

生物炭对温室黄瓜不同连作年限土壤养分和微生物群落多样性的影响

王彩云¹ 武春成^{1*} 曹霞¹ 贺字典² 曾晓玉¹ 姜涛¹

(¹河北科技师范学院园艺科技学院, 河北昌黎 066600; ²河北科技师范学院农学与生物科技学院, 河北昌黎 066600)

摘要 以温室黄瓜连作6年和10年土壤添加质量比为5%生物炭为处理,以不添加生物炭为对照,采用桶栽的方法,研究了生物炭对不同年限连作土壤养分和微生物群落多样性的影响.结果表明:与连作土壤相比,生物炭处理的连作6年土壤的黄瓜单株产量提高11.4%,连作10年土壤产量提高62.8%.施入生物炭显著降低了2种连作土壤容重,显著提高了有机质、速效磷含量、阳离子交换量(CEC)和pH;显著提高了土壤细菌数量和细菌/真菌,降低了真菌和尖孢镰刀菌数量,使土壤类型由真菌型向细菌型转变,尤其对连作10年土壤作用最为明显,土壤细菌和细菌/真菌分别是未处理的2.00和3.64倍,真菌和尖孢镰刀菌数量分别是未处理的54.8%和55.9%.土壤微生物群落碳源利用分析表明,10年连作土壤施入生物炭可显著提高土壤微生物活性、Shannon指数和均匀度指数,分别是未处理的1.50、2.14和1.31倍,同时显著提高了土壤微生物对糖类、氨基酸类、酚酸类和胺类碳源的利用强度,分别是未处理的1.62、1.81、1.74和1.93倍.相关性分析表明,土壤容重、速效磷含量、CEC和pH 4个指标对微生物群落变化的影响较显著.综上,生物炭通过对连作土壤理化性质及土壤微生物生态系统的改善,优化了黄瓜根区环境,促进了黄瓜产量的提高,缓解了温室黄瓜连作障碍.

关键词 生物炭; 养分; 微生物多样性; 连作土壤; Biolog法

Effects of biochar on soil nutrition and microbial community diversity under continuous cultivated cucumber soils in greenhouse. WANG Cai-yun¹, WU Chun-cheng^{1*}, CAO Xia¹, HE Zidian², ZENG Xiao-yu¹, JIANG Tao¹ (¹College of Horticulture, Hebei Normal University of Science & Technology, Changli 066600, Hebei, China; ²College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science & Technology, Changli 066600, Hebei, China).

Abstract: In this study, we examined the effects of biochar addition on the soil nutrition and microbial community diversity in continuous cultivated cucumber soils, using 95% soils of planting cucumbers for 6 and 10 years mixed with 5% biochar as treatment and no biochar addition as control, all plants cultivated in the pots. The results showed that adding biochar increased per plant yield of cucumber by 11.4% and 62.8% compared with continuous cropping soil of 6 years and 10 years, respectively. Biochar addition significantly decreased two continuous cropping soils bulk density, increased the content of soil organic matter, available P content, cation exchange capacity (CEC) and soil pH. Meanwhile, biochar addition remarkably improved the abundance of bacteria, ratio of bacteria/fungi, but reduced the abundance of fungi and fusarium oxysporum, which made fungal type soil turn to bacterial type soil. For 10 years continuous cropping soils of adding biochar, the abundance of soil bacteria and bacteria/fungi ratio were 2.00 and 3.64 times to that in the control, respectively, and the abundance of fungi and fusarium oxysporum were decreased by 54.8% and 55.9%, respectively. Biochar addition significantly enhanced soil microbial activities, soil microbial Shannon and McIntosh indexes of 10 years soil by 1.50, 2.14 and 1.31 times, respectively.

本文由河北省自然科学基金项目(C2016407101)和河北省现代农业产业体系项目(HBCT2018030209)资助 This work was supported by the Natural Science Fund of Hebei Province (C2016407101) and Modern Agricultural Industry System Project of Hebei Province (HBCT2018030209).

2018-09-15 Received, 2019-03-19 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuchuncheng1979@126.com

For continuous cropping soil of 10 years, biochar addition significantly increased microbial utilization abilities of carbohydrate, amino acid, phenolic acid and amine by 1.62, 1.81, 1.74 and 1.93 times, respectively. There were remarkable influences of soil bulk density, available P content, CEC, and pH value to changes of soil microbial community. In conclusion, biochar addition optimized the riphzosphere environment, increased cucumber yield, and alleviated continuous cropping obstacles by improving soil physical and chemical properties, as well as soil microbial community.

Key words: biochar; nutrition; microbial diversity; continuous cropping soil; Biolog method.

黄瓜是我国日光温室栽培较早的果菜类蔬菜,栽培面积大,经济效益高.但随着栽培年限的增加,连作现象十分普遍,连作障碍发生严重,导致土壤通气不良、土壤酸化和次生盐渍化严重,土壤病原物增加,微生物种群失衡,已成为制约我国设施蔬菜产业发展的重大问题^[1-2].生物炭由于具有独特的结构特征和理化性状,能够降低连作土壤容重,提高土壤 pH,为有益微生物栖息和繁殖提供场所,由此作为新型的环境友好型土壤改良剂被国内外广泛关注^[3-5].关于生物炭的早期研究多集中在对农田土壤理化性质及作物生长的影响方面^[6-8],目前对土壤微生物生态领域的影响研究也逐渐深入^[9-11].但将土壤理化性质与土壤微生物生态结合起来,研究其相互作用的报道较少.顾美英等^[12]研究表明,新疆灰漠土和风沙土连作棉田施用生物炭提高了两种连作棉田土壤有机质含量,促进了土壤细菌、真菌、纤维素分解菌和自生固氮菌的生长,土壤 Shannon 指数得到提升.设施退化土壤添加生物炭可提高土壤的 pH、全碳、全氮含量及碳氮比,可以显著增加土壤中氨氧化古菌、氨氧化细菌和 nirK 基因型反硝化细菌的丰度,提高土壤的硝化潜势^[13].

