

DOI: 10.11686/cyxb2019338

<http://cyxb.magtech.com.cn>

徐绮雯, 马淑敏, 朱波, 等. 生物炭与化肥配施对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响. 草业学报, 2020, 29(5): 121—131.

Xu Q W, Ma S M, Zhu B, *et al.* Effects of the combined application of biochar and chemical fertilizer on fertility and microbial characteristics of purple soil and yield and quality of oilseed rape. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(5): 121—131.

# 生物炭与化肥配施对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响

徐绮雯, 马淑敏, 朱波, 张小短, 邢毅, 段美春, 王龙昌\*

(西南大学农学与生物科技学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400716)

**摘要:** 研究不同梯度的生物炭与常规施肥、减量施肥相配合对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响, 为实际生产中制定生物炭与化肥的配施方案提供理论参考。依托西南地区特有的紫色土, 采用裂区试验设计, 试验处理包括:  $B_0F_1$  (不施生物炭+减量肥)、 $B_0F_2$  (不施生物炭+全量肥)、 $B_1F_1$  (低量生物炭+减量肥)、 $B_1F_2$  (低量生物炭+全量肥)、 $B_2F_1$  (高量生物炭+减量肥)、 $B_2F_2$  (高量生物炭+全量肥)。结果表明: 生物炭改良后的土壤全碳、全氮、全钾、阳离子交换量(CEC)、pH 显著高于  $B_0$  处理, 且  $F_1$  各土壤肥力指标水平与  $F_2$  相近。生物炭的输入提升了土壤微生物 Shannon 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )、碳源利用丰富度指数( $S$ ), 促进了根际微生物对糖类、氨基酸类、羧酸类、聚合物类、酚酸类碳源的利用程度。生物炭有效提高了油菜产量, 在  $F_1$  水平下, 生物炭的施用显著降低籽粒中芥酸、硫苷、亚麻酸的含量, 提升了高油酸、油酸、黄籽度水平。冗余分析(RDA)结果显示, 对油菜品质指标的重要性排序为: 全钾>全碳>全氮>全磷>CEC>pH。其中, 全钾、全碳、全氮、全磷对籽粒品质有显著影响( $P<0.05$ )。总之, 生物炭与化肥联合施用可显著改善土壤肥力状况, 提升土壤微生物活性, 促进了微生物对碳源的利用程度。生物炭的施用量以  $35\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  为宜, 可有效弥补化肥减量后的养分亏缺, 促进油菜增产和籽粒品质的改良。

**关键词:** 生物炭; 减量施肥; 土壤微生物; 油菜; 冗余分析

## Effects of the combined application of biochar and chemical fertilizer on fertility and microbial characteristics of purple soil and yield and quality of oilseed rape

XU Qi-wen, MA Shu-min, ZHU Bo, ZHANG Xiao-duan, XING Yi, DUAN Mei-chun,

WANG Long-chang\*

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400716, China

**Abstract:** The aim of this study was to investigate the effects of the combined application of biochar and chemical fertilizer on fertility and microbial characteristics of ‘purple soil’ (an Entisol in USDA taxonomy) and yield and quality of oilseed rape, so as to provide a theoretical basis for formulating an optimal combination of biochar and chemical fertilizer in Southwest China. The treatments included:  $B_0F_1$  (no biochar+reduced fertilization),  $B_0F_2$  (no biochar+traditional fertilization),  $B_1F_1$  (low biochar+reduced fertilization),  $B_1F_2$  (low

收稿日期: 2019-08-05; 改回日期: 2019-09-29

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503127)和国家自然科学基金项目(31271673, 31871583)资助。

作者简介: 徐绮雯(1994-), 女, 山东日照人, 在读硕士。E-mail: xqiw@yeah.net

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wanglc2003@163.com

biochar+traditional fertilization),  $B_2F_1$  (high biochar+reduced fertilization), and  $B_2F_2$  (high biochar+traditional fertilization), arranged in a split-plot design. It was found that soil pH, cation exchange capacity (CEC), total nitrogen (TN), total carbon (TC) and total potassium (TK) increased significantly under  $B_1$  and  $B_2$ , compared with values for  $B_0$ , while no significant difference was detected between  $F_1$  and  $F_2$ . Biochar application promoted diversity of soil microorganisms with increased Shannon's index ( $H$ ), Simpson index ( $D$ ) and abundance index of carbon source utilization ( $S$ ), and improved the overall utilization ability of carbohydrates, amino acids, carboxylic acids, polymers and phenolic compounds. Yield of oilseed increased significantly with application of biochar. Contents of erucic acid, glucosinolates and linolenic acid decreased, while levels of oleic acid and yellowness increased with application of biochar under  $F_1$ . Redundancy analysis showed that factors influencing oilseed quality included, in order of significance, TK, TC, TN, total phosphorus (TP), CEC and soil pH, among which TK, TC, TN and TP affected oilseed quality significantly ( $P < 0.05$ ). In conclusion, the combined application of biochar and chemical fertilizer significantly improved the fertility status of soil, increased the activity of soil microorganisms, and promoted the microbial utilization of carbon sources. The optimal application of biochar was  $35 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Biochar at this rate effectively offset the nutrient deficiency after the reduction of fertilizer, and improved the yield and quality of oilseed rape.

**Key words:** biochar; reduced fertilization; soil microorganisms; oilseed rape; redundancy analysis

20 世纪 80 年代以来,我国粮食产量在化肥的助力下实现了飞跃式增长<sup>[1]</sup>。但长期过度施用化肥导致土壤生态系统的失衡,加剧了农业面源污染。农业农村部提出到 2020 年实现化肥零增长的目标<sup>[2]</sup>。因此,探索切实可行的方式以提高肥料利用效率、减少化肥施用量已成为当前农业的紧要任务<sup>[3]</sup>。生物炭作为一种有机改良剂与肥料配施,既能改善土壤肥力,又能提升生态系统服务功能,已成为修复环境且提高产量的新型农业技术。如何尽可能发挥生物炭的优势,使其与传统田间管理耦合达到增益效应,比单独施用生物炭替代化肥更具有实际指导性意义。

