

丛枝菌根真菌和生物炭对番茄幼苗生长和养分吸收的影响

赵子亮¹, 王敏^{2*}

¹广东省农业技术推广中心, 广东 广州

²中国农业大学园艺学院, 北京

收稿日期: 2023年5月26日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

丛枝菌根真菌(AM真菌)和生物炭(BIO)可以促进植物生长, 研究表明, 两者之间存在互作关系。为了分析两者对番茄幼苗生长的影响, 本文采用盆栽试验, 用随机区组设计设置两个生物炭梯度(加入和不加入)、两个AM真菌梯度(接种和不接种)。研究结果表明, 接种AM真菌分别使番茄地上部干重、根部干重和地上部磷吸收量提高14.1%、12.8%和12.7%。添加生物炭使番茄幼苗生物量增加6.7%。两者共同施用, 分别将生物量、P吸收量和钾吸收量增加20.9%、18.8%和26.1%。在本试验中, 生物炭未提高菌根侵染率, 两者也未产生互作。总之, 菌根和生物炭都能促进番茄生长, 而且两者共同加入效果最佳。

关键词

丛枝菌根真菌, 生物炭, 生物量

The Effect of AMF and Biochar on Growth and Nutrient Uptake of Tomato Seedlings

Ziliang Zhao¹, Min Wang^{2*}

¹Agri-Tech Extension Center of Guangdong Province, Guangzhou Guangdong

²College of Horticulture, China Agriculture University, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 赵子亮, 王敏. 丛枝菌根真菌和生物炭对番茄幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 农业科学, 2023, 13(6): 627-634. DOI: 10.12677/hjas.2023.136085

Abstract

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and biochar can improve the growth of plants. Research shows there are interactions between them. A pot experiment was conducted to explore the effects of these two materials on tomatoes in this paper. The experiment was arranged in a randomized complete block design with two biochar rates (amended or unamended) and two AMF rates (inoculated or uninoculated). Results showed that AMF increased the shoot dry weight, root dry weight and shoot P uptake of tomatoes by 14.1%, 12.8% and 12.7%, respectively. Biochar increased the shoot dry weight of tomato seedlings by 6.7%. The largest improvement in plant growth was shown in the treatment of co-amendment of these two materials, which improved the biomass, P uptake and K uptake by 20.9%, 18.8% and 26.1%, respectively. In this experiment, biochar did not increase AMF inoculation and no interaction was found between them. In conclusion, both AMF and biochar improved the growth of tomatoes and co-amendment of them performed best.

Keywords

Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, Biomass

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化肥、农药的大量施用,造成了土壤结构、理化性质的恶化,降低了土壤的生产力。土壤生产力的降低影响着人类粮食安全[1]。应用合理的栽培管理方式是改良土壤的有效方法,此外,施用土壤改良剂也是修复退化土壤的重要措施[2]。生物炭是指生物有机材料,在相对较低的温度(<700℃)和无氧或者低氧的条件下热解而得到的一种炭化物质,大多为粉状颗粒。生物炭的主要元素组成包括碳、氢、氧和灰分(包括钾、钙、钠、镁、硅等),含碳量在 50% 以上。生物炭具有多孔性、比表面积大、容重小、吸水和吸气能力强、带负电荷多、阳离子交换量(CEC)大的特点。研究表明,生物炭的施用可提高土壤 pH、EC 值,提高土壤含水率,促进微生物活性[3] [4] [5] [6]。

菌根真菌是指能与植物根系形成互利共生体的真菌类群,其中一类能在根系表层形成“丛枝”结构的为丛枝菌根真菌。菌根真菌在自然界中普遍存在,能与约 80% 的陆生植物形成共生体[7]。在这个共生体系中,植物为真菌提供有机营养,真菌帮助植物吸收土壤中的矿质元素[8]。AM 真菌可为植物提供矿质营养,尤其是 P 元素[9],促进土壤团粒结构的形成[10],提高植物对生物和非生物胁迫的抵抗能力[11] [12]。

番茄是世界上除马铃薯外最主要的蔬菜种类,属全球产量最高的 30 种农作物之一,在我国各地均有种植[13]。有研究者已经将菌根和生物炭运用于番茄的生产,并发现两者对番茄的生长均有不同程度的促进作用[14] [15]。勾芒芒等发现,施加生物炭促进了番茄根系的发育和产量的提高,每千克干土加 40 g 生物炭处理的主根长、主根直径、总根系鲜质量和产量分别是对照的 1.20、1.24、1.21 和 2.67 倍[16]。饶霜发现,生物炭处理降低青枯病病情指数 61.11%;植株鲜重和干重分别增加 39.04%和 22.26%;植株全碳(全