生物炭理化性状具有广泛的多样性,对于不同的环境条件和栽培作物表现出不同的应用效果^[14-15].设施土壤是在覆盖结构之下,处以一个相对封闭的系统中,其水分及养分运转、土壤微生物生态环境与农田土壤差异较大^[16].关于施入生物炭后设施连作土壤理化性质、土壤微生物群落结构变化及相互作用方面的研究报道较少.由此,本研究以温室黄瓜连作 6 年和 10 年的土壤为对象,通过分析不

同障碍程度的设施土壤理化性质和微生物群落对生物炭的响应及相互作用关系,揭示生物炭修复根区土壤的微生态机制,为缓解设施蔬菜连作障碍以及生物炭在设施蔬菜生产上的应用奠定理论基础.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄瓜品种为‘津优 35’,由天津科润黄瓜研究所培育.供试连作土壤取自河北科技师范学院昌黎校区园艺实验站日光温室连续栽培 6 年和 10 年黄瓜的 0~30 cm 耕层土壤,其基本化学性质见表 1.供试生物炭为玉米秸秆炭,由辽宁省生物炭工程技术中心提供,碳化温度为 500 ℃,基本理化性质为:平均孔径 16.27 nm,粒径 1.50~2.00 mm,全碳 70.38%,全氮 1.53%,全磷 0.78%,全钾 1.68%,pH 8.97.

1.2 试验设计

试验于 2017 年 4—7 月在河北科技师范学院昌黎校区(39°42′ N, 119°10′ E,海拔 22 m)园艺实验站日光温室内进行.试验采用塑料桶(规格:上口直径 30 cm,下口直径 20 cm,高 25 cm)栽培,随机区组设计,共设 5 个处理:T₀,温室外未栽培过蔬菜的对照土壤;T₆,连作 6 年土壤;T₁₀,连作 10 年土壤;TS₆,连作 6 年土壤+5%生物炭;TS₁₀,连作 10 年土壤+5%生物炭;生物炭按质量比加入土壤并混匀装桶,每桶折合干土 10 kg,添加 NPK 复合肥 10 g.各处理重复 3 次,每个重复 10 桶.2017 年 4 月 7 日于黄瓜幼苗两叶一心时定植,每桶 1 株,常规管理.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤取样方法 于黄瓜拉秧后(7月4日)采

表 1 供试土壤基本化学性状
Table 1 Chemical properties of experimental soil

土壤 Soil	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali- hydrolysis N (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)	pH	电导率 EC (μS · cm ⁻¹)
6 年连作土壤 Continuous cropping soil for 6 years	12.48	245.00	97.32	192.81	5.45	307.65
10 年连作土壤 Continuous cropping soil for 10 years	13.58	157.50	88.96	243.39	5.18	477.36
温室外对照土壤 Control soil out of greenhouse	9.30	420.00	322.74	42.64	7.48	68.22

集土样,每个区组随机选取 3 个点,采集黄瓜根区土壤,混合均匀,用消毒的镊子除去杂质后,分为 3 份,一份保存于 4 ℃ 冰箱中,一周内测定土壤微生物数量,一份立即置于-80 ℃ 超低温冰箱中保存,用于微生物多样性测定;剩余部分在室内自然风干过筛后测定土壤化学性状。

1.3.2 土壤理化性状测定 土壤含水量采用烘干法测定;容重采用环刀法测定;土壤 pH 值按土水比 1 : 5 用上海雷磁多参数水质分析仪 DZS-708 测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量稀释法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用钼蓝比色法测定;速效钾采用火焰光度法测定;土壤阳离子交换量采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定^[17]。

1.3.3 土壤可培养微生物数量测定 采用稀释平板法测定,其中细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌采用马丁氏培养基,放线菌采用改良高氏 1 号培养基,尖孢镰刀菌采用 PDA 培养基。

1.3.4 土壤微生物群落多样性测定 采用 Biolog-ECO 分析微生物群落功能多样性^[12,18]。微平板孔中溶液吸光值平均颜色变化率 AWCD (average well color development) 计算公式为:

$$AWCD = \sum (C-R)/31$$

式中:*C* 为所测 31 孔的吸光值;*R* 为对照空白孔的吸光值。

土壤微生物群落多样性指数计算公式:

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

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

$$J = H / \ln S$$

$$U = \sqrt{\sum n_i^2}$$

式中:*H* 为 Shannon 指数;*D* 为 Simpson 指数;*J* 为 Pielou 指数;*U* 为 McIntosh 指数;*p_i* 为第 *i* 孔的相对吸光值与整个微平板所有相对吸光值总和的比值 (*C_i* - *R_i*) / ∑ (*C_i* - *R_i*);*S* 为被利用的碳源总数;*n_i* 为第 *i* 孔的相对吸光值 (*C_i* - *R_i*)。

