

## 生物炭和AM真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响

王岩, 周鹏, 白立伟, 吴康云, 邢丹, 郭涛, 张成铭

引用本文:

王岩, 周鹏, 白立伟, 等. 生物炭和AM真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(10): 1600–1608.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200196>

(向下翻页, 阅读全文)

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 生防链霉菌配施棉秆炭对连作棉田土壤微生物区系的影响

Effect of cotton stalk biochar application on soil microflora of continuous cotton cropping under use of antagonistic actinomycetes

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 400–409 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160583>

#### 冬小麦免耕覆盖与有机栽培对土壤微生物群落组成的影响

Effects of no-tillage, mulching and organic fertilization on soil microbial composition in winter wheat field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 267–276 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180583>

#### 牛粪和生物炭对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响

Effects of cow dung and biochar on root growth, soil properties and nitrogen utilization of apple

中国生态农业学报. 2018, 26(12): 1795–1801 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180394>

#### 马铃薯连作栽培对土壤微生物多样性的影响

Effects of continuous potato cropping on the diversity of soil microorganisms

中国生态农业学报. 2015(5): 589–596 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140888>

#### 土著AMF与氮形态对辣椒-菜豆间作系统植株氮利用及其影响因素研究

Effects of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen forms on plant nitrogen utilization and the influencing factors in a pepper-common bean intercropping system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 245–254 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190575>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200196

王岩, 周鹏, 白立伟, 吴康云, 邢丹, 郭涛, 张成铭. 生物炭和 AM 真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1600-1608

WANG Y, ZHOU P, BAI L W, WU K Y, XING D, GUO T, ZHANG C M. Effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of continuous cropping pepper and soil nutrient status[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1600-1608

# 生物炭和 AM 真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响\*

王岩<sup>1</sup>, 周鹏<sup>1</sup>, 白立伟<sup>1</sup>, 吴康云<sup>1</sup>, 邢丹<sup>1\*\*</sup>, 郭涛<sup>2</sup>, 张成铭<sup>3</sup>

(1. 贵州省农业科学院辣椒研究所 贵阳 550006; 2. 西南大学资源环境学院 重庆 400716;  
3. 北海道大学农学研究院 札幌市 060-0808)

**摘要:** 研究生物炭和丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌对连作辣椒生长和土壤养分的影响, 可为辣椒连作土壤改良和新型肥料的开发提供理论依据。采用温室盆栽试验, 设置4个生物炭添加水平(0、1%、2%、3%), 2个接菌水平[接菌(+AM)和不接菌(-AM)]。辣椒生长60 d后收获并测定其生理指标、土壤酶活性及土壤养分含量。结果表明, 施加生物炭和接种AM真菌处理促进了连作辣椒的生长, 提高了辣椒叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量。接种AM真菌对辣椒的促生效果弱于生物炭, 而生物炭和AM真菌配施的促生效果最佳。接种AM真菌促进辣椒对P吸收的效果优于生物炭; 但对于K吸收来说, 施加生物炭的效果优于接菌。生物炭(3%)和AM真菌配施条件下, 辣椒根部N、P、K含量分别较对照(0生物炭和-AM处理)显著提高74.04%、106.42%和78.82%。生物炭(3%)与AM真菌配施处理菌根侵染效果最佳, 侵染率高达58.96%, 较0生物炭+AM处理提高41.59%。土壤pH随生物炭添加量的增加呈增加趋势, 但差异不显著。土壤脲酶、蔗糖酶活性随生物炭添加量的增加呈增加趋势, 且差异显著, 接种AM真菌处理对其影响不显著。土壤速效钾、有效磷、有机质含量随生物炭添加量的增加而增加, 接种AM真菌对土壤有机质含量、阳离子交换量(CEC)无显著影响。土壤速效钾、有效磷、碱解氮含量均在生物炭(3%)和AM真菌配施条件下达最大。与单一处理相比, 生物炭和AM真菌配施在促进连作辣椒生长、改善连作土壤养分方面具有显著的协同增效作用, 尤其是3%生物炭与AM真菌配施条件下效果最佳。

**关键词:** 辣椒; 生物炭; AM真菌; 土壤养分; 连作障碍; 协同效应

中图分类号: S641.3; S156.2

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of continuous cropping pepper and soil nutrient status\*

WANG Yan<sup>1</sup>, ZHOU Peng<sup>1</sup>, BAI Liwei<sup>1</sup>, WU Kangyun<sup>1</sup>, XING Dan<sup>1\*\*</sup>, GUO Tao<sup>2</sup>, ZHANG Chengming<sup>3</sup>

(1. Pepper Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3. Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0808, Japan)

\* 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-24-G-19)和贵州省科技计划项目([2017]5709, [2018]2329)资助

\*\* 通信作者: 邢丹, 主要研究方向为辣椒栽培管理。E-mail: 2004xingdan@163.com

王岩, 主要从事植物养分资源管理研究。E-mail: 270237985@qq.com

收稿日期: 2020-03-17 接受日期: 2020-05-25

\* This study was supported by the Special Fund for Modern Agricultural Industrial Technology System of China (CARS-24-G-19) and the Science and Technology Project of Guizhou Province ([2017]5709, [2018]2329).

\*\* Corresponding author, E-mail: 2004xingdan@163.com

Received Mar. 17, 2020; accepted May 25, 2020

**Abstract:** In this study, a pot experiment was conducted to investigate the synergistic effects of biochar and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on the alleviation of the continuous cropping obstacles of pepper, improve soil nutrient status, and further provide theoretical foundations for continuous cropping soil improvement and new fertilizer development. A total of eight treatments were set as growth conditions of pepper consisting of four biochar addition levels (0, 1%, 2%, and 3%) with or without AM fungal inoculations (+AM and -AM), each treatment was replicated four times. Peppers were harvested after 60 days, and the physiological index, soil enzyme activity, and soil nutrient content were analyzed. Results showed that the biochar+AM treatments significantly promoted the growth of successive cropping pepper and increased the net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomata conductance ( $G_s$ ), and chlorophyll content in pepper leaves. The treatments of only AM fungi inoculation also showed an increase in the growth and yield of peppers; however, biochar+AM had the best combined treatment effect. The effect of only AM fungal inoculation on P absorption in pepper plants and fruits showed a better result compared with that of only biochar, while the effect was opposite on K absorption. Moreover, the contents of N, P, and K in the root of pepper treated with 3% biochar+AM fungi increased by 74.04%, 106.42%, and 78.82%, compared with 0 biochar without AM fungi (control), respectively. The mycorrhizal infection rate under the treatment of 3% biochar+AM was 58.96%, which was 41.59% higher than that of the control. Soil pH and activities of urease and sucrase increased with an increase in biochar application; although, there was no significant difference in pH. AM inoculation showed not significant effects on soil enzyme activity. In addition, the available contents of K, P, and organic matter in the soil also increased with an increase in biochar application. The most significant improvement was achieved under the 3% biochar+AM treatment, while the treatment of only AM fungal inoculation showed no marked effect on these indexes. In conclusion, biochar, especially the treatment of 3% biochar+AM, had a significant synergistic effect on the growth and soil nutrient improvement of the continuous cropping pepper.

