

研究报告



丛枝菌根真菌和生物质炭对连作西瓜土壤肥力的影响

刘耀臣^{1,2} 王萍^{1,2} 刘润进¹ 李敏^{*1,2}

1 青岛农业大学菌根生物技术研究所 山东 青岛 266109

2 青岛农业大学园艺学院 山东 青岛 266109

摘要:【背景】作为土壤改良剂生物质炭能够改善土壤条件,促进丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌侵染和植物生长发育。【目的】探究接种 AM 真菌配合施加生物质炭对连作土壤肥力和西瓜生长的效应。【方法】盆栽‘圆佳’西瓜(*Citrullus lanatus*)嫁接苗[砧木为‘全能铁甲’南瓜(*Cucurbita maxima*×*C. moschata*)],栽培基质为西瓜连作土壤,试验设接种或不接种 AM 真菌变形球囊霉(*Glomus versiforme*)并施加 0%、1%、2%和 4%的生物质炭,共 8 个处理,测定土壤理化特性、土壤酶活性、土壤微生物数量和植株生长量。【结果】接种 AM 真菌并施加生物质炭,可显著促进土壤大颗粒团聚体的形成和有机质的矿化,稳定土壤 pH,增加土壤细菌和放线菌数量,降低真菌数量,提高土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和脲酶的活性,活化土壤矿质养分,最终促进西瓜植株的生长发育。其中,以接种变形球囊霉并施加 2%–4%生物质炭组合的效应最大。两者互作在一定程度上提高了连作土壤的 pH、饱和含水量及孔隙度,降低了土壤容重,有利于土壤大颗粒团聚体的形成,提高了土壤酶活性,改善了根围土壤微生物组成。【结论】AM 真菌接种配合施加 2%–4%的生物质炭可以显著改善连作土壤的肥力状况。

关键词: 丛枝菌根真菌, 生物质炭, 连作土壤, 土壤微生物, 土壤团聚体

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the fertility of continuous watermelon cropping soil

LIU Yao-Chen^{1,2} WANG Ping^{1,2} LIU Run-Jin¹ LI Min^{*1,2}

1 Institute of Mycorrhizal Biotechnology, Agricultural University of Qingdao, Qingdao, Shandong 266109, China

2 College of Horticulture, Agricultural University of Qingdao, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract: [Background] As a soil modifier, biochar can improve soil fertility, promote arbuscular mycorrhizal (AM) fungal colonization, plant growth and development. [Objective] To evaluate the effects of AM fungi inoculation with adding biochar on the fertility of continuous cropping soil, and the growth of watermelon plants. [Methods] A pot experiment was conducted with watermelon continuous cropping soil

Foundation items: Major Scientific Innovation Project of Shandong Province (2019JZZY010715); Key Research and Development Program of Shandong Province (2019GNC106043); Graduate Innovation Fund of Qingdao Agricultural University (QYC201925)

*Corresponding author: E-mail: minli@qau.edu.cn

Received: 06-07-2020; Accepted: 12-10-2020; Published online: 20-10-2020

基金项目: 山东省重大科技创新项目(2019JZZY010715); 山东省重点研发计划(2019GNC106043); 青岛农业大学研究生创新基金(QYC201925)

*通信作者: E-mail: minli@qau.edu.cn

收稿日期: 2020-07-06; 接受日期: 2020-10-12; 网络首发日期: 2020-10-20

as the substrate for planting ‘Yuanjia’ watermelon (*Citrullus lanatus*) grafted on the root stock ‘Quannengtiejia’ pumpkin (*Cucurbita maxima*×*C. moschata*). A total of 8 treatments were designed with the inoculation with or without AM fungi (*Glomus versiforme*), being added 0%, 1%, 2% and 4% biochar. The soil physical and chemical properties, soil enzyme activities, soil microbial quantity and the plant growth were measured. **[Results]** *G. versiforme* inoculation with biochar addition could significantly promote the formation of large soil aggregates and the mineralization of soil organic matter; stabilize soil pH; increase the number of soil bacteria and actinomycetes, and reduce the number of fungi; increase the activities of soil invertase, hydrogen peroxide enzyme and urease; activate soil mineral nutrients, and ultimately promote the growth and development of watermelon plants. Among them, the effect of inoculating *G. versiforme* and applying 2%–4% biochar combination is the best. There were interactions between AM fungi and biochar, which improved the continuous cropping soil pH, saturated water content and porosity, reduced the soil bulk density, favorable for the formation of large particles aggregate of soil, increased the soil enzyme activities and improved the rhizosphere soil microbial composition. **[Conclusion]** The combination of AM fungi and 2%–4% biochar can significantly improve the fertility of continuous cropping soil.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, Biochar, Continuous cropping soil, Soil microbes, Soil aggregates

近年来, 连作障碍日益加剧, 造成土壤板结、土壤微生物群落结构失衡和土壤酶活性降低等肥力下降与健康恶化问题, 致使蔬菜作物生长发育不良, 产量和品质降低, 严重制约了蔬菜产业的可持续发展。人们一直在探索寻求解决这一难题的有效途径。