1.3.5 黄瓜单株产量测定 采用称量法定期采摘测定黄瓜质量,拉秧后按小区进行单株计产。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件对试验数据进行整理,用 DPS 软件的 Duncan 新复极差法进行差异显著性分析 (α = 0.05),主成分分析应用 SPSS 19.0 软件的 Data Reduction 工具,相关性分析使用 COR-

REL 过程。

2 结果与分析

2.1 生物炭对黄瓜单株产量的影响

由图 1 可知,与 *T₀* 相比,连作栽培显著降低了黄瓜单株产量,表现为 *T₀* > *T₆* > *T₁₀*,其单株产量分别为 2.29、1.77 和 0.49 kg。施入生物炭后,TS₆ 黄瓜单株产量较 *T₆* 提高 11.4%,但差异不显著,TS₁₀ 较 *T₁₀* 提高 62.8%,差异达显著水平。同一连作年限间,生物炭对连作 10 年土壤的增产效果明显好于连作 6 年土壤,但 TS₁₀ 的黄瓜单株产量仍显著低于 *T₆* 处理。

2.2 生物炭对连作土壤理化性质的影响

由表 2 可以看出,生物炭处理显著降低了同年限连作土壤的容重,提高了土壤含水量,其中 TS₆ 的含水量显著高于 *T₆*,改善了土壤物理性质。生物炭对连作土壤的化学性质影响趋势基本一致,均表现为提高了有机质、速效磷、速效钾含量,提高了阳离子交换量 (CEC) 和 pH,降低了碱解氮含量,其中有机质、速效磷、CEC 和 pH 与未施入生物炭的连作土壤差异达显著水平,TS₆ 碱解氮含量显著低于 *T₆*,是未处理的 22.1%,TS₁₀ 的速效钾含量显著高于 *T₁₀*,是未处理的 1.20 倍。

2.3 生物炭对连作土壤微生物数量的影响

由图 2 可以看出,黄瓜连作栽培降低了土壤细菌/真菌,提高了真菌和尖孢镰刀菌数量,使土壤由细菌型向真菌型转变,土壤微生物环境进一步恶化。生物炭处理的 TS₆ 和 TS₁₀ 土壤细菌数量显著提高,

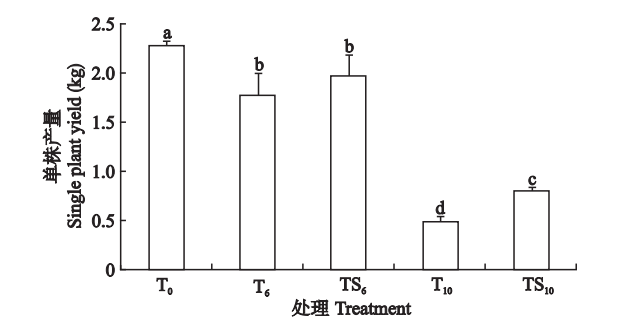


图 1 生物炭处理对黄瓜单株产量的影响
Fig.1 Effects of biochar treatments on cucumber single plant yield.

T₀: 温室外对照土壤 Control soil out of greenhouse; *T₆*: 连作 6 年土壤 Continuous cropping soil for 6 years; TS₆: 连作 6 年土壤添加 5% 生物炭 Continuous cropping soil for 6 years adding 5% biochar; *T₁₀*: 连作 10 年土壤 Continuous cropping soil for 10 years; TS₁₀: 连作 10 年土壤添加 5% 生物炭 Continuous cropping soil for 10 years adding 5% biochar. 不同小写字母表示处理间差异显著 (*P* < 0.05) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 生物炭处理对土壤理化性状的影响
Table 2 Effects of biochar treatments on soil physical and chemical properties

处理 Treat- ment	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	含水量 Water content (%)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali- hydrolysis N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC (cmol·kg ⁻¹)	pH
T ₀	1.35±0.04b	16.22±0.26c	9.95±0.92d	233.33±40.41b	345.15±1.77a	56.75±2.38d	166.83±14.58a	7.97±0.09a
T ₆	1.35±0.14ab	18.75±0.46b	14.39±0.35c	560.00±5.20a	139.80±4.18c	160.30±7.79c	145.33±5.69b	6.14±0.04d
TS ₆	1.03±0.09c	21.43±1.85a	17.86±0.61a	123.67±17.62d	344.48±8.03a	168.22±2.38c	162.67±11.24a	6.92±0.03b
T ₁₀	1.49±0.04a	18.43±0.37b	13.58±0.01c	186.67±20.21c	144.70±6.70c	252.50±0.60b	94.00±5.29d	6.19±0.02d
TS ₁₀	1.22±0.06b	20.27±1.04ab	15.82±0.35b	163.33±20.21cd	241.92±4.09b	302.73±5.16a	119.00±7.21c	6.59±0.06c

T₀: 温室外对照土壤 Control soil out of greenhouse; T₆: 连作 6 年土壤 Continuous cropping soil for 6 years; TS₆: 连作 6 年土壤添加 5% 生物炭 Continuous cropping soil for 6 years adding 5% biochar; T₁₀: 连作 10 年土壤 Continuous cropping soil for 10 years; TS₁₀: 连作 10 年土壤添加 5% 生物炭 Continuous cropping soil for 10 years adding 5% biochar. 不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same as below.

