



生物发酵前处理生物炭对亚甲基蓝的吸附研究

蔡成坤¹, 魏红福¹, 刘希阳², 王亚洲^{1,3}

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010; 2. 西南科技大学材料与化学学院, 四川绵阳 621010; 3. 四川农业大学资源学院, 四川成都 611130)

[摘要] 原始生物炭由于比表面积小、官能团含量低, 吸附性能受到影响。为提高生物炭的吸附性能, 以棉秆生物质为基质, 采用生物质微生物发酵前处理结合低温热空气碳化(TAT)技术制备高比表面积、高含氧官能团的生物炭, 并通过扫描电镜(SEM)对发酵前后棉秆生物质的形貌进行表征, 采用 N_2 吸附-脱附实验、傅里叶红外变换(FT-IR)、拉曼光谱对所制备生物炭的比表面积、官能团进行分析。结果表明, 微生物发酵前处理所得的棉秆生物质表面附着大量微生物, 微生物的分解作用破坏了生物质形貌结构, 使所制备的生物炭的比表面积由 $0.01\text{ m}^2/\text{g}$ 提高至 $20.53\text{ m}^2/\text{g}$, C—O及其他含氧官能团含量大幅增加。吸附实验表明, 微生物发酵前处理所得的棉秆基生物炭对亚甲基蓝(MB)的吸附容量为 64.9 mg/g , 是直接碳化制备的生物炭吸附容量的8倍; 发酵前后棉秆生物质所制备的2种生物炭对MB的吸附均符合准二级动力学模型, 其吸附过程受生物炭活性位点数和生物炭层状结构的控制; 羟基在生物炭和MB之间的相互作用中起着关键作用, 是主要的活性吸附位点。

[关键词] 亚甲基蓝; 生物炭; 发酵; 棉秆; 含氧官能团

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)03-0080-07

Study on the adsorption of biochar pre-treated by a microbial fermentation to methylene blue

CAI Chengkun¹, WEI Hongfu¹, LIU Xiyang², WANG Yazhou^{1,3}

(1. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. School of Materials and Chemistry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
3. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Due to the small specific surface area and low functional group content of biochar, its adsorption capacity is limited. In order to improve the adsorption performance of biochar, cotton stalk biochar was prepared by microbial pretreatment and low temperature hot air carbonization (TAT) technology. The prepared biochar has high specific surface area and high oxygen-containing functional groups. The morphology of cotton stalk biomass before and after fermentation was characterized by scanning electron microscopy (SEM). The specific surface area and functional groups of the biochar prepared were analyzed by N_2 adsorption and desorption experiment, fourier transform infrared (FT-IR) and Raman spectroscopy. The results showed that a large number of microorganisms were attached to the surface of cotton stalk biomass obtained from microbial fermentation pretreatment, and the decomposition of microorganisms destroyed the biomass morphology, so that the specific surface area of the prepared biochar increased from $0.01\text{ m}^2/\text{g}$ to $20.53\text{ m}^2/\text{g}$, and the contents of C—O and other oxygen-containing functional groups increased greatly. The adsorption experiment showed that the adsorption capacity of cotton straw-based biochar obtained from microbial fermentation pretreatment for methylene blue (MB) was 64.9 mg/g , which was 8 times of that of biochar prepared by direct carbonization. The adsorption of MB by two kinds of biochar prepared from cotton stalk biomass before and after fermentation conformed to the quasi-second-order kinetic model. The adsorption process was controlled by the number of active sites of biochar and the layered structure of biochar. Hydroxyl played a key role in

[基金项目] 全国大学生创新创业项目(202110619001); 西南科技大学大学生创新基金项目精准资助专项(JZ21-071)

the interaction between biochar and MB, and was the main active adsorption site.

Key words: methylene blue; biochar; fermentation; cotton stalk; oxygen-containing functional group

石油、医药、油漆、纺织、造纸技术在进步的同时,所导致的环境问题也并行增加。据统计,世界范围内约有13%的染料被排放到污水中。亚甲基蓝(MB)是棉花、木材和丝绸染色中最常用的染料之一^[1]。MB排放在水中,不仅会恶化环境,还会危害各种生物^[2],因此,有必要在排放前去除废水中的MB分子。目前,可以采用絮凝法、臭氧法、过滤法、离子交换法、辐照法和吸附法等多种技术从废水中去除MB^[3-4],吸附法因其高效和吸附材料易于再生的特点,成为最有前途的技术之一^[5]。与其他吸附剂相比,生物炭成本较低,在吸附研究中引起了广泛关注。然而,原始生物炭因比表面积小,有效官能团含量少,对污染物吸附率非常低,限制了其在吸附中的应用,目前主要通过对其进行物理/化学活化以提高其孔隙度进而改善其性能^[6-8]。然而,生物炭的活化需要高温(通常>600℃)和额外的活化剂(例如CO₂、H₂O、KOH或ZnCl₂),这导致产品产量低、生产成本低,且表面官能团损失显著。

