

# 花生壳生物炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能

尤智丛 于海燕 肖剑 赵云鹏\*

中国矿业大学化工学院 江苏徐州 221008

**摘要:** 以废弃花生壳为原料, 采用低温预炭化和  $K_2CO_3$  活化两步法制备了花生壳生物炭 (KBC)。利用 SEM、 $N_2$  吸脱附、FT-IR 和 XPS 等现代分析技术对 KBC 的微观形貌、孔隙结构、表面官能团结构及元素组成进行表征, 考察了制备条件 (预炭化温度、升温速率、浸渍比、活化温度和活化时间) 和吸附条件 (生物炭投加量、pH 值和吸附时间) 对 KBC 吸附模拟水溶液中亚甲基蓝 (MB) 性能的影响。结果表明, 在炭化温度为  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、活化时间为 1.5 h、升温速率为  $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 、活化温度为  $750\text{ }^\circ\text{C}$  和浸渍比为 1:1.5 的条件下制备的 KBC 对 MB 的吸附效果最好, 吸附量达到  $398.2\text{ mg/g}$ , MB 去除率达到 84.0%。吸附过程遵循准二级动力学模型和 Langmuir 吸附模型, 为自发吸热过程, 且以化学吸附为主。

**关键词:** 生物炭; 亚甲基蓝; 吸附动力学; 吸附模型

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: \*\*

## Preparation and modification of peanut shell biochar and its adsorption properties for methylene blue

Zhi-cong You, Hai-yan Yu, Jian Xiao, Yun-peng Zhao\*

School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221000

**Abstract:** Using waste peanut shell as raw material, the modified peanut shell biochar (KBC) was prepared by a two-step method of low temperature precarbonization and  $K_2CO_3$  activation. The micromorphology, pore structure, surface functional group structure and element composition of the biochar prepared were characterized by several modern analytical techniques such as SEM,  $N_2$  adsorption-desorption, FT-IR and XPS, etc. The effects of preparation conditions (carbonization temperature, heating rate, impregnation ratio, activation temperature and activation time) and the adsorption conditions (dosage of biochar, pH value and adsorption time) on the adsorption properties of methylene blue (MB) in simulated aqueous solution over KBC were investigated. The results showed that KBC prepared under the conditions of carbonization temperature of  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , activation time of 1.5 h, heating rate of  $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , activation temperature of  $750\text{ }^\circ\text{C}$  and impregnation ratio of 1:1.5, exhibited the best adsorption capacity, providing a adsorbed quantity of  $398.2\text{ mg/g}$  and a removal rate of 84.0% towards MB. The adsorption process follows quasi-second-order kinetic and Langmuir adsorption models, and it is a spontaneous endothermic process, which is dominated by chemisorption.

**Key words:** Biochar; Methylene Blue; Adsorption kinetics; Adsorption thermodynamics

随着纺织和印染工业的日益发展, 染料废水对于环境的破坏也越来越严重。亚甲基蓝 (MB) 是一种具有复杂的芳香结构的典型有机染料, 通常存在于印染工业废水中。MB 可造成土壤和水体的大规模不可降解污染, 进一步危害农作物和水生生物, 因此研究和开发印染废水中 MB 的处理技术迫在眉睫<sup>[1,2]</sup>。在众多污水处理方法中, 吸附法因其具有能耗小、成本低、设备简单等诸多优点, 已经成为从废水中去除 MB 的一种常用且有效的方法<sup>[3,4]</sup>。吸附过程中吸附剂的选择和使用范围非常广泛, 其决定了废水处理过程的效率和成本, 因此探索低成本、高效率的吸附材料成为研究重点。

生物炭吸附剂因其具有成本低廉、化学性质稳定、孔隙结构发达、比表面积大、富含表面羟基和羧基官能团等特点, 已被广泛应用于废水中重金属<sup>[5,6]</sup>和有机污染物<sup>[7]</sup>的去除。本文以花生壳为炭前驱体, 经低温预炭化和  $K_2CO_3$  活化制备了花生壳生物炭 (KBC), 考察了制备条件和吸附条件对生物炭吸附模拟废水中 MB 性能的影响。利用扫描电子显微镜 (SEM)、 $N_2$  吸脱附、傅立叶变换红外光谱

(FT-IR)、X 射线光电子能谱 (XPS) 等现代分析技术对 KBC 的微观形貌和结构特征进行了表征。本研究旨在进一步提高生物炭对 MB 的吸附能力, 揭示 KBC 的制备条件、结构特征与吸附性能之间的关系, 为生物炭吸附性能的优化提供一定的依据。

### 1 实验部分

#### 1.1 材料、试剂和仪器

实验所用的花生壳由徐州某农贸市场采购。实验试剂包括碳酸钾 ( $K_2CO_3$ )、亚甲基蓝和酸碱溶液等。实验所用仪器设备包括粉碎机、管式炉、恒温振荡器、真空干燥箱、紫外分光光度计等。采用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察生物炭微观形貌; X 射线光电子能谱仪 (XPS) 和傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 分析生物炭表面官能团的种类及相对含量; 利用物理吸附分析仪 (BET) 测定生物炭比表面积和孔隙结构特征。