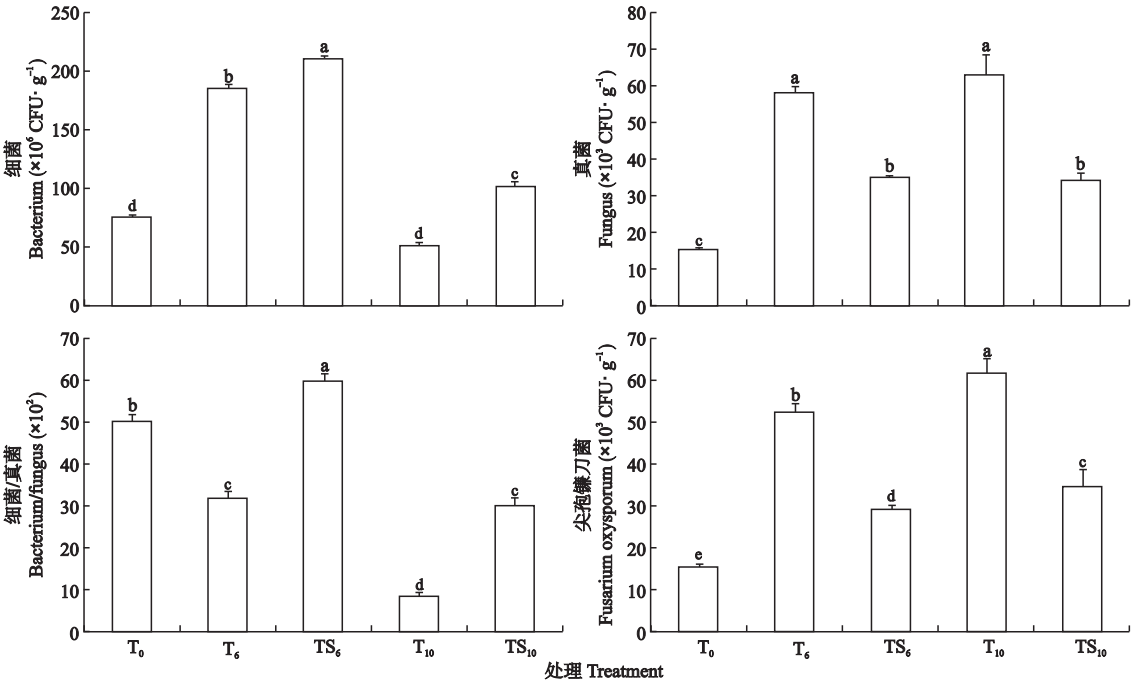


图 2 生物炭处理对土壤微生物数量的影响
Fig.2 Effects of biochar treatments on microorganism quantity.

分别是同年限连作土壤的 1.13 和 2.00 倍,细菌/真菌显著提高,分别是同年限连作土壤的 1.89 和 3.64 倍;土壤真菌数量和尖孢镰刀菌数量显著降低,TS₆ 分别是 T₆ 的 60.0% 和 54.8%,TS₁₀ 分别是 T₁₀ 的 55.1% 和 55.9%.说明生物炭处理显著改善了黄瓜根区土壤微生物环境,对 10 年连作土壤的改良效果优于 6 年连作土壤.

2.4 生物炭对连作土壤微生物群落功能多样性的影响

2.4.1 微生物代谢功能的 AWCD 值变化特征及主成分分析 AWCD 值反映了微生物对碳源的利用能力,是表征微生物活性的重要指标^[9,19].由图 3 可以看出,随着培养时间的延长,AWCD 值不断增加,自 24 h 开始 AWCD 迅速增加,在 144 h 后趋于稳定,表

现为 TS₆>TS₁₀>T₆>T₀>T₁₀,TS₁₀ 显著高于 T₁₀,TS₆ 与 T₆ 差异不显著(表 3).对不同处理培养 144 h 碳源的 AWCD 值进行主成分分析,提取了 4 个主成分因子,第 1 和第 2 主成分累积贡献率达 80.5%,由此作微生物碳源代谢主成分分析图.由图 4 可知,连作年限较短的 T₆ 与 T₀ 距离较近,相似性较高,而连作年限更长的 T₁₀ 远离 T₀,差异明显.生物炭处理的 TS₆ 和 TS₁₀ 与连作土壤微生物群落结构差异明显,均与连作土壤分离较远,TS₁₀ 与 T₁₀ 之间的距离明显大于 TS₆ 与 T₆ 之间的距离,说明生物炭对连作 10 年土壤的微生物活性影响更大.

2.4.2 微生物群落多样性分析 根据不同处理碳源利用情况,取分型较好且相对稳定的 144 h 的 AWCD 值进行土壤微生物多样性分析(表 3).生物

表 3 生物炭处理对土壤微生物群落功能多样性指数的影响
Table 3 Effects of biochar treatments on diversity indices of soil microbial community

处理 Treatment	平均颜色变化率 AWCD (144 h)	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>U</i>	<i>R</i>
T ₀	1.02±0.14b	2.90±0.07b	0.97±0.00b	6.28±0.75b	29.00±1.00a
T ₆	1.12±0.05ab	2.94±0.04b	0.97±0.00b	6.79±0.23ab	29.33±1.15a
TS ₆	1.31±0.05a	3.02±0.03ab	0.97±0.00b	7.77±0.32a	29.00±1.00a
T ₁₀	0.78±0.23c	1.55±0.35c	0.99±0.00a	4.87±1.11c	27.33±4.62a
TS ₁₀	1.17±0.02ab	3.31±0.03a	0.96±0.00c	6.39±0.68b	28.67±0.58a

H: Shannon 指数 Shannon index; *D*: 优势度指数 Simpon index; *U*: 均匀度指数 McIntosh index; *R*: 丰富度指数 Richness index. 下同 The same below.

