



# 辣椒秸秆生物炭对考马斯亮蓝染料的吸附性能研究

张 娟<sup>1,2,3</sup>, 孙 宇<sup>3</sup>, 黄贵琦<sup>1,2,3</sup>, 吴婉婧<sup>3</sup>, 李美玲<sup>3</sup>, 李思敏<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北工程大学河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北邯郸 056038;

2. 河北工程大学邯郸市水利利用技术重点实验室, 河北邯郸 056038;

3. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北邯郸 056038)

**[摘要]** 研究了不同热解温度下以辣椒秸秆为原材料制备的生物炭对水中考马斯亮蓝(CBB)染料的吸附特性, 并对生物炭进行表征。结果表明, 热解温度为 700 °C, 烧制 2 h 下制备的辣椒秸秆生物炭对考马斯亮蓝的去除效果最好。在生物炭投加量为 3 g/L, 考马斯亮蓝染料初始质量浓度为 50 mg/L, 溶液 pH 为 5, 反应温度为 25 °C 的条件下, 吸附在 120 min 左右达到平衡, 去除率可达 92.66%, 最大吸附量为 20.51 mg/g。该吸附过程为单层吸附, 符合伪二级动力学。辣椒秸秆生物炭可以有效去除水中的考马斯亮蓝染料。

**[关键词]** 辣椒秸秆; 生物炭; 考马斯亮蓝; 吸附

**[中图分类号]** TQ424.2; X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0118-06

## Adsorption characteristics study on coomassie bright blue dye by hot pepper straw biochar

ZHANG Juan<sup>1,2,3</sup>, SUN Yu<sup>3</sup>, HUANG Guiqi<sup>1,2,3</sup>, WU Wanjing<sup>3</sup>, LI Meiling<sup>3</sup>, LI Simin<sup>1,2,3</sup>

(1. Hebei Technology Innovation Center of Water Pollution Control and Water

Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Handan Key Laboratory of Water Utilization Technology, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** The adsorption characteristics of biochar prepared from pepper straw to coomasi bright blue dye in water at different pyrolysis temperatures were studied, and the biochar was characterized. The results showed that the removal effect of pepper straw biochar on coomassie bright blue was the best when the pyrolysis temperature and pyrolysis time was 700 °C and 2 h. Under the conditions of biochar dosage 3 g/L, initial mass concentration of coomassie bright blue 50 mg/L, pH 5, reaction temperature 25 °C, the adsorption reached equilibrium after 120 min, and the removal rate could reach 92.66%, with the maximum adsorption capacity 20.51 mg/g. The adsorption process was monolayer adsorption, which conformed to pseudo second order kinetics. Pepper straw biochar can effectively remove coomassie bright blue dye from water.

**Key words:** pepper straw; biochar; coomassie brilliant blue; adsorbent

由于染料行业的迅速发展,有机染料被广泛应用于造纸、皮革、化妆品、制药、纺织印染等行业<sup>[1]</sup>。然而,大多数有机染料大分子包含羟基、氨基、苯环和其他活性基团,具有着色能力强、生物降解性差等特点。据统计每年大概有 10%~15% 的染料在生产和使用过程中被释放到水体中,这不仅会导致水体

被污染,更会通过食物链富集作用严重威胁人类健康<sup>[2-3]</sup>。该类废水主要通过高级氧化法、生物法和吸附法等进行处理,其中生物炭吸附法因其原料来源广泛、成本低、适合于大规模工业化生产,被认为是一种有效的处理方法<sup>[4]</sup>。目前生物炭对于有机染料的吸附是一个热点研究方向,袁秦英<sup>[5]</sup>在 200~

**[基金项目]** 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-002);河北省重点研发计划项目(18273806D);河北省创新能力提升计划项目(20567646H);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(20312904004)

600 °C下制备了梧桐树皮生物炭用于吸附亚甲基蓝,200 °C下制备的生物炭在pH为11、亚甲基蓝质量浓度为20 mg/L、生物炭投加量为100 mg条件下,最大吸附量可达88.6 mg/g。孙玲等<sup>[6]</sup>投加200 mg在500 °C下制备的麦麸生物炭吸附15 mg/L的刚果红染料,最大吸附量为18.72 mg/g。江晨浩等<sup>[7]</sup>通过共沉淀法将 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 附载到蟹壳炭上,制备出的蟹壳活性炭比表面积可达2 023.90  $\text{m}^2/\text{g}$ ,在温度293 K,孔雀石绿溶液初始质量浓度为100 mg/L时,最大吸附容量为1 876.58 mg/g,去除率为93.83%。

