

温度对生物质三组分热解制备生物炭理化特性的影响

杨选民¹ 王雅君¹ 邱凌^{1,2} 赵立欣³ 孟程琳^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站, 陕西杨凌 712100;

3. 农业部规划设计研究院农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125)

摘要: 以纤维素、木聚糖和木质素为研究对象, 利用真空气氛炉热解制备生物炭, 探究温度对生物质三组分热解制备生物炭理化特性的影响规律, 为生物炭的性能调控和机理研究提供理论依据。结果表明: 纤维素和木聚糖的热解温度范围主要集中在 300~500℃, 纤维素生物炭产率由 35.38% 下降至 20.93%, 木聚糖生物炭产率由 46.28% 下降至 29.40%, 木质素热解温度范围主要集中在 300~600℃, 木质素生物炭产率由 81.22% 下降至 51.53%; 热解温度对生物质三组分制备生物炭的 C、H、O、N 元素含量的影响规律基本相同, 即 C 元素含量逐渐升高, H、O、N 元素含量逐渐降低, C 元素质量分数分别由 69.42%、72.92%、54.75% 升至 96.39%、77.26%、67.97%; 热解温度对生物质三组分制备生物炭的灰分、挥发分、固定碳和热值的影响规律基本相同, 即挥发分逐渐降低, 而灰分、固定碳和热值均逐渐升高, 挥发分分别由 50.67%、44.89%、39.99% 降至 7.63%、5.52%、14.41%, 固定碳分别由 47.95%、55.03%、35.41% 升至 90.18%、94.11%、53.70%, 热值分别由 25 652.58、26 681.81、21 173.29 kJ/kg 升至 34 602.52、33 965.15、24 142.62 kJ/kg; 热解温度对木质素生物炭的比表面积和孔径分布影响明显, 对纤维素和木聚糖生物炭的影响较小, 500℃ 时纤维素和木聚糖达到最优的比表面积和微孔体积, 600℃ 时木质素达到最优的比表面积和微孔体积; 热解温度在 500℃ 时, 纤维素和木聚糖制备的生物炭达到最大的碘吸附值, 纤维素生物炭碘吸附值为 422.46 mg/g, 木聚糖生物炭碘吸附值为 115.06 mg/g, 热解温度在 600℃ 时, 木质素制备的生物炭达到最大的碘吸附值, 为 460.35 mg/g。

关键词: 生物炭; 温度; 理化特性; 热解

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)04-0284-07

Effect of Temperature on Physicochemical Properties of Biochar Prepared by Pyrolysis of Three Components of Biomass

YANG Xuanmin¹ WANG Yajun¹ QIU Ling^{1,2} ZHAO Lixin³ MENG Chenglin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. The West Scientific Observing and Experimental Station of Rural Renewable Energy Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

Abstract: With the aim to study the performance regulation and mechanism of different biochar-based biomasses, cellulose, hemicellulose and lignin were used as the raw materials to prepare biochar by pyrolysis in vacuum atmosphere furnace. The results manifested that the pyrolysis temperature of cellulose and hemicellulose ranged from 300℃ to 500℃, and the yields of biochar decreased from 35.38% (cellulose), 46.28% (hemicellulose) to 20.93%, 29.40%, respectively. Meanwhile, the pyrolysis temperature range of lignin was 300~600℃, and the yields of biochar decreased from 81.22% to 51.53%. Moreover, the effect of pyrolysis temperature on C, H, O and N contents of prepared biochar were similar in the three feedstocks. The content of C raised up gradually according to the temperature increase, while the contents of H, O, N decreased gradually. Detailly, the content of C increased from

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-11-02

基金项目: 农业部重点实验室开放项目(KLERUAR2015-01)、公益性行业(农业)科研专项(201503135-18)和陕西省农业专项(2015-136)

作者简介: 杨选民(1979—),男,实验师,主要从事生物质能源研究,E-mail: tzkym@163.com

通信作者: 邱凌(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事生物能源与环境工程研究,E-mail: ql2871@126.com

