

微生物预处理与微波热解强化竹炭 吸附CO₂性能研究

庄鑫恒, 邵音子, 张世盛, 陶育壮, 蒋仔涵, 陈昱璇, 黄雅玲, 曹澄澄

徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

为提高竹炭(BC)对CO₂的吸附性能, 本研究采用厌氧微生物对其进行预处理, 而后使用微波进行二次热解获得改性生物炭(WBC), 考察了改性生物炭对CO₂的吸附性能。结果发现, 微生物处理会因代谢产物的堵塞导致生物炭比表面积下降, 相较于BC (182.35 m²/g), 处理1周(WBC-1)与2周(WBC-2)的改性生物炭比表面积分别降至76.88 m²/g和65.50 m²/g。微生物与微波处理后的生物炭对CO₂的吸附容量较原始生物炭有所增加, 可由44.78 mg/g提高至48.80 mg/g (WBC-1)。通过动力学分析发现, 伪二级动力学模型相比伪一级模型能够更好地描述生物炭对CO₂的吸附作用, 表明生物炭对CO₂的吸附过程并非单一的物理吸附, 还可能存在化学吸附。另外, 生物炭对CO₂的吸附行为更符合Langmuir模型, 结果显示生物炭对CO₂的吸附以单分子层吸附为主。

关键词

生物炭, 微生物, 微波, 吸附, CO₂

Enhancing CO₂ Adsorption Performance of Bamboo Biochar via Microbial Pretreatment Combined with Microwave Pyrolysis

Xinheng Zhuang, Yinzi Shao, Shisheng Zhang, Yuzhuang Tao, Zihan Jiang, Yuxuan Chen,
Yaling Huang, Chengcheng Cao

School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: January 27, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 6, 2026

文章引用: 庄鑫恒, 邵音子, 张世盛, 陶育壮, 蒋仔涵, 陈昱璇, 黄雅玲, 曹澄澄. 微生物预处理与微波热解强化竹炭吸附 CO₂ 性能研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(3): 304-311. DOI: 10.12677/aep.2026.163031

Abstract

To improve the CO₂ adsorption performance of bamboo biochar (BC), this study adopted anaerobic microorganisms for pretreatment, followed by microwave-assisted secondary pyrolysis to prepare modified biochar (WBC). The CO₂ adsorption properties of the modified biochar were systematically investigated. Results showed that microbial treatment led to a decrease in the specific surface area of biochar due to pore clogging by metabolic products. Compared with pristine BC (182.35 m²/g), the specific surface areas of WBC treated for 1 week (WBC-1) and 2 weeks (WBC-2) reduced to 76.88 m²/g and 65.50 m²/g, respectively. Nevertheless, the CO₂ adsorption capacity of biochar modified by microbial pretreatment and microwave pyrolysis was higher than that of raw BC, increasing from 44.78 mg/g to 48.80 mg/g (WBC-1). Kinetic analysis indicated that the pseudo-second-order kinetic model fitted the adsorption process better than the pseudo-first-order model, suggesting that the CO₂ adsorption on biochar involves not only physical adsorption but also chemical adsorption. Additionally, the adsorption behavior of CO₂ on biochar was more consistent with the Langmuir model, indicating that the adsorption is dominated by monolayer adsorption.

Keywords

Biochar, Microorganism, Microwave, Adsorption, CO₂

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业化和城市化进程的不断推进,大气中二氧化碳(CO₂)浓度持续升高所引发的温室效应与全球气候变暖已成为严峻的全球性问题。全球变暖对自然生态和人类社会可持续发展构成了严重威胁[1]。因此,发展高效、低成本的 CO₂ 捕集与封存技术迫在眉睫。在众多碳捕集技术中,燃烧后吸附法因其技术成熟、改造成本低且操作方便而被视为最具应用潜力的方案之一[2]。