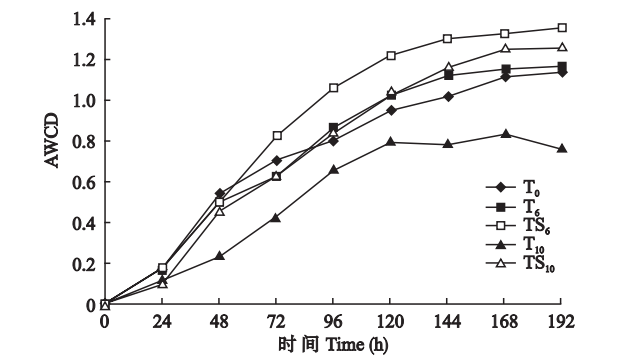


图 3 生物炭处理对土壤微生物 AWCD 值变化的影响
Fig.3 Effects of biochar treatments on AWCD variation of soil microbes.

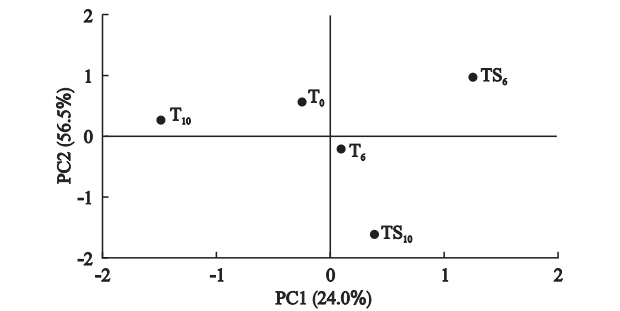


图 4 土壤微生物碳源代谢主成分分析
Fig.4 Principal component analysis (PCA) of soil microbial community carbon source metabolism.

炭处理土壤相对连作土壤提高了Shannon指数和均

匀度指数,TS₁₀显著高于T₁₀,分别是T₁₀的2.14和1.31倍,TS₆和T₆差异不显著;优势度指数TS₁₀显著低于T₁₀,TS₆与T₆差异不显著;各处理间丰富度指数无显著差异.由此认为生物炭对10年连作土壤微生物多样性水平提高程度大于6年连作土壤.

2.4.3 土壤微生物对不同类型碳源利用的差异分析

由图5可以看出,连作10年的土壤微生物对碳源的利用强度明显低于连作6年土壤,生物炭对不同年限连作土壤的碳源利用的影响程度不同.10年连作土壤施入生物炭显著增加了土壤微生物对糖类、氨基酸类、酚酸类和胺类碳源的利用强度,分别是未处理的1.62、1.81、1.74和1.93倍,6年连作土壤施入生物炭只显著提高了多聚物类碳源的利用强度,对其他碳源的利用强度无显著影响.

2.5 土壤理化性质与土壤微生物群落多样性的相关性

对土壤理化性质与土壤微生物群落多样性指标进行相关性分析,结果表明,土壤真菌数量与速效磷含量呈显著负相关,与pH值呈极显著负相关;细菌/真菌与容重呈显著负相关,与速效磷含量呈显著正相关,与CEC呈极显著正相关;尖孢镰刀菌数量与速效磷含量和pH值呈极显著负相关,AWCD值与容重呈极显著负相关,均匀度指数与容重呈显著负相关,丰富度指数与CEC呈显著正相关(表4).

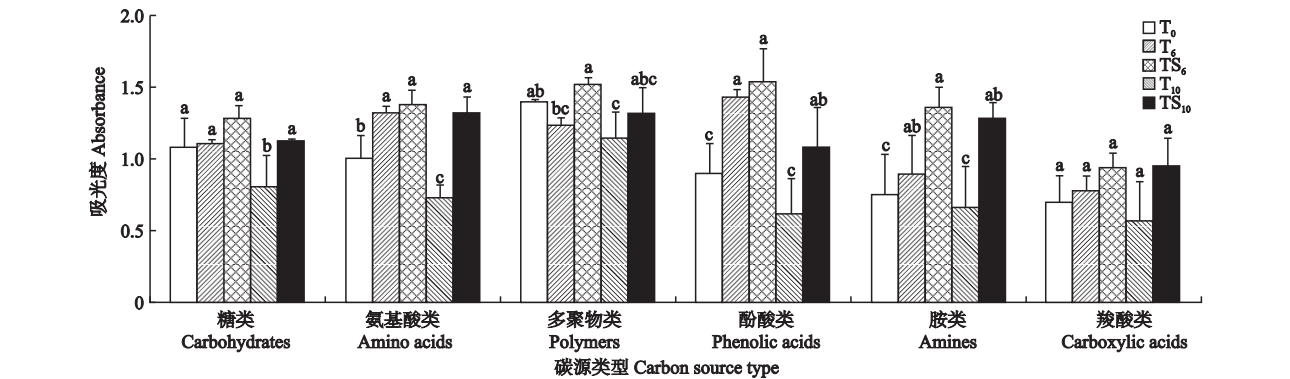


图 5 生物炭处理对土壤微生物对 6 类碳源利用强度的影响
Fig.5 Effects of biochar treatments on utilization intensity of soil microbial community to six types of carbon source.

