

## 竹炭与有机肥配施对土壤肥力及紫甘蓝生长的影响

陈丽美<sup>1</sup>, 李小英<sup>1</sup>, 李俊龙<sup>2</sup>, 梁 智<sup>1</sup>, 史亮涛<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室, 云南 昆明 650224; 3. 云南省农业科学院 热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300)

**摘要:** 【目的】探讨竹炭与有机肥配施对元谋坝区燥红壤土壤肥力及紫甘蓝 *Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* 生长的影响, 为生物质炭在蔬菜生产中的合理施用以及改良燥红壤提供依据。【方法】设置 3 个竹炭(B) 质量分数水平 (4%、6%、8%), 3 个有机肥(F) 用量水平 (5、10、20 t·hm<sup>-2</sup>), 采用 3×3 完全方案设计, 加空白处理(对照) 共 10 个处理。在 9-12 月每月底测定 1 次叶片光合特性, 于 12 月底紫甘蓝收获后, 采集 0-20 cm 土层土壤测定土壤养分质量分数, 同时测定紫甘蓝产量和品质。【结果】竹炭与有机肥配施提高了土壤 pH 和有机质、全磷、有效磷、全钾和速效钾质量分数, 同时提高了紫甘蓝光合特性和产量及品质, 且各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。与对照相比, pH 以 B8F10 处理最高, 提高了 0.9 个单位; 有机质和全钾质量分数以 B4F10 处理最高, 分别提高了 107.93% 和 46.06%; 全磷以 B8F5 处理最高, 提高了 58.67%; 有效磷以 B6F20 处理最高, 提高了 157.44%; 速效钾以 B8F20 最高, 提高了 226.60%。与对照相比, 除 B8F5 处理外, 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝叶片各时期净光合速率均值提高了 1.14%~23.54%; 不同处理下紫甘蓝叶片各时期蒸腾速率和胞间二氧化碳摩尔分数均值分别提高了 3.01%~43.52% 和 2.33%~9.11%; 除 B4F5 处理外, 紫甘蓝叶片各时期气孔导度均值较对照处理提高了 2.33%~39.54%。增产效果、可溶性蛋白质和花青素质量分数均以 B6F10 处理最高。【结论】竹炭与有机肥配施为紫甘蓝生长持续供应养分, 促进紫甘蓝生长, 提高了紫甘蓝产量和品质, 最佳配比为有机肥 10 t·hm<sup>-2</sup> 和竹炭 6% 配合施用。图 4 表 2 参 34

**关键词:** 土壤学; 竹炭; 有机肥; 紫甘蓝; 土壤养分; 产量和品质

中图分类号: S153 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)04-0774-10

## Effects of combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer on soil fertility and growth of *Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*

CHEN Limei<sup>1</sup>, LI Xiaoying<sup>1</sup>, LI Junlong<sup>2</sup>, LIANG Zhi<sup>1</sup>, SHI Liangtao<sup>3</sup>

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Lab of Soil Erosion and Control in Yunnan Universities, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Institute of Tropical Eco-agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou 651300, Yunnan, China)

**Abstract:** [Objective] This objective is to investigate the effects of combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer on soil fertility and growth of *Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* in dry red soil of Yuanmou area, Yunnan Province. [Method] Three levels of bamboo charcoal mass fraction (4%, 6%, 8%) and three levels of organic fertilizer (5, 10, 20 t·hm<sup>-2</sup>) were set up in the experiment. A total of 10 treatments were designed with 3×3 complete scheme and blank treatment (ck) as control. The photosynthetic characteristics of leaves were measured once a month from September to December. After the *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2021-03-26

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目 (2017YFC0505102-4)

作者简介: 陈丽美 (ORCID: 0000-0002-0124-9743), 从事生态环境与水土保持研究。E-mail: 2577230616@qq.com。

通信作者: 李小英 (ORCID: 0000-0001-9634-688X), 副教授, 博士, 从事生态环境与水土保持研究。  
E-mail: lxy92@126.com

was harvested at the end of December, soil samples were collected from 0–20 cm soil layer to determine the soil nutrient contents, as well as the yield and quality of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*. [Result] Combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer increased soil pH, organic matter, total phosphorus, available phosphorus, total potassium and available potassium, and improved the net photosynthetic rate, yield and quality of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*, with significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). Compared with the control, the pH value in B8F10 treatment was the highest, which increased by 0.9 units. The contents of organic matter and total potassium were the highest in B4F10 treatment, with an increase of 107.93% and 46.06%, respectively. Total phosphorus content was the highest in B8F5 treatment, with an increase of 58.67%. Available phosphorus content was the highest in B6F20 treatment, with an increase of 157.44%, and available potassium content was the highest in B8F20 treatment, with an increase of 226.60%. Compared with the control, except for B8F5 treatment, the average net photosynthetic rate in leaves of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra* at each stage increased by 1.14%–23.54%, and the average transpiration rate and intercellular CO<sub>2</sub> concentration in leaves of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra* increased by 3.01%–43.52% and 2.33%–9.11%, respectively. Except for B4F5 treatment, the mean value of stomatal conductance of leaves increased by 2.33%–39.54%. B6F10 treatment had the highest yield-increasing effects, soluble protein and anthocyanin contents. [Conclusion] Combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer can continuously supply nutrients for *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*, also promote its growth, yield and quality. Appropriate amount of organic fertilizer (10 t·hm<sup>-2</sup>) with bamboo charcoal (6%) has better effect on growth promotion, yield increase and quality improvement.[Ch, 4 fig. 2 tab. 34 ref.]