业已证实, 丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌不仅能促进寄主植物的生长发育, 而且还能改善土壤理化性状^[1-2]。接种摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)、变形球囊霉(*Glomus versiforme*)和根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)能够提高土壤中有益微生物的数量, 其丰富的根外菌丝结构也能改善土壤理化特性^[3]。试验表明, 摩西斗管囊霉可以改善土壤团粒结构, 促进有益微生物的繁殖, 提高土壤酶活性, 促进土壤养分的转运与利用^[4]。AM真菌还能减少连作西瓜土壤中酚酸化合物的积累, 缓解连作障碍对西瓜造成的自毒现象^[5]。然而, 一些条件下仅仅依靠AM真菌接种尚难以达到理想的效果。AM真菌配合其他农艺措施往往可以增大接种效应^[6-7]。

所谓生物质炭属于一种新型的土壤改良剂, 独特的空间结构和组成成分使其在土壤改良方面

具有重要作用^[8-9]。生物质炭在土壤中稳定性高, 疏松多孔的结构可以显著促进土壤团聚体的形成, 增加土壤孔隙度, 防止土壤板结^[10]; 丰富的官能团还可以为土壤微生物提供良好的附着空间和繁殖条件, 对土壤微生物区系及土壤微生态环境有重要影响。生物质炭可通过自身携带养分、改善土壤理化性质和养分有效性等途径影响微生物数量、活性和群落结构^[11]。Maestrini等^[12]和Kuzyakov等^[13]采用¹³C或¹⁴C标记生物质炭的研究发现, 生物质炭可以通过共生代谢来作为一种碳源。大量研究证实, 添加生物质炭不仅改善土壤的理化特性^[14]、微生物群落结构和酶活性^[15], 而且对于连作土壤中有机质积累^[16]、有效养分转化^[14]和增强植物抗病性^[17]等过程同样发挥着重要作用, 可直接或间接影响植物生长发育过程。

Ishii等^[18]的试验进一步表明生物质炭可以显著促进AM真菌对植物的侵染。Ezawa等^[19]发现无机土壤改良剂可以增强AM真菌对寄主植物的促生作用, 其中无机多孔材料包括生物质炭具有显著的效果。接种AM真菌配施生物炭可以显著促进烟草的生长^[20]; 修复矿区土壤, 提高矿区土壤养分^[21]。可见AM真菌配合一定量的生物质炭之间可能存在相互促进, 增强其生理生态效应。然

而, 有关AM真菌与生物质炭联合缓解设施土壤连作障碍的研究尚鲜见报道。本文通过探讨接种AM真菌和生物质炭协同增效作用及其对连作土壤理化性质和微生物区系的影响, 以为缓解设施蔬菜连作障碍提供技术基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

自青岛即墨区刘家庄采集 5 年以上西瓜连作土壤, 其 pH 6.24, 全氮含量 6.40 g/kg, 速效磷 54.60 mg/kg, 速效钾 119.30 mg/kg, 有机质 12.70 g/kg。

‘圆佳’西瓜品种和嫁接砧木‘全能铁甲’均由邹平华创农业科技有限公司提供。

AM 真菌为保存于三叶草(*Trifolium repens* L.) 上的变形球囊霉(*Glomus versiforme*, Gv), 由青岛农业大学菌根技术研究所提供。在灭菌砂土中经三叶草扩繁 4–5 个月, 以菌根化根段、培育基质中的菌丝体、孢子和根围土壤组成混合接种物, 每 1 mL 菌剂含 20 个孢子。

生物质炭为花生壳炭, 由河南三利新能源有限公司提供。炭化温度为 350–500 °C, 生物材料 35% 转化为生物质炭, pH 9.86, 有机碳 138.32 g/kg, 土壤容重 0.46 g/cm³, 比表面积 8.61 m²/g。

栽培植株用的花盆上/下口直径为 15/12 cm, 高 10 cm。

电导率仪, 上海仪电科学仪器股份有限公司; 等离子体发射光谱仪, PerkinElmer 公司; 凯氏定氮仪, Foss 公司。

1.2 试验方法

试验在青岛农业大学日光温室进行。采用穴盘育苗, 每穴接种 AM 真菌菌剂 5 mL, 一叶一心时选取长势一致的嫁接苗移栽至塑料盆中, 每个处理 10 盆, 每盆内 2 株, 盆内装 2 kg 连作土和 2%–4% 的生物质炭均匀混合物。幼苗生长期定期补充 Hoagland 营养液, 其他则按照常规方法管理。

1.3 试验设计

试验共设 8 个处理: (1) 不施加生物质炭, 不

接种 AM 真菌(CK); (2) 只接种 AM 真菌(Gv); (3) 生物质炭施加量为 1% (1% C, 质量比, 下同); (4) 生物质炭施加量为 1%并接种 AM 真菌(1% C+Gv); (5) 生物质炭施加量为 2% (2% C); (6) 生物质炭施加量为 2%并接种 AM 真菌(2% C+Gv); (7) 生物质炭施加量为 4% (4% C); (8) 生物质炭施加量为 4%并接种 AM 真菌(4% C+Gv)。完全随机排列, 重复 10 次, 共 80 盆。

1.4 试验指标测定

参照鲍士旦^[22]的方法用 pH 计测定 pH (水:土=5:1, 质量比, 下同), 用电导率仪测定 EC (水:土=5:1), 重铬酸钾容量法测定有机质含量, 等离子体发射光谱仪测定土壤全磷、全钾、速效磷、速效钾、钙、镁和铜含量, 凯氏定氮仪测定土壤全氮含量。

