

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.030

不同灰分生物质炭对红壤理化特性与微生物特性的影响

简秀梅^{1,2} 陈学濡² 刘富豪² 杜衍红³ 付小燕⁴ 蒋恩臣^{1,2}

(1. 华南农业大学生物基材料与能源教育部重点实验室, 广州 510640; 2. 华南农业大学材料与能源学院, 广州 510640; 3. 广东省生态环境技术研究所广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650; 4. 广州市番禺区农产品质量监测所, 广州 511400)

摘要: 为探讨不同灰分含量的生物质炭对酸性红壤特性和微生物特性的协同影响, 采用盆栽试验, 添加1%~10%土壤质量的高灰分稻壳炭(RHC)和低灰分油茶壳炭(COSC), 以无添加为对照, 50 d后测定土壤含水率、pH值和土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量, 以及土壤微生物群落数量、微生物量碳含量和微生物活性。结果表明, 添加1%~10%的RHC和COSC, 土壤含水率由15.54%增加至17.47%~28.28%, pH值由5.40提高至7.05~7.75, 其中, 10%RHC处理土壤的含水率显著($p < 0.05$)提高81.98%, pH值显著提高43.52%。酸性红壤的营养元素随RHC添加量的增加而提高, 10%RHC处理土壤的碱解氮、速效磷、速效钾含量分别显著增加84.83%、70.47%和595.57%, COSC添加对土壤碱解氮含量有负相关影响, 使其降低14.65%~29.27%。微生物群落数量随RHC、COSC添加量的增加呈现先增大、后减小的趋势, 5%RHC处理对细菌、真菌、放线菌数量影响显著, 分别增长了1040.05%、715.00%和713.59%; 5%COSC处理对土壤真菌数量影响显著, 增长了1265.00%。土壤微生物生物量碳含量和微生物活性均随RHC和COSC添加量的增加呈先升高、后降低的趋势, 5%COSC处理对微生物生物量碳含量影响显著, 较对照组增长了11倍, 5%RHC处理对微生物活性影响显著, 较对照组增加了60.50%。因此, 适量添加高灰分稻壳炭改良红壤, 可协同改良土壤理化特性、增加微生物群落数量和微生物活性。本研究结果可为高灰分生物质炭改良酸性土壤提供科学依据。

关键词: 红壤; 生物质炭; 理化特性; 微生物特性; 高灰分; 含氧官能团

中图分类号: S156.6; X172

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)06-0282-10

OSID:



Effects of Biochars with Various Ash Contents on Physicochemical Properties and Microbial Community Quantity and Activity in Red Soils

JIAN Xiumei^{1,2} CHEN Xueru² LIU Fuhao² DU Yanhong³ FU Xiaoyan⁴ JIANG Enchen^{1,2}

(1. Key Laboratory for Biobased Materials and Energy, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China 2. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China 3. Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-environmental Science and Technology, Guangzhou 510650, China 4. Guangzhou Panyu Institute of Agricultural Products Quality Supervision and Testing, Guangzhou 511400, China)

Abstract: The synergistic effects of biochar properties on soil properties and biota have received much less attention than their effects on soil chemical properties. To investigate how biochar properties and addition amount affecting physicochemical properties and the quantity and activity of microbial in acid red soils, acid red soils (pH value 5.40) were incubated for 50 days by adding different rates (1%~10%) of ash-rich rice husk biochar (RHC) and ash-low *Camellia oleifera* shell biochar (COSC) pyrolyzed at 500°C. The results showed that compared with COSC (3.80% ash content, 0.22 O/C), RHC remained higher ash content (30.69%), greater O/C molar ratio (0.63) and more oxygen functional groups (C-P-O). With the addition of RHC and COSC, soil moisture contents were increased to 17.47%~28.28%, also the pH value was improved to 7.05~7.75. Additionally, 10% RHC treatment significantly increased ($p < 0.05$) soil moisture content and the pH value by 81.98% and 43.52%,

收稿日期: 2020-02-29 修回日期: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21606093)和广东省自然科学基金项目(2018A030310490)

作者简介: 简秀梅(1977—),女,讲师,博士,主要从事农业生物环境与能源工程研究, E-mail: silkcotton@scau.edu.cn

通信作者: 蒋恩臣(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事生物质能利用工程研究, E-mail: ecjiang@scau.edu.cn

respectively. The nutrient elements of acid red soil was increased with the increase of RHC content, and with the addition of 10% RHC treatment, alkali hydrolyzed N, available P and available K in soil were increased by 84.83%, 70.47% and 595.57%, respectively. The 5% and 10% addition of COSC both had a negative correlation effect on the alkali hydrolyzed N content, which was decreased by 14.65% ~ 29.27%, respectively. RHC and COSC both had a positive effect on the quantity of soil microbial communities, and the abundance of microbial was grown first and then dropped with the increase of amount of biochar. 5% RHC had a significant influence on the quantity of bacteria and actinomycetes, which were increased by 1 040.05% and 713.59%, respectively. However, 5% COSC had a significant effect on the quantity of soil fungi, as increased by 1 265.00%. RHC and COSC treatment both had a positive influence on soil microbial biomass carbon (MBC) content and microbial activity, which were increased first and then decreased with the increment of biochar addition. Compared with the CK, 5% COSC treatment had significantly increased 11 times of MBC content, and 5% RHC treatment significantly increased the microbial activity by 60.50%. Therefore, adding ash-rich rice husk biochar to amend the red soil may improve the physiochemical properties of soil and increase the quantity and activity of microbial community. The results would provide scientific basis for improving acid soil with ash-rich biochar.