**Key words:** soil science; bamboo charcoal; organic fertilizer; *Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*; soil nutrients; yield and quality

紫甘蓝 *Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* 是十字花科 Brassicaceae 芸苔属 *Brassica* 结球甘蓝 *B. oleracea* var. *capitata* 的一个变型，是云南干热河谷农业区冬季特色优势农产品之一，具有适应性广、速生、早结丰产、保质期长、不易腐败和经济价值高等特点。紫甘蓝在元谋坝区种植面积较广。然而，随着当地化肥农药的大量施用，加之燥红壤黏粒较多，遇降雨土壤易板结，养分易流失，导致土壤肥力下降，影响作物的产量和品质。生物质炭是良好的土壤改良剂<sup>[1]</sup>，施入土壤后会改变土壤性状，同时可作为缓释肥料载体，提高作物产量<sup>[2]</sup>，近年来被广泛应用于农业生产领域。有机肥能为作物生长持续供应养分，同时能够改善土壤结构，保障蔬菜优质高产，是生产有机蔬菜不可替代的肥料<sup>[3]</sup>。有研究<sup>[4]</sup>表明：生物质炭与有机肥配施比单施更益于平邑甜茶 *Malus hupehensis* 幼苗的生长发育，更好地防控苹果 *Malus pumila* 连作障碍。李喜凤等<sup>[5]</sup> 研究证明：生物质炭与有机肥配施可显著增强 0–40 cm 土壤总有机碳、颗粒有机碳、轻质有机碳、微生物量碳、易氧化有机碳和可溶性有机碳质量分数，有助于苹果成花，促进植株生长，提高产量。张毅博等<sup>[6]</sup> 研究表明：生物质炭与有机肥的配施提高了土壤有机碳和全氮含量，从而改善土壤质地，提高土壤肥效。ARIF 等<sup>[7]</sup> 也研究发现：在低肥力碱性土壤中，生物质炭与有机肥的配施能显著提高磷素利用率，同时提高了玉米 *Zea mays*-小麦 *Triticum aestivum* 的生产力和农田土壤质量。SÁNCHEZ-MONEDERO 等<sup>[8]</sup> 的研究结果显示：与单施生物质炭相比，生物质炭与有机肥(羊粪堆肥)混施使番茄 *Solanum lycopersicum* 果实质量增加 16%，直径增加 9%，硬度提高 8%。目前，生物质炭与有机肥配施在经济果木和作物方面均有研究，但针对云南干热河谷坝区燥红壤改良和紫甘蓝生长的研究尚未见报道。鉴于此，本研究以元谋燥红壤为研究对象，紫甘蓝为供试材料，研究竹炭与有机肥配施对燥红壤土壤肥力及紫甘蓝光合特性、产量和品质的影响，以期获得元谋坝区紫甘蓝优质高产的配施策略，为生物质炭在蔬菜生产应用中提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

田间试验于 2019 年 7-12 月在云南省楚雄彝族自治州元谋县南城街 150 号热区生态研究所大田试验基地 (25°41.5'N, 101°52.6'E) 进行。元谋属南亚热带干热季风气候, 热量充足, 年平均气温为 21.9 °C, 年平均降水量 613.8 mm, 年日照时数 2 670.4 h, 无霜期 302~331 d。

### 1.2 试验材料

供试土壤燥红壤 (0~20 cm) 基本理化性质为 pH 6.60, 有机质 6.30 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.65 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 2.20 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 17.22 g·kg<sup>-1</sup>, 速效磷 10.67 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 108.41 mg·kg<sup>-1</sup>。

供试紫甘蓝品种为普罗米悠 ‘Puluomiyou’, 是元谋干热河谷地区主要种植的紫甘蓝品种, 其生长期约 100~120 d, 为云南省农业科学院热区生态农业研究所提供。

供试生物质炭为竹炭, 购于福建优选炭业有限责任公司。其以竹材经 450~480 °C 温度炭化 1 h 而成。竹炭 pH 为 11.31, 有机碳质量分数为 860.60 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 10.30 g·kg<sup>-1</sup>, 平均孔径为 2.654 43 nm。

供试有机肥为当地农户常用的经羊粪发酵产生的堆肥, 其 pH 为 7.63, 氮、五氧化二磷、氧化钾质量分数分别为 46.00、14.50、9.80 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 试验设计

采用 3×3 完全方案设计, 设置竹炭用量 3 个水平, 有机肥用量 3 个水平, 加上空白对照 (ck), 共计 10 个处理 (表 1)。每个处理 3 次重复。

表 1 试验设计

Table 1 Design of field experiment

处理代号	竹炭(B)/%	有机肥(F)/(t·hm <sup>-2</sup> )	处理代号	竹炭(B)/%	有机肥(F)/(t·hm <sup>-2</sup> )
对照	0	0	B6F10	6	10
B4F5	4	5	B8F10	8	10
B6F5	6	5	B4F20	4	20
B8F5	8	5	B6F20	6	20
B4F10	4	10	B8F20	8	20

试验地总面积为 600 m<sup>2</sup>, 每个小区面积为 20 m<sup>2</sup>(4 m×5 m), 每个处理 3 个重复, 共 30 个小区。于 2019 年 7 月用旋耕机将小区土壤翻匀晾晒, 并用铁板将各小区隔开。7 月末按照试验设计将生物质炭和有机肥一次性施入小区 (随机组合), 并再次将土壤翻匀 (土肥厚度约 30 cm)。9 月 5 日种植长势均一株高为 6.57~7.50 cm 紫甘蓝幼苗, 株距为 30.00 cm, 行距为 20.00 cm, 并覆膜, 保持充分灌水, 后期隔 3 d 灌水 1 次。在 9 月底和 10 月底进行追肥 (每个小区追施尿素 300 g, 磷酸二氢钾 140 g), 促进紫甘蓝幼苗期和莲座期生长。试验灌溉方式为地表滴灌, 每株幼苗 1 个滴头, 滴头设置在同一侧, 滴头与幼苗的距离约为 3 cm, 滴头间距与株距相同。期间管理方式按当地方式管理。