采用环刀法测定土壤容重, 烘干法测定土壤饱和含水量, 称重法测定土壤孔隙度, 筛分法测定土壤团聚体含量, 常规方法测定土壤酶活性。

稀释涂布平板法测定土壤微生物含量^[23]; 酸性品红染色法测定 AM 真菌侵染率^[24]。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据处理, 采用 DPS 7.05 软件进行方差分析及 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤理化性质的影响

双因素方差分析表明, AM 真菌对土壤 pH、EC、土壤容重和土壤饱和含水量影响极显著, 对总孔隙度影响显著, 对通气孔隙影响不显著; 生物质炭施用量对土壤理化性质各项指标影响均达到极显著水平。生物质炭施用量与 AM 真菌交互作用对土壤 EC 值、土壤总孔隙及通气孔隙影响极显著。

施加生物质炭可提高连作土壤 pH, 而且随着添加量的增加, 土壤 pH 不断提高。相较于

CK, 施加 1%、2% 和 4% 生物质炭时, 土壤 pH 分别提高了 0.13、0.55 和 0.65; 接种 AM 真菌的土壤 pH 均高于同施用量下不接种处理; 施加生物质炭显著降低连作土壤 EC, 而且随着生物质炭添加量的增加, 土壤 EC 呈线性下降趋势。未添加生物质炭和未接种 AM 真菌处理的连作土壤, 其 EC 高达 809.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 相较于 CK, 1% C、2% C 和 4% C 处理的连作土壤 EC 分别下降了 16%、42% 和 47%, 处理间差异显著; 接种 AM 真菌的连作土壤 EC 均低于同施用量下不接种处理; 随着生物质炭施加量的增加, 土壤容重显著下降, 而土壤饱和含水量变化为 CK<1% C<4% C<2% C。当施加 2% 生物质炭时, 接种 AM 真菌处理, 土壤容重为 1.31 g/cm^3 , 此时土壤饱和含水量达到最高值, 为 20%。AM 真菌与生物质炭交互作用能显著改善连作土壤容重、增加土壤饱和水量。AM 真菌与生物质炭交互效应能显著提高土壤总孔隙度, 表现效果为 4% C+Gv>2% C+Gv>1% C+Gv>Gv。在单施加生物质炭的处理中, 土壤通气孔隙度随着生物

质炭施用量的提高呈先上升后下降的趋势, 生物质炭施用量为 2% 的土壤通气孔隙度均高于其他处理; 接种 AM 真菌处理中, 以 2% C+Gv 处理后的连作土壤通气孔隙度最高, 达到 25% (表 1)。

2.2 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤团聚体含量的影响

表 2 结果表明, >2 mm 的土壤团聚体颗粒含量最高的处理为 4% C+Gv, 含量最低的处理为 CK。0.25–0.50 mm 和 <0.25 mm 的土壤团聚体颗粒含量最高的处理均为 CK, 而这两种粒级团聚体颗粒的最低含量分别出现在处理 4% C 和 4% C+Gv; AM 真菌对 >2 mm、1–2 mm 和 <0.25 mm 的土壤团聚体颗粒含量影响极显著; 生物质炭施用量对 >2 mm、1–2 mm 和 <0.25 mm 的土壤团聚体颗粒含量影响极显著, 对 0.5–1.0 mm 和 0.25–0.50 mm 的土壤团聚体颗粒含量影响显著; 两者相互作用对 0.5–1.0 mm 和 0.25–0.50 mm 的土壤团聚体颗粒含量影响极显著, 对 1–2 mm 的土壤团聚体颗粒含量影响显著。

表 1 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of AM fungi and biochar on physical and chemical properties of continuous watermelon cropping soil

处理 Treatments	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	土壤容重 Compaction (g/cm^3)	总孔隙度 Total porosity (%)	通气孔隙 Aeration porosity (%)	土壤饱和含水量 Soil saturated water content (%)
CK	809.00±2.52a	6.57±0.07g	1.41±0.10a	62.47±9.50g	22.16±7.14f	12.33±0.45f
1% C	677.33±4.91b	6.70±0.02f	1.37±0.18b	63.58±3.41e	23.95±9.21c	15.03±0.58e
2% C	470.67±1.86c	7.13±0.03cd	1.33±0.14c	64.64±2.22c	24.85±5.52a	19.07±0.24b
4% C	425.33±7.13d	7.22±0.05bc	1.29±0.21de	65.63±5.80ab	24.41±5.51b	17.90±0.20cd
Gv	743.67±6.57e	6.86±0.04e	1.4±0.15ab	62.65±6.71f	22.50±2.84e	14.77±0.18e
1% C+Gv	637.67±2.40f	7.00±0.04d	1.34±0.17c	64.35±2.13d	23.51±2.27d	17.20±0.26d
2% C+Gv	428.00±4.04f	7.31±0.02b	1.31±0.16cd	65.57±4.45b	25.05±3.29a	20.43±0.60a
4% C+Gv	394.67±1.76g	7.44±0.04a	1.28±0.15e	65.74±1.19a	24.55±2.42b	18.73±0.18bc
F (AMF)	79.83**	36.58**	28.22**	21.44**	4.53*	1.04 ^{ns}
F (Biochar)	109.92**	154.20**	153.19**	54.30**	39.33**	44.05**
F (Biochar×AMF)	0.87 ^{ns}	5.68**	0.35 ^{ns}	1.91 ^{ns}	27.23**	8.12**

注: 同列数据后字母不同则表示在 5% 水平上差异显著; *和**: $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著; ns: 差异不显著。CK: 对照; 1% C: 生物质炭添加量为 1%; 2% C: 生物质炭添加量为 2%; 4% C: 生物质炭添加量为 4%; Gv: 接种 AM 真菌。下同。

Note: Different letters indicate significant difference at 0.05 level. *, ** means that $P<0.05$ and $P<0.01$ are significantly different, ns means that the difference is not significant. CK: Control; 1% C: The amount of biochar added is 1%; 2% C: The amount of biochar added is 2%; 4% C: The amount of biochar added is 4%; Gv: AM fungi inoculation. The same as below.