Key words: red soil; biochar; physiochemical properties; microbial properties; rich ash; oxygen functional group

0 引言

红壤是华南地区典型的土壤类型之一,是一种缺乏碱金属和碱土金属而富含铁、铝氧化物,呈酸性红色的土壤。红壤质地粘重,易板结、易干旱。由于红壤不合理开发利用造成了水土流失、土壤退化、土壤污染,因此改善红壤的持水能力、肥力和土壤微生物环境,对于提高红壤的农业产出具有重要意义^[1-2]。

生物质炭是生物质在一定温度和厌氧条件下经过热解作用后形成的一种比表面积大、富含碳的有机物质。生物质炭可通过自身理化特性影响土壤理化特性,同时又影响土壤微生物活性和微生物群落结构^[3]。生物质炭作为一种土壤理化特性改良剂,已经在农作物和植物生产、温室气体减排和污染物修复方面进行了试验。研究表明,适当使用生物质炭作为土壤改良剂,可以保持和增加土壤水分和养分,减少土壤温室气体的排放,释放可溶性C和提高微量营养素的有效性,提高酸性土壤的pH值,促进植物生长,增加各种土壤的作物产量^[4-6]。同时,土壤微生物在维持土壤功能方面起着重要作用,具有分解、养分循环、生物修复、维持土壤有机质稳定和促进土壤团聚体形成的功能,因而可改善土壤的物理和化学性质。生物质炭虽然含有大量惰性物质,但其高表面积、多孔性和吸附可溶性营养物质的能力可以为微生物的生存和繁殖提供场所和能源物质^[7]。但生物质炭对土壤微生物也有一些负面影响。研究表明,生物质炭对土壤生物群落,包括土壤弹尾虫和蚯蚓,具有生态毒性^[8]。因此,研究添加

生物质炭肥料对土壤理化特性、微生物特性的协同影响,可为作物生产的土壤健康评估提供参考^[9]。

生物质炭来源广泛,且性质各异,施用量与土壤环境条件也各不相同,这使得生物质炭施加对土壤理化特性和土壤微生物特性有不同的影响。当使用不同类型的原料或不同热解条件下生产时,生物质炭的特性通常会发生变化^[10-11]。与农林生物质相比,非农林生物质(生活污水、畜禽粪便)含有高灰分,产生的生物质炭在土壤中保留氮的能力更强^[12]。高温热解(大于400℃)产生孔隙度丰富的生物质炭,可促进植物根系在坚硬土壤中的生长,还可以为多种微生物的生长提供栖息地,最终提高作物产量^[13];低温热解(小于400℃)产生的低比表面积生物质炭物理吸附作用较低,但是保留了用作阳离子交换的表面官能团,促进了化学吸附。生物质炭粒径影响土壤特性和微生物群落结构^[14],粒径2 mm生物质炭比粒径小于0.42 mm生物质炭更稳定,而粒径小于0.25 mm生物质炭的矿化率高于粒径大于0.25 mm生物质炭。生物质炭的施用量与土壤微生物特性有相关关系。LIAO等^[15]研究发现,与较低的施用量(2.25 t/hm²)及对照组相比,较高的棉花秸秆生物质炭施用量(4.5 t/hm²)可提高微生物群落组成、土壤微生物生物量、C底物利用率和与C、N转化相关的酶活性。NAN等^[16]研究发现,连续4年施用较低施用量(2.8 t/hm²)的稻壳炭,也可显著提高水稻产量,这主要由于稻壳生物质炭具备独特的表面官能团,导致土壤钾、镁含量增加,同时由于稻壳炭自身难降解固定碳,改善了土壤细菌间的协同关系,因而促进水稻产量的增加。在

不同肥力和酸碱性土壤改良中,不同生物质炭的改良效应与生物质炭特性相关。低肥力酸性土壤中,低温热解的麦秸对土壤的氮、磷和钾的有效性具有显著促进作用^[17];在碱性土壤改良研究中,低温热解(300℃)畜禽粪便生物质炭的施用能提高植物氮、磷、钾营养,但降低了植物有效铁(Fe)、锌(Zn)、铜(Cu)和锰(Mn)的浓度^[18]。因此,在生物质炭用作土壤改良剂之前,掌握生物质炭理化特性对土壤理化特性和微生物特性的正激发效应、负激发效应很有必要^[19]。

在改善土壤功能时,必须考虑在土壤中添加适当和适量的生物质炭。近年来,生物质炭在农业领域的应用研究广泛,但目前研究较多的是生物质炭优异的理化性质(高孔隙率、比表面积大、结构稳定)对土壤的改良,而对生物质炭的营养特性关注较少^[20]。生物质炭的营养效应指生物质在热解过程中保留并浓缩了生物质多种微量元素^[21],即生物质炭的灰分。生物质炭灰分含量(质量分数)在0.3%~92.4%之间,生物质炭中灰分含量最高的是生活污水和动物粪便,而以草本饲料为原料的生物质炭灰分含量最低^[22]。富营养灰分和多孔碳结构的生物质炭具有改善土壤质量的潜力^[23]。

本研究通过室内盆栽试验阐明高灰分和低灰分生物质炭在改良酸性红壤中的作用,评价高灰分和低灰分生物质炭的理化特性,研究不同添加量、不同灰分含量的生物质炭对土壤理化特性的影响,探究高灰分和低灰分生物质炭对土壤微生物群落数量、微生物生物量碳含量和微生物活性的影响,从而阐述生物质炭的理化特性对酸性土壤理化特性和微生物特性的协同影响,探讨高灰分生物质炭作为酸性红壤改良剂的潜在机制。

1 材料与方法

1.1 生物质炭制备及土壤试验

分别以稻壳和油茶壳作为原料,于70℃干燥箱干燥24 h,在无氧状态下炭化炉从室温(20℃)升温至500℃热解并保温1 h,断开电源后,生物质炭随炭化炉冷却至室温。所制备的生物质炭研磨,过0.425 mm筛(40目)备用。

试验土壤为采自湛江甘蔗种植基地的红壤,使用五点采样法采集0~15 cm深度的表层土壤,采集后风干,并去除植物幼根等残留生物质,研磨后过2 mm筛(10目)备用。试验土壤的pH值为5.4,碱解氮质量比为38.9 mg/kg,速效磷质量比为19.3 mg/kg,速效钾质量比为79.2 mg/kg。

所有处理的土壤添加量均为5 kg,生物质炭与土壤的质量百分比分别为0(对照CK)、1%、2%、3%、5%和10%,炭土混合后放置于塑料盆,各处理设2次重复。培养期间每隔7 d定期称量补水至盆中土壤含水率为28%,相当于75%田间持水率^[24]。生物质炭处理土壤50 d后,测定土壤的理化性质、土壤微生物群落数量、微生物生物量碳含量和微生物活性。生物质炭处理土壤样品命名:前缀数字代表炭土比例,中间字母COS(*Camellia oleifera* shell)及RH(Rice husk)分别代表油茶壳和稻壳,最后字母C(Char)代表生物质炭样品,如5% COSC代表炭土比为5%的油茶壳炭样品。

1.2 生物质炭表征

采用NETZSCH STA449C型综合热分析仪进行生物质原料的热重分析(TG-DTG)。生物质炭pH值的测定采用固水比为1:20,150 r/min搅拌5 min,用Mettler-Toledo型pH计测定上清液。使用工业分析仪测试生物质炭的水分、灰分、挥发分含量,采用差减法计算固定碳含量^[25]。采用干燃烧法于Perking Elmer 2400系列II型CHNS分析仪测定生物质炭的元素组成(CHNS),采用差减法计算氧元素含量。采用ASAP2000型全自动物理吸附仪测试生物质炭的比表面积和孔径分布。采用BRUKER TENSOR II型傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)测定生物质炭有机官能团。

