

生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响

周桂玉, 窦 森*, 刘世杰

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要: 生物质炭是具有高度热稳定性和较强吸附特性的含碳物质, 不同来源生物质炭的结构性质可能存在着很大的差异。为此对 2 种自制的不同来源生物质炭和 1 种商业黑炭进行了结构表征, 并研究了添加生物质炭对土壤有效养分和腐殖质组成的影响。结果表明, 不同来源的生物质炭在结构上有明显区别: 秸秆生物质炭的芳构化程度和热稳定性最低, 脂族性最强; 商业黑炭缩合程度和热稳定性最高, 脂族性最弱; 松枝生物质炭介于二者之间。向土壤中添加秸秆生物质炭和松枝生物质炭培养 45 d 后, 土壤有机碳含量、胡敏酸和富里酸含量、有效养分含量都有不同程度的增加, 同时胡敏酸的色调系数 $\Delta\lg K$ 降低, 对土壤有机碳的长期保存有积极意义。

关键词: 生物质炭; 结构性质; 土壤有效养分; 腐殖质组成

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)10-2075-06

The Structural Characteristics of Biochar and Its Effects on Soil Available Nutrients and Humus Composition

ZHOU Gui-yu, DOU Sen*, LIU Shi-jie

(College of Resources and Environmental Science, Jilin Agriculture University, Changchun 130118, China)

Abstract: Biomass-derived charcoal, also named biochar, has the characteristics of high stability against decay and high capability of adsorption, so it can influence the environment through interaction with climate and geology. There is significant difference in structural characteristics of biochar which is obtained from wood and agricultural residues by means of different procedures. As one possible source of the components with high aromatic structure in soil humus, biochar is of great importance in improving soil fertility, and in maintaining the balance of soil ecosystem. The aim of the research is to investigate the structural characteristics of biochar and the effects of it when applied to soil on available nutrients and humus composition. The results showed that there was great difference between chemical structures of biochar which was produced by different biomass. Aliphatic property of maize straw-derived biochar was stronger than that of pine-derived biochar and commercial black carbon; Aromaticity and thermal stability was on the contrary; Properties of pine-derived biochar was just intermediate. Biochar could influence the soil properties, after being added to soil and incubated for 45 days, and the content of soil organic matter, humic acid and fulvic acid were more or less increased to different levels. However, humification degree decreased with the increase of incubated time. The application of biochar could also increase the content of available nutrients, especially the content of phosphorus, calcium and magnesium. The decreased $\Delta\lg K$ of humic acid had a positive impact on the long-term preservation of soil organic carbon.

Keywords: biochar; structural characteristics; soil available nutrients; humus composition

生物质炭(biochar)属于黑炭的一种类型,是由植物生物质在完全或部分缺氧情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化的难溶性固态物质^[1],具有高度热稳定性和较强吸附特性。据估测,全球每年通过生物

体燃烧形成的生物质炭数量在 $50 \times 10^{12} \sim 200 \times 10^{12}$ g,且随着人类活动还将不断上升。常见的生物质炭包括木炭、秸秆炭、竹炭、稻壳炭等^[2],有研究报道生物质炭主要包括碳(一般高达 60%以上)、氢、氧等,其次是灰分(包括钾、钙、钠、镁、硅等)。据 Demirbas 报道,生物质炭的元素组成为: C(66.6%~87.9%)、H(1.2%~2.9%)、O(10.6%~26.6%)^[3]。其元素组成由最终炭化温度决定,随着最终炭化温度的升高,其含碳量增加,氢和氧的含量降低,灰分含量亦有所增加^[4]。Abdul 等利用热

收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 973 项目(2011CB100503); 国家自然科学基金(40871107, 40971141); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-Q1-07)

作者简介: 周桂玉(1983—),女,吉林长春人,硕士研究生,从事土壤生物化学的研究。E-mail: guiyu001@163.com

* 通讯作者: 窦 森 E-mail: dousen@tom.com

重分析(TGA)分析了含生物质炭混合物的热稳定性,结果表明加入5%的农业废弃物生物质炭后增加了环氧混合物的热稳定性^[5]。Titirici等的红外光谱表明,羧基、酚羟基、羰基、脂族双键和一定的芳香性是生物质炭的典型结构特征^[6]。Schmidt and Noack研究表明,生物质炭不仅由稳定芳香化结构组成,而且含有许多脂肪族和氧化态碳结构^[4]。由于生物质炭的物理化学性质受来源和产生条件的影响^[7],不同来源生物质炭的结构性质可能存在着很大的差异。