69.42%, 72.92%, 54.75% to 96.39%, 77.26%, 67.97% for cellulose, hemicellulose and lignin, respectively. The effect of pyrolysis temperature on the content of ash, volatile, fixed carbon and the calorific value was basically the same in the three feedstocks. The volatile relatively decreased, and the ash, fixed carbon and calorific value increased gradually. Specifically, the volatile from the cellulose, hemicellulose and lignin fell to 7.63%, 5.52%, 14.41% from 50.67%, 44.89%, 39.99%, respectively. The fixed carbon increased from 47.95%, 55.03%, 35.41% to 90.18%, 94.11%, 53.70%, respectively. The calorific value rose to 34 602.52 kJ/kg, 33 965.15 kJ/kg, 24 142.62 kJ/kg from 25 652.58 kJ/kg, 26 681.81 kJ/kg, 21 173.29 kJ/kg, respectively. The significant effect of pyrolysis temperature on the specific surface area and pore size distribution of the prepared biochar was observed for lignin, however, insignificant effect was shown for cellulose and hemicellulose. The optimal surface area and pore volume of the biochar produced from cellulose and hemicellulose was obtained at 500°C, and the lignin was at 600°C. Besides, when the pyrolysis temperature was at 500°C, the iodine adsorption value of the biochar from cellulose and hemicellulose reached their respective maximum values at 422.46 mg/g and 115.06 mg/g. Meanwhile, at the pyrolysis temperature of 600°C, the iodine adsorption value of the biochar from lignin reached the maximum point of 460.35 mg/g.

Key words: biochar; temperature; physicochemical properties; pyrolysis

引言

生物质热解是一种重要的生物质利用技术^[1]。生物炭是生物质热解的主要产物之一^[2], 羟基、酚羟基、羧基等芳香结构, 以及脂肪族和氧化态碳是生物炭的典型特征^[3-4]。生物炭具有诸多的优良特性, 如碳含量高、热值高、孔隙发达、比表面积较大、性质稳定等^[5]。生物炭可用于冶金和生产活性炭^[6], 也可作为土壤的改良剂, 增强土壤的持水性及提高水肥利用效率等^[7-8]。

温度是影响生物质热解过程和产物的关键因素^[9-11]。生物质热解炭化一般分4个阶段: 第1阶段为120~150°C, 生物质中所含水分依靠外部供给的热量进行蒸发; 第2阶段为150~275°C, 不稳定成分分解成CO₂、CO及少量乙酸, 标志着热解反应的开始; 第3阶段为275~450°C, 生物质急剧地进行热分解, 生成大量的分解产物, 是热解的主要发生阶段; 第4阶段为450~500°C, 这个阶段是对木炭进行煅烧, 排出残留在木炭中的挥发物质, 提高木炭中的固定碳含量^[12]。300°C作为热解主反应起点、400°C作为热解反应剧烈点、500°C作为煅烧炭关键点、600°C作为常温热解炭化终结点, 这4个温度点常被用作研究热解的关键节点。赵世翔等^[13]以苹果枝条为原料在300、400、500、600°C下热解, 发现生物炭的碳含量、比表面积随着温度的增加而增大。杨瑛等^[14]以棉秆为原料在400、500、600°C下热解, 发现生物炭产率随着温度的增加而减小。

生物质主要是由纤维素、半纤维素和木质素组成的高聚物, 它的热解行为可以认为是这3种主要组分热解行为的综合表现^[15-16]。从生物质三组分的角度来分析生物质热解特性, 可以从源头上探究

生物质的热解规律。而温度对生物质三组分热解炭化同样具有重要影响, 但目前仍缺乏相关方面的研究报道。因此, 本文以生物质三组分为研究对象, 测定其在不同温度下制备生物炭的理化特性, 包括产率、元素含量、表面结构、碘吸附值等多项关键指标, 探究温度对生物质三组分热解制备生物炭理化特性的影响规律, 以期对生物炭的性能调控和机理研究提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用原料为纤维素、半纤维素和木质素。纤维素由阿拉丁生物科技有限公司提供(CAS号: 9004-34-6), 呈粉末状, 显白色。半纤维素结构成分相对复杂, 而木聚糖是半纤维素中最常见且含量最多的结构单体, 因此选用木聚糖作为半纤维素的模拟物, 对半纤维素进行热解特性研究^[17]。木聚糖由阿拉丁生物科技有限公司提供(CAS号: 9014-63-5), 显白色, 为水不溶性木聚糖, 纯度85%。木质素由Sigma公司提供(CAS号: 8068-05-1), 该木质素pH值为10.5, 显棕褐色。本试验所用原料均为粉末状且粒径小于0.1 mm, 原料成分分析和热值如表1所示。