### 1.4 测定方法

土壤: 2019 年 12 月底紫甘蓝采收后, 在每个小区采用 5 点取样法采集 0~20 cm 土层土样, 并将每个处理混匀带回实验室风干。一部分过 1.00 mm 筛, 装自封袋用于土壤 pH 和速效成分的测定; 另一部分过 0.25 mm 筛, 装自封袋用于土壤有机质、全磷和全钾质量分数的测定。土壤理化性质参照文献 [9] 测定。其中, 土壤 pH 采用 pH 酸度计 (PHS-3C, PHS-4C 型) 测定; 土壤有机质质量分数采用油浴加热-重铬酸钾氧化容量法测定; 全磷采用高氯酸消解-钼锑抗比色法测定; 土壤有效磷采用 Brayl 法 (0.025~0.030 mol·L<sup>-1</sup>, 氟化铵) 浸提剂测定; 全钾和速效钾均使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP) 测定。

光合特性: 定期观测紫甘蓝生长状况, 于每月月底选择晴朗天气在 11:00~16:00 采用 Li-6400Xt 测定紫甘蓝不同生长时期 (幼苗期、莲座期、结球期、成熟期) 叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数。

产量和品质: 12 月底紫甘蓝收获后称量, 记录每个小区紫甘蓝产量, 并在每个小区选取长势基本一致的 10 株, 去掉外叶, 进行维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质和花青素等品质分析。其中: 可溶性蛋

白质采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定，维生素 C 采用 2,6-二氯酚靛比色法，还原糖采用 3,5-二硝基酚水杨酸比色法测定，花青素采用质量分数为 1% 盐酸浸提比色法测定<sup>[10]</sup>。

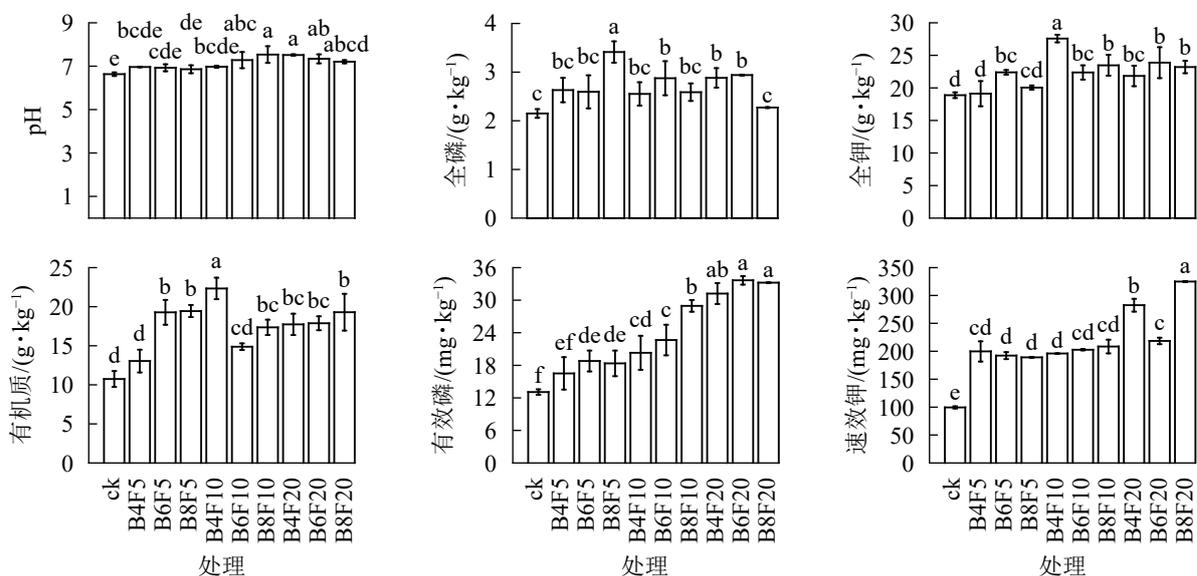
### 1.5 数据处理

数据采用 Excel 2016 进行整理，使用 Origin 2017 作图，采用 SPSS 21.0 统计分析软件进行双因素方差分析和多重比较，用 Duncan 法比较处理间的差异显著性 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 竹炭与有机肥配施对土壤基本理化性质的影响

由图 1 可知：竹炭与有机肥配施对紫甘蓝地土壤 pH 以及有机质、全磷、有效磷、全钾和速效钾质量分数均具有不同程度的影响。与对照相比，竹炭与有机肥配施能显著提高土壤速效钾质量分数 ( $P < 0.05$ )，同时高量有机肥与竹炭配施显著提高了土壤有效磷质量分数 ( $P < 0.05$ )。其中，pH 以 B8F10 处理最高；有机质和全钾以 B4F10 处理最高，分别提高了 107.93% 和 46.06%；全磷以 B8F5 处理最高，提高了 58.67%；有效磷以 B6F20 处理最高，提高了 157.44%；速效钾以 B8F20 最高，提高了 226.60%。



不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 1 竹炭与有机肥配施对土壤理化性质的影响

Figure 1 Effects of bamboo charcoal and organic fertilizer application on soil physical and chemical properties

在  $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量条件下，土壤有机质和全磷质量分数随竹炭比例的增加而增加，全钾和有效磷以 B6F5 处理较高，而对速效钾无显著影响 ( $P > 0.05$ )。在  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，土壤有机质和全钾质量分数以 B4F10 处理较高，全磷以 B6F10 处理较高，高比例竹炭的施用反而降低了土壤有机质和全磷质量分数，有效磷和速效钾质量分数随竹炭量的增加而增加，但对速效钾影响不显著。在  $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，土壤速效养分 (有效磷和速效钾质量分数) 均较高，有机质质量分数随竹炭比例的增加而增加，全磷、全钾和有效磷以 B6F20 处理最高，速效钾以 B8F20 处理最高。而在同一有机肥用量下，各处理间土壤 pH 均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝光合特性的影响