生物炭是由农林等废弃物在缺氧环境下制成的一种富碳性物质,具有丰富的孔隙结构与高度的稳定性,在丰盈土壤碳库的同时吸附养分,改善土壤理化性质<sup>[4]</sup>。同时,生物炭特有的巨大比表面和非挥发性灰分养分,为土壤微生物提供更多的生态位,提升了土壤生态环境下生物群落的丰富度<sup>[5-6]</sup>。这种生物炭对微生物的动态调节过程进一步影响着土壤营养循环<sup>[7]</sup>或空间结构<sup>[8]</sup>,改善了土壤的 pH 值、阳离子交换容量(cation exchange capacity, CEC)以及有机质含量<sup>[9-10]</sup>,间接增强了植物的抗逆能力<sup>[11]</sup>,最终达到提高作物产量的目的<sup>[12-13]</sup>。但单独施用生物炭难以取代化肥在作物生长过程中的作用,且高额施用生物炭将抬高农户的生产成本。因此,通过与不同肥料联合施用的途径可以有效弥补生物炭在农业推广过程中的这一缺陷<sup>[14]</sup>。研究表明,在连续 4 年的定位施肥试验中,生物炭与化肥混合加工制成的炭基肥对耕层土壤总有机碳含量提升效果要显著优于投入等量碳素或氮、磷、钾养分的处理<sup>[15]</sup>。Zheng 等<sup>[14]</sup>也发现,与单独施用化肥相比,生物炭与化肥配施使玉米(*Zea mays*)氮素利用效率显著提升了 43.1%,增产 10.7%。在低肥力碱性土壤上连续两年的田间试验发现,将无机肥混合有机肥再配施  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  生物炭具有最佳的增产效应<sup>[16]</sup>,并有效改良石灰性土壤的 pH<sup>[9]</sup>。利用 16S rRNA 序列技术也进一步证实,生物炭与化肥配施对土壤细菌群落的改良效果优于单独使用生物炭或化肥<sup>[17]</sup>。由此可知,生物炭与化肥间的互作效应产生良好的“减肥增效”的作用<sup>[18]</sup>,但对于这种效应也存有相悖报道:有研究表明,生物炭的输入对砂浆水稻土 pH 值并没有显著影响<sup>[19]</sup>,对灰质土壤微生物量及群落多样性存在抑制作用<sup>[20]</sup>。甚至有不少学者发现,生物炭会在一定程度上降低作物对氮的吸收程度<sup>[20-21]</sup>。对于这些迥异的结果,大多学者将其归咎于生物炭的结构特异性与制作工艺上的差异,也有人认为这与生物炭的配施量以及施用的土壤类型有关<sup>[22]</sup>。

目前研究多集中于对生物炭的单一报道,生物炭的适宜施用范围为  $0.5 \sim 135 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  都已被证实<sup>[20]</sup>。但对于不同梯度的生物炭与化肥配施产生的互作效应,尤其是生物炭与减量化肥配施是否会改变肥效水平尚不明确。

同时,对于生物炭的研究大多集中在土壤修复与产量提高等方面,对作物品质影响的探讨尚不多见。生物炭与化肥配施在发挥增产效益的同时是否会对作物品质产生影响,值得探究。本研究对比不同梯度的生物炭与化肥配施对西南地区紫色土肥力状况和微生物群落的作用差异,探究生物炭与化肥配施对油菜(*Brassica napus*)产量和籽粒品质的影响,以期确立生物炭和化肥最优配比方案,为生物炭的合理应用及紫色土生态环境的修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2016 年 10 月至 2017 年 5 月在重庆市西南大学教学温室(29°49' N,106°25' E)中进行。供试土壤属紫色砂泥岩母质上发育的中性紫色土,采集于 0~20 cm 的土层,将土壤自然风干后过 2 mm 筛混合均匀备用。土壤基本理化性质如下:pH 6.58,全碳 8.14 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.69 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.57 g·kg<sup>-1</sup>。供试油菜品种为中双 11 号。供试生物炭:四川美日佳生物质能源有限责任公司生产,原料为玉米秸秆,制备温度为 550 °C。

### 1.2 试验设计

试验为裂区设计,主因素为化肥施用水平,1) F<sub>1</sub>:减量肥(50%F<sub>2</sub>);2) F<sub>2</sub>:全量肥。全量肥施肥水平:氮肥(N)、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和钾肥(K<sub>2</sub>O)的施用量分别为 180、90、120 kg·hm<sup>-2</sup>;所有处理均施加硼肥,用量为 15 kg·hm<sup>-2</sup>。副因素为生物炭的配施量,设置 3 个水平,1) B<sub>0</sub>:不施生物炭;2) B<sub>1</sub>:施低量生物炭(35 t·hm<sup>-2</sup>);3) B<sub>2</sub>:施高量生物炭(50 t·hm<sup>-2</sup>)。试验共 6 个处理:B<sub>0</sub>F<sub>1</sub>(不施生物炭+减量肥)、B<sub>0</sub>F<sub>2</sub>(不施生物炭+全量肥)、B<sub>1</sub>F<sub>1</sub>(低量生物炭+减量肥)、B<sub>1</sub>F<sub>2</sub>(低量生物炭+全量肥)、B<sub>2</sub>F<sub>1</sub>(高量生物炭+减量肥)、B<sub>2</sub>F<sub>2</sub>(高量生物炭+全量肥)。采用盆栽试验,每盆装基质 5.0 kg(基质=土壤+氮、磷、钾肥+生物炭,所有肥料和土混合均匀,一次性装盆)。于 2016 年 9 月中下旬进行油菜大田育苗,在五叶期时,选择长势一致幼苗移栽到装有基质的盆钵中,每盆 1 株,置于遮雨玻璃温室中培养。油菜生长期间水分控制在最大田间持水量的 60%左右。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 土壤样品采集** 于成熟期油菜收获时,轻轻抖落与根系结合比较松散的土壤,按四分法取样,用于土壤理化指标的测定。随后,用经灭菌的镊子刮取附着在根系表层(<2 mm)土壤作为根际土壤,迅速过 2 mm 筛用自封袋保存于 4 °C 冰箱,用于土壤微生物的测定。

**1.3.2 土壤肥力指标测定** 将自然风干后的土壤过 0.25 mm 筛,采用岛津 TOC 分析仪(TOC-L SSM-5000A and ASI-L,日本 SHIMADZU 公司)测定土壤全碳含量。采用 pH 计测定(土:水=1.0:2.5)土壤 pH;采用乙酸铵交换法测定 CEC;采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定土壤全磷含量;采用 NaOH 熔融—原子分光光度计法(岛津 AA6300)测定土壤全钾含量;采用凯氏定氮法消煮,半自动凯氏定氮仪(SKD-200,上海沛欧)测定土壤全氮含量<sup>[23]</sup>。