生物炭的主要来源就是农林废弃物。近年来我国辣椒年种植面积稳定在 $2.1 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 以上,总产量达 $6.4 \times 10^7 \text{ t}$ <sup>[8]</sup>。种植辣椒可以生产大量农副产品,但同时也会产生大量农业废弃物,如辣椒秸秆。目前我国大部分地区辣椒秸秆的处理方法不够妥当,或被直接焚烧,或被堆弃在田间地头,既造成自然资源被浪费,又加剧了病虫害的传播,还会导致后续一系列污染问题的出现<sup>[9]</sup>。尤其是辣椒秸秆在堆弃腐败后会分解出一定量不利于田间作物生长的化感物质,使得辣椒秸秆难以直接还田<sup>[10]</sup>。辣椒秸秆碳含量高,灰分及硫含量低,具有制作生物炭的潜能<sup>[11]</sup>。但是,对辣椒秸秆生物炭的制备及其在有机染料吸附中的应用研究不多。本实验主要研究辣椒秸秆生物炭对水中考马斯亮蓝(CBB)染料去除效果,为辣椒秸秆资源化利用提供技术支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与材料

TU-1901 双光束紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,上海力辰仪器科技有限公司;HZQ-X100 恒温振荡培养箱,苏州培英实验设备有限公司;TL80-2 型医用离心机,江苏天力医疗器械有限公司;202-DB 恒温干燥箱,绍兴市易诚仪器制造有限公司。辣椒秸秆取自河北省邯郸市成安县。试剂均为分析纯,实验用水为去离子水。

### 1.2 生物炭的制备

将辣椒秸秆用去离子水反复清洗,以去除表面的尘土等杂质;将清洗后的辣椒秸秆在烘箱中完全干燥,破碎后装入有盖坩埚置于马弗炉中,设置温度分别为400、550、700 °C,焙烧2 h,以确定辣椒秸秆

生物炭的最适热解温度;待炭化完成,冷却后取出。将冷却后的炭化物研磨、冲洗、烘干,分别记为生物炭PC400、PC550、PC700。

使用扫描电镜(SEM)、比表面积分析仪(BET)和傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)分析制备的生物炭材料。

### 1.3 吸附实验

配制不同浓度的CBB溶液,分别加入一定量的辣椒秸秆生物炭,使用磁力搅拌器控制反应温度及搅拌强度,搅拌至规定时间后,用0.45  $\mu\text{m}$ 的滤膜分离出溶液中的生物炭粉末,用紫外分光光度计测定上清液中CBB的浓度,并计算吸附量和去除率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物炭表征

#### 2.1.1 扫描电镜

使用扫描电镜观察3种不同热解温度下的生物炭,结果如图1所示。

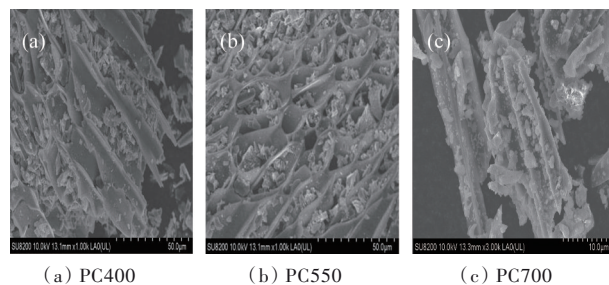


图1 辣椒秸秆生物炭扫描电镜

Fig. 1 Scanning electron microscope of biochar from pepper straw

由图1可知,PC400和PC550表面较为光滑,孔隙丰富,孔道较多,排列比较均匀,表面有少许絮状物以及由研磨产生的生物炭碎屑。热解温度的升高对生物炭表面形貌影响较大,生物炭表面结构会随温度的升高发生坍塌、断裂。可以明显看到,在700 °C的热解温度下,生物炭表面变得粗糙,出现了更多絮状附着物,更有利于吸附<sup>[12]</sup>。