#### 1.2 生物炭的制备流程

取 2 g 的花生壳粉末于瓷舟中, 放置管式炉中, 在一定温度下

(400–700 °C) 预炭化 1 h, 自然冷却到室温后取出, 经 0.1 mol/L 的 HCl 洗涤后 80 °C 真空干燥 12 h, 即得到花生壳生物炭 BC。然后, 将 BC 与一定比例的碳酸钾混合, 放置管式炉中, 在一定的温度和时间下活化, 自然冷却至室温, 经 0.1 mol/L 的 HCl 洗涤后 80 °C 真空干燥 12 h, 即得到碳酸钾活化的花生壳生物炭 (KBC)。如表 1 所示, 不同条件下制备的 KBC 命名为 KBC-X。

表 1 KBC-X 的制备条件

样品	升温速率 (°C/min)	浸渍比	活化温度 (°C)	活化时间 (h)
KBC-1	3	1:1.5	750	1.5
KBC-2	5	1:1.5	750	1.5
KBC-3	10	1:1.5	750	1.5
KBC-4	3	1:1	750	1.5
KBC-5	3	1:2	750	1.5
KBC-6	3	1:1.5	700	1.5
KBC-7	3	1:1.5	800	1.5
KBC-8	3	1:1.5	750	1
KBC-9	3	1:1.5	750	2

### 1.3 吸附试验

采用批处理方法进行了吸附实验。将 KBC 在一定的接触时间、初始浓度、温度和 pH 等条件下, 与一定浓度的 MB 水溶液混合, 加盖密封后放置恒温振荡器中, 以 1500 rpm 的速度震荡。震荡一定时间后取出样品, 在紫外分光光度计 665 nm 波长下测定吸光度。

通过计算去除率 ( $Y, \%$ ) 和吸附量  $Q$ , 评价 KBC 对 MB 的吸附性能。溶液的吸附分配比  $K_d$  可以近似看作溶质在两个溶剂中溶解度之比, 可反映出溶质在两相中的迁移能力及分离效果。计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$Y = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (2)$$

$$K_d = \frac{C_0 - C_e}{C_e} \times \frac{V}{m} \quad (3)$$

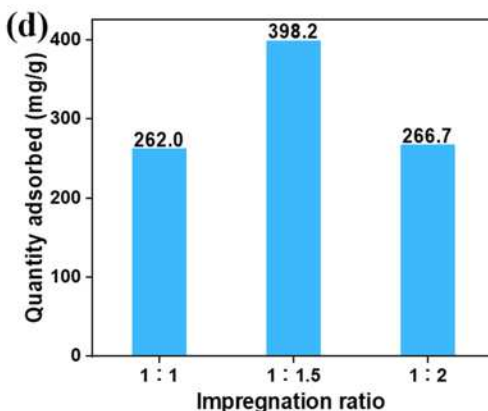
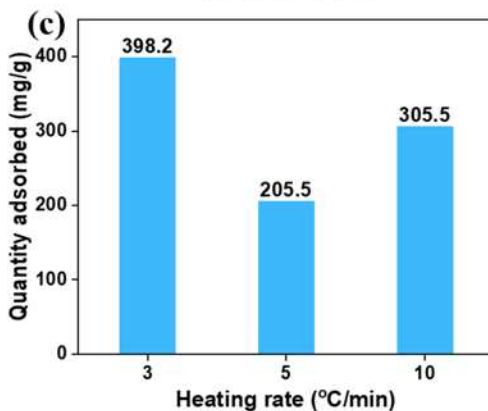
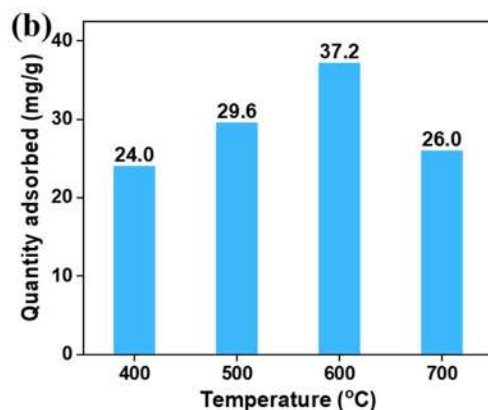
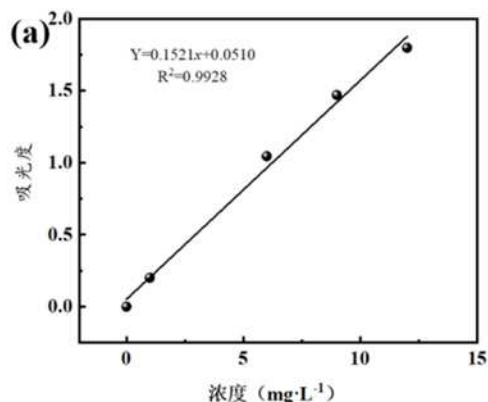
式中:  $C_0$  为 MB 溶液的初始浓度, mg/L;  $C_e$  为吸附后 MB 溶液浓度, mg/L;  $V$  为溶液体积, mL;  $m$  生物炭质量, g;  $Y$  为 MB 的去除率, %;  $Q$  为吸附量, mg/g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同生物炭对 MB 的吸附性能比较