C)含量增加 15.92% [17]; 而且生物炭能提高菌根的侵染率[18] [19]。因此, 本研究假设同时向土壤中施加菌根和生物炭能产生互作, 共同促进番茄的生长和养分吸收。试验设计将菌根和生物炭单独以及共同应用番茄苗期栽培, 通过测定番茄生物量、营养元素含量来探究两者对番茄的生长和养分吸收的影响。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

2.1.1. 供试植物

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.), 品种为中杂 9 号。

2.1.2. 供试菌种

丛枝菌根真菌为摩西球囊菌(*Glomus mosseae*), 由中国农业大学园艺学院蔬菜系提供。接种剂为含有寄主植物根段及 AM 真菌孢子及菌丝体。

2.1.3. 生物炭及栽培基质

试验所用生物炭(biochar)原料为玉米秸秆。其理化性质如下: 密度为 0.297 g/m^3 , pH (H_2O)为 7.78, EC 值为 847 us/cm , 速效氮、磷、钾含量分别为 4.6 mg/kg , 162.0 mg/kg , 9.6 g/kg , 有机质含量为 52.1 g/kg 。

试验所用基质为草炭和蛭石混合物(v:v = 2:1)。

2.2. 试验设计

以丛枝菌根真菌(AMF)和生物炭(biochar)为土壤添加物质, 试验处理设置如下表: 共设置 4 种处理: 对照(CK)、AM 真菌(AM)、生物炭(BIO)、AM 真菌和生物炭(AB), 每种处理重复 8 次。

2.3. 试验实施

试验于 2015 年 3 月 12 日至 2015 年 4 月 28 日在北京市首农集团日光温室中进行。在塑料盆中垫上塑料袋, 以防营养流失和微生物的相互污染。按草炭:蛭石 = 2:1 的比例和好基质, 装入 2.5 L 塑料盆中。接种 AM 量为每盆 70 克带菌沙土; 对于不接种的处理, 每盆加入等量高压蒸汽灭菌 30 min 的菌剂。生物炭按每盆 100 mL 的量加入(重量为 42 g)。

首先对番茄种子进行催芽, 选取出芽一致的种子播种到盆中, 每盆播种 4 株, 出苗后每盆留下长得最好的间苗成单株。根据番茄的长势, 分三次向土壤中加入营养液, 每盆加入 3600 mL, 包括 1.65 g KNO_3 、 $1.17 \text{ g Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 0.36 g MgSO_4 、 $0.28 \text{ g K}_2\text{SO}_4$ 、 $0.87 \text{ g NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $23.25 \text{ mg C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8$ 、 $4.47 \text{ mg H}_3\text{BO}_4$ 、 $6.09 \text{ mg MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $4.14 \text{ mg ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.648 \text{ mg CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.432 \text{ mg } (\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。

试验主控因素是环境对番茄生长的影响, 因此要尽量保持番茄生长条件一致。对 32 盆番茄随机摆放。在其生长期, 根据番茄生长情况调节浇水重量, 保持土壤含水率在 25%左右, 根据失水量每天称重浇水 1~2 次, 补充水分。并且每天轮换盆的位置, 以减少环境误差。

2.4. 测定项目与方法

2.4.1. 生物量的测定

番茄生长 47 天后收获。番茄收获时, 用剪刀将地上部和根分割开来。地上部清洗干净, 用纸擦尽表面的水, 再用电子天平称量鲜重, 之后放置于 70°C 的烘箱中 48 h 后烘干测量干重。根清洗干净后, 用吸水纸吸干表面多余的水分后测量鲜重, 之后取一小部分根测量菌根侵染率, 剩余部分的根放在 70°C 的烘

箱中 48 h 后烘干测量干重, 按比例计算根系生物量。

2.4.2. 营养元素的测定

将地上部分样品用粉碎机粉碎。N 元素用海能全自动凯氏定氮仪测定, P 元素采用钼锑抗分光光度法用分光光度计测定, K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、Mo 元素采用 ICP-6300 电感耦合等离子体发射光谱仪分析。

