



# 生物炭对阳离子染料的吸附性能研究进展

陈 佼<sup>1,2</sup>, 刘 欢<sup>1</sup>, 刘浩霖<sup>1</sup>, 林华峰<sup>1</sup>, 李晓媛<sup>1</sup>, 陆一新<sup>1,2,3</sup>

(1. 成都工业学院材料与环境工程学院, 四川成都 611730; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756; 3. 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室, 四川成都 610059)

**[摘要]** 印染废水是一类重要的难降解工业废水, 高效处理印染废水对于保护水生态环境和促进印染行业的可持续发展具有重要的现实意义。生物炭原料来源广泛、比表面积大、孔隙结构发达、制备成本低, 对印染废水中的多种污染物均表现出良好的吸附潜能, 其中采用生物炭吸附阳离子染料的研究近年来备受关注。概述了可用于制备生物炭的生物质原料选取原则, 以及常见的植物源、动物源、污泥源生物质原料类型, 分析了限氧热解法、水热炭化法、微波热解法等生物炭制备方法的工作原理和工艺特点, 综述了生物炭对亚甲基蓝、罗丹明 B、结晶紫等多种阳离子染料的吸附性能, 并对其吸附机理进行探讨。针对目前研究中存在的不足, 对未来值得深入探索的研究方向进行了展望, 包括多种阳离子染料共存时生物炭的吸附效果、新型生物质原料的开发与改性技术、生物炭制备方法改良、实验室模拟研究向实际应用的逐步推进等, 以期生物炭的制备及其在阳离子染料吸附领域中的应用提供有益参考。

**[关键词]** 生物炭; 阳离子染料; 工业废水; 吸附

**[中图分类号]** X703; TQ424 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0027-07

## Research progress on the adsorption property of biochar for cationic dyes

CHEN Jiao<sup>1,2</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>, LIU Haolin<sup>1</sup>, LIN Huafeng<sup>1</sup>, LI Xiaoyuan<sup>1</sup>, LU Yixin<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 611730, China;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Printing and dyeing wastewater is an important kind of refractory industrial wastewater, and its efficient treatment is of great practical significance to protect the water ecological environment and promote the sustainable development of printing and dyeing industry. Biochar, with its wide source of raw materials, large specific surface area, well-developed pore structure and low preparation cost, has shown good adsorption potential for a variety of pollutants in printing and dyeing wastewater. Using biochar for cationic dyes adsorption has attracted much attention recently. The principles of selecting biomass feedstocks that can be used for biochar preparation and the common types of plant-derived, animal-derived and sludge-derived biomass feedstocks were summarized. The working principles and process characteristics of biochar preparation methods, such as oxygen-limited pyrolysis, hydrothermal carbonization and microwave pyrolysis were analyzed. The adsorption performance of biochar on various cationic dyes such as methylene blue, rhodamine B and crystalline violet was reviewed, and the adsorption mechanism was discussed. In view of the shortcomings in the current research, the future research directions worthy of further exploration were prospected, including the adsorption effect of biochar in the coexistence of various cationic dyes, the development and modification techniques of new biomass raw materials, the improvement of biochar preparation methods, and the gradual advancement of laboratory simulation studies to practical applications, in order to provide useful references for the preparation of biochar and its application in the field of cationic dye adsorption.

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(21705133); 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室开放基金项目(GHBK-2021-004); 四川省科技计划项目(2022YFG0307, 2022NSFSC0393); 成都工业学院青苗计划项目(QM2021003)

**Key words:** biochar; cationic dye; industrial wastewater; adsorption

随着纺织和染色工业的迅速发展,种类繁多的染料被应用于印染行业,产生的印染废水是一类重要的难降解工业废水<sup>[1]</sup>,对水生态环境造成污染,也不利于印染行业的可持续发展。阳离子染料作为一类最常见的纺织染料,在水中溶解后可生成带正电荷的有色离子,因具有色泽鲜艳、耐晒牢度和湿牢度强等优点而应用广泛<sup>[2]</sup>。然而,阳离子染料生产和染色过程中产生的废水色度高、可生化性差,难以采用生物处理方法去除,探寻适于高效去除阳离子染料的方法已成为研究热点。