表 4 土壤理化性质与土壤微生物群落多样性的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between soil physical and chemical properties with microbial community diversities

项目 Item	容重 Bulk density	含水量 Water content	有机质 Organic matter	碱解氮 Alkali- hydrolysis N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	阳离子 交换量 CEC	pH
细菌数量 Bacteria number	-0.69	0.62	0.66	0.31	0.17	-0.17	0.57	-0.17
真菌数量 Fungi number	0.54	0.18	0.29	0.41	-0.91 *	0.50	-0.67	-0.93 **
细菌/真菌 Bacteria/fungi	-0.84 *	0.20	0.15	-0.16	0.87 *	-0.62	0.94 **	0.68
尖孢镰刀菌数量 <i>Fusarium oxysporum</i> number	0.63	0.11	0.21	0.37	-0.94 **	0.55	-0.76	-0.92 **
AWCD	-0.93 **	0.65	0.62	-0.03	0.53	-0.09	0.65	0.16
H	-0.73	0.30	0.25	0.10	0.51	-0.17	0.65	0.34
D	0.65	-0.29	-0.23	-0.06	-0.44	0.03	-0.51	-0.30
U	-0.90 *	0.55	0.53	0.06	0.56	-0.31	0.78	0.23
R	-0.59	0.09	0.08	0.44	0.41	-0.52	0.85 *	0.35

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

3 讨 论

温室是一个半封闭系统,受人为干扰程度远远大于农田土壤,由于作物的长期连作栽培,造成设施土壤严重退化,表现为容重增加,有机质、速效磷和速效钾含量降低,碱解氮含量增加,土壤酸化^[19].生物炭作为环境友好型土壤改良剂,在设施退化土壤改良方面的应用研究逐渐增多.本研究发现,生物炭施入后连作 6 年和 10 年的土壤容重均显著降低,土壤含水量明显增加,改善了土壤物理性状,这与刘卉等^[20]的研究结果一致.这可能与生物炭多孔结构、比表面积大,具有较强的吸附能力,能增加根际区水分的滞留有关^[21].土壤阳离子交换量(CEC)反映土壤吸附和供给可交换养分的能力,是衡量土壤肥力的重要指标^[22],生物炭对低 CEC 和酸性较强的土壤 CEC 的提高作用明显^[15,23].本试验中黄瓜连作栽培降低了土壤 CEC 和 pH,生物炭施入后显著提高了 CEC 和 pH,这与前人研究结果基本一致.生物炭施入增加了土壤有机质、速效磷和速效钾含量,这可能与生物炭施入提高了连作土壤 CEC,同时有机质一般具有较高的 CEC,而高 CEC 可提高土壤营养元素交换能力有关^[24].

多数研究者认为,微生物种群结构失衡是引起土壤连作障碍发生的主要原因,随着作物连作年限的增加,有益微生物数量大量减少,病原微生物数量急剧增加,微生物种群结构趋于单一,土传病害严重^[25-26].生物炭的多孔性和表面特性为土壤微生物生长与繁殖提供了良好的栖息环境,减少了微生物之间的生存竞争,能保护土壤有益微生物^[10].王艳芳等^[27]研究发现,生物炭配施甲壳素能增加苹果连作土壤中细菌数量,明显提高细菌/真菌值,使土壤类型由真菌型向细菌型转变.本试验也取得了同样

的结果,黄瓜连作土壤施入生物炭后,显著提高了连作土壤细菌数量,降低了真菌数量,同时显著提高了细菌/真菌值,抑制了连作土壤由细菌型向真菌型转变,保持了土壤微生物生态平衡.尖孢镰刀菌是引起温室黄瓜枯萎病的主要致病菌,连作栽培后由于土壤 pH 的下降以及根系分泌酚酸类物质的增多,为尖孢镰刀菌的繁殖提供了有利条件^[28].王牧等^[29]利用实时荧光定量 PCR 技术研究发现,生物炭配施有机肥处理的土壤中尖孢镰刀菌基因拷贝数均显著低于连作土壤.本研究中,随着黄瓜连作年限的增加,土壤尖孢镰刀菌数量急剧增加,生物炭施入后显著降低了尖孢镰刀菌数量,净化了土壤环境,这可能与生物炭施入一方面提高了土壤 pH,另一方面吸附了部分酚酸类物质,降低了其在土壤中的有效浓度有关^[30-31].

