

炭-肥互作对芥菜产量和肥料利用率的影响

杜衍红 蒋恩臣 王明峰 许细薇 李治宇 张世军

(华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642)

摘要: 进行了生物质炭-化肥互作试验,探究炭-肥互作对红壤养分、芥菜产量、肥料利用率的影响。采用盆栽试验,设置空白对照组 CK(不加炭,不施肥)、加炭组(施加 5% 的稻壳炭),按照化肥投入量的递减率为 0、15%、30%、45%,依次标记为 RFC₀、RFC₁、RFC₂、RFC₃,对应的不加炭处理依次记为 RF₀、RF₁、RF₂、RF₃。结果表明,添加 5% 的稻壳炭、化肥施用量为常规施肥量的 55% (RFC₃) 时,氮肥表观利用率最高,炭-肥互作处理的氮肥利用率均显著高于常规施肥处理,平均提高 161.42%,而加炭处理(RFC₀、RFC₁、RFC₂、RFC₃)的芥菜产量分别比对应的不加炭处理平均提高 79.28%。炭-肥互作组的红壤有机质含量比单施化肥组平均高出 241.42%;RFC₃ 处理的红壤碱解氮、有效磷含量均高于 RF₀ 处理,说明炭可以增加土壤养分,当施肥量为常规施肥量的 55% 时,生物质炭与化肥互作,保持了土壤的有效养分。另外,炭-肥互作的种植模式也促进了芥菜对氮、磷、钾养分的吸收和贮藏。在本试验条件下,降低肥料投入时,生物质炭发挥其对红壤的综合改良效应及其对养分的吸收和固持作用,从而表现出显著的增产效应;炭-肥互作模式可以在低肥料投入时通过提高肥料表观利用率、氮肥利用率来保证作物的养分供给,保持土壤的肥力,使作物增产。

关键词: 生物质炭; 炭-肥互作; 红壤养分; 肥料利用率

中图分类号: S156.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0059-06

Effect of Interaction of Biochar and Fertilizer on Mustard Yield and Fertilizer Utilization Rate

Du Yanhong Jiang Enchen Wang Mingfeng Xu Xiwei Li Zhiyu Zhang Shijun

(College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The effect of interaction of biochar and fertilizer (IBF) on nutrients of red soil, yield of mustard and fertilizer utilization rate was investigated. IBF experiments were conducted, the treatments included RFC treatment (both biochar and fertilizer were applied), RF treatment (only fertilizer applied) and control treatment CK (no biochar and fertilizer applied). The fertilizer application dosages were 100%, 85%, 70%, 55% of the regular fertilizer application quantity, which were correspondingly denoted as RFC₀, RFC₁, RFC₂, RFC₃ of RFC treatment and RF₀, RF₁, RF₂, RF₃ of RF treatment, respectively. The results showed that the nitrogen utilization rate of RFC₃ was higher than those of other treatments. The nitrogen utilization rate, yield of mustard and the soil organic matter content of RFC treatments were averagely increased by 161.42%, 79.28% and 241.42% compared with those of RF treatments, respectively. The alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus contents of RFC₃ were higher than those of RF₀. Additionally, IBF planting pattern promoted mustard to adsorb and accumulate N, P, K effectively. In conclusion, biochar played an important role in nutrients adsorption and enrichment for mustard growth. The mechanism of yield increment and soil fertility enhancement could be explained that the IBF planting pattern brought the comprehensive amendment effect in the red

收稿日期: 2015-11-23 修回日期: 2016-01-10

基金项目: 科技部农业科技成果转化项目(2014GB2E000048)

作者简介: 杜衍红(1984—),女,博士生,主要从事生物质炭对红壤的改良研究,E-mail: wn221017@163.com

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

soil and provided mustard with sufficient nutrients by biochar's adsorption and fixation for nutrients, which made fertilizer and nitrogen fertilizer utilization rate increase significantly, although the application amount of fertilizer was very low in the experiment.

