

# 污泥基磁改性生物炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能研究

龚松林<sup>1</sup>, 李琛<sup>1\*</sup>, 申心鹤<sup>1</sup>, 刘惠<sup>1</sup>, 范智超<sup>2</sup>, 樊啸<sup>1</sup>, 王鑫娜<sup>1</sup>, 芦贝贝<sup>1</sup>, 刘杰<sup>3</sup>, 杨红源<sup>1</sup>

(1. 陕西理工大学化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723001;

2. 陕西省环境痕量污染物监测预警重点实验室, 陕西 西安 710000;

3. 陕西理工大学数学与计算机科学学院, 陕西 汉中 723001)

**摘要:**为提升污泥基生物炭对亚甲基蓝(MB)的吸附性能及回收效率,提出废弃聚苯乙烯(PS)掺杂策略,开发磁性复合材料(PS-MSSBC)。以市政污泥和 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为原料,固液浸渍比1:8( $m:v$ )条件下经350~750℃高温碳化制备,重点探究PS掺杂的协同增强机制。表征显示,750℃下制备的PS-MSSBC<sub>750</sub>性能最优,其比表面积为56.57 m<sup>2</sup>/g,饱和磁化强度为24.4397 emu/g,表面富含 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 晶相及—OH、—COOH等官能团。正交实验优化后,在投加量2 g/L、318 K、MB初始浓度20 mg/L、pH=5条件下,MB去除率达99.25%。吸附过程符合准二级动力学和Langmuir等温模型( $Q_{\text{max}}=154.766$  mg/g),热力学参数证实其为自发吸热过程。在3次吸附-解吸循环后,材料仍保持82.07%的初始吸附容量,优于未掺杂对照样。研究制备了可磁回收的高效吸附剂,建立了有机-无机协同改性的普适性策略,为固废资源化与废水治理耦合技术提供新思路。

**关键词:**磁改性;污泥基生物炭;聚苯乙烯掺杂;亚甲基蓝;吸附

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)02-0185-09

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.02.030

## Preparation of magnetic sludge-based biochar and its adsorption of methylene blue

GONG Song-lin<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1\*</sup>, SHEN Xin-ge<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, FAN Zhi-chao<sup>2</sup>, FAN Xiao<sup>1</sup>,  
WANG Xin-na<sup>1</sup>, LU Bei-bei<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>3</sup>, YANG Hong-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Shaanxi Key Laboratory for Monitoring and Early Warning of Trace Pollutants in Environmental, Xi'an 710000, China;

3. School of Mathematics and Computer Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

**Abstract:** To enhance the adsorption performance and recovery efficiency of sludge-based biochar for methylene blue (MB), this study proposed a doping strategy using waste polystyrene (PS) and developed a magnetically modified composite (PS-MSSBC). The material was prepared via high-temperature carbonization of municipal sludge and  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  at a solid-liquid ratio of 1:8 ( $m:v$ ) and temperatures ranging from 350 to 750℃, with a focus on investigating the synergistic enhancement mechanism of PS doping. Characterization results indicated that PS-MSSBC<sub>750</sub>, fabricated at 750℃, exhibited the optimal performance; it possessed a specific surface area of 56.57 m<sup>2</sup>/g, a saturation magnetization of 24.4397 emu/g, and a surface abundant in  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  crystal phases as well as functional groups such as —OH and —COOH. After optimization via orthogonal experiments, the MB removal rate reached 99.25% under the following conditions: adsorbent dosage of 2 g/L, temperature of 318 K, initial MB concentration of 20 mg/L, and pH = 5. The adsorption process followed the pseudo-second-order kinetic model and Langmuir isotherm model ( $Q_{\text{max}}=154.766$  mg/g), while thermodynamic parameters confirmed it to be a spontaneous endothermic process. After three adsorption-desorption cycles, the material retained 82.07% of its initial adsorption capacity, outperforming the undoped control sample. This study provides a magnetically recyclable and highly efficient adsorbent, establishes a universal strategy for organic-inorganic synergistic modification, and offers new insights into the coupling technology of solid waste resource utilization and wastewater treatment.

**Key words:** magnetic modification; sludge-derived biochar; polystyrene doping; methylene blue; adsorption

收稿日期:2025-05-07;修回日期:2025-11-28

基金项目:陕西理工大学博士启动基金(X20240039);大学生创新创业训练计划项目(202410720016);陕西省环境介质痕量污染物监测预警重点实验室开放基金项目(SHJKFJJ202317);陕西省教育厅2023年重点智库项目(23JY001);陕西理工大学科研计划项目(X20240103);陕西理工大学市校共建国家重点实验室专项计划项目(SXJ-2107)

作者简介:龚松林(2000-),男,硕士生,研究方向为环境功能材料开发与利用、污染评价, gongsonglin@snut.edu.cn;李琛(1980-),男,博士,教授,研究方向为环境功能材料开发与应用、新污染物分析检测与污染修复、污染评价与健康风险评估等,通讯联系人, leecheen\_317@126.com。

纺织工业的迅猛发展导致水环境污染问题日益加剧。据统计,我国每年产生的印染废水量约 20~23 亿 t<sup>[1]</sup>,在 2022 年纳入统计的 42 个工业行业中,其排放量约占总排放量的 9% 左右<sup>[2]</sup>。印染废水中所含亚甲基蓝(MB)等偶氮染料具有强生物毒性(96 h-LC<sub>50</sub><10 mg/L)<sup>[3]</sup>,可通过食物链蓄积威胁人体健康。与此同时,污泥处置问题同样严峻,据《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》,2025 我国市政污泥产量将突破 9 500 万 t<sup>[4]</sup>。

基于污泥热解制备功能性生物炭的“以废治废”策略虽具潜力,但其实际应用仍受多重因素制约。传统污泥基生物炭因原料灰分高,易引发腔孔堵塞、比表面积不足,限制吸附点位利用率<sup>[5]</sup>,且分离回收存在回收率低、能耗高的问题,阻碍其工程化应用<sup>[6]</sup>。近年来学者们通过 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁改性技术成功实现了吸附容量与回收效率的双重突破<sup>[7]</sup>,而聚苯乙烯共热解体系中自由基交联效应带来材料碳含量的增加<sup>[8]</sup>,这为破解污泥高灰分难题提供了新思路<sup>[9]</sup>。然而,磁改性过程与聚合物掺杂之间的协同研究仍属盲区,亟待进一步深入研究。

本研究以市政污泥和废弃快递包装衍生的废弃聚苯乙烯塑料为原料,通过 FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 浸渍耦合高温碳化工艺,制备兼具高吸附效能与磁响应特性的复合生物炭(PS-MSSBC)。采用 SEM、XPS、XRD 等技术表征材料的结构与表面性质,通过单因素实验和正交实验明确影响其吸附 MB 的主要因素及最佳条件,结合吸附热力学与动力学探讨吸附机理。研究结果可为印染废水深度处理提供可工程化应用的高效吸附剂,同时为有机-无机复合改性污泥基生物炭的创新合成提供新思路。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