近年来,有研究表明,微生物可以通过分泌各种酶(纤维素酶、半纤维素酶、木质素酶等)破坏生物质结构,使生物质形成多孔结构,增加其比表面积,从而对其进行活化^[9-10]。Ping WANG等^[11]利用平菇菌丝分泌的纤维素酶和半纤维素酶破坏植物细胞壁结构,提高了植物基质比表面积。Weixia ZHANG等^[12]采取真菌分解策略,采用曲霉、木霉菌和黄孢原毛平革菌分别定向分解荷叶中的半纤维素、纤维素和木质素,制备出高比表面积、孔径分布不同的活性炭。

生物炭上的含氧官能团(如羟基、羧基、羰基)对生物炭去除水中污染物起着关键作用,是主要的活性吸附位点^[13]。目前,采用高浓度氧化剂氧化生物炭表面含炭物质被认为是制备高含氧生物炭的有效策略。然而,由于生产效率低,这种策略很难在实际生产中推广。此外,化学氧化会产生大量废水,这也会限制其实际应用。据报道,微生物发酵前处理可以有效增加生物质中的含氧官能团。如黄顺等^[14]

发现,微生物发酵能够增加中药渣含氧官能团的种类和数量。刘畅等^[15]发现,经过堆肥发酵,腐殖酸中羧酸、醛、酮、羧酸酐等含氧物质明显增加。基于此,本研究拟对棉秆生物质进行微生物发酵前处理以制备富含氧官能团的生物质,同时结合低温热空气氧化碳化(TAT)技术对其进行处理以制备富含含氧官能团的生物炭^[16],并将其用于对MB的吸附研究,以期生物炭快速走向实际应用的工程策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

微生物堆肥菌种由酵母、乳酸菌、菌丝体真菌、芽孢杆菌等复合而成,购自北海强兴生物科技有限公司(中国广西);棉秆生物质购自中国新疆。盐酸(HCl)、乙醇均为分析纯,购自阿拉丁生化科技有限公司(中国上海)。

1.2 生物炭的制备

生物质微生物发酵。用0.1 mol/L盐酸冲洗棉花秸秆,并于60℃烘箱中将其烘干。之后将棉秆经高速破碎机破碎,过0.25 mm筛。向发酵罐中加入菌种和秸秆粉末(质量比为1:50),同时加入大量水,搅拌均匀,使含水率保持在60%~70%之间,发酵15 d,得到发酵后的棉秆。

低温热空气氧化碳化。将含有约30 g发酵前/后棉秆生物质的坩埚放入马弗炉中,以10℃/min的升温速率从室温加热至300℃,并在300℃下保持30 min,制得棉秆基生物炭^[17]。为方便描述,将发酵后棉秆制备的生物炭标记为Fermentation biochar,未经发酵的棉秆所制备生物炭标记为Raw biochar。

实验还在碳化温度220℃、碳化时间240 min条件下通过常规水热碳化(HTC)制备了富氧棉秆基生物炭,将其标记为HTC biochar,用以与上述所制备的Fermentation biochar、Raw biochar进行对比。

1.3 吸附实验

将5 mg生物炭加入到20 mL质量浓度为10 mg/L

的MB溶液中,室温下以250 r/min的转速磁力搅拌3 h直至反应平衡,之后使用微孔滤膜过滤混合溶液得到吸附后溶液。使用紫外分光光度计在666 nm处测定吸附前后溶液中MB的浓度。

