

热解法制备烟杆生物碳及其吸附性能研究

胡念武^{1,2,3}, 王子维^{1,2,3}, 刘志昌^{1,2,3}, 刘奔^{1,2,3}, 陈一桢^{1,2,3},
童宇星^{1,2,3}, 李晓涵⁴, 王磊⁴

(1.湖北中烟工业有限责任公司, 武汉 430040; 2.湖北新业烟草薄片开发有限公司, 武汉 430056;
3.重组烟叶应用技术研究湖北省重点实验室, 武汉 430040; 4.湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点
实验室, 武汉 430068)

摘要: **目的** 解决烟杆废弃物的燃烧处理造成的资源浪费和环境污染问题, 研究实现烟杆废弃物资源化利用。**方法** 通过对烟杆在不同温度下进行热解制备烟杆生物碳, 表征烟杆生物碳的形貌、结构和吸附性能, 并将其应用于重金属离子吸附。**结果** 研究表明, 800 °C热解条件下制得的烟杆生物碳具有良好的孔隙结构以及优异的金属离子吸附效果, 该生物碳对 Cu(II) 吸附效果最佳, Cd(II) 次之, Cr(III) 的吸附效果不显著。**结论** 烟杆制备的生物碳对特定重金属离子具有优异的选择吸附效果, 该研究对重金属吸附和污水处理领域的发展有重要的指导意义。

关键词: 烟杆; 生物碳; 重金属吸附

中图分类号: TS49 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)05-0034-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.005

Preparation of Biochar from Tobacco Stems by Pyrolysis and Its Adsorption Performance

HU Nian-wu^{1,2,3}, WANG Zi-wei^{1,2,3}, LIU Zhi-chang^{1,2,3}, LIU Ben^{1,2,3},
CHEN Yi-zhen^{1,2,3}, TONG Yu-xing^{1,2,3}, LI Xiao-han⁴, WANG Lei⁴

(1. China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Hubei Xinye Reconstituted Tobacco Development Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 3. Applied Technology Research of Reconstituted Tobacco Hubei Province Key Laboratory, Wuhan 430040, China; 4. Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The work aims to research the resource utilization of tobacco stalk waste to solve the great waste of resources and environmental pollution caused by combustion treatment of tobacco stems. The morphology, structure and adsorption properties of the tobacco stem biochar were characterized by pyrolysis of tobacco stems at different temperature, and the ions adsorption of heavy metals were applied. The results showed that the tobacco stem biochar produced during pyrolysis at 800 °C had a good pore structure and excellent metal ion adsorption effect, and its adsorption effect on Cu(II) was the best, followed by Cd(II). That on Cr(III) was not significant. The biochar prepared from tobacco stems has excellent selective adsorption effect on specific ions, and this study has important guiding significance for the development of heavy metal adsorption field.

KEY WORDS: tobacco stem; biochar; heavy metal adsorption

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 湖北省自然科学基金 (2021CFB595)

作者简介: 胡念武 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为再造烟叶工艺和产品技术。

通信作者: 王磊 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物基功能材料和纤维。

在 20 世纪, 随着含重金属农用化学品的过度使用以及工业活动的迅速扩张, 有毒重金属排放到环境中的数量急剧增加。有毒重金属, 包括铜 (Cu)、镉 (Cd) 和铬 (Cr) 等会进入植物、动物和人体组织, 对植物^[1]、动物和人类^[2]造成有害影响。吸附被认为是去除重金属较为有效的方法之一, 因此, 探索高效、经济的重金属吸附途径以保障环境安全, 具有重要而紧迫的意义。生物碳是一种在真空或氧气有限的环境下从生物质中转换得到的富含碳的材料^[3], 而热解是将生物质转化为生物碳的最常用的方法^[4]。生物碳具有良好的表面性质, 来源广泛且对环境友好^[5], 引起了各领域的极大关注^[6]。基于这种能够吸附多种污染物的能力, 生物碳被广泛用作环境保护的吸附剂^[7]。

