

施用玉米秸秆生物质炭对水稻土黑碳数量和结构特征的影响

张 葛¹, 窦 森^{1*}, 谢祖彬², 孟繁荣¹, 尹显宝¹

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要:通过研究玉米秸秆生物质炭施用对土壤黑碳(BC)数量和结构的影响规律,比较施用生物质炭后不同年限间的差异,为阐明土壤 BC 在土壤固碳上的作用提供理论依据。选择化学氧化修改法进行土壤 BC 的提取,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(SOC)含量,采用元素组成和红外光谱分析对土壤 BC 进行结构表征。研究表明:与对照(未施用玉米秸秆生物质炭)相比,施用玉米秸秆生物质炭后 3 年间各年土壤 BC 的含量分别增加 177.0%、304.3%和 434.2%,土壤 BC 占 SOC 的比例分别增加 40.2%、143.5%和 167.3%,说明玉米秸秆生物质炭有助于表层土壤 BC 长期稳定的积累,且随时间的延长而增加;与对照相比,施用玉米秸秆生物质炭后表层土壤 BC 的碳元素含量增加,缩合度和芳香性增加,氧化度和脂族性降低,且随玉米秸秆生物质炭施用年限的延长表现得更加明显。长期施用玉米秸秆生物质炭后使土壤 BC 的结构向着芳香性增加的方向发展,稳定性增强,因而对于土壤固碳是有利的。

关键词:玉米秸秆生物质炭;表层水稻土;土壤黑碳;含量;结构特征

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)09-1769-06 **doi:**10.11654/jaes.2015.09.020

Effect of Corn Stalk-Derived Biochar on Quantity and Structural Characteristics of Black Carbon in Paddy Soil

ZHANG Ge¹, DOU Sen^{1*}, XIE Zu-bin², MENG Fan-rong¹, YIN Xian-bao¹

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract: Biochar can improve soil fertility and enhance soil carbon sequestration. In order to understand the contribution of biochar to soil carbon sequestration, the quantity and structural characteristics of black carbon(BC) were studied in soil applied with corn stalk-derived biochar for different durations under rice and wheat rotation. Compared with CK(no corn stalk-derived biochar), the content of BC in surface soil increased by 177.0%, 304.3% and 434.2% in the 1st, 2nd, and 3rd year of biochar application, respectively, resulting in an increase in BC/SOC ratio by 40.2%, 143.5%, and 167.3%. This indicated that applying corn stalk-derived biochar would help the accumulation of BC in surface soil over time. Furthermore, the biochar applications increased the carbon content, condensation degree and aromatic degree of BC in surface soil, while decreased the oxidation degree and aliphatic degree as compared to CK. Such effects were more obvious in longer duration of biochar application. These findings suggest that long-term application of biochar would improve aromaticity and stability of BC, and enhance soil carbon sequestration.

Keywords: corn stalk-derived biochar; surface paddy soil; black carbon; quantity; structural characteristics

生物质炭(Biochar Carbon, BcC)是黑碳(Black Carbon, BC)的一部分(不区分时可以统称 BC),与腐殖质碳(Humus Carbon, HC)同为土壤有机碳(Soil Organic

Carbon, SOC)稳定性碳库的组成部分,但 BC 通常较 HC 更为稳定^[1]。目前,关于 BcC 或 BC 尚未有统一的定义,二者均是高温热解产生的富含碳且性质稳定的物质,但 BcC 较 BC 的范围窄些,不包括化石燃料产物或地球成因形成的碳^[2]。土壤有机质是泛指以各种形态和状态存在于土壤中的各种含碳有机化合物,其含量决定了土壤有机碳的含量^[3]。土壤有机碳主要来源于动物、植物、根系分泌物和微生物残体,并处于一

收稿日期:2015-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41171188)