2.4.3. 菌根侵染率的测定

采用 5 mL 1% 的 HCl 溶液酸化后采用 10% 的 KOH 溶液中和, 后采用 0.05% 的台盼蓝溶液染色[20]。

2.5. 数据统计与分析

试验数据全部采用 Microsoft Excel 2010 进行记录和处理, 利用 IBM SPSS Statistics (Version 22.0) 进行方差分析, 随后采用 LSD 法比较多重及主成分因素分析($P < 0.05$)。

3. 结果与分析

3.1. AM 真菌、生物炭对番茄幼苗生物量的影响

采用双因素方差分析, AM 真菌和 biochar 均显著提高了番茄地上部干重, 和 CK 比较, 增长率分别为 14.1% 和 6.7% (表 1)。对各处理进行多重比较, 可得 AM 和 AB 分别比 CK 增加 15.4% 和 21.9% (图 1(A))。AM 真菌显著提高番茄根干重, 增长量为 12.78% (表 1); AM 和 AB 分别比 CK 增加 19.4% 和 19.3% (图 1(B))。

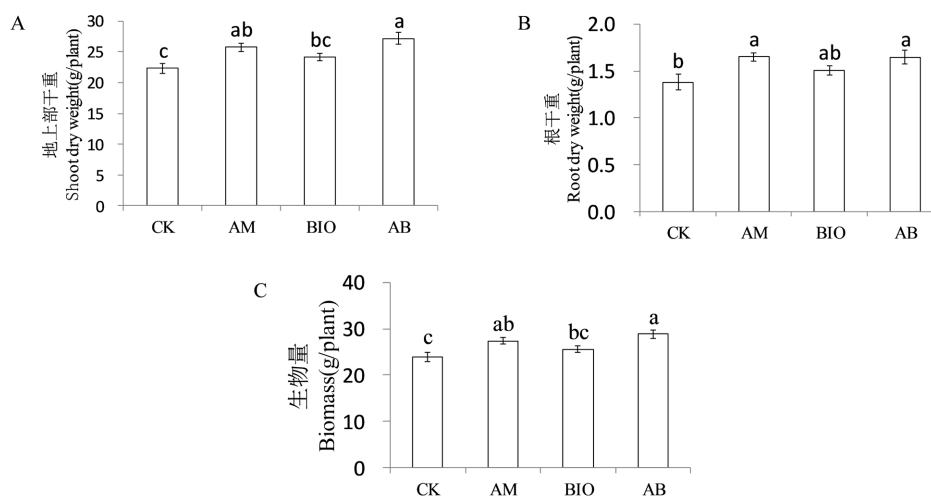
AM 真菌显著提高番茄生物量, 增长量为 12.73% (表 1)。AM 和 AB 分别增加 14.9% 和 20.9% (图 1(C))。

Table 1. Effect of AMF and biochar on shoot dry weight, root dry weight and biomass of tomato plants

表 1. 菌根和生物炭对番茄地上部干重、根干重、生物量的影响

变量	地上部干重(g/株)	根干重(g/株)	生物量(g/株)
AMF			
M ₀	23.14 ± 0.56b	1.44 ± 0.05b	24.72 ± 0.62b
M ₁	26.46 ± 0.58a	1.65 ± 0.04a	28.11 ± 0.59a
Biochar			
B ₀	24.02 ± 0.68b	1.52 ± 0.06	25.73 ± 0.74
B ₁	25.74 ± 0.69a	1.58 ± 0.05	27.32 ± 0.71
ANOVA			
AMF	0.000***	0.005**	0.000***
Biochar	0.049*	0.358	0.068
AMF × Biochar	0.834	0.349	0.856

注: 生物量的结果用平均值 ± 标准误表示(mean ± SE), 不同字母表示差异显著($P < 0.05$); M₀ 表示不接种 AM 真菌, M₁ 表示接种 AM 真菌; B₀ 表示不加入 biochar, B₁ 表示加入 Biochar; **、*、* 分别表示在 0.001、0.01、0.05 水平上显著, 未标*表示差异不显著。下表同。



注: 不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上的显著差异 ($n = 8$)。图中误差线为标准误。CK (未处理)、AM (仅 AM 真菌)、BIO (仅生物炭)、AB (AM 真菌 + 生物炭)。下图同。

Figure 1. Effect of AMF and biochar on shoot dry weight (A), root dry weight (B) and biomass (C) of tomato plants

图 1. 菌根和生物炭对番茄地上部干重(A)、根干重的影响(B)、生物量(C)的影响

3.2. AM 真菌、生物炭对番茄 N、P、K 吸收的影响

AM 真菌和 biochar 降低了番茄氮含量(表 2)。AM、BIO、AB 分别降低 10.5%、10.5%和 14.8% (图 2(A)), 但对番茄氮吸收量均无显著影响(图 2(B))。