**Keywords:** Pepper; Biochar; AM fungi; Soil nutrients; Continuous cropping obstacle; Synergistic

辣椒(*Capsicum annuum* L.)作为我国第一大蔬菜作物<sup>[1]</sup>, 因其营养丰富、高经济价值, 受到广大消费者和种植者的青睐。但随着辣椒市场需求量和种植经济效益不断增加, 导致种植区出现同一地块连续种植多季辣椒的现象。即使在正常的栽培管理条件下, 在同一块土地连续种植同一种作物或近亲缘作物会导致植株生长变弱、病虫害加剧、产量降低、品质下降等现象, 即连作障碍<sup>[2]</sup>。辣椒连作障碍是全世界主要辣椒产区普遍存在的问题, 已成为制约辣椒产业可持续发展的一个重要因素。因此, 寻求安全有效的缓解和克服辣椒连作障碍的措施迫在眉睫。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是一种能够与 80%以上的陆生植物形成共生体的根际微生物<sup>[3]</sup>, 大量存在于农田土壤及各种逆境环境中, 能够增强宿主植物在逆境中的耐受性<sup>[4]</sup>, 改善宿主植物的矿质营养<sup>[5]</sup>, 尤其是磷元素。AM 真菌与作物共生不但可以增加宿主对无机磷的吸收<sup>[6]</sup>, 还可以与解磷细菌互作提高有机磷的利用效率<sup>[7]</sup>。此外, 在连作土壤中, AM 真菌可改善连作土壤环境, 诱导植物增强对连作土传病害的抗病性<sup>[8]</sup>, 并与其他有益土壤微生物互作缓解连作障碍<sup>[9]</sup>。

生物炭(biochar)作为近几年新兴的集肥料、吸附剂和改良剂于一体的新型材料, 因其独特的结构特征和理化性状而被广泛应用于农业生产中。生物炭

能够增加土壤有机物质含量, 提高土壤保肥<sup>[10]</sup>、持水能力<sup>[11]</sup>, 促进作物对营养物质的吸收。生物炭的增产效应已在水稻(*Oryza sativa* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、番茄(*Solanum lycopersicum* L.)和甜椒(*Capsicum frutescens* L.)等农作物上得到验证<sup>[12-14]</sup>。此外, 生物炭的施用可以改善土壤微生物群落结构, 促进有益微生物的生长<sup>[15]</sup>。生物炭与有益微生物或生防微生物配施的协同技术被越来越多的关注。已有研究表明, 生物炭和 AM 真菌配施对促进植物生长<sup>[16]</sup>、改良土壤<sup>[17]</sup>有显著的协同增效作用。那么, 生物炭和 AM 真菌配施是否具有缓解辣椒连作障碍的协同作用? 目前有关问题尚鲜有研究。基于此, 本研究以辣椒连作土壤为基质, 研究生物炭和 AM 真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响, 以期生物炭和 AM 真菌协同技术应用于辣椒生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试辣椒品种为‘辣研 102’, 由贵州省辣椒研究所选育。种子用 10%  $H_2O_2$  表面消毒 10 min, 随后用蒸馏水冲洗 3 次, 在 25 °C 恒温培养箱中催芽 1 夜。在盛有辣椒专用育苗基质的漂盘中进行漂浮育苗, 随时补充水分和养分, 待辣椒出现 4~5 片真叶时,

选择生长状况一致的辣椒幼苗进行移栽。

供试土壤采自贵州省毕节市大方县羊场镇桶井村(105°41'0.62"E, 27°03'42.20"N), 该试验地已经连续种植辣椒 7 年。土壤类型为黄壤土, 土壤 pH 为 6.20, 速效钾 121.33 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷 29.68 mg·kg<sup>-1</sup>, 硝态氮 11.56 mg·kg<sup>-1</sup>, 铵态氮 4.32 mg·kg<sup>-1</sup>, 有机质 9.45 g·kg<sup>-1</sup>。收集 0~20 cm 耕层土壤, 多点取样混匀使用。

供试生物炭为水稻稻壳、秸秆混合物经 450 缺氧条件下裂解 9 min 制成, 自然冷却, 研磨后过 100 目筛备用。其基本理化性质为: pH 9.9, 有机碳 265.32 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 2.31 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 1.89 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 30.64 g·kg<sup>-1</sup>。

试验菌剂为西南大学资源环境学院植物营养学实验室惠赠的根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradicis*<sup>[18]</sup>, Ri), 菌剂包含菌根真菌孢子和植物根段。本试验所用菌剂以河砂和土壤的混合物作为基质, 以三叶草(*Trifolium repens* L.)和玉米为宿主将原种扩繁而得, 孢子密度为 20~30 个·g<sup>-1</sup>。

## 1.2 试验设计

试验于 2019 年 7—9 月在贵州省农业科学院辣椒研究所植物生长室展开。采用二因素交互试验, 共设置 2 个接菌水平[接菌(+AM)和不接菌(-AM)], 4 个生物炭添加量水平(0、1%、2%、3%, 每盆土壤生物炭添加量分别为 0×2 500 g=0 g、1%×2 500 g=25 g、2%×2 500 g=50 g、3%×2 500 g=75 g)。试验共 8 个处理, 每个处理 4 个重复。将不同量生物炭与土壤混合均匀装入塑料花盆(高 17.5 cm, 底面直径 16 cm)至 2/3 处, 将接菌菌剂层铺其上, 再装入剩余土壤, 每盆净重 2.5 kg, 接菌量为每盆 350 g。不接菌(-AM)处理分别添加相应质量的灭菌土壤, 保持各处理每盆重量一致。生长期每隔 2 d 用称重法补充去离子水, 水分保持在田间最大持水量的 75%左右。在光照植物生长室内培养 60 d 后收获, LED 植物生长灯补充光照 14 h·d<sup>-1</sup>, 保持室温(25±3)。