首先, 做出 MB 的标准曲线如图 1 (a) 所示, 之后在相同吸附条件下, 比较不同条件制备的 KBC 对 MB 的吸附性能。图 1 (b) 为在不同温度预炭化制备的 BC 对 MB 吸附性能的影响。可以看出, 在 600 °C 预炭化时制备的 BC 对 MB 具有最大吸附量, 达到 37.2 mg/g。图 1 (c-f) 为 600 °C 预炭化制备的 BC 在不同活化条件下制备的 KBC 的对 MB 的吸附性能。由图可知, 与 BC 相比, KBC 对 MB 的吸附性能显著提升。图 1 (c) 可以看出, 以 3 °C/min 的升温速率制备的 KBC 对 MB 的吸附量最高, 达到 398.2 mg/g。升温过快会显著影响活性组分在载体上的均匀分布。图 1 (d) 看出, 以 1:1.5 的浸渍比制备的 KBC 对 MB 的吸附量最高, 说明此时  $K_2CO_3$  对生物炭的刻蚀程度最优。图 1 (e) 和 (f) 显示活化时间为 1.5 h 和 750 °C 下活化所制备的 KBC 对 MB 的吸附量最高。活化温度的升高促进了碳和钾的反应, 有利于更多微孔和中孔的形成; 而温度过高会导致孔结构

的坍塌和塌陷, 阻碍了吸附的进行。上述结果表明, 生物炭的最佳改性条件为: 预炭化温度 600 °C、BC/ $K_2CO_3$  浸渍比为 1:1.5, 升温速率 3 °C/min、活化温度 750 °C、活化时间 1.5 h。



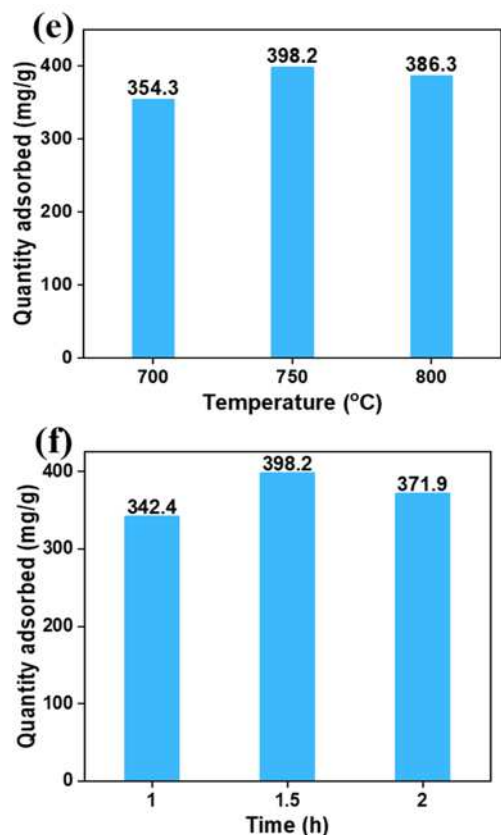


图1 (a) MB 的标准曲线; (b) 不同预炭化温度制备 BC 对 MB 的吸附性能; 不同活化条件制备的 KBC 对 MB 的吸附性能: (c) 升温速率, (d) 浸渍比, (e) 活化温度, (f) 活化时间。

## 2.2 生物炭的表征

利用 SEM 观察 BC 和 KBC-1 的表观形貌。由图 2 (a) 可以看出, BC 表面没有存在明显的孔隙结构。图 2 (b) 显示 KBC-1 表面结构不均匀, 具有多孔表面和不规则的网络结构, 包含不同大小和形状的孔隙。KBC-1 表面明显的管状结构归因于活化剂  $K_2CO_3$  对生物炭刻蚀过程中所产生的  $CO_2$  和  $H_2O$  等挥发性气体的释放。