表 2 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤团聚体的影响

Table 2 Effects of AM fungi and biochar on aggregates of continuous watermelon cropping soil

处理 Treatments	土壤团聚体含量 Soil stable aggregate contents (%)				
	>2 mm	1-2 mm	0.5-1.0 mm	0.25-0.5 mm	<0.25 mm
CK	16.40±1.22e	12.93±0.24e	20.20±0.42b	20.13±0.18a	29.67±1.25a
1% C	19.40±0.12d	15.73±0.52d	19.67±0.90b	16.73±0.48bc	27.27±0.64ab
2% C	23.87±0.18c	19.07±0.77bc	15.60±0.31c	16.20±0.69c	24.73±0.53b
4% C	26.53±1.12b	20.80±0.92b	19.13±0.37b	13.00±0.20ef	19.73±0.24cd
Gv	18.73±0.77de	14.40±1.22de	23.13±1.83a	18.00±0.76b	25.13±1.62b
1% C+Gv	23.20±1.31c	17.87±0.29c	24.47±0.07a	12.53±0.35f	21.27±1.16c
2% C+Gv	28.07±0.53ab	24.27±0.24a	14.53±0.18c	15.67±0.29cd	16.87±0.47de
4% C+Gv	30.27±0.77a	22.93±0.29a	15.33±0.75c	14.27±0.87de	16.47±1.22e
F (AMF)	74.39**	10.67**	0.14 ^{ns}	1.45 ^{ns}	29.98**
F (Biochar)	140.34**	22.65**	3.11*	4.12*	16.79**
F (Biochar×AMF)	0.45 ^{ns}	3.21*	11.64**	9.35**	1.96 ^{ns}

2.3 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤氮、磷、钾元素含量的影响

如表 3 所示, 随着生物质炭施用量的增加, 土壤中氮含量呈先上升后下降的趋势。生物质炭施用量为 2% 时土壤氮含量最高, 达到 16.29 g/kg, 接种 AM 真菌提高了土壤含氮量; 随着生物质炭施用量的增加, 土壤中磷含量呈持续上升, 生物质炭施用量为 4% 处理的连作土壤中磷含量比 CK 上升了 21%; 接种 AM 真菌与施加生物质炭交互处理的土壤磷含量呈先减少后增加的趋势; 土壤全钾量因生

物质炭添加量的增大而先增加后减少, 在生物质炭施用量为 2% 时土壤钾含量最高, 为 58.20 g/kg, 同一生物质炭施用量下接种 AM 真菌使土壤含钾量减少, 而且在生物质炭施用量为 2% 时下降幅度最大; 在同一生物质炭施用量下, 接种 AM 真菌的土壤中速效磷和速效钾含量均低于未接种处理, 而在 4 种生物质炭施用量中, 又以 CK 的含量最低, 速效磷和速效钾含量随着生物质炭添加量的增加而不断提高, 在所有未接种处理中的连作土壤中生物质炭施用量为 4% 时速效磷和速效钾含量最高。

表 3 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤氮、磷、钾元素含量的影响

Table 3 Effects of AM fungi and biochar on soil N, P and K contents in continuous watermelon cropping soil

处理 Treatments	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
CK	5.82±0.67e	1 554.98±8.89b	52.27±0.23g	46.18±1.19b	106.80±0.53g
1% C	12.03±1.69cd	1 584.8±9.89b	61.13±0.26e	55.11±1.30a	120.67±0.47c
2% C	16.29±1.34ab	1 812.31±53.22a	74.10±0.15b	58.20±0.87a	137.63±0.69a
4% C	13.58±1.69abc	1 876.00±70.96a	76.27±0.43a	55.91±1.85a	139.93±0.35b
Gv	9.31±0.67de	1 089.25±14.20d	49.30±0.69h	39.60±0.30c	99.97±0.77h
1% C+Gv	12.8±1.16bcd	979.40±51.84d	57.23±0.43f	47.91±0.13b	112.20±0.25e
2% C+Gv	17.07±1.03a	1 000.91±81.80d	65.40±1.06d	47.03±1.5b	127.73±0.45f
4% C+Gv	13.97±0.67abc	1 235.21±10.91c	70.20±0.26c	48.20±1.50b	133.20±0.26d
F (AMF)	3.60 ^{ns}	358.86**	213.33**	51.80**	504.20**
F (Biochar)	28.20**	13.21**	763.03**	16.51**	1 855.43**
F (Biochar×AMF)	0.73 ^{ns}	4.56*	11.85**	0.82 ^{ns}	4.48*

2.4 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤其他矿物质含量的影响

如表 4 所示, 施用生物质炭可明显增加土壤中 Cu、Mg 和 Ca 的含量, 与 CK 相比, 各处理的土壤钙含量分别增加了 19%、21% 和 36%; 土壤中镁含量分别增加了 5%、7% 和 19%; 土壤铜含量分别增加了 15%、27% 和 33%; 同施用量下接种 AM 真菌处理的 3 种矿物质含量均低于未接种处理; 土壤有机质含量随着生物质炭添加量的增多而不断上升, 接种 AM 真菌的土壤有机质含量均低于同施用量下未接种处理, 各处理分别降低 17%、22%、18% 和 15%。