市政污泥为汉中市城市污水处理厂污泥脱水车间的脱水污泥,含水率 78%±3%,经 XRF(美国,赛默飞,ARL PERFORM<sup>®</sup>X 4200W)检测,主要金属含量为:Fe 5.2%±0.3%、Al 3.1%±0.2%;废弃聚苯乙烯(PS)取自废弃包装材料;六水合氯化铁(分析纯,国药集团);亚甲基蓝(分析纯,北京库尔化学试剂有限公司);实验用水均为去离子水(KH-100ML,四川优普超纯科技有限公司)。

### 1.2 生物炭制备

#### 1.2.1 污泥基生物炭的制备及其磁改性

脱水污泥经 105℃ 干燥 12 h、自然冷却后研磨

过 100 目筛,置于瓷舟中放入加热区体积 3 L 的卧式管式炉,在高纯 N<sub>2</sub> 氛围下热解制备生物炭。先以 5 L/min 流量吹扫 3 min,再控制 N<sub>2</sub> 流量 1 L/min,以 10℃/min 分别升温至 350、550、750℃,恒温保持 120 min,自然冷却后分别得到污泥基生物炭 SSBC<sub>350</sub>、SSBC<sub>550</sub> 和 SSBC<sub>750</sub>。

将上述 SSBC 与 1 mol/L FeCl<sub>3</sub> 溶液(以 0.1 mol/L HCl 调节 pH=2.5)按固液比 1:8(*m:v*)混合,25℃ 下 180 r/min 振荡浸渍 12 h,经磁铁分离后按初始热解条件二次碳化,获得磁改性污泥基生物炭 MSSBC<sub>350</sub>、MSSBC<sub>550</sub> 和 MSSBC<sub>750</sub>。

#### 1.2.2 PS 掺杂污泥基生物炭的制备及其磁改性

通过球磨机(300 r/min,30 min)将 PS 与干污泥按 1:4(*w/w*)混合,经熔融共混(180℃、10 min)后按上述流程制备,分别得到系列 PS 掺杂污泥基生物炭(PS-SSBC<sub>350</sub>、PS-SSBC<sub>550</sub> 和 PS-SSBC<sub>750</sub>)和 PS 掺杂磁改性污泥基生物炭(PS-MSSBC<sub>350</sub>、PS-MSSBC<sub>550</sub> 和 PS-MSSBC<sub>750</sub>)。

## 1.3 生物炭表征

使用电子扫描显微镜(SEM,HITACHI SU8010,日本日立)观察生物炭样品的表面形貌,样品喷金 30 s,加速电压 15 kV,工作距离 8 mm;使用 X-射线衍射仪(XRD,D8 ADVANCE,德国布鲁克)分析其物相组成与晶体结构,Cu K $\alpha$  辐射源, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ,扫描速率 5°/min,2 $\theta = 20 \sim 90^\circ$ ;使用傅里叶变换红外分光光度计(FT-IR,TJ270-30A,中世沃克)检测其官能团,KBr 压片法,分辨率 4 cm<sup>-1</sup>,累积扫描 32 次,波数 500~4 000 cm<sup>-1</sup>;使用 X 射线光电子能谱仪(XPS,ESCALAB 250Xi,美国赛默飞)解析其表面化学组成及元素价态,单色 X 射线源,Al K $\alpha$  激发源,离子枪能量 100 eV~4 keV,入射角 90°,分析深度约 10 nm,以 C 1s 284.8 eV 校准结合能;采用氮气吸附-脱附法(BELSORP MAX,日本麦克克拜尔)测定比表面积与孔径分布,样品在 200℃ 脱气预处理 6 h,分析  $P/P_0 = 0.05 \sim 0.30$  的吸附数据;使用振动样品磁强计(VSM,7404,美国 LakeShore)评估其磁性能,室温,±15 kOe 磁场,检测磁化强度获取磁滞回线。

### 1.4 吸附实验

在 50 mL 聚丙烯离心管中,加入 20 mg 生物炭吸附剂与 40 mL MB 溶液,置于恒温振荡器,温度为 (25±0.5)℃,转速为 150 r/min。取样后经 0.22  $\mu\text{m}$  尼龙膜过滤,用紫外-可见分光光度计(UV-2600,日本岛津)测定浓度,校准曲线  $R^2 = 0.9994$ 。每组

实验重复3次,以算术平均值计。MB 的去除率( $r$ )及吸附量( $Q_e$ )由式(1)、(2)分别计算<sup>[10]</sup>。

$$r = (1 - C_e/C_0) \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_e = [(C_0 - C_e)V]/m \quad (2)$$

式中, $C_0$ 为MB的初始浓度,mg/L; $C_e$ 为反应一定时间后MB浓度,mg/L; $m$ 为吸附剂的投加量,g; $V$ 为参与吸附反应的MB溶液体积,L; $r$ 为吸附剂对MB的去除效率,%; $Q_e$ 为在吸附达到平衡时,单位质量吸附剂所吸附的MB质量,mg/kg。

### 1.5 正交优化

在单因素实验基础上,采用四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交表优化吸附条件,正交试验选取废水pH(5~7)、吸附剂投加量(1~2 g/L)、MB初始浓度(20~40 mg/L)和反应温度(298~318 K)作为关键控制变量,通过多因素正交分析揭示各参数对吸附效率的显著性影响及其交互作用。基于极差分析确定MB最优吸附条件。

### 1.6 吸附动力学、等温线及热力学

在恒温(25℃±0.5℃)条件下,将一定量的吸附剂加入初始浓度为10 mg/L的MB溶液,于恒温振荡器(150 r/min)中反应。按预设时间梯度(0、5、10、20、40、60、90、120、180、230 min)取样,经0.22 μm尼龙膜过滤后测定浓度。采用准一级[式(3)]与准二级[式(4)]动力学模型拟合<sup>[11-12]</sup>。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

$$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e \quad (4)$$

式中, $q_e$ 和 $q_t$ 分别为吸附平衡及 $t$ 时刻的吸附容量,mg/g; $k_1$ 为准一级动力学速率常数, $\text{min}^{-1}$ ; $k_2$ 为准二级动力学速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ ; $t$ 为某一特定取样时刻所经历的时间间隔,min。

在298、308、318 K下,将吸附剂与40 mL MB溶液(浓度梯度为5~300 mg/L)混合,振荡至平衡(24 h)。采用Langmuir[式(5)]与Freundlich[式(6)]模型分析,计算分离因子 $R$ [式(7)]评估吸附可行性<sup>[13]</sup>。

$$C_e/q_e = 1/(K_L \times q_m) + C_e/q_m \quad (5)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \ln C_e \quad (6)$$

$$R = 1/(1 + K_L C_0) \quad (7)$$

式中, $q_m$ 为Langmuir理论饱和吸附量,mg/g; $K_L$ 为Langmuir常数,L/mg; $C_0$ 和 $C_e$ 为MB初始浓度和平衡浓度,mg/L; $n$ 为吸附常数; $q_e$ 为吸附平衡时的吸附容量,mg/g; $K_F$ 为Freundlich常数, $(\text{mg}/\text{g})(\text{L}/\text{mg})^{1/n}$ 。

