

玉米芯生物炭吸附亚甲基蓝的特性研究

王雨蝶¹, 廖东铭¹, 许春雨¹, 王彤彤¹, 鞠祯郅¹, 王玺尧¹, 宋紫萱¹, 谭珍珍^{1,2*}

1. 徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州 221018

2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221018

DOI: 10.61369/SSSD.2026070037

摘 要 : 以玉米芯为原料, 在300、450、600℃下制备玉米芯生物炭 (YM300、YM450、YM600)。采用孔径与比表面积分析仪、SEM对玉米芯生物炭进行表征, 研究生物炭材料吸附水体中亚甲基蓝的特性。结果表明, 随热解温度升高, 玉米芯原始生物炭的比表面积与孔容积会随之增大, 对应的最可几直径则呈现出缩小的变化趋势。准二级动力学方程 ($R^2>0.9926$) 和 Freundlich 等温模型 ($R^2>0.9554$) 更适合描述生物炭对 MB 的吸附, 生物炭对 MB 的吸附容量顺序为 q_{YM450} (67.50 mg/g) > q_{YM300} (66.21 mg/g) > q_{YM600} (44.22 mg/g)。

关 键 词 : 生物炭; 染料; 亚甲基蓝; 吸附; 玉米芯

Study on Adsorption Characteristics of Methylene Blue from Corn Cob Biochar

Wang Yudie¹, Liao Dongming¹, Xu Chunyu¹, Wang Tongtong¹, Ju Zhenzhi¹, Wang Xiyao¹, Song Zixuan¹, Tan Zhenzhen^{1,2*}

1. College of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018

2. Jiangsu Key Laboratory of Industrial Pollution Control and Resource Reuse, Xuzhou, Jiangsu 221018

Abstract : Corn cob was employed as the raw material for the preparation of corn cob biochar (YM300, YM450, YM600) at temperatures of 300, 450, and 600° C. The corn cob biochar was characterized using a pore size and specific surface area analyzer, scanning electron microscopy (SEM). The adsorption characteristics of methylene blue (MB) in aqueous solution on biochar were investigated. The results indicated that as the pyrolysis temperature increased, the specific surface area and pore volume of the original corn cob biochar increased, whereas the most probable pore diameter exhibited a decreasing trend. The pseudo – second – order kinetic equation (with an R^2 value greater than 0.9926) and the Freundlich isothermal model (with an R^2 value greater than 0.9554) were more appropriate for describing the adsorption of MB on biochar. The adsorption capacity of MB on biochar followed the order of q_{YM450} (67.50 mg/g) > q_{YM300} (66.21 mg/g) > q_{YM600} (44.22 mg/g).

Keywords : biochar; dye; methylene blue; adsorption; corn cob

亚甲基蓝 (MB) 是一种染色类有机物质, 广泛应用于印染行业中^[1]。染料废水色度高、难降解, 进入水体后造成生物体内酶活性下降^[2], 危及水生动物和人体健康。在染料废水处理中, 吸附法因工艺简便、操作容易且成本低, 成为一种常用技术。

生物炭是生物质在缺氧环境条件下经热裂解后得到。生物炭因在改善土壤性质、促进碳封存和协助废弃物处置等领域潜力巨大而受到学术界广泛关注。玉米芯含有丰富的碳组分, 主要包含纤维素、半纤维素及木质素等具备多种活性官能团的组分, 促进染料吸附^[3], 且具有离子交换能力^[4], 适于制备生物炭。利用玉米芯作为前驱体合成生物炭并应用于染料的吸附去除, 实现了农业废弃物的资源化再利用。

本文在 300 °C, 450 °C, 600 °C 下限氧热解制备玉米芯生物炭并进行表征, 探究玉米芯生物炭对 MB 的吸附性能, 为生物炭吸附污染物提供理论参考。

一、试验部分

(一) 生物炭的制备

以玉米芯为原料, 经冲洗、干燥与碎裂处理后置于石英坩埚

内。将坩埚移至马弗炉内, 在 300、450 和 600℃ 下限氧热解 10 小时。所得生物炭分别标记为 YM300、YM450 与 YM600。

(二) 试验试剂、仪器与检测方法

亚甲基蓝 (MB, $C_{16}H_{18}ClN_3S$, 分子量为 319.86 g/mol, 纯

项目信息: 江苏省大学生创新训练计划项目 (Xcx2024170)。

作者简介: 王雨蝶 (2004—), 女, 学士, 研究方向为生物质炭材料在环境中的应用研究。

通讯作者: 谭珍珍 (1986—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为水污染控制工程。

度 >95 %) , 配制质量浓度为 1 g/L 的亚甲基蓝 (MB) 储备液。 Nicolet iS10 傅立叶变换红外光谱仪; kubo X1000 型孔径与比表面积分析仪; L6S 型紫外可见分光光度计。采用紫外分光光度法检测 MB 浓度, 吸收波长为 655 nm^[5-6]。