目前,用于 CO₂ 的吸附材料主要有沸石分子筛、金属有机框架和活性炭等多孔物质。除此之外,生物炭因其来源广泛、成本低廉、孔隙较发达等优势,逐步成为吸附领域的研究热点。然而,热解获得的生物炭其孔结构还未能达到直接应用的水平,因此还需要通过改性进一步优化其孔结构。物理和化学技术是常用的改性生物炭的有效方法,可显著提升其吸附性能[3][4]。此外,生物法作为一种新兴的绿色技术,能够利用微生物或其代谢产物对生物炭进行改性,正受到越来越多的关注。Zhang 等[5]通过黑曲霉对藜麦壳进行微生物固态发酵预处理,制备菌丝体复合生物炭材料(BQH-AN),并系统评估了该生物炭对罗丹明 B 的吸附性能。结果表明,改性后生物炭的比表面积从 2641.31 m²/g 提升至 3547.47 m²/g,对罗丹明 B 的最大吸附容量也从 1134.78 mg/g 提高至 1450.79 mg/g。这些变化归因于真菌分泌的酶类降解了木质纤维结构,在热解过程中增强了孔隙发育,同时菌丝热解引入的氮元素(如吡啶氮、吡咯氮)提供了更多吸附活性位点。而厌氧微生物则能够产生有机酸、H₂S 等代谢产物腐蚀生物炭表面,对其进行改性[6]。随着微生物及其代谢产物的积累,生物炭中的介孔结构可进一步向微孔发展,微生物在生长代谢过程中会消耗原料中的部分 N、S 元素用于合成自身蛋白质等物质,从而降低了这些元素在生物炭中的残留,进而改变生物炭的表面化学性质[7]。

微波热解作为一种高效、节能的热处理方式,能在短时间内实现生物质的快速升温与热解,有利于生物炭形成丰富的孔隙结构[8]。微波加热还可促使碳骨架中 C-C 键和 C-O 键断裂,形成更多石墨层缺陷和活性位点[9]。Ren 等[10]研究微波热解污泥时发现,所得样品的含氧官能团可达到 57.29%,但过高的制备温度会使含氧官能团数量下降。将微生物预处理与微波二次热解相结合,能够进一步优化生物炭的表面化学性质,从而提升其 CO₂ 吸附性能。

基于以上背景,本研究利用微生物对竹子生物炭进行处理,而后进行微波二次热解获得改性生物炭。一方面评价浸渍时间对生物炭的比表面积、孔径分布、表面官能团和石墨化程度等因素的影响,另一方面研究这些因素对生物炭吸附 CO₂ 性能的影响。本研究为开发高性能 CO₂ 吸附材料提供了新策略。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料

将竹子置于马弗炉,在 600℃ 热解 3 h 制得竹子生物炭,经研磨后过筛获得 16~60 目的竹炭(BC),备用。高纯 CO₂ 由徐州特种气体厂提供。

2.2. 微生物浸渍生物炭

分别称取 9 g 竹炭,用 80 目尼龙纱网包裹,制成竹炭包并投入含有厌氧活性污泥的发酵桶中进行生物处理。一周与二周后分别取出竹炭包,干燥后置于微波炉中,在 400℃,600 W 条件下进行微波热解 3 min。所得生物炭根据处理时长分别命名为 WBC-1 和 WBC-2。

2.3. 表征测试

将样品在 150℃ 下真空脱气 2 h,使用比表面积分析仪(北京彼奥德, Kubo-X1000)测试 N₂ 吸附-脱附等温线,基于 Brunauer-Emmett-Teller 理论与密度泛函理论计算生物炭的比表面积和孔径分布。通过傅里叶变换红外光谱仪(赛默飞, IS10)以 KBr 压片法来测试样品的表面官能团。采用 514 nm 激光二极管(XpoRA, Horiba, 日本)的拉曼显微镜对生物炭的无序结构进行了分析,用 WiRE 拉曼软件(3.2 版)对 500~2000 cm⁻¹ 范围内的拉曼光谱进行了曲线拟合。采用元素分析仪(Elementar Vario EL cube, 德国)测定生物炭中的碳、氢、氮和硫的含量。

2.4. CO₂ 吸附实验

CO₂ 吸附实验通过热重分析仪(TGA, 梅特勒托利多, TGA/DSC 3+)测定。测试时称取约 10 mg 样品置于氧化铝坩埚并移入 TGA,在 120℃ 加热 30 min 以去除样品中水分等杂质,待温度降至 25℃ 后,通入 50 mL/min 高纯 CO₂,维持 30 min 完成吸附,通过 TGA 记录样品质量变化,质量增加部分即为吸附的 CO₂ 量,每组样品均进行三次平行实验,结果取平均值以保障数据的可靠性。采用静态吸附法,利用比表面积分析仪测试生物炭在 0℃ 对 CO₂ 的吸附量[11]。