**1.3.3 土壤微生物群落功能测定** 采用 Biolog-Eco 生态板法测定土壤微生物群落功能<sup>[24]</sup>。采用培养 120 h 的微生物数据计算 Shannon 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )、均匀度指数( $E$ )和丰富度指数( $S$ ),表征土壤微生物群落多样性<sup>[25]</sup>。计算方法如下:

$$P_i = (C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i)$$

$$H = - \sum P_i (\ln P_i)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

$$E = H / \ln S$$

$$S = \text{被利用碳源的总数}$$

式中: $P_i$  为第  $i$  孔的相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率, $C_i$  为每个微孔的实际吸光值, $R_i$  为对照孔的吸光值, $S$  为微生物群落利用碳源种类的数目,即 ECO 板上颜色变化孔数,吸光值小于 0.25 视为颜色没有变化<sup>[25]</sup>。

**1.3.4 油菜生物量和产量测定** 在油菜成熟期每个处理选取具代表性的植株 3 株,计算其单株生物量,同时  
将有效角果自然晒干并脱粒,待籽粒自然风干后,测定单株籽粒产量。

**1.3.5 油菜籽粒品质测定** 采用近红外线品质分析仪(Infratec TM 1241,上海福斯)测定油菜籽粒品质<sup>[26]</sup>,  
主要指标有籽粒含油量、蛋白质、油酸、亚油酸、硫苷和芥酸等脂肪酸含量。

1.4 统计分析

用 Excel 2007 软件进行数据整理、作图,用 SPSS 20.0 进行方差分析,采用 Canoco 5.0 绘制冗余分析(re-  
dundancy analysis,RDA)图,采用 General Linear Model 进行单变量双因素方差分析,采用 Duncan’s 新复极差  
法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 生物炭与化肥配施对土壤肥力的改良效果

生物炭的施用对土壤全碳、全氮、全钾、CEC 和 pH 影响显著(表 1)。除全钾外,各项指标均随生物炭用量的  
增加而显著上升。添加生物炭处理的土壤全碳、全氮指标分别比空白处理(B<sub>0</sub>)平均上升 6.11 与 1.42 倍,改良效  
果显著。生物炭促使土壤 pH 值由弱酸性(F<sub>1</sub>B<sub>0</sub>、F<sub>2</sub>B<sub>0</sub> 下分别为 6.60、6.66)转至中性(F<sub>1</sub>B<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>B<sub>1</sub>、F<sub>1</sub>B<sub>2</sub>、F<sub>2</sub>B<sub>2</sub> 下  
分别为 7.00、6.91、7.20、7.13)(*P*<0.05)。与空白(B<sub>0</sub>)相比,CEC 也平均增加 1 个单位(*P*<0.05)。对土壤全  
钾来说,高量生物炭(B<sub>2</sub>)不再具有改良优势,以 B<sub>1</sub> 提升效果最佳(*P*<0.05)。从方差分析结果来看,生物炭用量  
与各项土壤肥力指标(除全磷外)均显著相关,不同化肥梯度对全氮、全钾含量影响达到显著水平,而两者的交互  
作用仅显著影响全钾和 pH 值。

表 1 不同处理对土壤肥力的影响  
Table 1 Effects of different treatments on soil fertility

施肥 Fertilizer	生物炭 Biochar	全碳 Total C (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g · kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 CEC (cmol · kg <sup>-1</sup> )	pH
F <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	8.32±0.17c	0.70±0.01d	0.51±0.01ab	17.79±0.57c	23.16±0.09e	6.60±0.02c
	B <sub>1</sub>	50.60±0.48b	1.65±0.05c	0.49±0.02b	22.53±1.37b	23.81±0.26bc	7.00±0.03b
	B <sub>2</sub>	65.77±1.57a	1.91±0.04b	0.50±0.01ab	18.31±0.26c	24.29±0.01a	7.20±0.01a
F <sub>2</sub>	B <sub>0</sub>	8.10±0.16c	0.83±0.02d	0.51±0.00ab	17.49±1.09c	23.28±0.06de	6.66±0.02c
	B <sub>1</sub>	50.69±1.54b	1.74±0.04c	0.49±0.01b	26.90±0.47a	23.58±0.06cd	6.91±0.04b
	B <sub>2</sub>	66.43±1.02a	2.10±0.08a	0.54±0.02a	24.45±0.77ab	24.15±0.11ab	7.13±0.02a
生物炭 Biochar		*	*	NS	*	*	*
化肥 Fertilizer		NS	*	NS	*	NS	NS
生物炭×化肥 Biochar×fertilizer		NS	NS	NS	*	NS	*

注:同列不同小写字母表示 Duncan 多重比较不同处理在 *P*<0.05 水平差异显著,数据表示平均值±标准误;\* 表示在 0.05 水平差异显著;NS 表示  
差异不显著。下同。

Note: Different small letters within one column mean significant difference of Duncan multiple range test among different treatments at 5% level.  
Data are expressed as means±SE; \*, significant differences at the 0.05 probability levels; NS, no significant difference (*P*>0.05). The same be-  
low.

2.2 生物炭与化肥配施对微生物多样性的影响

生物炭的输入使土壤微生物区系向健康方向转化。由图 1 可知,除均匀度指数(*E*)外,生物炭的添加对微生物  
多样性指标均起到促进作用。在 F<sub>1</sub> 条件下,生物炭输入后的土壤微生物 Shannon 多样性指数(*H*)、Simpson  
优势度指数(*D*)、丰富度指数(*S*)均显著大于 B<sub>0</sub>,说明土壤微生物种类增多;在 F<sub>2</sub> 中,*H*、*D*、*S* 均随着生物炭添加量  
的增多而逐步上升,呈 B<sub>2</sub>>B<sub>1</sub>>B<sub>0</sub> 的趋势,但生物炭的各处理间差异不显著。