作者简介:张 葛(1982—),女,博士研究生,从事土壤生物化学与土壤改良培肥工作。E-mail:40389317@qq.com

* 通信作者:窦 森 E-mail:dousen@tom.com

个不断分解和形成的动态变化过程中,是生态系统在特定条件下的动态平衡值^[4]。相关研究结果表明,土壤黑碳具有较强的稳定性,在土壤中可存在成百上千年,在全球碳循环、温室气体排放和环境污染修复^[5-6]中发挥着重要作用。李丽等^[7]发现通过固定化改性生物质炭后,可增加其对硝态氮的吸附能力,在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝态氮溶液中,改性生物质炭对硝态氮的去除比例可达 80%。目前关于施用生物质炭对土壤基本理化性质和作物产量的影响已经开展了大量的研究,有研究表明:添加生物质炭后,可以增加土壤含碳量^[8]、改善土壤性质、促进土壤团聚体的形成、增加土壤养分^[9]、促进植物生长、增加产量^[10]和刺激微生物活动。这些研究多在较短的试验时间内探讨生物质炭对土壤和植物生长的影响,通常忽视了施用生物质炭对土壤和植物影响效果持续性的问题,但土壤黑碳会通过矿物、微生物、植物等发生相互作用而不断发生物理化学特性变化。仅有部分研究者开展了生物质炭施用效果持续性方面的研究,Knoblauch 等^[11]认为向稻田中施用炭化稻壳后,第 1 年 CH_4 释放量显著增加,第 2 年 CH_4 释放量却不显著变化;Zhang 等^[12]通过连续 2 年大田试验研究发现,向稻田中施用生物炭之后,作物产量及土壤 pH、土壤有机碳和全氮含量增加,而土壤容重降低。此外,由于土壤黑碳的化学复杂性及其固有的化学惰性,同时也由于缺乏统一的界定、鉴别和测定技术标准,对不同类型土壤中黑碳的提取和定量分析及结构鉴定十分困难^[13],致使研究施用生物质炭对土壤黑碳数量和结构的影响几乎没有。

本研究以添加 400°C 的玉米秸秆生物质炭的表层水稻土为研究对象,采用化学氧化修改法对土壤黑碳进行提取和纯化,并采用重铬酸钾外加热法、元素组成和红外光谱分析一次施用生物质炭添加后连续 3 年对土壤有机碳和黑碳数量和结构特征的影响,以期深入研究添加生物质炭对土壤黑碳的持续作用,为土壤黑碳在土壤固碳、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

1.1.1 土壤

供试土壤采自江苏省江都市小记镇宗村($32^\circ 35' 5''\text{N}$, $119^\circ 42' 0''\text{E}$)生物炭实验基地。该地位于亚热带湿润气候带,海拔 5 m,年平均降雨量 980 mm,年平均蒸发量 1100 mm,年平均气温 14.9°C ,年日照时

间 2100 h,年无霜期 220 d,土壤类型为中层砂浆水稻土,试验前其基本理化性状如下:pH 8.0,有机碳 $7.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.821 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.259 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、C/N 8.53。

1.1.2 生物质炭

供试生物质炭采用低温热解法,首先将玉米秸秆在烘箱内 80°C 烘干 12 h,然后将玉米秸秆放入炭化炉(中国科学院南京土壤研究所研制 ZBX1 型),之后设定初始炉温为 200°C ,抽真空,充氮气,反复 3 次(保证无氧环境)程序升温至 400°C ,保持 1.5 h,直至无烟冒出。冷却研磨,过 0.25 mm 筛,制得的生物质炭(编号为 Bc),理化性状为:pH 9.20、有机碳 $519.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $7.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.900 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、C/N 比为 73.2。

1.2 试验设计与样品采集

试验设置 2 个处理:对照处理,土壤样品采自不添加生物质炭的小区,采集时间为 2012 春季,编号为 CK;施用生物质炭处理,采自生物质炭添加量为 $48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的小区,该小区添加玉米秸秆生物质炭的时间为 2011-06-20,即种水稻前一次性人工均匀施入,深度约 15 cm,然后开始水稻-小麦轮作,每年 2 季。每个处理重复 3 次,小区面积 10 m^2 。