(三) 试验设计

1. 吸附动力学

称取 3 种生物炭各 100 mg, 置于含 1 L、浓度为 10 mg/L MB 溶液的广口瓶中。将广口瓶置于恒温振荡器中振荡 (306 K、200 RPM) 反应。于预设时间点分别取出 10 mL 样液, 经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后测定 MB 的浓度。

2. 吸附等温线

称取 3 种生物炭各 5 mg, 置于含有 50 mL 浓度分别为 0、1、3、5、10、15、20 mg/L MB 溶液的定量瓶中。将定量瓶置于恒温振荡器 (306 K、200 RPM) 中振荡 72 h 至吸附平衡, 经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后测定其中 MB 的浓度。

二、结果与讨论

(一) 样品表征

从 SEM 图像 (图 1) 看出, 玉米芯生物炭具有层状构造, 随热解温度升高, 生物质原料中的有机组分逐步转化为生物油与合成气释放,

生物质基体内部孔隙数量逐渐增加, 形成大量狭长缝隙并向内部延伸。

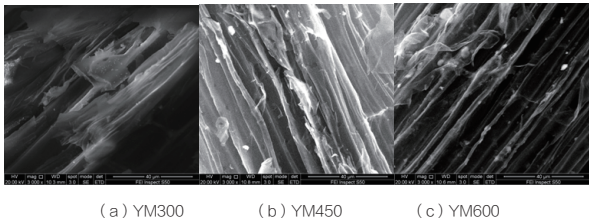


图 1 玉米芯生物炭的 SEM 图

由生物炭的比表面积与孔容积 (表 1) 可知, 随热解温度升高, 玉米芯生物炭的比表面积和孔容积均逐步增加。当温度为 600 ° C 时, YM600 的比表面积和孔容显著增至 302.57 m²/g 和 0.2582 cm³/g。分析原因为温度为 300 ° C 时, 玉米芯中纤维素、半纤维素等有机组分未充分分解, 形成孔隙较少, 当温度升高至 600 ° C 时, 生物质内有机组分热解较充分, 以生物油及合成气形式逸出, 促进了孔隙结构发育^[7]。

表 1 玉米芯生物炭的理化性质

生物炭种类	比表面积 (m ² /g)	孔容积 (cm ³ /g)	BJH 吸附最可直径 (nm)	单点平均孔半径 (nm)
YM300	3.0575	0.0183	3.85	11.98
YM450	40.2708	0.1093	2.98	6.40
YM600	302.5700	0.2582	4.98	1.71

(二) 吸附动力学分析

由生物炭吸附 MB 的拟合曲线 (图 2) 及相关动力学参数 (表

2) 可知, 生物炭对 MB 的吸附量随时间的延长迅速增加, 在吸附 12 h 后基本达到平衡。吸附平衡后, 各生物炭对 MB 的吸附容量顺序为 YM450 (67.50 mg/g) > YM300 (66.21 mg/g) > YM600 (44.22 mg/g)。准二级动力学拟合优度 (R² > 0.9926) 高于准一级动力学 (R² > 0.9840), 且计算得到的理论吸附容量与实验吸附容量更为接近, 表明准二级动力学更适合描述各生物炭对 MB 的吸附过程, 表明该吸附过程受多种因素共同影响。

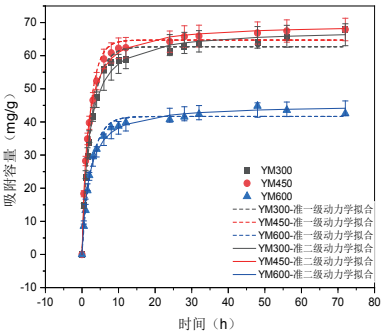


图 2 玉米芯生物炭对 MB 的动力学拟合曲线

表 2 玉米芯生物炭吸附 MB 的动力学模型参数

模型方程	准一级动力学			准二级动力学			实验吸附量
参数	Q _e /(mg/g)	k ₁ /(min ⁻¹)	R ²	Q _e /(mg/g)	k ₂ /(g/(mg · min))	R ²	Q/(mg/g)
YM300	62.70	0.6785	0.9840	68.00	0.0081	0.9943	66.21
YM450	64.69	0.6187	0.9840	69.51	0.0102	0.9970	67.50
YM600	41.66	0.6772	0.9881	45.27	0.0119	0.9926	44.22