3. 结果与讨论

3.1. 生物炭表征分析

生物炭的孔结构参数如表 1 所示,原竹炭 BC 的比表面积为 182.35 m²/g,总孔体积和微孔体积分别为 0.128 cm³/g 和 0.085 cm³/g。对生物炭进行微生物处理之后,WBC-1 和 WBC-2 的比表面积均显著减小,分别是 76.88 m²/g 和 65.50 m²/g,总孔体积相应减少至 0.069 cm³/g 和 0.085 cm³/g,微孔体积也分别

降至 $0.036 \text{ cm}^3/\text{g}$ 和 $0.030 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。其原因可能是微生物的代谢产物堵塞了生物炭的孔隙，导致其孔隙减少[6]。此外，微波的体相加热使生物炭由内而外快速升温，过高的温度可能会导致生物炭内部结构坍塌，从而破坏了其孔隙结构[12]。

孔径分布如图 1(a)所示，随着处理时间的延长生物炭中较大的孔径有所减小，这可能是由于微生物及其代谢产物在生物炭孔隙结构中积累所致。与原始生物炭 BC 相比，WBC-1 和 WBC-2 的平均孔径逐渐增大，由 1.41 nm 分别增大至 1.81 nm 和 2.61 nm ，这可能与微生物的代谢物质腐蚀扩孔和微波二次热解有关[13]。元素分析表明，微生物处理并进行二次热解后，生物炭的 N、S 和 H 元素含量普遍减小，而 C 元素含量均有所增加。这可能与微生物在生长代谢过程中会消耗原料中的部分 N、S 等元素用于合成自身蛋白质等物质有关[7]。

Table 1. Pore structure parameters of biochar
表 1. 生物炭孔结构参数

样品	比表面积(m^2/g)	总孔体积(cm^3/g)	微孔体积(cm^3/g)	平均孔半径(nm)	N%	C%	H%	S%
BC	182.35	0.128	0.085	1.41	1.2	80.79	1.85	0.80
WBC-1	76.88	0.069	0.036	1.81	1.04	90.20	1.37	0.24
WBC-2	65.50	0.085	0.030	2.61	1.06	90.19	1.53	0.18

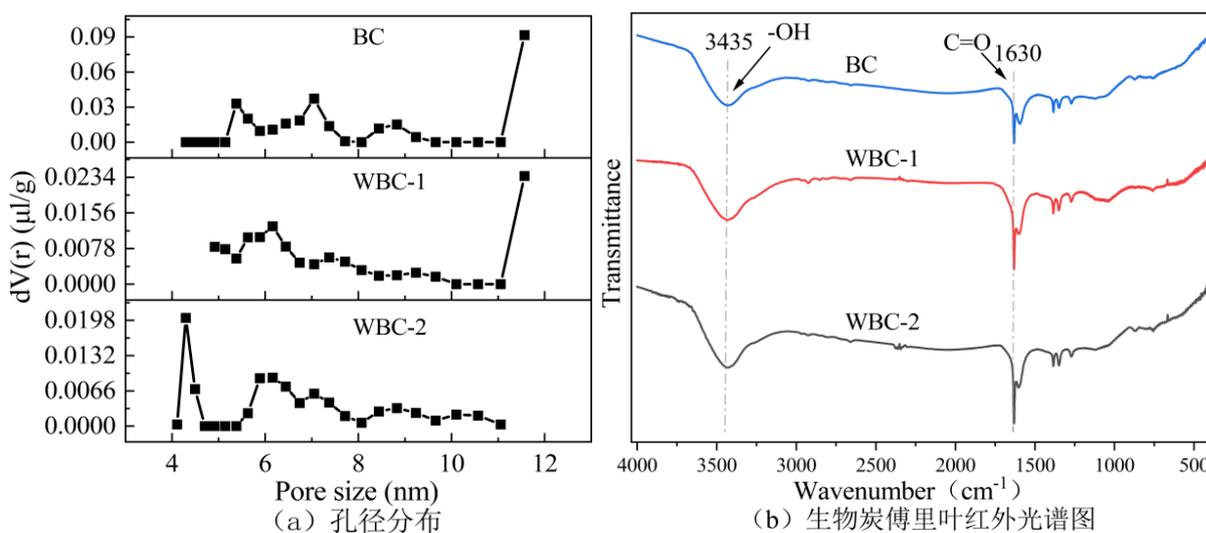


Figure 1. Pore size distribution (a) and Fourier transform infrared spectroscopy (b) of biochar
图 1. 生物炭的孔径分布(a); 生物炭傅里叶红外光谱(b)