1.3 土壤理化性质和微生物特性测试

土壤理化性质测定方法:土壤的含水率测试采用新鲜土壤于105℃干燥箱干燥6~8 h至质量恒定,然后测定其含水率。土壤的pH值测试采用pH计测试土水比为10:25的悬浊液(搅拌5 min,静止30 min)。碱解氮含量采用碱解扩散法,速效磷含量采用盐酸氟化铵浸提-钼锑抗比色法,速效钾含量采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法^[26]。

土壤微生物特性测试方法:土壤微生物菌落(细菌、真菌和放线菌)数量测试采用平板梯度稀释法^[27],其中细菌培养基为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌培养基为马丁氏培养基,放线菌培养基为高氏一号琼脂培养基,并分别进行微生物的分离和计数,计算每克干土中的微生物数量(CFU/g)。土壤微生物的生物量碳(MBC)含量测试使用精氨酸诱导氨化法^[28],向土壤加入一定量的精氨酸水溶液,培养4 h后,通过紫外分光光度计测定土壤中铵态氮含量来计算土壤微生物的生物量。土壤微生物活性的测定使用密闭培养呼吸法^[29]和碱液法^[30]。利用一定浓度的NaOH溶液吸收由土壤微生物呼吸作用所释放出的CO₂,然后用标准HCl溶液滴定剩余

的 NaOH 量,再根据 NaOH 溶液的消耗量,计算 CO₂ 的释放量即微生物呼吸作用强度。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 和 Origin 9.0 软件对数据进行处理及绘图;采用 SPSS 22.0 统计分析软件对土壤理化性质、土壤微生物群落数量、生物量碳含量和微生物活性进行统计学分析。多组平均数比较采用单因素方差分析(ANOVA),组间两两比较采用最小显著性差异法(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 原料及生物质炭表征

2.1.1 热重(TG-DTG)分析

稻壳和油茶壳的热重谱图(TG)和微分热重谱图(DTG)如图1所示。稻壳和油茶壳的热分解主要发生在180~500℃之间,在900℃最终温度下的质量分数分别为33.00%和22.72%(图1a)。此外,稻壳的灰分含量较高,在900℃时最终质量损失较小,油茶壳的挥发分含量较高,在900℃时最终质量损失较大。由图1b可知,4个特定的温度间隔分别为4个质量损失区域^[31]:区域I温度范围为40~210℃,指的是稻壳和油茶壳在105℃下相对于最终干基的质量损失;区域II温度范围为210~420℃,这是指碳水化合物和烷基不稳定体系的热转化导致的最大挥发分,代表了生物质原料的典型热解降解曲线,稻壳和油茶壳原料都具有相同的特征;区域III包括芳香族部分热转变的间隔(420~570℃);区域IV在570~800℃之间,是由于矿物和生物盐如钙和碳酸钾的降解。两种原料均没有出现区域III和区域IV的明显质量转变。根据TG-DTG结果分析,稻壳和油茶壳原料是碳水化合物和烷基的复杂混合物,适宜的热解温度为500℃。

2.1.2 理化特性分析

生物质炭的工业分析、元素分析、pH值和比表面积如表1所示。油茶壳炭的挥发分含量较高,而稻壳炭的灰分含量较高,表明500℃油茶壳炭的易热解挥发的有机质比500℃稻壳炭多,而500℃稻壳

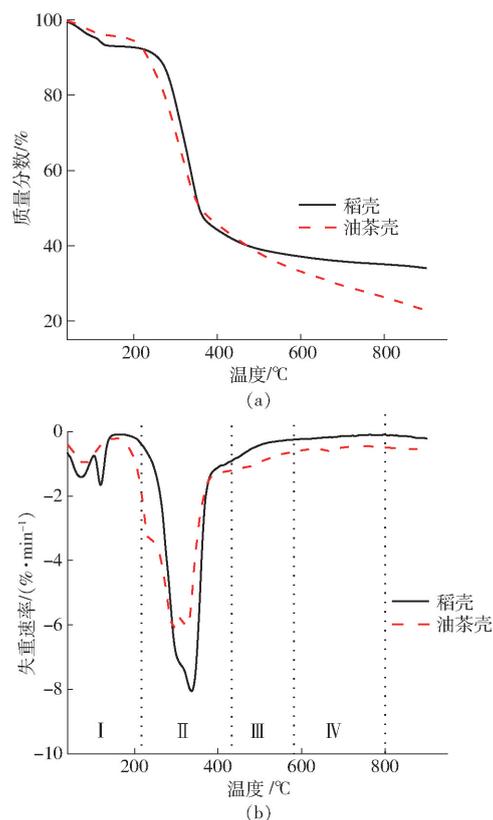


图1 稻壳与油茶壳原料的热重分析

Fig. 1 Thermograms (TG) and the first derivatives of thermograms (DTG) for biomass

炭含有更多的矿物质元素。H/C可作为碳化或芳香度的一个参数,H/C低表明生物质炭碳化程度和芳香度高^[32];O/C可作为生物质炭稳定性的重要指标^[33],O/C高表明生物质炭含有更多的羟基、羧基和羰基等含氧官能团;C/N可表征难降解碳化合物含量^[3]。元素分析结果表明,稻壳炭与油茶壳炭相比较,稻壳炭具有较低的H/C和C/N,较高的O/C,表明稻壳炭碳化程度高,同时含有更多的含氧官能团,但含有较少的难降解碳化合物。稻壳炭与油茶壳炭的pH值均在9.0以上,呈碱性。高温热解制备的生物质炭中碱性物质主要以碳酸盐形态存在,低温制备生物质炭的碱性则由生物质炭含有的—COOH和—OH决定。而稻壳炭的比表面积约是油茶壳炭的3倍,与其碳化程度高相一致。

表1 稻壳炭与油茶壳炭的理化特性

Tab. 1 Characteristics of rice husk biochar (RHC) and *Camellia oleifera* shell biochar (COSC)