2.5 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤酶活性的影响

施加生物质炭处理可显著提高连作土壤的蔗糖酶活性, 1% C、2% C 和 4% C 处理的蔗糖酶活性比 CK 分别增加了 26%、56% 和 120%; 脲酶活性随着生物质炭施用量的增加呈先上升后下降的趋势, 在生物质炭施用量为 2% 和 4% 时最高。接种 AM 真菌处理的连作土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶和脲酶活性均高于未接种处理的土壤。土壤中蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性最高的处理分别为 4% C+Gv、2% C+Gv 和 2% C+Gv, 分别高于最低值 79%、59% 和 6%。通过方差分析可见, 接种 AM 真菌、施加生物质炭都对 3 种土壤酶活性产生

极显著的影响, 而二者交互作用对蔗糖酶和脲酶活性影响不显著, 对过氧化氢酶影响极显著(表 5)。

2.6 西瓜连作土壤养分与酶活性相关性分析

相关性分析(表 6)表明, 土壤 EC 与土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶有极显著负相关, 而土壤 pH 与其呈现极显著正相关。土壤全磷、全钾含量与土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶并没有显著相关性, 但土壤速效磷与蔗糖酶和过氧化氢酶呈显著正相关, 相关系数分别为 $r=0.730$ 和 $r=0.816$, 土壤速效钾与蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶显著正相关, 相关系数为 $r=0.724$ 、 $r=0.711$ 和 $r=0.763$ 。全氮含量与脲酶显著正相关, 与过氧化氢酶极显著正相关。土壤有机质含量与过氧化氢酶呈显著正相关。

2.7 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤微生物含量的影响

施用生物质炭后土壤中细菌、放线菌数量均有所增加, 土壤中真菌数量呈下降趋势(表 7)。与 CK 相比, 不同生物质炭施用量处理的土壤细菌数量分别增加了 26%、65% 和 56%; 真菌数量随生物质炭施用量升高而不断下降; 放线菌数量随生物质炭施用量升高而不断增加。同生物质炭施用量下接种 AM 真菌的土壤中真菌数量显著低于未接种处理, 细菌数量显著高于未接种处理, 放线菌数量高于未接种处理(表 7)。

表 4 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤钙、镁、铜和有机质含量的影响

Table 4 Effects of AM fungi and biomass carbon on contents of Ca, Mg, Cu and organic matter in continuous watermelon cropping soil

Treatments	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Cu (mg/kg)	Organic matter (mg/kg)
CK	7.61±0.74c	5.46±0.23b	22.28±1.02c	18.27±1.13de
1% C	9.04±0.30b	5.72±0.11b	25.59±1.08bc	24.48±0.86c
2% C	9.22±0.02b	5.83±0.20b	28.25±0.43ab	29.46±0.82ab
4% C	10.31±0.29a	6.48±0.07a	29.66±1.32a	31.05±0.60a
Gv	4.63±0.21e	4.38±0.09cd	22.35±0.28c	15.68±0.90e
1% C+Gv	5.47±0.10de	3.92±0.07d	24.13±0.78c	20.06±0.33d
2% C+Gv	5.89±0.09d	4.12±0.10d	24.33±1.17c	24.94±1.53c
4% C+Gv	6.87±0.09c	4.72±0.28c	23.92±1.16c	27.08±1.27bc
F (AMF)	222.95**	191.61**	11.46**	30.33**
F (Biochar)	20.71**	9.51**	6.04**	59.33**
F (Biochar×AMF)	0.33 ^{ns}	2.23 ^{ns}	2.49 ^{ns}	0.40 ^{ns}

表 5 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤酶活性的影响

Table 5 Effects of AM fungi and biochar on enzyme activities in continuous watermelon cropping soil

处理 Treatment	蔗糖酶 Invertase (mg/(g·24 h))	脲酶 Urease (mg/(g·24 h))	过氧化氢酶 Catalase (mL/(g·20 min))
CK	9.90±0.39e	0.07±0.02g	1.60±0.07g
1% C	12.44±0.58d	0.08±0.01ef	1.67±0.04e
2% C	15.46±0.82c	0.10±0.02bc	1.74±0.04b
4% C	21.76±0.84a	0.10±0.01cd	1.72±0.06c
Gv	13.21±0.35d	0.07±0.02fg	1.65±0.02f
1% C+Gv	15.84±1.15c	0.09±0.01de	1.69±0.04d
2% C+Gv	19.62±0.18b	0.12±0.06a	1.75±0.05a
4% C+Gv	23.71±0.53a	0.11±0.01ab	1.74±0.05ab
F (AMF)	48.40**	29.97**	10.29**
F (Biochar)	109.63**	84.25**	46.73**
F (Biochar×AMF)	0.93 ^{ns}	0.81 ^{ns}	5.87**

表 6 西瓜连作土壤养分与酶活性相关性分析

Table 6 Correlation analysis between soil nutrients and soil enzyme activities in continuous watermelon cropping