1.2 试验方法

1.2.1 生物炭的制备

分别取纤维素、木聚糖、木质素40 g, 置于105°C电热恒温鼓风干燥箱内加热干燥至质量恒定, 随后放入真空气氛炉内, 用高纯氮气吹扫30 min, 确保试验在绝氧状态下进行, 热解温度在5 min内由室温(20°C)快速升至100°C, 然后以1°C/min的升温速率分别加热至300、400、500、600°C, 保温2 h后自然冷

表1 原料成分分析和热值

Tab. 1 Composition analysis and calorific value of materials

原料	元素分析(质量分数)/%							工业分析(质量分数)/%				热值/ (kJ·kg ⁻¹)
	C	H	O	N	S	Na	Al	水分	灰分	挥发分	固定碳	
纤维素	44.76	6.08	49.16					2.86	0.01	92.05	5.08	16 313.28
木聚糖	41.58	6.40	52.02					3.85	0.02	91.51	4.62	16 207.36
木质素	47.86	4.75	28.96	1.95	4.42	7.33	4.73	3.16	23.54	51.29	22.01	19 309.74

却至室温。纤维素生成的生物炭分别记为 C300、C400、C500 和 C600,木聚糖生成的生物炭分别记为 H300、H400、H500 和 H600,木质素生成的生物炭分别记为 L300、L400、L500 和 L600。

1.2.2 分析方法

(1) 生物炭的产率计算

生物炭的产率计算公式为

$$Y = \frac{M}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 Y ——生物炭产率, %

M ——生物炭质量, g

M_0 ——原料质量, g

(2) 工业分析

生物炭灰分和挥发分的含量根据 GB/T 212—2008 中缓慢灰化法进行测定,干燥基固定碳质量分数的计算公式为

$$C_d = (1 - A_d - V_d) \times 100\% \quad (2)$$

式中 A_d ——干燥基灰分质量分数, %

V_d ——干燥基挥发分质量分数, %

C_d ——干燥基固定碳质量分数, %

(3) 元素分析

生物炭元素含量采用 ECS4024 型元素分析仪进行测定。

(4) 热值分析

采用 ZDHW-5 型微机全自动量热仪对生物炭的热值进行测定。

(5) 傅里叶变换红外光谱

将制好的样品研磨均匀后于压片机制成薄片,采用 BRUKER TENSOR 27 型傅里叶红外光谱仪进行测定,测量范围为 400 ~ 4 000 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹。

(6) 形貌分析

采用 HITACHI TM3030 型扫描电子显微镜对生物炭进行形貌分析,该扫描电镜的放大倍率为 15 ~ 30 000 倍。

(7) 比表面积及孔径结构

采用 JW-BK132F 型比表面积及孔径分析仪对生物炭的比表面积及孔径分布进行测定,该仪器是以静态容量法对样品进行等温吸附和脱附测定,通

过 BET 方程计算得到样品的比表面积,利用 BJH 模型计算得到孔径分布。试验仪器比表面积测试范围为 0.000 5 m²/g 以上,孔径测试范围为 0.35 ~ 500 nm。

(8) 碘吸附性分析

根据 GB/T 12496.8—2015 对生物炭的碘吸附值进行测定。

2 结果与分析

2.1 生物炭的产率分析

生物质三组分热解制备生物炭的产率随热解温度的变化如图 1 所示。热解温度由 300℃ 升高至 600℃,三组分热解生物炭的产率均逐渐降低,木质素生物炭产率由 81.22% 迅速下降至 51.53%。热解温度由 300℃ 升高至 500℃ 时,纤维素和木聚糖中大量的挥发分和低沸点物质不断析出,因此生物炭产率快速降低,纤维素生物炭产率由 35.38% 下降至 20.93%,木聚糖生物炭产率由 46.28% 下降至 29.40%。热解温度由 500℃ 升高至 600℃ 时,高沸点物质和难挥发性物质缓慢分解,生物炭产率下降趋于缓和,纤维素生物炭产率由 20.93% 下降至 20.67%,木聚糖生物炭产率由 29.40% 下降至 27.12%。这说明纤维素和木聚糖的热解温度范围主要集中在 300 ~ 500℃,在这个温度区间内,纤维素和木聚糖释放大量挥发分,生物炭产率快速下降。而木质素是生物质三组分中热稳定性最好的组分,其热解温度区间相对较宽,集中在 300 ~ 600℃ 范围内。另外,木质素炭产率较高,一方面是因为木质素是一种芳香族高分子化合物,另一方面是因为本试验所用木质素中灰分的含量较高,灰分