生物质炭	质量	灰分质	挥发分	固定碳	C	H	N	S	O	H/C比	O/C比	C/N比	pH值	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)
	含水率/ %	量分数/ %	质量分 数/%	质量分 数/%	质量 分数/%	质量 分数/%	质量 分数/%	质量 分数/%	质量 分数/%					
稻壳炭	4.17	30.69	14.30	50.84	52.60	1.72	0.98	0.34	44.36	0.39	0.63	62.92	9.50	6.64
油茶壳炭	5.97	3.80	23.39	66.84	73.98	2.77	1.18	0.60	21.47	0.45	0.22	73.14	9.20	2.04

2.1.3 氮气吸附特性与孔径分布分析

图2为稻壳炭和油茶壳炭的氮气吸附-脱附等

温线和孔径分布图。由图2a可知,根据IUPAC分类样品^[34],在压力范围内,稻壳炭的吸附-脱附等温

线可归为Ⅲ型等温线,这表明了稻壳炭存在大量的介孔以及少部分的大孔,且在压力区域存在有H4型洄滞环,样品含有狭窄裂隙孔。油茶壳炭的氮气吸附-脱附等温线在压力范围内无明显吸附量的增加,分析原因可能是由其内部的孔隙结构不发达,所含介孔、大孔较少导致。由图2b可知,稻壳炭于4~6 nm处存在大量介孔,且内部孔隙主要存在于3~40 nm范围内,与其氮气吸附-脱附等温线表现一致。油茶壳炭不含微孔,所含介孔与大孔数量很少,与其氮气吸附-脱附等温线表现一致。

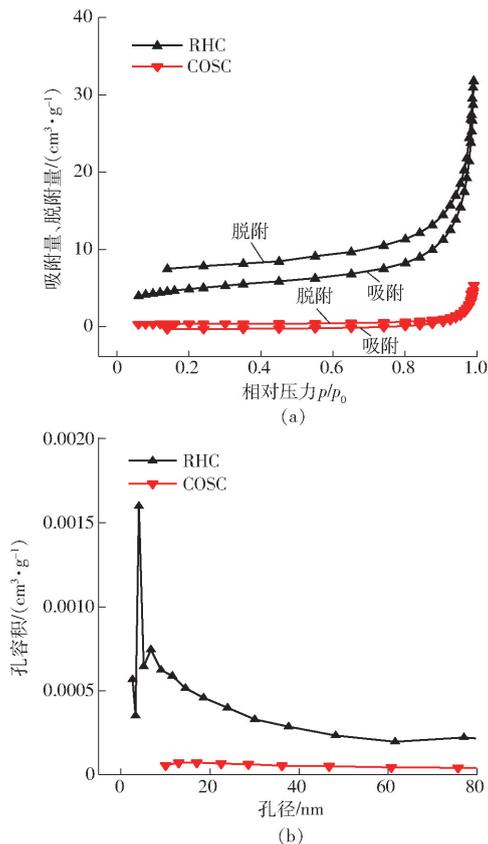


图2 稻壳炭与油茶壳炭的氮气吸附-脱附等温线和孔径分布图

Fig.2 Nitrogen adsorption - desorption isotherms and pore size distributions of RHC and COSC

2.1.4 红外光谱 (FTIR) 分析

稻壳炭和油茶壳炭的红外光谱曲线如图3所示。稻壳炭和油茶壳炭在 $3100 \sim 3750 \text{ cm}^{-1}$ 之间均有两处羟基(OH)伸缩振动吸收峰,醇类和酚类的游离羟基在 $3600 \sim 3650 \text{ cm}^{-1}$ 之间出现,而在 $3200 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 之间是氢键结合的缔合羟基宽峰。稻壳炭在 3050 cm^{-1} 处有芳香烃的C—H伸缩振动吸收峰^[6]。稻壳炭和油茶壳炭在 $1300 \sim 1900 \text{ cm}^{-1}$ 范围内,均出现酸酐C=O的吸收峰(1875 cm^{-1})和酰胺I带C=N的吸收峰($1600 \sim 1700 \text{ cm}^{-1}$),芳香烃C=C的吸收峰(1600 cm^{-1})和酚醛O—H的吸收峰(1394 cm^{-1})^[35]。稻壳炭在 $850 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 范围

内, 1088 cm^{-1} 处出现一个尖锐的P—O—C伸缩振动峰^[36],而 875 cm^{-1} 处出现芳香烃C—H弯曲振动吸收峰,而油茶壳炭在这个波长范围内没有明显的吸收峰。羟基磷灰石和其他磷矿物标准品的红外光谱特征峰位于 $1030 \sim 1130 \text{ cm}^{-1}$ 之间,红外光谱结果表明稻壳炭含有丰富的含氧官能团和矿物质元素。

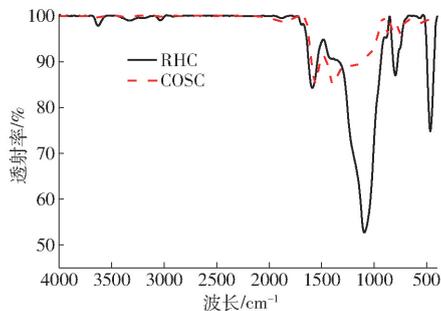


图3 稻壳炭和油茶壳炭的红外光谱图

Fig.3 FTIR spectra of RHC and COSC

2.2 生物质炭对土壤理化特性的影响

2.2.1 对土壤含水率的影响

不同添加量的稻壳炭(RHC)与油茶壳炭(COSC)对土壤含水率的影响如图4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。添加少量RHC(1%~5%)对土壤含水率(17.47%~18.93%)影响不显著,但添加10%RHC的土壤含水率较对照组显著($p < 0.05$)增加至28.28%。生物质炭表征结果表明,RHC含有高的O/C比,保留脂肪族疏水官能团,因而可被水取代,生物质炭的亲水性和持水能力增强^[33]。而油茶壳炭添加量增加,则使土壤含水率呈现逐渐下降趋势。