生物炭(Biochar)是生物质残体在缺氧或绝氧情况下经高温转化生成的一类富含碳素的固态物<sup>[3]</sup>,其比表面积大、制备简单、原料成本低廉、吸附效果显著,在印染废水处理领域具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。近年来关于生物炭吸附废水中阳离子染料的研究受到广泛关注,但尚缺乏系统性的总结。笔者对可吸附阳离子染料的生物炭制备原料、制备方法、吸附效果、吸附机理、未来研究方向进行了系统的总结和分析,以期为生物炭在阳离子染料吸附领域的应用和发展提供借鉴。

## 1 生物炭制备原料

可用于制备生物炭的生物质原料主要有植物源、动物源、污泥源等,选取原则包括<sup>[5]</sup>:(1)廉价易得,经济效益好;(2)吸附效率高;(3)制备过程能耗低,二次污染小;(4)优选废弃生物质制备生物炭,实现废弃资源再利用和“以废治废”。

### 1.1 植物源

目前用于阳离子染料吸附的生物炭植物源材料包括水稻秸秆、麦秸、玉米芯等,多数含有丰富的木质纤维素,因而制备的生物炭碳含量较高。常见植物源生物炭的主要特征如表1所示。

不同生物质材料的理化性质不同,因此不同热解条件下制备的生物炭在比表面积、总孔容、孔径、碳元素含量等方面存在明显差异,相同热解条件下不同原料制备的生物炭理化性质及其对阳离子染料的吸附效果也不尽相同。M. T. AMIN等<sup>[13]</sup>在800℃热解温度下分别制备了桔子皮生物炭和香蕉皮生物炭,其比表面积分别为1 073.5、954.24 m<sup>2</sup>/g,前者的碳含量比后者高出33.42%,对水中亚甲基蓝的吸附

表1 常见植物源生物炭的主要特征

Table 1 Main characteristics of common plant-derived biochar

制备原料	制备温度/℃	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm	ω(碳元素)/%	文献
水稻秸秆	500	153.44	—	—	52.90	[6]
麦秸	700	2 263.10	1.21	2.133	—	[7]
白菜	500	11.44	—	3122	46.42	[8]
玉米芯	600	23.58	0.053	5.17	71.66	[9]
玉兰叶	600	96.861 4	0.028 06	7.518 5	—	[10]
椰枣叶	700	431.82	13.4	—	—	[11]
芦苇	450	4.16	0.003 2	48.34	—	[12]

容量也比后者高出86 mg/g。此外,同类型生物质因取材时间和位置的不同,在相同条件下制备出的生物炭亦呈现差异化特征。

### 1.2 动物源

常见可用于阳离子染料吸附的动物源生物炭及其主要特征如表2所示。

表2 常见动物源生物炭的主要特征

Table 2 Main characteristics of common animal-derived biochar

制备原料	制备温度/℃	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm	ω(碳元素)/%	文献
牛粪	600	162.50	0.990	2.60	—	[14]
羊粪	600	181.76	0.245	11.91	63.25	[15]
猪粪	500	13.36	0.025	7.33	43.12	[16]
兔粪	500	21.14	0.041	8.64	51.66	[16]
鱼骨	500	156.87	0.330	3.09	10.99	[17]

采用动物粪便制备生物炭既能实现粪污减量化,又能为粪便资源再利用提供一条新途径,因而近年来颇受关注。动物粪便源生物炭通常含有丰富的Na、K、Ca、Mg等矿质元素,或含有Cu、Cd、Zn等微量元素,不仅有利于提高吸附性能,还田时还可改良土壤品质<sup>[18]</sup>。通常而言,食草性动物产生的粪便(牛粪、羊粪、兔粪等)含有更丰富的植物纤维,因而制得的生物炭碳含量也更高。黄雯等<sup>[9]</sup>分别采用玉米芯和羊粪在600℃下制得生物炭,发现羊粪生物炭的比表面积、总孔容、孔径分别比玉米芯生物炭提高了6.71、3.62、1.3倍,且芳香性更高、极性更强,在50 mg/L亚甲基蓝溶液中投加0.3 g/L的羊粪生物炭时对亚甲基蓝的去除率高达95.24%。此外,在筛选制炭粪便源时,需考虑是否存在重金属或抗生素等二次污染风险,并采取相应的措施进行预防。