#### 2.1.2 比表面积

辣椒秸秆生物炭的比表面积受温度影响较大。PC400的比表面积仅为6.499 7  $\text{m}^2/\text{g}$ ,PC550比表面积上升至28.885 3  $\text{m}^2/\text{g}$ 。随着热解温度的继续升高,700 °C时比表面积达到85.406 0  $\text{m}^2/\text{g}$ 。较中低温段,高温段热解能够使辣椒秸秆生物炭具有更大的比表面积。

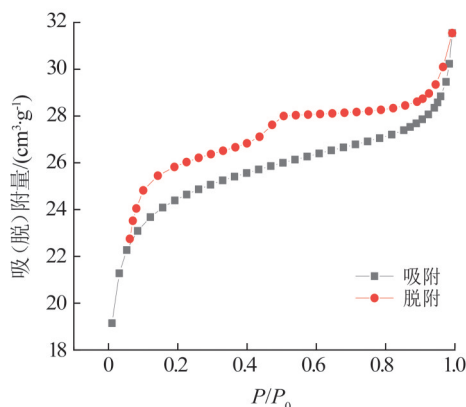
图2为PC700的N<sub>2</sub>吸脱附曲线。

图2 PC700氮气吸脱附等温线

Fig. 2 Nitrogen adsorption desorption isotherm of PC700

由图2可知,在低压区(相对压力小于0.1),N<sub>2</sub>吸附较快,在较高相对压力范围内也继续呈上升趋势。该曲线为IV类吸附等温线,比压高时有毛细凝聚现象产生,同时存在脱附滞后。产生这些现象的原因可能是发生凝聚时的蒸汽压力与发生蒸发时的凝聚压力不同,使得N<sub>2</sub>吸附量增加<sup>[13]</sup>。

### 2.1.3 傅里叶变换红外光谱

红外光谱可显示样品中主要官能团的特征吸收峰。图3为辣椒秸秆生物炭的红外光谱图。

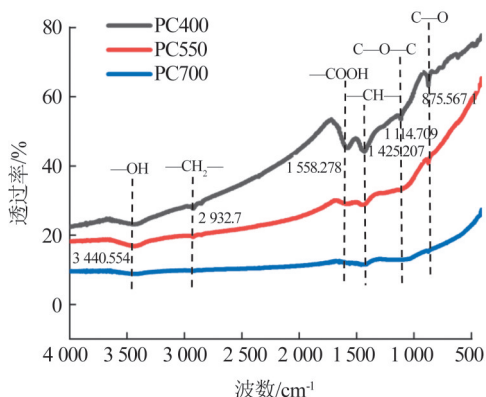


图3 辣椒秸秆生物炭红外光谱

Fig. 3 Infrared spectrum of biochar from pepper straw

图3中,3 440.554 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰主要归因于羟基的伸缩振动,2 932.7 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰一般认为是烷烃—CH的伸缩振动引起的。1 558.278 cm<sup>-1</sup>处—COOH的反对称伸缩振动和1 425.207 cm<sup>-1</sup>处—CH的弯曲振动通常被认为是苯环物质的特征吸附峰。1 114.709 cm<sup>-1</sup>处有一个小的C—O—C吸收峰,

875.567 1 cm<sup>-1</sup>处有一个明显的C—O吸收峰。这主要是因为辣椒秸秆中富含纤维素、多糖、半糖,导致生物炭中含有羟基、羧基、醚键等官能团。此外,随着温度的升高,羧基(1 558.278 cm<sup>-1</sup>)的伸缩振动峰逐渐减小<sup>[14-15]</sup>。通过红外表征结果可以清晰看出,高温热解后生物炭表面的一OH、—CH<sub>x</sub>、芳香族化合物等依然存在,使得π电子、络合等多种吸附形式发生作用,对有机染料的吸附作用更强<sup>[16]</sup>。

## 2.2 吸附条件考察

### 2.2.1 生物炭投加量

生物炭投加量是影响吸附效果的重要因素<sup>[17]</sup>。在实验温度恒定(25 ℃)、溶液原始pH为6、CBB初始质量浓度为50 mg/L的条件下,分别投加0.5、1、2、3、4、5 g/L生物炭至溶液中,吸附一定时间,考察生物炭投加量对CBB去除率的影响,结果如图4所示。