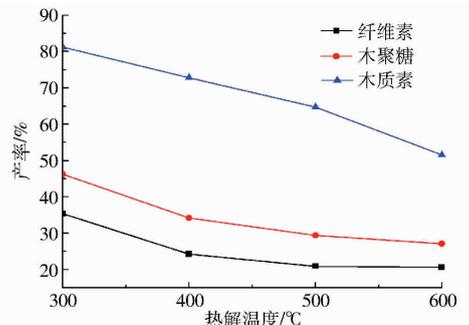


图1 生物炭的产率

Fig. 1 Yield of biochar

中的金属盐类成分也会对生物炭的形成产生催化作用^[18]。

2.2 生物炭的成分分析和热值

生物质三组分热解制备生物炭的成分及热值变化如表2所示。热解温度对生物质三组分制备生物炭的C、H、O、N元素影响规律基本相同,即随着热

解温度的升高,C元素含量逐渐升高,H、O、N元素含量逐渐降低。这是由于在高温热解反应过程中,C—H和C—O键发生断裂,使得H原子和O原子转化为挥发性气体,脱离了碳结构体系^[19];同时,高温使N原子转化为氨基或其他含氮有机气态物质,同样也脱离了碳结构体系^[20]。

表2 生物炭的成分分析和热值

Tab.2 Composition analysis and calorific value of biochar

样品	元素分析(质量分数)/%				工业分析(质量分数)/%			热值/ (kJ·kg ⁻¹)
	C	H	O	N	灰分	挥发分	固定碳	
C300	69.42	4.05	26.53		1.38	50.67	47.95	25 652.58
C400	82.31	3.59	14.10		1.84	29.81	68.35	30 798.72
C500	91.70	2.97	5.33		2.16	21.60	76.24	33 793.45
C600	96.39	2.13	1.48		2.19	7.63	90.18	34 602.52
H300	72.92	5.15	21.93		0.08	44.89	55.03	26 681.81
H400	76.45	5.11	18.44		0.15	25.23	74.62	30 827.35
H500	76.84	4.86	18.30		0.22	11.66	88.12	32 794.64
H600	77.26	4.78	17.96		0.37	5.52	94.11	33 965.15
L300	54.75	3.63	24.44	1.24	24.60	39.99	35.41	21 173.29
L400	62.84	2.85	17.31	0.93	25.78	33.03	41.19	22 604.86
L500	65.87	1.96	16.12	0.62	28.81	24.59	46.60	23 388.09
L600	67.97	1.40	14.86	0.45	31.89	14.41	53.70	24 142.62

热解温度由300℃升高至600℃,三组分生物炭的挥发分迅速下降,纤维素挥发分下降43.04个百分点,木聚糖挥发分下降39.37个百分点,木质素挥发分下降25.58个百分点,而同时,灰分和固定碳含量则逐渐升高。另外,因为生物炭中固定碳含量的升高对热值的贡献高于灰分含量升高和挥发分含量降低所造成的负效应,所以生物炭的热值也逐渐增大。

2.3 表面特征分析

纤维素生物炭的傅里叶红外谱图如图2所示,木聚糖的红外谱图如图3所示,热解温度对两者的影响都呈现类似的变化规律。温度由300℃升高至600℃,由于生物质结构中的羧基、羰基(C=O)等含氧官能团,在热解过程中发生断裂或者重组,1 691~1 700 cm⁻¹处的羰基峰逐渐减弱,在600℃完全消失;1 555~1 607 cm⁻¹处的峰值(苯环骨架C—C键)随着温度的升高也呈逐渐减弱的趋势,也在600℃完全消失,说明苯环已大部分被裂解;并且1 155~1 219 cm⁻¹处的峰值(C—O键)强度大幅度下降,871~877 cm⁻¹附近的峰值(芳香族的C—H键)面外弯曲,该峰的强度随着温度的升高逐渐变大,说明随着温度的升高单环芳烃逐渐转变为大分子芳香族分子^[21]。