各处理对番茄含磷量无显著影响。AM 真菌能将番茄磷吸收量提高 12.7% (表 2)。AM、AB 的磷吸收量分别为 177.8 mg/株和 187.8 mg/株, 较 CK 的 158.0 mg/株分别增加了 12.5%和 18.8% (图 3(B))。

Biochar 能将钾含量显著提高 5.7%, 其余三个处理与 CK 均无显著差异(表 2)。biochar 和 AM 真菌分别将钾吸收量提高 12.3%和 12.5% (表 2)。AM、BIO、AB 的钾吸收量分别为每株 1046、1047 和 1192 mg, 较 CK 的 945 mg 分别增加 10.7%、10.8%和 26.1% (图 4(B))。

Table 2. Effect of AMF and biochar on the shoot N, P, and K concentration and uptake of tomato plants

表 2. 菌根和生物炭对番茄地上部 N、P、K 含量和吸收量影响

变量	N 含量 (mg/g)	N 吸收量 (mg/株)	P 含量 (mg/g)	P 吸收量 (mg/株)	K 含量 (mg/g)	K 吸收量 (mg/株)
AMF						
M₀	21.05 ± 0.47a	481.4 ± 8.13	7.12 ± 0.10	164.3 ± 3.71b	43.6 ± 0.80	995.8 ± 35.09b
M₁	19.21 ± 0.51b	488.4 ± 8.21	6.95 ± 0.08	178.8 ± 5.91a	42.3 ± 0.92	1124.2 ± 31.84a
Biochar						
B₀	21.14 ± 0.53a	487.0 ± 8.41	7.06 ± 0.11	166.5 ± 4.03	41.8 ± 0.75b	987.8 ± 29.31b
B₁	19.27 ± 0.43b	482.2 ± 8.02	7.02 ± 0.08	175.6 ± 5.87	44.2 ± 0.86a	1114.5 ± 37.74a
ANOVA						
AMF	0.015*	0.549	0.156	0.003**	0.234	0.010**
Biochar	0.017*	0.708	0.714	0.152	0.048*	0.009**
AMF × Biochar	0.269	0.321	0.606	0.898	0.909	0.624

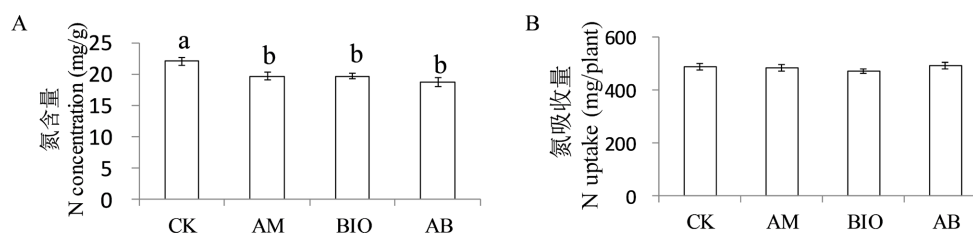


Figure 2. Effect of AMF and biochar on shoot N concentration and uptake of tomato plants

图 2. 菌根和生物炭对番茄地上部氮含量(A)和氮吸收量(B)的影响

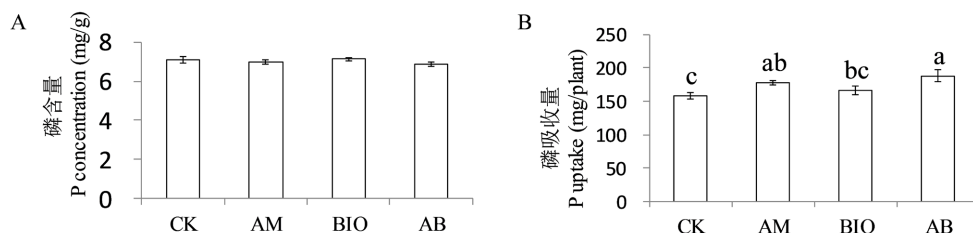


Figure 3. Effect of AMF and biochar on shoot P concentration and uptake of tomato plants