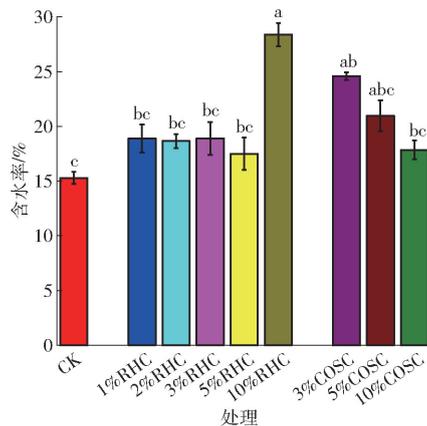


图4 不同添加量稻壳炭与油茶壳炭对土壤含水率的影响

Fig.4 Effect of different adding rates of RHC and COSC on soil water content

2.2.2 对土壤pH值的影响

不同添加量的稻壳炭(RHC)和油茶壳炭(COSC)对土壤pH值的影响如图5所示。不同添加

量的两种生物质炭的处理均降低了土壤酸度(即土壤pH值上升),且pH值与生物质炭添加量呈正向关系,其中增幅最大的是10%RHC与10%COOSC处

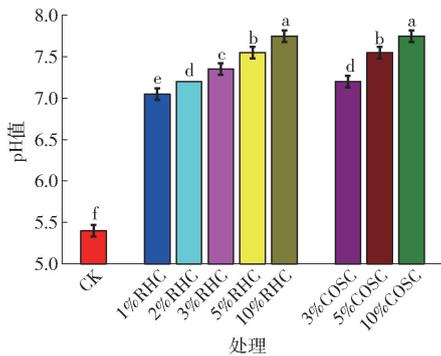


图5 不同添加量稻壳炭与油茶壳炭对土壤pH值的影响

Fig. 5 Effect of different adding rates of RHC and COSC on soil pH value

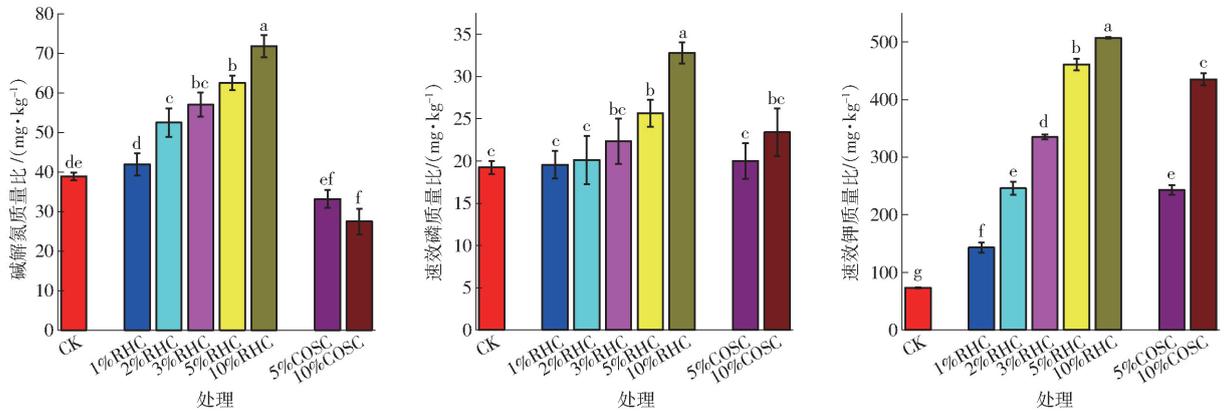


图6 不同添加量稻壳炭与油茶壳炭对土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量的影响

Fig. 6 Effect of different adding rates of RHC and COSC on contents of alkaline nitrogen, available phosphorus and available potassium

2.3 生物质炭对土壤微生物特性的影响

2.3.1 对土壤微生物群落数量的影响

不同添加量的稻壳炭(RHC)和油茶壳炭(COSC)对土壤微生物群落数量的影响如图7所示。不同添加量的生物质炭(1%~10%)对土壤微生物的细菌、真菌、放线菌数量均有正向关系。尤其,添

理,pH值由对照土壤的5.40均增加至7.75。

2.2.3 对土壤养分的影响

不同添加量的稻壳炭(RHC)和油茶壳炭(COSC)对土壤养分的影响如图6所示。土壤中的碱解氮、速效磷、速效钾含量与稻壳炭的添加量呈正向关系,而速效钾含量的提高最为显著。添加10%RHC使土壤速效钾质量比由对照组的72.89 mg/kg,增加到507.00 mg/kg,增幅达6倍,土壤碱解氮质量比比空白对照组增加了84.83%。但速效磷质量比的增幅较为平缓,10%RHC土壤的速效磷质量比为32.90 mg/kg,比空白对照组增加了70.47%。油茶壳炭施加对土壤的碱解氮有负相关影响,5%和10%的添加量均使土壤碱解氮含量低于对照组,分别下降了14.65%和29.27%,而对土壤的速效磷、速效钾含量有正相关影响。

加5%RHC在同类型稻壳炭中影响显著,使细菌、真菌、放线菌的数量较对照土壤的 4.07×10^5 、 2×10^3 、 6.33×10^5 CFU/g分别提高到 4.64×10^6 、 1.6×10^4 、 5.15×10^6 CFU/g,分别增长了1040.05%、715.00%和713.59%。添加5%COOSC为同类型油茶壳炭中影响最显著,使细菌、真菌、放线菌的数量

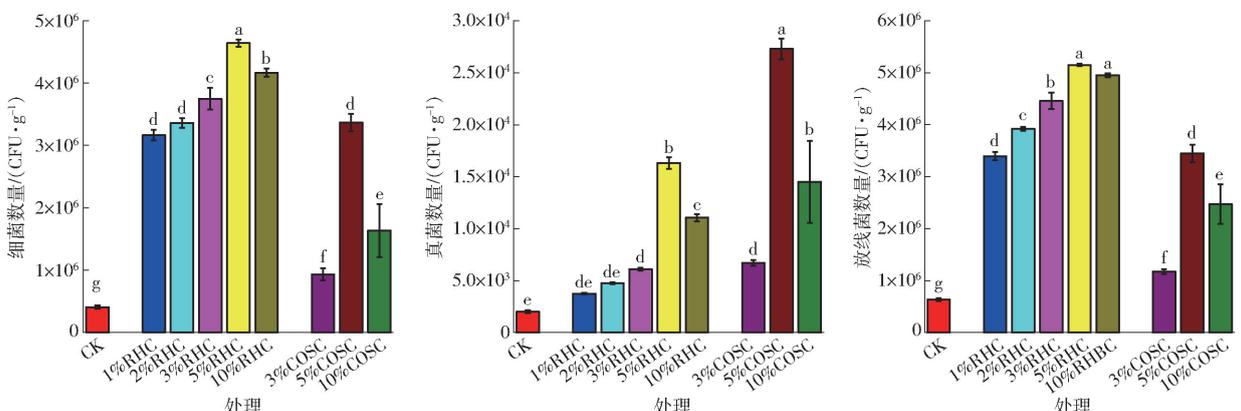


图7 不同添加量稻壳炭与油茶壳炭对土壤细菌、真菌、放线菌数量的影响

Fig. 7 Effect of different adding rates of RHC and COSC on soil bacterial quantity, fungi quantity and actinomycetes quantity