2.3 生物炭与化肥配施对微生物碳源利用能力的影响

根据土壤微生物对碳源利用能力的差异，可以全面了解生物炭与化肥配施对微生物群落代谢功能的影响。土壤微生物群落对聚合物类和羧酸类碳源利用较多，对酚酸类和胺类碳源利用相对较少(表 2)。生物炭的施用对土壤微生物群落代谢影响显著。除胺类碳源外,生物炭的施用有效提升根际微生物群落对糖类、氨基酸、羧酸类、聚合物类和酚酸类碳源的代谢效率,均显著高于不添加生物炭的空白处理。值得注意的是,在同一施肥水平下,高、低量生物炭之间微生物群落的代谢差异并不显著。生物炭与化肥的互作效应差异体现在对胺类碳源的作用效果上,生物炭促进胺类碳源的代谢功能仅在 F<sub>1</sub> 中表现出来( $P<0.05$ ),在 F<sub>2</sub> 下反而有抑制的倾向。

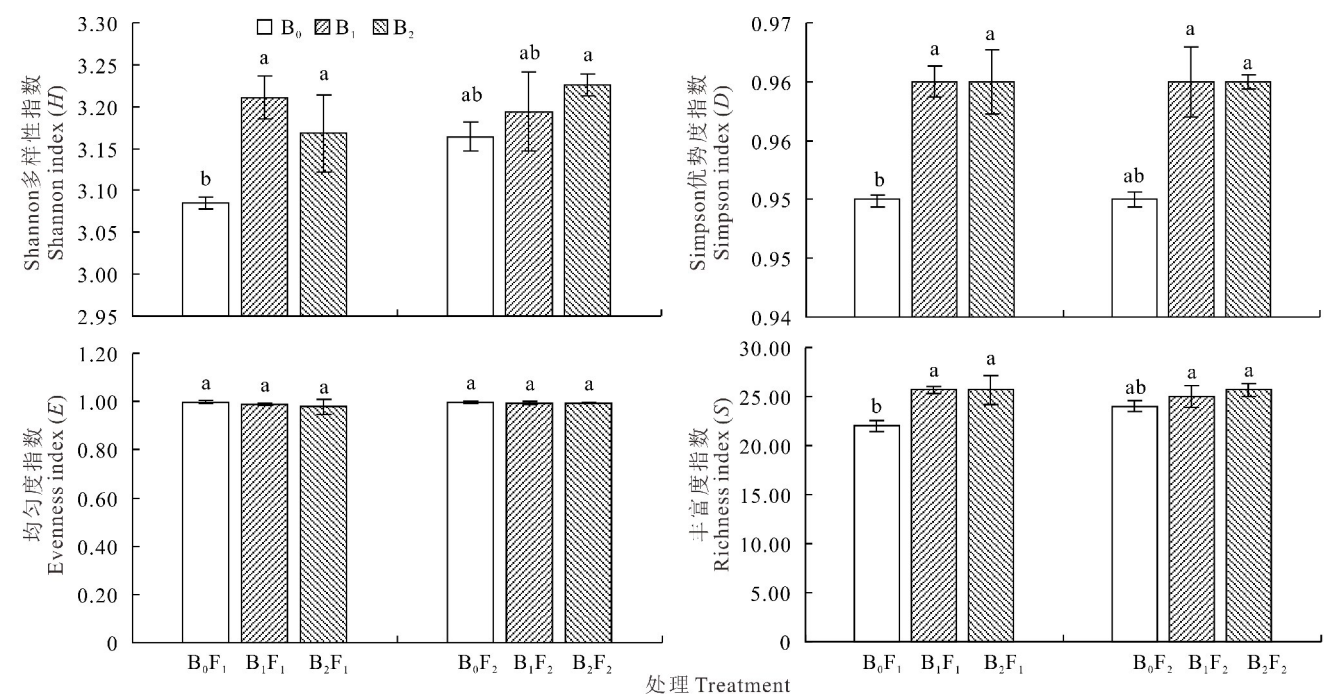


图 1 不同处理下土壤微生物多样性指数

Fig. 1 Soil microbial diversity indices under different treatments

不同字母表示 Duncan 多重比较在 0.05 水平差异显著。Different small letters mean significant difference of Duncan multiple range test among different treatments at 5% level.

表 2 不同处理下土壤微生物对 6 类碳源的利用强度

Table 2 Utilization intensity of six carbon sources by soil microbial community under different treatments

施肥 Fertilizer	生物炭 Biochar	糖类 Carbohydrate	氨基酸类 Amino acids	羧酸类 Carboxylic acids	聚合物类 Polymer	胺类 Amines	酚酸类 Phenolic compounds
F <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	0.55±0.07c	0.71±0.06b	0.75±0.02b	0.79±0.08b	0.38±0.67c	0.44±0.60b
	B <sub>1</sub>	0.78±0.09ab	0.99±0.04a	1.02±0.10a	0.90±0.07ab	0.67±0.03b	0.75±0.04a
	B <sub>2</sub>	0.86±0.09a	0.95±0.10a	1.02±0.07a	1.13±0.05a	0.91±0.10a	0.68±0.06ab
F <sub>2</sub>	B <sub>0</sub>	0.63±0.04bc	0.72±0.05b	0.89±0.06ab	0.95±0.11ab	0.79±0.03ab	0.46±0.10b
	B <sub>1</sub>	0.84±0.06ab	0.96±0.05a	1.01±0.08a	1.11±0.05a	0.63±0.09b	0.55±0.07ab
	B <sub>2</sub>	0.91±0.04a	0.90±0.05ab	1.04±0.09a	1.13±0.04a	0.63±0.08b	0.71±0.11a
生物炭 Biochar		*	*	*	*	*	*
化肥 Fertilizer		NS	NS	NS	NS	NS	NS
生物炭×化肥 Biochar×fertilizer		NS	NS	NS	NS	*	NS

2.4 生物炭与化肥配施对油菜产量和品质的影响

生物炭与化肥配合施用对油菜籽中的营养组成(油脂、蛋白质)和单株生物量影响不显著(表 3)。两种施肥水平下,油菜产量均以 B<sub>1</sub> 处理最高,显著高于 B<sub>0</sub> 和 B<sub>2</sub> 处理。籽粒的黄籽度仅在 F<sub>1</sub> 水平下随生物炭输入量的增多呈显著上升趋势,与空白(B<sub>0</sub>)相比提升范围在 8.9%~17.0%(*P*<0.05),在 F<sub>2</sub> 中并未有显著变化。方差分析结果显示,油菜单株产量受主副因素及其互作效应的共同影响;影响籽粒黄籽度的主要因素为化肥及两者的互作效应,生物炭并未产生显著影响;单株生物量仅受到肥料的显著影响,且在同等生物炭水平下 F<sub>2</sub> 的单株生物量低于 F<sub>1</sub>,说明高化肥处理对油菜产量有明显的抑制作用。