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 生长指标和光合指标

株高、茎粗、生物量: 辣椒株高、茎粗于收获前用刻度尺、游标卡尺测定。植物生长 60 d 后将地上部、根部、果实分别收获, 植株地上部和根系样品洗净后用滤纸吸干, 然后放入烘箱中, 先 105 杀青 30 min 后 70 烘干至样品恒重, 分别称取干物质生物量, 计算干重。

叶片指数: 辣椒生长 60 d 后, 每个处理随机选

择 3 株辣椒测定, 用扫描式叶面积测量仪(YMJ-B)测定叶面积, 单株叶面积等于所有叶片面积总和。叶面积指数(LAI)指每盆辣椒叶面积之和与塑料花盆横切面面积的商。

光合参数: 采用美国 Li-Cor 公司生产的 LI-6800 型便携式光合系统分析仪在定植后 58 d 上午 09:00—11:00, 选取植株从上向下第 3 节位新成熟叶片, 分别测定辣椒叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $T_r$ ); 每个处理选取 3 株, 每株辣椒选取代表性 3 片叶测定后取其平均值。测定光照强度为 1 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

叶绿素含量: 直接浸取法。在光合参数测定完采集叶片, 每个处理选具有代表性 4 片叶, 除去叶脉, 将剩余部分剪为 2 mm 左右细丝, 混匀称取 0.5 g 样品放入 10 mL 具塞离心管中, 用 80%丙酮定容至刻度, 于暗柜中静置 72 h 浸取, 取上清液于分光光度计下测定吸光度, 计算叶绿素含量。

### 1.3.2 菌根侵染率

根系用去离子水洗净, 剪成 1 cm 左右的根段, 混匀后随机取约 1 g, 按照方格交叉法测定 AM 真菌侵染率<sup>[19-20]</sup>。

### 1.3.3 土壤和植株养分含量

植株根部、地上部养分含量: 参照鲁如坤<sup>[21]</sup>的方法, 样品经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 全氮含量采用凯氏定氮法测定, 全磷含量采用钼锑抗比色法测定, 全钾含量采用火焰光度法测定。

根围土壤养分含量: 参照鲁如坤<sup>[21]</sup>的方法, 土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法)测定, 土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定, 土壤有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定。

pH 测定: 采用 pH 计(上海精密科学仪器有限公司, 雷磁 pHs—3C)进行测定, 水土比为 5 : 1。

### 1.3.4 土壤酶活性

土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定, 以 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sub>3</sub>-N 的质量表示脲酶活性; 土壤蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 其活性以 24 h 后 1 g 土壤产生 1 mg 还原糖表示; 采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性, 结果以酚含量(37 °C, 24 h)表示<sup>[22]</sup>。

## 1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 进行图表制作; 采用 SPSS 24.0 软件对数据进行统计分析, LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭和 AM 真菌配施对辣椒生长与侵染率的影响

由表 1 可知, 添加生物炭和接种 AM 真菌显著促进辣椒生长。辣椒株高、茎粗、地上部生物量和根部生物量均随生物炭添加量的增加呈增加趋势, 且差异显著( $P<0.05$ ), 各生长指标均在 3% 生物炭添加和 AM 真菌配施处理时达到最大。相同生物炭添加条件下, 接种 AM 真菌显著增加辣椒的单株果重( $P<0.05$ ), 0、1%、2%、3% 生物炭添加量处理下,

接菌处理使得辣椒单株果重分别提高 26.69%、10.85%、21.54%、28.09%, 且差异显著( $P<0.05$ )。接种 AM 真菌对辣椒根系有良好的侵染效果, 其侵染率均在 40% 以上, 说明 AM 真菌与辣椒根系能够建立较好的共生关系。施用生物炭(3%)与接种 AM 真菌配施处理时菌根侵染效果最佳, 侵染率高达 58.96%, 较无生物炭添加处理提高 41.59%。总体而言, 接种 AM 真菌对促进辣椒生长、产量形成效果弱于生物炭, 而生物炭和 AM 真菌配施处理效果最佳。

表 1 不同生物炭和 AM 真菌处理对辣椒生长的影响  
Table 1 Effects of different treatments of biochar and AM fungus on pepper growth

| 生物炭施用量<br>Biochar rate (%) | 接菌<br>AM inoculation | 株高<br>Plant height (cm) | 茎粗<br>Stem diameter (mm) | 生物量 Biomass [g(DW)·pot <sup>-1</sup> ] |              | 单株果重<br>Fruit weight (g·pot <sup>-1</sup> ) | 侵染率<br>Inoculation rate (%) |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
|                            |                      |                         |                          | 地上部 Shoot                              | 根部 Root      |                                             |                             |
| 0                          | -AM                  | 26.97±0.34e             | 3.04±0.11d               | 7.50±0.35e                             | 7.28±1.84e   | 6.18±0.33f                                  |                             |
| 1                          | -AM                  | 42.07±0.57b             | 4.06±0.38bc              | 16.93±0.87b                            | 12.18±2.01cd | 10.23±0.37d                                 |                             |
| 2                          | -AM                  | 40.17±0.61bc            | 3.92±0.08bc              | 15.78±0.73bc                           | 15.03±0.74bc | 13.55±0.74c                                 |                             |
| 3                          | -AM                  | 39.57±1.70c             | 4.20±0.31ab              | 16.87±0.94b                            | 11.70±0.48d  | 15.41±0.93b                                 |                             |
| 0                          | +AM                  | 29.01±0.69e             | 3.48±0.49cd              | 10.47±3.07de                           | 6.52±1.37e   | 7.83±0.65e                                  | 41.64±1.42d                 |
| 1                          | +AM                  | 36.47±1.26d             | 3.58±0.15bcd             | 12.87±1.29cd                           | 10.52±1.14d  | 11.34±1.06d                                 | 45.99±1.22c                 |
| 2                          | +AM                  | 41.12±1.23bc            | 3.99±0.08bc              | 16.85±0.51b                            | 17.53±0.90b  | 16.47±0.78b                                 | 52.55±1.22b                 |
| 3                          | +AM                  | 49.73±1.09a             | 4.68±0.22a               | 25.72±1.76a                            | 21.83±1.90a  | 19.74±0.80a                                 | 58.96±1.27a                 |
| 显著性 Significance           |                      |                         |                          |                                        |              |                                             |                             |
| 接菌 Inoculation (m)         |                      | **                      | ns                       | **                                     | **           | ***                                         | ***                         |
| 生物炭 Biochar (b)            |                      | ***                     | ***                      | ***                                    | ***          | ***                                         | ***                         |
| m×b                        |                      | ***                     | ns                       | ***                                    | ***          | *                                           | ***                         |

+M: AM 真菌接种处理; -M: 未接种处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。\*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; ns: 影响不显著。+M: inoculation of AM fungus; -M: no AM fungus inoculation. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different treatments at 5% level. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; ns: no significant effect.

