

不同裂解温度下 3 种豆科植物生物炭理化特性分析

徐玉娥^{1,2}, 邵晓辉³, 谢军海⁴, 丁榕⁵, 柯用春^{1*}

1. 三亚市农业农村局, 海南三亚 572000; 2. 南京泓泰环境检测有限公司, 江苏南京 211500; 3. 中化现代农业(湖北)有限公司, 湖北武汉 430000; 4. 海南省保亭黎族苗族自治县农业服务中心, 海南保亭 572300; 5. 海南省保亭黎族苗族自治县农产品质量安全检验检测服务中心, 海南保亭 572300

摘要: 为研究 3 种豆科植物在不同温度下裂解所得生物炭的理化性质差异, 确定适宜用于热带地区酸性土壤改良的生物炭。以花生秸秆、大豆秸秆和柱花草 3 种豆科植物为原料, 在 300、500、700 °C 下制备成花生秸秆炭 (Pe)、大豆秸秆炭 (Be) 和柱花草炭 (St), 利用傅里叶红外光谱仪对生物炭表面官能团进行定性分析, 并测定生物炭的 pH、C 和 N 含量等理化性质。结果表明: 3 种原料制备的生物炭在 500 °C 显著高于 300 °C, 500 °C 后基本平稳; 生物炭的 N 含量和产率随温度升高而降低, 3 种材料制备的生物炭中, Be 的碳含量和 C/N 最高, N 含量和产率最低; 生物炭的灰分含量、灰分碱度和 pH 均随裂解温度升高而升高, 同一裂解温度, 不同材料均表现为 Be>St>Pe; 生物炭的孔径和比表面积均随温度升高而增大; 3 种原料生物炭随温度升高形成更稳定的芳香族化合物, 结构主要以 C=O 和 C=C 为主。该研究豆科植物生物炭适宜的热解温度为 500 °C, 温度再升高, 对生物炭理化性质影响不大。综上, 500 °C 裂解生成的大豆生物炭适合于农田酸性土壤改良, 而花生和柱花草生物炭有利于农田土壤固碳减排。

关键词: 生物炭; 制炭率; 豆科植株; 裂解温度

中图分类号: S529 文献标识码: A

Analysis of Physicochemical Characteristics of Biochar from Three Legume Plants at Different Pyrolysis

XU Yu'e^{1,2}, SHAO Xiaohui³, XIE Junhai⁴, DING Rong⁵, KE Yongchun^{1*}

1. Agriculture and Rural Bureau of Sanya City, Sanya, Hainan 572000, China; 2. Nanjing Hongtai Environmental Testing Co., LTD, Nanjing, Jiangsu 211500, China; 3. Sinochem Modern Agriculture (Hubei) Co., LTD, Wuhan, Hubei 430000, China; 4. Agricultural Service Center of Baoting Li and Miao Autonomous County, Hainan Province, Baoting, Hainan 572300, China; 5. Hainan Baoting Li and Miao Autonomous County Agricultural product Quality and Safety Inspection and Testing Service Center, Baoting, Hainan 572300, China

Abstract: To study the differences in the physical and chemical properties of biochar obtained from three legumes at different temperatures, and to determine the appropriate temperature range for legume biochar. Using leguminous plant peanut straw, soybean straw and stylofoam as raw materials, peanut straw biochar (Pe), soybean straw biochar (Be) and stylofoam biochar (St) were prepared at 300 °C, 500 °C and 700 °C. A Fourier infrared spectrometer was used to qualitatively analyze the functional groups on the surface of the biochar, and the surface morphology of the biochar was observed with a scanning electron microscope, and the physical and chemical properties, such as pH, C and N content, were measured. The results showed that the carbon content of biochar prepared from three kinds of raw materials increased with the increase of pyrolysis temperature at 300 °C to 500 °C, and was basically stable after 500 °C; the nitrogen content and yield of biochar decreased with the increase of temperature. Among the biomass charcoal prepared from the three materials, Be has the highest carbon content and C/N, and N content and yield are the lowest. The ash content, ash alkalinity and pH of biochar all increase with the increase of pyrolysis temperature. The same pyrolysis

收稿日期 2022-10-17; 修回日期 2022-12-20

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 41771340); 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 320RC493); 海南省自然科学基金项目 (No. 320QN196)。

作者简介 徐玉娥 (1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 材料研发与环境监测。*通信作者 (Corresponding author): 柯用春 (KE Yongchun), E-mail: key1318119@163.com。

ash alkalinity and pH of biochar all increase with the increase of pyrolysis temperature. The same pyrolysis temperature and different materials are all expressed as $Be > St > Pe$. Both the pore size and specific surface area of biochar increase with increasing temperature. The three raw materials of biochar form more stable aromatic compounds with increasing temperature, and the structure is mainly $C=O$ and $C=C$. In this study, the suitable pyrolysis temperature of legume biochar is $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature rises again, which has little effect on the physical and chemical properties of biochar. In summary, the soybean biochar produced by cracking at $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ is more used in farmland soil improvement, and can also try soil remediation, carbon sequestration and emission reduction applications.