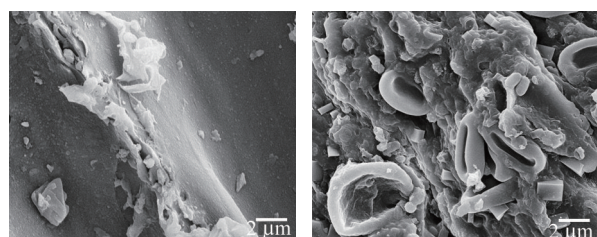
1.4 测试与表征

采用场发射扫描电镜(SEM)观察发酵前后棉秆生物质表面的微观结构;采用ASAP2460型比表面积分析仪测定Fermentation biochar和Raw biochar的比表面积;采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)确定Fermentation biochar和Raw biochar表面的官能团,波数范围为4 000~400 cm^{-1} ;采用Renishaw InVia激光拉曼光谱仪对Fermentation biochar和Raw biochar进行拉曼光谱分析。

2 结果与讨论

2.1 生物炭的表征

为考察微生物发酵对棉花秸秆生物质形貌的影响,通过SEM对比了发酵前后生物质的表面,结果见图1。



(a) 原始棉花秸秆 (b) 微生物发酵后的棉花秸秆

图1 棉花秸秆生物质的SEM

Fig. 1 SEM of cotton stalk biomass

由图1(a)可知,未经发酵的棉花秸秆生物质表面致密、光滑,仅有一些破碎的片层结构。而图1(b)显示,经过微生物发酵后,大量镰刀状、球状、线状等复杂微生物遍布棉花秸秆表面。各种微生物以生物质为培养基,通过分泌各种胞外酶,分解生物质,吸收养分。

为进一步探究微生物发酵是否对生物炭的比表面积产生实质影响,采用 N_2 吸附-脱附等温线测定了Fermentation biochar和Raw biochar的比表面积和孔径分布,结果见表1。

表1 比表面积及孔隙度分析

Table 1 Specific surface area and porosity analysis		
材料	Langmuir法比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔体积/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
Fermentation biochar	20.53	0.000 914
Raw biochar	0.01	0.000 000

由表1可知,Fermentation biochar的比表面积和孔体积都远远大于Raw biochar相应的值,这是因为微生物发酵产生的胞外酶(如纤维素酶、半纤维素酶、木质素酶)分解了细胞壁,使之形成穿孔,同时提高了比表面积。

为了进一步说明微生物发酵对生物炭表面官能团的影响,通过FT-IR对Fermentation biochar和Raw biochar表面官能团进行了测定,并对比了采用HTC制备的富氧棉秆基生物炭表面的官能团,结果见图2。

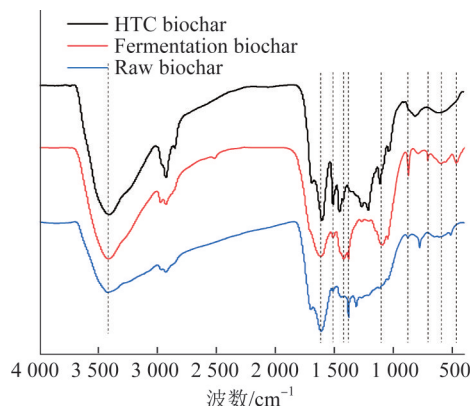


图2 生物炭的红外光谱

Fig. 2 FT-IR spectra of biochars

由图2可知,在1 400 cm^{-1} 处是C—O的反对称伸缩振动特征峰,1 100 cm^{-1} 附近主要是C—O拉伸振动的特征峰,500 cm^{-1} 附近是C—C—O伸缩振动的特征峰,900 cm^{-1} 左右是—COH(酸碱)面外弯曲的特征峰,在以上峰处Fermentation biochar比Raw biochar和HTC biochar表现出更强的峰,表明Fermentation biochar相对于Raw biochar和HTC biochar有着更多的含氧官能团,即微生物发酵处理有利于形成含氧官能团,而含氧官能团有助于对MB的吸附^[18-19]。