烟草具有很高的经济价值, 在我国被广泛种植, 尤其是在云贵等地区。我国烟草种植面积一般在 40~90 万公顷, 每年烟草的产量在 200~300 万 t, 由此产生的烟草废弃物 (主要是烟杆) 每年达到 300~500 万 t^[8]。烟杆体积大、利用率低且不宜填埋, 农民一般将其晒干后直接集中焚烧, 极大地造成了环境污染^[9]。加强对烟杆的回收和高值化利用可以有效处理这些废弃物, 目前对烟杆的资源化利用主要是将其转化为碳材料, 其中以生物碳和活性碳为主要研究方向。通过热解等方法将烟杆转化为生物碳是一种很有前景的可持续管理策略, 近年来得到了深入研究。此外, 生物碳经过改性后具有较为良好的物理特性, 可以应用于吸附等领域^[10-11], 因此, 烟杆的高值化利用不仅可以减少环境污染, 还能为烟农带来新的收益途径, 具有很好的研究意义。常见的生物碳制备工艺包括热解法、水热碳化法和气化法^[12]。水热碳化法制备的生物碳稳定性差且容易氧化降解, 而气化法制备的生物碳产量极低^[4]。热解法是将生物质原料置于管式炉中, 在氮气环境下降温, 原料在高温环境下分解得到生物碳、生物油以及挥发性气体。热解法主要分为快速热解和慢速热解, 快速热解法通常用于制备生物油, 其停留时间短且获得的固态物较少; 而慢速热解需要较长的反应时间和较低的热解温度, 可以获得更高的碳产率。

将烟杆资源回收再利用用于解决重金属残留问题, 既可解决资源浪费问题, 又可改善生态环境, 对农业废弃物资源化利用具有重要的研究价值。本实验通过热解法, 在 400~800 °C 条件下对烟杆进行碳化处理, 从而得到不同结构的烟杆生物碳。利用扫描电镜、红外、拉曼等方法对烟杆生物碳的理化性能进行表征。建立不同热解条件下制备的烟杆生物碳与重金属离子吸附之间的关系, 并为烟杆生物碳在重金属吸附方面的应用发展做铺垫。

1 实验

1.1 材料和试剂

主要材料和试剂: 烟杆, 湖北新业烟草薄片开发

有限公司; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CdSO}_4 \cdot 3/8 \text{H}_2\text{O}$ 、 CrCl_3 , 上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 烟杆生物碳制备方法

将烟杆裁切成 1 cm 的小段, 真空干燥 24 h 以后置于管式炉中, 在 N_2 保护氛围下高温碳化。管式炉升温速率: 先以 5 °C/min 的升温速率升至 200 °C, 再以 10 °C/min 的速率升至 400~800 °C, 在目标温度下保温 90 min。 N_2 流速为 200 mL/min。反应结束后, 待炉内温度降至室温后将碳化产物取出, 得到烟杆生物碳。

1.3 烟杆生物碳表征及吸附

1.3.1 灰分测试

将烟杆生物碳在真空干燥箱中干燥 24 h 后取出, 放入马弗炉, 在 575 °C 条件下灼烧 4 h, 干燥器中冷却后称量, 得到烟杆生物碳灰分含量。

1.3.2 红外光谱

取微量烟杆生物碳样品与无水溴化钾粉末共同置于研钵中, 反复研磨样品至细腻粉末状, 将其均匀平铺在压片装置中, 在 19 MPa 的压力下压制 3 min, 制成均匀且透光的薄片。使用 Niconet 6700 型红外光谱仪对样品进行分析, 扫描波长范围为 500~4 000 cm^{-1} , 分析分辨率为 2 cm^{-1} 。

1.3.3 拉曼光谱

取少量样品置于载玻片上, 使用共焦拉曼 (Xplora Plus, Horiba Francesas, France), 在室温条件下采集样品, 采用尼康 50X 物镜采集, 测试波长为 638 nm, 功率为 25 mW。

1.3.4 扫描电镜

将烟杆生物碳样品用导电胶置于样品台上, 使用扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi SU70, Japan) 观察生物碳的表面形态, 电压为 3 kV。

1.3.5 比表面积测试

为了进一步了解不同热解温度下制备的烟杆生物碳的比表面积 (BET), 对这 2 种样品使用比表面积分析仪 (ASAP 2020) 进行分析, 样品在 120 °C 下进行真空脱气处理 9 h, 然后在 77 K 下进行氮气等温吸附脱附测定。