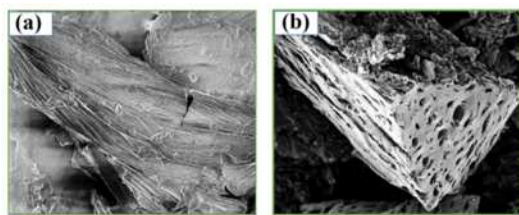


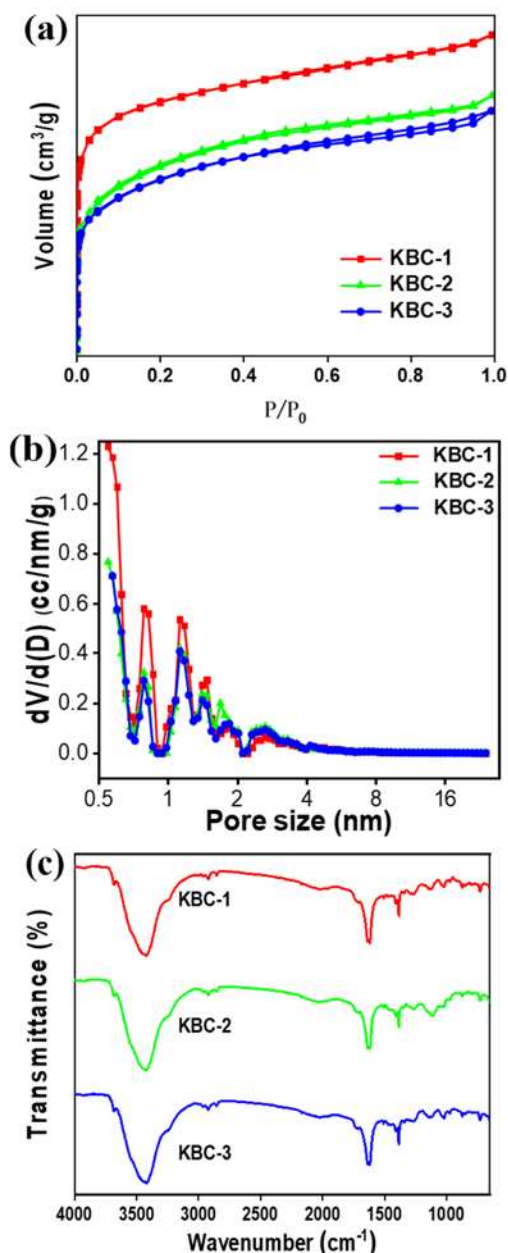
图2 (a) BC 和 (b) KBC-1 的 SEM 图

为了探究所制备吸附材料的结构与吸附性能之间的关系, 对 KBC 进行了一系列表征。由图 3(a)和 3(b)可以看出, KBC 的吸附等温曲线为典型的 I 型等温线, 在相对压力为 0.1 时, 气体的吸附量未达到饱和, 这进一步说明了生物炭中主要含有微孔和介孔。以  $3^\circ C/min$  速率升温所制备的活化生物炭的比表面积最大, 达到  $1460.92 m^2/g$ , 表明活化过程显著提高了生物炭比表面积, 可为 MB 的吸附提供了更多的吸附位点。

KBC 的 FT-IR 谱图如图 3 (c) 所示。可以看出, KBC 分别在  $3332$ 、 $1650$  和  $1125 cm^{-1}$  处出现了对应于  $-OH$ 、 $-COOH$  和  $-CO$  的特征峰, 表明 KBC 中存在丰富的含氧官能团, 有利于 KBC 对 MB 的

吸附<sup>[9]</sup>。如图 3 (d) 所示, 花生壳基生物炭的 XRD 谱图在  $2\theta = 28^\circ$  和  $43^\circ$  处有两个衍射峰, 分别对应于石墨的 (002) 和 (100) 晶面。BC 的这两个晶面表现出较强的窄峰, 这归属于有高结晶度炭物种的晶相。经  $K_2CO_3$  活化后, KBC-1 出现了  $K_2O$  ( $2\theta = 32.5^\circ$ ) 和  $K_2CO_3$  ( $2\theta = 13.0^\circ$ 、 $25.0^\circ$  和  $41.5^\circ$ ) 对应的特征衍射峰<sup>[10]</sup>。

利用 XPS 分析 KBC 表面化学状态和元素组成。如图 3 (e) 所示, KBC-1 的 XPS 谱图中具有明显的 C、O、N 元素的特征峰, 其中 C、O 元素的相对含量较高, 少量 K 元素的存在表明  $K_2CO_3$  成功掺杂在生物炭表面。由图 3 (f) 可以看出, KBC 的 C 1s 光谱区间在  $284.8$  和  $285.6 eV$  位置出现特征峰, 分别由 C-C/C=C 和 C-N/C-O 化学键引起。图 3 (g) 为 KBC 的 N 1s 区域的高分辨 XPS 谱图。N 原子的主要赋存形态为吡啶型氮 (N-6,  $398.5 \pm 0.2 eV$ )、含氧基团相连的吡咯氮 (N-5,  $400.5 \pm 0.2 eV$ ) 和季氮 (N-Q,  $401.2 \pm 0.2 eV$ )<sup>[11]</sup>。