为了说明Raw biochar和Fermentation biochar的无序和缺陷结构,对二者进行了拉曼光谱表征,结果

见图3。

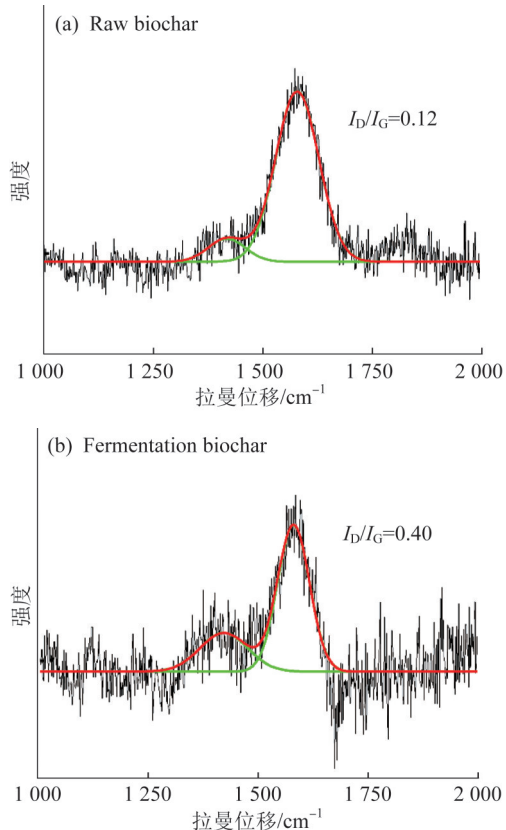


图3 生物炭的拉曼光谱

Fig. 3 Raman spectra of biochars

如图3所示,Raw biochar和Fermentation biochar的 I_D/I_G 值分别为0.12和0.40。Fermentation biochar的 I_D/I_G 值高于Raw biochar,表明Fermentation biochar的缺陷较多,这可归因于微生物部分分解生物物质使其形成的高度多孔和无序的结构。

2.2 MB吸附实验

2.2.1 Fermentation biochar对MB的吸附性能

将一定质量的Fermentation biochar加入到20 mL质量浓度为10 mg/L的MB溶液中,以250 r/min的转速磁力搅拌3 h直至反应平衡,对比Raw biochar,考察其对MB的吸附性能,结果见图4。

由图4可知,相较于Raw biochar, Fermentation biochar在各浓度梯度下对MB的吸附率均大大提高,当Fermentation biochar投加质量浓度为2.0 g/L时,其对MB的吸附率大于90%,此时,Raw biochar对MB的吸附率低于10%。由此可知,棉秆经生物发酵前处理后制备的生物炭吸附能力大大提高。

此外,由图4还可知,起初随着Fermentation bio-

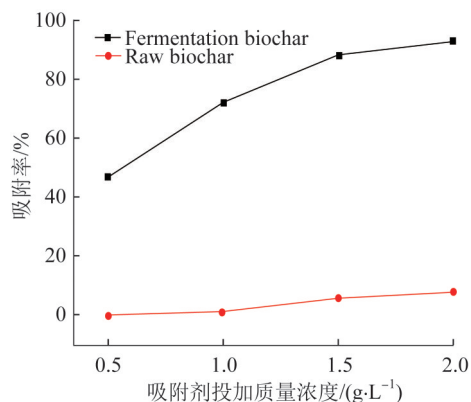


图4 生物炭投加质量浓度对吸附率的影响

Fig. 4 Effect of mass concentration of biochars on adsorption rate

char投加质量浓度不断增加,其对MB的吸附率迅速增加,当吸附剂投加质量浓度为1.5 g/L时,吸附率达到88%,但当吸附剂投加质量浓度由1.5 g/L继续增加至2.0 g/L时,吸附率增加不明显;而Raw biochar对MB的吸附率与其投加质量浓度相关性不大。综合成本分析,棉秆基生物炭最佳投加质量浓度为1.5 g/L,后续实验均在此条件下进行。

2.2.2 吸附动力学

在MB初始质量浓度为10 mg/L, Fermentation biochar和Raw biochar投加质量浓度均为1.5 g/L条件下,研究了它们对MB的吸附动力学,并采用准一级动力学模型和准二级动力学模型对实验数据进行拟合,结果见图5和表2。

由图5可知,随着反应时间的延长,生物炭对MB的吸附量先是迅速增加,然后缓慢增加直至达到吸附平衡,其中Fermentation biochar在反应时间100 min左右达到对MB的吸附平衡,Raw biochar在反应时间50 min达到对MB的吸附平衡。在吸附初期,由于生物炭表面有大量的活性位点,其对于MB具有较快的吸附速率,而随着反应的进行,生物炭活性中心逐渐被MB占据而减少,吸附量缓慢增加。由图5和表2可知, Fermentation biochar和Raw biochar的准一级动力学模型相关系数 R^2 分别为0.955 5和0.801 0,准二级动力学模型相关系数 R^2 分别为0.997 8和0.964 0,因此2种材料对MB的吸附更符合准二级动力学模型,表明Fermentation biochar和Raw biochar对MB的吸附过程受化学吸附机理控制,即受生物炭活性位点数和生物炭层状结构的控制。