木质素生物炭的傅里叶红外谱图如图4所示,木质素是以苯丙烷为基本单位构成的非线形高分子

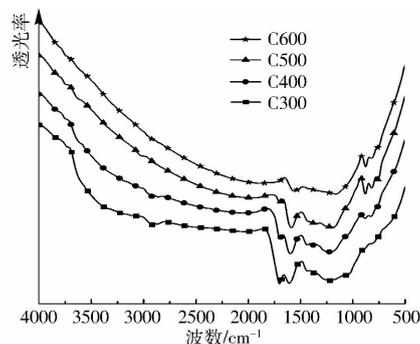


图2 纤维素生物炭傅里叶红外谱图

Fig.2 FTIR of biochar from cellulose

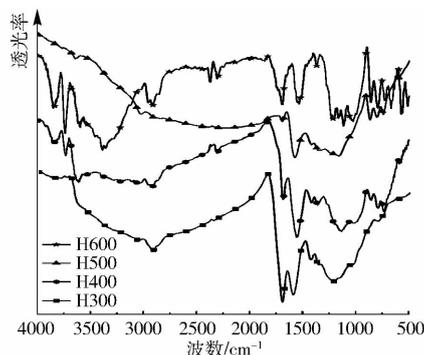


图3 木聚糖生物炭傅里叶红外谱图

Fig.3 FTIR of biochar from hemicellulose

有机化合物,有着丰富的甲氧基和羟基支链^[22]。由于碳氧键的键能较小,随着温度的升高,1 100~1 160 cm⁻¹处的峰值(C—O键)强度大幅度下降;并且1 568 cm⁻¹处的峰值(苯环骨架C—C键)随着温

度的升高也呈逐渐减弱的趋势,在 600℃ 已非常微弱,说明苯环已大部分被裂解。872 ~ 878 cm^{-1} 附近的峰值面外弯曲,该峰的强度随着温度的升高逐渐变大,单环芳烃逐渐转变为大分子芳香族分子,这与纤维素和木聚糖热解生成生物炭是类似的,说明三组分不仅在热解温度区间存在交互区,而且具有某些结构相似的热解产物^[23]。

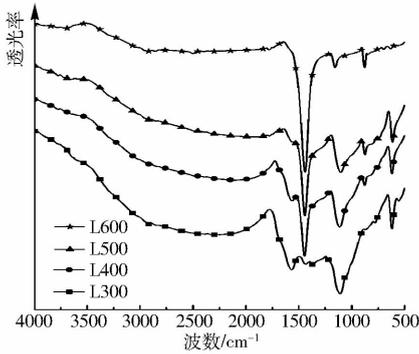


图4 木质素生物炭傅里叶红外谱图

Fig. 4 FTIR of biochar from lignin

2.4 形貌分析

生物炭的 SEM 扫描图像随热解温度变化放大 1 000 倍的情况如图 5 所示。热解温度由 300℃ 升高至 500℃,纤维素生物炭的纤维壁不断变薄,纤维直径不断减小;木聚糖生物炭表面呈现少量的气孔,而后逐步变得密集且均匀,这些均与挥发分迅速聚集析出和气体产物不断释放相关。而随着热解温度继续升高至 600℃,纤维素生物炭表面开始出现坍塌现象,而木聚糖生物炭表面孔隙结构不断扩大,且孔的数量较少,生物炭表面逐步出现断层,这是由气体产物大量的释放和过高的热解温度使已生成的炭骨架被破坏所致^[24]。

热解温度由 300℃ 升高至 600℃,挥发分迅速聚集析出和气体产物不断增多,木质素生物炭的孔隙结构趋于复杂化和均匀化,简单的孔隙结构变得致密多样,在较大孔隙的周围及内部形成大量的小孔。这种丰富的孔隙结构有利于提高木质素生物炭的吸附性能。

2.5 比表面积及孔径结构分析

生物炭的比表面积及孔径结构如表 3 所示。热解温度由 300℃ 升高至 600℃,纤维素生物炭的比表面积提高 0.834 4 m^2/g ,总孔体积提高 0.012 8 cm^3/g ;木聚糖生物炭的比表面积提高 0.106 4 m^2/g ,总孔体积提高 0.011 4 cm^3/g ;木质素生物炭的比表面积提高 4.267 2 m^2/g ,总孔体积提高 0.001 4 cm^3/g 。三组分生物炭孔径以大孔为主,微孔极少,随温度的升高,纤维素和木聚糖微孔体积变化很小,木质素微孔体积由 0.001 3 cm^3/g 升至 0.002 2 cm^3/g 。热解

