAC 生物炭的制备:称取 8.5 g 渣粉置于 100 mL 烧杯中,加入含 8.5 g 磷酸的水溶液浸渍 6 h 后,在  $60^\circ\text{C}$  下干燥过夜。随后将其装入 50 mL 坩埚,盖盖后置于马弗炉中,升温速率为  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  至  $(500 \sim 800^\circ\text{C})$

后热解 3 h。自然冷却至室温后研磨并过 100 目筛,用超纯水洗涤至滤液 pH $\approx$ 7。在 60 $^{\circ}$ C 下干燥过夜,所得样品根据碳化温度分别标记为 WAC500、WAC600、WAC700 和 WAC800。

WBC 及 WAC 生物炭的完整制备流程如图 1 所示。

### 1.3 样品的表征测试

采用德国 BRUKER 公司 D8 ADVANCE 型的 X 射线衍射仪测试 X 射线衍射(XRD)图谱。样品的微观结构通过日本 Hitachi 公司的 S-4800 型扫描电子显微镜(SEM)进行观察。样品的傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和拉曼光谱(Raman)采用日本 JASCO 公司的 FTIR-400 型红外光谱仪和法国 HORIBA 公司的 Horiba LabRAM HR Evolution 型拉曼光谱仪进行测试。氮气吸附-脱附等温线通过美国康塔公司的 Quadrasorb SI 系列测试仪在液氮中测试。

### 1.4 吸附性能测试

称取 100 mg 的生物炭置于 250 mL 锥形瓶中,加入 100 mL 的吸附质溶液(20 mg/L)。随后,将锥形瓶置于恒温震荡摇床中吸附 3 h,温度为 25 $^{\circ}$ C,并按预设时间间隔取样。上清液通过紫外-可见分光光度计在其最大波长(MO, 464 nm; RhB, 554 nm; TC, 275 nm)处测定吸光度,并通过公式(1)计算吸附量

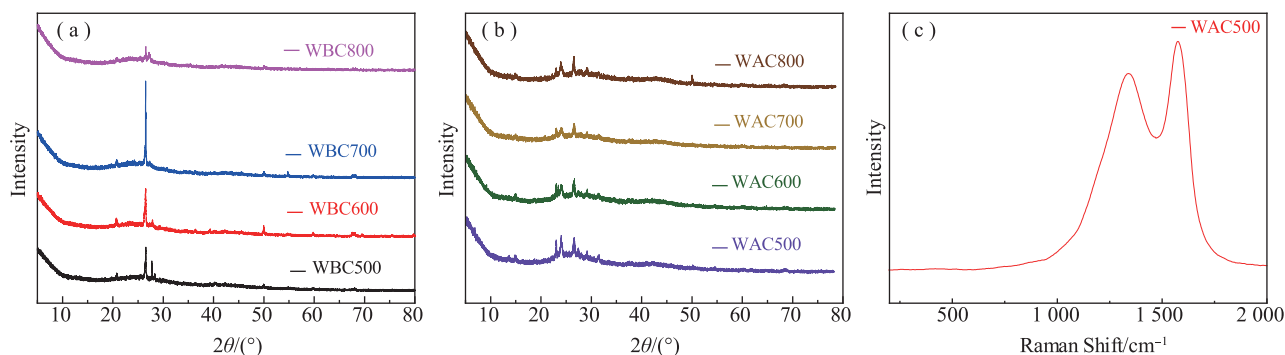
$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}, \quad (1)$$

式中  $q_t$  为特定时间  $t$  的吸附量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $C_0$  为吸附质的初始浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $C_t$  为  $t$  时刻的吸附质浓度, ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $V$  为溶液体积(L);  $m$  为吸附剂质量(g)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 和 Raman 分析

图 2(a)和 2(b)为 WBC 和 WAC 系列样品在不同碳化温度下的 XRD 谱图。如图 2(a)所示,随着碳化温度的升高,WBC 的 XRD 衍射峰位置与强度未发生明显变化,仅检测到硬石膏、氯化钾和碳酸钙等无机组分,这些组分易经磷酸溶解除去。而对于 WAC,在  $2\theta = 13.48^{\circ}$ 、 $14.74^{\circ}$ 、 $22.87^{\circ}$ 、 $23.80^{\circ}$ 、 $26.45^{\circ}$ 、 $27.26^{\circ}$  和  $31.33^{\circ}$  处出现明显的衍射峰,对应三氧化二铝、钙铝黄长石和镁黄长石等无机组分,说明原料废渣本身含有上述物质,如图 2(b)所示。所有样品均在  $23^{\circ}$  处均呈现出现宽带,表明 WBC 和 WAC 系列样品主体为石墨化程度较低的无定形碳<sup>[15]</sup>。图 2(c)为样品 WAC500 的拉曼光谱。位于  $1340$  和  $1577\text{ cm}^{-1}$  处的峰分别对应无序的石墨结构(D)和有序的石墨结构(G),表明在  $500^{\circ}\text{C}$  下磷酸处理的艾草生物炭兼具  $\text{sp}^2/\text{sp}^3$  混合碳骨架。低石墨化度以及存在于  $\text{sp}^3$  型碳原子上的大量含氧官能团为吸附过程提供了丰富的活性位点<sup>[16]</sup>。