在298~318 K温度梯度下进行平衡吸附实验,通过Van't Hoff方程[式(8)~(11)]计算热力学参数<sup>[14]</sup>。

$$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta \quad (8)$$

$$\Delta G^\theta = -RT \ln K_d \quad (9)$$

$$\ln K_d = -\Delta H^\theta/RT + \Delta S^\theta/R \quad (10)$$

$$K_d = q_e/C_e \quad (11)$$

式中, $K_d$ 为分配系数,L/g; $R$ 为理想气体状态常数,8.314 J/(mol·K); $T$ 为绝对温度,K; $q_e$ 为吸附平衡时的吸附量,mg/g; $C_e$ 代表吸附平衡时的浓度,mg/L; $\Delta S^\theta$ 为标准熵变,反映了吸附前后体系混乱度的变化,kJ/(mol·K); $\Delta H^\theta$ 为标准焓变,反映了吸附过程中的能量变化,kJ/mol; $\Delta G^\theta$ 为标准吉布斯自由能变,是判断吸附过程能否自发进行的最高判据,kJ/mol。

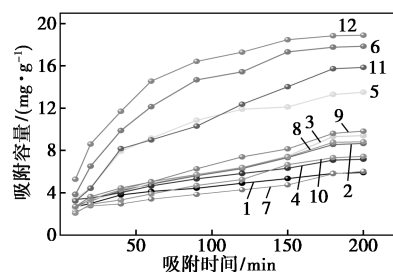
### 1.7 再生实验

使用0.1 mol/L HCl将去离子水pH调节至2,并在此酸性溶液中对吸附饱和的吸附剂进行再生实验,外加0.5T钕磁铁回收,使用去离子水洗涤至滤液电导率<5 μS/cm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同生物炭吸附剂对MB吸附效果

为探究制备工艺参数对污泥基生物炭吸附MB性能的影响,系统比较了碳化温度(350~750℃)、磁改性、PS掺杂的协同效应。如图1所示,MB去除率随碳化温度升高呈增长态势,磁改性提高了污泥基生物炭对MB的吸附性能,PS掺杂进一步提升了污泥基生物炭对MB的吸附能力,单一的磁改性或PS掺杂均对SSBC吸附性能有提升作用。相同碳化温度下,单独磁改性对SSBC性能的提升优于PS掺杂改性,两者复合改性进一步提升了污泥基生物炭对MB的吸附性能。其中,750℃碳化的样品(MSSBC<sub>750</sub>和PS-MSSBC<sub>750</sub>)对MB的吸附量分别达到17.88、18.91 mg/g,较MSSBC<sub>350</sub>和PS-MSSBC<sub>350</sub>分别增加1.6倍和1.5倍,PS-MSSBC<sub>750</sub>对MB的吸附效率达



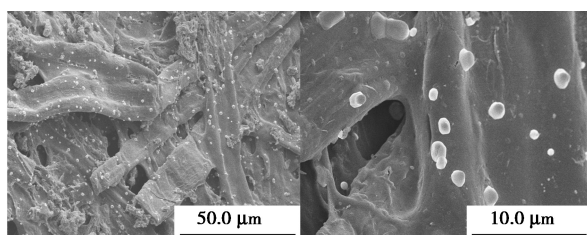
1—SSBC<sub>350</sub>; 2—SSBC<sub>550</sub>; 3—SSBC<sub>750</sub>; 4—MSSBC<sub>350</sub>;  
5—MSSBC<sub>550</sub>; 6—MSSBC<sub>750</sub>; 7—PS-SSBC<sub>350</sub>; 8—PS-SSBC<sub>550</sub>;  
9—PS-SSBC<sub>750</sub>; 10—PS-MSSBC<sub>350</sub>; 11—PS-MSSBC<sub>550</sub>;  
12—PS-MSSBC<sub>750</sub>

图1 不同吸附剂对MB吸附性能

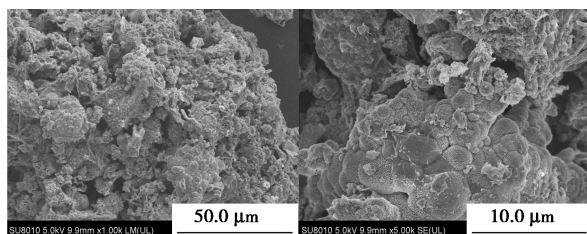
到 94.2%, 为未改性生物炭 (SSBC<sub>750</sub>) 的 2 倍, 验证了改性策略的有效性。

### 2.2 表征结果

PS-MSSBC<sub>750</sub> 的 SEM 表征结果如图 2 所示。图 2(a) 中 PS-MSSBC<sub>750</sub> 出现了层状堆叠结构, 进一步放大后发现, 其表面均匀负载颗粒状的晶体铁氧化物。图 2(b) 显示 PS-MSSBC<sub>750</sub> 截面形成蓬松的纤维状凸起和微球结构, 并在腔孔中形成交错的隔膜, 这些结构特征可能表现为更大的比表面积和更多的吸附点位。进一步放大后发现, PS-MSSBC<sub>750</sub> 中污泥有机质、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 晶粒与 PS 热解碳紧密交织, 形成抗机械冲击的复合体<sup>[15]</sup>。Wang 等<sup>[16]</sup> 发现污泥-塑料共热解可形成致密交联结构, 与本研究 PS 掺杂的形貌强化效应一致。Li 等<sup>[17]</sup> 以污泥和负载金属的聚氯乙烯为原料, 通过共热解制备的生物炭表面出现了大的孔隙和不规则的颗粒, 同时生物炭内部腔孔的完整性增加。



(a) PS-MSSBC<sub>750</sub> 表面形貌



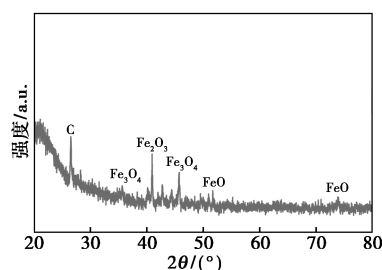
(b) PS-MSSBC<sub>750</sub> 断面形貌

图 2 PS-MSSBC<sub>750</sub> 表面形貌、断面形貌 SEM 表征

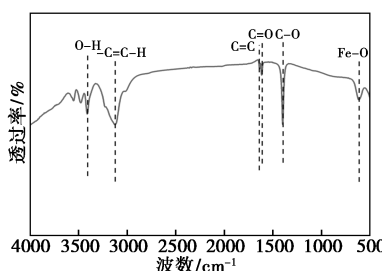
图 3(a) 展示了 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的 XRD 谱图,  $2\theta = 26.5^\circ$  处出现的宽化峰对应无定形碳 (002) 晶面, 并在  $2\theta = 35.463^\circ$  (311)、 $43.113^\circ$  (400)、 $45.238^\circ$  (422)、 $49.784^\circ$  (511) 处识别出匹配 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的特征峰 (标准卡 JCPDS 76-0957), 此外, 在  $2\theta = 40.828^\circ$  ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 113)、 $51.409^\circ$  (FeO, 018) 和  $73.007^\circ$  (FeO, 042) 出现的铁氧化物特征衍射峰证实材料中 Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> 共存, 说明污泥基生物炭的成功磁改性。汪金鹏<sup>[18]</sup> 以水葫芦茎为原料制备磁性生物炭, 其 XRD 图谱中同样识别出多处特征衍射峰与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的特征峰的匹配, 表明铁元素以磁铁矿晶型稳定存在。同时, 升高碳化温度有利于 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 特征峰强度