较对照土壤分别提高到 3.367×10^6 、 2.7×10^4 、 3.45×10^6 CFU/g, 较对照组分别增长了 727.27%、1 265.00% 和 445.02%。

2.3.2 对土壤微生物生物量碳的影响

不同添加量的稻壳炭 (RHC) 和油茶壳炭 (COSC) 对土壤微生物生物量碳含量的影响如图 8 所示。微生物生物量碳是表示土壤生物肥力的一项重要标志, 同时也是土壤有机质中最活跃的部分。不同添加量的稻壳炭和油茶壳炭均有效增加土壤微生物生物量碳含量, 这可能因为生物质炭巨大的比表面积及疏松多孔的结构, 改善了土壤孔隙度, 提高土壤团聚体稳定性, 协调土壤水、肥、气、热的平衡, 为微生物的生长繁殖提供了良好的生存条件。同时稻壳炭对土壤微生物生物量碳含量的增幅仅为 12.50% ~ 87.50%, 而不同添加量的油茶壳炭对土壤微生物生物量碳含量的影响显著, 5% COSC 处理的土壤微生物生物量碳含量较对照组增长了 11 倍。

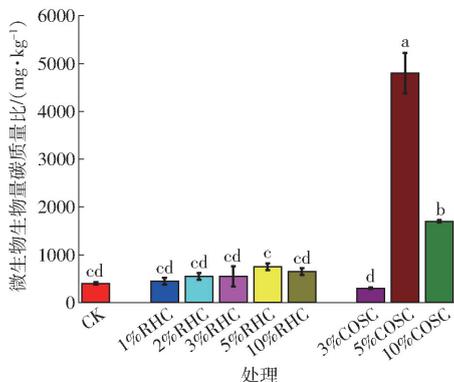


图 8 不同添加量稻壳炭与油茶壳炭对土壤微生物生物量碳含量的影响

Fig. 8 Effect of different adding rates of RHC and COSC on microbial biomass carbon content

2.3.3 对土壤微生物活性的影响

土壤呼吸强度是土壤微生物活性的重要标志, 因而土壤微生物活性可用土壤呼吸的 CO_2 浓度表征。不同添加量的稻壳炭 (RHC) 和油茶壳炭 (COSC) 对土壤 CO_2 浓度的影响如图 9 所示。土壤 CO_2 浓度随着生物质炭添加量的增加先提高后降低, 5% RHC 和 5% COSC 处理的土壤比空白对照组分别增加了 60.50% 和 40.71%, 稻壳炭处理土壤的微生物活性较油茶壳炭处理更高。结果表明, 由于稻壳炭 O/C 比高, 含氧官能团 (如羟基、羧基和羰基) 被保留, 稳定性差, 矿化速率高, 可以增加根际微生物生物量碳含量和微生物活性^[5]。因而, 生物质炭对土壤微生物活性的影响应取决于生物质炭的添加比例、施用生物质炭中营养物质的含量以及土壤中可利用无机营养物质的含量。

同时, 不同添加量和不同原料的生物质炭对土

壤微生物活性的影响, 没有对土壤微生物菌落的影响明显。然而, 土壤微生物群落总活性作为测定微生物呼吸作用的指标, 可用于监测生物质炭处理土壤后 pH 值对细菌、真菌和放线菌的影响^[37]。

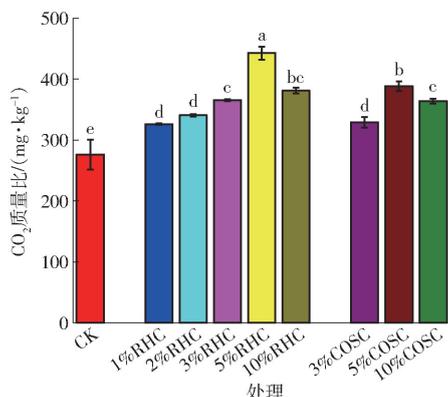


图 9 不同添加量稻壳炭与油茶壳炭对土壤 CO_2 含量的影响

Fig. 9 Effect of different adding rates of RHC and COSC on soil CO_2 content

3 讨论

3.1 生物质炭对土壤理化特性的影响

施加低添加量的 COSC, 能降低土壤的板结性, 增加土壤持水能力。但施加大量的 COSC, 因为油茶壳炭亲水性的含氧官能团较少和孔隙不发达, 过量添加使土壤团聚性下降, 因而土壤亲水性下降, 降低土壤持水能力。

不同添加量的稻壳炭 (RHC) 和油茶壳炭 (COSC) 对土壤 pH 值的影响表明, 两种生物质炭处理的 pH 值增加幅度相同, 与稻壳炭和油茶壳炭的 pH 值差异性关系不大。同时, 生物质炭处理酸性土壤后使土壤酸度降低, 增加了土壤 pH 值和 Ca 含量, 降低了交换 Al 含量, 从而改善了土壤微生物的生存环境^[38], 因而生物质炭改善土壤理化特性, 协同影响了土壤微生物特性。

添加高灰分稻壳炭能显著提高土壤必要的植物养分含量, 如 Ca、K、Mg 和 P, 尤其是 K 含量^[29]。因而, 含有丰富水溶性矿质元素的高灰分稻壳炭, 能直接提高耕作土壤中的营养元素总量和作物可利用态含量^[39], 可以作为速效钾肥使用^[40]。然而, 添加油茶壳炭可能增加了土壤的阳离子交换量, 对于吸附带正电的铵根离子产生积极作用, 从而降低土壤的碱解氮含量, 因此在施加氮肥时要注意参考耕地生物炭种类及添加量, 以减少养分损失, 提高农业生产资料的利用效率。

3.2 生物质炭对土壤微生物特性的影响

生物质炭对土壤微生物群落的影响有 3 方面:

微生物数量、微生物生物量碳含量和微生物活性。

两种生物质炭对微生物群落数量的影响,均为先促进后抑制,表明了对于土壤微生物而言,生物质炭的添加量有一个合适范围,添加量超过合适范围,对土壤微生物的生长呈现抑制作用。其原因可能归结为高浓度碳的添加量提高了土壤中无机盐的浓度,导致渗透压发生变化,影响微生物的正常生长。