注: (a) WBC 和 (b) WAC 的 XRD 图谱; (c) WAC500 的拉曼光谱。

图 2 样品的 XRD 图谱和拉曼光谱

Fig. 2 XRD patterns and Raman spectrum of samples

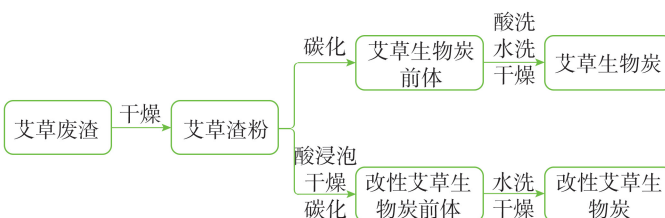
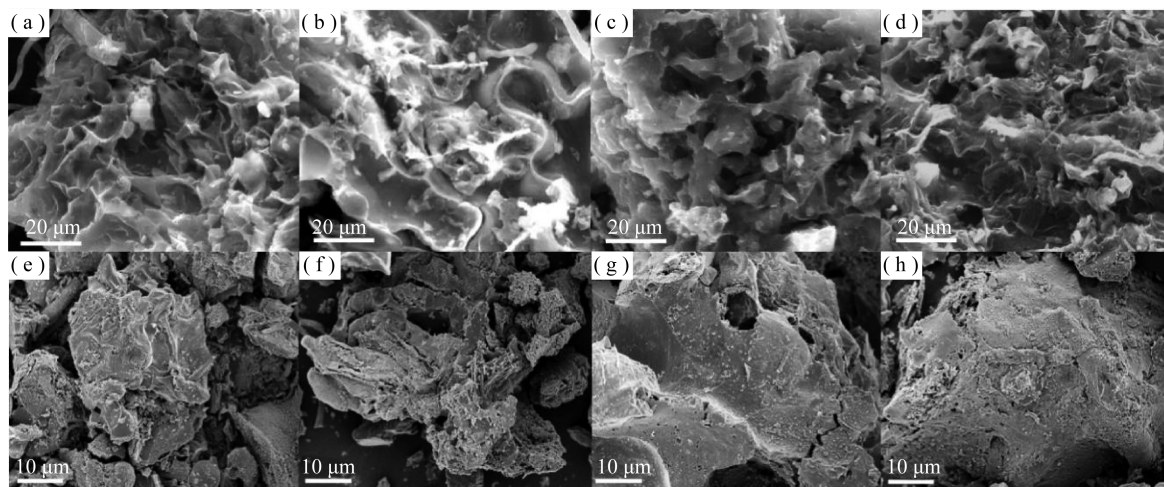


图 1 WBC 及 WAC 系列样品制备流程图

Fig. 1 Flow chart of WBC and WAC series preparation

## 2.2 SEM 分析

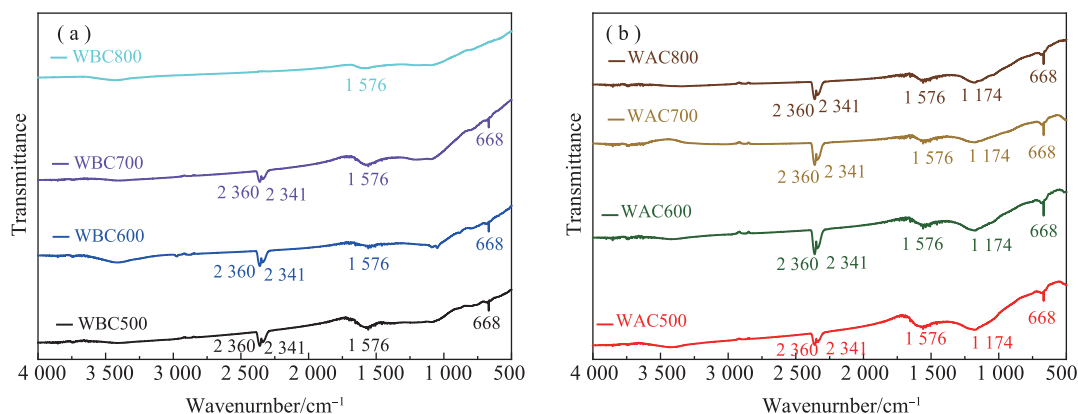
图 3 为 WBC 和 WAC 系列样品的 SEM 图。如图 3(a~h)所示,随着碳化温度的升高,WBC 和 WAC 两类材料的空隙发育均显著提高。其中,图 3(a)中的样品 WBC500 表面仅存在少量褶皱,表明在此温度下表面尚未形成有效孔道。相比之下,图 3(d)中的样品 WBC800 出现了大量不规则孔洞,为后续吸附过程提供了吸附空间。相比于样品 WBC500,图 3(e)中经磷酸改性的样品 WAC500 表面同时呈现出丰富的褶皱与贯通孔洞,不仅增大了比表面积,还有利于引入额外的活性位点,从而显著提升了与有机小分子的接触机率和吸附性能。