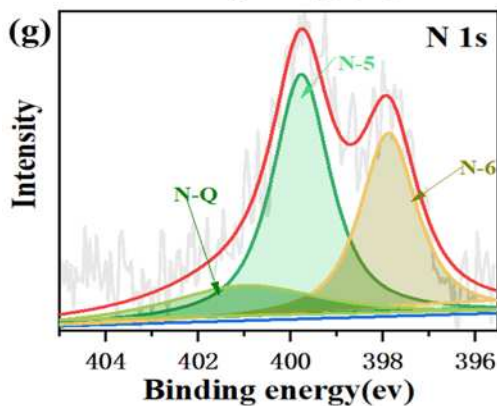
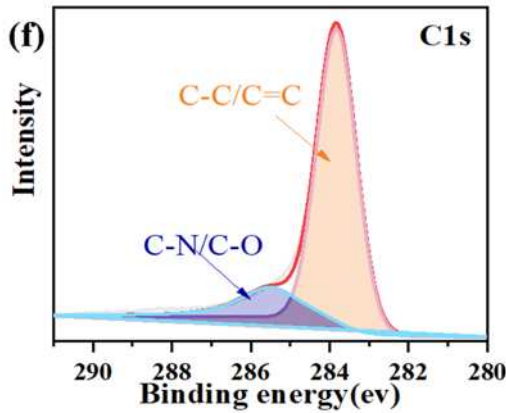
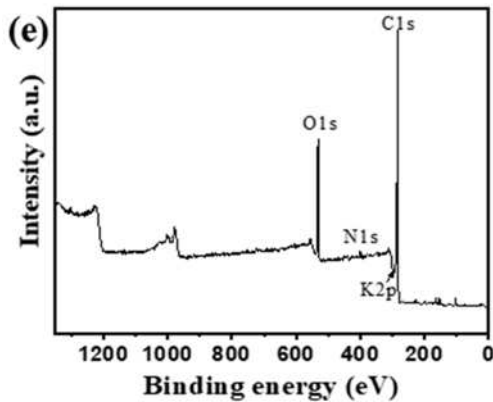
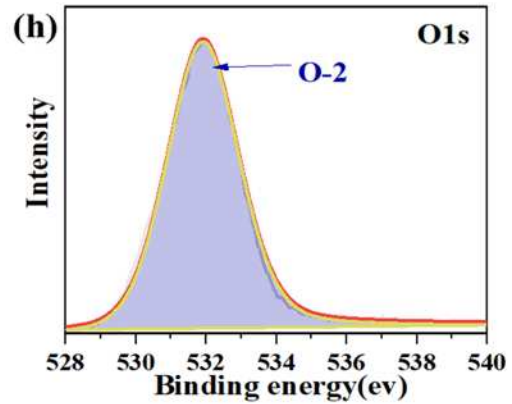
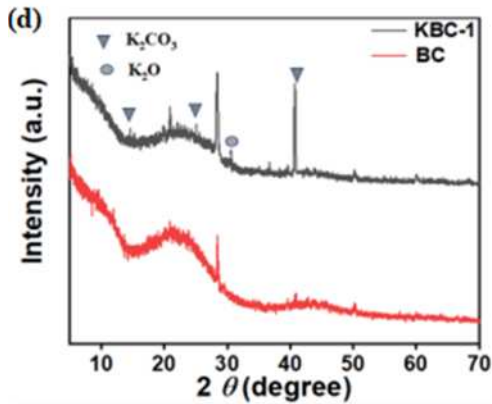


图3 (a) 生物炭的氮气吸附-脱附曲线; (b)孔径分布; (c) FT-IR 谱图; (d) KBC-1 和 BC 的 XRD 谱图; KBC-1 的(e)XPS 全扫描谱图, (f)高分辨 C 1s 谱, (g) 高分辨 N 1s 谱, (h) 高分辨 O 1s 谱图.

### 2.3 吸附条件对 KBC-1 吸附 MB 性能的影响

以 KBC-1 为吸附剂, 探究吸附条件对其吸附 MB 性能的影响。从图 4 (a) 可以看出, 随着生物炭用量的增加, MB 的去除率呈现上升的趋势, 而吸附量则呈下降的趋势。随着生物炭用量的增加, 可用于吸附的结合位点增多, 因此 MB 去除率呈现上升的趋势; 而生物炭用量的增加意味着单位质量生物炭可吸附的 MB 减少, 从而引起吸附量的下降。从图 4 (b) 可以看出, KBC-1 对 MB 去除率随着 pH 增加而增加, 当 pH > 6 时, MB 的去除率逐渐稳定, 而 pH > 8 时, 去除率稍微变少, 可以推测在中碱性条件下 KBC-1 对 MB 具有较好的去除能力。这可能是由于 KBC-1 表面电性的变化所致, 在中强度碱性条件下 MB 以阳离子形式存在, 加速了吸附平衡。