生物炭的傅里叶变换红外光谱如图 1(b)所示，所有生物炭在 3435 cm^{-1} 和 1630 cm^{-1} 都有明显的特征峰，可分别对应于 O-H 和 C=O 官能团[14][15]。改性生物炭与原始生物炭相比，其特征峰强度略有增加但波数无明显变化，可推测改性后生物炭基本特征得以保留，表面官能团略有增多。

图 2 为生物炭的拉曼光谱，各生物炭在 $1344\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ 与 $1601\sim 1605 \text{ cm}^{-1}$ 两处均出现特征峰，分别属于无序结构 D 峰及石墨化 G 峰。 A_D/A_G 峰面积比是评价碳材料结构有序性的重要参数，该比值增大意味着缺陷位点增多，而比值减小则表现石墨化程度的提升[16]。原始竹炭的 A_D/A_G 为 3.15，WBC-1 和 WBC-2 的 A_D/A_G 有所提高，分别为 3.30 和 3.45，可推测经过微生物处理后的生物炭的无序化程度有所增加。

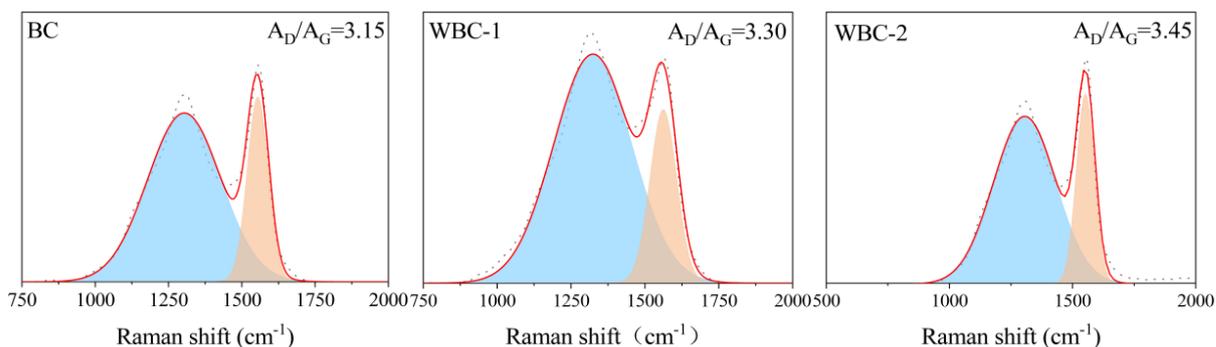


Figure 2. Raman spectroscopy of biochar

图 2. 生物炭拉曼光谱

3.2. CO₂ 吸附

如图 3 所示, 生物炭对 CO₂ 的吸附量可达 58.90 mg/g, 且随着温度升高吸附量呈现下降趋势, 可推测生物炭对 CO₂ 的吸附是放热反应[17] [18]。在 25℃, BC 对 CO₂ 的吸附量为 44.78 mg/g, 而 WBC-1 和 WBC-2 的 CO₂ 吸附量分别是 48.80 mg/g 和 48.73 mg/g, 表明改性后生物炭对 CO₂ 吸附性能有所提高。孔结构对吸附有着重要影响, 虽然 WBC-1 和 WBC-2 的比表面积和微孔体积均低于 BC, 但是其孔径均高于 BC, 孔径的增大可以降低 CO₂ 在生物炭孔道中传质的阻力, 可加快对 CO₂ 的吸附。除孔结构外, 生物炭表面化学性质也是影响吸附的重要因素, 改性生物炭吸附能力的提升可能与其表面化学性质得到提升有关。