注:(a) WBC500;(b) WBC600;(c) WBC700;(d) WBC800;(e) WAC500;(f) WAC600;(g) WAC700;(h) WAC800。

图 3 样品的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of samples



注:(a) WBC;(b) WAC。

图 4 样品的 FT-IR 图谱

Fig. 4 FT-IR spectra of samples

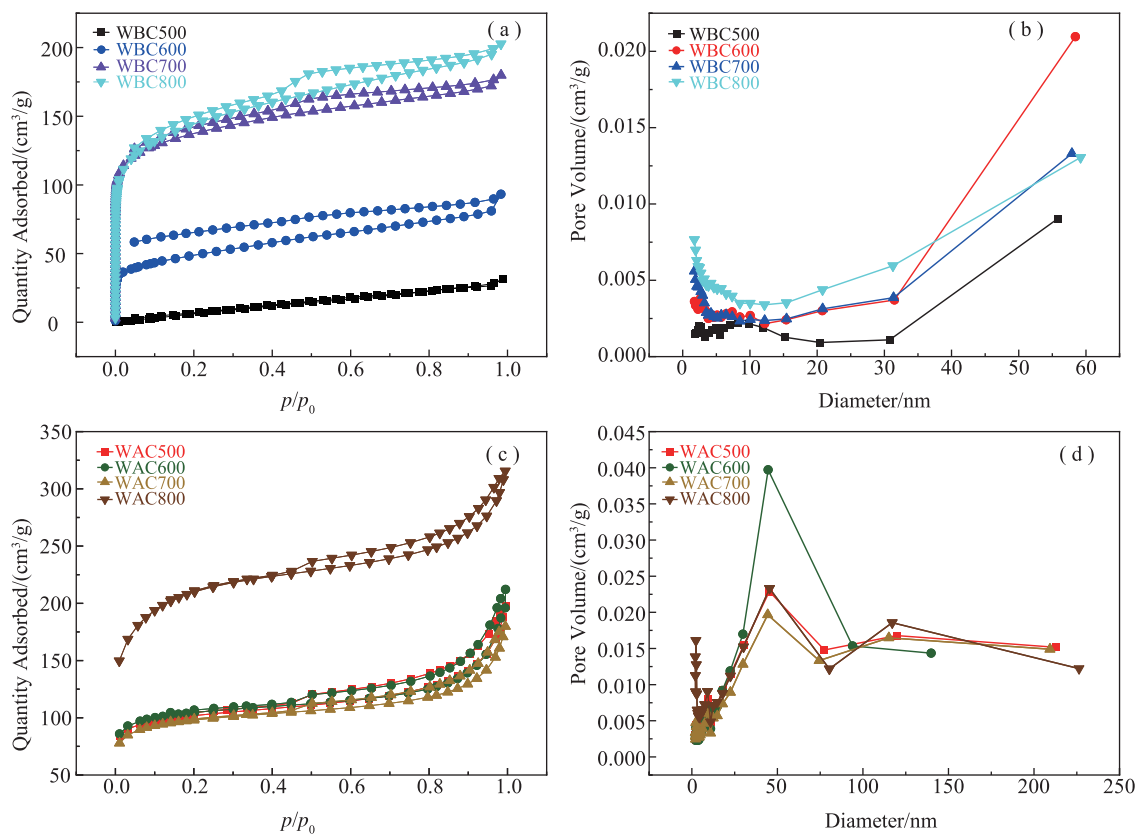
## 2.3 FT-IR 分析

图 4 为 WBC 和 WAC 系列样品的 FT-IR 光谱,不同位置的吸收峰反映了样品表面不同种类的官能团。 $668\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰源于 C—H 键拉伸振动<sup>[17]</sup>。 $1174\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于芳香醚基(—C—O—C—)与酚羟基(—OH)的伸缩振动<sup>[18]</sup>。与 WBC 相比,WAC 谱图中在  $1174\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰显著增强,说明经过磷酸改性过程引入了更多的—C—O—C—和—OH 含氧官能团。位于  $1576\text{ cm}^{-1}$  处的强吸收峰对应羧酸(—COO—)的不对称伸缩振动<sup>[19]</sup>,两类样品均出现且强度相近,表明磷酸处理对材料表面的—COO—基团影响有限。 $2360$  和  $2341\text{ cm}^{-1}$  附近的吸收峰可归属为炔基(—C≡C—)或其共轭体系的伸缩振动<sup>[20]</sup>,该峰在 WBC 高温样品中明显减弱,而在 WAC 中仍保留一定强度,为静电  $\pi$ - $\pi$  相互作用提供潜在位点。此外,