同时,稻壳炭和油茶壳炭处理的土壤中细菌与放线菌数量增幅远高于真菌数量。研究表明,生物质炭的 pH 值是生物质炭上生长微生物的重要控制因素之一。适宜细菌生长的 pH 值为 6.5 ~ 7.5,放线菌生长 pH 值为 7.5 ~ 8.0,相反,酸性 pH 值有利于真菌生长^[37, 41]。因而,不同添加量的生物质炭处理后土壤均呈碱性,适宜嗜好碱性环境的细菌与放线菌生长。同时,嗜酸性的真菌数量在生物质炭处理的碱性土壤数量不丰富。结果表明,生物质炭添加对细菌、放线菌和真菌群落结构的变化不一致,在田间条件下,生物质炭改良土壤中动态真菌群落结构少于细菌群落结构^[9]。

稻壳炭处理土壤的微生物群落细菌与放线菌数量比施加油茶壳炭处理的土壤更为丰富,表明施加同等质量的稻壳炭比油茶壳炭更有利于细菌与放线菌的生长。ZHANG 等^[27]研究表明,微生物丰度与生物质炭的 H/C 比、O/C 比呈极显著正相关($p < 0.01$),碳化度高、亲水性低的生物质炭不利于微生物生长。因而,高灰分稻壳炭含有更多的含氧官能团,其官能团可以通过专性吸附作用,有效吸附包括溶解性有机碳在内的易矿化有机碳和 NH_4^+ , 这为微生物提供了丰富的食物来源,进而增加微生物丰度^[42]。同时,生物质炭的孔隙适合容纳微生物,如细菌(0.3 ~ 3 μm)、真菌和放线菌(2 ~ 80 μm),才能作为微生物栖息地和保护区。稻壳炭具有较大表面积和丰富的孔隙(大孔孔径大于 200 nm),促进水和营养物质从大块土壤转移到生物质炭孔隙中,这可能为微生物定植和增加微生物的生长提供了机会^[41]。然而,稻壳炭处理土壤的真菌数量增加不及油茶壳炭处理。稻壳炭改良土壤后,稻壳炭特性中的高含量矿物元素或有机化合物对真菌有直接的负面影响,如高盐或重金属含量,因而真菌的丰度与生物质炭特性有相关关系^[5]。

土壤微生物生物量碳含量随两种生物质炭添加量的增加呈现先增大后减小的趋势。添加生物质炭对土壤微生物生物量碳含量有正激发效应、负激发效应或没有效应。正激发效应的原因,添加适量的生物质炭,生物质炭表面可以吸附大量活性有机碳,成为土壤微生物良好的栖息地,从而促进微生物生

物量碳含量和活性的增加^[43]。负激发效应(没有效应),添加过量的生物质炭,土壤本身有机质中易矿化的可溶性有机碳可扩散并被吸附到生物质炭颗粒的微孔中,这些微孔平均孔径小于大部分土壤微生物,从而阻止微生物进入微孔并矿化可溶性有机碳,因而抑制土壤原有有机碳的分解。研究表明,施加具有较高的微孔孔隙度、比表面积大于 200 m^2/g 的生物质炭有可能对土壤本身有机质的矿化产生负激发效应^[44]。低灰分油茶壳炭具有较高的含碳量,因而适量添加可以提高土壤中微生物量碳含量,为微生物的生长提供长效养分^[45],促进土壤微生物更好地利用土壤养分及更强的分解有机物能力,过量添加生物质炭反而会抑制土壤有机碳的分解。

由于稻壳炭 O/C 比高,表明含氧官能团(如羟基、羧基和羰基)被保留,矿化速率更高,可以增加根际微生物活性^[5]。因而,生物质炭对土壤微生物活性的影响,应取决于生物质炭的添加比例、施用生物质炭中营养物质的含量以及土壤中可利用无机营养物质的含量。

3.3 生物质炭对土壤理化特性和微生物群落的协同影响

生物质炭的高灰分含量有利于提高土壤营养元素^[24],提高土壤中无机盐的浓度,从而提高微生物营养来源,进一步促进土壤微生物的生长。同时,生物质炭的添加丰富了土壤微生物群落数量,而微生物生长推动了土壤养分(如 C、N 和 P)的循环,促进了土壤养分变化,从而增加了作物的养分有效性^[38]。因而,生物质炭对土壤理化特性的直接影响,间接也影响了土壤微生物特性,而生物质炭对土壤微生物特性的直接影响,也可间接影响土壤理化特性。

4 结论

(1) 将 500 $^{\circ}\text{C}$ 热解的稻壳炭(RHC)和油茶壳炭(COSC)进行比较,稻壳炭具有高灰分(30.69%)、低挥发分(14.30%)、低 H/C 和 C/N、高 O/C 和比表面积、较丰富的孔隙,说明稻壳炭的芳香化程度高、孔隙发达,同时含有更多的含氧官能团和较少的难降解碳化合物。

(2) 稻壳炭和油茶壳炭处理均可提高土壤含水率和 pH 值。土壤营养成分随着稻壳炭添加量的增加而增加,碱解氮、速效磷、速效钾含量在稻壳炭添加量为 10% 时达到最大值。土壤细菌、真菌、放线菌数量随稻壳炭和油茶壳炭添加量的增加先增加、后减小,5% RHC 处理对细菌、真菌、放线菌数量影响显著,分别增长了 1 040.05%、715.00% 和

713.59%,5% COSC 处理对土壤真菌数量影响显著,增长了1265.00%。不同添加量稻壳炭和油茶壳炭处理均使土壤微生物生物量碳含量增加、微生物活性增大,增加幅度均随着稻壳炭和油茶壳炭添加量的增加先增大、后减小。5% COSC 处理对微生物生物量碳含量影响显著,比对照组增长了11倍,5% RHC 处理对微生物活性影响显著,增加了

60.50%。

(3)高灰分生物质炭通过自身理化特性影响土壤理化特性,包括土壤 pH 值、含水率、可溶性碳(脂肪碳)的释放、含氧官能团和微量元素的有效性,并影响微生物群落和微生物活性。同时,添加高灰分生物质炭引起的土壤微生物特性的改变又会协同影响土壤理化特性。