的提升, 意味着高温促使铁氧化的结晶度优化与负载量的提升。

图 3(b) 为 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的 FT-IR 谱图, 其中识别出  $563\text{ cm}^{-1}$  处的 Fe—O 振动峰, 验证了污泥基生物炭的铁负载<sup>[19]</sup>。同时, 在  $1\ 400$ 、 $1\ 660$ 、 $1\ 639$ 、 $3\ 130$ 、 $3\ 410\text{ cm}^{-1}$  处识别出对应 C—O、C=C、C=O、—C=C—H、O—H 的振动峰, 意味着 PS-MSSBC<sub>750</sub> 具备多样的官能团结构, 这可能会对材料吸附 MB 起到积极促进作用。潘紫倩等<sup>[20]</sup> 通过污泥液化制备的生物炭在  $3\ 423$ 、 $1\ 635$ 、 $2926\text{ cm}^{-1}$  处出现了酚羟基、C=O、—OH 的伸缩振动峰。



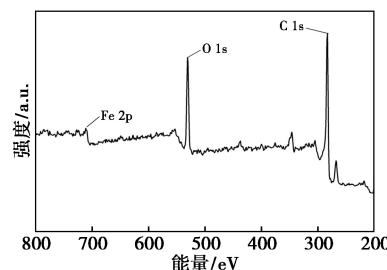
(a) XRD 谱图



(b) FT-IR 谱图

图 3 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的晶体结构与表面官能团

图 4 为样品的 XPS 分析结果。图 4(a) 全谱图中的 C 1s ( $284.7\text{ eV}$ )、O 1s ( $531.8\text{ eV}$ )、Fe 2p ( $710.8\text{ eV}$ ) 峰确认了 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的主成分为 C/O/Fe; 在图 4(b)、(c) 中, C 1s 在  $284.7\text{ eV}$ 、 $285.3\text{ eV}$ 、 $286.3\text{ eV}$  处的特征峰对应 C=C、C—O、C=O<sup>[21]</sup>, O 1s 在  $531.8\text{ eV}$ 、 $532.6\text{ eV}$ 、 $530.7\text{ eV}$  处的特征峰分别对应 C—O、C=O、O—H<sup>[22]</sup>, 佐证了材料中丰富的官能团结构; 图 4(d) Fe 2p 分峰显示



(a) XPS 全谱图

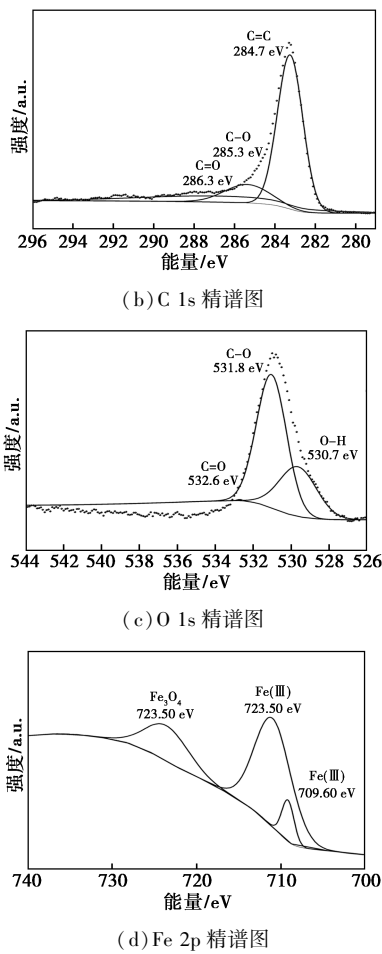


图 4 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的 XPS 分析

710.80 eV ( $Fe^{3+} 2p_{3/2}$ )、723.50 eV ( $Fe^{2+} 2p_{1/2}$ )、709.60 eV ( $Fe^{2+} 2p_{3/2}$ ), 证实  $Fe_3O_4$  主导磁性相<sup>[23]</sup>, 与  $Fe^{2+} 2p_{3/2}$  峰相比,  $Fe^{3+} 2p_{3/2}$  峰窄而强, 峰面积更大, 这可能是由  $Fe 2p_{3/2}$  的自旋轨道耦合作用导致的<sup>[24-25]</sup>。

$N_2$  吸附-解吸等温线和孔径分布 (图 5) 显示, 吸附-解吸等温线呈 IV 型 (H3 滞后环), 揭示了其介孔主导的孔结构特征, 平均孔径为 7.61 nm, 比表面积为 56.57  $m^2/g$ 。

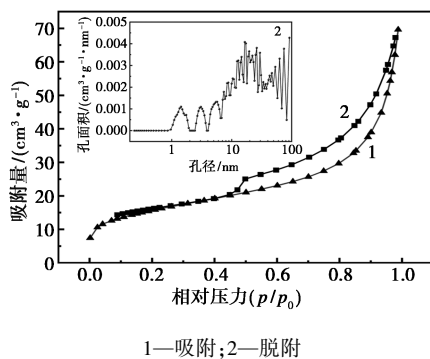


图 5 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的  $N_2$  吸附-解吸等温线和孔径分布图

图 6(a) 磁滞回线显示, PS-MSSBC<sub>750</sub> 的饱和磁强度 ( $M_s$ ) 为 24.4397 emu/g, 磁滞回线关于原点呈“S”形对称, 意味着生物炭材料具备超顺磁性特征<sup>[26]</sup>, 材料的磁矫顽力  $H_c \approx 0$  Oe, 0.5T 的 NdFeB 磁铁在 60 s 内实现超过 99.5% 的材料回收率。高温复合改性所制备的 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的饱和磁强度显著高于汪金鹏<sup>[18]</sup> 通过浸渍-热解法制备的  $Fe_3O_4@BC$  的磁强度 (18.49 emu/g) 和张明明<sup>[27]</sup> 所制备的水葫芦基磁改性生物炭 (11.60 emu/g)。已有研究表明, 吸附材料的等电位点对吸附过程存在显著影响<sup>[28]</sup>, PS-MSSBC<sub>750</sub> 的 Zeta 电位等电位点  $pH_{pzc} = 4.3$  [图 6(b)], 意味着材料的表面电荷将随 pH 升高而由正转负。当  $pH > 4.3$  时, 负电荷密度增加, 材料与 MB ( $pKa = 3.8$ ) 的静电引力增加<sup>[29]</sup>。