由图 2 可知：与对照相比，除紫甘蓝幼苗期外，竹炭和有机肥配施后紫甘蓝各生长时期的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数总体上有提高趋势。紫甘蓝叶片净光合速率从幼苗期到结球期不断增大，在结球期达到顶峰，成熟期逐渐减弱；叶片蒸腾速率和气孔导度 (除对照外) 在莲座期最大，结球期和成熟期逐渐减弱；除对照和 B4F5 处理外，叶片胞间二氧化碳摩尔分数在莲座期达到最大，紫甘蓝叶片光合作用从幼苗期到结球期逐渐增强，而成熟期逐渐减弱。与对照相比，除 B8F5 处理外，竹炭与有机肥配施对紫甘蓝叶片 4 个时期净光合速率均值提高了 1.14%~23.54%；竹炭与有机肥配施对紫甘蓝叶片 4 个时期蒸腾速率和胞间二氧化碳摩尔分数均值较对照分别提高了 3.01%~43.52% 和

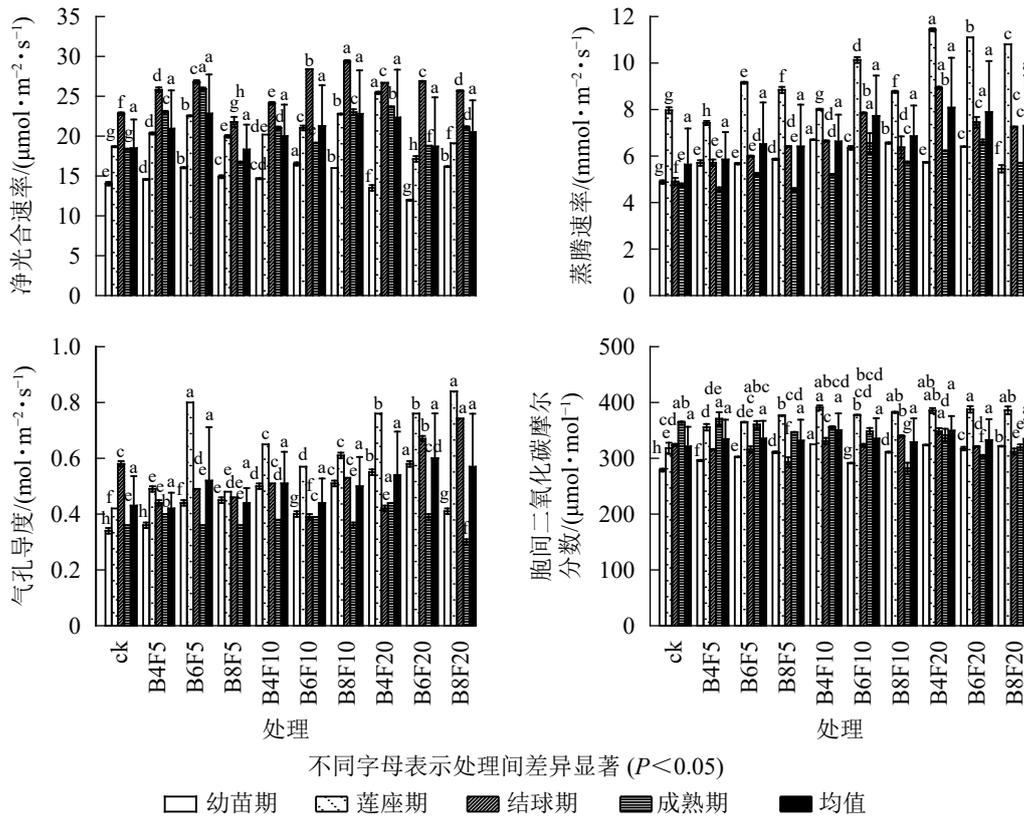


图2 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝日均光合特性的影响

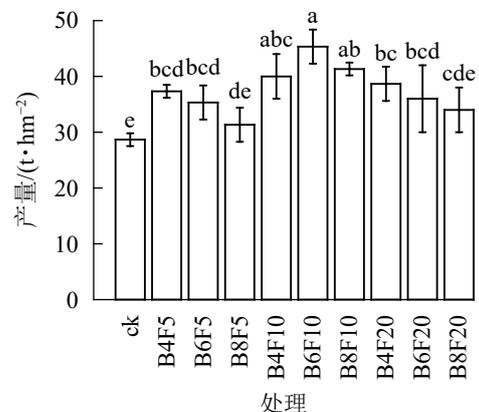
Figure 2 Effects of bamboo charcoal and organic fertilizer application on daily averaged photosynthetic characteristics of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*

2.33%~9.11%；除 B4F5 处理外，竹炭与有机肥配施对紫甘蓝叶片 4 个时期气孔导度均值较对照处理提高了 2.33%~39.54%。

在  $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，B6F5 处理各时期叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均能维持较高水平，与另外 2 个处理相比，叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度分别增加了 9.08%~24.55%、1.56%~11.28% 和 18.18%~23.81%，而对叶片胞间二氧化碳摩尔分数无显著差异。在  $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，各时期叶片净光合速率随竹炭比例的增加而增加，与 B4F10 相比，B6F10 和 B8F10 处理的净光合速率均值分别提高了 6.30% 和 13.84%；叶片蒸腾速率以 B6F10 处理较高，较 B4F10 和 B8F10 处理分别提高了 16.44% 和 12.70%，而对叶片气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数无显著性差异。在  $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，叶片净光合速率、蒸腾速率和胞间二氧化碳摩尔分数随竹炭量的增加而呈减弱趋势，B6F20 和 B8F20 较 B4F20 处理对叶片净光合速率、蒸腾速率和胞间二氧化碳摩尔分数分别降低了 8.93%~19.48%、2.41%~10.68% 和 4.48%~5.16%，而叶片气孔导度则以 B6F20 处理较高，较 B4F20 和 B8F20 处理分别提高了 11.11% 和 5.26%。