1.3.6 金属离子吸附

分别配置 1~20 mg/L 不同质量浓度梯度的 CuSO_4 水溶液、 CdSO_4 水溶液、 CrCl_3 水溶液制作标准曲线。将 20 mg 生物碳置于 20 mL 质量浓度为 10 mg/L 的上述溶液中, 室温条件下在摇床中以 200 r/min 处理 4 h, 随后用 0.45 μm 过滤器过滤, 置于离心管中, 利用原子吸收分光光度计 (SHIMADZU AA-6300C) 测定离子浓度, 计算吸附率。

$$\text{Cu(II)去除率} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为 Cu (II) 的初始质量浓度, mg/L;
 C_t 为 t 时刻的 Cu (II) 质量浓度, mg/L。

不同 pH 下的吸附实验: 取 800 °C 热解温度下制得的烟杆生物碳, 配置不同 pH 的 CuSO_4 水溶液、 CdSO_4 水溶液、 CrCl_3 水溶液, 将 20 mg 生物碳置于 20 mL 质量浓度为 10 mg/L 的上述溶液中, 室温条件下在摇床中以 200 r/min 处理 4 h, 随后用 0.45 μm 过滤器过滤, 置于离心管中, 利用原子吸收分光光度计测定其离子浓度, 计算吸附率。

2 结果与分析

2.1 烟杆生物碳结构分析

在生物质多孔碳的应用方面, 基于碳材料具有较高的电导率、可调的微孔结构以及优异的稳定性等特点, 近些年来, 作为吸附材料受到国内外研究者的广泛关注。对烟杆多孔碳的大多研究主要集中于材料自身的吸附功能, 未对不同离子的吸附做系统性的研究。吸附过程涉及多种作用机理, 包括静电作用、离子交换, 物理吸附表面络合或表面沉淀, 不同重金属离子的具体吸附机理不同。生物碳较大的比表面积和空隙结构有利于吸附过程^[13], 而生物碳的表面物理化学性质在很大程度上取决于热解条件^[14]。为了研究热解温度对烟杆生物碳吸附性能的影响, 通过红外、拉曼、扫描电镜对烟杆生物碳进行全面分析。

表 1 为不同热解温度下制备得到的烟杆生物碳灰分的含量, 由此可以看出, 随着热解温度升高, 烟杆生物碳的灰分逐渐增加。烟杆生物碳的红外谱图结构如图 1 所示, 烟杆生物碳从 400 ~ 800 °C 经历了不同的热分解过程。随着热解温度的升高, 烟杆生物碳的红外谱图有着明显的结构变化, 随着碳化温度升高, 烟杆开始脱水并且伴随着一部分连接键断裂, 烟杆生物碳的特征峰数量和强度都有明显的下降趋势。在热解过程中, 3 400 cm^{-1} 处的宽带吸收峰表现为—OH 的振动, 从图 1 中可以看到随着温度的升高—OH 峰的强度降低, 表明烟杆的脱水导致了—OH 的损失^[15]。2 930 和 1 460 cm^{-1} 分别对应甲基/烷烃/醛类中的强 C—H 振动和芳香族结构中的 C=C 拉伸^[16], 这可能是由于烟杆在升温过程中 C—H 键的裂解形成 CH_4 , 以及芳香族中的羧酸基团衍变为羧酸盐^[17]。在进行脱氢和脱氧时, C—H 键断裂的同时会增加芳香族的含量^[18]。在 1 600 cm^{-1} 波长处出现的峰归属于游离羧基的 C=O 和 C—O 的拉伸振动, 当热解温度达到 600 ~ 800 °C 时, 该峰急剧下降直至消失, 表明了热解过程中烟杆中的糖类和纤维素的连接键得到破坏, 游离羧基中的 C=O 断裂并释放大量的 CO 和 CO_2 , 高温促进了烟杆中的脂肪族碳的分解与转

化, 降低了烟杆生物碳中—OH、C=O 等含氧官能团的含量, 而芳香族 C—H 的峰出现并加强^[19]。对于 600 °C 以上热解的生物碳, 糖和纤维素的峰持续减弱或消失, 碳水化合物脱氢开始缩合, 生成酮、醛、羧酸等基团^[20]。

表 1 不同热解温度下制备烟杆生物碳灰分质量分数
 Tab.1 Ash content of cigarette biochar prepared by different pyrolysis temperatures