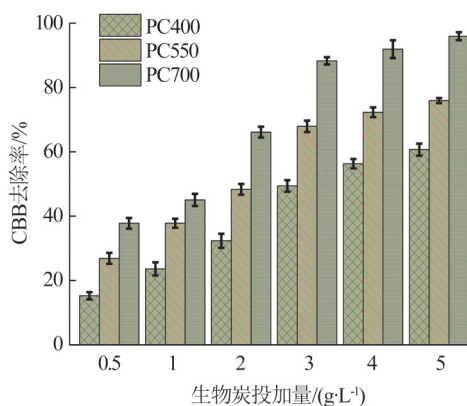


图4 生物炭投加量对CBB去除率的影响

Fig. 4 Effect of biochar dosage on CBB removal rate

由图4可知,相比另外2个温度下的生物炭,PC700对CBB的去除率明显提高,且随着投加量的增加,去除率呈增大趋势。在投加量增加至3 g/L前,CBB去除率随投加量的增加显著提高,当投加量为3 g/L时,PC400、PC550、PC700对CBB的去除率分别为49.42%、67.95%、88.12%,后续再加大生物炭投加量,去除率提高不明显。这是由于CBB初始浓度固定,生物炭投加量较少时,CBB会快速被生物炭吸附;生物炭投加量增加,吸附位点增多,而CBB浓度有限,CBB去除率逐渐趋于稳定。从节约成本的角度考虑,最终确定生物炭投加量为3 g/L。

### 2.2.2 溶液pH

在实验温度(25 ℃)恒定、CBB初始质量浓度为

50 mg/L、生物炭投加量为 3 g/L 的条件下,调节溶液 pH 为 4、5、6、7、8、9、10,考察溶液 pH 对 CBB 去除率的影响,结果如图 5 所示。

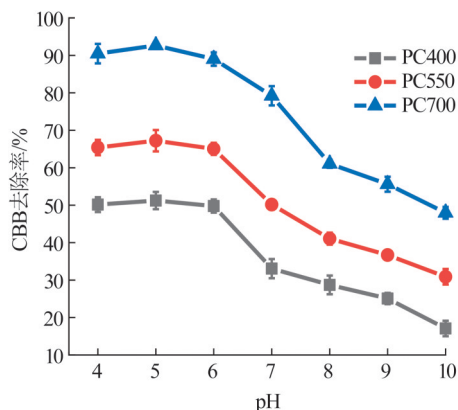


图5 溶液 pH 对 CBB 去除率的影响

Fig. 5 Effect of solution pH on CBB removal rate

由图 5 可知,随着 pH 的增大,CBB 去除率逐渐减小。pH 为 5 时,PC400、PC550、PC700 对 CBB 的去除率最大,分别为 51.24%、67.22%、92.66%。在 pH 为 7 时 CBB 去除率显著下降。主要原因可能是在酸性条件下,溶液中氢离子较多,生物炭表面质子化,正电荷增多,可与 CBB 分子中富含孤对电子的 N、O 形成氢键,CBB 被迅速吸附,因而去除率较大<sup>[18]</sup>。

### 2.2.3 反应时间

在恒定实验温度(25 °C)、溶液 pH 为 5、生物炭投加量为 3 g/L、CBB 初始质量浓度为 50 mg/L 条件下,分别在 5、10、15、30、60、120、180、240 min 时,探究不同吸附时间下辣椒秸秆生物炭对 CBB 的吸附量,结果见图 6。

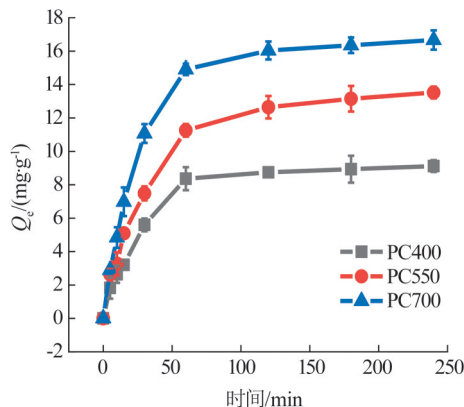


图6 反应时间对生物炭吸附 CBB 的影响

Fig. 6 Effect of reaction time on CBB adsorption by biochar

由图 6 可知,3 种热解温度下的生物炭对 CBB 的吸附量均在 0~60 min 时快速上升,60~120 min 时上升缓慢,120 min 附近达到平衡。PC400、PC550、PC700 的平衡吸附量分别为 8.74、12.64、16.04 mg/g。