### 2.3 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝产量的影响

与对照相比，竹炭与有机肥配施均不同程度提高了紫甘蓝产量且各处理间表现不同，增产幅度为 9.28%~58.11%，其中以 B6F10 处理下紫甘蓝产量最高，其次为 B8F10 处理，紫甘蓝产量分别较对照提高了 58.11% 和 44.16% (图 3)。当有机肥用量为 5 和  $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时，紫甘蓝产量随竹炭用量的增加呈现下



不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图3 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝产量的影响

Figure 3 Effects of bamboo charcoal and organic fertilizer application on yield of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*

降的趋势；当有机肥用量为  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时，紫甘蓝产量以 B5F10 处理较高，但处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。综合来看， $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量下添加 6% 竹炭处理对紫甘蓝增产效果最佳。

#### 2.4 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝品质的影响

图 4 显示：与对照相比，竹炭与有机肥配施均提高了紫甘蓝维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质和花青素质量分数。紫甘蓝中维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质和花青素质量分数分别提高了 13.79%~33.29%、0.06%~11.17%、5.44%~27.97% 和 8.00%~33.88%，其中维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质和花青素质量分数分别以 B4F10、B8F5、B6F10、B6F10 处理下最高。在同一有机肥用量条件下，各处理间紫甘蓝中维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质和花青素质量分数无显著差异 ( $P > 0.05$ )，其中，在  $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，维生素 C 和花青素质量分数以 B6F5 处理较高，还原糖随竹炭量的增加略有增加，可溶性蛋白质以 B4F5 处理较高；在  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，维生素 C 质量分数随竹炭比例的增加而略微有下降的趋势，可溶性蛋白质和花青素质量分数以 B6F10 处理较高，还原糖无显著差异；在  $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  有机肥用量下，维生素 C、可溶性蛋白质和花青素质量分数以 B6F20 处理较高，而还原糖随竹炭比例的增加而降低。

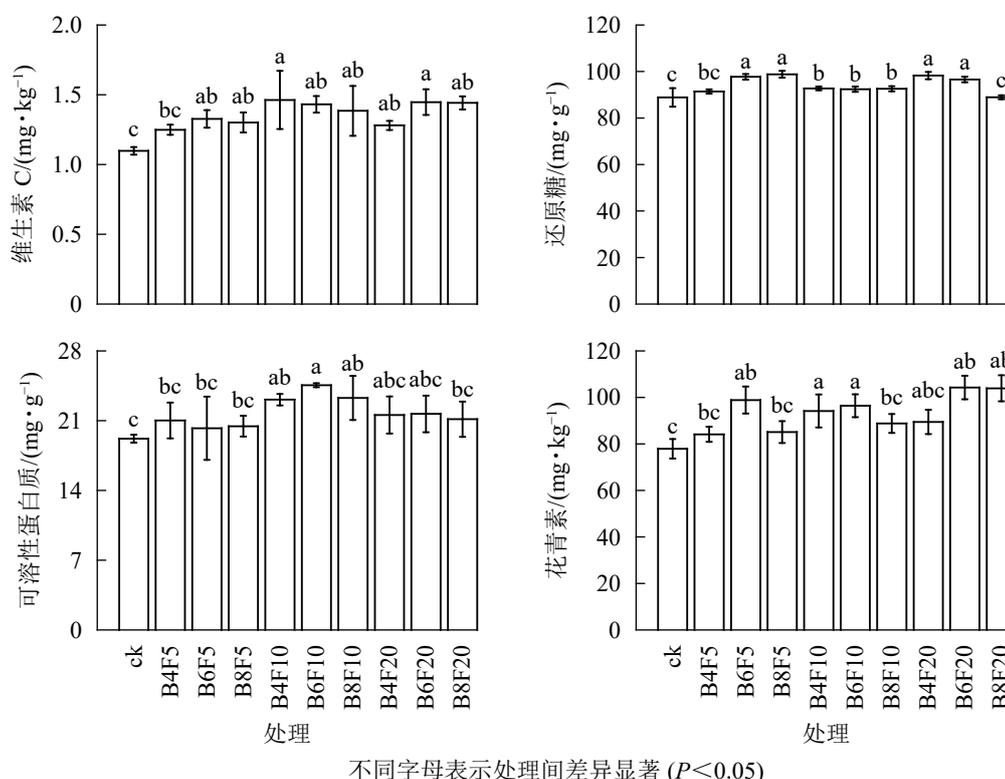


图 4 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝品质的影响

Figure 4 Effects of bamboo charcoal and organic fertilizer application on quality of *B. oleracea* var. *capitata* f. *rubra*

#### 2.5 方差分析

本研究土壤样品采集于紫甘蓝成熟期，因此，采用土壤基本理化性质、成熟期的紫甘蓝光合特性指标和产量及品质进行双因素和单因素方差分析。表 2 显示：竹炭添加比例对土壤速效钾、土壤全磷、有效磷质量分数和紫甘蓝光合特性有极显著影响 ( $P < 0.01$ )，对紫甘蓝还原糖和花青素质量分数有显著影响 ( $P < 0.05$ )；有机肥用量对土壤 pH、全磷、有效磷、全钾、速效钾质量分数及紫甘蓝净光合速率、蒸腾速率、胞间二氧化碳摩尔分数、产量和紫甘蓝还原糖、可溶性蛋白质质量分数有极显著影响 ( $P < 0.01$ )，对土壤有机质、紫甘蓝维生素 C 和花青素质量分数具有显著影响 ( $P < 0.05$ )；除土壤 pH 外，竹炭与有机肥的交互效应对土壤 pH 具有显著影响 ( $P < 0.05$ )；对土壤其他理化性质、紫甘蓝光合特性和还原糖质量分数均具有极显著影响 ( $P < 0.01$ )，而各处理对紫甘蓝可溶性蛋白质有显著影响 ( $P < 0.05$ )，对土壤理化性质和紫甘蓝光合特性、产量及其维生素 C、还原糖、花青素均具有极显著的影响 ( $P < 0.01$ )。