生物质炭施加到土壤中,可能作为土壤腐殖质中高度芳香化结构组分的来源,不仅能稳定土壤有机碳库,持留土壤养分,而且对维持土壤生态系统平衡可能发挥重要作用。同时生物质炭较强的吸附特性,还可有效降低农田氮的挥发,减少土壤养分淋失^[2,8]。然而,对于生物质炭的结构特征和广泛应用还缺少强有力的证据,这也是当前面临的巨大挑战。能否利用生物质农业废弃物转化为生物质炭储存于土壤中达到固碳减排、培肥地力之目的是当前的研究热点,但由于生物质炭结构复杂和惰性,目前多限于研究添加生物质炭对土壤性质的影响,而添加生物质炭对土壤腐殖质组成变化的研究尚属空白。

为了研究不同来源生物质炭的结构差异和土壤中生物质炭的存在是否有利于腐殖质的形成,本文对2种自制的不同来源生物质炭和1种商业黑炭进行了结构表征,并对添加生物质炭后土壤有效养分和腐殖质组成的变化进行了研究,为生物质炭在土壤固碳、环境保护和农业生产上应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

松枝和玉米秸秆分别采自吉林农业大学生态园的松树林和吉林农业大学教学试验站玉米地。将采集的松枝和玉米秸秆剪为2 cm长的段,在70℃干燥至恒重,将其磨碎,分别过1 mm筛备用。

商业黑炭由长春铁鑫橡胶机械厂生产。

供试土壤采自吉林农业大学试验站玉米连作耕地(43°48'47.39"N, 125°23'21.79"E),土壤类型为草甸黑土。当地年降雨量500~600 mm,年平均气温4.6℃,日照2 600 h,年积温3 200℃,海拔高度205 m,砂粒、粉粒和粘粒含量分别为430、277 g·kg⁻¹和297 g·kg⁻¹,为壤质粘土,其理化性质为:pH 6.74,有机质32.5 g·kg⁻¹,全氮1.4 g·kg⁻¹,全磷0.57 g·kg⁻¹,碱解氮125 mg·kg⁻¹,速效磷26.4 mg·kg⁻¹,速效钾242.5 mg·kg⁻¹。将土

壤样品去除杂物后风干,过2 mm筛备用。

1.2 试验方法

1.2.1 生物质炭的制备

采用程序控制微波马弗炉制备生物质炭。以松枝为原料的生物质炭的制备条件如下:氮气流量250 L·h⁻¹,从室温到450℃的升温时间为5 h,然后在450℃下保持15 h。以秸秆为原料的生物质炭的制备条件终温采用400℃,制备时间为10 h,其他参数与松枝为原料的生物质炭的制备相同。结束后打开马弗炉,使其自然降温,粉碎过100目备用。

1.2.2 培养试验

选用秸秆生物质炭和松枝生物质炭作为添加物,添加量为土重的0.4%、1%和2%,并设不添加生物质炭的对照(CK)。将土壤与生物质炭混合均匀,加蒸馏水至田间持水量的80%,装入烧杯,覆上可透气的塑料薄膜。在25℃恒温恒湿条件下培养。动态取样时间分别为0、3、15、30 d和45 d,取出样品自然风干,过筛待测。

1.2.3 测定方法

生物质炭和商业黑炭的元素组成采用德国产的元素分析仪(Vario EL III型)测定;差热分析(DTA)用日本产差热分析仪(岛津,TA60)测定;红外光谱(IR)用美国产红外光谱仪(Nicolet AV-360)KBr压片法测定。DTA和IR均进行半定量处理。HA和FA含量用腐殖质组成修改法^[9],将连续提取4次的提取液合并,酸化分离HA和FA。其他采用常规方法测定。