表 3 不同处理对油菜产量和品质的影响  
Table 3 Effects of different treatments on qualities and yield of rape

施肥 Fertilizer	生物炭 Biochar	油脂 Oil (%)	蛋白质 Protein (%)	黄籽度 Yellowness (%)	单株产量 Yield per plant (g)	单株生物量 Biomass per plant (g)
F <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	30.44±0.74a	28.46±0.57a	45.97±1.09c	6.35±0.31b	44.24±2.57a
	B <sub>1</sub>	31.49±2.27a	28.91±0.69a	50.06±1.20b	7.57±0.14a	44.88±3.71a
	B <sub>2</sub>	30.21±1.68a	29.64±1.82a	53.79±3.92a	5.60±0.02b	37.16±1.20a
F <sub>2</sub>	B <sub>0</sub>	29.95±2.28a	28.06±0.62a	34.87±0.32d	3.92±0.47c	34.59±7.47a
	B <sub>1</sub>	29.18±1.20a	30.19±3.64a	32.32±0.32d	5.88±0.51b	38.42±1.15a
	B <sub>2</sub>	28.02±2.00a	28.04±0.35a	31.68±1.90d	4.41±0.44c	35.68±4.16a
生物炭 Biochar		NS	NS	NS	*	NS
化肥 Fertilizer		NS	NS	*	*	*
生物炭×化肥 Biochar×fertilizer		NS	NS	*	*	NS

表 4 不同处理对油菜籽粒脂肪酸组分的影响  
Table 4 Effects of different treatments on fatty acid compisition of rape seed (%)

施肥 Fertilizer	生物炭 Biochar	芥酸 Erucic acid	硫苷 Glucosinolates	亚麻酸 Linolenic acid	高油酸 High oleic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid
F <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	5.09±0.31b	30.77±0.09a	6.15±0.07b	75.43±1.30b	63.16±0.70c	16.59±0.67a	4.70±0.04a	0.52±0.13a
	B <sub>1</sub>	4.43±0.22c	26.59±0.41b	5.50±0.28c	78.36±1.44a	64.65±0.17bc	16.21±0.57a	4.54±0.20a	0.37±0.08a
	B <sub>2</sub>	3.32±0.29d	26.25±1.18b	6.08±0.08b	75.63±0.79b	65.54±1.47ab	16.99±1.15a	4.70±0.22a	0.28±0.13a
F <sub>2</sub>	B <sub>0</sub>	3.21±0.54d	25.89±0.76b	6.19±0.12b	74.75±1.58b	66.44±0.89a	16.87±0.65a	4.75±0.06a	0.40±0.12a
	B <sub>1</sub>	6.39±0.14a	30.08±0.85a	6.70±0.09a	75.87±1.03b	60.19±0.31d	16.99±1.59a	4.71±0.10a	0.35±0.08a
	B <sub>2</sub>	3.70±0.04d	29.92±1.35a	6.89±0.05a	74.32±1.39b	63.05±0.31c	17.43±1.69a	4.93±0.30a	0.39±0.28a
生物炭 Biochar		*	NS	*	*	*	NS	NS	NS
肥料 Fertilizer		NS	NS	*	*	*	NS	NS	NS
生物炭×肥料 Biochar×fertilizer		*	*	*	NS	*	NS	NS	NS

由表 4 可知,生物炭与两种肥料梯度配合对油菜籽粒脂肪酸组分存在不同的作用效果。在  $F_1$  条件下,生物炭输入后芥酸、硫苷及亚麻酸的含量均呈下调趋势且显著低于空白处理( $B_0$ )。其中, $B_1$ 、 $B_2$  下芥酸分别降低了 13.0%与 35.0%,硫苷下调 13.4%与 14.7%,改良效果呈现  $B_2 > B_1 > B_0$  的趋势;而对亚麻酸含量, $B_1$  的改良效果优于  $B_2$  ( $P < 0.05$ )。脂肪酸组中的高油酸、油酸含量表现出上调趋势, $B_1$  对高油酸促进效果最佳,与空白( $B_0$ )相比显著提升 3.8%;油酸则随着生物炭用量的增多逐步上升,提升幅度在 2.4%~3.8%,且  $B_2$  与  $B_0$  间差异显著。然而,不同梯度的生物炭与  $F_2$  水平的化肥配施却表现出与  $F_1$  相反的作用结果。生物炭的输入使芥酸与硫苷的含量在  $B_1$  处达到峰值( $P < 0.05$ ),不仅促使亚麻酸的含量逐步上升( $P < 0.05$ ),同时对油酸表现出显著的抑制作用。从方差分析结果来看,各指标所受到的影响因素大不相同。硫苷仅受到生物炭与化肥间互作效应的影响,而高油酸却相反;生物炭及二者的互作效应对芥酸含量的影响达到显著水平;亚麻酸与油酸的变化同时受到生物炭、化肥及二者交互作用的显著影响( $P < 0.05$ )。

## 2.5 油菜品质与土壤肥力指标的冗余分析

以油菜籽粒各品质指标为物种因子对不同土壤肥力指标作约束性排序(RDA 分析),利用蒙特卡罗  $P$  值检验中有显著贡献( $P < 0.05$ )的环境因子与物种因子作物种—环境双序图。结果显示,轴 1 和轴 2 解释了籽粒品质指标与土壤理化性质关系总变异的 64.55%,说明排序效果较好。主成分一将  $B_1$  与  $B_0$ 、 $B_2$  处理区分开,主成分二大致将  $F_2$  和  $F_1$  两处理区分开。对各品质含量的重要性由大至小排序为:全钾、全碳、全氮、全磷、CEC、pH 值。其中,全钾、全碳、全氮、全磷对籽粒品质有显著影响( $P < 0.05$ ),是引起油菜籽粒各品质指标变异的主要因素;油菜籽粒中芥酸和硫苷与全钾的含量呈正相关,而亚麻酸则受到全磷、全钾两者影响较大;籽粒中主要的营养成分蛋白质和油脂与土壤中全碳、全氮含量呈正相关;脂肪酸组成中棕榈酸、亚油酸与全磷含量呈高度正相关,油酸、高油酸分别与全钾、全磷呈高度负相关;而黄籽度则受土壤中的全钾、全磷含量共同的负调控。