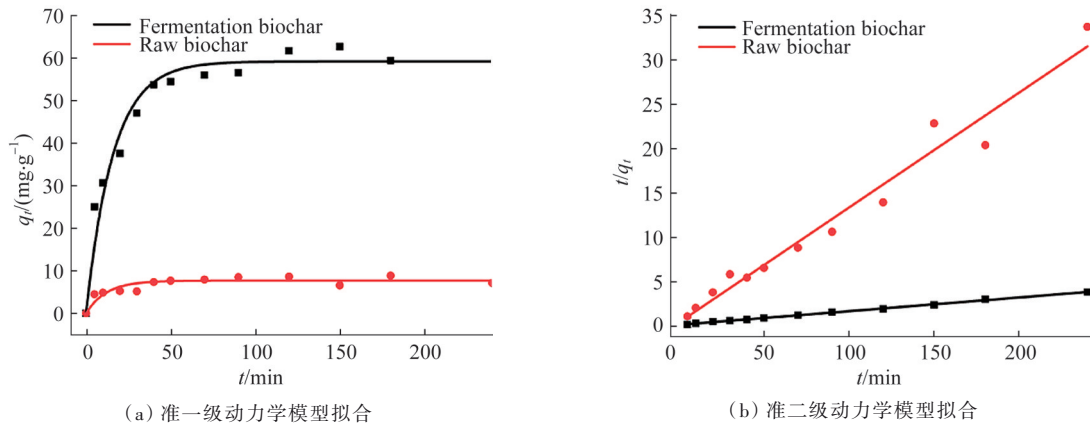


图5 Fermentation biochar和Raw biochar吸附MB的动力学

Fig. 5 Adsorption kinetics of MB by Fermentation biochar and Raw biochar

表2 动力学拟合参数

Table 2 The kinetic fitting parameters

吸附剂	准一级动力学			准二级动力学		
	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	k_1	R^2	$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	k_2	R^2
Fermentation biochar	59.10	0.062 5	0.955 5	64.93	0.004 6	0.997 8
Raw biochar	7.66	0.084 1	0.801 0	7.73	0.020 3	0.964 0

2.2.3 吸附热力学

在Fermentation biochar和Raw biochar投加质量浓度均为1.5 g/L,反应时间180 min条件下对活性炭吸附MB的热力学行为进行研究,并采用Langmuir吸附等温模型和Freundlich吸附等温模型对实验数据进行拟合,结果见图6和表3。

由图6可知,Fermentation biochar对MB的吸附量明显大于Raw biochar相应的值,结合表3可以看出,Freundlich模型对Fermentation biochar吸附MB行为的拟合较好,表明Fermentation biochar对MB的吸附是多分子层吸附,吸附剂表面不均匀,Fermentation biochar与MB之间存在多种机理的吸附过程。

2.3 生物炭吸附MB机理

为了进一步阐明生物炭对MB的吸附机理,采用FT-IR对吸附后的生物炭进行表征,结果见图7。

图7显示了吸附MB后Raw biochar和Fermentation biochar的红外光谱。Fermentation biochar吸附MB后,位于 3414 cm^{-1} 处的—OH的伸缩振动峰强度降低,表明

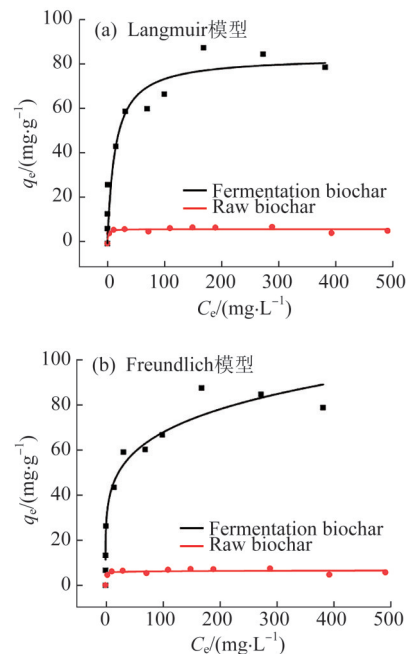


图6 Fermentation与Raw biochar吸附MB的吸附等温线拟合

Fig. 6 Fitting the adsorption isotherm of MB by Fermentation biochar and Raw biochar