Key words: biochar; interaction of biochar and fertilizer; red soil nutrients; fertilizer utilization rate

引言

氮肥利用率低是全球农业生产面临的问题,据统计,我国主要粮食作物水稻、小麦、玉米氮肥利用率分别为 28.3%、28.2% 和 26.1%,远低于国际水平,与 20 世纪 80 年代相比呈下降趋势^[1],蔬菜作物由于施肥量高,氮肥利用率更低,仅在 10% 左右^[2]。过量施肥、氮肥利用率低、氮素径流损失是造成地表水氮素富集,河流湖泊富营养化的重要原因,同时导致水体环境污染,土壤地力下降,危害极大^[3-5]。因此,如何提高氮肥利用率,合理施肥,减少氮素损失是迫切需要解决的关键问题。

生物质炭具有特殊的孔隙结构、较大的比表面积和多种化学官能团,可以吸附和负载肥料养分,延缓肥料在土壤中的释放,降低养分淋失^[6]。生物质炭基肥可以有效提高肥料的利用率^[7]。乔志刚等^[8]研究发现,与普通复合肥相比,负载养分的炭基肥在总养分减少约 8% 的情况下,能有效提高青椒产量和氮肥的农学利用率。另外,生物质炭吸附 NH_4^+ 、 NO_3^- ,能减少土壤速效养分的损失^[9]。有研究表明,生物质炭能吸附土壤中极性化合物,并通过在中微孔内储存的氮素得以保持^[10-11];生物质炭输入土壤后,提高了土壤的 C/N 比,增强了土壤对矿质氮的吸持容量,提高了矿质氮肥的利用率^[12];生物质炭施入土壤后可抑制微生物的反硝化作用以降低氮氧化物的排放^[13],从而减少氮肥的损失。生物质炭作为一种新型多功能材料,多用来改良土壤理化性质^[7],增加土壤碳汇,提高土壤有机质含量^[14],还能有效地保存土壤水分和养料,提高土壤肥力^[15]。

本文主要研究炭-肥互作对红壤养分、芥菜生长的影响,通过测定和分析土壤有效养分含量,作物养分积累量以及肥料的表观利用率和氮素利用率,来探究生物质炭对作物养分吸收的影响,进而验证生物质炭在提高肥料利用率、降低肥料投入和提高作物产量方面的效应。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用生物质炭为稻壳炭,由 500℃ 连续热解装置制得,研磨过 40 目筛备用;试验用红土采自广东省湛江市甘蔗种植基地,其农化性质如表 1 所示。

试验用塑料槽尺寸(长×宽×高)为 50 cm×20 cm×17 cm,装土 5 kg。供试作物:叶用芥菜,购自广东省农科院蔬菜研究所。叶用芥菜需肥量大,水肥充足的条件有利于芥菜的生长,提高芥菜产量^[16]。一般大田种植芥菜经济施肥量约为 $\text{N } 327 \text{ kg/hm}^2$, P_2O_5 119 kg/hm^2 , $\text{K}_2\text{O } 194 \text{ kg/hm}^2$ 。^[17]

表 1 红壤基础农化性质(质量比)

Tab.1 Basic agrochemical properties of red soil

参数	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
数值	5.3	60.5	35.6	360

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

采用盆栽试验,设 9 个处理,6 个重复,随机区组排列。具体如表 2 所示。试验时间为 2015 年 3 月 15 日—4 月 25 日。CK 为空白对照,不施肥不加炭处理;RF₀ (Routine fertilization) 为当地常规施肥处理,施肥量 $\text{N } 300 \text{ kg/hm}^2$, P_2O_5 200 kg/hm^2 , $\text{K}_2\text{O } 200 \text{ kg/hm}^2$,等量基施,肥料为尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾(分析纯),作为底肥一次性施入。RF₁、RF₂、RF₃ 分别为在常规施肥(RF₀)基础上施肥量依次递减 15%、30%、45%,即施肥量分别为常规施肥量的 85%、70%、55%;RFC₀ 为常规施肥处理+稻壳炭处理,RFC₁、RFC₂、RFC₃ 处理在肥料递减处理(RF₁、RF₂、RF₃)基础上施用与 RFC₀ 等量的稻壳炭处理。在前期的红壤改良试验中,发现炭土质量比为 5% 时,红壤的改良效果相对最好,低于 5% 时,红壤板结、硬度大,幼苗不容易扎根,高于 5% 时红壤碱性强,造成氨态氮肥的挥发,肥料利用率低。因此,本文选取炭的添加比例为 5%,按照耕层土壤深度 15 cm,红壤容重 1.33 g/cm^3 折算,大田施炭量为 100 t/hm^2 。