### 2.3 吸附动力学分析

吸附动力学曲线的变化揭示了吸附质在吸附剂和吸附质间的分配规律。伪一级动力学假定的限制步骤是扩散过程;伪二级动力学假定的限制步骤是化学吸附或物理化学吸附,该吸附过程涉及电子的共用、交换和转移作用,即化学键的形成<sup>[19]</sup>。

利用伪一级动力学和伪二级动力学方程分别对生物炭吸附 CBB 的动力学数据进行拟合,结果见表 1。

表 1 3 种生物炭吸附 CBB 的动力学参数

| 吸附剂   | 伪一级动力学                      |                |       | 伪二级动力学                      |                                        |       |
|-------|-----------------------------|----------------|-------|-----------------------------|----------------------------------------|-------|
|       | $q_{cal}/(mg \cdot g^{-1})$ | $k_1/min^{-1}$ | $R^2$ | $q_{cal}/(mg \cdot g^{-1})$ | $k_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$ | $R^2$ |
| PC400 | 8.42                        | 0.006 7        | 0.783 | 10.18                       | 0.004 0                                | 0.995 |
| PC550 | 11.78                       | 0.008 1        | 0.874 | 15.27                       | 0.002 3                                | 0.997 |
| PC700 | 13.56                       | 0.007 8        | 0.782 | 18.52                       | 0.002 4                                | 0.995 |

由表 1 中的拟合结果可知,辣椒秸秆生物炭对 CBB 的吸附更符合伪二级动力学模型,PC400、PC550、PC700 的  $R^2$  分别为 0.995、0.997、0.995。表明该吸附过程并不是由单一物理吸附决定,而是物理吸附和化学吸附的共同作用<sup>[20]</sup>。所以,辣椒秸秆生物炭对 CBB 的吸附不仅仅是简单地通过生物炭表面孔隙进行物理吸附,生物炭中丰富的官能团还会与一部分 CBB 进行化学结合,从而去除水中考马斯亮蓝染料。

### 2.4 吸附等温模型分析

吸附等温线反映在一定温度下,吸附平衡时吸附剂的吸附容量与吸附质的平衡浓度之间的关系。实验温度为 25 °C、pH 为 5 时,PC400、PC550、PC700 对 CBB 溶液的吸附等温线如图 7 所示。

由图 7 可知,随着 CBB 溶液初始质量浓度的增加,3 种生物炭对 CBB 的吸附量都呈升高趋势。这是由于 CBB 初始质量浓度较低时,生物炭的吸附点位过剩,能够进行充分吸附且吸附速率较快;但随着 CBB 初始质量浓度的不断增加,生物炭的吸附空间逐渐被填满,不能再满足高浓度时的正常吸附,所以

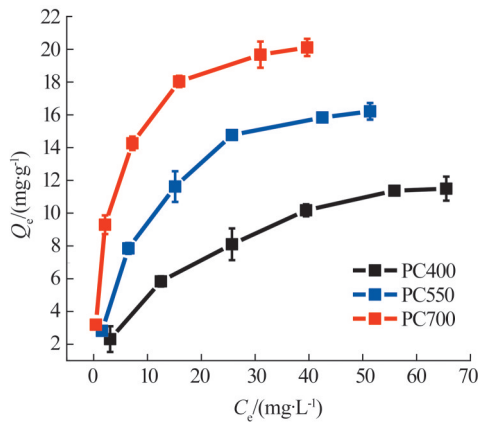


图7 3种生物炭对CBB的吸附等温线

Fig. 7 Adsorption isotherms of CBB of three biochars

后续吸附过程中  $Q_e$  不再明显增加。

利用 Freundlich 模型和 Langmuir 模型对数据进行拟合, 结果见表2。

表2 3种生物炭吸附CBB的等温方程拟合参数

Table 2 The parameters of isothermal equation for CBB adsorption by three biochars

| 吸附剂   | Langmuir                |                         |       | Freundlich |       |       |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------|------------|-------|-------|
|       | $q_m/(mg \cdot g^{-1})$ | $k_L/(L \cdot mg^{-1})$ | $R^2$ | $k_F$      | $1/n$ | $R^2$ |
| PC400 | 11.81                   | 0.054                   | 0.995 | 1.382      | 0.529 | 0.983 |
| PC550 | 16.23                   | 0.109                   | 0.998 | 2.641      | 0.499 | 0.956 |
| PC700 | 20.51                   | 0.342                   | 0.997 | 5.581      | 0.393 | 0.937 |