WBC 在 668、2 341 和 2 360  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰随着碳化温度的升高逐渐减弱,这与高温环境中部分官能团逐渐消失有关。综上,磷酸活化显著提高了—C—O—C—和—OH 等含氧基团的含量,并保留了  $\pi$  电子体系,二者协同增强了氢键与静电  $\pi$ - $\pi$  相互作用,从而有效促进目标有机分子的表面络合与吸附。

## 2.4 氮气吸附-脱附等温线分析

WBC 和 WAC 系列样品的氮气吸附-脱附曲线如图 5 所示。根据 IUPAC 标准分类,WBC600 等温线属于 IV 型<sup>[21]</sup>,而 WBC500、WBC700 与 WBC800 的等温线属于典型的 I 型,且在相对压力  $p/p_0$  为 0.6~1.0 的范围内均出现了明显的 H4 型迟滞环,如图 5(a)和 5(b)所示。这主要由于样品中微孔含量较多,在低压端时对氮气产生急剧吸附,相对压力增大后曲线趋于平稳。随着碳化温度的升高,材料的微孔含量增多,因此在低压区氮气吸附较高。WAC 系列样品均呈现 IV 型等温线,H4 型迟滞环明显,且在  $p/p_0 = 1$  附近吸附量陡升,说明磷酸活化促使原有微孔壁局部坍塌,孔道之间相互连通,形成以介孔为主的孔隙结构,这从孔径分布上也得到了证实。图 5(b)显示,WBC 样品的孔径均小于 10 nm,是一种微介孔材料。而图 5(d)中 WAC 以介孔为主,孔径主要分布在 2.5、8.5 和 40 nm,其中样品 WAC800 在 120 nm 处还含有少量大孔,有利于有机小分子的快速扩散与高效吸附。



注:(a, c) 氮气吸附-脱附曲线;(c, d) 孔径分布图。

图5 样品的氮气吸附-脱附曲线和孔径分布图

Fig. 5  $\text{N}_2$  adsorption-desorption curves and pore size distributions of samples

表 1 汇总了 WBC 和 WAC 系列样品的比表面积( $S_{\text{BET}}$ )和孔容积。所有样品中,样品 WBC500 具有最小的比表面积( $46 \text{ m}^2/\text{g}$ )以及孔容积( $0.042 \text{ cm}^3/\text{g}$ ),但仍高于相同碳化温度下以杂草为前驱体制备的生物炭(比表面积  $40.46 \text{ m}^2/\text{g}$ ,孔容积  $0.036 \text{ cm}^3/\text{g}$ )<sup>[22]</sup>。随着碳化温度的升高,WBC 的比表面积和孔容积逐渐增大,表明半纤维素和纤维素等半挥发性组分热解逸出形成多孔结构<sup>[23]</sup>。在相同碳化温度下,WAC 的比表面积和孔容积显著高于 WBC,证实磷酸活化能有效扩孔并提升空隙体积,从而增大材料的比表面积和孔容积。

2.5 吸附性能分析

为分析艾草生物炭对有机小分子的吸附机制,选取准一级(Pseudo-first order)、准二级(Pesudo-second order)和颗粒内扩散(Intraparticle-diffusion)三种典型动力学模型对实验数据进行拟合与比较。

准一级动力学吸附模型

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t。$$
 (2)

准二级动力学吸附模型

表 1 WBC 和 WAC 样品的比表面积和孔容积  
Tab. 1 Specific surface areas and pore volumes of WBC and WAC samples

| Samples | $S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ | Pore volume/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ |
|---------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| WBC500  | 46                                                | 0.042                                            |
| WBC600  | 176                                               | 0.087                                            |
| WBC700  | 511                                               | 0.088                                            |
| WBC800  | 528                                               | 0.121                                            |
| WAC500  | 317                                               | 0.186                                            |
| WAC600  | 324                                               | 0.174                                            |
| WAC700  | 349                                               | 0.161                                            |
| WAC800  | 667                                               | 0.121                                            |

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

颗粒内扩散吸附模型

$$q_e = k_p t^{\frac{1}{2}} + C，$$
 (4)