(三) 吸附等温线分析

采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型对实验结果进行拟合, 得到图 3 和拟合参数表 3。由图 3 和表 3 可知, 两种等温模型均能对玉米芯生物炭吸附 MB 的过程进行较好拟合。其中, Freundlich 模型的拟合优度 (R² > 0.9554) 优于 Langmuir 模型 (R² > 0.9283), 表明 Freundlich 模型能够更准确地描述该吸附行为。这进一步说明, 玉米芯生物炭对 MB 的吸附更符合多分子层吸附特征。如图 3 所示, 3 种生物炭对 MB 的吸附量均随平衡浓度升高而增加, 并在达到一定浓度后增速趋缓^[8]。这主要因为在较低的 MB 浓度条件下, 生物炭表面可供利用的吸附位点及活性基团较为充足, 吸附过程较快; 随着 MB 浓度增大, 吸附位点逐渐趋于饱和, 导致吸附量增速减慢^[9]。

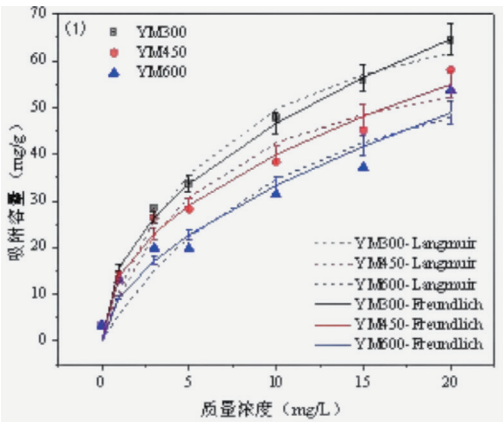


图 3 玉米芯生物炭吸附 MB 的等温线拟合曲线

表3 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合参数							
碳 材 料	等温线 方程	Langmuir			Freundlich		
	温度/ K	$/(mg \cdot g^{-1})$	$B/(L \cdot mg^{-1})$	R^2	$/(L \cdot mg^{-1})$	n	R^2
YM300	306	81.4362	0.1562	0.9913	15.7734	2.1241	0.9938
YM450	306	68.0420	0.1658	0.9592	13.8967	2.1789	0.9814
YM600	306	77.5889	0.0807	0.9283	9.3815	1.8151	0.9554

三、结论

（1）玉米芯生物炭的比表面积和总孔容积随热解温度的升高逐渐增加，最可几直径逐渐减小。

（2）Freundlich 等温吸附模型对玉米芯生物炭吸附 MB 的过程具有更好的拟合效果，表明该吸附行为更符合多分子层吸附特征。

参考文献

[1] 王崧, 刘东帆, 丁杨惠勤, et al. 侧柏叶生物炭的制备及对亚甲基蓝的吸附机制 [J]. 江苏工程职业技术学院学报, 2025, 25(03): 7–14.

[2] 韩子寅, 孙晔, 李智彬, et al. 锰改性生物炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能研究 [J]. 当代化工研究, 2025, (01): 191–3.

[3] 李薇, 李政, 马宏飞, et al. 改性玉米秸秆对碱性品红吸附性能研究 [J]. 应用化工, 2025, 54(01): 120–5.

[4] 张韶珂, 王梦丽, 张杰, et al. 改性玉米秸秆在污水处理中的应用 [J]. 应用化工, 2023, 52(03): 815–9+26.

[5] 陈燕, 李霞, 展开, et al. 西蓝花梗生物炭对亚甲基蓝的吸附性能研究 [J]. 安全与环境学报, 2025, 25(08): 3222–30.

[6] 刘少东, 余茂森, 郭敏, 稻秆基生物炭对亚甲基蓝的吸附性能 [J]. 染整技术, 2024, 46(11): 27–33.

[7] 高阳, 李博, 蒲建业, et al. 玉米秸秆皮生物炭制备及其对亚甲基蓝吸附性能研究 [J]. 现代农业科技, 2024, (19): 93–8.

[8] 夏宇凡, 吴仪, 袁迪, et al. 磁性樟树叶生物炭对水体中亚甲基蓝的吸附研究 [J]. 四川环境, 2024, 43(02): 167–72.

[9] 谭珍珍, 张学杨, 方茹, et al. 小麦秸秆生物炭吸附诺氟沙星特性 [J]. 工业水处理, 2020, 40(01): 24–8.

[10] 陈豪宇, 张胜利, 凯橙橙, et al. 聚乙烯胺改性纤维素纤维对 Cr(VI) 的吸附研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(08): 3090–8.

[11] 谭珍珍, 张学杨, 骆俊鹏, et al. 小麦秸秆生物炭对四环素的吸附特性研究 [J]. 水处理技术, 2019, 45(02): 32–8.