Keywords: biochar; biochar production rate; legume plants; pyrolysis temperature

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.12.019

生物炭是由生物质材料在无氧或缺氧条件下经高温裂解(通常小于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$)形成,所有的生物质均可通过热解过程获得稳定形态^[1]。生物炭含有丰富的官能团^[2],较多的孔隙结构及较大的比表面积^[3],是一种吸附力极强的碱性多用途材料^[4]。农田土壤施入生物炭后,可以减少温室气体排放^[5],改良酸性土壤^[6],提高作物产量等作用^[7]。生物炭的功能取决于其理化特性,而原料类型和热解温度是影响生物炭理化特性的 2 个重要因素^[8]。

生物炭的物理结构、表面化学结构和产率等会随制备材料、裂解温度以及生产工艺不同而有所差异^[9-10]。高温条件下,生物炭产率,氮氢元素比例降低,但高温能够促进生物炭的芳构化,增大比表面积,提高吸附能力^[11-13]。于晓娜等^[14]研究指出,裂解温度 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,花生壳生物炭的孔隙度比较发达,微孔和中孔均比较丰富。简敏菲等^[15]研究不同裂解温度水稻秸秆生物炭发现,生物炭比表面积在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最大。生物质经高温裂解,会析出大量盐基离子,生物炭的碱性官能团比例逐渐增多,酸性官能团比例随温度升高而逐渐减少,所以生物炭一般呈碱性^[16]。生物炭施入土壤后有利于酸性土壤改良,且降低土壤温室气体排放,季雅岚等^[17]研究得出, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制备的生物炭能够显著抑制土壤 N_2O 排放。国内外学者针对生物质的热解炭化过程做了大量研究,结果均表明热解温度是决定生物炭理化特性的重要因素^[9]。而在生物质制作生物炭过程中,由于制备原料的不同,会导致不同生物炭本身理化性质^[18]和吸附特征^[19-20]存在差异。高海英等^[21]研究发现,竹炭灰分含量、矿质养分元素种类和 pH 均高于木炭。生物炭的碳含量跟材料相关,一般秸秆生物炭全碳含量约为 $40\%\sim 80\%$,而木质生物炭分布于 $60\%\sim 85\%$ ^[22]。

海南省是我国最大的岛屿,其蔬菜种植产业发展迅速,同时,大量的施肥也造成了严重的土

壤酸化。柱花草作为一种豆科绿肥,在海南各地区均有种植,其还田有助于提高土壤养分含量;而海南地区豆科植物大豆和花生种植面积分别达到 0.78 万 hm^2 和 4.58 万 hm^2 ,关于这 3 种豆科植物在制作为生物炭后,其理化特征是否存在差异,现阶段并未有相关报道。因此,本研究选取海南地区广泛种植的 3 种豆科植物(花生、大豆和柱花草)为材料,分别在 300 、 500 、 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下厌氧热裂解制备生物炭,对比分析元素含量、表面结构等理化性质,以期为海南地区酸性土壤改良和土壤固碳提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

3 种生物质原料为豆科植物花生秸秆、大豆秸秆和柱花草,取自海南省三亚市吉阳区南繁科学技术研究院基地内($109^{\circ}35'52''\text{E}$, $18^{\circ}17'16''\text{N}$)。采用限氧控温炭化法对生物质进行炭化。具体制备过程为:将生物质材料干燥、粉碎,称取 600 g 置于铝箔纸中,包裹好后用针头在铝箔纸表面均匀扎孔,然后置于 KTF 管式真空气氛电阻炉(江苏前锦炉业设备有限公司)内,密封后抽真空,然后充氮气(纯度 $\geq 99.99\%$)形成厌氧环境并加热,达到预设温度 300 、 500 、 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后开始计时,2 h 后切断电源,持续通入氮气冷却至室温,取出样品称重。所获得的生物炭分别标记为:Pe(花生秸秆炭)、Be(大豆秸秆炭)、St(柱花草炭)。

1.2 方法

1.2.1 pH 测定 将生物炭与水以液固比 $1:20$ 混合,室温 180 r/min 振荡 3 h,静置 1 h,取上清液用 PHS-3C 型 pH 计(上海雷磁)测定。

1.2.2 产率测定 称量 3 种材料在 300 、 500 、 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 炭化前、后质量,炭化后与炭化前质量比即为生物炭在不同温度下的产率。

1.2.3 灰分和 C、N 含量测定 灰分含量按照

GB/T 212—2001 中所述的缓慢灰化法进行测定, 将 30 mL 瓷坩埚于 650 °C 下置于高温炉中灼烧至恒重, 冷却称重, 称取生物炭 1 g 置于已灼烧至恒重的瓷坩埚中, 将坩埚送入高温电炉中, 打开坩埚盖, 逐渐升高温度, 在 800 °C 灰化 4 h, 冷却取出称量。称取 100 mg 过 100 目筛生物炭样品, 用 LECO CNS 2000 仪(LECO 公司, US)测定 C、N 含量。

1.2.4 生物炭傅立叶变换红外线光谱 (FTIR) 分析官能团变化 用傅立叶变换红外光谱仪 (Nicolet 6700, 美国) 测定生物炭的红外光谱。将生物炭磨碎后过 100 目筛, 烘干后, 将样品与 KBr 以质量比 1 : 2000 混合, 用玛瑙研钵研磨后于压片机上压成均匀的薄片, 红外光谱仪测定范围为 400~4000 cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} , 通过波谱特征分析生物炭的表面特征。