由表2可知, 2种模型都能较好地拟合辣椒秸秆生物炭对CBB的吸附过程, 但相比于 Freundlich 模型, Langmuir 模型的  $R^2$  更接近1, 因此该吸附过程更符合 Langmuir 模型。这表明该吸附过程更倾向于单分子层吸附, 即吸附剂表面的活性位点达到吸附饱和以后, 生物炭不再继续吸附有机染料<sup>[21]</sup>。经过计算, PC400、PC550、PC700对CBB的最大吸附量分别达到11.81、16.23、20.51 mg/g。同时, 在 Freundlich 模型等温吸附中,  $1/n$  是与吸附强度有关的常数, 当  $0 < 1/n < 1$  时, 吸附是有利的;  $1/n > 1$  时, 吸附是不利的;  $1/n = 1$  时吸附过程不可逆<sup>[22]</sup>。由表2可知, 生物炭吸附CBB的  $1/n$  均在0~1之间, 说明3种生物炭对CBB的吸附是容易进行的。

### 3 结论

(1) 700 °C热解下的辣椒秸秆生物炭对CBB具有更好的去除能力。3种生物炭在投加量为3 g/L、CBB染料初始质量浓度为50 mg/L、吸附温度为

25 °C、溶液pH为5、吸附时间为120 min的条件下, CBB的去除率为PC700(92.66%) > PC550(67.22%) > PC400(51.24%), 最大吸附量为PC700(20.51 mg/g) > PC550(16.23 mg/g) > PC400(11.81 mg/g), 其中生物炭投加量与pH对CBB的去除效果影响显著。

(2) 随着热解温度的增加, 官能团数量略有减少, 但使生物炭和CBB之间产生化学作用的官能团(如—OH、—CH<sub>x</sub>)并未消失, 同时, 增大的比表面积更利于吸附的进行, 因此热解温度的升高不会降低生物炭对CBB的吸附量。3种辣椒秸秆生物炭对CBB的吸附更符合 Langmuir 等温吸附模型, 吸附过程为单层吸附, 且该过程是容易进行的。3种辣椒秸秆生物炭对CBB的吸附均符合伪二级动力学, 该吸附过程有物理吸附和化学吸附双重作用。

(3) 辣椒秸秆生物炭既可以使农业废弃物得到有效利用, 又能作为吸附剂去除水中的有机染料, 后续需进一步改良辣椒秸秆生物炭的性能, 以达到实际应用的目的。

### 参考文献

- [1] AHMAD A, MOHD-SETAPAR S H, CHUONG C S, et al. Recent advances in new generation dye removal technologies: Novel search for approaches to reprocess wastewater[J]. RSC Advances, 2015, 5(39): 30801–30818.
- [2] ATES F, UN U T. Production of char from hornbeam sawdust and its performance evaluation in the dye removal[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2013, 103: 159–166.
- [3] 王泽烽, 赵斌, 沈伯雄, 等. 热改性废茶叶吸附刚果红性能的研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(4): 78–82.  
WANG Zeyi, ZHAO Bin, SHEN Boxiong, et al. Research on the adsorption capacity of thermal-modified waste tea for Congo Red[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(4): 78–82.
- [4] TAN K B, VAKILI M, HORRI B. A, et al. Adsorption of dyes by nanomaterials: Recent developments and adsorption mechanisms[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 150: 229–242.
- [5] 袁秦英. 梧桐树皮生物炭对亚甲基蓝的吸附性能研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.  
YUAN Qinying. Study on adsorption of methylene blue by platanus orientalis bark biochar[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [6] 孙玲, 安凤霞, 李宏斌, 等. 麦麸制备生物炭对刚果红吸附行为研究[J]. 能源科技, 2020, 18(2): 88–91.  
SUN Ling, AN Fengxia, LI Hongbin, et al. Adsorption behavior study of wheat bran preparation biochar on Congo Red[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(2): 88–91.