处理 Treatments	全氮 Total N	全磷 Total P	速效磷 Available P	全钾 Total K	速效钾 Available K	有机质 Organic matter	EC	pH
蔗糖酶 Invertase	0.70 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	0.73*	0.19 ^{ns}	0.72*	0.67 ^{ns}	-0.91**	0.95**
脲酶 Urease	0.74*	-0.13 ^{ns}	0.69 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.71*	0.62 ^{ns}	-0.90**	0.94**
过氧化氢酶 Catalase	0.97**	-0.02 ^{ns}	0.82*	0.42 ^{ns}	0.82*	0.76*	-0.96**	0.93**

表 7 AM 真菌和生物质炭对西瓜连作土壤微生物含量的影响

Table 7 Effects of AM fungi and biochar on microbial content in continuous watermelon cropping soil

处理 Treatments	真菌 Fungi ($\times 10^3$ CFU/g)	细菌 Bacteria ($\times 10^5$ CFU/g)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^3$ CFU/g)
CK	7.27±0.13a	4.80±0.17e	1.76±0.23ef
1% C	6.40±0.19bc	6.07±0.32d	2.40±0.13d
2% C	5.53±0.17d	7.93±0.29bc	3.12±0.23c
4% C	5.27±0.13de	7.47±0.17bc	4.12±0.12ab
Gv	6.67±0.15b	5.87±0.49d	2.02±0.17de
1% C+Gv	6.20±0.08c	7.20±0.31c	2.94±0.11c
2% C+Gv	5.20±0.13de	8.93±0.19a	3.74±0.16b
4% C+Gv	5.07±0.12e	8.13±0.27ab	4.60±0.13a
F (AMF)	66.34**	558.79**	135.39**
F (Biochar)	422.73**	1 116.19**	669.03**
F (Biochar×AMF)	5.33**	6.63**	3.58*

2.8 AM 真菌和生物质炭对连作西瓜生长量的影响

接种 AM 真菌的西瓜幼苗与未接种处理的相比, 各项指标均显著高于同生物质炭施用量下不接种的处理, 其中在生物质炭施用量为 2% 时差异最显著, 株高、茎粗、地上部、地下部鲜重分别增加了 25%、19%、20% 和 22%。AM 真菌和生物质炭的交互处理中, 各项指标都显著高于 CK, 其中 2% C+AM 真菌处理效果最优, 各项指标分别比 CK 增加了 91%、34%、50% 和 70%。通过方差分析可见, 施加生物质炭、接种 AM 真菌都对连作西瓜生长产生极显著的影响, 而二者交互作用影响不显著; 与 CK 相比, 施加生物质炭处理的菌根侵染率均有所提高, 分别较 CK 提高了 3%、10% 和 5%, 表明添加生物质炭有利于 AM 真菌对寄主植物的侵染, 生物质炭对 AM 真菌活动有增益作用(表 8)。

3 讨论与结论

单独施用生物质炭^[25]或单独接种 AM 真菌^[3]均可改善土壤团聚体构成。本试验观测到施加生物质炭和/或接种 AM 真菌减少 <0.25 mm 和 0.25–0.5 mm 的团聚体相对含量, 而增加大团聚体相对含量, 从而可以有效防止土壤板结, 提高土壤孔隙度和饱和含水量, 显著降低土壤容重。土

壤团聚体结构的改变可能与以下因素相关: (1) 生物质炭表面较多的官能团可以与土壤胶粒结合, 形成较为稳定的大团粒结构; 生物质较大的比表面积、较多的表面负电荷和较高的电荷密度, 对小分子物质和金属离子具有较强的吸附能力, 借助于吸附的小分子物质和金属离子生物质炭也可以对土壤胶粒进行结合。(2) 土壤中分布的 AM 真菌庞大的菌丝网络可以促进土壤团聚体的形成和结构稳定, 其与植物根系结合而成的菌根结构会分泌酚酸和类黄酮等物质, 这些分泌物可以进一步增强菌根在土壤团聚体形成中的作用^[26–28]。(3) 本研究将生物质炭与 AM 真菌配合施用, AM 真菌菌丝可以从生物质炭颗粒的多孔结构中穿过, AM 真菌庞大的菌丝网络与生物质炭的多孔结构相结合, 形成稳定性更高的土壤团粒结构。

本试验生物质炭处理的土壤养分状况得到显著改善, 这与所施用的生物质炭为花生壳加工而成, 自身含有一定的可溶性有机质和 N、P、K、Ca、Mg、Cu 等营养物质, 可以提高土壤养分含量不无关系。土壤团粒结构的改善进而改善了土壤的毛管结构, 有利于土壤养分的转运^[29]; AM 真菌也可以协助土壤养分的转运^[1]。生物质炭具有较强的吸附能力, 可以有效避免淋溶损失, 有利于保持土壤肥力, 增加土壤阳离子交换能力^[30]。

表 8 AM 真菌和生物质炭对连作西瓜幼苗生长的影响

Table 8 Effect of AM fungi and biochar on growth of continuous cropping watermelon seedlings