图 3. 菌根和生物炭对番茄地上部磷含量(A)和磷吸收量(B)的影响

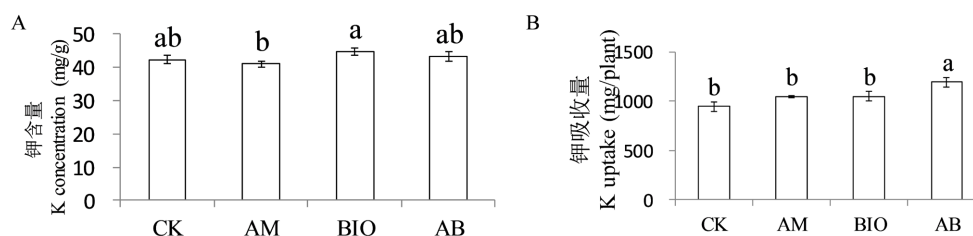


Figure 4. Effect of AMF and biochar on shoot K concentration and uptake of tomato plants

图 4. 菌根和生物炭对番茄地上部钾含量(A)和钾吸收量(B)的影响

3.3. AM 真菌、生物炭对番茄根系侵染率的影响

由表 3 可知, 接种 AM 真菌的处理的侵染率显著大于未接种真菌的处理, 而未接种 AM 真菌的处理由于基质未灭菌, 存在较低的侵染率。

Table 3. Effect of AMF and biochar on root colonization of tomato plants

表 3. 菌根和生物炭对番茄根系侵染率的影响

处理	侵染率
CK	8.50 ± 1.94b
AM	26.63 ± 4.03a
BIO	6.25 ± 1.89b
AB	28.25 ± 8.84a

4. 讨论

试验结果表明, AM 真菌和生物炭都显著地提高了番茄地上部干重。其中, AM 真菌能提高 14.1%, 生物炭能提高 6.7%。两者共同加入时, 将地上部干重提高了 21.9%, 其增加幅度几乎等同于 AM 真菌和生物炭单独加入时的和。说明 AM 真菌和生物炭加入到土壤中后不会相互干扰, 可以各自发挥其促生作

用。生物炭未能增加番茄根干重, 但是 AM 真菌将根干重增加了 12.8%, 对根干重增加最多的依然是两者同时加入, 增加了 19.3%。各处理对生物量的影响与根干重类似, AM 真菌增加了生物量, AB 的效果最好。总的来说, AM 真菌对生物量的影响更明显, 而且同时加入 AM 真菌和生物炭的增产效果最好。Jeffery 等总结了 23 个关于生物炭作用的试验, 发现生物炭在酸性或中性的粗质土壤中的效果最好, 以家禽粪便为原料的生物炭, 生物炭的施用量为 100 t/hm², 均产生了较好的增产效果[21]。Nzanza 等在酸性的沙壤土中施入 5 t/hm² 的生物炭, 发现生物炭并未提高番茄的生物量和产量。

生物炭和 AM 真菌均降低了番茄的 N 含量, 但是对番茄的 N 吸收量未产生显著影响。这可能是 AM 真菌和生物炭都增加了生长量, 由此稀释了 N 含量。由于 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 在土壤中的移动性较强, 在氮素充分的情况下, 对 N 吸收的促进不明显[9]。各处理对番茄地上部 P 含量无显著影响, 但是 AM 真菌能促进 P 的吸收。生物炭促进了 K 含量和吸收量。这可能是由于生物炭本身含有的 K 被植物吸收[22]。本试验中所用生物炭 K 含量为 9.6 g/kg。番茄通过直接从生物炭上吸收 K, 从而提高 K 的含量。

侵染率反映了 AM 真菌对寄主植物的亲和性, 很大程度上决定了 AM 真菌对寄主植物的作用。在本试验中, 加入了 AM 处理和 AB 处理的侵染率分别为 26.6% 和 28.2%, 而生物炭未提高菌根侵染率。

5. 结论

1) 对番茄生长而言, AM 真菌和生物炭对番茄生长起到明显的促进作用, 且两者效果可叠加, 不会相互干扰; 其中, AM 真菌对番茄生长的促进作用更大。AM 真菌还能促进番茄根系生长, 而生物炭对番茄根系生长无促进作用。