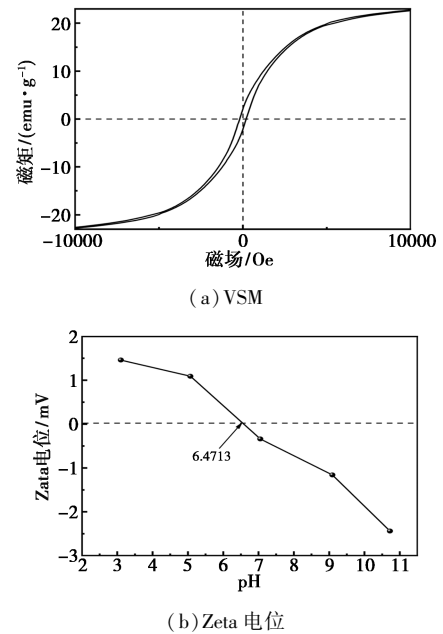


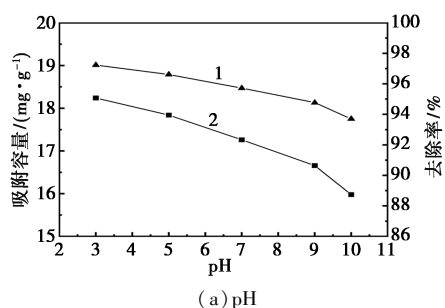
图 6 PS-MSSBC<sub>750</sub> 的 VSM 与 Zeta 电位图

### 2.3 单因素实验结果

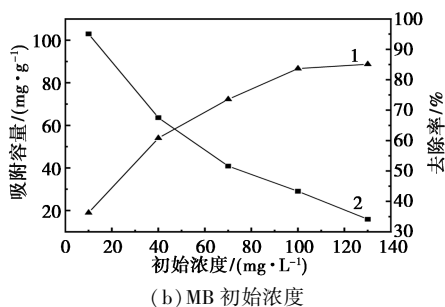
溶液的 pH 不仅显著影响生物炭的表面电荷特性, 还会改变吸附质的存在形态<sup>[30]</sup>。如图 7(a) 所示, PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的吸附效率在  $pH = 2 \sim 10$  范围内均保持 85% 以上, 但随 pH 升高, MB 去除率从 95.07% 降至 88.74%。这可能是因为, 水中 MB ( $pKa = 3.8$ ) 以阳离子 ( $C_{16}H_{18}N_3S^+$ ) 形式存在<sup>[31]</sup>, 同时 PS-MSSBC<sub>750</sub> ( $pH_{pzc} = 4.3$ ) 表面的负电荷特性赋予两者之间天然的静电引力, 使 PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的吸附在较宽的 pH 范围内均有较高的去除率<sup>[12, 32]</sup>。同时, 高 pH 条件下, 丰富的  $OH^-$  与 MB 可能产生吸附位点的竞争, 且部分 MB 可能发生水解生成中性分子, 导致静电作用减弱, 进而导致高 pH

下 MB 去除率下降<sup>[33]</sup>。周勇<sup>[34]</sup>发现 pH 通过改变生物炭表面官能团(如—COOH、—OH)的离子化状态影响吸附位点有效性,与本研究结果一致。

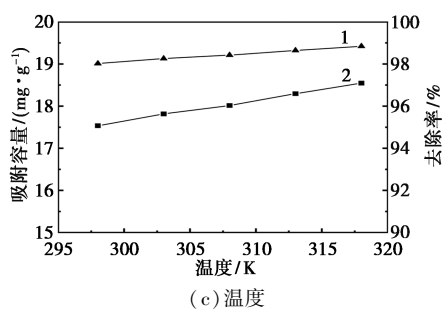
图 7(b) 所示, MB 初始浓度由 10 mg/L 增至 130 mg/L 的过程中, PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的吸附容量由 19.01 mg/g 增至 88.71 mg/g, 符合浓度梯度驱动扩散机制; 而去除率则由 95.07% 降至 34.12%, 表明高浓度下吸附点位趋于饱和<sup>[35-36]</sup>。一方面, 初始浓度的增加提高了 MSSBC<sub>750</sub> 与 MB 之间的接触机率, 有利于吸附的发生; 另一方面, 高浓度下, MB 在 PS-MSSBC<sub>750</sub> 中的内扩散阻力增大, 吸附速率由膜扩散主导转化为空隙扩散为主导<sup>[37]</sup>。



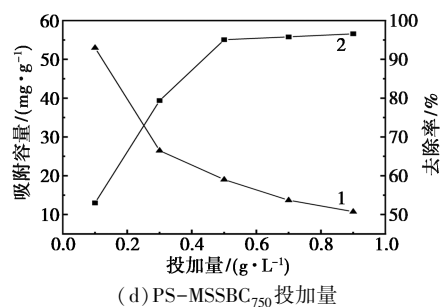
(a) pH



(b) MB 初始浓度



(c) 温度



(d) PS-MSSBC<sub>750</sub> 投加量

1—吸附容量; 2—MB 去除率

图 7 PS-MSSBC<sub>750</sub> 吸附 MB 性能的关键影响因素

如图 7(c) 所示, PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的吸附容量在 318 K 达到最大, 为 19.42 mg/g, 去除率为 97.09%, 温度升高对 PS-MSSBC<sub>750</sub> 吸附 MB 具有促进作用, 这可能与 MB 分子热运动和迁移速度的增加有关<sup>[38]</sup>。陈凤婷<sup>[30]</sup>发现温度升高使 MB 分子与生物炭表面 Fe—O 键的配位作用增强, 与本研究 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 负载特性[图 3(a)]相符。图 7(d) 揭示了 PS-MSSBC<sub>750</sub> 投加量变化对 MB 去除效果的影响。发现 MB 去除率随投加量的增加而升高, 而吸附容量呈下降趋势。当 PS-MSSBC<sub>750</sub> 投加量超过 0.5 g/L 时, 吸附容量趋于稳定, 说明此投加量下吸附位点开始出现冗余<sup>[39]</sup>, 吸附剂内的吸附位点未得到完全利用。此外, 过量的吸附剂投加量可能导致颗粒团聚, 比表面积利用率降低<sup>[40]</sup>。