炭与土壤混合陈化一个月,浇足水分,适宜湿度时松土施肥,2015 年 3 月中旬开始种植芥菜,两叶期定苗,每盆留苗 6 株。每天浇水量控制为土壤含水量的 20%,通过重量法进行,采用大田常规管理。

1.2.2 产量及干物质量

种植到收获 55 d 左右,将作物从土壤中挖出,将根系冲洗干净,用滤纸吸去明水,称量。植株于干燥箱内 105℃ 杀青 2 h,70℃ 干燥称量。

表 2 试验设计
Tab.2 Experimental design

处理	施肥总量/(g·盆 ⁻¹)			肥料递减 百分比/%	施炭总量/ (g·盆 ⁻¹)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
CK	0	0	0	0	0
RF ₀	0.81	0.52	0.52	0	0
RFC ₀	0.81	0.52	0.52	0	250
RF ₁	0.69	0.44	0.44	15	0
RFC ₁	0.69	0.44	0.44	15	250
RF ₂	0.57	0.36	0.36	30	0
RFC ₂	0.57	0.36	0.36	30	250
RF ₃	0.45	0.29	0.29	45	0
RFC ₃	0.45	0.29	0.29	45	250

1.2.3 作物养分

全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用干灰化-钼黄比色法;全钾采用干灰化-原子吸收分光光度法。

1.2.4 氮肥利用率和肥料表观利用率

氮肥利用率是指作物地上部分吸收来自肥料部分的氮素占施氮量的比例^[18],计算公式为

$$w_N = \frac{N_1 - N_2}{N_t} \times 100\%$$
 (1)

式中 w_N ——氮肥利用率,%
 N_1 ——施氮肥作物地上部分吸收总氮量,g
 N_2 ——未施氮肥作物地上部分吸收总氮量,g
 N_t ——化肥氮的投入量,g

作物肥料表观利用率的计算公式^[19]为

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\%$$
 (2)

式中 w ——肥料表观利用率,%
 m_1 ——地上部植株 N、P、K 积累量,g
 m_2 ——对照地上部植株 N、P、K 积累量,g
 m ——施肥量,g

1.2.5 土壤养分测试

土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用盐酸氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾则采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 炭-肥互作不同配比对芥菜产量及干物质质量的影响

由图 1 可知(图中不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平时差异显著,不同大写字母表示 $p < 0.01$ 水平时差异极显著,下同),炭-肥互作处理的芥菜产量和干物质质量均高于对应的单施化肥处理,且差异显著。各处理产量和干物质质量均表现为:RFC₃ > RFC₁ > RFC₂ > RFC₀ > RF₀ > RF₁ > RF₂ > RF₃ > CK。炭-肥互作组 RFC₀、RFC₁、RFC₂ 和 RFC₃ 分别比对应

的单施化肥组 RF₀、RF₁、RF₂ 和 RF₃ 产量提高 60.99%、96.81%、112.40%、267.04%,平均增产 134.31%,增产效应显著;炭-肥互作处理组 RFC₀、RFC₁、RFC₂ 和 RFC₃ 产量也均高于常规施肥 RF₀ 处理,分别比 RF₀ 提高 60.99%、66.54%、65.72%、123.86%,平均增产 79.28%,增产效应显著。炭-肥互作处理组的干物质质量也均高于对应的单施化肥处理组。随着施肥量的递减,不加炭组产量降低,而加炭组没有出现减产现象,这说明,生物质炭利用其自身的养分及其对红壤的综合改良效应,弥补了肥料的不足,维持了芥菜的正常生长和产量。