1.2.5 扫描电镜分析测定生物炭表面特征 采用扫描电子显微镜 (日立 S-3400 N, 日本) 观测生物炭样品形状及表面特征。分析前将生物炭过筛烘干, 随机选取生物炭样品外表面部位, 放置在黑色背景胶板上, 调整视野清晰度, 选择结构完整的部位拍照, 分析并保存。

1.2.6 能谱分析 取 1 g 生物炭样品, 用 OCT 化合物 (Sakura Finetek, 日本) 涂片, 立即置于液氮中冷却, 在 -150 °C 低温下测定表面形态及元素组成。

1.3 数据处理

试验结果为 3 次重复的平均值, 采用 Microsoft Excel 2016 软件对试验数据进行整理, Origin 2016 软件制图。通过 DPS 16.05 软件分析文中各指标的差异性和相关性, 多重比较采用 least significant difference (LSD) 法进行差异显著性检验, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同裂解温度下 3 种豆科 C、N 含量和 C/N 对比

由表 1 可知, 3 种豆科生物炭 C 含量在裂解温度为 500 °C 时显著高于 300 °C, 而 500 °C 和 700 °C 无显著差异。各温度条件下, 3 种豆科生物炭的 C 含量表现为 $\text{Be} > \text{St} > \text{Pe}$ 。Pe 和 St 的 N 含量 $300\text{ °C} > 500\text{ °C} > 700\text{ °C}$, 而 Be 处理的 N 含量基本保持不变。相同温度下, 3 种生物炭 N 含量均表现为 $\text{St} > \text{Pe} > \text{Be}$ 。生物炭裂解温度越高, C/N 比越大。

表 1 不同生物炭在不同温度下的 C、N 含量和 C/N

Tab. 1 Comparison of C and N content, C/N and biochar production rate of different biochars at different temperatures

生物炭 Biochar	C/%			N/%			C/N		
	300 °C	500 °C	700 °C	300 °C	500 °C	700 °C	300 °C	500 °C	700 °C
Pe	47.46±1.63 ^e	54.08±0.82 ^d	54.60±0.83 ^d	1.80±0.08 ^c	1.62±0.16 ^d	1.43±0.12 ^e	26.34±0.29 ^e	33.47±2.93 ^d	36.21±2.66 ^c
Be	64.50±0.73 ^e	71.11±1.46 ^a	71.26±2.41 ^a	1.37±0.11 ^f	1.38±0.09 ^f	1.36±0.08 ^f	47.18±2.23 ^b	51.60±2.48 ^a	52.36±3.76 ^a
St	64.13±1.68 ^e	67.50±2.54 ^b	67.28±2.08 ^b	2.31±0.17 ^a	2.16±0.11 ^b	1.88±0.07 ^e	27.82±0.28 ^e	31.21±1.94	35.88±2.44 ^{cd}

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

2.2 不同裂解温度下 3 种豆科生物炭制碳率、灰分含量、灰分碱度和 pH 变化

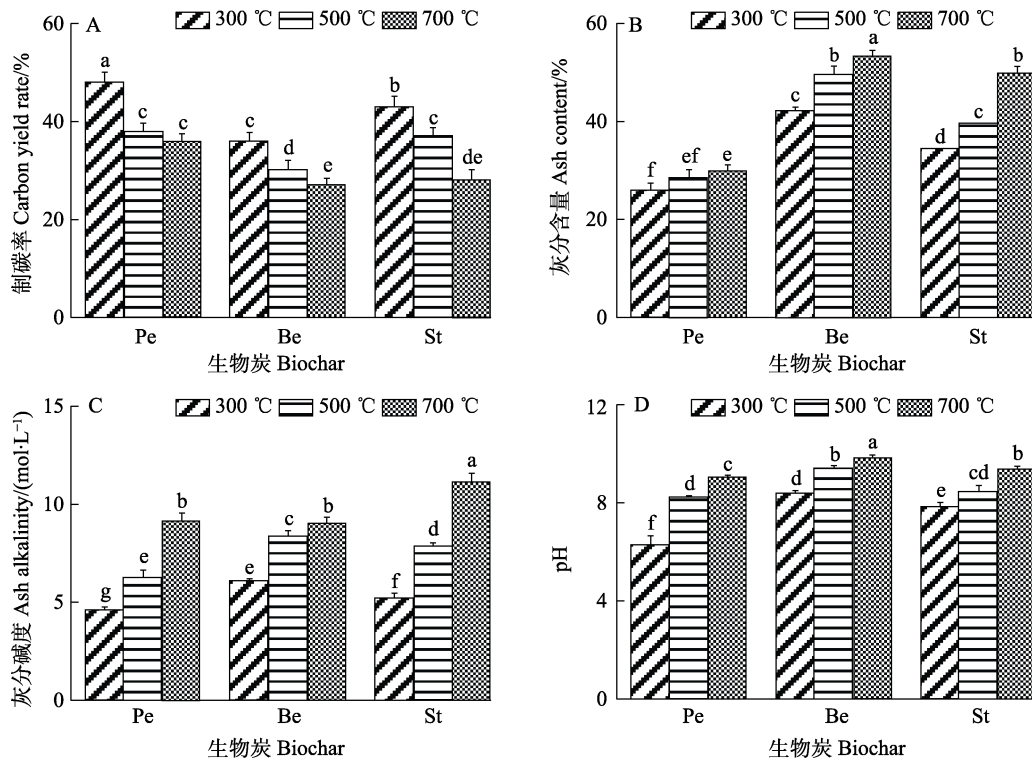
裂解温度越高, 3 种生物炭的制碳率越低 (图 1A)。相比 300 °C, 500 °C 时 Pe、Be 和 St 的灰分含量分别增加 9.73%、18.12% 和 14.59%, 700 °C 分别增加 14.88%、27.40% 和 44.28% (图 1B)。3 种生物炭裂解温度越高, 灰分碱度和 pH 越高 (图 1C 和 1D); Pe、Be 和 St 在 500 °C 时的 pH 较 300 °C 时分别增加 29.91%、12.28% 和 7.79%, 而 700 °C 时的 pH 较 300 °C 时分别增加 42.88%、17.16% 和 19.41%。