微生物多样性指数是反映土壤微生物群落中物种丰度的重要指标,多样性指数越高,说明微生物多样性越丰富,微生物生态系统越复杂,功能越稳定^[12,31].长期连作栽培后,微生物多样性水平会显著下降^[18].本研究利用 Biolog-ECO 技术分析结果表明,生物炭施入对土壤微生物群落结构的影响较大,增加了土壤 AWCD 值,提高了微生物活性;土壤微生物 Shannon 指数和均匀度指数得到提高,TS₁₀显著降低了优势度指数,说明生物炭施入提高了连作土壤微生物群落多样性,这与王光飞等^[32]利用 PCR-DGGE 技术在辣椒连作土壤上取得的研究结果基本一致.土壤微生物种群碳源利用的分析结果表明,生物炭对 10 年连作土壤作用效果大于 6 年连作土壤,显著提高了土壤微生物对糖类、氨基酸类、酚酸类和胺类碳源的利用强度.生物炭对微生物群落结构的改变程度受营养物质、土壤水分、pH 值及栖息环境等的影响^[33-34],在养分贫瘠或退化土壤上的

作用效果更加明显^[23].通过比较生物炭对不同连作年限土壤间的微生物生态环境改良效果发现,对 10 年连作土壤的改良作用比对 6 年连作土壤的作用明显,分析其原因可能是 10 年连作土壤较 6 年连作土壤退化更严重,土壤微生物群落功能多样性水平较低,微生物生态平衡破坏严重,生物炭作为新的物质施入土壤后,能够很快增加土壤有机质含量,提高土壤通气性,改变土壤中养分的生物可利用性,从而迅速刺激了土壤微生物活性,提高了其对碳源的利用强度,致使微生物群落结构发生相应改变,而这种刺激在 10 年连作土壤中比温和的 6 年连作土壤中作用更明显.

生物炭可以改善连作土壤的理化性质,土壤微生物作为土壤中活的生物体,对环境的变化比较敏感,可为土壤性质的变化提供依据^[9].本试验相关性分析结果表明,土壤容重、速效磷含量、CEC 和 pH 4 个指标对微生物群落变化的影响较显著.由此分析认为,生物炭由于自身可利用的养分含量不多^[16],施入连作土壤后提高黄瓜产量可能是通过间接途径实现的,即通过降低连作土壤容重,增加土壤透气性,提高土壤 pH 和 CEC,增强土壤速效磷等养分的有效性,进而降低了土壤真菌和尖孢镰刀菌数量,提高了细菌/真菌值、微生物活性、群落均匀度指数和丰富度指数,从而稳定了土壤微生物的种群结构,提高了微生物功能多样性,改善了根区微生态环境,促进了黄瓜根系及地上部生长,最终提高了黄瓜产量.

综上所述,生物炭施用可以改善温室黄瓜连作土壤的理化性质,提高土壤细菌数量及细菌/真菌值,降低有害真菌数量,使根区土壤微生物的代谢活性增强,功能多样性提高,促进了土壤微生物生态系统的改良,提高了黄瓜产量,说明生物炭在设施连作土壤改良方面具有积极作用.但施用生物炭对连作 6 年和 10 年土壤的作用效果不同,对连作障碍程度更深的 10 年连作土壤改良效果更好,但多数指标仍明显低于 6 年连作土壤,可见,单独施入生物炭很难完全克服连作障碍,而进一步开展生物炭与其他物质的配施研究,能更好地推进生物炭作为设施连作土壤改良剂在生产中的应用.

参考文献

[1] Wu C-C (武春成), Li T-L (李天来), Cao X (曹霞), *et al.* Effects of nutrition medium on cucumber growth and soil microenvironment in greenhouse under continuous cropping. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(5): 1401–1407 (in Chinese)

nese)
[2] Guo S-R (郭世荣), Sun J (孙 锦), Shu S (束胜), *et al.* Analysis of general situation, characteristics, existing problems and development trend of protected horticulture in China. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2012(18): 1–14 (in Chinese)
[3] Tang J-Y (唐珺瑶), Zhao Y-J (赵永杰), Qu D (曲东), *et al.* Review on contribution and mechanism of biochar bate soil salinization. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2017, **26**(2): 294–303 (in Chinese)
[4] Asai H, Samson BK, Stephan HM, *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 2009, **111**: 81–84
[5] Wu C-C (武春成), Wang C-Y (王彩云), Cao X (曹霞), *et al.* Effects of different biochar application rate on improvement of continuous cropping soil and cucumber growth. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2017(19): 150–154 (in Chinese)
[6] Zhang W-M (张伟明), Meng J (孟 军), Wang J-Y (王嘉宇), *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2013, **39**(8): 1445–1451 (in Chinese)
[7] Zhang H-Z (张晗芝), Huang Y (黄 云), Liu G (刘钢), *et al.* Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2010, **19**(11): 2713–2717 (in Chinese)
[8] Liu Y-X (刘玉学), Lyu H-H (吕豪豪), Shi Y (石岩), *et al.* Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(1): 304–310 (in Chinese)
[9] Zhao L-F (赵兰凤), Zhang X-M (张新明), Cheng G (程 根), *et al.* Effects of biochar on microbial functional diversity of vegetable garden soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(14): 4754–4762 (in Chinese)
[10] Ding Y-L (丁艳丽), Liu J (刘 杰), Wang Y-Y (王莹莹). Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(11): 3311–3317 (in Chinese)
[11] Zhang Y-J (张玉洁), Wu T (吴 婷), Zhao J (赵娟), *et al.* Effect of biochar amendment on bacterial community structure and diversity in straw-amended soils. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2017, **37**(2): 712–720 (in Chinese)
[12] Gu M-Y (顾美英), Liu H-L (刘洪亮), Li Z-Q (李志强), *et al.* Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2014, **47**(20): 4128–4136 (in Chinese)
[13] Wang X-H (王晓辉), Guo G-X (郭光霞), Zheng R-L (郑瑞伦), *et al.* Effect of biochar on abundance of N-related functional microbial communities in degraded greenhouse soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **3**(3): 624–631 (in Chinese)
[14] Liu Z-K (刘志坤), Ye L-J (叶黎佳). Preparation and