羟基在生物炭富集分离MB过程中起到了重要作用;位于 2957 、 2922 cm^{-1} 处的峰强增加,其分别代表—CH₃

表3 Fermentation与Raw biochar吸附MB的等温线拟合参数

Table 3 Adsorption isotherm fitting parameters of MB by Fermentation biochar and Raw biochar

吸附剂	Langmuir模型			Freundlich模型		
	$Q_{\max}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$K_L/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	R^2	$1/n$	K_F	R^2
Fermentation biochar	83.49	0.073 4	0.855 0	0.204 5	26.40	0.948 4
Raw biochar	6.43	0.884 0	0.176 7	0.033 1	5.30	0.006 1

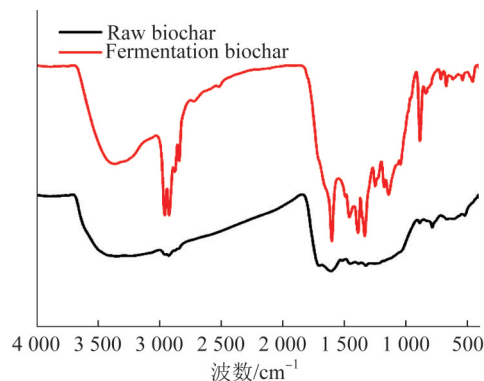


图7 吸附后生物炭的FT-IR图谱

Fig. 7 FT-IR spectra of biochars after adsorption

和 $-\text{CH}_2-$ 的 $\text{C}-\text{H}$ 振动;此外,在 1590 、 1488 cm^{-1} 处的吸收峰对应苯环的骨架振动,在 1331 cm^{-1} 处的峰为 $-\text{CH}_3$ 的对称变形振动引起的吸收峰,在 1254 cm^{-1} 处的吸收峰为 $\text{C}-\text{N}$ 的指纹特征峰,在 1136 cm^{-1} 处的峰是 $\text{C}-\text{N}$ 伸缩振动峰, 1136 cm^{-1} 后面出现的峰是芳香环指纹区的特征峰。这些新增的吸收峰正是MB的特征吸收峰,这说明MB已经被吸附在Fermentation biochar上。Raw biochar吸附MB后,并未出现新的特征峰,表明Raw biochar对MB的富集分离效率低。综上, Fermentation biochar吸附MB后,出现MB的特征峰,表明MB已被生物炭吸附, Fermentation biochar的羟基吸收峰强度明显下降,表明羟基在MB的富集分离过程中起到了重要作用。

3 结论

本研究以棉秆生物质为基质,通过微生物发酵、低温热空气碳化制备了富氧官能团的生物炭Fermentation biochar,并探讨了其对亚甲基蓝的吸附性能,得到如下结论:

(1)微生物发酵前处理所得的棉秆生物质表面附着大量微生物,微生物的分解作用破坏了生物质形貌结构,导致以其为原料生成的生物炭的比表面积增大,且微生物发酵增加了所制备生物炭中含

氧官能团的数量,为吸附MB提供了更多的活性位点。

(2) Fermentation biochar能有效吸附溶液中的MB,其吸附能力远高于直接碳化生物炭; Fermentation biochar对MB的吸附符合准二级动力学模型,其对MB的吸附过程受化学吸附机理控制,即受生物炭活性位点数和生物炭层状结构的控制; Fermentation biochar对MB的吸附为多分子层吸附^[25],吸附剂表面不均匀, Fermentation biochar与MB之间存在多种机理的吸附过程;吸附机理研究表明,生物炭上的含氧官能团在生物炭和MB之间的相互作用中起着关键作用,羟基是主要的活性吸附位点。

参考文献

- [1] 蒋婧,程锦程.多孔柱[5]芳烃聚合物的制备及其对有机污染物的吸附性能研究[J].铜陵学院学报,2018,17(6):113-117.
JIANG Jing, CHENG Jincheng. Preparation of porous pillar[5] arene polymer and its adsorption properties for organic pollutants[J]. Journal of Tongling University, 2018, 17(6): 113-117.
- [2] 张卡卡.苯胺-磺酸基苯胺共聚物的制备及其对染料吸附性能的研究[D].郑州:郑州大学,2014.
ZHANG Kaka. Facile high-yield synthesis of poly(aniline-co-m-sulfophenylenediamine) for dye removal[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [3] 杨俊晖,张惠灵,梁俊杰,等.壳聚糖/磁性榴莲生物炭对亚甲基蓝的吸附研究[J].环境科学与技术,2021,44(12):7-12.
YANG Junhui, ZHANG Huiling, LIANG Junjie, et al. Adsorption of methylene blue by chitosan/magnetic durian biochar[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(12): 7-12.
- [4] 张宏,褚玲,张文博,等.硫酸铁活化菜叶生物质炭对水中亚甲基蓝的去除研究[J].西北民族大学学报:自然科学版,2020,41(4):11-16.
ZHANG Hong, CHU Ling, ZHANG Wenbo, et al. Removal of methylene blue from water by activated vegetable leaf biochar with ferric sulfate[J]. Journal of Northwest Minzu University: Natural Science, 2020, 41(4): 11-16.
- [5] 徐仁扣,赵安珍,肖双成,等.农作物残体制备的生物炭对水