### 2.4 正交实验优化结果

表 1 正交实验结果表明, 各因素对吸附率的影响排序为: PS-MSSBC<sub>750</sub> 投加量 > MB 初始浓度 > 温度 > pH, 吸附剂投加量是影响 MB 去除率的主导因素, 投加量增加显著提升了 MB 去除率, 归因于活性位点数量增加和表面接触概率提升。但研究表明过量投加可能引发颗粒团聚, 导致比表面积利用率下降<sup>[41]</sup>。相反, MB 初始浓度的增加则对其去除率存在抑制作用, 符合 Langmuir 单分子层吸附饱和规律<sup>[42]</sup>。正交实验确定的最佳吸附条件为:  $T = 318$  K、 $pH = 5$ 、PS-MSSBC<sub>750</sub> 投加量 2 g/L、MB 初始浓度 20 mg/L, 此条件下, MB 去除率为 99.25%, 高于文献报道的柠檬渣活性炭对 MB 的 97.19% 去除率<sup>[43]</sup>。

表 1 正交实验结果

组号	废水 pH	PS-MSSBC <sub>750</sub> 投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	废水 MB 初始浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	温度/ K	吸附率/ %
1	5	1.0	20	298	95.99
2	5	1.5	30	308	97.03
3	5	2.0	40	318	98.81
4	6	1.0	30	318	89.59
5	6	1.5	40	298	91.85
6	6	2.0	20	308	98.63
7	7	1.0	40	308	85.23
8	7	1.5	20	318	98.74
9	7	2.0	30	298	97.91
$K_1$	0.973	0.903	0.978	0.952	
$K_2$	0.934	0.959	0.948	0.936	
$K_3$	0.940	0.984	0.920	0.957	

2.5 吸附动力学、等温线、热力学

图 8(a) 显示了 PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的吸附动力学特征。吸附过程可分为快速吸附(0~30 min)、缓慢增长(30~180 min)和平衡(180~230 min)阶段,平衡吸附量为 22.317 mg/g。吸附动力学数据经准一级( $R^2 = 0.98849$ )和准二级( $R^2 = 0.98928$ )模型拟合发现,准二级模型能够更好地拟合 PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的吸附过程,证实该吸附过程以表面络合、电子转移等化学吸附机制为主导<sup>[44]</sup>,PS-MSSBC<sub>750</sub> 表面官能团(如—COO—、—OH)对 MB 的去除可能发挥着不可忽略的作用。图 8(b)、(c) 展示了不同温度下的吸附等温线特征。图 8(b) Langmuir 模型在

298~318 K 温度范围内均表现出优异拟合度( $R^2 > 0.99$ ),优于 Freundlich 模型[图 8(c)]拟合度( $R^2 < 0.95$ ),表明该吸附为吸热的单层分子覆盖过程<sup>[45]</sup>。经 Freundlich 模型预测,PS-MSSBC<sub>750</sub> 对 MB 的理论最大吸附容量( $q_{max}$ )为 154.766 mg/g,显著优于其他污泥基磁改性生物炭对 MB 的吸附能力(表 2)。Freundlich 模型拟合结果表明(表 3),模型参数  $1/n$  值(0.427)处于 0.3~0.5 之间,提示材料表面存在适度的非均质性,有利于吸附的进行<sup>[46]</sup>。通过  $R_L$  验证发现, $R_L$  值在 298 K(0.1534~0.9158)、308 K(0.1770~0.9281)、318 K(0.1912~0.9341) 范围内均满足  $0 < R_L < 1$ ,证实吸附过程的热力学可行性<sup>[47]</sup>。

表 2 污泥基生物炭对 MB 的吸附能力对比

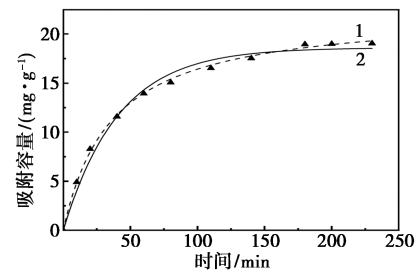
序号	吸附剂	原料	$q_{max}/(mg \cdot g^{-1})$	模型拟合	参考文献
1	PS-MSSBC <sub>750</sub>	市政污泥+PS	154.766	Freundlich 准二级动力学模型	本实验
2	SMB	市政污泥+反洗铁泥	47.44	Langmuir 准二级动力学模型	[13]
3	SCK700	市政污泥	56.1	未披露	[11]
4	SB	市政污泥	19.21	Langmuir 准二级动力学模型	[48]
5	MP-10	滤池反冲洗含铁污泥	99.4	Langmuir(未披露)	[49]
6	SRHB	稻壳+市政污泥	22.59	Langmuir+Freundlich 准二级动力学模型	[50]
7	NC	造纸污泥	50	Langmuir 准二级动力学模型	[51]

由图 8(d) 结合表 3 的热力学参数显示,PS-MSSBC<sub>750</sub> 吸附 MB 过程的  $\Delta S^\theta$  值  $+0.04 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}) > 0$ ,表明吸附过程中固液界面分子排列的无序度增加,这种熵增现象可能源于 MB 分子在生物炭孔隙内的自由扩散及表面官能团的多点位吸附<sup>[52-53]</sup>。 $\Delta H^\theta = +9.769 \text{ kJ}/\text{mol}$  的正值验证了该过程的吸热本质<sup>[54]</sup>,这与材料孔隙活化及克服传质阻力所需能量输入的特性相符<sup>[10,41,52,55]</sup>。通过吉布斯自由能方程  $\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta$  计算发现,在 298~318 K 范围内  $\Delta G^\theta$  从  $-2.149 \text{ kJ}/\text{mol}$  降至  $-2.949 \text{ kJ}/\text{mol}$ ,每升高 10 K,PS-MSSBC<sub>750</sub> 吸附 MB 的吸附驱动力提升约  $0.4 \text{ kJ}/\text{mol}$ ,这种负值加深的趋势通常意味着吸附过程的自发性随温度升高而增强,升高吸附体系温度对吸附 MB 是有利的<sup>[56-57]</sup>。

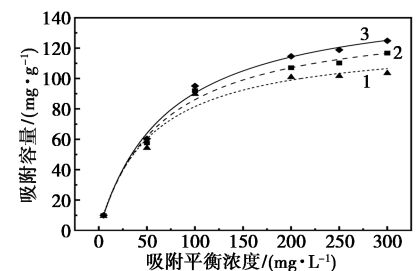
表 3 吸附动力学、吸附等温线及吸附热力学模型拟合参数

	拟合模型	参数	$R^2$
吸附动力学	准一级动力学	$k_1(k_2)/\text{min}^{-1}$	0.98849
		$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	18.599
	准二级动力学	0.001	0.98928
吸附等温线	Langmuir	$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	0.9953
		$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	154.766
	Freundlich	$1/n$	$K_F$
		0.427	11.499

吸附热力学	Van't Hoff	$T/\text{K}$	$K_d$	$\Delta G/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
		298	2.374	-2.149	9.769	0.040
		308	2.721	-2.549		
		318	3.041	-2.949		