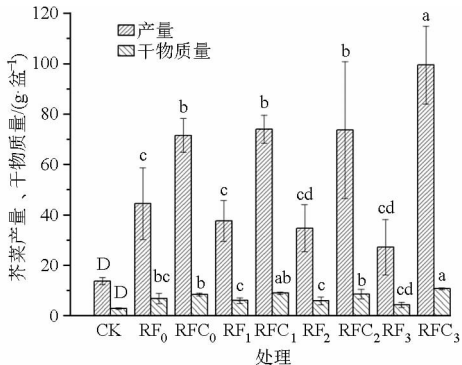


图 1 炭-肥互作对芥菜产量及干物质质量的影响
Fig.1 Effect of interaction of biochar and fertilizer on yield and dry biomass of mustard

2.2 炭-肥互作不同配比对芥菜叶片养分含量的影响

由表 3 可以看出,炭-肥互作处理芥菜叶片的总养分含量比对应的单施肥料处理的总养分含量高,即在同等施肥量基础上,叶片养分含量表现为加炭组高于不加炭组。不同处理叶片全氮含量表现为:RFC₃ > RFC₀ > RFC₂ > RFC₁ > RF₀ > RF₂ > RF₃ > RF₁ > CK,炭-肥互作处理 RFC₁ 与 RFC₀、RFC₃ 差异显著,其余各处理差异不显著,而单施化肥处理 RF₂ 与 RF₀、RF₃ 差异不显著,其余处理相互之间差异显著。单施化肥组叶片全氮含量均低于常规施肥处理(RF₀),而炭-肥互作组均高于常规施肥处理(RF₀)。芥菜叶片全磷和全钾含量表现出了相似的规律。

全磷变化表现为:RFC₁ > RFC₂ > RFC₀ > RFC₃ > RF₀ > RF₁ > RF₃ > RF₂ > CK,其中炭-肥互作处理与单施化肥处理 RF₁、RF₂、RF₃ 差异显著,与 RF₀ 差异不显著,炭-肥互作处理组除了 RFC₁ 与 RFC₃ 差异显著外,其余处理之间差异不显著,单施化肥组 RF₀、RF₁、RF₂、RF₃ 处理相互之间差异不显著。

全钾含量表现为:RFC₃ > RFC₂ > RFC₁ > RF₀ > RFC₀ > RF₁ > RF₂ > RF₃ > CK,炭-肥互作处理与对应的单施肥料处理相比,除 RFC₀ 与 RF₀ 差异不显著外,RFC₁ 与 RF₁、RFC₂ 与 RF₂、RFC₃ 与 RF₃ 均差异显著 ($p < 0.05$),增量分别为 5.29%、43.77%、

40.63%、53.52%。

表 3 炭-肥互作对芥菜叶片养分的影响(质量比)
Tab.3 Effect of interaction of biochar and fertilizer on nutrition content of mustard leaf g/kg

处理	全氮	全磷	全钾
CK	16.90 ± 1.12 ^E	2.57 ± 0.17 ^D	20.17 ± 0.98 ^E
RF ₀	30.28 ± 2.36 ^b	3.92 ± 0.37 ^{bc}	38.72 ± 3.67 ^{bc}
RFC ₀	36.17 ± 1.36 ^a	4.83 ± 0.59 ^{ab}	36.53 ± 5.00 ^{bcd}
RF ₁	20.83 ± 0.72 ^D	3.33 ± 0.13 ^C	32.23 ± 2.35 ^C
RFC ₁	30.87 ± 2.00 ^b	5.67 ± 0.40 ^a	40.63 ± 1.61 ^b
RF ₂	26.83 ± 2.15 ^{bc}	3.10 ± 0.11 ^c	29.60 ± 1.72 ^c
RFC ₂	35.65 ± 5.44 ^{abc}	5.10 ± 0.52 ^{ab}	45.45 ± 2.12 ^B
RF ₃	23.60 ± 0.74 ^C	3.18 ± 0.11 ^c	25.22 ± 0.86 ^d
RFC ₃	41.02 ± 4.24 ^a	4.57 ± 0.10 ^b	55.12 ± 3.00 ^a