- performance measurement of biomass charcoal materials. *Biomass Chemical Engineering* (生物质化学工程), 2007, **41**(5): 28–32 (in Chinese)
- [15] Lehmann J. Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management. Amsterdam, the Netherlands: Kluwer Academic Press, 2003
- [16] Yu J-Q (喻景权). Soil-sickness problem in the sustainable development for the protected production of vegetables. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2000, **31**(1): 124–126 (in Chinese)
- [17] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemical Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [18] Zou C-J (邹春娇), Qi M-F (齐明芳), Ma J (马建), *et al.* Analysis of soil microbial community structure and diversity in cucumber continuous cropping nutrition medium by Biolog-ECO. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2016, **49**(5): 942–951 (in Chinese)
- [19] Geng S-J (耿士均), Liu K (刘 刊), Shang H-Y (商海燕), *et al.* Research progress of continuous cropping obstacle in horticultural plants. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2012(7): 190–195 (in Chinese)
- [20] Liu H (刘 卉), Zhou Q-M (周清明), Li J (黎娟), *et al.* Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences* (核农学报), 2016, **30**(7): 1411–1419 (in Chinese)
- [21] Li S-L (李帅霖), Wang X (王 霞), Wang S (王朔), *et al.* Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(14): 135–144 (in Chinese)
- [22] Jiang Y-P (姜玉萍), Yang X-F (杨晓峰), Zhang Z-H (张兆辉), *et al.* Progress of the effect of biomass charcoal on soil environment and crop growth. *Acta Agricultrae Zhejiangensis* (浙江农业学报), 2013, **25**(2): 410–415 (in Chinese)
- [23] Hilber I, Wyss GS, Maeder P, *et al.* Influence of activated charcoal amendment to contaminated soil on diel-drin and nutrient uptake by cucumbers. *Environmental Pollution*, 2009, **157**: 2224–2230
- [24] Fan Q-F (范庆峰), Yu N (虞 娜), Zhang Y-L (张玉玲), *et al.* Effects of vegetable cultivation on soil cation exchange capacity in greenhouse. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **51**(5): 1132–1137 (in Chinese)
- [25] Wu F-Z (吴凤芝), Shen Y-H (沈彦辉), Zhou X-G (周新刚), *et al.* Regulation effect of wheat and oat residue on growth of continuous cucumber cropping and soil microbial community structure. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2015, **48**(22): 4585–4596 (in Chinese)
- [26] Hu Y-S (胡元森), Liu Y-F (刘亚峰), Wu K (吴坤), *et al.* Variation of microbial community structure in relation to successive cucumber cropping soil. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(1): 126–129 (in Chinese)
- [27] Wang Y-F (王艳芳), Xiang L (相 立), Xu S-Z (徐少卓), *et al.* Effects of biochar and chitin combined application on *Malus hupehensis* Rehd. seedlings and soil environment under replanting conditions. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2017, **50**(4): 711–719 (in Chinese)
- [28] Ma Y-H (马云华), Wei M (魏 珉), Wang X-F (王秀峰). Variation of microflora and enzyme activity in continuous cropping cucumber soil in solar greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1005–1008 (in Chinese)
- [29] Wang M (王 牧), Xu S-Z (徐少卓), Liu Y-S (刘宇松), *et al.* Improvement of soil properties and control of apple replanting disease by combined application of biochar and organic fertilizer. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers* (植物营养与肥料学报), 2018, **24**(1): 220–227 (in Chinese)
- [30] Jia D (贾 丹), Zhuo K-Y (卓孔友), Gu D-Y (谷东岩). Adsorption kinetics and equilibrium of pentachlorophenol onto corn stalk biochar. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2018, **46**(1): 71–73 (in Chinese)
- [31] Liu C-X (刘朝霞), Niu W-J (牛文娟), Chu H-Y (楚合营), *et al.* Process optimization for straws pyrolysis and analysis of biochar physiochemical properties. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2018, **34**(5): 196–203 (in Chinese)
- [32] Wang G-F (王光飞), Ma Y (马 艳), Guo D-J (郭德杰), *et al.* Application-rate-dependent effects of straw biochar on control of phytophthora blight of chilli pepper and soil properties. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2017, **54**(1): 204–215 (in Chinese)
- [33] He L-L (何莉莉), Yang H-M (杨慧敏), Zhong Z-K (钟哲科), *et al.* PCR-DGGE analysis of soil bacterium community diversity in farmland influenced by biochar. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(15): 4288–4294 (in Chinese)
- [34] Chen Y (陈 懿), Chen W (陈 伟), Lin Y-C (林叶春), *et al.* Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(12): 3781–3787 (in Chinese)

作者简介 王彩云,女,1992年生,硕士研究生.主要从事设施蔬菜连作障碍修复方面的研究. E-mail: 1226631207@qq.com

责任编辑 张凤丽

王彩云,武春成,曹霞,等.生物炭对温室黄瓜不同连作年限土壤养分和微生物群落多样性的影响.应用生态学报,2019, **30**(4): 1359–1366

Wang C-Y, Wu C-C, Cao X, *et al.* Effects of biochar on soil nutrition and microbial community diversity under continuous cultivated cucumber soils in greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(4): 1359–1366 (in Chinese)