- 中亚甲基蓝的吸附作用[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 142-146.
- XU Renkou, ZHAO Anzhen, XIAO Shuangcheng, et al. Adsorption of methylene blue from water by the biochars generated from crop residues[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 142-146.
- [6] 孙晨. 改性生物炭对于水中重金属与有机污染物去除的性能与机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- SUN Chen. Modified biochars for heavy metal and organic pollutant removal: Performance and mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [7] 杨晓宇. 基于富钙生物炭的多重改性及其结构和吸附性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- YANG Xiaoyu. Research on multiple modifications based on calcium-rich biochar and its structure and adsorption performance[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021.
- [8] 朱留凯, 昌莹鸽, 种元辉, 等. 生物质活性炭的改性方法研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(7): 1900-1904.
- ZHU Liukai, CHANG Yingge, CHONG Yuanhui, et al. Research progress in modification methods of biochar[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(7): 1900-1904.
- [9] 刘江. 柠檬果胶工艺制备及其在调配型酸性乳饮料中的应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- LIU Jiang. Preparation of lemon pectin and its application in formulated acidic milk beverage[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [10] 张立秀. 酶制剂对不同种类和来源饲料养分利用率影响的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2002.
- ZHANG Lixiu. Effects of cellulase-containing enzyme preparation or phytase on the nutrient utilization of feeds of different kinds and sources[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2002.
- [11] WANG Ping, YE Huan, YIN Yaxia, et al. Fungi-enabled synthesis of ultrahigh-surface-area porous carbon[J]. Advanced Materials, 2019, 31(4): 1805134.
- [12] ZHANG Weixia, CHENG Hairong, NIU Qi, et al. Microbial targeted degradation pretreatment: A novel approach to preparation of activated carbon with specific hierarchical porous structures, high surface areas, and satisfactory toluene adsorption performance [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(13): 7632-7640.
- [13] 杨娟娟. 炭材料对钴的吸附行为研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- YANG Juanjuan. Sorption behavior of CO(II) on carbon[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [14] 黄顺. 中药渣与城市生活污水泥发酵无害化处理及物料降解机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- HUANG Shun. Study on harmless treatment and material degradation mechanism of traditional Chinese medicine residue and municipal sludge fermentation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [15] 油畅, 崔骏, 李强, 等. 堆肥腐殖酸形成及其电化学活性[J]. 环境科学研究, 2021, 34(12): 2980-2988.
- YOU Chang, CUI Jun, LI Qiang, et al. Formation and electrochemical activity of humic acid in compost[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(12): 2980-2988.
- [16] LI Liang, YANG Mei, LU Qian, et al. Oxygen-rich biochar from torrefaction: A versatile adsorbent for water pollution control [J]. Bioresource Technology, 2019, 294: 122142.
- [17] 毕一凡. 蔗渣生物质炭的制备及其对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- BI Yifan. Preparation of bagasse biochar and its adsorption of Cu^{2+} , Pb^{2+} and Zn^{2+} [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [18] ZHANG Ping, O'CONNOR D, WANG Yinan, et al. A green biochar/iron oxide composite for methylene blue removal[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 121286.
- [19] 祖林鹏, 邓斌, 杨成, 等. 笋壳渣对阴阳离子染料的吸附特征及机制研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(7): 109-117.
- ZU Linpeng, DENG Bin, YANG Cheng, et al. Adsorption characteristics and mechanism of anion and cation dyes by bamboo shoot shell residue [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42 (7) : 109-117.
- [作者简介] 蔡成坤(1999—), 本科。E-mail: cck152832@163.com。
通讯作者: 王亚洲, 硕士。E-mail: wangyazhou950808@163.com。
- [收稿日期] 2023-01-04(修改稿)