制备温度/°C	灰分质量分数/%
400	81.6
500	83.2
600	85.4
700	87.7
800	89.9

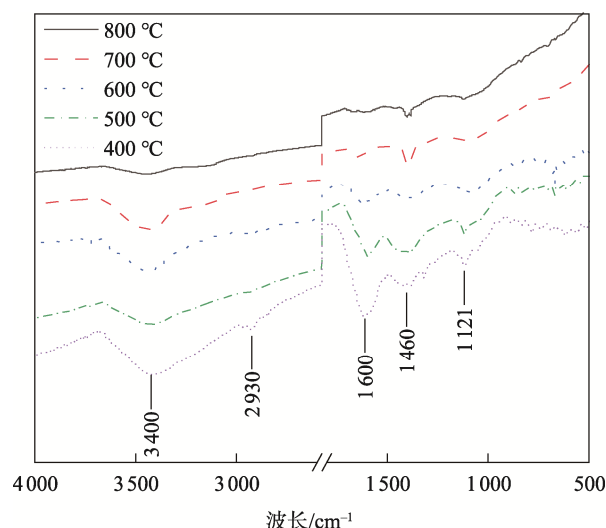


图 1 烟杆生物碳红外谱图
 Fig.1 FTIR spectrum of tobacco stem biochar

拉曼光谱是研究碳材料缺陷和石墨化结构的重要手段之一。使用拉曼对生物碳的石墨化程度进行了进一步表征 (图 2)。由图 2 可以看出, 在 400 ~ 800 °C 热解温度下制备得到的烟杆生物碳都有 2 个突出的特征峰, 出现在 1 350 cm^{-1} (D 峰, 无序结构) 和 1 580 cm^{-1} (G 峰, 石墨化结构) 处。随着热解温度提高, D 峰与 G 峰逐渐增强。 I_D/I_G 的强度比值与无序碳含量呈正相关, 通常用于确定石墨化的程度, 即较高的 I_D/I_G 的比率代表生物碳中无序碳含量更多, 具有更多的孔隙结构^[21]。 I_D/I_G 的比值随着热解温度的增加而增加, 此外, 根据 BET 结果可知, 在较高的热解温度下制备的烟杆生物碳比表面积也较高, 可能是由于某些轻质气体 (CO_2 、CO、 CH_4 和 H_2O) 的释放导致的^[22-23]。拉曼光谱证明, 较高的热解温度会使生物碳的无序化程度提高, 产生更多的缺陷结构, 而无序化程度越高, 生物碳的吸附效果越好。

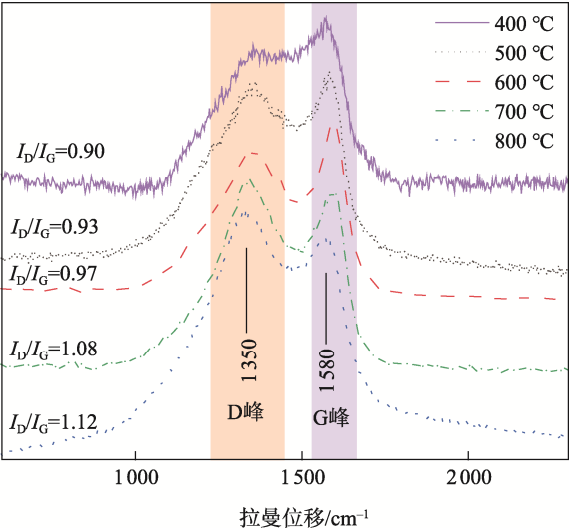


图 2 烟杆生物碳拉曼谱图
Fig.2 Raman spectrum of tobacco stem biochar

2.2 烟杆生物碳的形貌分析

生物碳的微观结构对其物理吸附性能具有较大的影响。图 3 是使用扫描电子显微镜对不同热解温度下制备的烟杆生物碳的表面形态形貌进行观察,可以看出,在 400 ~ 800 °C 热解温度下所制备的烟杆生物碳均具有一定的孔隙结构。当热解温度在 400 ~ 500 °C 时,可以观察到生物碳具有还具有一定的片层结构,表面比较光滑密实,孔隙较少。当热解温度提

升至 600 °C 后,生物碳样品表面孔隙结构更加丰富,孔隙数量增多,出现更多的凹陷微孔结构,使得比表面积增大,且随着热解温度升高至 700、800 °C 后,生物碳表面缺陷结构进一步增加,生物碳上的孔隙结构越多,比表面积越大,则金属离子的吸附位点越多,有利于吸附反应的进行,从而对金属离子产生更好的吸附效果。