2 结果与讨论

2.1 生物质炭的结构性性质

2.1.1 元素组成

2种生物质炭和1种商业黑炭的元素组成见表1。松枝生物质炭和商业黑炭的元素组成差异较小,说明松枝生物质炭与商业黑炭的成分更接近。秸秆生物质炭的碳含量较低,但H、N、O含量和H/C摩尔比均较高,说明其分子缩合度较商业黑炭和松枝生物质炭低;秸秆生物质炭O/C比值高,说明其表面极性官能团较多,亲水性较强^[10];秸秆生物质炭O、H含量和H/C摩尔比均低于松枝生物质炭,可能就是热解温度的影响,这符合Chun等热解温度能显著影响生物质炭化学组成,随热解温度升高,生物质炭的C含量增加,O、H含量和H/C摩尔比均降低的结论^[11]。

2.1.2 差热分析

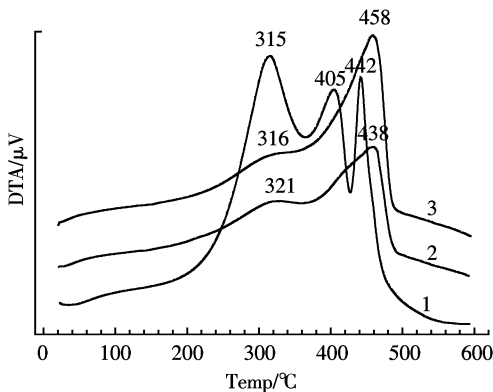
生物质炭和商业黑炭的差热分析见图1,这3种

表 1 生物质炭和商业黑炭的元素组成

Table 1 Elemental composition of biochar and commercial black charcoal

种类	C/g·kg ⁻¹	H/g·kg ⁻¹	N/g·kg ⁻¹	O/g·kg ⁻¹	C/N 摩尔比	H/C 摩尔比	O/C 摩尔比
秸秆生物质炭	556.83	50.98	12.04	380.23	53.96	1.10	0.51
松枝生物质炭	705.12	39.24	6.17	249.53	133.33	0.67	0.27
商业黑炭	705.60	36.32	5.90	252.21	139.53	0.62	0.27

物质均有明显的中温和高温放热峰。中温放热峰的峰温在 315~321 ℃,代表着分子中脂族化合物的分解和外围官能团的脱羧等放热反应^[12];高温放热峰在 405~458 ℃,是分子完全氧化、内部结构分解的结果^[13-14]。商业黑炭与松枝生物质炭相近,只有两个放热峰;但秸秆生物质炭不仅中温放热峰最大,而且在 405 ℃多一个放热峰,说明秸秆生物质炭的成分复杂,热稳定性较弱。



1、2、3 分别代表秸秆生物质炭(maize straw-derived biochar)、松枝生物质炭(pine-derived biochar)、商业黑炭 (Commercial black charcoal)

图 1 生物质炭和商业黑炭的差热分析

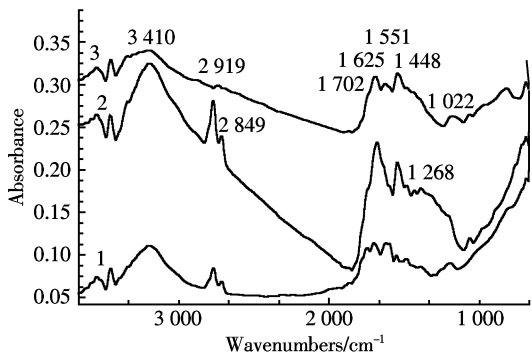
Figure 1 Differential thermal analysis of biochar and commercial black charcoal

半定量分析结果见表 2,这 3 种物质的总反应热为 34~62 kJ·g⁻¹,以商业黑炭最高,秸秆生物质炭最低。商业黑炭以高温放热为主,占 95%以上;秸秆生物质炭则以中温放热为主,占 59%;松枝生物质炭居中。热失重反应了大致相同的规律,即商业黑炭以高温失重为主,占 90%以上;秸秆生物质炭则以中温失重为主,占 53%;也是松枝生物质炭居中。这些都说明,商业黑炭的热值大、热稳定性最高;秸秆生物质炭的热值小,热稳定性最弱。