不同材料对比发现, Pe 的制碳率最高, 而 Be

在各温度条件下制碳率最低; 但 Be 的灰分含量最高, Pe 的最低。Pe 的灰分碱度在 3 种材料各温度制成生物炭后均最低。各温度条件下, Be 的 pH 最高。

2.3 不同裂解温度下对 3 种豆科生物炭微观形貌及孔隙结构的影响

图 2 为 3 种生物炭在 300、500 和 700 °C 的扫描电镜图, Pe 在 300 °C 热裂解炭化处理后, 表现出规则的絮状结构, 孔隙结构清晰良好, 当温度为 500 °C 时, 絮状结构开始消失, 出现光滑的条状结构, 形成不规则的小孔状, 有一些碎屑覆盖, 孔隙直径均小于 10 μm , 温度达到 700 °C 时, 生



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同生物炭灰分含量、灰分碱度和 pH 在不同温度下的对比

Fig. 1 Comparisons of ash contents, ash alkalinity and pH between biochars at different temperatures

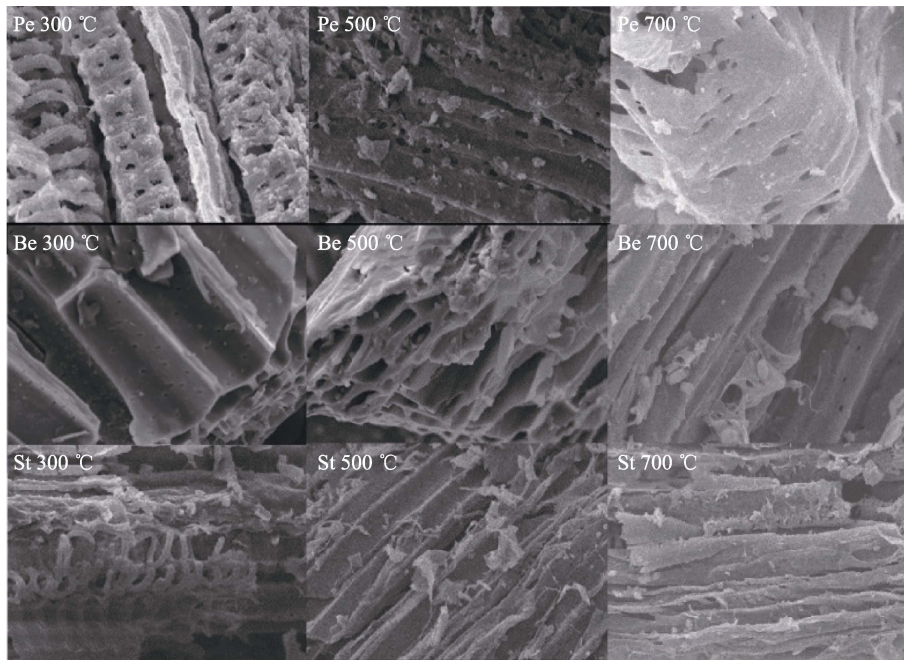


图 2 不同生物炭的电镜扫描图 ($\times 2000$)

Fig. 2 Comparisons of SEM images of different biochars surface at different temperatures ($\times 2000$)

物炭表面变得光滑，碎屑消失，且表面孔径变大。300 °C时，生物炭 Be 有规则的孔径结构，且孔径结构比较大，基本超过 10 μm ，500 °C时炭化更加

完全，孔径结构更加规整，且孔径基本为 10 μm ，700 °C时则由原本较光滑的内壁变得粗糙，且表面有碎屑生成，表明 700 °C时炭化完全。St 在

300 °C 时, 表面存在大量的规整絮状, 当温度达到 500 °C 时, 絮状结构开始消失, 表面形成条纹结构, 且附碎屑, 温度达到 700 °C 时, 表面更加粗糙, 附着在外部的碎屑物减少。豆科植物高温条件下制备的生物炭具有更发达的孔隙结构和更大的比表面积。

2.4 不同裂解温度下 3 种豆科生物炭元素组成

由图 3 可知, 不同裂解温度下生物炭的元素组成存在较大差异。300 °C, Pe 的元素组成主要为 C、O、P、Cl、K 和 Ca, 其中 C 含量最高, 其次为