### 1.3 污泥源

剩余污泥作为生物处理法的副产品,产量巨大,其处理与处置是污水处理后不可或缺的环节。剩余污泥中富集了许多易腐化有机质和有毒有害物质,处理不当会造成严重的环境污染,制成生物炭不失为一种新的处理方式。徐波等<sup>[19]</sup>分别在300、350、400℃热解温度下制得剩余污泥生物炭,发现生物炭的比表面积、孔容积、碳含量均随热解温度的升高而增大;投加1 g/L 400℃制得的生物炭、吸附时间为1 h时,对印染废水的脱色率可达75%。污泥源易受污水处理过程中水质水量、操作条件等因素的影响,导致制备的生物炭效果不稳定,研发适于污泥源生物炭的改性技术十分必要。

## 2 生物炭制备方法

### 2.1 限氧热解法

限氧热解法是目前制备生物炭最常用的方法,通常将预处理后的生物质原料制成粉末,再在限氧条件下热解形成生物炭、生物油和气体等多种产物,经冷却、后处理、筛分后得到生物炭产品<sup>[15-16]</sup>。由于热解温度、升温速率、停留时间各不相同,生物质原料热解后的产物比例也有所差异<sup>[20-25]</sup>。根据热解速率的不同,可将限氧热解法分为慢速热解、中速热解、快速热解、闪速热解4种类型<sup>[26]</sup>(如表3所示),其中慢速热解法产炭率处于较高水平,在生物炭制备中应用最为广泛。

表3 限氧热解法的主要类型及特点

Table 3 Main types and characteristics of oxygen limited pyrolysis

类型	热解温度/℃	升温速率/(℃·s <sup>-1</sup> )	停留时间/s	产率/%		
				生物炭	生物油	气体
慢速热解	400~660	<1	300~1 800	35	30	35
中速热解	400~550	5	10~20	20	50	30
快速热解	400~550	1 000	1~2	12	75	13
闪速热解	1 050~1 300	1 000	<1	10~25	50~75	10~30

热解温度、升温速率、停留时间对生物炭的产率、表面结构、元素组成、稳定性等有重要影响。李飞跃等<sup>[20]</sup>研究了200~700℃热解温度下花生壳生物炭的结构性质,发现产炭率、氢碳质量比随热解温度的升高而降低,而灰分、pH、芳香化程度随热解温度的升高而升高。高凯芳等<sup>[21]</sup>在不同热解温度下制备了稻秆生物炭,当

热解温度由300℃升至600℃时,稻秆生物炭的比表面积由6.11 m<sup>2</sup>/g升至288.10 m<sup>2</sup>/g,表面碱性官能团比例呈上升趋势,而酸性官能团比例呈下降趋势;热解温度升至700℃时比表面积出现下降趋势。杨艳琴等<sup>[22]</sup>在300~800℃温度下制备了污泥生物炭,发现热解温度升高会增加生物炭的碱性,产率、挥发分和有机碳比例则会逐渐减小,高温更有利于提高生物炭的吸附性能。R. C. PEREIRA等<sup>[23]</sup>的研究表明,相比高升温速率(62℃/min),低升温速率(24℃/min)更有利于提高生物炭的芳香度和孔隙率,且有助于去除孔隙中的挥发性组分及增大比表面积。R. ZORNOZA等<sup>[24]</sup>发现延长热解停留时间可使生物炭的炭化程度更高,低稳定性有机质含量更少。Kaifeng WANG等<sup>[25]</sup>探讨了不同热解温度(300~750℃)和停留时间(0~120 min)对猪粪生物炭理化性质的影响,结果表明,生物炭灰分、pH、矿物质、总重金属(Zn除外)和孔隙量均随热解温度和停留时间的增加而升高,而生物炭产量和N、O、H含量随之降低。热解条件通过影响生物炭的理化性质进而影响其吸附性能,因此在实际应用中需根据生物质原料特征、吸附质特性、吸附条件等选择适宜的热解温度、升温速率和反应停留时间。

### 2.2 水热炭化法

水热炭化法是利用水或其他溶液作为溶剂和介质,将生物质原料按一定比例加入其中,在高温和自生压力作用下,于密闭反应器内加热一段时间,使生物质最终形成生物炭、生物油和少量生物气<sup>[26]</sup>。相比于限氧热解法,水热炭化法具有操作简易、反应条件更温和、产炭率高(约40%~70%)、能耗低,不受生物质含水率限制等优势<sup>[27]</sup>,成为近年来备受青睐的一种新型生物炭材料制备方法。