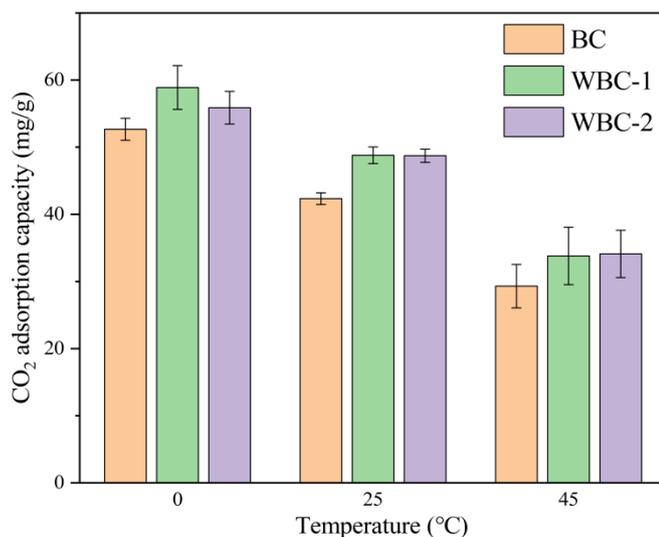


Figure 3. The adsorption capacity of CO₂ on biochar at various temperatures

图 3. 不同温度下生物炭对 CO₂ 的吸附容量

3.3. 吸附动力学

采用伪一级和伪二级动力学模型拟合生物炭吸附 CO₂ 过程, 结果如表 2 和图 4 所示。生物炭对 CO₂ 吸附过程的伪一级动力学拟合 R² 分别是 0.912 (BC)、0.946 (WBC-1)和 0.945 (WBC-2), 普遍低于伪二级动力学的拟合结果, R² 分别是 0.924 (BC)、0.960 (WBC-1)和 0.967 (WBC-2), 可推测这三种生物炭对 CO₂ 的吸附除了物理吸附外还有化学吸附。

Table 2. Kinetic parameters of CO₂ adsorption by biochar at 25°C
表 2. 生物炭在 25°C 对 CO₂ 的吸附动力学参数

生物炭	伪一级动力学			伪二级动力学			实验吸附量 (mg/g)
	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$			$q_t = \frac{tk_2 q_e^2}{1 + tk_2 q_e}$			
	q_e (mg/g)	k_1 (1/min)	R ²	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg·min)	R ²	
BC	43.15	0.888	0.912	45.27	0.036	0.924	44.78
WBC-1	49.03	0.531	0.946	52.78	0.016	0.960	48.80
WBC-2	49.52	0.418	0.945	54.29	0.011	0.967	48.73

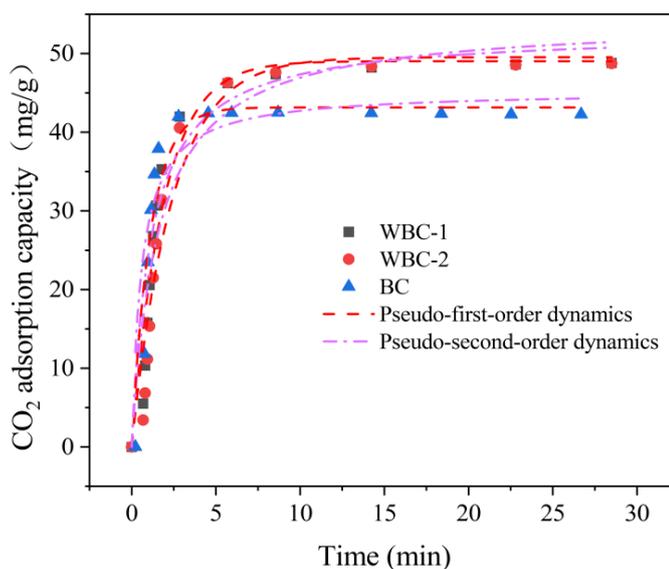


Figure 4. Adsorption kinetics of CO₂ by biochar at 25°C
图 4. 在 25°C 下生物炭对 CO₂ 的吸附动力学曲线

3.4. 吸附等温线

通过 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合生物炭对 CO₂ 的吸附等温线, 结果如表 3 和图 5 所示。生物炭对 CO₂ 吸附过程 Langmuir 模型拟合 R² 分别是 0.993 (WBC-1)、0.985 (WBC-2)和 0.993 (BC), 普遍高于 Freundlich 模型的 R², 分别是 0.988 (WBC-1)、0.964 (WBC-2)和 0.987 (BC), 可推测生物炭对 CO₂ 的吸附倾向于单分子层吸附。