表2 方差分析

Table 2 Analysis of variance (*P*-values)

参数	双因素			单因素处理
	竹炭	有机肥	竹炭×有机肥	
pH	0.869	<0.001***	0.017*	<0.001***
有机质	0.419	0.011*	<0.001***	<0.001***
全磷	0.001**	<0.001***	<0.001***	<0.001***
有效磷	0.001**	<0.001***	<0.001***	<0.001***
全钾	0.522	<0.001***	<0.001***	<0.001***
速效钾	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***
净光合速率	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***
蒸腾速率	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***
气孔导度	<0.001***	0.902	<0.001***	<0.001***
胞间二氧化碳摩尔分数	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***
产量	0.081	<0.001***	0.199	<0.001***
维生素C	0.335	0.029*	0.334	0.005**
还原糖	0.041*	0.001**	<0.001***	<0.001***
可溶性蛋白质	0.807	0.003**	0.853	0.035*
花青素	0.027*	0.045*	0.203	0.006**

说明：\*、\*\*和\*\*\*分别表示在0.05、0.01和0.001水平上差异显著

### 3 讨论

#### 3.1 竹炭与有机肥配施对土壤基本理化性质的影响

紫甘蓝适宜生长环境趋向于中性<sup>[11]</sup>。本研究中竹炭 (pH 11.31) 和有机肥 (pH 7.63) 呈碱性，与对照 (pH 6.63) 相比，各竹炭与有机肥配施处理均不同程度地提高了土壤 pH，使土壤趋于中性。本研究发现：竹炭与有机肥配施能显著提高土壤有机质、有效磷和速效钾质量分数，同时提高土壤全磷和全钾质量分数。其原因可能是生物质炭和有机肥之间存在互作效应<sup>[12]</sup>，生物质炭通过与有机矿物的相互作用，形成有机-矿物复合物，促进有机肥中碳的稳定，增加土壤有机质质量分数；生物质炭的施用能抑制土壤中氮磷的淋失<sup>[13]</sup>，有机肥也能够对氮磷进行补偿<sup>[14]</sup>，从而提高了土壤氮磷养分含量，弥补生物质炭本身的养分亏缺，两者具有一定的协同作用<sup>[15]</sup>。竹炭与有机肥配施还提高了土壤中全钾和速效钾质量分数，这与贺丽群等<sup>[16]</sup>的研究结果相似。总之，从对土壤肥力性状的作用方式来看，生物质炭与有机肥配施对土壤具有一定的互补性，两者通过同化作用<sup>[17-19]</sup>，改善了作物对于养分的吸收及转运，促进作物对土壤营养元素的吸收。

#### 3.2 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝光合特性的影响

本研究表明：竹炭与有机肥配施提高了紫甘蓝各时期净光合速率、蒸腾速率和气孔导度，这说明竹炭与有机肥配施有利于改善紫甘蓝生长的生理活性强度<sup>[20]</sup>，增强对外界二氧化碳的捕获，导致光合作用强度增大。这可能是因为有机肥的施用可增强植物的光合性能<sup>[21]</sup>，竹炭添加提高了有机肥的利用效率，且高量 (20 t·hm<sup>-2</sup>) 或中量 (10 t·hm<sup>-2</sup>) 有机肥中添加 4% 或 6% 竹炭更利于提高紫甘蓝光合特性，提高有机物质的积累，增大光合作用强度。有机肥的施用可延缓叶片的衰老，增强叶片的光合作用和抗逆性<sup>[22]</sup>，同时，有机肥的施用可提高叶绿素含量，使得叶片叶肉细胞光合作用活性增加<sup>[23]</sup>，进而导致紫甘蓝光合作用强度增加。此外，竹炭与有机肥的配施为紫甘蓝生长提供了更多的养分。

#### 3.3 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝产量的影响

大多研究结果显示：生物质炭与有机肥配施使作物增产效果更佳，更益于植物的生长。应金耀等<sup>[24]</sup>研究表明：生物质炭与有机肥配合施用使青菜 *Brassica chinensis* 产量高于单施生物炭处理，在促进蔬菜生长方面优于其他处理。本研究显示：竹炭与有机肥配施处理的紫甘蓝产量均高于对照，其中施用 10 t·hm<sup>-2</sup> 的有机肥下添加 6% 生物质炭增产效果更佳，较对照增产 58.11%，这与 LI 等<sup>[25]</sup> 研究结果类

似。生物质炭与有机或无机肥料配合施用，作物增产效果更佳<sup>[26]</sup>。韩晓亮等<sup>[27]</sup>研究表明：适量生物质炭的施用可提高根系代谢活动，确保作物稳定增产，在一定程度上可促进作物产量的积累，进而提高作物长势。但也有不一致的研究结果，表明生物质炭与有机或无机肥料配施可能受多种因素的影响，包括土壤类型、生物质炭种类、气候条件<sup>[28]</sup>、施用量和作物种类<sup>[29]</sup>等，导致生物质炭与有机或无机肥料配合施用的增产效应不同。

### 3.4 竹炭与有机肥配施对紫甘蓝品质的影响

紫甘蓝含有丰富的维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质、花青素等营养物质<sup>[30]</sup>，施用有机肥（粪便、秸秆等）有利于提高养分的利用效率<sup>[31]</sup>，促进紫甘蓝对养分的吸收，从而改善紫甘蓝品质。生物质炭与有机肥的配施能提高农作物品质，如张宇等<sup>[32]</sup>研究发现：氮肥减量 60% 和有机肥增加 40% 基础上添加生物质炭提高了大蒜 *Allium sativum* 鳞茎及蒜薹中的游离氨基酸含量、可溶性糖及蔗糖含量；易洪海等<sup>[33]</sup>研究表明：生物质炭与有机肥配合施用使藜蒿 *Artemisia selengensis* 中维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白质分别增加 4.80%~6.40%、1.86%~3.65%、0.74%~2.22%。本研究中，与对照相比，竹炭与有机肥配施均提高了紫甘蓝维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质和花青素质量分数，提高幅度分别为 13.79%~33.29%、0.06%~11.17%、5.44%~27.97% 和 8.00%~33.88%，这可能是由于有机肥提高了土壤养分含量，尤其速效钾和全钾为紫甘蓝生长所必需的营养成分。双因素方差分析显示：有机肥对紫甘蓝品质具有极显著或显著影响，适量有机肥与生物质炭配施可以促进农作物生长发育，提高蔬菜品质<sup>[34]</sup>。本研究结果显示：6% 竹炭与中量 ( $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 有机肥配施对紫甘蓝可溶性蛋白质和花青素质量分数提升效果更佳，且产量较高。这可能是由于生物质炭孔隙发达，有机肥肥效长，可为紫甘蓝的生长持续供应养分。