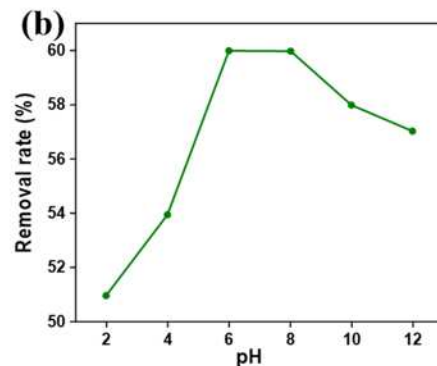
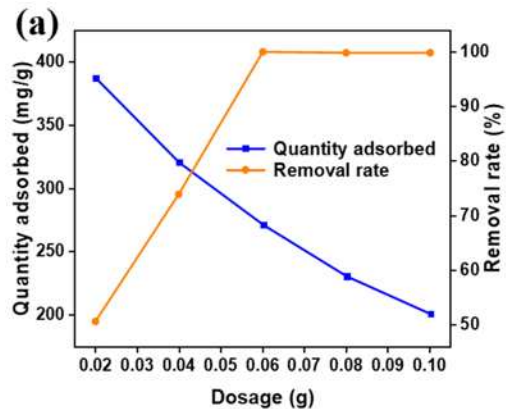


图4 (a) KBC-1 投加量对吸附性能的影响, (b) pH 对 MB 去除率的影响

### 2.4 吸附动力学

图 5 为 KBC-1 对 MB 的吸附量随时间的变化趋势。可以看出, 吸附量随着吸附时间的增加而增大。当初始 MB 的浓度为 150、200、250 和 300 mg/L 时, 达到吸附平衡时间分别为 90、120、180 和 240 min。随着 MB 初始浓度的增加, 达到吸附平衡时间逐渐延长。当接近吸附平衡时, 由于吸附推动力 ( $q_e - q_t$ ) 减小, 吸附量的增加幅度趋缓。对于不同初始浓度的 MB 进行吸附时, 生物炭吸附量随 MB 初始浓度的增加而增加, 但随着吸附位点的减少, 吸附量在更高 MB 初始浓度 (300 mg/L) 下不再增加。

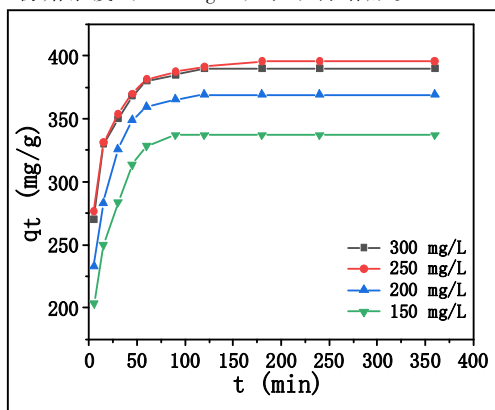


图 5 吸附时间对 KBC-1 吸附 MB 性能的影响

吸附动力学模型可以为揭示吸附过程的反应途径和速率控制机制提供重要的参数。采用拟一级动力学模型和拟二级动力学模型对 KBC-1 吸附 MB 过程进行拟合, 公式如下<sup>[12]</sup>。

拟一级动力学方程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (4)$$

拟二级动力学方程:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_m} \quad (5)$$

式中:  $q_e$  为达到平衡时的平衡吸附量, mg/g;  $q_t$  为  $t$  时刻时吸附量, mg/g;  $K_1$  ( $\text{min}^{-1}$ ) 和  $K_2$  ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 为吸附速率常数;  $t$  为吸附时间, min。

拟动力学模型结果如图 6 所示。由图 6 可知, 当 MB 溶液的初始浓度分别为 150、200 和 250 mg/L 时, 准二级动力学模型均能很好地拟合动力学实验数据, 相关系数  $R^2=0.999$ 。说明 KBC 对 MB 的吸附符合准二级动力学模型, 吸附过程主要以化学吸附为主。相关动力学拟合数据见表 2。

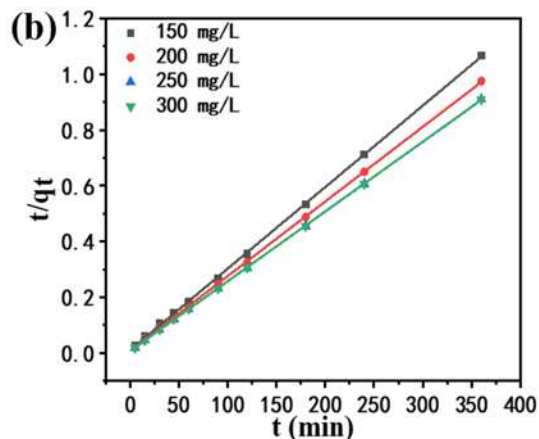
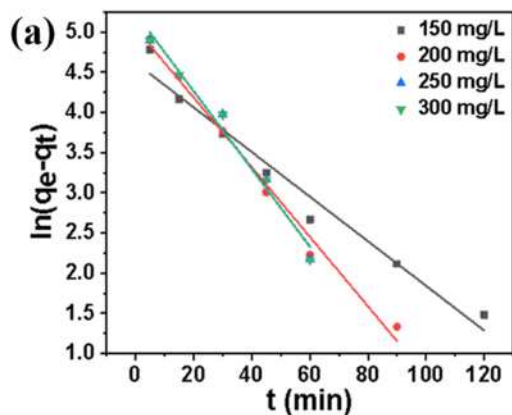