Table 3. Adsorption isotherm parameters of CO₂ on biochar at 0°C
表 3. 生物炭在 0°C 对 CO₂ 的吸附等温线参数

Biochar	Langmuir			Freundlich		
	$q_e = (bq^0 C_e) / (1 + bC_e)$			$q_e = k_f C_e^{1/n}$		
	q^0 (mg/g)	b (L/mg)	R ²	n	$k_f [(mg/g) \cdot (L/mg)^{1/n}]$	R ²
BC	68.19	0.049	0.993	2.43	9.14	0.987
WBC-1	70.81	0.041	0.993	2.40	8.82	0.988
WBC-2	64.42	0.047	0.985	2.58	9.37	0.964

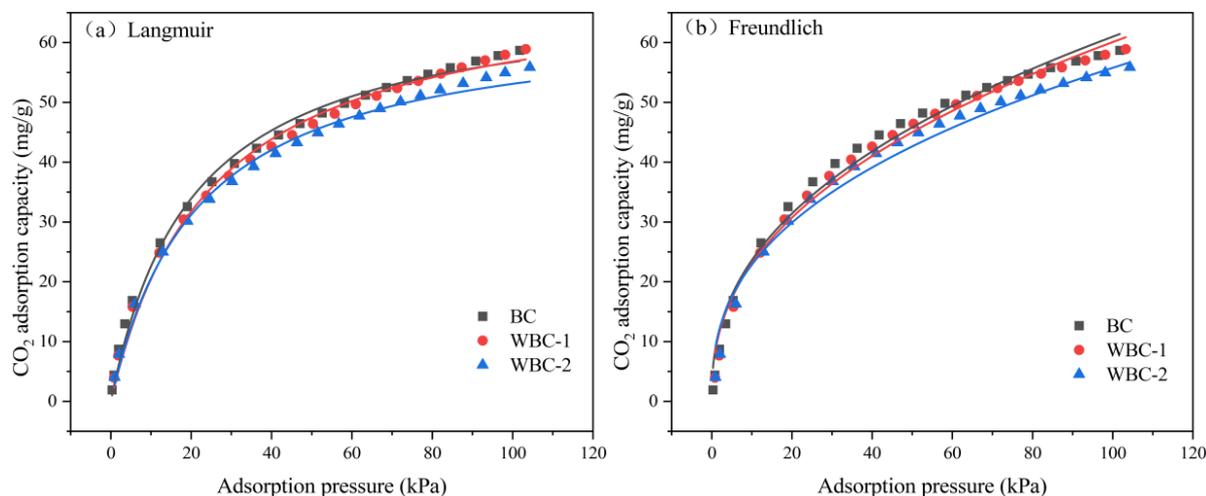


Figure 5. Adsorption isotherm of CO₂ on biochar at 0°C, (a) Langmuir model; (b) Freundlich model

图 5. 生物炭在 0°C 对 CO₂ 的吸附等温线, (a) Langmuir 模型; (b) Freundlich 模型

4. 结论

本研究利用厌氧微生物对竹炭进行处理, 而后通过微波辐照获得了改性生物炭, 考察了改性生物炭对 CO₂ 的吸附性能。结果显示, 尽管改性后生物炭比表面积和总孔容积均有所下降, 但平均孔径和表面官能团有所提高, 从而提升了对 CO₂ 的吸附性能。在 25°C, WBC-1 对 CO₂ 的吸附量最高, 达到 48.80 mg/g, 较未处理的原始生物炭 BC (44.78 mg/g) 提升了约 8.98%。吸附动力学和等温线拟合结果, 结果显示该吸附过程存在化学吸附作用, CO₂ 在生物炭表面以单分子层吸附为主。