土壤样品分 3 年采集,每个小区用土钻采集 5 点混合样品,自然风干备用,其中:第 1 年采集时间为 2012 春季,编号为 BC1(经过了 1 个稻季,1 个麦季,处于第 2 个麦季生长期),采集深度为 0~15 cm;第 2 年采集时间为 2013-07-10,编号为 BC2(经过了 2 个稻季,2 个麦季,处于第 3 个稻季苗期),采集深度为 0~20 cm;第 3 年采集时间为 2014-12-24,编号为 BC3(经过了 3 个稻季,3 个麦季,处于第 4 个稻季生长期),采集深度为 0~15 cm。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤有机碳的测定

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法^[14]测定。

1.3.2 土壤黑碳的提取

参照化学氧化法^[15],但在混酸($10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HF 和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl)处理残渣后,增加 3 次混酸处理步骤,即:向残渣中加入混酸后放入恒温(25°C)水浴振荡器中振荡 24 h,再用低速离心机以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度离心 20 min,弃去上清液,用蒸馏水洗残渣至 pH 为 4~5 为止,重复 3 次。

本试验中提取的土壤黑碳包括添加生物质炭。

1.3.3 元素组成

应用德国 VARIO EL III 型元素分析仪进行土壤黑碳的 C、H、N 质量分数测定, O 质量分数用差减法

计算,即: $O\%=100\%-(C\%+H\%+N\%)$,利用差热分析的灰分和含水量数据对元素分析数据进行校正。

1.3.4 红外光谱

采用 KBr 压片法^[16]在美国 Nicolet-AV360 红外光谱仪上测定,波数范围 4000~400 cm^{-1} 。以 3740、1820、860 cm^{-1} 处作为零吸收点,将通过该 3 点的直线作为基线,进行吸收强度的测定并加以比较。

1.4 数据分析

数据经 Excel2007 整理,用 SPSS 软件分析,采用 LSD 法进行差异显著性比较,并用 Original 软件作图。

2 结果与分析

2.1 施用生物质炭对土壤有机碳和黑碳含量的影响

施用生物质炭对不同时间内土壤有机碳和黑碳含量的影响结果见表 1。可以看出,施用生物质炭后,与表层 CK 相比,BC1、BC2、BC3 土壤有机碳的含量分别增加了 97.8%、66.3%和 100.2%;BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的含量分别增加了 177.0%、304.3%和 434.2%;BC1、BC2、BC3 土壤黑碳占土壤有机碳的比例分别增加了 40.2%、143.5%和 167.3%。可见,施用生物质炭后,随着时间的延长,表层土壤有机碳和黑碳含量,以及土壤黑碳占土壤有机碳的比例都有不同程度的增加,说明随时间的延长,生物质炭的施用有利于土壤有机碳,特别是土壤黑碳的积累。

此外,通过单因素方差分析可知,不同处理的土壤有机碳和土壤黑碳的含量差异显著,波动较大。

2.2 施用生物质炭对土壤黑碳元素组成的影响

表 2 表明了施用生物质炭对不同时间内土壤黑碳元素组成的影响。试验结果表明,土壤黑碳的 C 元素含量为 613.7~779.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,O 元素含量为 139.3~313.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明土壤黑碳的元素组成以 C 元素和 O 元素为主。与 CK 相比,施用生物质炭后,BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的 C 元素含量分别增加了 7.01%、

10.9%和 27.0%;BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的 H 元素含量分别增加了 3.97%、5.35%和 12.3%;BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的 N 元素含量分别增加了 2.85%、4.17%和 8.72%;但 BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的 O 元素含量分别减少了 14.6%、22.5%和 55.5%。这说明,随着时间的延长,生物质炭的施用使土壤黑碳的 C、H、N 元素含量增加,O 元素含量减少。

表 2 还表明施用生物质炭对土壤黑碳缩合度(C/H)和氧化度(O/C)的影响。土壤黑碳的 H/C 和 O/C 的比值范围分别为 0.833~0.942、0.134~0.383。施用生物质炭后,与 CK 相比,BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的 H/C 比值分别降低了 2.64%、4.79%和 11.4%;BC1、BC2、BC3 土壤黑碳的 O/C 比值分别降低了 19.6%、29.6%和 64.7%。这说明,施用生物质炭后,随着时间的延长,土壤黑碳的缩合度增加,氧化度降低。