注:同列数值后不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平时差异显著,不同大写字母表示在 $p < 0.01$ 水平时差异极显著,下同。

2.3 炭-肥互作不同配比对肥料利用率的影响

由图 2 可以看出,炭-肥互作处理的氮肥利用率均高于对应的单施肥料处理,总体表现为 $RFC_3 > RFC_2 > RFC_1 > RFC_0 > RF_0 > RF_1 > RF_2 > RF_3$,其中,炭-肥互作处理 RFC_3 、 RFC_2 、 RFC_1 、 RFC_0 分别比对应的单施肥料处理提高 910.69%、415.70%、148.44%、46.59%。当施肥量由常规施肥量的 100% 降低至 55% 时,单施肥料处理组的氮肥利用率逐渐下降,而炭-肥互作处理氮肥利用率则逐渐增加。另外,炭-肥互作处理的氮肥利用率均高于常规施肥处理 RF_0 、 RFC_3 、 RFC_2 、 RFC_1 、 RFC_0 分别比 RF_0 提高 339.91%、199.21%、59.98%、46.59%,平均提高 161.42%,表明生物质炭显著提高了氮肥的利用率。

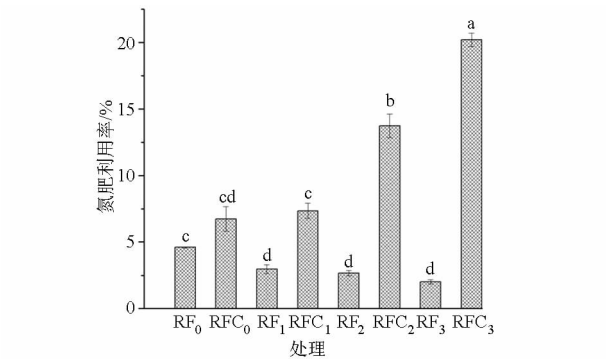


图 2 炭-肥互作对氮肥利用率的影响
Fig.2 Effect of interaction of biochar and fertilizer on nitrogen utilization rate

由图 3 可以看出,炭-肥互作处理与单施肥料处理组的肥料表观利用率(生物质炭自身的养分未计入总施肥量)差异显著,而炭-肥互作处理组内除了 RFC_0 与 RFC_1 差异不显著外,其余组相互之间差异显著($p < 0.05$),而单施肥料处理, RF_0 与 RF_2 、 RF_3 差异显著,其余组间差异不显著。炭-肥互作处理的

肥料表观利用率均高于单施肥料处理,这与氮肥利用率的变化规律相同;随着施肥量由常规施肥量的 100% 降低至 55% 时,单施肥料处理各组的肥料表观利用率依次降低,而炭-肥互作处理组肥料表观利用率则依次增加,炭-肥互作处理 RFC_3 、 RFC_2 、 RFC_1 、 RFC_0 的肥料表观利用率分别比对应的单施肥料处理提高 874.99%、349.42%、104.19%、27.60%,比常规施肥 RF_0 处理分别提高 308.75%、153.47%、52.67%、27.61%,平均提高 135.62%,表明生物质炭的添加对肥料表观利用率的提升效应显著。

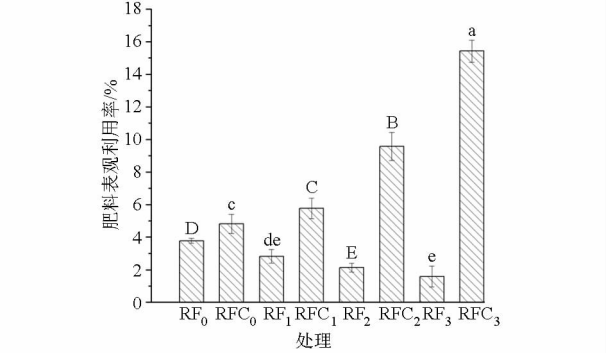


图 3 炭-肥互作对肥料表观利用率的影响
Fig.3 Effect of interaction of biochar and fertilizer on fertilizer apparent utilization rate