## 3 讨论

本研究表明,生物炭与土壤肥力指标(除全磷外)均有显著相关性,说明生物炭的输入对紫色土的改良起关键作用。在两种肥料梯度下,土壤 CEC 与 pH 均随着生物炭施用水平的上升而显著增加,以  $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  生物炭改良效果最优。生物炭具有巨大的比表面积,在一定程度上提高了土壤阳离子交换能力<sup>[27]</sup>,促使生物炭表面碱性阳离子与土壤中负电荷粘土颗粒反应,从而提升土壤 pH 值<sup>[5]</sup>。同时,生物炭的加入也促进了土壤微生物多样性指数的提高。已有诸多研究发现,生物炭或化肥单独施用效果次于两者联合施用<sup>[14,16]</sup>,两者的互补结合有效弥补了对方不足<sup>[28]</sup>:一方面,生物炭多孔性的结构特点既为微生物的生存繁殖提供了更多的庇护所,又使其自身具备良好的吸持能力,有效减缓化肥中养分的释放速率<sup>[29]</sup>,降低土壤养分的流失;另一方面,化肥与生物炭配施中和了生物炭制备原料及生产过程中所产生的不良挥发性有机物或重金属(如苯、镉等)带来的直接毒性<sup>[30]</sup>,从而减轻对根际微生物的胁迫作用。在本试验中,生物炭的输入对土壤全碳、全氮、全钾的提升效果也十分显著,丰富的土壤养分是微生物生态网络复杂性和稳定性的前提<sup>[31]</sup>,土壤微生物的活跃反过来又加快了微生物对生物炭或土壤中迟效性养分的分解,使局限在生物残渣中的营养物质得以循环利用,进一步优化了土壤微环境<sup>[32]</sup>。

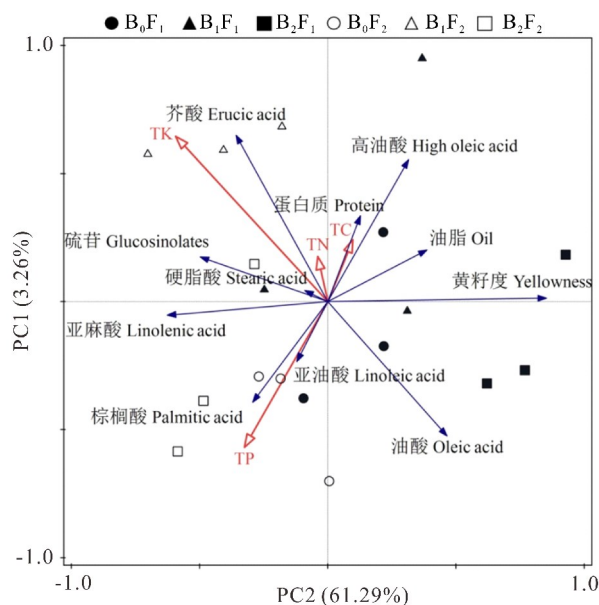


图 2 油菜籽粒品质和土壤肥力指标的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) of rape seed quality and soil fertility

TC、TN、TP 和 TK 分别代表土壤全碳、全氮、全磷和全钾。TC, TN, TP and TK represent soil total carbon, total nitrogen, total phosphorous and total potassium, respectively.

土壤微生物多样性指数与 6 类碳源利用程度(除胺类外)仅受单一因素生物炭的显著影响,这进一步佐证了土壤微生物对生物炭输入的敏感性。生物炭对微生物碳源利用程度的影响在两种肥料梯度下表现出相似规律,生物炭的加入大大促进了糖类、氨基酸类、羧酸类、聚合物类和酚酸类 5 类碳源的利用效率,说明土壤环境在添加生物炭后向健康方向转变<sup>[33]</sup>。在本次试验中,聚合物类与羧酸类是紫色土环境中油菜根际微生物的偏好碳源。有研究表明,聚合物类碳源与土壤中好气性微生物的活动有关,有利于难氧化类有机碳的矿化<sup>[33]</sup>,而大量生物炭的输入恰好疏松了土壤团聚体间的空间结构,增强了此类好气性微生物的活性。与之不同的是,不同梯度的生物炭对胺类碳源的代谢程度在两种肥料梯度下截然相反:在减量施肥条件下,随着生物炭梯度的上升,根际微生物对胺类碳源的消耗量增加;而在全量施肥下却呈下降趋势。方差分析结果也表明,胺类碳源的影响因素不同于其他 5 类碳源,受到生物炭与化肥梯度间互作效应的极显著影响。

生物炭与化肥间的互作效应产生了良好的“减量增产”作用。本试验土壤养分数据显示,生物炭所提供的长效碳源及营养组分,在一定程度上支持了其作为肥料补给土壤养分的功能<sup>[34]</sup>,消除了减量施肥所带来的养分亏缺问题。生物炭表面丰富的官能团和孔隙,吸附土壤养分汇成“源”,再依据作物生长情况和环境条件按需调整养分的释放速率,为作物生长提供持久稳定的营养供应,达到提高肥料利用效率且减少化肥用量的目的<sup>[7]</sup>。同时,化肥中氮、磷、钾的按需配比有助于维持土壤碳库的平衡,弥补了生物炭养分种类单一的缺陷。本试验中,在不同的化肥梯度下均以配施  $35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  生物炭增产效果最佳。高剂量( $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )的生物炭并没有起到更好的增产作用,可能是由于过剩的碳素养分破坏了土壤 C/N 的平衡,C/N 的增高致使土壤中铵态氮或硝态氮被转化成微生物量氮等形式固定下来<sup>[21]</sup>,从而降低了植株的氮素利用率<sup>[28]</sup>。全量施肥处理下的单株产量均低于减量施肥处理,可能是由于本试验的施肥水平参照邹娟<sup>[35]</sup>基于收获产量和经济效益为评判指标的推荐化肥施用量,但若以土壤养分允许平衡盈亏率作为指标,该水平中氮、磷、钾推荐用量偏高,加之生物炭的助力,使得全量施肥水平下养分过盛,刺激土壤环境中微生物的繁殖与活性,加剧了微生物与作物对养分竞争<sup>[21]</sup>,在一定程度上抑制了作物对养分的吸收利用。