2.3 施用生物质炭对土壤黑碳红外光谱的影响

施入生物质炭后不同时间土壤黑碳的红外光谱如图 1 所示。可观察到较明显的吸收峰及其归属分别为:3400 cm^{-1} (羧酸、酚类、醇类等的-OH 伸缩振动和酰胺类官能团的 N-H 振动);2920~2850 cm^{-1} (脂族结构中-CH₂和-CH₃的 C-H 的伸缩振动);1720 cm^{-1} (羧酸的 C=O 伸缩振动);1620 cm^{-1} (酰胺 I 类化合物的 C=O 伸展振动);1440 cm^{-1} (脂族结构中甲基和亚甲基

表 2 施用生物质炭对土壤黑碳元素组成的影响

Table 2 Effect of biochar application on elemental composition of BC

处理	C/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	H/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	O/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	C/N	H/C	O/C
CK	613.7	48.2	25.0	313.1	28.6	0.942	0.383
BC1	656.7	50.1	25.7	267.5	29.8	0.915	0.305
BC2	680.5	50.8	26.1	242.7	30.4	0.895	0.268
BC3	779.4	54.1	27.2	139.3	33.4	0.833	0.134
Bc	797.0	54.4	32.4	116.3	28.7	0.819	0.109

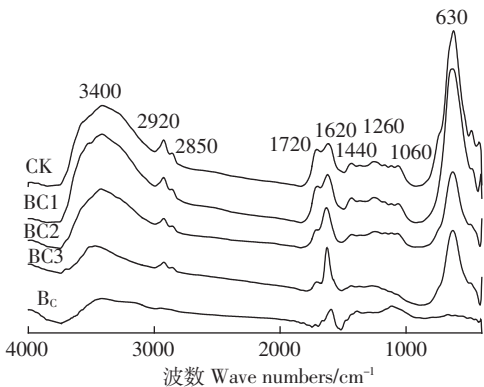


图 1 施用生物质炭对土壤黑碳的红外光谱影响

Figure 1 Effect of biochar application on infrared spectroscopy of BC

表 1 施用生物质炭对土壤 SOC 和 BC 含量的影响

Table 1 Effect of biochar application on content of SOC and BC

处理	有机碳含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤黑碳含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤黑碳占有机碳比例/%
CK	19.5±0.555c	1.61±0.219d	8.26
BC1	38.5±1.14a	4.46±0.291c	11.6
BC2	32.4±0.134b	6.51±0.360b	20.1
BC3	39.0±1.02a	8.60±0.095a	22.1
Bc	519.6	—	—

注:同一列中不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。

的变形振动);1260 cm^{-1} (羧基中-OH 的变形振动和 C-O 伸缩振动);1060 cm^{-1} (碳水化合物或多糖结构中 C-O 伸缩振动和无机物的 Si-O 伸缩振动)以及 630 cm^{-1} (无机矿物的 Si-O 变形振动)。

尽管所有土壤黑碳的红外光谱的谱形相似,但不同处理土壤黑碳的红外光谱的某些特征峰吸收强度有一定的差异,反映施用生物质炭对土壤黑碳结构单元和官能团数量有一定的影响。为了比较施用生物质炭的效果,重点比较 2920 cm^{-1} 、2850 cm^{-1} 、1720 cm^{-1} 和 1620 cm^{-1} 吸收峰强度的变化。

从表 3 可以看出,施入生物质炭后,与 CK 相比,土壤黑碳在 2920 cm^{-1} 、2850 cm^{-1} 和 1720 cm^{-1} 处的吸收强度降低,在 1620 cm^{-1} 处的吸收强度增加。这说明,施用生物质炭使土壤黑碳的脂族链烃和羧基含量降低,而促进了芳香碳数量的增加。I2920/I1620 表示土壤黑碳的脂族链烃与芳香族 C 的比值,可以反应土壤黑碳的芳香性和脂族性强弱^[17]。从表 3 可以看出,施用生物质炭后,随着时间的延长, I2920/I1620 比值降低,表明施用生物质炭后,随着时间的延长,土壤黑碳的芳香性增加,脂族性降低。