2.3 烟杆生物碳的重金属吸附性能

从图 4 中可以发现,在烟杆生物碳的吸附反应过程中伴随有吸收-脱附滞后过程,在相对压力 p/p_0 约为 0.5~0.9 时,产生的"H4"型滞后环表示样品中存在窄或狭缝状的孔,甚至更大的孔隙。另外,在很高的相对压强 ($p/p_0>0.9$) 下仍然存在吸附,甚至出现了高压拖尾现象,说明材料中存在着大孔或缝式的孔隙。400 °C 热解温度下得到的生物碳比表面积仅为 0.48 m²/g, 500 °C 热解温度下得到的生物碳比表面积为 1.34 m²/g, 600 °C 热解温度下得到的生物碳比表面积为 2.91 m²/g, 700 °C 热解温度下得到的生物碳比表面积为 3.94 m²/g, 当热解温度达到 800 °C 时,得到的生物碳比表面积最高,为 4.15 m²/g。随着热解温度升高,烟杆生物碳的比表面积变大,比表面积越大,烟杆生物碳的吸附性能越好。图 5 为不同热解温度制备的烟杆生物碳比孔容分布曲线,在不同热解温度下制备的烟草秸秆生物碳中,比孔容主要集中在 7~20 nm (中孔),说明烟杆生物碳的孔隙结构是以 7~20 nm 的中孔为主。

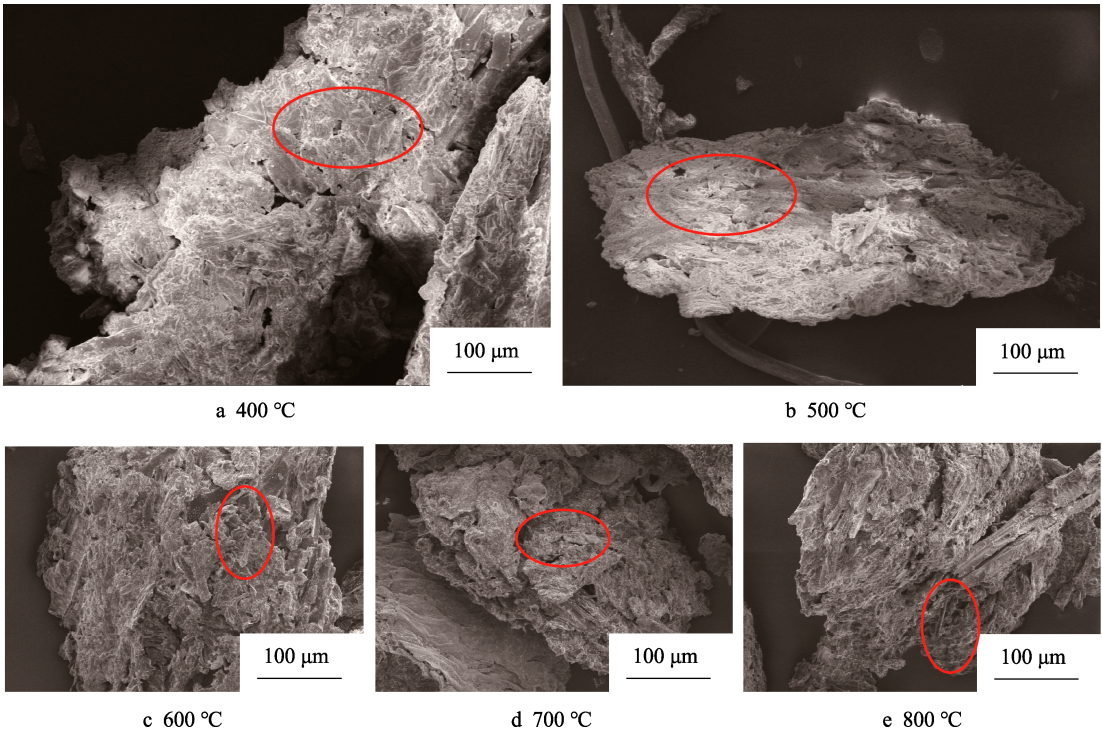


图 3 烟杆生物碳 SEM 图像
Fig.3 SEM images of tobacco stem biochar

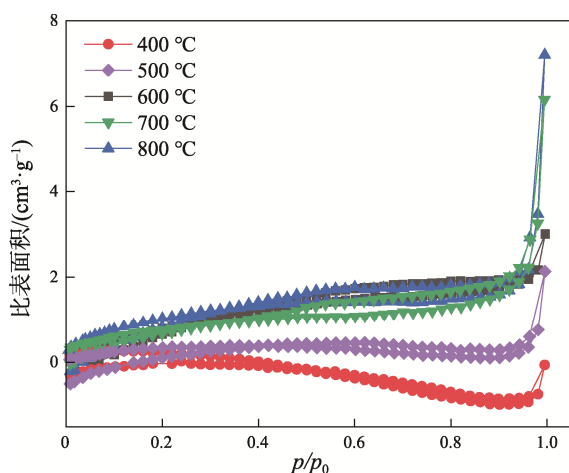


图4 不同温度制备烟杆生物碳的
N₂ 吸脱附等温线

Fig.4 N₂ adsorption and desorption
isotherm of tobacco stem biochar
prepared at different temperature