水热炭化过程受生物质原料性质、温度、停留时间、物水比、底物pH和催化剂浓度等工艺参数的影响<sup>[28]</sup>,其中生物质原料性质、温度和停留时间的影响最为关键。常春等<sup>[29]</sup>采用水热炭化法密闭恒温140℃保持20 h制得玉米叶生物炭、玉米秆生物炭,分析结果表明2种生物炭的比表面积分别比未炭化前增加了3.53、3.32倍,且经水热炭化后生物质表面暴露出更多官能团,对应的吸收峰有所增强,但玉米叶生物炭对染料废水的吸附性能更强。较高的炭化温度下固体产率往往较低而气态化合物产率增加<sup>[30]</sup>,将炭化温度由180℃提高到300℃时,水热炭



产率由 66.18% 降至 53.00%。固、液、气产品的分布和质量受反应停留时间的影响, Chao HE 等<sup>[31]</sup>的研究表明炭化停留时间越长, 含氧官能团越少, 碳芳香性和疏水性越强, 停留时间为 12 h 可使单位量生物质的炭产率提高 60%, 这是由于溶解相中碎片的聚合形成了具有多环芳烃结构的二次水热炭, 使得产炭率有所提高。

### 2.3 微波热解法

微波热解法将生物质原料在限氧条件下通过微波加热方式制备生物炭, 其加热原理为生物质吸收微波能后内部分子发生高频运动, 生成的“内摩擦热”使生物质由内而外加热<sup>[32]</sup>。微波热解能直接穿透生物质, 使其受热均匀, 具有能量利用率高、可控性强、反应条件温和、经济性好等优势, 逐渐成为生物炭制备的优选方法之一。

J. E. OMORIYEKOMWAN 等<sup>[33]</sup>采用微波热解法制备了含有大量中空碳纳米纤维的棕榈壳生物炭, 当热解温度由 500 °C 升至 600 °C 时, 中空纳米碳纤维生成量从 5.85% 提高到 9.88%, 吸附潜能随之增大。G. DURAN-JIMENEZ 等<sup>[34]</sup>通过微波热解将山核桃的果壳制成生物炭, 对溶液中的铅离子表现出良好的去除效果。谢为等<sup>[35]</sup>以醋糟为原料, 在反应温度为 450 °C、微波功率为 900 W、保温时间为 10 min 的条件下制备了生物炭, 产率高达 60.37%。该生物炭富含多种官能团, 是一种由醇类、酚类、醚类和烃类物质组成的复合物。目前微波热解法制备的生物炭多用于重金属离子的吸附, 对废水中阳离子染料吸附的研究相对较少。

## 3 生物炭吸附阳离子染料的应用

### 3.1 亚甲基蓝

亚甲基蓝( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ )被广泛用于棉麻、蚕丝、纸张、竹木等的染色, 同时也是制造墨水、色淀、生物染色剂、化学指示剂的常用化学药剂, 通过接触对人和动物健康产生威胁。季雪琴等<sup>[36]</sup>分别采用 500、700 °C 裂解温度下制备的秸秆生物炭吸附亚甲基蓝, 在 25 °C、200 r/min 操作条件下约 120~180 min 时达到吸附平衡, 理论平衡吸附量分别为 45.9、29.5 mg/g。Wen HUANG 等<sup>[16]</sup>在 500 °C 下恒温 120 min 分别制备出羊粪、兔粪、猪粪生物炭, 当进水亚甲基蓝质量浓度为 50 mg/L、溶液初始 pH 为 11 时, 210 min 左右吸附达到平衡; 3 种生物炭对亚甲基蓝的理论最大吸附量依次

为 238.31、104.02、53.68 mg/g。此外, 玉米芯/叶生物炭<sup>[9,29]</sup>、玉兰叶生物炭<sup>[10]</sup>、鱼骨生物炭<sup>[17]</sup>、有机垃圾生物炭<sup>[37]</sup>、果皮生物炭<sup>[13]</sup>、污泥生物炭<sup>[38]</sup>等也被研究者用于处理含亚甲基蓝废水, 并取得良好的吸附效果。