3 讨论

3.1 施用生物质炭对土壤有机碳和土壤黑碳含量的影响

由于生物质炭具有高度的芳香化结构和多孔特性,许多研究表明向农田施用生物质炭,可以增加土壤有机碳的含量。已有研究表明,施用生物质炭不仅会明显提高土壤有机碳的含量,且可长时间持续进行碳的补充^[10];在相同施肥条件下,向土壤中分别添加 0、5、10、20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的生物质炭,发现土壤有机碳含量随生物质炭添加量的增加而增加^[18]。本研究结果也表明,添加生物质炭后,土壤有机碳的含量增加,说明施入生物质炭有利于提高土壤腐殖质碳含量。导致土壤有机碳含量增加的原因可能是生物质炭转化为腐殖

质碳^[19],直接增加了土壤有机碳的含量;也可能是因为生物质炭改变了土壤有机碳的组分,形成了更稳定的土壤有机碳^[17]。

土壤中黑碳的来源有人为源和自然源两种^[20],其中自然源是指自然火灾,人为源是指人类农业活动。雷雨雨等^[21]通过对大兴安岭重度火烧迹地土壤黑碳的研究得出,重度火烧后,各层土壤黑碳均有不同程度的提高。张履勤等^[22]对原生林地、次生林地、茶园和旱地土壤有机碳、碳黑和颗粒有机碳的含量进行比较,发现黑碳占总有机碳的比例为旱地、茶园>次生林地>原生林地,说明在林地垦为农业用地过程中,碳黑(即土壤黑碳)的增加可能与施用有机肥有关。本研究结果表明,施用生物质炭后,土壤黑碳的含量和土壤黑碳占土壤有机碳的比例持续增加,其原因可能是施用的生物质炭转化成了土壤黑碳,直接增加了土壤黑碳的含量,也可能是因为土壤微生物作用的结果^[23]。已有研究报道,BC/SOC 比值可以反映土壤中 BC 的来源,该比值在 0.5 左右表明 BC 主要来自化石燃料燃烧,而在 0.1 左右表明 BC 主要来自生物质燃烧^[24]。本文中 BC/SOC 在 0.08~0.22 范围内,表明土壤 BC 主要来源为生物质燃烧。

3.2 施用生物质炭对土壤黑碳结构特征的影响

土壤黑碳是土壤稳定性碳库的组成部分,元素组成分析仪、红外光谱仪、差热分析仪和核磁共振分析仪等现代分析仪器被广泛应用于土壤黑碳结构特征的研究工作中,成为科学工作者们研究的重点内容之一。杨敏^[25]通过生物质炭还田试验分析了秸秆炭还田 3.5 年间的变化,结果表明还田秸秆炭的碳含量呈先增加后降低的趋势(但比刚还田时高),还田后以脂肪族碳降解为主;Liang 等^[26]报道,BC 含量高与含量低的相邻土壤相比,芳香性、羧基和酚羟基官能团均较高,其中芳香碳占总碳的比例为 30%~42%,较邻近土壤高 66%~81%,同时认为生物质炭含量丰富的土壤

表 3 施用生物质炭对土壤 BC 的红外光谱主要吸收峰的相对强度的影响(半定量)

Table 3 Effect of biochar application on relative intensity of main absorption peaks of infrared spectroscopy of BC (Semi-quantitative result)

处理	相对强度/%				比值	
	2920 cm^{-1}	2850 cm^{-1}	1720 cm^{-1}	1620 cm^{-1}	I2920/I1720	I2920/I1620
CK	8.34	4.93	10.8	20.2	1.23	0.657
BC1	7.58	4.15	9.43	23.7	1.24	0.495
BC2	4.22	2.17	5.06	26.8	1.26	0.238
BC3	2.58	1.17	2.96	29.8	1.27	0.126
Bc	1.59	0.831	1.81	62.4	1.34	0.0392