### 2.2 生物炭与 AM 真菌配施对辣椒光合特性的影响

生物炭和 AM 真菌接种处理对辣椒叶面积指数、叶绿素含量、植株  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  的影响极显著( $P<0.001$ ), 而生物炭和接菌交互效应对叶绿素含量影响不显著(表 2)。在相同接菌条件下, 叶绿素含量随生物炭添加量的增加呈现增加趋势; 同一生物炭添加量(0、1%、2%、3%)下, 接菌处理显著提高了叶绿素含量( $P<0.05$ ), 分别提高 9.43%、9.92%、6.05%、5.56%。未接菌条件下,  $P_n$  在 3% 生物炭添加时达最大, 其他生物炭添加量变化对  $P_n$  影响差异不显著; 接菌条件下,  $P_n$  随生物炭添加量的增加而显著提高。 $G_s$  与  $P_n$  呈同样的变化趋势。无论接菌与否,  $T_r$  均随生物炭添加量的增加而显著提高( $P<0.05$ ), 且在 3% 生物炭添加量和 AM 真菌配施处理时达最大。

### 2.3 生物炭和 AM 真菌配施对辣椒植株养分含量的影响

由表 3 可知生物炭添加对辣椒植株养分含量影

响极显著( $P<0.001$ ), 而 AM 真菌接种处理对辣椒根部全氮含量、地上部全钾含量影响不显著, 生物炭和接菌交互效应仅对根部全钾含量影响不显著。未添加生物炭条件下, AM 真菌接种对辣椒植株全氮含量影响差异不显著。对于磷元素来说, 接菌处理显著提高其在植株中的含量( $P<0.05$ ), 且其效果优于生物炭处理, 但对于钾元素来说生物炭处理效果明显优于接种菌处理。生物炭(3%)与接种 AM 真菌配施处理对提高辣椒植株中全氮、全磷、全钾含量效果最佳, 辣椒根部中全氮、全磷、全钾含量分别较对照(0 生物炭和 -AM 处理)提高 74.04%、106.42% 和 78.82%。综上, 生物炭和 AM 真菌均能提高辣椒植株中全氮、全磷、全钾含量, 其中 AM 真菌处理促进辣椒磷的吸收效果优于生物炭处理, 生物炭处理促进辣椒对钾的吸收效果较好, 生物炭、AM 真菌二者配施处理对促进辣椒氮、磷、钾吸收效果最好。

表 2 不同生物炭和 AM 真菌处理对辣椒叶面积指数、叶绿素含量、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $T_r$ )的影响  
Table 2 Effects of different treatments of biochar and AM fungus on leaf area index (LAI), chlorophyll content, net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) of pepper

| 生物炭施用量<br>Biochar rate (%) | 接菌<br>AM inoculation | $P_n$<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $G_s$<br>( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $T_r$<br>( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | LAI         | 叶绿素<br>Chlorophyll content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|----------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------|
| 0                          | -AM                  | 4.11±0.05d                                                       | 0.22±0.01g                                                    | 2.17±0.02g                                                     | 0.20±0.03f  | 2.44±0.05f                                                   |
| 1                          | -AM                  | 4.00±0.09d                                                       | 0.23±0.14f                                                    | 3.19±0.07f                                                     | 0.91±0.04c  | 2.62±0.05e                                                   |
| 2                          | -AM                  | 5.05±0.10d                                                       | 0.59±0.16bc                                                   | 5.04±0.01bc                                                    | 1.07±0.09b  | 2.81±0.07d                                                   |
| 3                          | -AM                  | 7.11±0.52c                                                       | 0.67±0.20b                                                    | 5.54±0.05b                                                     | 0.43±0.08e  | 3.06±0.07b                                                   |
| 0                          | +AM                  | 5.04±0.41d                                                       | 0.48±0.61de                                                   | 4.20±0.29e                                                     | 0.50±0.07de | 2.67±0.05e                                                   |
| 1                          | +AM                  | 6.66±0.40c                                                       | 0.31±0.09ef                                                   | 3.79±0.08ef                                                    | 0.62±0.02d  | 2.88±0.07cd                                                  |
| 2                          | +AM                  | 8.28±0.06b                                                       | 0.62±0.33cd                                                   | 4.69±0.14cd                                                    | 0.82±0.05c  | 2.98±0.06bc                                                  |
| 3                          | +AM                  | 10.14±1.22a                                                      | 0.82±0.28a                                                    | 6.91±0.11a                                                     | 1.44±0.05a  | 3.23±0.03a                                                   |
| 显著性 Significance           |                      |                                                                  |                                                               |                                                                |             |                                                              |
| 接菌 Inoculation (m)         |                      | ***                                                              | ***                                                           | ***                                                            | ***         | ***                                                          |
| 生物炭 Biochar (b)            |                      | ***                                                              | ***                                                           | ***                                                            | ***         | ***                                                          |
| m×b                        |                      | *                                                                | *                                                             | ***                                                            | ***         | ns                                                           |

+M: 接种处理; -M: 未接种处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。\*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; ns: 影响不显著。  
+M: inoculation of AM fungus; -M: no AM fungus inoculation. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different treatments at 5% level. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; ns: no significant effect.