1—准一级动力学模型;2—准二级动力学模型  
(a) 吸附动力学模型



1—298 K;2—308 K;3—318 K  
(b) Langmuir 模型

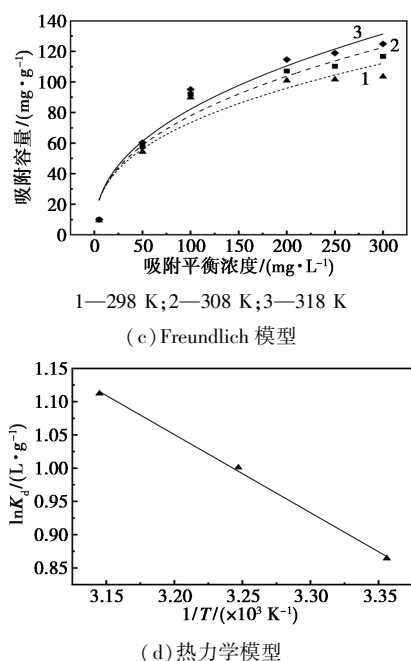


图8 吸附动力学、吸附等温线及吸附热力学模型拟合

## 2.6 可重复利用性

PS-MSSBC<sub>750</sub> 的重复利用性能如图9所示, 经历3次吸附-解吸循环后, 其对MB的去除率仍保持88.5%以上, 平衡吸附量从22.317 mg/g降至18.125 mg/g(降幅不足18%)。相比吴瑶<sup>[29]</sup>研究的水稻秸秆生物炭, 本材料的再生优势显著, 这可能与PS掺杂对材料结构的强化有关, PS掺杂所产生的空腔内隔膜不仅增加了材料的比表面积, 同时能够有效缓解孔隙坍塌, 进而提升了材料的循环利用性能。

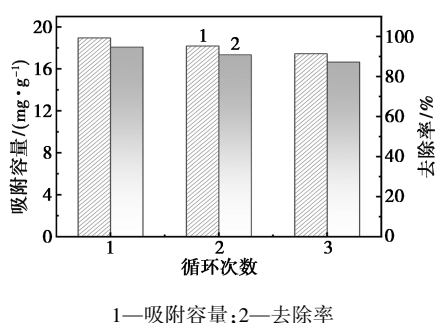


图9 循环再生对PS-MSSBC<sub>750</sub>性能影响

## 3 结论

本研究采用浸渍-热解法制备PS-MSSBC<sub>750</sub>, 基于“以废治废”策略高效去除水中MB。研究表明, 所制备的PS-MSSBC<sub>750</sub>具有丰富的表面官能团结构(C—O、C=C、C=O、—C=C—H、O—H等), 以介

孔为主(平均孔径7.61 nm)的丰富比表面积(56.57 m<sup>2</sup>/g), 良好的磁回收性能(超顺磁特性, 24.439 7 emu/g)。正交实验结果表明, 各因素对吸附率的影响排序为: PS-MSSBC<sub>750</sub>投加量>MB初始浓度>温度>pH。优化条件下(2 g/L投加量、318K、20 mg/L初始浓度、pH=5), PS-MSSBC<sub>750</sub>对MB去除率可达99.25%, 理论最大吸附量为154.766 mg/g。吸附过程符合准二级动力学( $R^2=0.98928$ )及Langmuir模型( $R^2=0.9953$ ), 吸附过程以单层化学吸附为主, 具有自发吸热特性。该研究为污泥资源化与染料废水治理提供了兼具高吸附容量、高效分离和低再生损耗的创新型解决方案。另外, 对吸附过程的机制有待深入研究, 同时对该材料在印染行业这一复杂水质工程应用过程中的效能有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 王佳琪, 柳蒙蒙, 汪志永, 等. 典型工业废水有机污染物特征和分析方法[J]. 工业水处理, 2025, 45(10): 37-52.
- [2] 唐雅兰, 蒋学金. 纳米复合材料在印染废水处理中的应用机制与发展趋势[J]. 印染助剂, 2025, 42(3): 22-27.
- [3] 王颖洁, 努热曼古丽·图尔荪, 谢开, 等. 辣椒秸秆基活性炭对锌离子和MB染料的吸附性能研究[J]. 应用化工, 2025, 54(4): 934-940.
- [4] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. “十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划[R]. 北京, 2021.
- [5] Chen L, Wang S, Meng H, et al. Synergistic effect on thermal behavior and char morphology analysis during co-pyrolysis of paulownia wood blended with different plastics waste[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111(9): 834-846.
- [6] Tan X F, Liu Y G, Gu Y L, et al. Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: A review[J]. Bioresource Technology, 2016, 212(6): 318-333.
- [7] Ifthikar J, Wang J, Wang Q, et al. Highly efficient lead distribution by magnetic sewage sludge biochar: Sorption mechanisms and bench applications[J]. Bioresource Technology, 2017, 238(8): 399-406.
- [8] 姜丽思, 刘子瑞, 姜美琪, 等. 微/纳米塑料对农作物的毒性效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 265-279.
- [9] 汪刚, 余广炜, 谢胜禹, 等. 添加不同塑料与污泥混合热解对生物炭中重金属的影响[J]. 燃料化学学报, 2019, 47(5): 611-620.
- [10] Mian M M, Ao W, Deng S. Sludge-based biochar adsorbent: Pore tuning mechanisms, challenges, and role in carbon sequestration[J]. Biochar, 2023, 5(1): 83.
- [11] Sierra I, Iriarte-Velasco U, Ayastuy J L, et al. Production of magnetic sewage sludge biochar: Investigation of the activation mechanism and effect of the activating agent and temperature[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, 13(18): 17101-17108.
- [12] Su X, Wang X, Ge Z, et al. KOH-activated biochar and chitosan composites for efficient adsorption of industrial dye pollutants[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486(4): 150387.
- [13] Zeng H, Qi W, Zhai L, et al. Preparation and characterization of sludge-based magnetic biochar by pyrolysis for methylene blue removal[J]. Nanomaterials (Basel), 2021, 11(10): 11102473.
- [14] Lima E C, Gomes A A, Tran H N. Comparison of the nonlinear and linear forms of the van't Hoff equation for calculation of adsorption