Cl 和 K 元素, 当裂解温度升高到 500 °C 时, 析出 Na、Mg 和 Al 等金属离子及 Si 和 S 等非金属离子, 当裂解温度为 700 °C 时, 生物炭的元素组成主要为 C、O、Mg、Al、Si、Cl、K 和 Ca。Be 的元素组成主要为 C、O、K 和 Ca, 其中以 C 元素含量最高, 其次为 O 和 K。500 °C 时析出 Si、P、S 和 Cl 等离子, 其中 K 含量升高, 700 °C 则析出 Mg 金属离子。St 于 300 °C 裂解温度制成生物炭后, 主要元素为 C、O、Si、Cl 和 K, 当裂解温度升高至 500 °C 时, 析出 Ca 离子, 700 °C 时, Mg、P 和 S 离子析出。

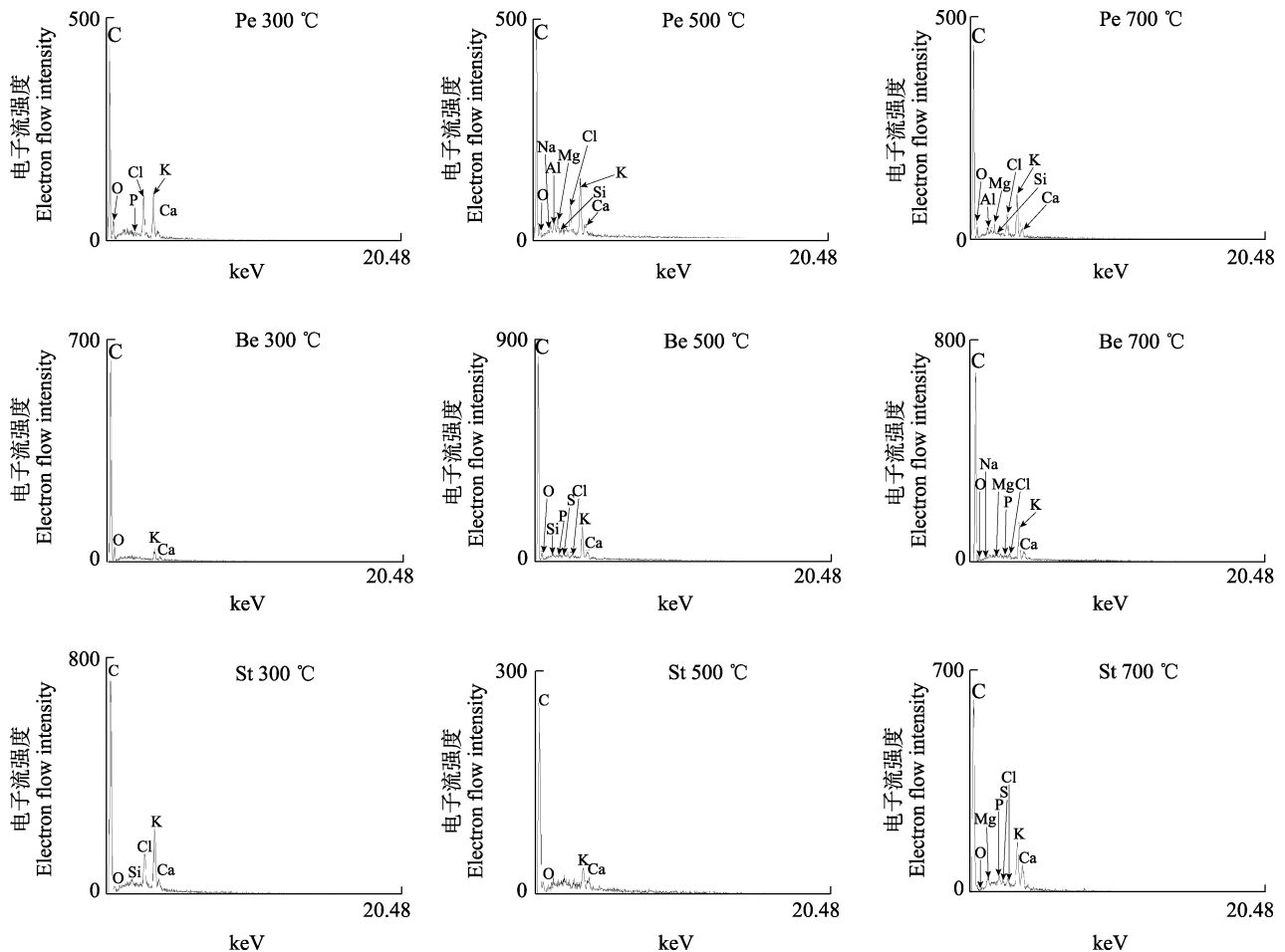


图 3 不同生物炭表面任一位点 X 射线谱在不同温度下的对比

Fig. 3 Comparisons of EDS spectrum at the one site of different biochars surface at different temperatures

2.5 热解温度对生物炭表面官能团变化的影响

以波数 ($4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$) 为横坐标, 透光率 (%) 为纵坐标, 绘制不同材料生物炭在不同温度下的 FTIR 图谱 (图 4)。不同温度热解生物炭均出现相似的吸收峰, 主要包括 3432 、 2924 、 1744 、 1659 、 1375 、 1082 、 880 、 785 cm^{-1} 附近的振动峰, 表现出随温度升高, 碱性官能团含量增加。3 种材