表 3 不同生物炭和 AM 真菌处理对辣椒植株养分含量的影响  
Table 3 Effects of different treatments of biochar and AM fungus on plant nutrients contents of pepper

| 生物炭施用量<br>Biochar rate (%) | 接菌<br>AM inoculation | 根部养分含量 Root nutrient content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |            |              | 地上部养分含量 Shoot nutrient content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |             |              |
|----------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|------------|--------------|------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|
|                            |                      | 全氮 Total N                                                     | 全磷 Total P | 全钾 Total K   | 全氮 Total N                                                       | 全磷 Total P  | 全钾 Total K   |
| 0                          | -AM                  | 10.41±0.31cd                                                   | 1.09±0.26d | 13.93±12.05e | 13.08±2.49e                                                      | 1.52±0.68e  | 25.11±5.02e  |
| 1                          | -AM                  | 14.25±1.52b                                                    | 1.17±1.53d | 15.68±0.75de | 23.65±0.69bc                                                     | 2.17±0.25bc | 25.17±5.11e  |
| 2                          | -AM                  | 11.60±0.33c                                                    | 1.41±0.29c | 18.23±5.01c  | 19.72±0.32d                                                      | 1.93±0.41d  | 29.41±12.68c |
| 3                          | -AM                  | 17.48±0.71a                                                    | 1.85±0.68b | 21.37±7.182b | 24.54±2.41b                                                      | 2.21±1.08bc | 33.84±8.64a  |
| 0                          | +AM                  | 8.68±0.44d                                                     | 1.46±0.37c | 17.07±2.09cd | 13.89±0.35e                                                      | 2.03±0.17bc | 25.09±3.25e  |
| 1                          | +AM                  | 11.92±2.34c                                                    | 2.12±0.25a | 17.72±2.17cd | 23.02±1.04bcd                                                    | 2.22±0.46bc | 27.51±8.77d  |
| 2                          | +AM                  | 16.74±1.29a                                                    | 2.12±0.31a | 24.31±0.11a  | 25.54±2.47b                                                      | 2.38±1.28b  | 29.63±6.46c  |
| 3                          | +AM                  | 18.06±0.58a                                                    | 2.25±0.64a | 24.85±8.22a  | 30.06±1.36a                                                      | 2.51±0.72a  | 31.72±0.77b  |
| 显著性 Significance           |                      |                                                                |            |              |                                                                  |             |              |
| 接菌 Inoculation (m)         |                      | ns                                                             | ***        | ***          | ***                                                              | ***         | ns           |
| 生物炭 Biochar (b)            |                      | ***                                                            | ***        | ***          | ***                                                              | ***         | ***          |
| m×b                        |                      | **                                                             | ***        | ns           | *                                                                | **          | **           |

+M: 接种处理; -M: 未接种处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。\*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; ns: 影响不显著。  
+M: inoculation of AM fungus; -M: no AM fungus inoculation. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different treatments at 5% level. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; \*\*\*:  $P<0.001$ ; ns: no significant effect.

#### 2.4 生物炭和 AM 真菌配施对辣椒连作土壤酶活性和根际 pH 的影响

土壤 pH 随生物炭添加量的增加呈增加趋势(表 4)。相对于生物炭处理, 接种 AM 真菌对土壤 pH 影响较小。土壤脲酶、蔗糖酶活性均随生物炭添加量的增加呈现增加的趋势, 且差异显著( $P<0.05$ )。接种 AM 真菌后土壤脲酶活性、蔗糖酶活性也有所增加, 但差异不显著。当添加 3%生物炭和 AM 真菌配施处

理时, 土壤脲酶、蔗糖酶活性达最大, 分别为  $0.45 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $18.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 较 0 生物炭+AM 处理提高 84.05%、108.82%。未接菌条件下, 生物炭添加量为 1%时, 相对于未添加生物炭处理, 土壤磷酸酶活性显著提高 41.91%( $P<0.05$ ), 随着生物炭添加量的继续增加, 土壤磷酸酶活性呈增加趋势; 接菌条件下, 土壤磷酸酶活性在无生物炭添加时达到最大, 生物炭的施用使其略有下降。

表 4 不同生物炭和 AM 真菌处理对连作辣椒土壤酶活性和根际 pH 的影响

Table 4 Effects of different treatments of biochar and AM fungus on soil enzymes activities and soil pH of continuous cropping pepper

| 生物炭施用量<br>Biochar rate (%) | 接菌<br>Inoculation | 脲酶活性<br>Urease activity (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 蔗糖酶活性<br>Sucrase activity (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 磷酸酶活性<br>Phosphatase activity (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 土壤 pH<br>Soil pH |
|----------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|
| 0                          | -AM               | 0.14±0.003f                                                    | 8.60±0.08e                                                       | 1.68±0.13e                                                           | 6.21±0.07e       |
| 1                          | -AM               | 0.29±0.009d                                                    | 10.60±0.33de                                                     | 2.37±0.09d                                                           | 7.64±0.05c       |
| 2                          | -AM               | 0.35±0.009c                                                    | 12.27±0.62bcd                                                    | 2.69±0.07bcd                                                         | 7.91±0.12b       |
| 3                          | -AM               | 0.40±0.02b                                                     | 14.60±2.24b                                                      | 2.81±0.08ab                                                          | 7.93±0.12b       |
| 0                          | +AM               | 0.24±0.01e                                                     | 8.73±0.45e                                                       | 3.05±0.2a                                                            | 6.81±0.01d       |
| 1                          | +AM               | 0.36±0.03c                                                     | 11.43±0.77cd                                                     | 2.43±0.14cd                                                          | 7.84±0.11b       |
| 2                          | +AM               | 0.42±0.02ab                                                    | 13.37±0.95bcd                                                    | 2.61±0.06bc                                                          | 7.8±0.03bc       |
| 3                          | +AM               | 0.46±0.03b                                                     | 18.23±1.78a                                                      | 2.79±0.18ab                                                          | 8.72±0.04a       |
| 显著性 Significance           |                   |                                                                |                                                                  |                                                                      |                  |
| 接菌 Inoculation (m)         |                   | ***                                                            | ***                                                              | ***                                                                  | ***              |
| 生物炭 Biochar (b)            |                   | ***                                                            | ***                                                              | ***                                                                  | ***              |
| m×b                        |                   | *                                                              | *                                                                | ***                                                                  | ***              |

+M: 接种处理; -M: 未接种处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ ; ns: 影响不显著。+M: inoculation of AM fungus; -M: no AM fungus inoculation. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different treatments at 5% level. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ ; ns: no significant effect.