基金项目

江苏省大学生创新创业训练计划项目(xcx2025069)。

参考文献

- [1] Li, M. and Wang, R. (2025) Integrated Technology of CO₂ Adsorption and Catalysis. *Catalysts*, **15**, Article 745. <https://doi.org/10.3390/catal15080745>
- [2] Raganati, F. and Ammendola, P. (2024) CO₂ Post-Combustion Capture: A Critical Review of Current Technologies and Future Directions. *Energy & Fuels*, **38**, 13858-13905. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02513>
- [3] Amer, N.M., Lahijani, P., Mohammadi, M. and Mohamed, A.R. (2024) Modification of Biomass-Derived Biochar: A Practical Approach Towards Development of Sustainable CO₂ Adsorbent. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, 7401-7448. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02905-3>
- [4] Panwar, N.L. and Pawar, A. (2022) Influence of Activation Conditions on the Physicochemical Properties of Activated Biochar: A Review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **12**, 925-947. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00870-3>
- [5] Zhang, B., Li, R., Zheng, Y., Chen, S., Su, Y., Zhou, W., et al. (2024) Biochar Composite with Enhanced Performance Prepared through Microbial Modification for Water Pollutant Removal. *International Journal of Molecular Sciences*, **25**, Article 11732. <https://doi.org/10.3390/ijms252111732>
- [6] 邱丽娜, 张玮玮, 弓爱君, 等. 腐蚀微生物种类及腐蚀机理研究进展[J]. 工程科学学报, 2023, 45(6): 927-940.
- [7] Matyasik, I., Brzeszcz, J., Labus, M., Kania, M., Mroczkowska-Szerszeń, M. and Dudek, L. (2025) The Effect of Microbiological Pretreatment on Pyrolysis Process of Sunflower Husk. *Journal of Environmental Management*, **379**, Article 124861. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124861>
- [8] Zhang, Y., Qu, M., Zhang, K., Liu, W., Wang, J., Ren, L., et al. (2025) Effect Mechanisms of Microwave on CO₂ Adsorption with Cellulosic and Non-Cellulosic Biochar. *Separation and Purification Technology*, **373**, Article 133610. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133610>

- [9] Wan, Z. and Li, K. (2018) Effect of Pre-Pyrolysis Mode on Simultaneous Introduction of Nitrogen/Oxygen-Containing Functional Groups into the Structure of Bagasse-Based Mesoporous Carbon and Its Influence on Cu(II) Adsorption. *Chemosphere*, **194**, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.181>
- [10] Ren, L., Zhang, K., Zhang, Y., Wang, F., Yang, F. and Cheng, F. (2023) Mechanism of Gas Production under Microwave/conventional Pyrolysis of Sewage Sludge: Mechanism of Microwave Energy Action on Oxygen-Containing Functional Groups. *Chemical Engineering Journal*, **464**, Article 142511. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142511>
- [11] Cao, C., Li, R., Dai, H., Zhao, Y., Sun, L., Zhuang, X., *et al.* (2025) Anaerobic Digestion Enhances the Comprehensive Utilization of Shaddock Peel: Methane Production, Biochar Preparation, and CO₂ Capture. *Water, Air, & Soil Pollution*, **236**, Article No. 540. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08169-7>
- [12] Robinson, J., Binner, E., Vallejo, D.B., Perez, N.D., Al Mughairi, K., Ryan, J., *et al.* (2022) Unravelling the Mechanisms of Microwave Pyrolysis of Biomass. *Chemical Engineering Journal*, **430**, Article 132975. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132975>
- [13] 黄焯, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1699-1713.
- [14] Pan, Z., Qi, G., Zhang, X., Dai, H., Xiang, W., Zhao, Y., *et al.* (2025) Biological Pretreatment through Anaerobic Digestion for Micro-Mesoporous Biochar Production: Characterization and Environmental Remediation Application. *Biore-source Technology Reports*, **29**, Article 102062. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102062>
- [15] 邵音子, 庄鑫恒, 费希同, 等. 玉米秸秆生物炭掺杂 Pebax 1657 混合基质膜分离 CO₂ 性能[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 329-337.
- [16] Cao, W., Xu, H., Zhang, X., Xiang, W., Qi, G., Wan, L., *et al.* (2023) Novel Post-Treatment of Ultrasound Assisting with Acid Washing Enhance Lignin-Based Biochar for CO₂ Capture: Adsorption Performance and Mechanism. *Chemical Engineering Journal*, **471**, Article 144523. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144523>
- [17] 张学杨, 徐浩亮, 戴欢涛, 等. 微波辐照木质素浸渍生物炭吸附 CO₂ 性能[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4427-4436.
- [18] Zhang, X., Cao, L., Xiang, W., Xu, Y. and Gao, B. (2022) Preparation and Evaluation of Fine-Tuned Micropore Biochar by Lignin Impregnation for CO₂ and VOCs Adsorption. *Separation and Purification Technology*, **295**, Article 121295. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121295>