明,商业黑炭的热值大、热稳定性最高;秸秆生物质炭的热值小,热稳定性最弱。

2.1.3 红外光谱

红外光谱主要用于土壤腐殖质结构定性,反映官能团组成等特点^[15],生物质炭和商业黑炭的 IR 光谱见图 2。



1、2、3 分别代表秸秆生物质炭(maize straw-derived biochar)、松枝生物质炭(pine-derived biochar)、商业黑炭 (commercial black carbon)

图 2 生物质炭和商业黑炭的 IR 图谱

Figure 2 IR spectrum of biochar and commercial black charcoal

从图 2 可以看出,这 3 种物质吸收峰分别出现在 3 410、2 919、2 849、1 702、1 625、1 551、1 448、1 260 cm⁻¹和 1 022 cm⁻¹,其中秸秆生物质炭和松枝生物质炭在 2 919 cm⁻¹和 2 849 cm⁻¹吸收明显,分别代表脂族中聚亚甲基链和末端甲基中的 C-H 振动。代表羧基中 C=O 振动的 1 720 cm⁻¹在秸秆生物质炭吸收最明显,与元素分析中其 O/C 比值最高相一致。商业黑炭吸收峰较少,没有脂族吸收峰,说明其成分较为单一。3 种物质在 1 620 cm⁻¹(属于芳香 C=C 环伸展的分子振动)和 1 551 cm⁻¹(用于表征芳香 C=C 伸展)处均有吸收峰^[16-17],说明它们都有一定的芳香碳振动,这

表 2 生物质炭和商业黑炭的反应热

Table 2 Reactive heat of biochar and commercial black charcoal

种类	中温			高温 1			高温 2			总反应热/ kJ·g ⁻¹	总失重/ mg·g ⁻¹	放热量 高/中
	℃	放热/kJ·g ⁻¹	失重/mg·g ⁻¹	℃	放热/kJ·g ⁻¹	失重/mg·g ⁻¹	℃	放热/kJ·g ⁻¹	失重/mg·g ⁻¹			
秸秆生物质炭	315	19.97	481	405	6.91	281	442	7.21	142	34.09	904	0.71
松枝生物质炭	321	5.39	179	-	-	-	438	36.29	768	41.68	947	6.73
商业黑炭	316	3.08	97	-	-	-	458	59.07	830	62.15	927	19.18

与 Schmidt and Noack 的生物质炭主要由稳定芳香化结构组成的结论和宋建中等的黑炭结构以芳环骨架为主的研究结果基本一致^[4,18]。半定量分析结果见表 3。

2 920/1 620 比值用于反映土壤腐殖质的脂族与芳香族碳的比例,虽然用于生物质炭不一定完全有效,但大致上可以试用。3 种物质的 2 920/1 620 比值顺序为秸秆生物质炭(2.06)>松枝生物质炭(0.99)>商业黑炭(0.14)。说明秸秆生物质炭脂族性最强,其次是松枝生物质炭,商业黑炭脂族性最弱。

2.2 添加生物质炭对土壤性质的影响

2.2.1 有效养分含量

生物质炭有很强的吸附能力,可吸附铵、硝酸盐,还可吸附磷和其他水溶性盐离子,具有保肥性能^[9],针对生物质炭的这一特性,分析了添加松枝生物质炭培养 45 d 后,土壤有效养分含量的变化(图 3)。

与 CK 相比,其他 3 个处理的养分含量都有所上升。在 0.4%~2%生物质炭添加水平范围内,随着生物质炭添加量的上升,各有效养分的含量也随之上升。其中添加生物质炭使碱(水)解氮的含量依次提高 0.61%、4.89%和 10.18%,有效磷的含量提高 1.96%、4.45%和 22.58%,有效钾含量提高 0.90%、6.01%和 8.20%,有效钙含量提高 3.37%、16.76%和 18.54%,有效镁含量提高 5.0%、11.65%和 14.52%。从作用效果的大小来看,0.4%添加量对以上几种养分的作用效果

大小依次为镁>钙>磷>钾>氮,1%添加量为:钙>镁>钾>氮>磷,2%添加量为磷>钙>镁>氮>钾。

研究结果表明,添加生物质炭可以提高土壤中有效养分的含量,其中生物质炭对有效磷、钙、镁的作用效果较明显,但对氮和钾的作用差异不显著。这和 Glaser 等报道的施用炭能增加有效 P、K、Mg 和 Ca 含量的研究结果一致^[9]。