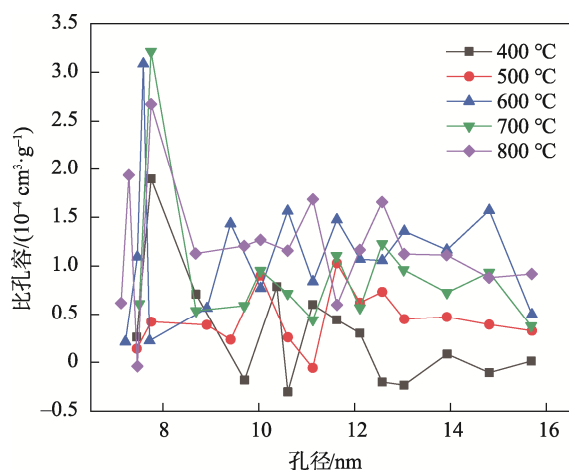


图5 不同温度制备烟杆生物碳的比
孔容分布曲线

Fig.5 Specific pore volume
distribution of tobacco stem biochar
prepared at different temperature

图6显示了不同pH值条件下生物碳对各种金属离子的吸附情况。可以看出,随着pH值的增加,生物碳对金属离子的去除率逐渐增加,当pH值达到5左右时,吸附曲线达到平稳,这可能是由于在酸性条件下,高浓度的氢离子占据了生物碳上的吸附位点,从而阻止了金属离子在生物碳上的吸附^[24],而在pH值高于7时,金属离子与溶液中的OH⁻反应形成羟基络合物,从而影响金属离子在生物碳上进一步吸附,因此,在随后的吸附实验中,没有调整溶液的pH值。

不同温度下制备得到的烟杆生物碳对金属离子(Cu²⁺、Cd²⁺、Cr³⁺)吸附结果如图7所示。可以看出,同一热解温度下得到的烟杆生物碳对Cu(II)的吸附效果最好,800 °C热解条件下得到的生物碳对Cu(II)的去除率达到71.9%;Cd(II)次之,为22.5%;对Cr(III)的吸附效果最差,去除率仅为5.6%。将

生物碳对Cr(III)的清除率与Cu(II)的清除率进行差异分析得出 $P=0.013$,说明这2组数据具有显著性差异。生物碳对金属离子吸附效果与金属离子的电负性相关^[25]。Cu²⁺的电负性为1.9,高于Cd²⁺与Cr³⁺的电负性1.69和1.66,因此生物碳对Cu²⁺的吸附效果优于对Cd²⁺和Cr³⁺的。此外,随着热解温度的升高,烟杆生物碳对同种金属离子的吸附效果增强,这是因为高温下烟杆生物碳具有更多的微孔结构。由Cu(II)、Cd(II)的吸附结果可以看出,在热解温度达到600 °C时,生物碳对金属离子的吸附效果明显提高。这可能是由于当热解温度达到600 °C时,生物碳的无序化程度提高,产生更多的微孔(图2),从而导致吸附效果提高。由吸附结果可以看出,制备得到的烟杆生物碳更适合处理Cu(II)废水,其对铜离子具有较高的去除效果。

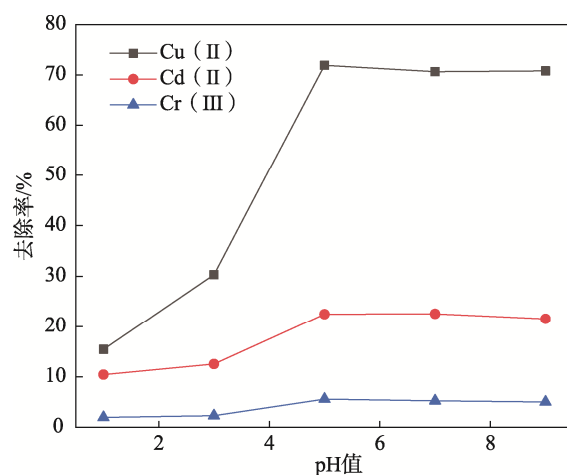


图6 不同pH条件下烟杆生物碳对Cu(II)、
Cd(II)以及Cr(III)的吸附效果
Fig.6 Adsorption of Cu(II), Cd(II) and
Cr(III) on biochar prepared from tobacco
stems under different pH conditions