图 6 (a) 准一级动力学方程拟合曲线, (b) 准二级动力学方程拟合曲线

表 2 动力学拟合参数

$C_0$ (mg/L)	$q_e$ (mg/g)	拟一级吸附动力学			拟二级吸附动力学		
		$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_m$ (mg/g)	$R^2$	$K_2$ [ $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min})$ ]	$q_m$ (mg/g)	$R^2$
150	337.2	0.02777	101.3	0.966	0.00081	342.5	0.999
200	369.1	0.04331	156.5	0.986	0.00087	373.2	0.999
250	395.7	0.04838	188.2	0.975	0.00085	400.1	0.999
300	390.1	0.04749	180.5	0.988	0.00086	398.2	0.999

### 2.5 吸附等温线

吸附等温线模型可用于描述平衡状态下液相与固相的相互作用, 采用 Langmuir 和 Freundlich 等温线模型描述 KBC-1 对 MB 的吸附等温线。公式分别如下<sup>[13]</sup>。

Langmuir 等温吸附方程:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_m K_L C_e} \quad (6)$$

$$R_L = \frac{1}{K_L C_0} \quad (7)$$

Freundlich 等温吸附方程:

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_e \quad (8)$$

式中:  $C_e$  为吸附平衡时溶液中 MB 浓度, mg/L;  $K_L$  为 Langmuir 吸附常数;  $K_F$  为 Freundlich 吸附常数;  $1/n$  为吸附指数。

等温线拟合参数如表 3 所示。根据相关系数, 得到三个吸附温度下 Langmuir 模型均比 Freundlich 模型拟合效果好, 这表明 KBC-1 对 MB 的吸附可能发生在均匀的单层膜上。采用  $R_L$  来描述吸附剂的吸附强度, 其中不利吸附 ( $R_L > 1$ )、有利吸附 ( $0 < R_L < 1$ )、线性吸附 ( $R_L = 1$ ) 和不可逆吸附 ( $R_L = 0$ )。本研究在三种温度下  $R_L$  的值均小于 1, 因此表明 KBC-1 对 MB 为利吸附。

表 3 等温线拟合参数

温度	Langmuir 拟合参数			Freundlich 拟合参数		
	$K_L$	$R_L$	$R^2$	$K_F$	$1/n$	$R^2$
298K	0.00167	0.39-0.80	0.998	713.4	0.1544	0.541
308K	0.00450	0.44-0.60	0.998	760.5	0.1530	0.660
318K	0.00853	0.25-0.44	0.999	823.7	0.1532	0.757

从图 7 和表 3 可知, Langmuir 吸附等温线模型拟合程度更高, 说明生物炭活性吸附位点数目有限并且 MB 在生物炭上的吸附过程为单分子层吸附;  $R_L$  均小于 1, 说明吸附过程容易发生。

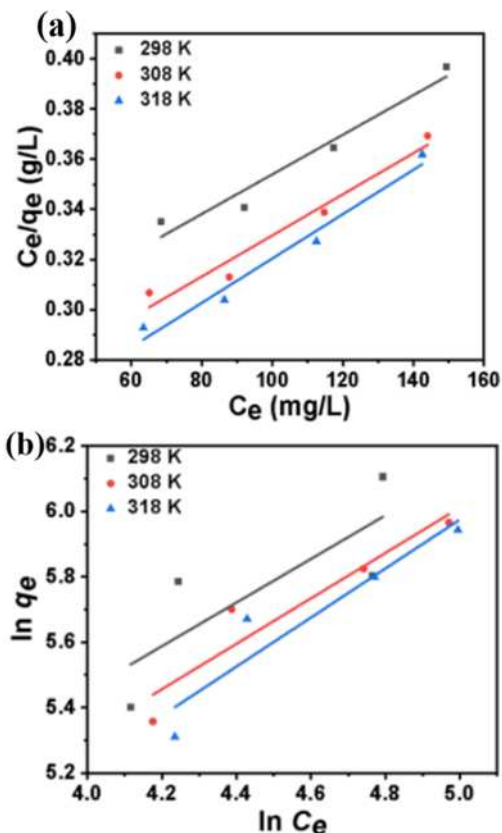


图7 KBC-1 吸附 MB 的 (a) Langmuir 模型, (b) Freundlich 模型  
2.6 吸附热力学

吸附热力学可以判断吸附过程的自发性和可行性, 以及温度对吸附性能的影响。热力学参数通过以下方程计算<sup>[14]</sup>。

$$\ln \frac{q_e}{c_e} = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (9)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (10)$$