式中  $q_e$  为平衡吸附量 (mg/g),  $q_t$  为时刻  $t$  的吸附量 (mg/g)。  $k_1$  ( $\text{min}^{-1}$ )、  $k_2$  ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 和  $k_p$  ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$ ) 为上述三种动力学吸附模型的速率常数。式(4)中的  $C$  代表吸附过程中的边界层厚度。以 WBC 和 WAC 系列样品为生物炭材料,对有机分子 MO、RhB 和 TC 的吸附结果如图 6 所示,相关动力学模型参数分别列于表 2、3 和 4 所示。

由图 6(a)可知,样品 WAC800 仅需 30 min 既可达到 MO 吸附平衡,而样品 WBC800 耗时近 100 min,且同一时刻前者的  $q_t$  明显高于后者。相同碳化温度下,WAC 系列样品对三种模拟污染物分子的吸附量均优于 WBC,且  $q_t$  值随碳化温度的升高而递增,表明碳化温度通过调控样品的孔隙结构和官能团进而影响吸附性能。如图 6(b)和图 6(c)所示,生物炭样品对 RhB 和 TC 的吸附趋势与 MO 相似。相应的吸附动力学模型的拟合参数分别列于表(2~4)中,在所有体系中准二级动力学模型的相关系数  $R^2$  均保持最大值( $R^2 \approx 1$ ),表明准二级动力学模型更适合解释三种模拟污染物分子的吸附过程,即吸附过程中化学吸附为主导机制<sup>[24]</sup>,主要源于吸附剂与目标有机分子之间氢键和静电  $\pi$ - $\pi$  相互作用等诱导的表面络合作用。如表 5 所示,与文献报道的多种生物炭相比,本研究制备的艾草生物炭兼具高吸附容量和快速平衡优势,展现出良好的吸附应用潜力。

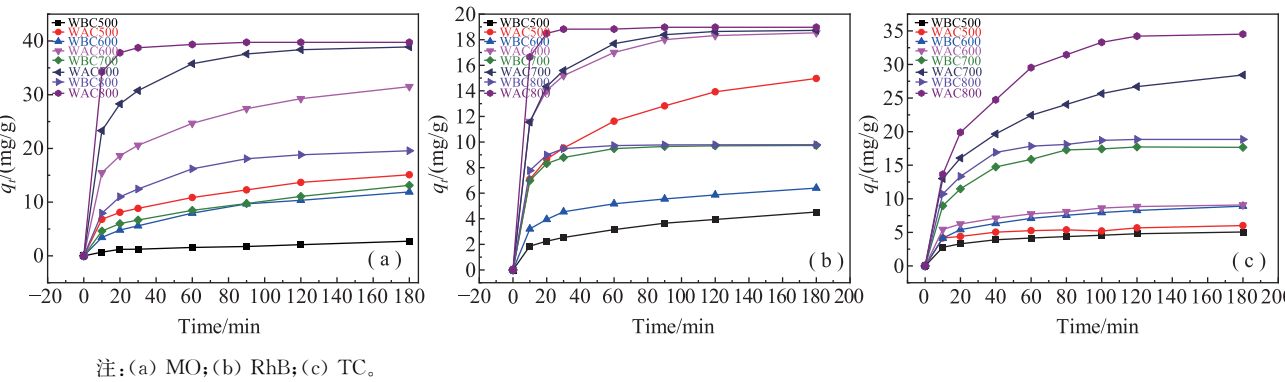


图 6 样品对 MO,RhB 和 TC 的吸附曲线  
Fig. 6 Adsorption curves for MO, RhB, and TC

表 2 样品 WBC 和 WAC 吸附 MO 的动力学参数

Tab. 2 The parameters of kinetic to removing MO on WBC and WAC

| Sample | Pseudo-first order                            |                             |       | Pseudo-second order                           |                                                                  |       | Intraparticle-diffusion                                            |                                             |       |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|
|        | $q_e/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $k_1/$<br>$\text{min}^{-1}$ | $R^2$ | $q_e/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1})$<br>$\cdot \text{min}^{-1}$ | $R^2$ | $k_p/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$<br>$\cdot \text{min}^{-0.5}$ | $C/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $R^2$ |
| WBC500 | 2.392                                         | 0.023                       | 0.885 | 3.095                                         | 0.007                                                            | 0.917 | 0.176                                                              | 0.236                                       | 0.956 |
| WAC500 | 13.376                                        | 0.044                       | 0.915 | 16.507                                        | 0.003                                                            | 0.986 | 0.823                                                              | 4.375                                       | 0.995 |
| WBC600 | 11.335                                        | 0.024                       | 0.973 | 14.213                                        | 0.002                                                            | 0.989 | 0.843                                                              | 1.082                                       | 0.983 |
| WAC600 | 28.491                                        | 0.054                       | 0.941 | 33.910                                        | 0.002                                                            | 0.995 | 1.577                                                              | 11.607                                      | 0.974 |
| WBC700 | 11.599                                        | 0.030                       | 0.916 | 14.745                                        | 0.002                                                            | 0.969 | 0.811                                                              | 2.193                                       | 0.998 |
| WAC700 | 37.263                                        | 0.078                       | 0.975 | 40.866                                        | 0.003                                                            | 1.000 | 1.499                                                              | 21.563                                      | 0.844 |
| WBC800 | 18.713                                        | 0.042                       | 0.980 | 21.758                                        | 0.002                                                            | 0.999 | 1.152                                                              | 5.857                                       | 0.906 |
| WAC800 | 39.377                                        | 0.199                       | 0.999 | 40.096                                        | 0.021                                                            | 1.000 | 0.420                                                              | 35.207                                      | 0.520 |