- thermodynamic parameters ( $\Delta S^\circ$  and  $\Delta H^\circ$ ) [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 311(8): 113315.
- [15] Zhang M, Gao B, Varnoosfaderani S, *et al.* Preparation and characterization of a novel magnetic biochar for arsenic removal [J]. *Biore-source Technology*, 2013, 130(2): 457-462.
- [16] Wang X B, Ma D Y, Jin Q M, *et al.* Synergistic effects of biomass and polyurethane co-pyrolysis on the yield, reactivity, and heating value of biochar at high temperatures [J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 194(11): 106127.
- [17] Li W, Meng J, Zhang Y, *et al.* Co-pyrolysis of sewage sludge and metal-free/metal-loaded polyvinyl chloride (PVC) microplastics improved biochar properties and reduced environmental risk of heavy metals [J]. *Environ Pollut*, 2022, 302(6): 119092.
- [18] 汪金鹏. 磁性生物炭的制备及其对水中有机污染物的吸附特性研究 [D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2021.
- [19] 王仕超. 磁性污泥基生物炭的制备及其吸附性能研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [20] 潘紫倩, 黄华军, 何小武, 等. 污泥液化生物炭对亚甲基蓝的吸附特性及机理 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 217-226.
- [21] Shchukarev A, Korolkov D. XPS Study of group IA carbonates [J]. *Open Chemistry*, 2004, 2(2): 347-362.
- [22] Nohira H, Tsai W, Besling W, *et al.* Characterization of ALCV-D- $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  layer using X-ray photoelectron spectroscopy [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, 303(1): 83-87.
- [23] Biesinger M C, Payne B P, Grosvenor A P, *et al.* Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(7): 2717-2730.
- [24] Grosvenor A P, Kobe B A, Biesinger M C, *et al.* Investigation of multiplet splitting of Fe 2p XPS spectra and bonding in iron compounds [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2004, 36(12): 1564-1574.
- [25] 李丹阳. 几种生物炭及改性材料对水中镉离子的吸附性能及机理研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [26] Ge J, Hu Y, Biasini M, *et al.* Superparamagnetic magnetite colloidal nanocrystal clusters [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2007, 46(23): 4342-4345.
- [27] 张明明. 生物炭改性材料的制备及其对水体中六价铬的吸附机理研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [28] Kikuchi Y, Qian Q, Machida M, *et al.* Effect of ZnO loading to activated carbon on Pb(II) adsorption from aqueous solution [J]. *Carbon*, 2006, 44(2): 195-202.
- [29] 吴瑶. 水稻秸秆生物炭协同过硫酸钠降解水中苯胺和罗丹明 B 的效果与机制研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [30] 陈凤婷. 生物炭材料对亚甲基蓝和磷的吸附效果和吸附机理研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- [31] 张鹏会, 李艳春, 胡浩斌, 等. 银杏叶生物炭对亚甲基蓝的吸附特性 [J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(11): 1229-1234.
- [32] Fang W, Zhou Y, Cheng M, *et al.* Effective adsorption performance and mechanism of methylene blue from dye wastewater by humic acid sucrose-modified red mud [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 191(Part A): 1168-1180.
- [33] He Y, Zheng Y, Liu X, *et al.* Polyvinyl alcohol-citric acid: A new material for green and efficient removal of cationic dye wastewater [J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 15(22): 4341.
- [34] 周勇. 改性玉米秸秆吸附水液中溶橙黄 II 染料及其过程参数优化 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [35] 许伟, 刘军利, 孙康, 等. 颗粒活性炭对亚甲基蓝的吸附与再生研究 [J]. *林产化学与工业*, 2024, 44(3): 69-77.
- [36] Kwikima M M, Chebude Y, Meshesha B T. Kinetics, adsorption isotherms, thermodynamics, and desorption studies of cadmium removal from aqueous solutions using bamboo sawdust/rice husk biochar [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13(11): 9367-9379.
- [37] 肖凯军, 何婷琳. 烧结聚乙烯-活性炭的亚甲基蓝吸附动力学 [J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(11): 127-132.
- [38] Salleh M A M, Mahmoud D K, Karim W A W A, *et al.* Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review [J]. *Desalination*, 2011, 280(1/3): 1-13.
- [39] 张妍杰, 王欢, 蔡玉福, 等. 改性柚子皮生物炭吸附亚甲基蓝性能研究 [J]. *化学试剂*, 2022, 44(6): 822-827.
- [40] 解鑫颖, 孙悦莹, 傅晓旭, 等. 改性花生壳生物炭吸附典型烷基和氯代有机磷阻燃剂的机理研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 41(10): 1367-1380.
- [41] 孙辉, 李逢春, 丰江丽, 等.  $\text{NH}_2$ -MOF-199@粘胶复合非织造材料的制备及有机染料吸附性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(8): 1-10.
- [42] 韩冲, 杨合, 薛向欣. 亚甲基蓝在  $\text{CaTiO}_3$  上的吸附动力学 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(1): 73-76.
- [43] 李丙国, 赵岩, 刘逸杨. 柠檬渣活性炭制备及其亚甲基蓝吸附性能研究 [J]. *化学工程与技术*, 2024, 14(4): 277-286.
- [44] 徐恩兵, 李坤权, 朱志强, 等. 双孔介孔碳的合成及其对亚甲基蓝的吸附 [J]. *环境化学*, 2015, 34(1): 137-143.
- [45] 张英. 不同来源生物质生物炭的制备、表征及对 Cr(VI) 和偶氮染料的吸附研究 [D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [46] Kyzas G Z, Deliyanni E A, Matis K A. Graphene oxide and its application as an adsorbent for wastewater treatment [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2013, 89(2): 196-205.
- [47] 常春, 刘天琪, 王瑀婷, 等. 水热法制备玉米叶基生物炭对亚甲基蓝的吸附性能研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(7): 2680-2689.
- [48] Ahmad A, Khan N, Giri B S, *et al.* Removal of methylene blue dye using rice husk, cow dung and sludge biochar: Characterization, application, and kinetic studies [J]. *Biore-source Technology*, 2020, 306(6): 123202.
- [49] Zhu S, Fang S, Huo M, *et al.* A novel conversion of the groundwater treatment sludge to magnetic particles for the adsorption of methylene blue [J]. *J Hazard Mater*, 2015, 292(7): 173-179.
- [50] Chen S, Qin C, Wang T, *et al.* Study on the adsorption of dyestuffs with different properties by sludge-rice husk biochar: Adsorption capacity, isotherm, kinetic, thermodynamics and mechanism [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 285(7): 62-74.
- [51] Chaukura N, Murimba E C, Gwenzi W. Sorptive removal of methylene blue from simulated wastewater using biochars derived from pulp and paper sludge [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2017, 8(11): 132-140.
- [52] Shi L, LaCour R A, Qian N, *et al.* Water structure and electric fields at the interface of oil droplets [J]. *Nature*, 2025, 640(4): 87-93.
- [53] 代泽宇, 周剑林, 刘伟银, 等.  $\text{K}^+$  改性生物炭对亚甲基蓝吸附性能的影响 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(6): 2419-2430.
- [54] Saha P, Chowdhury S, Gupta S, *et al.* Insight into adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of Malachite Green onto clayey soil of Indian origin [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 165(3): 874-882.
- [55] 荣琨, 李学平, 陈红, 等. 生物炭负载绿色纳米铁去除水中亚甲基蓝的性能与机理 [J]. *环境工程学报*, 2024, 18(11): 3197-3208.
- [56] Salima A, Benaouda B, Noureddine B, *et al.* Application of *Ulva lactuca* and *Systocera stricta* algae-based activated carbons to hazardous cationic dyes removal from industrial effluents [J]. *Water Res*, 2013, 47(10): 3375-3388.
- [57] 许婉冰, 唐东山, 牛洁, 等. 锌镍铁三元水滑石的制备及其对铀的吸附性能研究 [J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(1): 14-24. ■