## 4 结论

与对照相比，竹炭与有机肥配施提高了土壤 pH，同时提高了有机质、全磷、有效磷、全钾和速效钾质量分数；提高了紫甘蓝叶片除幼苗期外其他时期净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数；总体上提高了紫甘蓝产量，同时提高了紫甘蓝维生素 C、还原糖、可溶性蛋白质、花青素质量分数。从紫甘蓝增产效益来看，添加 6% 竹炭与  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的有机肥为最佳施肥配比，该处理下紫甘蓝可溶性蛋白质和花青素质量分数最高。竹炭、有机肥、竹炭与有机肥的交互效应对土壤养分质量分数与紫甘蓝叶片光合特性指标、产量、品质有极显著或显著的影响，竹炭与有机肥配施为紫甘蓝生长持续供应养分，促进紫甘蓝生长，提高紫甘蓝产量和品质。

## 5 参考文献

- [1] 单瑞峰, 宋俊瑶, 邓若男, 等. 不同类型生物炭理化特性及其对土壤持水性的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 63-68. SHAN Ruifeng, SONG Junyao, DENG Ruonan, et al. Physical and chemical properties of biochar produced from different materials and effect on soil water holding capacity[J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2017, 37(5): 63-68.
- [2] 郑孟菲, 程利峰, 胡新喜, 等. 生物炭与不同用量氮肥配施对小白菜生长和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(4): 30-34. ZHENG Mengfei, CHENG Lifeng, HU Xinxi, et al. Effects of combined application of biochar and different amounts of nitrogen fertilizer on the growth and quality of pakchoi[J]. *Chin Cucurbits Veg*, 2019, 32(4): 30-34.
- [3] 张洪昌, 段继贤, 李星林. 设施蔬菜高效栽培与安全施肥[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2017.
- [4] 王玫, 徐少卓, 刘宇松, 等. 生物炭配施有机肥可改善土壤环境并减轻苹果连作障碍[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 220-227. WANG Mei, XU Shaozhuo, LIU Yusong, et al. Improvement of soil properties and control of apple replanting disease by combined application of biochar and nitrogen fertilizer [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2018, 24(1): 220-227.
- [5] 李喜凤, 杨小妮, 罗艳君, 等. 生物炭及有机肥对苹果园土壤有机碳组分及果树生长的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(4): 617-624. LI Xifeng, YANG Xiaoni, LUO Yanjun, et al. Effect of combination of biochar and organic fertilizers on soil organic carbon fractions, growth and yield of apple orchard [J]. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2017, 26(4): 617-624.
- [6] 张毅博, 韩燕来, 吴名字, 等. 生物炭与有机肥施用对黄褐土土壤酶活性及微生物碳氮的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(13): 113-118.

- ZHANG Yibo, HAN Yanlai, WU Mingyu, *et al.* Effect of biochar and organic fertilizer on soil enzyme activities and microbial carbon and nitrogen in yellow-cinnamon soil [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2018, **34**(13): 113 – 118.
- [7] 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 [J]. *Field Crops Res*, 2017, **214**: 25 – 37.
- [8] SÁNCHEZ-MONEDERO M A, CAYUELA M L, SÁNCHEZ-GARCÍA M, *et al.* Agronomic evaluation of biochar, compost and biochar-blended compost across different cropping systems: perspective from the European Project FERTIPLUS [J]. *Agronomy*, 2019, **9**(5): 225. doi: [10.3390/agronomy9050225](https://doi.org/10.3390/agronomy9050225).
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] 覃舟. 施用沼液对紫甘蓝产量、营养品质及土壤质量的影响[J]. *江西农业学报*, 2009, **21**(7): 83 – 86.
- QIN Zhou. Effect of biogas slurry application on yield nutrition quality of purple cabbage and soil quality [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2009, **21**(7): 83 – 86.
- [12] SCHULZ H. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2012, **175**(3): 410 – 422.
- [13] SHI Yulong, LIU Xingren, ZHANG Qingwen, *et al.* Biochar and organic fertilizer changed the ammonia-oxidizing bacteria and archaea community structure of saline-alkali soil in the North China Plain [J]. *J Soil Sediment*, 2019, **20**(3): 12 – 23. doi: [10.1007/s11368-019-02364-w](https://doi.org/10.1007/s11368-019-02364-w).
- [14] 邱吟霜, 王西娜, 李培富, 等. 不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(6): 182 – 189.
- QIU Yinshuang, WANG Xina, LI Peifu, *et al.* Different kinds of organic fertilizers and amounts on dryland soil fertility and corn yield in the current season [J]. *Soil Fert Sci China*, 2019(6): 182 – 189.
- [15] 燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(9): 303 – 307.
- YAN Jinrui, LÜ Qixin, GAO Zengping, *et al.* Effects of organic fertilizer and biochar on physicochemical properties of sandy soil [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, **47**(9): 303 – 307.
- [16] 贺丽群, 张庆金, 吴培栋, 等. 有机肥与生物炭互作对城市底土肥力及生菜生长的影响[J]. *南方农业学报*, 2019, **50**(8): 1701 – 1708.
- HE Liqun, ZHANG Qinjin, WU Peidong, *et al.* Effects of compost and biochar interaction on urban subsoil fertility and plant growth of lettuce [J]. *J Southern Agric*, 2019, **50**(8): 1701 – 1708.
- [17] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(2): 468 – 475.
- YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, *et al.* Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2017, **23**(2): 468 – 475.
- [18] 张文锋, 周际海, 袁颖红, 等. 低剂量生物质炭对旱地红壤增肥增产效果[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(3): 647 – 654.
- ZHANG Wenfeng, ZHOU Jihai, YUAN Yinhong, *et al.* Effects of low-dose biochar on the enhancement of fertility and yield in upland red soils [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35**(3): 647 – 654.
- [19] 彭辉辉, 刘强, 荣湘民, 等. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米养分利用及产量的影响[J]. *南方农业学报*, 2015, **46**(8): 1396 – 1400.
- PENG Huihui, LIU Qiang, RONG Xiangmin, *et al.* Effects of biochar, organic fertilizer and chemical fertilizer combined application on nutrient utilization and yield of spring maize [J]. *J Southern Agric*, 2015, **46**(8): 1396 – 1400.
- [20] 霍昭光, 孙志浩, 邢雪霞, 等. 北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(9): 1317 – 1325.
- HUO Zhaoguang, SUN Zhihao, XING Xuexia, *et al.* Effects of water and fertilizer integration on growth, morphology, physiology and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco in the North China [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2017, **25**(9): 1317 – 1325.
- [21] 郭喜军, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥用量及有机无机肥配比对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(5): 806 – 816.
- GUO Xijun, XIE Junhong, LI Lingling, *et al.* Appropriate nitrogen fertilizer rate and organic N ratio for satisfactory photosynthesis and yield of maize in dry farming area of Longzhong, Gansu Province [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2020, **26**(5):