表 3 样品 WBC 和 WAC 吸附 RhB 的动力学参数

Tab. 3 The parameters of kinetic to removing RhB on WBC and WAC

| Sample | Pseudo-first order                            |                             |       | Pseudo-second order                           |                                                                  |       | Intraparticle-diffusion                                            |                                             |       |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|
|        | $q_e/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $k_1/$<br>$\text{min}^{-1}$ | $R^2$ | $q_e/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1})$<br>$\cdot \text{min}^{-1}$ | $R^2$ | $k_p/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$<br>$\cdot \text{min}^{-0.5}$ | $C/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $R^2$ |
| WBC500 | 4.010                                         | 0.038                       | 0.924 | 4.992                                         | 0.041                                                            | 0.984 | 0.261                                                              | 1.092                                       | 0.996 |
| WAC500 | 13.545                                        | 0.050                       | 0.941 | 16.210                                        | 0.022                                                            | 0.995 | 0.776                                                              | 5.167                                       | 0.975 |
| WBC600 | 5.765                                         | 0.062                       | 0.957 | 6.768                                         | 0.059                                                            | 0.996 | 0.296                                                              | 2.640                                       | 0.948 |
| WAC600 | 17.745                                        | 0.088                       | 0.978 | 19.354                                        | 0.107                                                            | 1.000 | 0.652                                                              | 10.999                                      | 0.835 |
| WBC700 | 9.511                                         | 0.120                       | 0.992 | 9.974                                         | 0.254                                                            | 1.000 | 0.237                                                              | 7.100                                       | 0.689 |
| WAC700 | 18.173                                        | 0.085                       | 0.985 | 19.558                                        | 0.087                                                            | 1.000 | 0.664                                                              | 11.229                                      | 0.779 |
| WBC800 | 9.697                                         | 0.155                       | 0.998 | 9.919                                         | 0.253                                                            | 1.000 | 0.155                                                              | 8.119                                       | 0.512 |
| WAC800 | 18.901                                        | 0.211                       | 1.000 | 19.084                                        | 0.219                                                            | 1.000 | 0.156                                                              | 17.314                                      | 0.353 |

表 4 样品 WBC 和 WAC 吸附 TC 的动力学参数

Tab. 4 The parameters of kinetic to removing TC on WBC and WAC

| Sample | Pseudo-first order                            |                             |       | Pseudo-second order                           |                                                                  |       | Intraparticle-diffusion                                            |                                             |       |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|
|        | $q_e/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $k_1/$<br>$\text{min}^{-1}$ | $R^2$ | $q_e/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1})$<br>$\cdot \text{min}^{-1}$ | $R^2$ | $k_p/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$<br>$\cdot \text{min}^{-0.5}$ | $C/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | $R^2$ |
| WBC500 | 4.544                                         | 0.073                       | 0.950 | 5.344                                         | 0.013                                                            | 0.996 | 0.221                                                              | 2.322                                       | 0.952 |
| WAC500 | 5.391                                         | 0.123                       | 0.955 | 6.122                                         | 0.018                                                            | 0.993 | 0.173                                                              | 3.728                                       | 0.919 |
| WBC600 | 7.984                                         | 0.055                       | 0.951 | 9.582                                         | 0.006                                                            | 0.996 | 0.455                                                              | 3.253                                       | 0.951 |
| WAC600 | 8.328                                         | 0.082                       | 0.949 | 9.599                                         | 0.009                                                            | 0.998 | 0.370                                                              | 4.638                                       | 0.939 |
| WBC700 | 17.242                                        | 0.059                       | 0.984 | 19.040                                        | 0.005                                                            | 0.998 | 0.873                                                              | 8.047                                       | 0.798 |
| WAC700 | 25.855                                        | 0.047                       | 0.948 | 31.095                                        | 0.002                                                            | 0.996 | 1.549                                                              | 9.414                                       | 0.958 |
| WBC800 | 18.403                                        | 0.074                       | 0.989 | 19.873                                        | 0.006                                                            | 0.999 | 0.779                                                              | 10.330                                      | 0.741 |
| WAC800 | 33.488                                        | 0.041                       | 0.983 | 38.685                                        | 0.001                                                            | 0.998 | 2.097                                                              | 10.618                                      | 0.866 |