### 3.2 罗丹明 B

罗丹明 B( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ )常用于化妆品工业中溶液、软化剂、洗发水等的着色。该类染料废水具有色度高、成分复杂、难生物降解等特点, 已被世卫组织列入 3 类致癌物清单中。Yixin LU 等<sup>[15]</sup>采用限氧热解法在 600 °C 下制得羊粪生物炭用于罗丹明 B 的吸附, 当罗丹明 B 初始质量浓度为 20 mg/L、溶液初始 pH 为 5.0、反应温度为 25 °C、生物炭投加量为 0.4 g/L 时, 反应 150 min 达到吸附平衡, 羊粪生物炭对水中罗丹明 B 的吸附率达到 96.5%。Wen HUANG 等<sup>[39]</sup>采用兔粪为原料在 550 °C 下制备生物炭, 用其吸附罗丹明 B 的最适溶液初始 pH 为 3, 当进水罗丹明 B 质量浓度为 30 mg/L、生物炭投加量为 0.9 g/L 时, 吸附 180 min 吸附量可达到 30.99 mg/g。除动物粪便源生物炭外, 水稻秸秆生物炭、竹笋壳生物炭、可可豆壳生物炭等植物源生物炭也不断被开发出来并成功应用于含罗丹明 B 废水的处理。

### 3.3 结晶紫

结晶紫( $C_{25}H_{30}ClN_3$ )染料对水中的生物毒性极强, 进入水体后会对水生态环境产生恶劣影响。D. D. SEWU 等<sup>[8]</sup>在 500 °C 下分别制备了稻草、白菜、木屑生物炭, 它们对结晶紫的理论最大吸附量分别为 620.3、1 304.0、195.6 mg/g, 其中以白菜生物炭的吸附效果最优。G. VYAVAHARE 等<sup>[40]</sup>在 800 °C 下热解 60 min 制得芒果叶生物炭, 在最佳条件(初始溶液 pH 为 8.0、结晶紫质量浓度为 2 500 mg/L、生物炭投加量为 50 g/L、反应温度 47 °C、时间为 48 min)下, 对结晶紫的去除率高达 99.85%。各种低成本、高性能、环保型生物炭的研发, 为去除水体中的结晶紫染料提供了更多的可选途径。

### 3.4 其他阳离子染料

除亚甲基蓝、罗丹明 B、结晶紫外, 近年来关于生物炭吸附其他阳离子染料的研究日益增多。尹丽等<sup>[14]</sup>考察了牛粪生物炭对甲基紫的吸附效果, 结果表明吸附量随甲基紫初始浓度、溶液 pH、反应温度的增加而升高, 当甲基紫初始质量浓度从 10 mg/L 升至 40 mg/L 时, 60 min 后达到吸附平衡, 平衡吸附量

由 5 mg/g 提高至 30 mg/g。L. MEILI 等<sup>[41]</sup>以农业废弃物木薯残根为原料制备生物炭用于吸附碱性品红,在热解温度 400、500 °C 下制备的生物炭对碱性品红的吸附量分别为  $1 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-5}$  mmol/g。可见生物炭对部分阳离子染料的吸附具有选择性,应根据待处理染料废水的特点选择适宜的生物炭作为吸附剂。

#### 4 生物炭对阳离子染料的吸附机理

生物炭对废水中阳离子染料的吸附机理包括物理吸附、静电吸附、离子交换、氢键作用、 $\pi$ - $\pi$  键作用等<sup>[9,36]</sup>,如图 1 所示。由于生物炭表面分布有丰富的羟基(—OH)、羧基(—COOH)、羰基(—C=O)、酯基(—COOR)等含氧官能团,为阳离子染料在生物炭上的高效吸附提供了基础<sup>[15]</sup>。