2.4 炭-肥互作不同配比对红壤肥力的影响

2.4.1 炭-肥互作对红壤有机质的影响

由图 4 可以看出,炭-肥互作处理的红壤有机质含量均高于单施肥料处理,且差异极显著。炭-肥互作处理组有机质含量变化表现为: $RFC_2 > RFC_0 > RFC_3 > RFC_1$,其中, RFC_2 、 RFC_0 和 RFC_3 处理间差异不显著,而单施肥料组有机质变化表现为: $RF_2 > RF_1 > RF_0 > RF_3$,各处理间差异不显著。同等施肥量条件下,加炭组有机质含量均高于不加炭组, RFC_0 处理的有机质含量比 RF_0 高 273.23%, RFC_1 比 RF_1 高 205.73%, RFC_2 比 RF_2 高 238.72%, RFC_3 比 RF_3 高 247.98%,炭-肥互作组比单施化肥组有机质含量平均高 241.42%,炭-肥互作显著提高了红壤

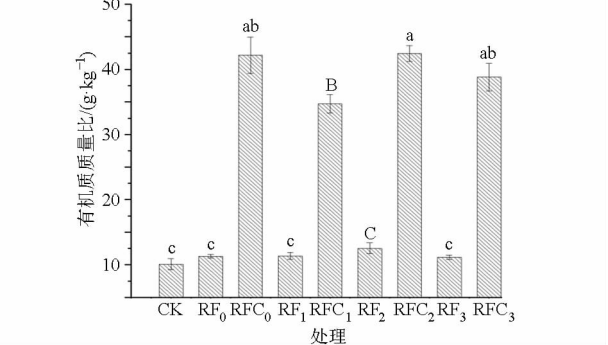


图 4 炭-肥互作对红壤有机质的影响
Fig.4 Effect of interaction of biochar and fertilizer on organic matter of red soil

的有机质含量,随着施肥量的减少,土壤中有机质含量的变化并不显著,这说明土壤有机质的含量与生物质炭的添加量相关性更强,或者说,炭对有机质含量的变化起着主导作用。

2.4.2 炭-肥互作对红壤养分的影响

红壤养分的变化如表 4 所示。土壤的碱解氮含量、有效磷、有效钾(速效钾)是反映土壤肥力的重要指标。炭-肥互作处理的碱解氮、有效磷和有效钾含量均高于对应的单施肥料处理。炭-肥互作处理 RFC₀、RFC₁、RFC₂、RFC₃与常规施肥处理 RF₀相比,碱解氮含量分别提高 14.53%、16.58%、11.92%、12.57%。单施化肥处理(不加炭组)红壤的碱解氮含量随着施肥量的递减而不断下降,且各处理组间差异显著;炭-肥互作处理的碱解氮含量表现为: RFC₁ > RFC₀ > RFC₃ > RFC₂,其中, RFC₀与 RFC₁、RFC₂和 RFC₃差异不显著,表明炭-肥互作模式中,在低施肥量时红壤的碱解氮含量与常规施肥量处理无显著差异,在添加等量的生物质炭时,降低化肥施用量,红壤碱解氮含量无显著变化,这是因为生物质炭利用自身的吸附性吸附铵根离子、硝酸根离子等,降低了氮素的流失,较好地保持了红壤的氮素。

表 4 炭-肥互作对芥菜土壤养分的影响(质量比)

Tab.4 Effect of interaction of biochar and fertilizer on nutrition content of red soil mg/kg