表 5 艾草生物炭的吸附性能和部分吸附指标与相关文献比较

Tab. 5 The comparison of adsorption performance and relevant parameters of this work with relevant literatures

| 吸附剂                 | $S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ | Pore volume/<br>$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ | $q_e(\text{mg}/\text{g})$ |       |        | Dosage/<br>$(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ | Concentration/<br>$(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | Contact time                           | Ref. |
|---------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|-------|--------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|------|
|                     |                                                   |                                                     | MO                        | RhB   | TC     |                                             |                                                     |                                        |      |
| 牧豆树生物炭<br>(HCl 活化)  | 352                                               | 0.18                                                | 12.8                      | 10.0  |        | 1.0                                         | 100                                                 | 60 min                                 | [25] |
| 牧豆树生物炭<br>(NaOH 活化) | 352                                               | 0.18                                                | 10.5                      | 8.7   |        | 1.0                                         | 100                                                 | 60 min                                 |      |
| 固废生物炭               | 7.703                                             | 0.002                                               |                           |       | 25.98  | 2.0                                         | 20                                                  | 12 h                                   | [26] |
| 稻草生物炭               | 21.69                                             | 0.054                                               |                           |       | 14.185 | 3.0                                         | 100                                                 | 60 min                                 | [27] |
| 黑木耳生物炭              | 46.56                                             |                                                     |                           |       | 11.9   | 1.4                                         | 10                                                  | 4 h                                    | [28] |
| 娑罗双树叶生物炭            | 1.50                                              |                                                     |                           | 23.39 |        | 0.7                                         | 17.5                                                | 60 min                                 | [29] |
| 稻壳生物炭               | 115.59                                            |                                                     | 31.63                     |       |        | 0.2                                         | 50                                                  | 240 min                                | [30] |
| 艾草渣生物炭              | 667                                               | 0.121                                               | 40.1                      | 19.1  | 38.7   | 1.0                                         | 20                                                  | 30 min (MO, RhB), This<br>120 min (TC) | work |

3 结论

本文以艾草精油提取废渣为原料,经不同碳化热解分别制得生物炭材料 WBC 及磷酸活化改性生物炭材料 WAC。分析表征结果表明,磷酸处理显著提升了比表面积和孔容积,且两者随碳化温度升高而逐渐增大。其中,样品 WAC800 对 MO、RhB、TC 的吸附容量最优,其动力学过程均遵循准二级模型,证实化学吸附为吸附主导机制。该工作为废弃艾草渣的高值化利用及水体有机微污染物的绿色高效去除提供了新的思路和可行路径。

参 考 文 献

[1] NGUYEN D T C, JALIL A A, NGUYEN L M, et al. A comprehensive review on the adsorption of dyes onto activated carbons derived from harmful invasive plants[J]. Environmental Research, 2025, 279(2): 121807.

[2] 顾杰, 李双硕, 崔天伊, 等. 生物质炭掺杂 BiOBr 的制备及其光催化性能研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 68-75.

[3] SRIRAM G, DHANABALAN K, VISHWANATH R S, et al. Progress in porous carbon-based adsorbents for the removal of dyes from single and binary systems and their adsorption mechanism-a review[J/OL]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2025, [2025-08-11]. <https://doi.org/10.1039/D5QI00952A>.

[4] NAKRO V, LOTHA T N, AO K, et al. Recent advances in applications of animal biowaste-based activated carbon as biosorbents of water pollutants; a mini-review[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2024, 196(10): 974.

[5] RANA P, SONI V, SHARMA S, et al. Harnessing nitrogen doped magnetic biochar for efficient antibiotic adsorption and degradation [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2025, 148: 174-195.

[6] FU T, DU L N, WU S Q, et al. Synthesis and application of wetland plant-based functional materials for aqueous antibiotics removal [J]. Science of The Total Environment, 2024, 908: 168214.

[7] AMALINA F, RAZAK A S A, KRISHNAN S, et al. The effects of chemical modification on adsorbent performance on water and wastewater treatment-a review[J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 20: 101259.

[8] ZHAO Y J, LIU X T, LI W H, et al. One-step synthesis of garlic peel derived biochar by concentrated sulfuric acid: enhanced adsorption capacities for Enrofloxacin and interfacial interaction mechanisms[J]. Chemosphere, 2022, 290: 133263.