式中,  $\Delta H$  (kJ/mol)、 $\Delta S$  (J/(mol·K))、 $\Delta G$  (kJ/mol) 为标准焓变、熵变和标准吉布斯自由能变化,  $R$  (8.314 J/(mol·K)) 为通用气体常数,  $K_L$  为标准平衡常数。

根据公式计算出 KBC-1 吸附 MB 的热力学参数如表 4 所示。由表可知,  $\Delta H$  值为正值, 表明吸附过程是吸热过程;  $\Delta G$  为负值, 表明吸附反应是自发进行; 随着温度的升高,  $\Delta G$  的绝对值也增大, 表明吸附过程在较高温度下自发性更高;  $\Delta S$  为正值, 表明吸附过程是不可逆的, 且 KBC-1 和 MB 两相界面的交互作用的无序性增加。

表 4 热力学拟合参数

温度	R <sup>2</sup>	热力学参数		
		$\Delta G$ (KJ/mol)	$\Delta H$ (KJ/mol)	$\Delta S$ (J/mol·K)
298K	0.921	-5.870	2.710	0.028
308K		-5.914		
318K		-6.194		

### 3 结论

预碳化温度 600 °C, 活化时间 1.5 h、升温速率 3 °C/min、活化温度 750 °C 和浸渍比 1:1.5 条件下制备的 KBC-1 的比表面积为 1460.92 m<sup>2</sup>/g, 对 MB 的最大吸附量达到 398.2 mg/g。在中碱性条件下 KBC-1 对于 MB 具有最佳的去除能力, 吸附过程符合 Langmuir

模型和准二级动力学模型, 证明其吸附过程为自发、吸热的单分子层化学吸附。花生壳经预碳化和 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 活化两步法制备的生物炭在废水中染料的吸附处理方面具有应用的前景。

### 参考文献

- [1]Chen B, Wang M, Duan M, et al. In search of key: Protecting human health and the ecosystem from water pollution in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 101-111.
  - [2]Wydra K, Becker P, Aulich H A. Sustainable solutions for solar energy driven drinking water supply for rural settings in Sub-Saharan Africa: a case study of Nigeria [J]. Journal of Photonics for Energy, 2019, 9(4): 043106.
  - [3]Crini G, Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(1): 145-155.
  - [4]Peng L, Shang Y, Gao B, et al. Co3O4 anchored in N, S heteroatom co-doped porous carbons for degradation of organic contaminant: role of pyridinic N-Co binding and high tolerance of chloride [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 282: 119484.
  - [5]邹继颖, 孙大志, 赵家伟, 等. 玉米秸秆生物炭对重金属镉、铅的吸附性[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 536-539.
  - [6]王彦隽, 赵婷婷, 王维大, 等. 玉米秸秆生物炭对水溶液中 Th(IV) 的吸附性能[J]. 安全与环境学报, 2022, 20(6): 2375-2382.
  - [7]高玉玲, 梁婷, 郭永霞. 玉米秸秆生物炭对杀扑磷吸附性能研究[J]. 农产品加工, 2019, 6: 22-24.
  - [8]许国强, 罗晓玥, 邓文, 等. Fe-MIL-101@白藜芦醇印迹复合材料的合成及其吸附性能[J]. 现代化工, 2023, 43(3):122-133.
  - [9]赵明涛, 张婧雯, 李冬冬, 等. 花生壳生物炭的制备、表征及其对邻苯二甲酸二甲酯的吸附特性[J]. 现代化工, 2021, 50(9):2415-2423.
  - [10]饶潇潇, 方昭, 王建超, 等. 花生壳生物炭的制备、表征及其吸附性能[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(6):14-18.
  - [11]熊青月, 韩志勇, 吴杰, 等. 改性花生壳生物炭对四环素的吸附性能研究[J]. 化学与生物工程, 2023, 40(3):49-57.
  - [12]赵丹丹, 王叔笑, 单锐, 等. 新型生物炭基催化剂催化甘油合成碳酸甘油酯 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(4):121-126.
  - [13]李文兵, 黄彝, 王光华, 等. 核桃壳炭载铈材料对亚甲基蓝的吸附性能研究 [J]. 水处理技术, 2022, 48(12):48-52.
  - [14]黄慧倩, 胡浩鹏, 杨斌, 等. 亚热带海湾表层沉积物对磷的吸附解析特征研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(2): 363-372.
- 基金项目: 中央高校基本科研业务费(中国矿业大学, 2019XKQYMS49)和江苏省高校优势学科项目资助。
- 作者简介: 尤智丛(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事生物炭制备及在水处理中的应用。
- 于海燕(2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事炭材料制备。
- 肖剑(1989-), 男, 讲师, 主要从事炭材料制备及应用。
- 赵云鹏(1981-), 男, 教授, 主要从事煤及生物质低碳清洁利用。