2.5 生物炭和 AM 真菌配施对辣椒连作土壤养分的影响

施用生物炭和接种 AM 真菌处理对辣椒连作土壤有良好的改善效果。无论接菌与否, 土壤速效钾含量均随生物炭添加量的增加而呈增加趋势, 且均在 3% 生物炭添加条件下达最大(表 5)。等量生物炭添加条件下, 接种 AM 真菌处理虽小幅提高了土壤速效钾含量, 但差异不显著。接种处理条件下, 土壤碱解氮含量随生物炭添加量的增加而显著增加 ( $P < 0.05$ ), 且在 3% 生物炭添加条件下达最大, 较 0、

1%、2% 生物炭添加条件下分别提高 55.85%、28.12%、15.21%。接种处理对土壤有机质含量、土壤 CEC 无显著影响, 而生物炭的添加均可显著增加土壤有机质含量和土壤 CEC ( $P < 0.05$ ), 且在 3% 生物炭添加条件下达最大。未接菌条件下, 生物炭添加显著提高土壤有效磷含量 ( $P < 0.05$ ); 接种 AM 真菌条件下, 0、1% 生物炭添加时, 土壤有效磷含量变化差异不显著, 但在 3% 生物炭添加时达最大, 较 0、1%、2% 生物炭添加条件下土壤有效磷含量分别显著提高 40.03%、37.31%、22.10% ( $P < 0.05$ )。

表 5 不同生物炭和 AM 真菌处理对连作辣椒土壤速效钾、碱解氮、有机质、有效磷和阳离子交换量(CEC)的影响  
Table 5 Effects of different treatments of biochar and AM fungus on soil available K, hydrolyzed N, organic matter, available P contents and cation exchange capacity (CEC) of continuous cropping pepper

| 生物炭施用量<br>Biochar rate (%) | 接菌<br>AM inoculation | 速效钾<br>Available potassium (mg·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Hydrolyzable nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质<br>Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> ) | 阳离子交换量<br>CEC (cmol·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 0                          | -AM                  | 61.92±6.15e                                       | 85.69±2.87f                                         | 10.58±0.82f                                 | 4.75±1.02d                             | 6.53±0.67f                                         |
| 1                          | -AM                  | 74.91±2.83d                                       | 109.46±0.58d                                        | 16.02±0.69d                                 | 5.61±0.38cd                            | 11.40±0.69e                                        |
| 2                          | -AM                  | 96.24±2.03b                                       | 113.53±1.25d                                        | 18.53±1.17bc                                | 6.41±0.28bc                            | 13.90±0.68cd                                       |
| 3                          | -AM                  | 114.56±0.93a                                      | 136.65±3.40b                                        | 21.79±0.37a                                 | 7.76±0.44ab                            | 16.40±0.68b                                        |
| 0                          | +AM                  | 71.91±1.64d                                       | 93.86±2.54e                                         | 13.47±0.77e                                 | 4.45±1.05d                             | 13.14±0.50d                                        |
| 1                          | +AM                  | 88.94±2.12c                                       | 114.18±1.36d                                        | 16.80±0.68d                                 | 5.84±0.62cd                            | 13.40±0.80d                                        |
| 2                          | +AM                  | 98.61±3.40b                                       | 126.97±1.56c                                        | 19.34±0.85b                                 | 6.75±0.52abc                           | 15.07±0.55bc                                       |
| 3                          | +AM                  | 115.23±3.44a                                      | 146.29±3.91a                                        | 23.46±1.06a                                 | 8.11±0.56a                             | 18.40±0.72a                                        |
| 显著性 Significance           |                      |                                                   |                                                     |                                             |                                        |                                                    |
| 接菌 Inoculation (m)         |                      | **                                                | ***                                                 | ns                                          | ns                                     | ***                                                |
| 生物炭 Biochar (b)            |                      | ***                                               | ***                                                 | ***                                         | ***                                    | ***                                                |
| m×b                        |                      | *                                                 | ns                                                  | ns                                          | ns                                     | ***                                                |

+M: 接种处理; -M: 未接种处理。同列不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ ; ns: 影响不显著。+M: inoculation of AM fungus; -M: no AM fungus inoculation. Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different treatments at 5% level. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ ; ns: no significant effect.

### 3 讨论

长期连作可改变土壤的理化和生物特性<sup>[23]</sup>, 同时也会进一步影响作物的生长及产量。有研究表明 AM 真菌<sup>[24]</sup>或生物炭<sup>[25]</sup>单独施用均促进辣椒的生长。本研究发现生物炭和 AM 真菌配施处理对连作辣椒的促生效果优于单独施用生物炭或 AM 真菌(表 1)。叶片光合色素含量直接影响植株的光合作用, 而光合作用是植物有机物合成的主要途径, 是影响作物生长的关键因素之一<sup>[26]</sup>。连作条件下, 辣椒植株受土壤生境劣变的胁迫, 生长发育受到抑制, 叶绿素合成酶活性降低致使叶绿素合成受到抑制, 叶绿素降解速率增加导致  $P_n$  降低<sup>[27]</sup>。本研究表明, 生物炭和接种 AM 真菌能协同改善连作辣椒生长和光合特性, 辣椒叶绿素含量、 $P_n$ 、 $G_s$  及  $T_r$  均随生物炭添加量的增加而提高, 且在 3% 生物炭添加和 AM 真菌复合处理条件下效果最佳。这可能是因为 AM 真菌丛枝结构和生物炭的保水、保肥特性协同提高辣椒对水分、养分的吸收, 进而提高光合效率、促进生长。

对于连作土壤来说, 土壤营养失衡、理化性质劣变、化感物质积累等问题严重制约了作物对养分的吸收, 因此提高作物对养分的利用对克服或缓解连作障碍至关重要。本研究表明, 在辣椒连作土壤中施用生物炭和接种 AM 真菌对辣椒氮、磷和钾营养具有明显的改善作用, 其中接种 AM 真菌对提高植株磷含量的效果显著, 施用生物炭对提高辣椒钾吸收效果明显, 而二者复合处理对连作辣椒养分吸收改善效果最佳。这可能是因为生物炭自身含有一定量的矿物质养分(如钾、钙等), 同时生物炭的多孔结构、大的表面积能够吸持土壤养分, 达到缓释效果, 提高养分利用率<sup>[28]</sup>; 另一方面, AM 真菌诱导宿主根系生长, 通过菌丝途径增加宿主植物的矿质营养<sup>[29-30]</sup>。同时, 生物炭的添加有利于 AM 真菌与连作辣椒建立良好的共生关系。研究显示土壤施入生物炭有益于菌根真菌在植物根部的定殖, Elmer<sup>[31]</sup>等报道 3% 的生物炭用量下丛枝菌根真菌在芦笋 (*Asparagus officinalis* L.) 根部的定殖量增加 1 倍。本研究也发现生物炭(3%)与 AM 真菌联合处理时菌根侵染效果最佳。这可能是因为生物炭的多孔性为真菌的生存繁殖提供栖息地, 且利于微生物躲避土壤掠夺性动物的侵袭<sup>[32]</sup>; 同时, 球囊菌(丛枝菌根真菌)可产生胞外酶分解生物炭中稳定性较差的组分得以生长繁殖<sup>[33]</sup>。