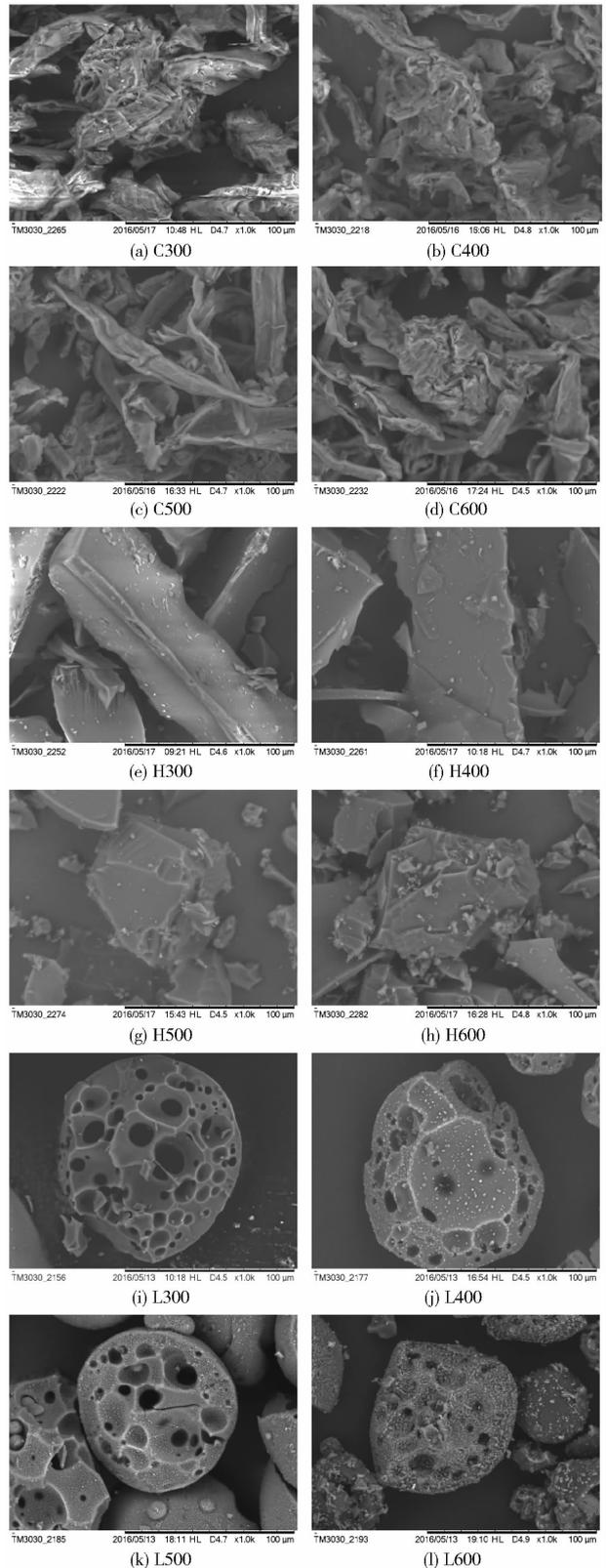


图5 生物炭的形貌特征

Fig. 5 Morphology of biochar

温度在 500℃ 时,纤维素生物炭平均孔径达到最低的 14.496 8 nm,木聚糖生物炭平均孔径达到最低的 9.964 9 nm,热解温度在 600℃ 时,木质素生物炭平均孔径达到最低的 8.470 9 nm。这表明,热解温度对木质素制备生物炭的比表面积及孔径结构影响明

表3 生物炭的比表面积和孔径结构

Tab.3 Specific surface area and pore structure of biochar

样品	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	微孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm
C300	3.344 7	0.018 5	0.001 3	17.210 4
C400	2.154 7	0.021 1	0.000 9	26.934 5
C500	3.720 9	0.018 3	0.001 5	14.496 8
C600	4.179 1	0.031 3	0.001 4	22.340 7
H300	3.331 2	0.017 5	0.001 2	10.914 4
H400	2.986 9	0.016 1	0.001 2	15.430 2
H500	3.449 3	0.012 9	0.001 4	9.964 9
H600	3.437 6	0.028 9	0.001 2	22.689 9
L300	3.895 2	0.025 1	0.001 3	17.794 1
L400	2.997 4	0.021 1	0.001 2	19.613 5
L500	4.728 1	0.025 9	0.001 8	13.026 9
L600	8.162 4	0.026 5	0.002 2	8.470 9