注:I2920/I1720 比值为 $I(2920+2850)/I1720$; I2920/I1620 比值为 $I(2920+2850)/I1620$ 。

其芳香化程度也相对较高;花莉等^[27]利用红外光谱和扫描电镜研究生物质炭对土壤腐殖质结构的作用发现,生物质炭的添加促进了碳水化合物、酯族、芳烃等有机大分子的形成。本研究结果表明,施入生物质炭后,表层土壤黑碳的 C 元素含量、I2920/I1720 比值升高,I2920/I1620、H/C 和 O/C 比值均降低,说明 1 次施用生物质炭后连续 3 年间,土壤黑碳中的碳元素含量和缩合程度增加,脂肪族链烃和氧化度减少。

导致上述结果的原因包括:一方面可能是化学氧化反应选择性地脂肪族官能团氧化成 CO 官能团或者水溶性有机酸和 CO₂ 的结果^[28-29];另一方面可能是生物质炭具有较高的吸附能力,抑制了土壤微生物的降解作用^[30],使得土壤黑碳的缩合度增加。

4 结论

对于供试水稻土而言,施用玉米秸秆生物质炭后,表层土壤黑碳含量和其占土壤有机碳的比例随着时间的延长而增加。从元素分析和红外光谱来看,施用小麦秸秆生物质炭后,表层土壤黑碳的 C 元素含量增加,缩合度和芳香性增加,氧化度和脂族性降低,上述规律性随玉米秸秆生物质炭施用年限的延长表现得更加明显。说明施用玉米秸秆生物质炭后,土壤黑碳的芳香性增加,脂肪族链烃含量减少。

参考文献:

- [1] 窦 森,周桂玉,杨翔宇,等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 796-802.
DOU Sen, ZHOU Gui-yu, YANG Xiang-yu, et al. Biochar and its relation to humus carbon in soil: A short review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4): 796-802.
- [2] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms[J]. *Plant Soil*, 2007, 300(1-2): 9-20.
- [3] 窦 森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 2-3.
DOU Sen. Soil organic matter[M]. Beijing: Science Press, 2010: 2-3.
- [4] 于沙沙, 窦 森, 杨靖民. CENTURY 模型在土壤有机碳研究中的应用[J]. 土壤与作物, 2014, 3(1): 10-14.
YU Sha-sha, DOU Sen, YANG Jing-min. Application of century model in the research of soil organic carbon[J]. *Soil and Crop*, 2014, 3(1): 10-14.
- [5] Richard S Q, Karina A M, Christoph G, et al. Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 158: 192-199.
- [6] Tsai W T, Liu S C, Chen H R, et al. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(2): 198-203.
- [7] 李 丽, 陈 旭, 吴 丹, 等. 固定化改性生物质炭模拟吸附水体硝态氮潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 137-143.
LI Li, CHEN Xu, WU Dan, et al. Adsorption of aqueous nitrate-N by immobilized modified biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 137-143.
- [8] 张阿凤, 程 琨, 潘根兴, 等. 秸秆生物黑炭农业应用的固碳减排计量方法学探讨[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1811-1815.
ZHANG A-feng, CHENG Kun, PAN Gen-xing, et al. An approach for measurement the carbon sequestration and mitigation of straw biochar amendment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1811-1815.
- [9] Barrow C J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture[J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 21-28.
- [10] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105-112.
- [11] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 9: 1768-1778.
- [12] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153-160.
- [13] Ascough P L. Hydropyrolysis as a new tool for radiocarbon pretreatment and the quantification of black carbon[J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(2): 140-147.
- [14] Dou S, Zhang J J, Li K. Effect of organic matter applications on ¹³C-NMR spectra of humic acids of soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(3): 532-539.
- [15] Lim B, Cachier H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous Tertiary clays[J]. *Chemical Geology*, 1996, 131(1-4): 143-154.
- [16] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984: 231-234.
WEN Qi-xiao. The study of soil organic matter[M]. Beijing: Agricultural Press, 1984: 231-234.
- [17] 周桂玉, 窦 森, 刘世杰. 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[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075-2080.
ZHOU Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. 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.
- [18] Lair D A, Fleming P, Davis D D. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4): 443-449.
- [19] Kwapinski W, Byrne C M P, Kryachko E, et al. Biochar from biomass and waste[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2010, 1(2): 177-189.
- [20] 胡学玉, 易 卿, 禹红红. 土壤生态系统中黑碳研究的几个关键问题[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 153-158.