处理	碱解氮	有效磷	有效钾
CK	17.63 ± 0.35 ^C	24.23 ± 2.75 ^c	371.00 ± 5.35 ^b
RF ₀	80.53 ± 1.42 ^C	38.98 ± 0.71 ^{ab}	766.00 ± 13.54 ^a
RFC ₀	92.23 ± 1.10 ^{ab}	39.90 ± 1.40 ^{ab}	806.50 ± 9.11 ^a
RF ₁	77.10 ± 1.80 ^D	30.90 ± 1.49 ^c	475.25 ± 53.80 ^b
RFC ₁	93.88 ± 1.47 ^a	39.68 ± 1.19 ^{ab}	683.25 ± 39.46 ^a
RF ₂	68.13 ± 1.46 ^E	31.35 ± 0.93 ^C	478.75 ± 47.11 ^b
RFC ₂	90.13 ± 2.35 ^b	36.80 ± 0.93 ^B	673.25 ± 63.38 ^a
RF ₃	59.85 ± 1.22 ^F	29.73 ± 1.48 ^c	455.00 ± 15.17 ^b
RFC ₃	90.65 ± 1.79 ^B	41.95 ± 0.82 ^a	698.50 ± 34.49 ^a

由表 4 还可以看出,炭-肥互作处理组的有效磷含量高于对应的单施化肥处理,其中, RFC₀比 RF₀高 2.37%, RFC₁比 RF₁高 28.40%, RFC₂比 RF₂高 17.38%, RFC₃比 RF₃高 41.13%,而单施化肥处理组 RF₁、RF₂、RF₃的有效磷含量与空白对照 CK(不加炭不加肥)无显著差异,均较低。同等施肥量条件下,炭-肥互作处理 RFC₁、RFC₂与对应的单施化肥处理 RF₁、RF₂的有效钾含量差异显著。而炭-肥互作处理组内, RFC₀、RFC₁、RFC₂、RFC₃差异不显著,单施化肥处理 RF₁、RF₂、RF₃之间的有效钾含量差异也不显著,各处理有效钾含量表现为: RFC₀ > RF₀ > RFC₃ > RFC₁ > RFC₂ > RF₂ > RF₁ > RF₃ > CK。总之,生物质炭-化肥互作对红壤肥力的改善具有显

著的效果,对红壤肥力的提升效应非常显著。

3 讨论

本试验条件下,炭-肥互作处理与单施化肥处理相比,土壤养分、有机质水平显著增加,芥菜产量、干物质量、叶片全氮、全磷、全钾含量以及肥料利用率均增加;当施肥量为常规用量的 85%、70%、55% 时,施肥量的降低对炭-肥互作处理的芥菜生长及红壤养分的影响不大,可能原因是:①生物质炭的吸附性以及发达的孔隙度,可以吸附养分,使得养分溶解存储在发达的空隙结构里,起到了缓释作用,从而降低了高温多雨气候条件下土壤养分的流失,而这种吸附多数是离子交换吸附,当植物生长需肥旺盛时,根部不断地将土壤溶液中的养分输送给植株,而生物质炭孔隙结构的微型养分库不断的释放养分,供给作物的生长。②生物质炭激活了根际微生物的活力,如固氮菌等^[20],不断地为土壤“生产”养分,提高土壤肥力,给作物额外的养分供给。③生物质炭自身也有一定的养分,尤其速效钾含量较高,约 8.6 mg/kg(自测),按照 15 000 kg/hm²施炭量,可提供的钾肥约 129 kg/hm²,可满足农作物以及叶菜类作物对钾肥的基本需求^[21]。可见,生物质炭输入红壤后,在肥料不足的条件下,通过改善红壤理化环境、红壤肥力及红壤微生物活力,提高肥料利用率等,保障了芥菜的养分供给,促进了芥菜的生长。

4 结论

- (1)炭-肥互作处理的红壤肥力、芥菜产量、芥菜矿质养分、氮肥利用率、肥料表观利用率均显著高于对应的单施肥料处理。炭-肥互作可有效改善红壤肥力,提高红壤的有机质、碱解氮、有效磷、有效钾含量。
- (2)炭-肥互作对肥料表观利用率的提升效应显著,尤其提高了氮素利用率,因此,在少施肥时,依然能保证作物的养分供给,促进作物的生长,保持土壤肥力,保障了作物的增产增收。
- (3)在本试验条件下,当炭土质量比为 5%,施肥量为常规用量的 55% 时,红壤肥力保持较好,芥菜产量和干物质量较高,芥菜叶片全氮、全磷、全钾积累量较高,氮素及肥料表观利用率最高,是较为经济高效的种植模式。
- (4)研究结果验证了炭-肥互作模式对土壤肥力及芥菜生长的促进效应和生物质炭的增产效应;通过生物质炭对红壤的综合改良效应以及在提高肥料利用率方面发挥的主导作用,弥补了肥料的不足,从而促进了芥菜的生长,提高了产量。