2.2.2 有机碳(SOC)含量

土壤有机质(SOM)含量经常作为土壤肥力的指标^[9]。为研究生物质炭对土壤有机质含量的影响,将不同用量的松枝生物质炭和秸秆生物质炭添加到土壤中,培养 45 d 后 SOC 含量发生了一定的变化(图 4)。随生物质炭用量的增加,SOC 含量增加,从 CK 的 16.2 g·kg⁻¹ 分别增加到 0.4%处理的 18.7 g·

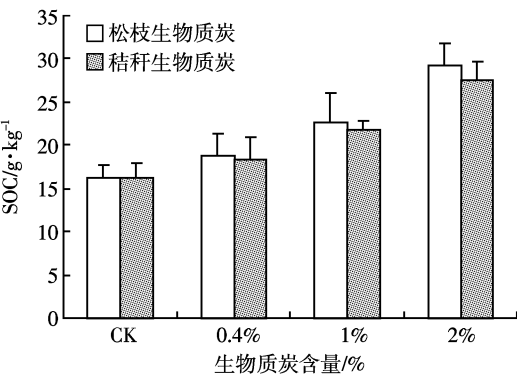


图 4 土壤有机碳含量的变化

Figure 4 Variation of SOC content

表 3 IR 光谱主要吸收峰的相对强度(半定量)

Table 3 Relative intensity of the main absorption peaks of IR spectrum(semi-quantitive)

样品	3 410 cm ⁻¹	2 919 cm ⁻¹	2 849 cm ⁻¹	1 620 cm ⁻¹	1 551 cm ⁻¹	1 448 cm ⁻¹	1 260 cm ⁻¹	1 022 cm ⁻¹	2 920/1 620
秸秆生物质炭	15.17	0.99	0.24	0.48	1.19	0.17	0.20	0.45	2.06
松枝生物质炭	32.73	2.35	0.51	2.37	0.06	1.64	0.21	—	0.99
商业黑炭	10.72	0.12	0.03	0.86	0.38	0.95	—	0.84	0.14

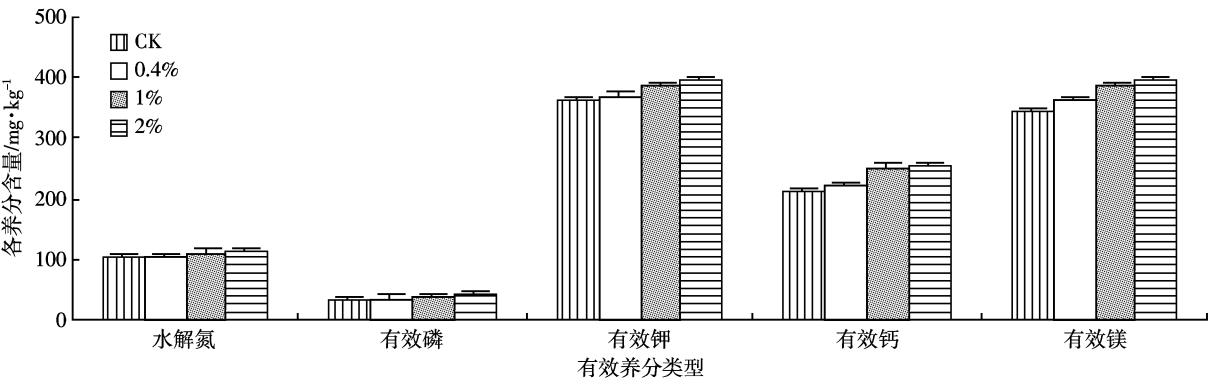


图 3 土壤有效养分含量的变化

Figure 3 Variation of soil available nutrients content

kg^{-1} , 1%处理的 $22.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 2%处理的 $29.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。原因可能是生物质炭改变土壤有机质的组成, 形成了稳定的 SOC。这也说明添加生物质炭有利于土壤有机质的积累和形成, 对提高土壤肥力, 稳定土壤有机碳库有重要意义, 与 Middelburg 等通过研究证实炭化的植物残体有助于土壤有机质积累的结论一致^[20]。