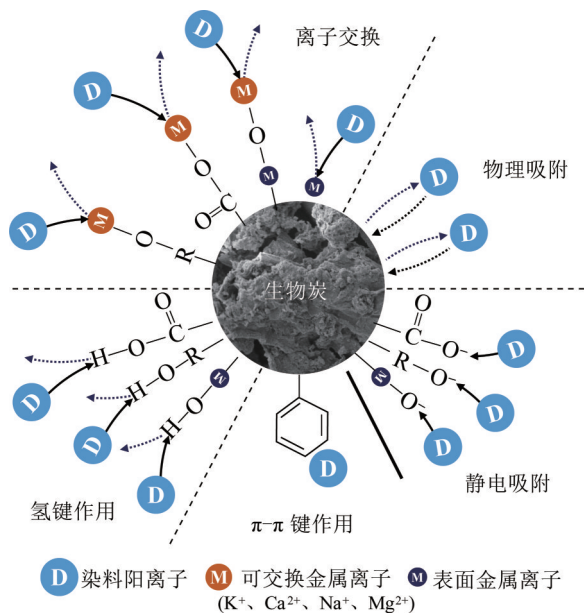


图 1 生物炭对阳离子染料的吸附机理

Fig.1 Adsorption mechanism of cationic dyes on biochar

生物炭对水中阳离子染料的吸附机理与生物炭制备方法、阳离子染料类型、吸附条件等因素密切相关,通常吸附过程涉及多种吸附机理。黄雯等<sup>[9]</sup>研究认为玉米芯生物炭和羊粪生物炭对亚甲基蓝的吸附以物理吸附为主,而氢键和  $\pi$ - $\pi$  键作用也是该吸附过程的重要作用机理。季雪琴等<sup>[36]</sup>的研究表明秸秆生物炭对亚甲基蓝的吸附机理主要为离子交换,离子交换作用随制备生物炭时热解温度的升高而减弱,这是热解温度升高后生物炭表面的极性基团含量降低所致。P. BOAKYE 等<sup>[42]</sup>采用海藻生物炭吸附结晶紫阳离子染料,发现阳离子与生物炭表

面可交换性阳离子交换是主要作用机制,同时静电作用也是去除结晶紫的重要机理。

目前对吸附机理的推导主要基于吸附染料前后的生物炭表征结果变化,表征方法包括扫描电镜(SEM)分析、红外光谱(FTIR)分析、X 射线能谱(EDS)分析和 X 射线衍射(XRD)分析等。

#### 5 结语

生物炭制备原料来源广泛、制备方法多样,对废水中的阳离子染料有良好的吸附性能。生物炭的吸附效果与生物质来源、生物炭制备方法、阳离子染料类型、吸附操作条件等因素相关,吸附过程涉及多种机理。利用废弃生物质制备生物炭吸附废水中的阳离子染料,既能高效去除污染物,又能实现废弃物质的资源化利用,产生显著的经济、能源和环保效益,具有巨大的发展潜力和应用空间。

在未来的研究中,以下方向值得深入研究:

(1) 目前生物炭可吸附的阳离子染料种类较为有限且类型单一,应拓展生物炭对多种阳离子染料共存时的吸附效果研究。

(2) 探寻新型生物质原材料,研发适用于生物炭的改性方法,进一步增强生物炭对阳离子染料的吸附效果。

(3) 改良生物炭的制备方法,在降低制备能耗的同时,减少制备过程中可能产生的二次污染。

(4) 在实验室研究的基础上,逐步走向现场研究和应用示范,为生物炭在染料废水处理领域的应用铺垫基础。

#### 参考文献

- [1] 王震,王长智,许青兰,等.微电解耦合非均相 Fenton 法处理印染废水膜浓缩液[J].工业水处理,2021,41(4):48-51.  
WANG Zhen, WANG Changzhi, XU Qinglan, et al. Treatment of membrane concentrate from dyeing wastewater by micro-electrolysis coupling heterogeneous Fenton-like system [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 48-51.
- [2] SHELAR-LOHAR G, JOSHI S. Amidoximated functionalized sodium alginate graft copolymer: An effective adsorbent for rapid removal of cationic dyes[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 3357-3362.
- [3] CHENG Ning, WANG Bing, WU Pan, et al. Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review[J]. Environmental Pollution, 2021, 273: 116448.
- [4] NGUYEN X C, NGUYEN T T H, NGUYEN T H C, et al. Sustain-