2) 对番茄营养吸收而言, 生物炭和 AM 真菌对番茄的 N 吸收量未产生显著影响。但是 AM 真菌能增加 P 的吸收量, 生物炭能提高 K 的吸收量。

3) 在菌根侵染率方面, 生物炭对菌根侵染率无显著影响。

参考文献

- [1] 李仲华. 试述土壤污染对人类健康的侵害[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(7): 192-194.
- [2] 闫童, 刘士亮, 于永梅, 李振玲. 土壤改良剂在蔬菜上的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(9): 3846-3847+3890.
- [3] Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D. and Hipps, N.A. (2010) Potential Mechanisms for Achieving Agricultural Benefits from Biochar Application to Temperate Soils: A Review. *Plant and Soil*, **337**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
- [4] Beesley, L., Moreno-Jiménez, E. and Gomez-Eyles, J.L. (2010) Effects of Biochar and Greenwaste Compost Amendments on Mobility, Bioavailability and Toxicity of Inorganic and Organic Contaminants in a Multi-Element Polluted Soil. *Environmental Pollution*, **158**, 2282-2287. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.003>
- [5] Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. (2002) Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in the Tropics with Charcoal—A Review. *Biology and Fertility of Soils*, **35**, 219-230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- [6] Sneath, H.E., Hutchings, T.R. and de Leij, F.A. (2013) Assessment of Biochar and Iron Filing Amendments for the Remediation of a Metal, Arsenic and Phenanthrene Co-Contaminated Spoil. *Environmental Pollution*, **178**, 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.009>
- [7] Heijden, M.G., Klironomos, J.N., Ursic, M., et al. (1998) Mycorrhizal Fungal Diversity Determines Plant Biodiversity, Ecosystem Variability and Productivity. *Nature International Weekly Journal of Science*, **396**, 69-72. <https://doi.org/10.1038/23932>
- [8] Harley, J.L. and Smith, S.E. (1997) Mycorrhizal Symbiosis. *Mycorrhizal Symbiosis*, **3**, 273-281.
- [9] Hodge, A., Helgason, T. and Fitter, A.H. (2010) Nutritional Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Fungal Ecology*, **3**, 267-273. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2010.02.002>
- [10] Rillig, M.C. and Mummey, D.L. (2006) Mycorrhizas and Soil Structure. *New Phytologist*, **171**, 41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>

- [11] Newsham, K.K. and Watkinson, A.R. (1995) Arbuscular Mycorrhiza Protect an Annual Grass from Root Pathogenic Fungi in the Field. *Journal of Ecology*, **83**, 991-1000. <https://doi.org/10.2307/2261180>
- [12] Al-Garni, S.M.S. (2006) Increased Heavy Metal Tolerance of Cowpea Plants by Dual Inoculation of an Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Nitrogen-Fixer Rhizobium Bacterium. *African Journal of Biotechnology*, **5**, 133-142.
- [13] 魏明. 中国番茄产业国际竞争力分析[J]. 农产品加工(创新版), 2009(5): 46-49.
- [14] Graber, E.R., Harel, Y.M., Kolton, M., *et al.* (2010) Biochar Impact on Development and Productivity of Pepper and Tomato Grown in Fertigated Soilless Media. *Plant and Soil*, **337**, 481-496. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0544-6>
- [15] Nzanza, B., Marais, D. and Soundy, P. (2012) Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Inoculation and Biochar Amendment on Growth and Yield of Tomato. *International Journal of Agriculture and Biology*, **14**, 965-969.
- [16] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2013(8): 1348-1352.
- [17] 饶霜. 生物炭对番茄青枯病抗性、土壤微生物活性及有机酸含量的影响[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [18] Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I.F., *et al.* (2006) Effects of the Application of Charred Bark of *Acacia mangium* on the Yield of Maize, Cowpea and Peanut, and Soil Chemical Properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*, **52**, 489-495. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00065.x>
- [19] Solaiman, Z.M., Blackwell, P., Abbott, L.K., *et al.* (2010) Direct and Residual Effect of Biochar Application on Mycorrhizal Root Colonisation, Growth and Nutrition of Wheat. *Soil Research*, **48**, 546-554. <https://doi.org/10.1071/SR10002>
- [20] Phillips, J.M. and Hayman, D.S. (1970) Improved Procedures for Clearing Roots and Staining Parasitic and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Rapid Assessment of Infection. *Transactions of the British Mycological Society*, **55**, 158-161, IN16-IN18. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- [21] Jeffery, S., Fga, V., Van, D.V.M., *et al.* (2011) A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **144**, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- [22] Jared, B.J., Marilyn, M.M., Chihiro, F.C., *et al.* (2007) Do All Carbonized Charcoals Have the Same Chemical Structure? 2. A Model of the Chemical Structure of Carbonized Charcoal. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **46**, 5954-5967. <https://doi.org/10.1021/ie070415u>