土壤酶活性是评价土壤肥力和表征土壤生物活

性的重要指标。长期连作会使土壤中的酶活性下降<sup>[34]</sup>。生物炭<sup>[35]</sup>和 AM 真菌<sup>[36]</sup>均能增加土壤酶活性, 从而缓解作物连作危害。本研究发现, 当添加 3% 生物炭和 AM 真菌复合处理时, 土壤脲酶、蔗糖酶活性达最大。生物炭和 AM 真菌配施协同促进土壤酶活性, 可能是二者协同促进土壤团粒结构形成<sup>[37]</sup>、大幅改善土壤质量<sup>[38]</sup>的结果。值得注意的是, 土壤磷酸酶活性在无生物炭添加+AM 真菌处理时达到最大, 生物炭添加量变化对其影响不显著。这可能是根外菌丝与土壤解磷细菌互作<sup>[39]</sup>, 提高了土壤磷酸酶活性。有机质是土壤的重要组成部分, 可以改善土壤物理性质, 提高土壤蓄水、保肥能力<sup>[40]</sup>。本研究中, AM 真菌对土壤 pH、有机质均无显著影响。施加生物炭提高了土壤 pH 和土壤有机质含量, 这与生物炭呈碱性和碳含量较高有关<sup>[41]</sup>。氮、磷、钾含量是反映土壤养分供给的重要指标, 连作土壤因长期种植单一作物会导致土壤氮磷钾比例失衡, 甚至会出现“养分衰竭”现象<sup>[42]</sup>。在本试验中, 生物炭施用可显著增加土壤速效钾、有效磷、碱解氮含量和土壤阳离子交换量, 这与大多数的研究一致<sup>[12,14,43]</sup>。而接菌处理对土壤速效钾、有机质、阳离子交换量影响不显著。这可能是因为 AMF 对土壤养分的影响主要体现在菌丝际土壤<sup>[44]</sup>, 而本试验研究的是整个根围土壤的肥力大小。

综上, 生物炭和 AM 真菌缓解辣椒连作障碍的协同增效作用, 一方面是因为生物炭显著改善了连作土壤环境, 并为 AM 真菌提供了适宜的环境, 促进菌根真菌在植物根部的侵染与增殖。另一方面, AM 真菌<sup>[45]</sup>和生物炭<sup>[46]</sup>都可影响其他连作土壤微生物和吸附连作土壤中化感物质<sup>[47]</sup>, 进而间接影响连作作物生长。这需要进一步的试验进行探索。

### 4 结论

1) 生物炭和 AM 真菌配施能显著提高辣椒根部和地上部生物量、叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量, 有效缓解连作土壤对辣椒生长的阻碍作用。生物炭和 AM 真菌配施对促进连作辣椒养分吸收具有显著的协同作用, 3% 生物炭+AM 真菌处理条件下, 辣椒根部全氮、全磷、全钾含量分别较对照(0 生物炭和-AM 处理)提高 74.04%、106.42% 和 78.82%。生物炭(3%)与 AM 真菌配施处理时菌根侵染效果最佳, 侵染率高达 58.96%, 较无生物炭添加处理提高 41.59%。

2) 当添加 3% 生物炭和 AM 真菌配施处理时, 土壤脲酶、蔗糖酶活性达最大, 分别为  $0.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、



18.23 mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>, 较 0 生物炭+AM 处理提高 84.05%、108.82%。生物炭施用可显著提高土壤 pH、土壤速效钾、有效磷、碱解氮含量和土壤阳离子交换量, 而接种 AM 真菌处理对土壤 pH、土壤速效钾、有机质、阳离子交换量影响不显著。

## 参考文献 References

- [1] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J/OL]. 园艺学报: 1-12 [2020-07-08]. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0103>  
ZOU X X, MA Y Q, DAI X Z, et al. Spread and industry development of pepper in China[J/OL]. Acta Horticulturae Sinica: 1-12 [2020-07-08]. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0103>
- [2] 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 M, XU S Z, LIU Y S, et al. Improvement of soil properties and control of apple replanting disease by combined application of biochar and organic fertilizer[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(1): 220-227
- [3] WHITESIDE M D, DIGMAN M A, GRATTON E, et al. Organic nitrogen uptake by arbuscular mycorrhizal fungi in a boreal forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 55: 7-13
- [4] 孙吉庆, 刘润进, 李敏. 丛枝菌根真菌提高植物抗逆性的效应及其机制研究进展[J]. 植物生理学报, 2012, 48(9): 845-852  
SUN J Q, LIU R J, LI M. Advances in the study of increasing plant stress resistance and mechanisms by arbuscular mycorrhizal Fungi[J]. Plant Physiology Communications, 2012, 48(9): 845-852
- [5] OSENI T O, SHONGWE N S, MASARIRAMBI M T. Effect of arbuscular mycorrhiza (AM) inoculation on the performance of tomato nursery seedlings in vermiculite[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2010, 12(5): 789-792
- [6] WATTS-WILLIAMS S J, TURNEY T W, PATTI A F, et al. Uptake of zinc and phosphorus by plants is affected by zinc fertiliser material and arbuscular mycorrhizas[J]. Plant and Soil, 2014, 376(1/2): 165-175
- [7] LIN Z, GU F, DECLERCK S. Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium[J]. The ISME Journal, 2018, 12(10): 2339-2351
- [8] HAUSE B, MROSK C, ISAYENKOV S, et al. Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions[J]. Phytochemistry, 2007, 68(1): 101-110
- [9] BHARADWAJ D P, ALSTRÖM S, LUNDQUIST P O. Interactions among *Glomus irregulare*, arbuscular mycorrhizal spore-associated bacteria, and plant pathogens under in vitro conditions[J]. Mycorrhiza, 2012, 22(6): 437-447
- [10] CHENG C H, LEHMANN J, ENGELHARD M H. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(6): 1598-1610
- [11] JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, VAN DER VELDE M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 175-187
- [12] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 81-84
- [13] GRABER E R, HAREL Y M, KOLTON M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1/2): 481-496
- [14] KAMAU S, KARANJA N K, AYUKE F O, et al. Short-term influence of biochar and fertilizer-biochar blends on soil nutrients, fauna and maize growth[J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, 55(7): 661-673
- [15] KOLTON M, MELLER HAREL Y, PASTERNAK Z, et al. Impact of Biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(14): 4924-4930
- [16] 刘先良, 张春, 邓茂, 等. 施用生物炭和 AM 真菌对烤烟根系形态、生理特性及化学成分的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 30-36  
LIU X L, ZHANG C, DENG M, et al. Effects of biochar and AM fungi on root morphology, physiological characteristics and chemical constituents of flue-cured tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(8): 30-36
- [17] 郭雄飞. 生物炭和 AM 真菌对重金属污染下土壤养分及望江南生长的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(11): 150-161  
GUO X F. Effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on soil nutrients and growth of *Cassia occidentalis* under heavy metal contamination[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(11): 150-161
- [18] 王幼珊, 张淑彬, 殷晓芳, 等. 中国大陆地区丛枝菌根真菌菌种资源的分离鉴定与形态学特征[J]. 微生物学通报, 2016, 43(10): 2154-2165  
WANG Y S, ZHANG S B, YIN X F, et al. Isolation and identification of arbuscular mycorrhizal fungi from mainland China[J]. Microbiology China, 2016, 43(10): 2154-2165
- [19] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161
- [20] GIOVANNETTI M, MOSSE B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots[J]. New Phytologist, 1980, 84(3): 489-500
- [21] 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, 2000: 312-314  
LU R K. Methods of Soil and Agro-Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000: 312-314
- [22] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 260-334  
GUAN S Y, ZHANG D S, ZHANG Z M. Soil Enzyme and its Research Methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 260-334