- [7] 江晨浩,王杰,龚亮,等. 磁性蟹壳碳吸附材料对溶液中孔雀石绿吸附性能研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2021, 52(5): 1446-1455.
- JIANG Chenhao, WANG Jie, GONG Liang, et al. Adsorption properties of magnetic crab shell-derived adsorption material for malachite green in solution[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(5): 1446-1455.
- [8] 邹学校,马艳青,戴雄泽,等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1715-1726.
- ZOU Xuexiao, MA Yanqing, DAI Xiongze, et al. Spread and industry development of pepper in China[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(9): 1715-1726.
- [9] BART V, HILDE M, IMKE D W, et al. Plant fibers for renewable growing media: Potential of defibration, acidification or inoculation with biocontrol fungi to reduce the N drawdown and plant pathogens[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 203: 1143-1154.
- [10] MORGAN E C, OVERHOLT W A. Potential allelopathic effects of Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolius* Raddi, *Anacardiaceae*) aqueous extract on germination and growth of selected Florida native plants[J]. Journal of the Torrey Botanical Society, 2005, 132(1): 11-15.
- [11] 王宁. 化学活化法制备辣椒秸秆基活性炭及其性能研究[D]. 西安:西安工程大学, 2017.
- WANG Ning. Chemical activation of chili straw based activated carbon and its performance study[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2017.
- [12] 郭丹丹. 生物炭和改性生物炭对重金属 Pb(II)、Cd(II) 的吸附性能研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
- GUO Dandan. Research on the adsorption performance of heavy metals Pb(II) and Cd(II) by biochar and modified biochar[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [13] 汪政德,张茂林,梅海燕,等. 毛细凝聚和吸附-脱附回路的物理化学解释[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3): 233-235.
- WANG Zhengde, ZHANG Maolin, MEI Haiyan, et al. The physical chemistry explanation of the capillary condensation and circuit of adsorption-desorption[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(3): 233-235.
- [14] MAYAKADUWA S S, KUMARATHILAKA P, HERATH I, et al. Equilibrium and kinetic mechanisms of woody biochar on aqueous glyphosate removal[J]. Chemosphere, 2016, 144: 2516-2521.
- [15] WU Wei, SHENG Hongjie, GU Chenggang, et al. Extraneous dissolved organic matter enhanced adsorption of dibutyl phthalate in soils: Insights from kinetics and isotherms[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 1495-1503.
- [16] SONG Xin, LI Kai, NING Ping, et al. Surface characterization studies of walnut-shell biochar catalysts for simultaneously removing of organic sulfur from yellow phosphorus tail gas[J]. Applied Surface Science, 2017, 425: 130-140.
- [17] 王建龙,陈灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 673-701.
- WANG Jianlong, CHEN Can. Research advance in heavy metal removal by biosorption[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(4): 673-701.
- [18] 陈修栋,曹小华,汪亚威,等. 改性生物炭对考马斯亮蓝的吸附研究[J]. 印染助剂, 2019, 36(9): 37-40.
- CHEN Xiudong, CAO Xiaohua, WANG Yawei, et al. Adsorption of coomassie brilliant blue by modified biochar[J]. Textile Auxiliaries, 2019, 36(9): 37-40.
- [19] 李艳春,张鹏会,张强,等. 4 种生物炭对阳离子染料吸附性能[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 101-110.
- LI Yanchun, ZHANG Penghui, ZHANG Qiang, et al. Adsorption of cationic dye in aqueous solution by four biochars[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7): 101-110.
- [20] 谭珍珍,张学杨,方茹,等. 小麦秸秆生物炭吸附诺氟沙星特性[J]. 工业水处理, 2020, 40(1): 24-28.
- TAN Zhenzhen, ZHANG Xueyang, FANG Ru, et al. Adsorption property of norfloxacin on wheat stalk biochar[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(1): 24-28.
- [21] 文永林,刘攀,汤琪. 农林废弃物吸附脱除废水中重金属研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(4): 1208-1215.
- WEN Yonglin, LIU Pan, TANG Qi. Review of removal of heavy metal ions from wastewater with agricultural and forestry waste as adsorbent[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(4): 1208-1215.
- [22] 张连科,刘心宇,王维大,等. 油料作物秸秆生物炭对水体中铅离子的吸附特性与机制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 218-226.
- ZHANG Lianke, LIU Xinyu, WANG Weida, et al. Characteristics and mechanism of lead adsorption from aqueous solutions by oil crops straw-derived biochar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7): 218-226.

[作者简介] 张娟(1978—), 硕士, 副教授. E-mail: 66766167@qq.com.

通讯作者: 李思敏, 博士, 教授. E-mail: chyeli@126.com.

[收稿日期] 2021-12-25(修改稿)