料不同裂解温度下所制成的生物炭在 3432 cm^{-1} 左右出现吸收峰, 温度越高, 峰值越低。说明温度升高减少了生物炭中的 -OH 基团。烷烃中的 C-H 振动吸收峰出现在 2924 cm^{-1} 附近, 脂肪族的 CH_3 和 CH_2 基团开始出现, 可能是脱羧作用导致脂肪族碳氢化合物的形成, 随温度升高, 吸收峰越强。在 $1375\sim 1744\text{ cm}^{-1}$ 波段, 生物炭振动吸收峰值加

强, 此波段中振动吸收峰主要由 C=O 和 C=C 的伸缩振动引起, 随温度升高, 振幅升高。在 1082 cm^{-1}

波段出现的伸缩振动为 Si-O-Si, 880 cm^{-1} 和 785 cm^{-1} 波段的吸收峰随温度升高而降低。

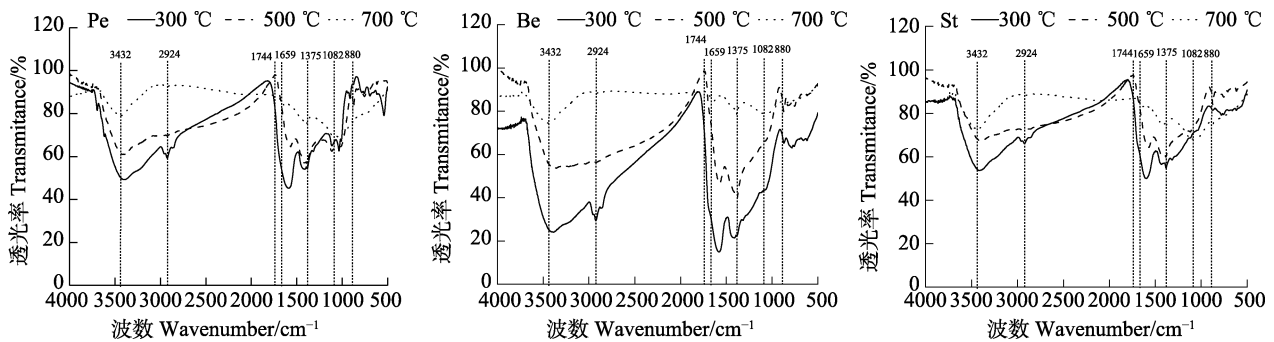


图 4 不同裂解温度处理 3 种生物炭红外光谱图

Fig. 4 FTIR spectrum of three biochars at different temperatures

3 讨论

3.1 裂解温度对生物炭理化性质的影响

本试验中裂解温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 3 种豆科植物 C 含量较 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时显著升高, 裂解温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, C 含量基本不变, 原因在于低于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 生物质分解以半纤维素、纤维素、木质素等物质为主, 当温度超过 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 形成难降解的芳香族结构, 产率变化趋于缓慢^[23]。生物炭 C/N 比随裂解温度升高而增大, 这与叶协锋等^[24]的研究结果一致。其中大豆秸秆炭的 C/N 最大, 高 C/N 比值生物炭添加至土壤后会降低土壤 N 素利用率^[25]。生物炭的裂解过程分为 3 个阶段, 随着裂解温度升高, 半纤维素、纤维素和木质素依次分解, 温度越高, 原材料的分解越彻底^[14]。因此温度越高, 产率越低。生物炭 pH 随温度升高而升高, 生物炭热解过程中, 会形成酸性物质, 随温度升高, 这些物质会逐渐挥发。高温条件下, 酸性物质减少, pH 升高^[26], 其次裂解温度升高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^{+} 等盐基离子析出也是 pH 升高的主要原因^[14]。简敏菲等^[15]通过对生物炭灰分和 pH 相关分析发现, 二者呈极显著相关关系, 本研究中, 灰分含量随温度提高的同时, pH 相应增加, 可能是随温度升高, 生物炭的碱性物质主要为灰分中的无机碳酸盐, 灰分含量增加, pH 相应提高^[27]。

3.2 裂解温度对生物炭微观结构及光谱特性的影响

韦思业^[28]研究木质生物炭指出, 低温 ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下生物炭表面出现平滑且规则的管状孔隙结构, 但当裂解温度达到 $500\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 管状孔隙结构坍塌, 孔径变大, 孔壁变薄, 这与本

试验研究结果相一致。随裂解温度升高, 3 种豆科生物炭比表面积均增大, 主要原因是高温条件下, 生物炭中的中孔和微孔打开, 炭化完全的结果^[29]。随温度升高, 3 种豆科植物生物炭为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 主要为 C、O 和 K 元素, 当温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 生物炭中开始析出 Na^{+} 和 Mg^{2+} 等金属离子。大豆秸秆碳元素种类和含量均最高, 这说明其应用过程中, 具有更好的碳封存优势。生物炭在土壤中可保持上百年至数千年, 有机碳大部分可保存下来, 起到长期固碳的作用。生物炭自身含碳量一般在 60% 以上, 施入土壤后, 可直接提高土壤有机碳含量, 极大地丰富了土壤碳库^[30]。同时, 生物炭中的 Na、K、Ca、Mg 等元素常以氧化物和碳酸盐形态存在, 施入土壤后溶于水, 一般呈碱性^[31]。