显,在600℃时达到最优的比表面积和微孔体积,而热解温度对纤维素和木聚糖制备生物炭的比表面积及孔径结构影响较小,在500℃时达到最优的比表面积和微孔体积,这与SEM图像观测的结果基本一致。

2.6 碘吸附性分析

碘吸附值是表征炭对小分子杂质吸附能力的重要指标。生物炭的碘吸附值随温度变化的情况如图6所示。热解温度由300℃升高至600℃,纤维素和木聚糖生物炭的碘吸附值都呈现先升高后下降的趋势,其中在500℃时,纤维素生物炭碘吸附值达到最大的422.46 mg/g,木聚糖生物炭碘吸附值达到最大的115.06 mg/g,热解温度升高至600℃时,纤维素生物炭的碘吸附值降至367.35 mg/g,木聚糖生物炭的碘吸附值降至112.48 mg/g。热解温度由300℃

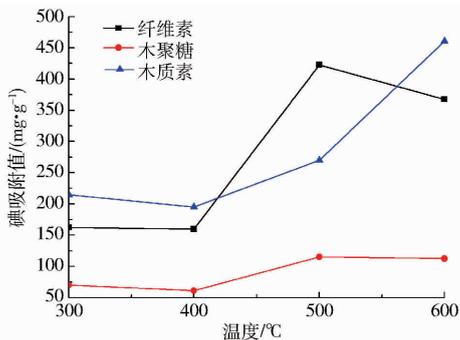


图6 生物炭的碘吸附值

Fig.6 Iodine adsorption value of biochar

升高至600℃过程中,由于木质素生物炭的孔隙结构逐步变得发达,其碘吸附值呈明显上升趋势,在600℃时达到最大的460.35 mg/g。生物质三组分热解制备生物炭的碘吸附性整体变化趋势与比表面积及孔径结构的测试结果基本保持一致。

3 结论

(1) 纤维素和木聚糖的热解温度范围主要集中在300~500℃,纤维素生物炭产率由35.38%下降至20.93%,木聚糖生物炭产率由46.28%下降至29.40%;木质素热解温度范围主要集中在300~600℃,木质素生物炭产率由81.22%降至51.53%。

(2) 热解温度对生物质三组分制备生物炭的C、H、O、N元素的影响规律基本相同,即C元素含量逐渐升高,H、O、N元素含量逐渐降低。

(3) 热解温度对生物质三组分制备生物炭灰分、挥发分、固定碳和热值的影响规律基本相同,即挥发分逐渐降低,而灰分、固定碳和热值均逐渐升高。由300℃升至600℃,纤维素生物炭挥发分由50.67%降至7.63%,固定碳由47.95%升至90.18%,热值由25652.58 kJ/kg升至34602.52 kJ/kg;木聚糖生物炭挥发分由44.89%降至5.52%,固定碳由55.03%升至94.11%,热值由26681.81 kJ/kg升至33965.15 kJ/kg;木质素生物炭挥发分由39.99%降至14.41%,固定碳由35.41%升至53.70%,热值由21173.29 kJ/kg升至24142.62 kJ/kg。

(4) 热解温度对木质素生物炭的比表面积和孔径分布影响最大,对纤维素和木聚糖生物炭的影响较小。在500℃时,纤维素和木聚糖达到最优比表面积和微孔体积,纤维素比表面积为3.7209 m²/g,微孔体积为0.0015 cm³/g,木聚糖的比表面积为3.4493 m²/g,微孔体积为0.0014 cm³/g;在600℃时,木质素达到最优的比表面积和微孔体积,木质素的比表面积为8.1624 m²/g,微孔体积为0.0022 cm³/g。

(5) 热解温度在500℃时,纤维素和木聚糖制备的生物炭达到最大的碘吸附值,纤维素生物炭碘吸附值为422.46 mg/g,木聚糖生物炭碘吸附值为115.06 mg/g;热解温度在600℃时,木质素制备的生物炭达到最大的碘吸附值为460.35 mg/g。

参 考 文 献

- 1 陈文伟,高荫榆,刘玉环,等. 生物质的转化与利用[J]. 可再生能源,2003,2(6):48-49.
CHEN Wenwei, GAO Yinyu, LIU Yuhuan, et al. The progress of biomass conversion and application [J]. Renewable Energy Resources, 2003, 2(6): 48-49. (in Chinese)
- 2 JAHIRUL M I, RASUL M G, CHOWDHURY A A, et al. Biofuels production through biomass pyrolysis—a technological review [J]. Energies, 2012, 5(12): 4952-5001.