- HU Xue-yu, YI Qing, YU Hong-hong. Several key issues related to black carbon in soil ecosystems[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 153-158.
- [21] 雷雨雨, 辛颖, 赵雨森, 等. 重度火烧对大兴安岭天然林土壤有机碳和黑碳的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(11): 103-106.
- LEI Yu-yu, XIN Ying, ZHAO Yu-sen, et al. Impact of severe burning on soil organic carbon and black carbon content in natural forest of Daxing'an[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(11): 103-106.
- [22] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 662-665.
- ZHANG Lü-qin, ZHANG Ming-kui. Effects of land use on particulate organic carbon and black carbon accumulation in red and yellow soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 662-665.
- [23] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils[J]. *Geoderma*, 2007, 139(1-2): 220-228.
- [24] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 177-182.
- HE Yue, ZHANG Gan-lin. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 177-182.
- [25] 杨敏. 水稻秸秆生物质炭在稻田土壤中的稳定性及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- YANG Min. Stability of rice straw-derived biochar and its mechanism in paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [26] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Stability of biomass-derived black carbon in soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(24): 6069-6078.
- [27] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1795-1799.
- HUA Li, JIN Su-su, LUO Jing-jing. Effect of biochar on the micro-environment characteristics and humus in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11): 1795-1799.
- [28] Cody G D, Alexander C M O D. NMR studies of chemical structural variation of insoluble organic matter from different carbonaceous chondrite groups[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(4): 1085-1097.
- [29] Nguyen B T, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil[J]. *Biogeochemistry*, 2009, 92(1/2): 163-176.
- [30] Wang H L, Lin K D, Hou Z N, et al. Sorption of the herbicide terbutylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(2): 283-289.

欢迎订阅 2016 年《农业资源与环境学报》

《农业资源与环境学报》(原《农业环境与发展》)创刊于 1984 年,由农业部主管、农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的国家级学术期刊,被评为中国科技核心期刊、天津市优秀期刊。本刊被美国乌利希期刊指南、化学文摘(CA)、国际农业与生物科学中心(CABI)、EBSCO、中国学术文摘数据库核心版(CSAD)等重要数据库收录。

作为与一级学科“农业资源与环境”对应的学报,《农业资源与环境学报》(Journal of Agricultural Resources and Environment)主要刊登土壤、水、养分及生物质等自然资源的高效利用及生态环境保护方面的研究论文。所设栏目:

- | | |
|---------|--------------|
| 一、战略与综述 | 六、产地环境与农产品安全 |
| 二、土地资源 | 七、生态农业 |
| 三、养分资源 | 八、生物多样性保护 |
| 四、水资源 | 九、乡村环境 |
| 五、生物质资源 | 十、检测分析方法 |

《农业资源与环境学报》为双月刊,大 16 开,96 页,逢单月 10 日出版,每册定价 30.00 元,全年 180.00 元。国际标准刊号:ISSN 2095-6819,国内统一刊号:CN 12-1437/S,国内外公开发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号:6-40,国外发行代号:BM3272。有漏订者可直接与编辑部联系订订。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮政编码:300191

电话:022-23611149

传真:022-23674336

电子信箱:caed@vip.163.com

网址:www.aed.org.cn

银行:中国农业银行天津滨水西道支行

户名:农业部环境保护科研监测所

帐号:02-190101040001154

纳税人识别号:120104401229113