- 806 – 816.
- [22] 杨森, 尹显慧, 龙友华, 等. 竹炭配施有机肥对砒嘧磺隆胁迫下土壤微生物特性及烟草生长的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(9): 68 – 76.  
YANG Seng, YIN Xianhui, LONG Youhua, *et al.* Effects of combined application of bamboo charcoal and organic fertilizers on soil microbial properties and growth of tobacco plants under rimsulfuron stress [J]. *J Henan Agric Sci*, 2018, 47(9): 68 – 76.
- [23] 王星辰, 詹雨珊, 束良佐. 氮肥与生物炭配施对采煤塌陷区复垦土壤性质及菠菜生长的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(6): 80 – 83.  
WANG Xingchen, ZHAN Yushan, SHU Liangzuo, *et al.* Effects of nitrogen and biochar combined application on Spinach growth and reclamation soil property in coal mining subsidence area [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2018, 46(6): 80 – 83.
- [24] 应金耀, 阮弋飞, 邬奇峰, 等. 有机肥配施生物炭对土壤肥力与蔬菜生长的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(16): 82 – 87.  
YING Jinyao, RUAN Yifei, WU Qifeng, *et al.* Combined application of organic manure and biochar affects soil fertility and vegetable growth [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2019, 35(16): 82 – 87.
- [25] LI Changjian, XIONG Yingwu, QU Zhongyi, *et al.* Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China [J]. *Geoderma*, 2018, 331: 100 – 108.
- [26] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 159 – 165.  
YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, *et al.* Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2018, 34(3): 159 – 165.
- [27] 韩晓亮, 王秀茹, 侯琨, 等. 黑土夏玉米施用生物炭最佳施用时期和最佳用量[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(1): 96 – 106.  
HAN Xiaoliang, WANG Xiuru, HOU Kun, *et al.* Application period and dosage optimums for biochar additions in black soil with summer maize [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, 36(1): 96 – 106.
- [28] 马嘉伟, 胡杨勇, 叶正钱, 等. 竹炭对红壤改良及青菜养分吸收、产量和品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 655 – 661.  
MA Jiawei, HU Yangyong, YE Zhengqian, *et al.* Bamboo char for soil fertility improvement and nutrient uptake, yield, and quality in *Brassica chinensis* [J]. *J Zhejiang A&F University*, 2013, 30(5): 655 – 661.
- [29] AMIN A E-E A Z. Amelioration of calcareous sandy soil productivity via incorporation between biochar and some organic manures [J]. *Arabian J Geosci*, 2018, 11(23): 749 – 759.
- [30] 杭园园, 梁颖, 李艺, 等. 部分紫色蔬菜中酚类物质及维生素 C 含量分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 16 – 20, 26.  
HANG Yuanyuan, LIANG Ying, LI Yi, *et al.* Analysis of phenolic compounds and vitamin C in some purple vegetables [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(4): 16 – 20, 26.
- [31] 李传章, 李吉进, 黄景, 等. 不同有机物料在紫甘蓝上应用的产量及养分效应[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(4): 597 – 602.  
LI Chuazhang, LI Jijin, HUANG Jing, *et al.* Effects of application of different organic materials on the yield and nutrients of purple cabbage [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2012, 24(4): 597 – 602.
- [32] 张宇, 徐刚, 樊小雪, 等. 生物炭施用及氮肥与有机肥配施对大蒜养分积累及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(11): 115 – 121.  
ZHANG Yu, XU Gang, FAN Xiaoxue, *et al.* Effects of biochar application and combination of nitrogen and organic fertilizer on nutrient accumulation and quality of garlic [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, 48(11): 115 – 121.
- [33] 易洪海, 杨利, 张成, 等. 生物炭与有机肥配合对藜蒿产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2019, 43(8): 1 – 6.  
YI Honghai, YANG Li, ZHANG Cheng, *et al.* Effects of biochar and organic fertilizer on yield and quality of *Artemisia selengensis* Turca [J]. *Northern Hortic*, 2019, 43(8): 1 – 6.
- [34] SUBEDI R, TAUPE N, IKOYI I, *et al.* Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 550: 924 – 933.