[9] CAI F M, LI C J, YANG C H, et al. Preparation of nitrogen-doped bagasse-derived biochar with outstanding methylene blue adsorption performance[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 224: 120415.

[10] SARANYA N, KARISHMA S K, HEMAPRIYA M, et al. Fabricating a biochar from Artocarpus heterophyllus peels for methylene blue sequestration from synthetic wastewater: isotherm, kinetic, and thermodynamic analysis[J]. Journal of Dispersion Science and

- Technology, 2025, 46(4): 628-638.
- [11] Preedy V R. Essential oils in food preservation, flavor and safety[M]//Judžientienė A. Wormwood (*Artemisia absinthium* L.) oils. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [12] NGUYEN H T, NÉMETH Z É. Sources of variability of wormwood (*Artemisia absinthium* L.) essential oil[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2016, 3(4): 143-150.
- [13] TARIQ K A, CHISHTI M Z, AHMAD F, et al. Anthelmintic activity of extracts of *Artemisia absinthium* against ovine nematodes[J]. Veterinary Parasitology, 2009, 160(1-2): 83-88.
- [14] DAO M U, LE H S, HOANG H Y, et al. Natural core-shell structure activated carbon beads derived from *Litsea glutinosa* seeds for removal of methylene blue: facile preparation, characterization, and adsorption properties[J]. Environmental Research, 2021, 198: 110481.
- [15] WANG H, YANG N C, QIU M Q. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by biochar-clay derived from clay and peanut shell[J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 35(3): 301-308.
- [16] HOSLETT J, GHAZAL H, KATSOU E, et al. The removal of tetracycline from water using biochar produced from agricultural discarded material[J]. Science of The Total Environment, 2021, 751: 141755.
- [17] YUAN Z H, XU Z H, ZHANG D F, et al. Mesoporous activated carbons synthesized by pyrolysis of waste polyester textiles mixed with Mg-containing compounds and their Cr(VI) adsorption[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 549: 86-93.
- [18] GUO W, HUO S L, FENG J L, et al. Adsorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on corn straw-derived biochar prepared at different pyrolytic temperatures[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 78: 265-271.
- [19] IBERAHIM N, SETHUPATHI S, BASHIR M J K, et al. Evaluation of oil palm fiber biochar and activated biochar for sulphur dioxide adsorption[J]. Science of The Total Environment, 2022, 805: 150421.
- [20] ZHANG X Y, MIAO X D, XIANG W, et al. Ball milling biochar with ammonia hydroxide or hydrogen peroxide enhances its adsorption of phenyl volatile organic compounds (VOCs)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123540.
- [21] WU F F, CHEN L, HU P, et al. Industrial alkali lignin-derived biochar as highly efficient and low-cost adsorption material for Pb(II) from aquatic environment[J]. Bioresource Technology, 2021, 322: 124539.
- [22] GÜZEL F, SAYGILI H, AKKAYA SAYGILI G, et al. Optimal oxidation with nitric acid of biochar derived from pyrolysis of weeds and its application in removal of hazardous dye methylene blue from aqueous solution[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 260-265.
- [23] AHMAD M, LEE S S, DOU X M, et al. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water[J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 536-544.
- [24] JIANG S B, YU T F, XIA R, et al. Realization of super high adsorption capability of 2D  $\delta$ -MnO<sub>2</sub>/GO through intra-particle diffusion[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 232: 374-381.
- [25] VALLABHA M S, NAGARAJ P C, MALLIKARJUNAPPA A K K. Competitive and cooperative adsorption analysis for dye removal from multicomponent system using *Prosopis juliflora* activated carbon[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 90362-90382.
- [26] BORTHAKUR P, ARYAFARD M, ZARA Z, et al. Computational and experimental assessment of pH and specific ions on the solute solvent interactions of clay-biochar composites towards tetracycline adsorption: implications on wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283: 111989.
- [27] WANG H, FANG C R, WANG Q, et al. Sorption of tetracycline on biochar derived from rice straw and swine manure[J]. RSC Advances, 2018, 8: 16260-16268.
- [28] ZHAO J W, DAI Y J. Tetracycline adsorption mechanisms by NaOH-modified biochar derived from waste *Auricularia auricula* dregs[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(6): 9142-9152.
- [29] SHAIKH W A, ISLAM R U, CHAKRABORTY S. Stable silver nanoparticle doped mesoporous biochar-based nanocomposite for efficient removal of toxic dyes[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(1): 104982.
- [30] LOC N X, TUYEN P T T, MAI L C, et al. Chitosan-modified biochar and unmodified biochar for methyl orange: adsorption characteristics and mechanism exploration[J]. Toxics, 2022, 10(9): 500.

(责任编辑:蒲锡鹏)