- 3 SCHMIDT M I, NOACK A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1): 777-794.
- 4 TITIRICI M M, THOMAS A, YU S H, et al. A direct synthesis of mesoporous carbons with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization[J]. *Chemistry of Materials*, 2007, 19(4): 4205-4212.
- 5 李丽洁, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物质热解炭化实验平台设计与实验[J]. *可再生能源*, 2016, 34(2): 305-310.
LI Lijie, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Design and experiment biomass pyrolysis carbonization experiment setup [J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(2): 305-310. (in Chinese)
- 6 张书雅, 丁玉. 生物活性炭技术的应用及发展趋势[J]. *辽宁化工*, 2007, 36(11): 781-784.
- 7 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 137-142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140122&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 137-142. (in Chinese)
- 8 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2459-2463.
ZHANG Afeng, PAN Genxing, LI Lianqing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2459-2463. (in Chinese)
- 9 BECIDAN M, SKREIBERG, HUSTAD J. Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 78(1): 207-213.
- 10 赵立欣, 贾吉秀, 姚宗路, 等. 生物质连续式分段热解炭化设备研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 221-226, 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160828&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.028.
ZHAO Lixin, JIA Jixiu, YAO Zonglu, et al. Equipment for biomass continuous grading pyrolysis[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 221-226, 220. (in Chinese)
- 11 邱泽晶, 阴秀丽, 马隆龙, 等. 玉米芯水解残渣木质素的热解特性实验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 111-115, 142.
QIU Zejing, YIN Xiuli, MA Longlong, et al. Pyrolytic characteristics of lignin derived from corncob hydrolysis residues[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12): 111-115, 142. (in Chinese)
- 12 高尔顿. 木材干馏学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1957: 22-23.
- 13 赵世翔, 姬强, 李忠徽, 等. 热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 183-200. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150626&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.026.
ZHAO Shixiang, JI Qiang, LI Zhonghui, et al. Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 183-200. (in Chinese)
- 14 杨瑛, 张衍林, 郑文轩, 等. 棉秆热裂解工艺参数优化与固体产物性质分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 160-164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131226&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.026.
YANG Ying, ZHANG Yanlin, ZHENG Wenxuan, et al. Optimizing technological parameters of cotton stalk and pyrolysis products[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 160-164. (in Chinese)
- 15 RAVEENDRAN K, GANESH A, KHILAR K C. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components[J]. *Fuel*, 1996, 75(8): 987-998.
- 16 YANG H P, YAN R, CHEN H P, et al. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(1): 388-393.
- 17 王树荣, 郑赞, 文丽华, 等. 半纤维素模化物热裂解动力学研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2006, 12(2): 105-109.
- 18 RAVEENDRAN K, GANESH A, KHILAR K C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics[J]. *Fuel*, 2005, 74(12): 1812-1822.
- 19 李水清, 李爱民, 任远, 等. 生物质废弃物在回转窑内热解研究-II. 热解终温对产物性质的影响[J]. *太阳能学报*, 2000, 21(4): 341-348.
LI Shuiqing, LI Aimin, REN Yuan, et al. Pyrolysis of the biomass waste in a rotary kiln II: impacts of final pyrolysis temperature on products properties[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2000, 21(4): 341-348. (in Chinese)
- 20 CAO X, HARRIS W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5222-5228.
- 21 胡亿明, 蒋剑春, 孙云娟, 等. 纤维素与半纤维素热解过程的相互影响[J]. *林产化学与工业*, 2014, 34(4): 1-8.
- 22 AMEN-CHEN C, PAKDEL H, ROY C. Product of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79(3): 27-29.
- 23 曹俊, 肖刚, 许啸, 等. 木质素热解/炭化官能团演变与焦炭形成[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2012, 42(1): 83-87.
CAO Jun, XIAO Gang, XU Xiao, et al. Functional groups evolution and charcoal formation during lignin pyrolysis/carbonization[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2012, 42(1): 83-87. (in Chinese)
- 24 陈应泉, 朱波, 王贤华, 等. 生物质热解过程中焦炭物化结构演变特性[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(8): 1267-1272.
CHEN Yingquan, ZHU Bo, WANG Xianhua, et al. Evolution of char's physical and chemical structure during biomass pyrolysis [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2012, 33(8): 1267-1272. (in Chinese)