处理	株高	茎粗	地上部鲜重	根鲜重	AM 真菌侵染率
Treatments	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Shoot fresh weight (g)	Root fresh weight (g)	AM fungi colonization rate (%)
CK	72.6±3.0e	7.03±0.17f	30.16±0.76e	8.30±0.30f	7.7±0.3d
1% C	87.3±3.4d	7.19±0.09ef	32.48±0.75e	9.42±0.27e	8.0±0.6d
2% C	111.4±3.8c	7.92±0.18cd	37.78±1.27cd	11.60±0.40c	8.7±0.3d
4% C	99.0±2.3d	7.81±0.12cd	37.78±1.39cd	11.26±0.28cd	8.7±0.9d
Gv	98.6±2.7d	7.64±0.19de	35.86±1.01d	10.46±0.30d	59.7±0.3c
1% C+Gv	123.5±4.6bc	8.22±0.09bc	40.76±0.70bc	12.50±0.21b	61.3±0.9bc
2% C+Gv	138.9±5.3a	9.40±0.16a	45.30±1.59a	14.12±0.27a	65.7±0.7a
4% C+Gv	129.3±7.1ab	8.62±0.22b	42.56±1.08ab	13.24±0.32b	62.7±0.3b
F (AMF)	180.02**	28.16**	69.58**	100.79**	261.16**
F (Biochar)	56.24**	9.86**	23.61**	40.36**	1.99 ^{ns}
F (Biochar×AMF)	0.54 ^{ns}	2.94 ^{ns}	1.05 ^{ns}	1.32 ^{ns}	6.44**

研究表明, 土壤有机质和土壤养分与土壤酶活性之间具有相关性^[31-32], 而酶主要集中在土壤团聚体中, 本研究中添加生物质炭并接种 AM 真菌以后土壤总孔隙度、通气孔隙度增加, 土壤微团聚体构成改善, 因此土壤中酶活性随之增强, 进而提高土壤养分含量^[33]。土壤微生物群落结构在添加生物质炭并接种 AM 真菌后得到显著改善, 土壤理化性质的改善能够为土壤微生物提供附着位点和较大的生存空间。张志龙等^[34]发现向黄瓜连作土壤中施加生物质炭后土壤微生物量显著提高; 于小彦等^[35]研究发现向土壤中添加生物质炭对土壤微生物类群丰度和群落结构影响显著, 并且受生物质炭添加时间和土壤含水量的影响。生物质炭所含有的易分解有机物质可以为微生物提供碳源^[14]。因此, 生物质炭和 AM 菌剂配施可以促进根围土壤中有益微生物的定殖, 提高菌体的成活率, 发挥协同增效作用。

综上所述, 接种 AM 真菌并施用生物质炭可以提高连作土壤的饱和含水量及孔隙度, 降低了土壤容重, 有利于土壤大颗粒团聚体的形成, 提高了土壤酶活性, 改善了根围土壤微生物结构, 其中生物质炭施用量为 2% 时生物质炭经济效果最佳。

REFERENCES

- [1] Cai XY, Liu YC, Xie ZH, et al. Research advances in mutualistic symbiotic microbe diversities[J]. *Microbiology China*, 2020, 47(11): 3899-3917 (in Chinese)
蔡昕悦, 刘耀臣, 谢志红, 等. 共生微生物多样性研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3899-3917
- [2] Liu RJ, Wang L. *Biological Symbiotics*[M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)
刘润进, 王琳. *生物共生学*[M]. 北京: 科学出版社, 2018
- [3] Xie HX, Liu RJ, Sun JQ, et al. Effects of AMF and grafting on soil physical, chemical and microbial characters in continuous cropping watermelon soil[J]. *Mycosystema*, 2018, 37(5): 625-632 (in Chinese)
谢宏鑫, 刘润进, 孙吉庆, 等. AMF 与嫁接对西瓜连作土壤理化和微生物状况的影响[J]. *菌物学报*, 2018, 37(5): 625-632
- [4] Cui L, Guo F, Zhang JL, et al. Improvement of continuous microbial environment in peanut rhizosphere soil by *Funneliformis mosseae*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(8): 718-728 (in Chinese)
崔利, 郭峰, 张佳蕾, 等. 摩西斗管囊霉改善连作花生根际土壤的微环境[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(8): 718-728
- [5] Ma T, Li GF, Liu RJ, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungus on the content of phenolic acids and flavonoids in continuous cropping watermelon roots and rhizosphere soils[J]. *Northern Horticulture*, 2014(8): 1-4 (in Chinese)
马通, 李桂舫, 刘润进, 等. AM 真菌对连作西瓜根内和根围土壤酚酸类物质和黄酮含量的影响[J]. *北方园艺*, 2014(8): 1-4
- [6] Zheng JL, Sun DD, Li M, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and agricultural techniques on soil fertilities[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2016, 33(2): 81-85 (in Chinese)
郑锦龙, 孙丹丹, 李敏, 等. 丛枝菌根真菌和农业技术对土壤肥力的影响[J]. *青岛农业大学学报: 自然科学版*, 2016, 33(2): 81-85
- [7] Sun DD, Zheng JL, Guo SX, et al. Synergistic effects and mechanism of agricultural techniques and arbuscular mycorrhizal fungi on soil-borne diseases of crops[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(7): 158-163 (in Chinese)
孙丹丹, 郑锦龙, 郭绍霞, 等. 农业技术与 AM 真菌协同防治作物土传病害的效应与机制[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(7): 158-163
- [8] Kavitha B, Reddy PVL, Kim B, et al. Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 227: 146-154
- [9] Laghari M, Naidu R, Xiao B, et al. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(15): 4840-4849
- [10] Xie GX, Wang DZ, Wu Y, et al. Ameliorating effects of biochar application on degraded vegetable soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(1): 67-71 (in Chinese)
谢国雄, 王道泽, 吴耀, 等. 生物质炭对退化蔬菜地土壤的改良效果[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(1): 67-71
- [11] Rao S, Lu Y, Huang F, et al. A review of researches on effects of biochars on soil microorganisms[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(1): 53-59 (in Chinese)
饶霜, 卢阳, 黄飞, 等. 生物炭对土壤微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(1): 53-59