- able carbonaceous biochar adsorbents derived from agro-wastes and invasive plants for cation dye adsorption from water[J]. *Chemosphere*, 2021, 282: 131009.
- [5] LONAPPAN L, ROUISSI T, DAS R K, et al. Adsorption of methylene blue on biochar microparticles derived from different waste materials[J]. *Waste Management*, 2016, 49: 537-544.
- [6] 李丹, 金修齐, 王朋, 等. 水稻秸秆生物炭对罗丹明 B 的吸附与降解[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 5195-5200.
- LI Dan, JIN Xiuqi, WANG Peng, et al. Adsorption and degradation of rhodamine B by rice-straw-derived biochars[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9): 5195-5200.
- [7] WANG Peifang, WU Chuangfei, GUO Yong, et al. Experimental and theoretical studies on methylene blue and methyl orange sorption by wheat straw-derived biochar with a large surface area[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2016, 18(43): 30196-30203.
- [8] SEWU D D, BOAKYE P, WOO S H. Highly efficient adsorption of cationic dye by biochar produced with Korean cabbage waste[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 206-213.
- [9] 黄雯, 陈佼, 张建强, 等. 玉米芯基和羊粪基生物炭对亚甲基蓝的吸附特性[J]. *水处理技术*, 2018, 44(4): 74-80.
- HUANG Wen, CHEN Jiao, ZHANG Jianqiang, et al. Adsorption properties of methylene blue by biochars derived from corn cob and sheep manure[J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(4): 74-80.
- [10] 卢娜娜, 陈威, 王家乐. 广玉兰叶粉及其生物炭对亚甲基蓝的吸附性能研究[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(5): 99-104.
- LU Nana, CHEN Wei, WANG Jiale. Study on adsorption performance of magnolia grandiflora leaves and their biochar for methylene blue[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 41(5): 99-104.
- [11] ZUBAIR M, MU'AZU N D, JARRAH N, et al. Adsorption behavior and mechanism of methylene blue, crystal violet, eriochrome black T, and methyl orange dyes onto biochar-derived date palm fronds waste produced at different pyrolysis conditions[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231(5): 240.
- [12] 李子音, 赵传起, 刘欢, 等. 芦苇基生物炭的制备与活化方式比较研究[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2018, 30(6): 446-451.
- LI Ziyin, ZHAO Chuanqi, LIU Huan, et al. Comparative study on preparation and activation methods of reed based biochar[J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2018, 30(6): 446-451.
- [13] AMIN M T, ALAZBA A A, SHAFIQ M. Comparative study for adsorption of methylene blue dye on biochar derived from orange peel and banana biomass in aqueous solutions[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(12): 735.
- [14] 尹丽, 邹海燕, 费陶, 等. 牛粪源生物炭对水中甲基紫的吸附动力学和热力学[J]. *环境化学*, 2017, 36(12): 2650-2657.
- YIN Li, ZOU Haiyan, FEI Tao, et al. Thermodynamics and kinetics of sorption of methyl violet on cow-manure-derived biochar in an aqueous solution[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(12): 2650-2657.
- [15] LU Yixin, CHEN Jiao, ZHAO Li, et al. Adsorption of rhodamine B from aqueous solution by goat manure biochar: Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(4): 2721-2730.
- [16] HUANG Wen, CHEN Jiao, ZHANG Jianqiang. Adsorption characteristics of methylene blue by biochar prepared using sheep, rabbit and pig manure[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(29): 29256-29266.
- [17] 王卫. 鱼骨炭的制备及其吸附铅离子和亚甲基蓝的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- WANG Wei. Study on the preparation of fishbone charcoal and application as the adsorbent for Pb(II) and methylene blue[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [18] 王群, 李飞跃, 曹心德, 等. 植物基与固废基生物炭的结构性质差异[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(8): 1-5.
- WANG Qun, LI Feiyue, CAO Xinde, et al. Difference between characteristics of biochars derived from plant and solid waste[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(8): 1-5.
- [19] 徐波, 甘雁飞, 丁付革, 等. 污泥生物炭的制备及其对印染废水的处理研究[J]. *水处理技术*, 2020, 46(7): 67-71.
- XU Bo, GAN Yanfei, DING Fuge, et al. Study on preparation of sludge biochar and its treatment for printing and dyeing wastewater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(7): 67-71.
- [20] 李飞跃, 陶进国, 汪建飞, 等. 不同温度下制备花生壳生物炭的结构性质差异[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3726-3730.
- LI Feiyue, TAO Jinguo, WANG Jianfei, et al. Difference characteristics of biochar derived from peanut shell under different temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6): 3726-3730.
- [21] 高凯芳, 简敏菲, 余厚平, 等. 裂解温度对稻秆与稻壳制备生物炭表面官能团的影响[J]. *环境化学*, 2016, 35(8): 1663-1669.
- GAO Kaifang, JIAN Minfei, YU Houping, et al. Effects of pyrolysis temperatures on the biochars and its surface functional groups made from rice straw and rice husk[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8): 1663-1669.
- [22] 杨艳琴, 崔敏华, 任屹罡, 等. 热解温度诱导下污泥生物炭特性和吸附能力相关性[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2020, 37(2): 194-201.
- YANG Yanqin, CUI Minhua, REN Yigang, et al. Correlations between the physicochemical characteristics and adsorption capacity of sludge-based biochar induced at pyrolysis temperature[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2020, 37(2): 194-201.
- [23] PEREIRA R C, KAAL J, ARBESTAIN M C, et al. Contribution to characterisation of biochar to estimate the labile fraction of carbon[J].