- [23] 李亮, 蔡柏岩. 丛枝菌根真菌缓解连作障碍的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1372–1377  
LI L, CAI B Y. Advances in arbuscular mycorrhizal fungi alleviating continuous cropping obstacles[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(5): 1372–1377
- [24] 江盼盼, 宋述尧, 赵春波, 等. 三种丛枝菌根真菌对辣椒根系生长的影响及效应分析[J]. 中国蔬菜, 2010, (6): 58–62  
JIANG P P, SONG S Y, ZHAO C B, et al. Studies on effects of three arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on pepper root system[J]. China Vegetables, 2010, (6): 58–62
- [25] 张福建, 陈昱, 杨磊, 等. 施用生物质炭和生石灰对连作辣椒生长的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1240–1247  
ZHANG F J, CHEN Y, YANG L, et al. Effects of biomass charcoal and lime on growth of pepper[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(6): 1240–1247
- [26] 张福建, 王馨悦, 陈昱, 等. 3 种作物幼嫩茎叶干粉对连作辣椒幼苗生长及根际土壤生物特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1569–1576  
ZHANG F J, WANG X Y, CHEN Y, et al. Effects of applying dry powders of three crop seedlings on pepper seedling growth and rhizosphere soil biological characteristics in continuous cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9): 1569–1576
- [27] SANTOS C V. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 103(1): 93–99
- [28] JONES D L, ROUSK J, EDWARDS-JONES G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 113–124
- [29] HODGE A, FITTER A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(31): 13754–13759
- [30] LAPARRE J, MALBREIL M, LETISSE F, et al. Combining metabolomics and gene expression analysis reveals that propionyl- and butyryl-carnitines are involved in late stages of arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Molecular Plant, 2014, 7(3): 554–566
- [31] ELMER W H, PIGNATELLO J J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils[J]. Plant Disease, 2011, 95(8): 960–966
- [32] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil — Concepts and mechanisms[J]. Plant & Soil, 2007, 300(1/2): 9–20
- [33] JIN H. Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar-amended soils[D]. Ithaca, New York: Cornell University, 2010
- [34] 马海燕, 徐瑾, 郑成淑, 等. 非洲菊连作对土壤理化性状与生物性状的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3733–3740  
MA H Y, XU J, ZHENG C S, et al. Effects of continuous cropping system on the soil physical-chemical properties and biological properties of *Gerbera jamesonii*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(18): 3733–3740
- [35] 胡华英, 殷丹阳, 曹升, 等. 生物炭对杉木人工林土壤养分、酶活性及细菌性质的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4138–4148  
HU H Y, YIN D Y, CAO S, et al. Effects of biochar on soil nutrient, enzyme activity, and bacterial properties of Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4138–4148
- [36] XUN F F, XIE B M, LIU S S, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on oats in saline-alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(1): 598–608
- [37] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高壤土团聚体稳定性及作物产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 782–791  
LI W, DAI Z, ZHANG G X, et al. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 782–791
- [38] RILLIG M C, WRIGHT S F, EVINER V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species[J]. Plant and Soil, 2002, 238(2): 325–333
- [39] CHEN W L, KOIDE R T, ADAMS T S, et al. Root morphology and mycorrhizal symbioses together shape nutrient foraging strategies of temperate trees[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(31): 8741–8746
- [40] KHEIRFAM H, SADEGHI S H, HOMAEE M, et al. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 230–238
- [41] FELLET G, MARCHIOL L, DELLE VEDOVE G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. Chemosphere, 2011, 83(9): 1262–1267
- [42] 张子龙, 王文全. 植物连作障碍的形成机制及其调控技术研究进展[J]. 生物学杂志, 2010, 27(5): 69–72  
ZHANG Z L, WANG W Q. Progress on formation mechanism and control measurements of continuous cropping obstacles in plants[J]. Journal of Biology, 2010, 27(5): 69–72
- [43] AMEUR D, ZEHETNER F, JOHNNEN S, et al. Activated biochar alters activities of carbon and nitrogen acquiring soil enzymes[J]. Pedobiologia, 2018, 69: 1–10
- [44] LINDERMAN R G. Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora: The mycorrhizosphere effect[J]. Phytopathology, 1987, 78(3): 366–371
- [45] KIM J S, SPAROVEK G, LONGO R M, et al. Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the western Amazon[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(2): 684–690
- [46] GRAVEL V, DORAIS M, MÉNARD C. Organic potted plants amended with biochar: Its effect on growth and *Pythium* colonization[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2013, 93(6): 1217–1227
- [47] ROGOVSKA N, LAIRD D, CRUSE R M, et al. Germination tests for assessing biochar quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1014–1022