傅立叶红外图谱 (FTIR) 分析能进一步探究生物炭在不同温度下表面官能团的变化^[32]。3 种材料不同裂解温度下所制成的生物炭在 3432 cm^{-1} 左右出现吸收峰, 说明存在酚羟基和醇羟基。随温度升高, 吸收峰增强, 说明温度升高增加了 -OH 基团。烷烃中的 C-H 振动吸收峰出现在 2924 cm^{-1} 附近, 此时温度升高, 吸收峰逐渐平缓, 说明随温度升高, 生物炭烷基基团丢失, 芳香化程度更高, 同时此波段中有亚甲基振动, 而温度升高, 逐渐被降解^[14]。在 1082 cm^{-1} 波段出现的伸缩振动为 Si-O-Si, 由此可知, 豆科植物在热裂解过程中, 会有一定的含硅矿物析出。本试验结果显示, 裂解温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 柱花草的 C-H 和 O-H 键的吸收振动峰增强, 说明柱花草生物炭热稳定性异于其余 2 种生物炭, 当温度达到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 生物

炭内仍保留 CH_2 基团, 当温度升高, 达到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时, CH_2 全部消失, 形成难降解的芳香族结构^[33]。裂解温度高于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 高度芳香化结构使施入土壤的生物炭极具抗氧化能力和吸附能力^[34], 使得生物炭在土壤中可保持上百年至数千年。

4 结论

裂解温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 3 种豆科原料制成的生物炭碳含量、灰分含量、灰分碱度和 pH 均显著高于 $300\text{ }^\circ\text{C}$, $500\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 无显著差异。该研究表明, 豆科植物生物炭适宜的热解温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$, 温度再升高, 对生物炭理化性质影响不大。大豆炭的灰分含量、pH、碳含量及碳氮比均高于其他 2 种生物炭, $500\text{ }^\circ\text{C}$ 裂解生成的大豆生物炭更有利于提高土壤 pH、土壤修复和固碳等。

参考文献

- [1] AHMAD M, RAJAPAKSHA A U, LIM J E, ZHANG M, BOLAN N, MOHAN D, VITHANAGE M, LEE S S, OK Y S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review[J]. *Chemosphere*, 2014, 99: 19-33.
- [2] 高凯芳, 简敏菲, 余厚平, 陈朴青, 谢永臻, 于培德. 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 K F, JIAN M F, YU H P, CHEN P Q, XIE Y C, YU P D. Effects of pyrolysis temperature on the biochars and its surface functional groups made from rice straw and rice husk[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8): 1663-1669. (in Chinese)
- [3] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, BOL R. A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105(1): 47-82.
- [4] SANCHEZ M E, LINDAO E, MARGALEFF D, MARTNEZ O, MORAN A. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: production and characterization of bio-fuels and biochar soil management[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85(1/2): 142-144.
- [5] 潘凤娥, 胡俊鹏, 索龙, 王小淇, 季雅岚, 孟磊. 添加玉米秸秆及其生物炭对砖红壤 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 396-402.
PAN F E, HU J P, SUO L, WANG X Q, JI Y L, MENG L. Effect of corn stalk and its biochar on N_2O emissions from latosol soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 396-402. (in Chinese)
- [6] 罗煜, 赵立欣, 孟海波, 向欣, 赵小蓉, 李贵桐, 林启美. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 208-217.
LUO Y, ZHAO L X, MENG H B, XIANG X, ZHAO X R, LI G T, LIN Q M. Physio-chemical characterization of biochars pyrolyzed from miscanthus under two different temperatures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 208-217. (in Chinese)
- [7] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, SONGYIKHANGSUTHOR K, HOMMA K, KIYONO Y, INOUE Y, SHIRAIWA T, HORIE T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [8] ZHAO L, CAO X, MASEK O, ZIMMERMAN A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 256/257: 1-9.
- [9] 张进红, 林启美, 赵小蓉, 李贵桐. 水热炭化温度和时间对鸡粪生物质炭性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 239-244.
ZHANG J H, LIN Q M, ZHAO X R, LI G T. Effect of hydrothermal carbonization temperature and time on characteristics of bio-chars from chicken manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 239-244. (in Chinese)
- [10] MUKOME F N D, ZHANG X M, SILVA L C R, SIX J, PARIKH S J. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(9): 2196-2204.
- [11] 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英. 不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1884-1890.
HUANG H, WANG Y X, TANG J C, ZHU W Y. Properties of maize stalk biochar produced under different pyrolysis temperatures and its sorption capability to naphthalene[J]. *Environmental Science*, 2015, 35(5): 1884-1890. (in Chinese)
- [12] 孙克静, 张海荣, 唐景春. 不同生物质原料水热生物炭特性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2260-2265.
SUN K J, ZHANG H R, TANG J C. Properties of hydrochars from different sources of biomass feedstock[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2260-2265. (in Chinese)
- [13] 郝蓉, 彭少麟, 宋艳曦, 刘名茗. 不同温度对黑碳表面官能团的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 528-531.
HAO R, PENG S L, SONG Y T, LIU M M. Effects of different temperature on surface functional groups of black carbon[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(3): 528-531. (in Chinese)
- [14] 于晓娜, 张晓帆, 李志鹏, 周涵君, 付仲毅, 孟琦, 叶协锋.