- Organic Geochemistry, 2011, 42(11): 1331-1342.
- [24] ZORNOZA R, MORENO-BARRIGA F, ACOSTA J A, et al. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments[J]. Chemosphere, 2016, 144: 122-130.
- [25] WANG Kaifeng, PENG Na, LU Guining, et al. Effects of pyrolysis temperature and holding time on physicochemical properties of swine-manure-derived biochar[J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(2): 613-624.
- [26] 李湘萍, 张建光. 生物质热解制备多孔炭材料的研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2020, 36(5): 1101-1110.
- LI Xiangping, ZHANG Jianguang. Progress on biochar preparation through pyrolysis process[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2020, 36(5): 1101-1110.
- [27] OUMABADY S, S P S, KAMALUDEEN S P B, et al. Preparation and characterization of optimized hydrochar from paper board mill sludge[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 773.
- [28] 俞盈, 韩兰芳, 姜晓满. 水热炭的制备、结构特征和应用[J]. 环境化学, 2018, 37(6): 1232-1244.
- YU Ying, HAN Lanfang, JIANG Xiaoman. Production, properties and environmental application of hydrochar [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(6): 1232-1244.
- [29] 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): 2680-2690.
- CHANG Chun, LIU Tianqi, WANG Yuting, et al. Hydrothermal preparation of maize leaf based biochar and its adsorption performance for methylene blue [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2680-2690.
- [30] GAI Chao, CHEN Mengjun, LIU Tingting, et al. Gasification characteristics of hydrochar and pyrochar derived from sewage sludge[J]. Energy, 2016, 113: 957-965.
- [31] HE Chao, GIANNIS A, WANG Jingyuan. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: Hydrochar fuel characteristics and combustion behavior[J]. Applied Energy, 2013, 111: 257-266.
- [32] 彭锦星, 刘新媛, 鲍振博. 生物质的微波热解技术研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(7): 1499-1503, 1508.
- PENG Jinxing, LIU Xinyuan, BAO Zhenbo. Research progress of microwave pyrolysis technology for biomass[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(7): 1499-1503, 1508.
- [33] OMORIYKOMWAN J E, TAHMASEBI A, ZHANG Jian, et al. Formation of hollow carbon nanofibers on bio-char during microwave pyrolysis of palm kernel shell [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 583-592.
- [34] DURAN-JIMENEZ G, MONTI T, TITMAN J J, et al. New insights into microwave pyrolysis of biomass: Preparation of carbon-based products from pecan nutshells and their application in wastewater treatment[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 124: 113-121.
- [35] 谢为, 卜权. 微波热解醋糟制备生物炭及其吸附性能研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 194-199.
- XIE Wei, BU Quan. Preparation and adsorption properties of biochar by microwave pyrolysis of vinegar residue [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(6): 194-199.
- [36] 季雪琴, 吕黎, 陈芬, 等. 秸秆生物炭对有机染料的吸附作用及机制[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1648-1654.
- JI Xueqin, LÜ Li, CHEN Fen, et al. Sorption properties and mechanisms of organic dyes by straw biochar [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1648-1654.
- [37] 高豆豆, 郭敏辉, 王侃, 等. 城镇有机垃圾热解生物炭对水中亚甲基蓝的吸附[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1165-1174.
- GAO Doudou, GUO Minhui, WANG Kan, et al. Adsorption of aqueous methylene blue by biochar pyrolyzed from municipal solid waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(5): 1165-1174.
- [38] 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]. Bioresource Technology, 2020, 306: 123202.
- [39] HUANG Wen, ZHANG Min, WANG Yinhai, et al. Biochars prepared from rabbit manure for the adsorption of rhodamine B and Congo red: Characterisation, kinetics, isotherms and thermodynamic studies [J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2020, 81(3): 436-444.
- [40] VYAVAHARE G, JADHAV P, JADHAV J, et al. Strategies for crystal violet dye sorption on biochar derived from mango leaves and evaluation of residual dye toxicity [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 296-305.
- [41] MEILI L, GODOY R P S, SOLETTI J I, et al. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) stump biochar: Physical/chemical characteristics and dye affinity [J]. Chemical Engineering Communications, 2019, 206(7): 829-841.
- [42] BOAKYE P, TRAN H N, LEE D S, et al. Effect of water washing pretreatment on property and adsorption capacity of macroalgae-derived biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233: 165-174.

[作者简介] 陈佼(1987—), 博士, 副教授。E-mail: 401603414@qq.com。通讯作者: 陆一新, 博士, 教授。E-mail: yx1u61@163.com。

[收稿日期] 2022-07-06(修改稿)