参 考 文 献

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7615-7622. ZHAO Qiguo, HUANG Guoqin, MA Yanqin. The problems in red soil ecosystem in Southern of China and its countremeasures [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7615-7622. (in Chinese)
- [2] 杜衍红,蒋恩臣,刘传平,等. 生物质炭对华南典型红壤水分渗透及持水性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2):276-282. DU Yanhong, JIANG Enchen, LIU Chuanping, et al. Effects of biochar application on water infiltration and retention of typical red soil in South China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2):276-282. (in Chinese)
- [3] 周之栋,卜晓莉,吴永波,等. 生物炭对土壤微生物特性影响的研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(6):1-8. ZHOU Zhidong, BU Xiaoli, WU Yongbo, et al. Research advances in biochar effects on soil microbial properties[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2016, 40(6):1-8. (in Chinese)
- [4] WU H, QIN X, WU H, et al. Biochar mediates microbial communities and their metabolic characteristics under continuous monoculture[J]. Chemosphere, 2020, 246:125835.
- [5] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota—a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9):1812-1836.
- [6] JIAN X, UCHIMIYA M, ORLOV A. Particle size- and crystallinity-controlled phosphorus release from biochars[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(6):5343-5351.
- [7] QIAO Y, MIAO S, ZHONG X, et al. The greatest potential benefit of biochar return on bacterial community structure among three maize-straw products after eight-year field experiment in Mollisols[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147:103432.
- [8] YANG X, TSIBART A, NAM H, et al. Effect of gasification biochar application on soil quality: trace metal behavior, microbial community, and soil dissolved organic matter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365:684-694.
- [9] DANGI S, GAO S, DUAN Y, et al. Soil microbial community structure affected by biochar and fertilizer sources[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 150:103452.
- [10] LI S, CHEN G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures[J]. Waste Management, 2018, 78:198-207.
- [11] WANG T, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M, et al. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars[J]. Plant and Soil, 2012, 357(1-2):173-187.
- [12] LI S, BARRETO V, LI R, et al. Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2018, 133:136-146.
- [13] LAGHARI M, NAIDU R, XIAO B, et al. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management—a review[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96(15):4840-4849.
- [14] ZHAO R, WU J, JIANG C, et al. Effects of biochar particle size and concomitant nitrogen fertilization on soil microbial community structure during the maize seedling stage[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27:13095-13104.
- [15] LIAO N, LI Q, ZHANG W, et al. Effects of biochar on soil microbial community composition and activity in drip-irrigated desert soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 72:27-34.
- [16] NAN Q, WANG C, WANG H, et al. Biochar drives microbially-mediated rice production by increasing soil carbon[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387:121680.
- [17] EL-NAGGAR A, LEE S S, RINKLEBE J, et al. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects[J]. Geoderma, 2019, 337:536-554.
- [18] GUNES A, INAL A, TASKIN M B, et al. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil[J]. Soil Use and Management, 2014, 30(2):182-188.
- [19] LI S, WANG S, FAN M, et al. Interactions between biochar and nitrogen impact soil carbon mineralization and the microbial community[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196:104437.
- [20] ZHANG M, RIAZ M, LIU B, et al. Two-year study of biochar: achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717:137286.
- [21] 刀靖东,况帅,李军,等. 生物质灰分还田对烟田土壤理化性质及烟叶质量的影响[J]. 现代农业科技, 2018(24):9-11. DAO Jingdong, KUANG Shuai, LI Jun, et al. The effect of biomass ash on the physical and chemical properties of tobacco soil and tobacco quality[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2018(24):9-11. (in Chinese)

- [22] LI S, HARRIS S, ANANDHI A, et al. Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: a review and data syntheses[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 890–902.
- [23] WANG T, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system[J]. *Plant and Soil*, 2014, 375(1): 61–74.
- [24] 张祥,王典,姜存仓,等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 979–984. ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cuncang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8): 979–984. (in Chinese)
- [25] JIAN X, ZHUANG X, LI B, et al. Comparison of characterization and adsorption of biochars produced from hydrothermal carbonization and pyrolysis[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, 10: 27–35.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999:146–193.
- [27] ZHANG G, GUO X, ZHU Y, et al. The effects of different biochars on microbial quantity, microbial community shift, enzyme activity, and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. *Geoderma*, 2018, 328: 100–108.
- [28] 林启美. 土壤微生物生物量测定的简单方法——精氨酸氨化分析[J]. *生态学报*, 1999, 19(1): 82–85. LIN Qimei. Arginine ammonification as a simple method for measuring soil microbial biomass [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 82–85. (in Chinese)
- [29] DEENIK J L, TAI M C, UEHARA G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4): 1259–1270.
- [30] 陶朋闯,陈效民,靳泽文,等. 生物质炭长期施用对旱地红壤微生物特性及理化性质的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1423–1428. TAO Pengchuan, CHEN Xiaomin, JIN Zewen, et al. Long-term effects of biochar application on microbial properties and physicochemical properties in upland red soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1423–1428. (in Chinese)
- [31] CIMÒ G, KUCERIK J, BERNIS A E, et al. Effect of heating time and temperature on the chemical characteristics of biochar from poultry manure[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(8): 1912–1918.
- [32] GAO R, WANG Q, LIU Y, et al. Co-pyrolysis biochar derived from rape straw and phosphate rock: carbon retention, aromaticity, and Pb removal capacity[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(1): 413–419.
- [33] SPOKAS A K. Review of the stability of biochar in soils; predictability of O:C molar ratios[J]. *Carbon Management*, 2010, 1(2): 289–303.
- [34] HONG Y G, DUAN Y F, ZHU C, et al. Experimental study on mercury adsorption of S-impregnated coconut shell activated carbon by duct injection[J]. *Journal of Southeast University*, 2015, 45(3): 521–525.
- [35] CANTRELL K B, HUNT P G, UCHIMIYA M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 419–428.
- [36] ZHAO L, CAO X, ZHENG W, et al. Copyrolysis of biomass with phosphate fertilizers to improve biochar carbon retention, slow nutrient release, and stabilize heavy metals in soil[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4(3): 1630–1636.
- [37] ROUSK J, BROOKES P C, ERLAND B. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2009, 75(6): 1589–1596.
- [38] 王欣,尹带霞,张凤,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 248–257. WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4): 248–257. (in Chinese)
- [39] XU G, WEI L L, SUN J N, et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism? [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 119–124.
- [40] XU H, WANG X, LI H, et al. Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(16): 9391–9399.
- [41] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 46–59.
- [42] AMELOOT N, GRABER E R, VERHEIJEN F G A, et al. Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 379–390.
- [43] ZIMMERMAN A R, GAO B, AHN M. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169–1179.
- [44] JONES D L, MURPHY D V, KHALID M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(8): 1723–1731.
- [45] 郭碧林,陈效民,景峰,等. 生物质炭添加对重金属污染稻田土壤理化性状及微生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 279–284. GUO Bilin, CHEN Xiaomin, JING Feng, et al. Effects of biochar addition on physicochemical properties and microbial biomass of the red paddy soil polluted by heavy metals[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 279–284. (in Chinese)