- 热解温度对花生壳生物炭产率及部分理化特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(1): 108-114.
- YU X N, ZHANG X F, LI Z P, ZHOU H J, FU Z Y, MENG Q, YE X F. Pyrolysis temperature on the peanut-shell-biochar production rate and some physical and chemical properties[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(1): 108-114. (in Chinese)
- [15] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1757-1765.
- JIAN M F, GAO K F, YU H P. Effects of different pyrolysis temperatures on the preparation and characteristics of bio-char from rice straw[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1757-1765. (in Chinese)
- [16] AI-WABEL M I, AL-OMARAN A, EL-NAGGAR A H, NADEEM M, USMAN A R A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastewaters[J]. Biore-source Technology, 2013, 131: 374-379.
- [17] 季雅岚, 索龙, 解钰, 王小淇, 方雅各, 杨霖, 赵伶茹, 孟磊. 不同生物炭对海南砖红壤性质及 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1172-1178.
- JI Y L, SUO L, XIE Y, WANG X Q, FANG Y G, YANG L, ZHAO L R, MENG L. Effects of different biochars on hainan latosol properties and N_2O emission[J]. Soils, 2017, 49(6): 1172-1178. (in Chinese)
- [18] UZOMA K C, INOUE M, ANDRY H, FUJIMAKI H, ZAHOOR A, NISHIHARA E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 205-212.
- [19] TAGHIZADEH-TOOSI A, CLOUGH T J, SHERLOCK R R, CONDRON L M. A wood based low-temperature biochar captures NH_3-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability[J]. Plant and Soil, 2012, 353(1/2): 73-84.
- [20] 索桂芳, 吕豪豪, 汪玉璞, 刘玉学, 何莉莉, 杨生茂. 不同生物炭对氮的吸附性能[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1193-1202.
- SUO G, LYU H H, WANG Y Y, LIU Y X, HE L L, YANG S M. Study on the adsorption properties of nitrogen by different biochars[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1193-1205. (in Chinese)
- [21] 高海英, 何绪生, 陈心想, 张雯, 耿增超. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1948-1955.
- GAO H Y, HE X S, CHEN X X, ZHANG W, GENG Z C. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1948-1955. (in Chinese)
- [22] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 沈玉君. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- YUAN S, ZHAO L X, MENG H B, SHENG Y J. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1402-1417. (in Chinese)
- [23] 刘慧冉, 谢昶琰, 康亚龙, 江尚焘, 梅新兰, 徐阳春, 董彩霞. 不同裂解温度对梨树枝条生物炭理化性质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(5): 895-902.
- LIU H R, XIE C Y, KANG Y L, JIANG S T, MEI X L, XU Y C, DONG C X. Influence of different pyrolysis temperatures on physical and chemical properties of biochar derived from pear branches[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, 42(5): 895-902. (in Chinese)
- [24] 叶协锋, 周涵君, 于晓娜, 张晓帆, 李志鹏, 付仲毅, 孟琦. 热解温度对玉米秸秆炭产率及理化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1268-1275.
- YE X F, ZHOU H J, YU X N, ZHANG X F, LI Z P, FU Z Y, MENG Q. Physicochemical properties and yields of corn-stalk-biochar under different pyrolyzed temperatures[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1268-1275. (in Chinese)
- [25] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 邵宏波. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.
- WU Y, XU G, LYU Y C, SHAO H B. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79. (in Chinese)
- [26] 朱启林, 曹明, 张雪彬, 陶凯, 柯用春, 孟磊. 不同热解温度下禾本科植物生物炭理化特性分析[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(4): 21-28.
- ZHU Q L, CAO M, ZHANG X B, TAO K, KE Y C, MENG L. Physicochemical and infrared spectroscopic properties of gramineae plants biochar at different pyrolysis temperatures[J]. Biomass Chemical Engineering, 2021, 55(4): 21-28. (in Chinese)
- [27] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Biore-source Technology, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [28] 韦思业. 不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- WEI S Y. Influence of biomass feedstocks and pyrolysis temperatures on physical and chemical properties of biochar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [29] 王宏燕, 王晓晨, 张瑜洁, 代琳, 许毛毛, 丁奕君. 几种生

- 物质热解炭基本理化性质比较[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(5): 83-90.
- WANG H Y, WANG X C, ZHANG Y J, DAI L, XU M M, DING Y J. Comparison of biochars characteristics from biomass residues produced through slow pyrolysis[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 47(5): 83-90. (in Chinese)
- [30] 马莉, 吕宁, 冶军, 茹思博, 李国峰, 侯振安. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 976-981.
- MA L, LYU N, YE J, RU S B, LI G F, HOU Z A. Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 976-981. (in Chinese)
- [31] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1914-1920.
- YANG C D, ZONG Y T, LU S G. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1914-1920. (in Chinese)
- [32] 孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 顾祝禹, 张佳喜, 贾宏涛. 不同原料生物炭理化性质的对比分析[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 543-549.
- SUN T, ZHU X P, LI D P, GU Z Y, ZHANG J X, JIA H T. Comparison of biochars characteristics from different raw materials[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(6): 543-549. (in Chinese)
- [33] ZHAO B, O'CONNOR D, ZHANG J L, PENG T Y, SHEN Z T, TSANG D C W, HOU D Y. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 977-987.
- [34] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075-2080.
- ZHOU G Y, DOU S, LIU S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 2075-2080. (in Chinese)