本研究中,生物炭与减量化肥配合施用具有优化油菜籽粒脂肪酸组成比例、提高种皮透明度的作用。与不添加生物炭相较,生物炭对油菜籽粒中不利于人体健康的脂肪酸成分(芥酸、硫苷与亚麻酸)起到显著的抑制作用。这主要是由于碳的积累会显著降低亚麻酸的含量,也在一定程度上影响了硫苷的含量<sup>[36]</sup>。与之相反的是,籽粒中油酸、高油酸的含量显著上升。大多数芥酸是以 C18 油酸为合成前体,脂肪酸延长酶(fatty acid elongase, FAE)为催化物<sup>[37]</sup>。随着生物炭施用量的升高,土壤水、气、热等生态因子发生改变,导致 FAE 的表达受到影响<sup>[38]</sup>,进而芥酸的合成受到抑制且含量显著降低,而作为合成前体物的油酸则被更多积累下来。油菜籽粒中油脂和蛋白质的含量并未受到显著影响,但表达种皮颜色的黄籽度在减量施肥条件下随着生物炭施用量的增加而显著上调。前人的研究表明,氮素施用量的增多会使籽粒黄籽度明显提高<sup>[39]</sup>,而一定范围内的生物炭又提高作物对氮肥的利用效率<sup>[32]</sup>。本研究中,黄籽度受到化肥梯度及生物炭与化肥间交互作用的共同调控,说明土壤中的养分变化是影响黄籽度的主要原因之一。但令人意外的是,生物炭在全量施肥下对品质的作用方向与减量施肥水平完全相反。方差分析结果显示,生物炭与肥料的互作效应对各品质指标(芥酸、硫苷、亚麻酸、黄籽度、油酸)的影响均达到显著水平,说明生物炭与两种梯度化肥配施产生的相反结果,可能是由于处理间差异的互作效应导致的。生物炭与化肥间的互作效应主要体现在生物炭自身的养分释放及对土壤养分的吸附与控释效应,改变了原先的养分供应策略,动态调节了土壤供肥状况<sup>[29]</sup>,并在不同环境下表现出差异。

RDA 分析进一步验证了土壤环境与油菜品质的相关性。结果显示,土壤环境中全钾、全碳、全氮、全磷是影响油菜籽粒化学组成的关键因子。籽粒中芥酸与硫苷的含量随土壤全钾含量的增多呈上调趋势,与前人所得结论相近<sup>[40]</sup>;高油酸、油酸则随土壤全钾含量的增多而逐步降低,这也进一步佐证了油酸与芥酸在含量上的负相关;黄籽度受到全钾和全磷的共同负调控。生物炭作为长效肥料,弥补了化肥一次性施入后养分短效、淋失等问题。但生物炭长期储存的特性与养分即时需求的功能相矛盾,其贮存的矿物质养分分解周期较长<sup>[41]</sup>,加之钾元素在土壤中较难移动<sup>[42]</sup>,深层土壤下可获取的钾元素除土壤固有的矿物质元素外绝大部分由化肥直接提供。此时,全量施肥所能提供的钾元素远远高于减量施肥水平,促使该处理下芥酸与硫苷含量的增多。油菜生长后期,



根系逐步向地下延伸,生物炭与减量化肥配施所提供的养分多富集于土壤表面<sup>[43]</sup>,不能满足深层次根系对养分的需求,造成两种施肥水平下土壤养分含量相近但利用效率差异巨大的现象,导致生物炭在两种肥料梯度下对品质作用结果的不同。生物炭与土壤养分的相关性分析表明,生物炭与全钾、全碳、全氮均有显著相关性,说明生物炭通过调节土壤特征指标而间接影响油菜品质。同时,施肥管理对油菜籽粒品质的影响与土壤条件、气候环境因素及栽培条件等密不可分。加之,研究所用的油菜品种单一,在不同的环境条件下品种的遗传性质存在差异,使生物炭对油菜籽粒的改良结果存在不稳定性。生物炭对籽粒品质的作用是否随着油菜长期的定点栽培表现出不同的结果,这需要进一步验证。

#### 4 结论

生物炭与化肥配施显著提升紫色土 pH、CEC 及全碳、全氮、全钾的水平,有效弥补了化肥减量配施造成的养分亏缺。生物炭的输入提高土壤微生物 Shannon 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )、碳源利用丰富度指数( $S$ ),促进了根际微生物对糖类、氨基酸类、羧酸类、聚合物类、酚酸类碳源的利用程度。生物炭与全量、减量化肥配施均显著促进油菜增产,且与减量化肥配施可显著降低籽粒中芥酸、硫苷和亚麻酸含量,促进油酸含量以及黄籽度水平的升高。综合评判,紫色土中生物炭的施用量以  $35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  为宜,适当减少化肥用量,也可保证油菜的产量和品质,实现化肥的“减量增效”。

#### 参考文献 References:

- [1] Zhang X. China proposes to achieve the goal of zero growth in the use of chemical fertilizers and pesticides by 2020—reducing “fertilizers” in agriculture will not affect food security. *Countryside Agriculture Farmers*, 2015, (4): 13–14.  
张雪. 我国提出到 2020 年实现化肥和农药使用量零增长目标——农业减“肥”不会影响粮食安全. *农村·农业·农民*, 2015, (4): 13–14.
- [2] Ministry of Agriculture of the PRC. Action plan for zero growth of chemical fertilizer use by 2020. *Qinghai Agro-Technology Extension*, 2015, (2): 3–5, 11.  
中华人民共和国农业部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案. *青海农技推广*, 2015, (2): 3–5, 11.
- [3] Peng X L, Wang W, Zhou N, *et al.* Analysis of fertilizer application and its reduction potential in paddy fields of Heilongjiang Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2092–2100.  
彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2092–2100.
- [4] Liu Y X, Wang Y F, Lü H H, *et al.* Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery (*Brassica chinensis*) and soil properties. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, (6): 1438–1444.  
刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, (6): 1438–1444.
- [5] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, *et al.* A Review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 2010, 105(1): 47–82.
- [6] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812–1836.
- [7] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralisol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893–899.
- [8] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 2006, 171(1): 41–53.
- [9] Naeem M A, Khalid M, Aon M, *et al.* Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(1): 112–122.
- [10] Sun L Y, Li L, Chen Z Z, *et al.* Combined effects of nitrogen deposition and biochar application on emissions of  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{NH}_3$  from agricultural and forest soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(2): 254–265.
- [11] Li C J, Li D F, Zhou G S, *et al.* Effects of different types of biochar on soil microorganism and rhizome diseases occurrence of flue-cured tobacco. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(2): 289–296.  
李成江, 李大肥, 周桂凤, 等. 不同种类生物炭对植烟土壤微生物及根茎病害发生的影响. *作物学报*, 2019, 45(2): 289–296.