参 考 文 献

- 1 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008,45(5): 915 – 924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915 – 924. (in Chinese)
- 2 串丽敏,赵同科,安志装,等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010,26(11): 200 – 205.
CHUAN Limin, ZHAO Tongke, AN Zhizhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 200 – 205. (in Chinese)
- 3 CAMARGO J A, ALONSO Á. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment[J]. Environment International, 2006, 32(6): 831 – 849.
- 4 朱兆良. 我国土壤氮素研究中的某些进展[C]//中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 中国土壤学会, 2004: 7 – 12.
- 5 BAKHSH A, KANWAR R S. Spatial clusters of subsurface drainage water $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching losses[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(2): 333 – 341.
- 6 DAY D, EVANS R, LEE J W. Utilization of CO_2 for the creation of a valuable and stable carbon co-product from fossil fuel exhaust scrubbing[J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2004, 227(1): U1093 – U1093.
- 7 张雯,耿增超,何绪生,等. 生物质炭基氮肥中试制备工艺与特性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 129 – 133, 147.
ZHANG Wen, GENG Zengchao, HE Xusheng, et al. Pilot preparation technology and properties of new biochar-based nitrogenous fertilizers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 129 – 133, 147. (in Chinese)
- 8 乔志刚,陈琳,李恋卿,等. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5): 175 – 180.
QIAO Zhigang, CHEN Lin, LI Lianqing, et al. Effects of biochar fertilizer on growth and nitrogen utilizing rate of rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(5): 175 – 180. (in Chinese)
- 9 LEHMANN J, SILVA J P D, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249: 343 – 357.
- 10 MOHAN S V, KARTHIKEYAN J. Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal [J]. Environmental Pollution, 1997, 97(1 – 2): 183 – 187.
- 11 SUDHAKAR Y, DIKSHIT A K. Kinetics of endosulfan sorption on to wood charcoal[J]. Journal of Environmental Science & Health Part B Pesticides Food Contaminants & Agricultural Wastes, 1999, 34(4): 587 – 615.
- 12 STEINER C, GLASER B, TEIXEIRA W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferrasol amended with compost and charcoal[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6): 893 – 899.
- 13 LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 395 – 419.
- 14 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]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 183 – 192, 200.
ZHAO Shixiang, JI Qiang, LI Zhonghui, et al. Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 183 – 192, 200. (in Chinese)
- 15 靳泽文,陈效民,李秋霞,等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和水力学特性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 81 – 85.
JIN Zhewen, CHEN Xiaomin, LI Qiuxia, et al. Effects of biochar on physicochemical properties and hydraulic characteristics in upland red soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 81 – 85. (in Chinese)
- 16 王常波. 叶用芥菜的高产栽培技术[J]. 吉林农业, 2012(8): 88.
- 17 姚建族. 芥菜氮磷钾肥效及其施肥指标研究[J]. 福建农业学报, 2011, 26(6): 1045 – 1050.
YAO Jianzu. Effect and recommend NPK fertilization for mustard green[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(6): 1045 – 1050. (in Chinese)
- 18 高海英,陈心想,张雯,等. 生物质炭及炭基硝酸铵肥料理化性质研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 14 – 20.
GAO Haiying, CHEN Xinxiang, ZHANG Wen, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 14 – 20. (in Chinese)
- 19 张伟明. 生物质炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2012.
ZHANG Weiming. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 20 NOYCE G L, BASILIKO N, FULTHORPE R, et al. Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(6): 649 – 659.
- 21 刘双全. 钾对蔬菜产量和品质影响的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2000(4): 25 – 26.
LIU Shuangquan. Study on the effect of potash on yield and quality of vegetables[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2000(4): 25 – 26. (in Chinese)