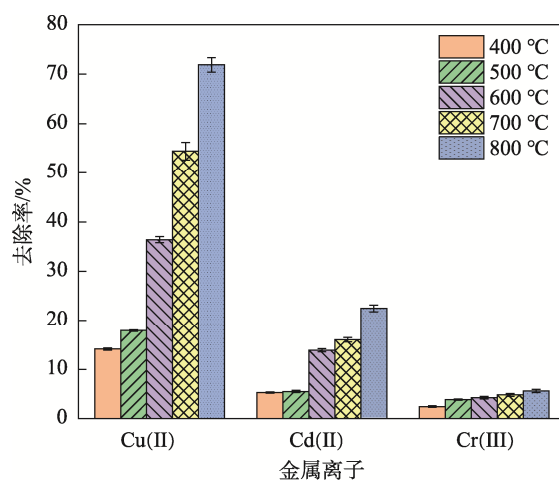


图7 不同温度制备的烟杆生物碳对Cu(II)、
Cd(II)以及Cr(III)的吸附效果
Fig.7 Adsorption of Cu(II), Cd(II) and
Cr(III) on biochar prepared from
tobacco stems at different temperature

3 结语

实验以烟杆为原料,在不同热解温度下制备了烟杆生物碳。通过红外、拉曼得到了温度对生物碳结构的影响:温度越高,烟杆生物碳无序化程度越高。此外,热解温度对生物碳的微观形貌也有较大的影响。当热解温度升高,生物碳样品孔隙数量增多,出现更多的凹陷微孔结构,使得比表面积增大,生物碳表面缺陷结构进一步增加,丰富的孔隙结构同时也为金属离子提供了更多的吸附位点,有利于吸附反应的进行,从而对金属离子产生更好的吸附效果。通过对Cu(II)、Cd(II)以及Cr(III)的吸附性能表征可以得出,制备温度越高,得到的生物碳对金属离子的吸附性能越强,且对Cu(II)的吸附有较强的选择性。生物碳对重金属的吸附研究表明,热解条件对生物碳的吸附性能具有显著影响,因此,建立不同热解条件下生物碳性质与重金属离子吸附之间的关系至关重要。本实验为不同热解温度下得到的烟杆生物碳对金属离子的吸附效果不同提供了理论依据,促进了烟杆废弃物在重金属吸附领域的应用。

参考文献:

- [1] BOTHE H, SŁOMKA A. Divergent Biology of Facultative Heavy Metal Plants[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 219: 45-61.
- [2] PRAVEENA S M, OMAR N A. Heavy Metal Exposure from Cooked Rice Grain Ingestion and Its Potential Health Risks to Humans from Total and Bioavailable Forms Analysis[J]. *Food Chemistry*, 2017, 235: 203-211.
- [3] NAM W L, PHANG X Y, SU Man-huan, et al. Production of Bio-Fertilizer from Microwave Vacuum Pyrolysis of Palm Kernel Shell for Cultivation of Oyster Mushroom (*Pleurotus Ostreatus*)[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 624: 9-16.
- [4] KAMBO H S, DUTTA A J R, REVIEWS S E. A Comparative Review of Biochar and Hydrochar In Terms of Production, Physico-Chemical Properties and Applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 359-378.
- [5] LIAN Fei, XING Bao-shan. Black Carbon (Biochar) in Water/Soil Environments: Molecular Structure, Sorption, Stability, and Potential Risk[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(23): 13517-13532.
- [6] LIU Wu-jun, JIANG Hong, YU Han-qing. Development of Biochar-Based Functional Materials: Toward a Sustainable Platform Carbon Material[J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(22): 12251-12285.
- [7] ZAZYCKI M A, GODINHO M, PERONDI D, et al. New biochar from pecan nutshells as an alternative adsorbent for removing reactive red 141 from aqueous solutions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 57-65.
- [8] 刘超, 翟欣, 许自成, 等. 关于烟杆资源化利用的研究进展[J]. *江西农业学报*, 2013, 25(12): 116-119.
LIU Chao, ZHAI Xin, XU Zi-cheng, et al. Research Advance in Resource Utilization of Tobacco Stalk[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(12): 116-119.
- [9] KARLEN D L, LAL R, FOLLETT R F, et al. Crop Residues: the Rest of the Story[M]. New York: American Chemical Society, 2009: 8011-8015.
- [10] LI W, ZHANG L B, PENG J H, et al. Preparation of High Surface Area Activated Carbons from tobacco Stems with K₂CO₃ Activation Using Microwave Radiation[J]. *Industrial crops and products*, 2008, 27(3): 341-7.
- [11] MENG A, ZHANG Y, ZHUO J, et al. Investigation on Pyrolysis and Carbonization of Eupatorium Adenophorum Spreng and Tobacco Stem[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2015, 88(4): 480-489.
- [12] MEYER S, GLASER B, QUICKER P. Technical, Economical, and Climate-Related Aspects of Biochar Production Technologies: A Literature Review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22): 9473-9483.
- [13] ZHOU N, CHEN H, FENG Q, et al. Effect of Phosphoric Acid on the Surface Properties and Pb(II) Adsorption Mechanisms of Hydrochars Prepared from Fresh Banana Peels[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 221-230.
- [14] LAM S S, LIEW R K, JUSOH A, et al. Progress in Waste Oil to Sustainable Energy, with Emphasis on Pyrolysis Techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 741-753.
- [15] ZHANG S, SU Y, XIONG Y, et al. Physicochemical Structure and Reactivity of Char from Torrefied Rice Husk: Effects of inorganic Species and Torrefaction Temperature[J]. *Fuel*, 2020, 262: 116667.
- [16] SHARMA R K, WOOTEN J B, BALIGA V L, et al. Characterization of Chars from Pyrolysis of Lignin[J]. *Fuel*, 2004, 83(11/12): 1469-82.
- [17] CHENG J, HU S C, SUN G T, et al. The Effect of Pyrolysis Temperature on the Characteristics of Biochar, Pyrolygneous Acids, and Gas Prepared from Cotton Stalk Through a Polygeneration Process[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 170: 113690.

- [18] YANG Z, KUMAR A, HUHNKE R L. Review of Recent Developments to Improve Storage and Transportation Stability of Bio-Oil[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 859-870.
- [19] WANG Hui-hui, WANG Xin, CUI Yan-shan, et al. Slow Pyrolysis Polygeneration of Bamboo (*Phyllostachys Pubescens*): Product Yield Prediction and Biochar Formation Mechanism[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 263: 444-449.
- [20] 徐亮, 于晓娜, 李雪利, 等. 不同热解温度制备的烟杆生物炭理化特征分析[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1): 75-81.
XU Liang, YU Xiao-na, LI Xue-li, et al. Physico-Chemical Characteristics of Biochars Prepared by Pyrolysis of Tobacco-Stalk under Different Temperatures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(1): 75-81.
- [21] JIAO Gao-jie, MA Ji-liang, LI Yan-cong, et al. Enhanced Adsorption Activity for Phosphate Removal by Functional Lignin-Derived Carbon-Based Adsorbent: Optimization, Performance and Evaluation[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143217.
- [22] ANAND A, KUMAR V, KAUSHAL P. Biochar and Its Twin Benefits: Crop Residue Management and Climate Change Mitigation in India [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 156: 111959.
- [23] RATHNAYAKE D, EHIDIAMHEN P O, EGENE C E, et al. Investigation of Biomass and Agricultural Plastic Co-Pyrolysis: Effect on Biochar Yield and Properties[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 155: 105029.
- [24] 王道涵, 李景阳, 汤家喜. 不同热解温度生物炭对溶液中镉的吸附性能研究[J]. *工业水处理*, 2020, 40(1): 18-23.
WANG Dao-han, LI Jing-yang, TANG Jia-xi. Adsorption of Cadmium in Solution by Biochar at Different Pyrolysis Temperatures[J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(1): 18-23.
- [25] SHI T, JIA S, CHEN Y, et al. Adsorption of Pb(II), Cr(III), Cu(II), Cd(II) and Ni(II) onto a Vanadium Mine Tailing from Aqueous Solution[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 169(1/2/3): 838-846.

责任编辑: 曾钰婵