- [12] Kim J, Yoo G, Kim D, *et al.* Combined application of biochar and slow-release fertilizer reduces methane emission but enhances rice yield by different mechanisms. *Applied Soil Ecology*, 2017, 117: 57–62.
- [13] Awad Y M, Lee S S, Kim K H, *et al.* Carbon and nitrogen mineralization and enzyme activities in soil aggregate-size classes: Effects of biochar, oyster shells, and polymers. *Chemosphere*, 2018, 198: 40–48.
- [14] Zheng J F, Han J M, Liu Z W, *et al.* Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 70–78.
- [15] Gao M Y, Jiang T, Han X R, *et al.* Effects of applying biochar-based fertilizer and biochar on organic carbon fractions and contents of brown soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2126–2135.  
高梦雨, 江彤, 韩晓日, 等. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2126–2135.
- [16] Arif M, Ilyas M, Riaz M, *et al.* Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. *Field Crops Research*, 2017, 214: 25–37.
- [17] Blackwell P, Krull E, Butler G, *et al.* Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertiliser use in south-western Australia: An agronomic and economic perspective. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6/7): 531–545.
- [18] Zhang W M, Guan X C, Huang Y W, *et al.* Biological effects of biochar and fertilizer interaction in soybean plant. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 109–122.  
张伟明, 管学超, 黄玉威, 等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应. *作物学报*, 2015, 41(1): 109–122.
- [19] Zhang H Z, Huang Y, Liu G, *et al.* Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seedling stage. *Ecology and Environment*, 2010, 19(11): 2713–2717.  
张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2713–2717.
- [20] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, *et al.* Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant and Soil*, 2012, 354(1/2): 311–324.
- [21] Wu A L, Wang J S, Dong E W, *et al.* Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 176–185.  
武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响. *土壤学报*, 2019, 56(1): 176–185.
- [22] Gu M Y, Liu H L, Li Z Q, *et al.* Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4128–4138.  
顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4128–4138.
- [23] Bao S D. *Agrochemical analysis of soil (Third Edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.  
鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Garland J L, Mills A L. Classification and haracterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57(8): 2351–2359.
- [25] Zhou Q, Zhang X D, Ma S M, *et al.* Effects of intercropping green manure on soil carbon, nitrogen and soil microbial in rapeseed rhizosphere. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7965–7971.  
周泉, 张小短, 马淑敏, 等. 间作绿肥对油菜根际土壤碳氮及根际微生物的影响. *生态学报*, 2017, 37(23): 7965–7971.
- [26] Zhu W X, Zhao J X, Zhang P, *et al.* The comparison study of NIR and chemical method for determining quality parameters in rape-seed. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(17): 182–183, 185.  
朱文秀, 赵继献, 张品, 等. 近红外光谱分析与化学方法检测油菜种子品质参数的比较. *安徽农学通报*, 2010, 16(17): 182–183, 185.
- [27] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—A review. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [28] Zhou Z D, Gao T, Zhu Q, *et al.* Increases in bacterial community network complexity induced by biochar-based fertilizer amendments to karst calcareous soil. *Geoderma*, 2019, 337: 691–700.
- [29] Lehmann J, Da Silva J P, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [30] Li B, Fan C H, Zhang H, *et al.* Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. *Atmospheric Environment*, 2015, 100: 10–19.
- [31] Zhou J Z, Deng Y, Luo F, *et al.* Functional molecular ecological networks. *mBio*, 2010, 1(4): 1592–1601.
- [32] Oladele S O, Adeyemo A J, Awodun M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils. *Geoderma*, 2019, 336: 1–11.

- [33] Wang Y, Zong N, He N P, *et al.* Soil microbial functional diversity patterns and drivers along an elevation gradient on Qinghai—Tibet, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5837—5845.  
王颖, 宗宁, 何念鹏, 等. 青藏高原高寒草甸不同海拔梯度下土壤微生物群落碳代谢多样性. *生态学报*, 2018, 38(16): 5837—5845.
- [34] Huang L L, Hu W J, Tao J, *et al.* Soil bacterial community structure and extracellular enzyme activities under different land use types in a long-term reclaimed wetland. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2543—2557.
- [35] Zou J. Study on response of winter rapeseed to NPKB fertilization and abundance & deficiency indices of soil nutrients. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.  
邹娟. 冬油菜施肥效果及土壤养分丰缺指标研究. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [36] Hogy P, Franzaring J, Schwadorf K, *et al.* Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment on energy traits and seed quality of oilseed rape. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 139(1/2): 239—244.
- [37] Liang J, Deng Y F, Mai B R. Effect of acid rain on the quality of double-low rapeseed. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(26): 12467—12470.  
梁骏, 郑有飞, 麦博儒. 酸雨胁迫对双低油菜籽粒品质的影响. *安徽农业科学*, 2009, 37(26): 12467—12470.
- [38] Liang J. Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 274—283.  
梁骏. 模拟酸雨对油菜(*Brassica napus* L.)生长、产量及品质的影响. *生态学报*, 2008, 28(1): 274—283.
- [39] Zhang Z L. Effect of environmental factors on seed color and related quality characters of yellow-seeded rapeseed (*Brassica napus* L.). Chongqing: Southwest University, 2002.  
张子龙. 环境对甘蓝型黄籽油菜粒色及其相关品质性状的影响. 重庆: 西南大学, 2002.
- [40] Lu J W. Response of, aphid to potassium and technique of potassium application on rapeseed. Beijing: China Agriculture University, 1999.  
鲁剑巍. 油菜对钾的反应及钾肥有效施用配套技术的研究. 北京: 中国农业大学, 1999.
- [41] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(6): 1301—1310.
- [42] Islam S M M, Gaihre Y K, Biswas J C, *et al.* Different nitrogen rates and methods of application for dry season rice cultivation with alternate wetting and drying irrigation: Fate of nitrogen and grain yield. *Agricultural Water Management*, 2018, 196: 144—153.
- [43] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477—1488.