2.2.3 胡敏酸和富里酸含量

添加 2% 的松枝生物质炭使 HA 的数量呈增加趋势, 从 CK 的 $2.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 2% 松枝生物质炭处理的 $3.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着培养时间的推移, 2% 松枝生物质炭处理 HA 含量呈逐渐递减的趋势, 且随着培养天数的增加, 下降趋势越来越明显, 培养 3、15、30 d 和 45 d 后, HA 含量分别下降了 2.27%、5.68%、10.23% 和 16.19% (图 5)。与 HA 相比, FA 变化幅度较小。生物质炭吸附有机分子, 再加上炭的逐步分解, 有助于启动腐殖质的形成。添加生物质炭后 HA 数量下降的幅度增大, 但却抑制了 FA 数量的下降, 说明生物质炭促进 HA 分解和转化的同时却有利于 FA 的形成和积累。

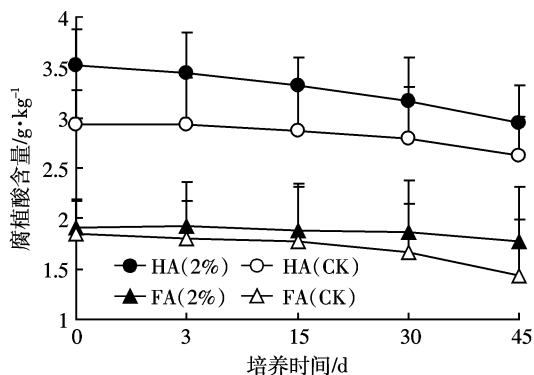


图 5 土壤 HA、FA 含量的变化

Figure 5 Variation of HA and FA content

2.2.4 胡敏酸光学特性

色调系数 $\Delta \lg K$ 是表征胡敏酸光学性质的重要参数。一般情况下 $\Delta \lg K$ 越高, 说明它们的分子结构越简单, 平均分子量越小^[9]。本研究对不同处理土壤胡敏酸的 $\Delta \lg K$ 进行了测定, 结果见图 6。

从图 6 可见, 添加松枝生物质炭使胡敏酸的 $\Delta \lg K$ 降低, 与 CK 相比, 0.4%、1% 和 2% 3 个处理的 $\Delta \lg K$ 降低幅度分别为 3.69%、12.55% 和 19.06%。降低的原因可能是由于生物质炭具有极强的吸附能力, 可以从土壤中吸附其他物质, 对生物质炭的包裹导致了生物质炭为微生物提供营养能力的下降, 从而抑制了微生物的降解作用, 使得土壤 HA 的缩合度增加,

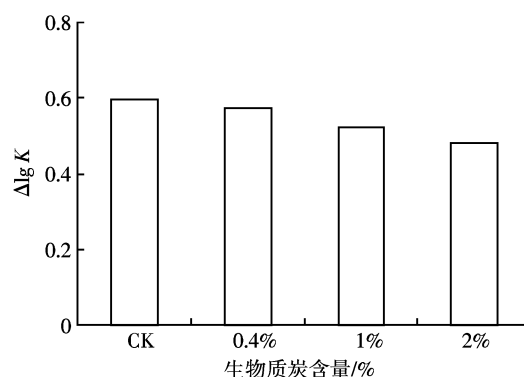


图 6 培养 45 d 后土壤胡敏酸 $\Delta \lg K$ 的变化

Figure 6 Variation of $\Delta \lg K$ of soil HA after incubating 45 days

结构变复杂。Zhang 等研究表明, 当土壤中含少量碳灰时, 开始阶段能加快微生物降解作用, 但随时间延长, 反而抑制微生物的降解, 添加碳灰的土壤中平均降解速率明显较没有添加碳灰的土壤中慢^[21]。 $\Delta \lg K$ 的降低说明添加生物质炭使土壤 HA 的分子结构复杂化, 芳构化程度增加, 对有机质的保存具有积极的意义。

3 结论

不同来源的生物质炭在结构上有明显区别。秸秆生物质炭的芳构化程度和热稳定性最低, 脂族性最强; 商业黑炭缩合程度和热稳定性最高, 脂族性最弱; 松枝生物质炭介于二者之间。向土壤中添加秸秆生物质炭和松枝生物质炭培养 45 d 后, 土壤有机碳含量、胡敏酸和富里酸含量、有效养分含量都有不同程度的增加, 同时胡敏酸的 $\Delta \lg K$ 降低, 对土壤有机碳的长期保存有积极意义。