- [12] Maestrini B, Herrmann AM, Nannipieri P, et al. Ryegrass-derived pyrogenic organic matter changes organic carbon and nitrogen mineralization in a temperate forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 291-301
- [13] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen HQ, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 210-219
- [14] Liu YS, Liu F, Chen ZY, et al. Regulation effects of biochar on the biological characteristics and nutrient availability of dryland soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 166-171,178 (in Chinese)
刘元生, 刘方, 陈祖拥, 等. 生物质炭对旱作土壤生物性状及养分有效性的调控效应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 166-171,178
- [15] Wang DD, Yang ZP, Zhao Y, et al. Effect of biochar addition on the diversity and interaction of rhizosphere fungi in manure-fertilized soil[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5163-5169 (in Chinese)
王丹丹, 杨泽平, 赵远, 等. 生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5163-5169
- [16] Lu HX. The effect of biochar on soil fertility[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2019, 35(5): 90-94 (in Chinese)
卢洪秀. 生物质炭对土壤肥力的影响研究[J]. *上海农业学报*, 2019, 35(5): 90-94
- [17] Wang GF, Ma Y, Guo DJ, et al. Inhibitory effect of biochar-enriched biocontrol agents on *Phytophthora capsici*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(7): 1015-1023 (in Chinese)
王光飞, 马艳, 郭德杰, 等. 生物质炭介导生防微生物抑制辣椒炭霉的作用[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(7): 1015-1023
- [18] Ishii T, Kadoya K. Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus growth and vesicular-arbuscular mycorrhizal development[J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1994, 63(3): 529-535
- [19] Ezawa T, Yamamoto K, Yoshida S. Enhancement of the effectiveness of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi by inorganic soil amendments[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, 48(6): 897-900
- [20] Liu XL, 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 (in Chinese)
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
- [21] Yue FX, Li JW, Wang YF, et al. Mechanism of the improvement effect by biochar and AM fungi on the availability of soil nutrients in coal mining area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(8): 1325-1334 (in Chinese)
悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 生物炭和 AM 真菌提高矿区土壤养分有效性的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1325-1334
- [22] Bao SD. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [23] Shen P, Chen XD. *Microbiology Experiment*[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese)
沈萍, 陈向东. *微生物学实验*[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [24] Liu RJ, Chen YL. *Mycorrhizology*[M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
刘润进, 陈应龙. *菌根学*[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [25] Ji Q, Ma YY, Liu YG, et al. Effects of biochar application on the distribution of soil aggregates and active organic carbon, kinetic parameters of soil invertase, and wheat growth[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4366-4375 (in Chinese)
姬强, 马媛媛, 刘永刚, 等. 秸秆生物炭对土壤结构体与活性碳分布、转化酶动力学参数及小麦生长的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4366-4375
- [26] Rillig MC, Wright SF, Eviner VT. 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
- [27] Peng SL, Guo T, Liu GC. The effects of arbuscular mycorrhizal hyphal networks on soil aggregations of purple soil in southwest China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 411-417
- [28] Carlsen SCK, Understrup A, Fomsgaard IS, et al. Flavonoids in roots of white clover: interaction of arbuscular mycorrhizal fungi and a pathogenic fungus[J]. *Plant & Soil*, 2008, 302(1/2): 33-43
- [29] Liu JT, Zhang JJ, Sun RX, et al. Effects of the conversion time of cropland into forestry on soil physical properties in loess area of western Shanxi Province of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(1): 94-103 (in Chinese)
刘俊廷, 张建军, 孙若修, 等. 晋西黄土区退耕年限对土

- 壤孔隙度等物理性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 94-103
- [30] Hao M, Li YW, Han JH, et al. Effects of biochar derived from corn cob and sludge on physical and chemical properties and heavy metal availability of saline-sodic soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 27-33 (in Chinese)
- 郝敏, 李艳伟, 韩剑宏, 等. 玉米芯基和污泥基生物质炭对盐碱土壤理化性质及重金属有效性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 27-33
- [31] Shang LR, Tong ZY, Li ZS, et al. Effects of sputum and slag on soil nutrients and enzyme activities in *Leymus chinensis* steppe[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(10): 81-91 (in Chinese)
- 商丽荣, 仝宗永, 李振松, 等. 蚯蚓粪和菌渣对羊草草原土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 81-91
- [32] Yan LJ, Wang HY, Li G, et al. Effects of four typical vegetations on soil nutrient and enzymes activities in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 190-196,204 (in Chinese)
- 闫丽娟, 王海燕, 李广, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 190-196,204
- [33] Jiao LN, Li ZH, Yin CC, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 665-672 (in Chinese)
- 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 665-672
- [34] Zhang ZL, Chen XM, Qu CC, et al. Effects of biochar addition on soil microbial biomass C, N and enzyme activities in cucumber continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1384-1391 (in Chinese)
- 张志龙, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤中微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1384-1391
- [35] Yu XY, Yang YF, Zhang PJ, et al. Effects of biochar addition on soil microbial community structure under different water conditions[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(9): 1163-1171 (in Chinese)
- 于小彦, 杨艳芳, 张平究, 等. 不同水分条件下生物质炭添加对湿地土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1163-1171