参考文献:

- [1] 史明, 胡林潮, 黄兆琴, 等. 生物质炭的加入对土壤吸附菲能力以及玉米幼苗对菲吸收量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 912-916.
SHI Ming, HU Lin-chao, HUANG Zhao-qin, et al. The influence of bio-char inputting on the adsorption of phenanthrene by soils and by maize seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 912-916.
- [2] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982.
- [3] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues [J]. *Journal of Analytical and Ap-*

- plied Pyrolysis, 2004, 72: 243–248.
- [4] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14: 777–794.
- [5] Abdul Khalil H P S, Firoozian P, Bakare I O, et al. Exploring biomass based carbon black as filler in epoxy composites: Flexural and thermal properties[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(7): 3419–3425.
- [6] 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: 4205–4212.
- [7] Sohi S, Lopez-Capel E, Krull E, et al. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research[J]. *CSIRO Land and Water Science*, 2009, 1834–6618: 1–56.
- [8] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153–157.
- ZHANG Wen-ling, LI Gui-hua, GAO Wei-dong. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17): 153–157.
- [9] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- DOU Sen. Soil organic matters[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [10] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳制备的不同热解温度对其吸附菲的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 125–128.
- WU Cheng, ZHANG Xiao-li, LI Guan-bin. Effects of pyrolytic temperature of phenanthrene on its adsorption to black carbon[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(1): 125–128.
- [11] Chun Yuan, Sheng Guangyao, Chou T. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(17): 4649–4655.
- [12] 窦森, 陈恩凤, 谭世文, 等. 不同来源胡敏酸的结构表征[J]. 吉林农业大学学报, 1989, 11(2): 50–56, 123.
- DOU Sen, CHEN En-feng, TAN Shi-wen, et al. Characterization of humic acids from different origin[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1989, 11(2): 50–56, 123.
- [13] 窦森, 陈恩凤, 须湘成, 等. 土壤有机培肥后胡敏酸结构特征变化规律的探讨: I 胡敏酸的化学性质和热性质[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 199–207.
- DOU Sen, CHEN En-feng, XU Xiang-cheng, et al. Effect of improving soil fertility by organic material application on structural characteristics of humic acids in soils: I. the chemical and thermal properties of HAs [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2): 199–207.
- [14] 朱燕, 李爱民, 李超, 等. 土壤有机质级份的红外和热重特性[J]. 环境化学, 2005, 24(3): 288–292.
- ZHU Yan, LI Ai-min, LI Chao, et al. Characteristics of soil humic substances by infrared spectra and thermal gravity [J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(3): 288–292.
- [15] 窦森. 土壤有机培肥后 HA 结构性变化规律系统研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 1988.
- DOU Sen. Effect of improving soil fertility by organic material application on structural characteristics of humic acids in soils[D]. Shenyang: Shenyang Agriculture University Ph. D. Thesis, 1988.
- [16] Starsinic M, Taylor R L, Walker J P L, et al. FTIR studies of Saran chars[J]. *Carbon*, 1983, 21: 69–74.
- [17] Guo Y, Bustin R M. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: Implications for studies of inertinite in coals[J]. *Coal Geol*, 1998, 37: 29–53.
- [18] 宋建中, 于赤灵, 彭平安, 等. 珠江三角洲地区土壤与表层沉积物有机质的性质结构研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 335–343.
- SONG Jian-zhong, YU Chi-ling, PENG Ping-an, et al. The characterization and structure of soil and sediments organic matter in Pearl River delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 335–343.
- [19] Glaser B. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. *Biol Fertil Soils*, 2005, 41: 15–21.
- [20] Middelburg J J, Nieuwenhuize J, van B P. Black carbon in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 1999, 65(3/4): 245–252.
- [21] Zhang P, Sheng G Y, Yu C F, et al. Role of wheat-residue-derived char in the biodegradation of benzonitrile in soil: Nutritional stimulation versus adsorptive inhibition[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 5442–5448.