

武春成,周国彦,曹霞,等.连作土壤连续施入生物炭对黄瓜品质及根区微生态的影响[J].江苏农业科学,2022,50(9):143-147.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.09.023

连作土壤连续施入生物炭对黄瓜品质及根区微生态的影响

武春成,周国彦,曹霞,王彩云,窦维卉,谢洋

(河北科技师范学院园艺科技学院/河北省园艺种质资源挖掘与创新利用重点实验室,河北秦皇岛 066004)

摘要:为了探讨连续施入生物炭对连作土壤黄瓜品质及根区微生态的影响,以黄瓜连作 14、22 茬土壤为研究对象,设置不施用、单次施用、连续 3 次施用生物炭处理。结果表明,与单次施入生物炭相比,连续施入生物炭的连作 14、22 茬土壤的黄瓜单株产量分别增加 24.06%、19.68%;与同一茬次相比,连续施入可以显著提高黄瓜果实的蛋白质、维生素 C 和可溶性糖含量,降低硝酸盐含量;土壤 pH 值、阳离子交换量、有机质含量、速效钾含量、细菌数量以及细菌/真菌的值得到显著提高,同时可以显著降低真菌和尖孢镰刀菌数量,并提高土壤微生物代谢活性和多样性。综上,生物炭连续施入较单次施入对连作土壤微生态环境的改善作用更显著,由此可以提高连作黄瓜的单株产量,改善果实品质,更有利于缓解温室连作障碍。

关键词:生物炭;黄瓜品质;连作土壤;理化性质;微生物多样性

中图分类号:S642.206 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)09-0143-05

我国设施蔬菜产业无论是面积还是产量均居世界首位^[1],在农业生产中占有重要的地位。由于设施蔬菜产业的高投入、高产出特性,多年来农民为追求高利益,过量施入化肥,且连作栽培普遍,造成严重的连作障碍现象,尤其是在一些发展设施蔬菜较早的产区,土壤已经严重退化,蔬菜产量和品质受到极大的影响。由此连作障碍已成为制约我国设施蔬菜产业可持续发展的重大问题^[2],必须采取有效的连作土壤修复措施。吕丰娟等认为,作物连作障碍的发生是作物与土壤相互影响和作用的综合表现,土壤理化性状、土壤微生物以及作物根系自毒物质等主要土壤因子失衡均可能引起连作障碍^[3]。再加上设施蔬菜生产中不合理的生产习惯,如菜农为提高产量,习惯过量施肥,其中氮肥投入量是蔬菜吸收量的 3~5 倍,加之设施蔬菜商品化生产连作现象普遍,致使设施土壤中氮素大量积累,导致土壤表层次生盐渍化和酸化,不仅严重降低了土壤的氮素转化能力和氮肥利用率,影响植物根系对氮素的吸收,同时也制约了磷、钾、钙、镁等

其他营养元素的有效性,引起蔬菜生育障碍,进而限制设施蔬菜产业可持续发展^[4]。生物炭是利用农业废弃物如秸秆、污泥、动物粪便、菌渣等有机物料高温碳化的一种富碳产品,其结构稳定、多孔,比表面积大,吸附能力强,具有降低土壤容重、减缓土壤酸化、减少氮素损失等特性,同时其表面可定殖微生物,为土壤微生物提供栖息场所^[5]。越来越多的研究表明,生物炭可以固定碳素、吸附重金属、改善土壤理化性状、减少温室气体排放、提高肥料利用率、改善修复连作土壤、提高作物产量等^[6-7]。但目前的研究多局限于生物炭的单次施入,对于生物炭连续施入及其持续效应研究较少。因此,本试验通过分析连作土壤单次施入和连续 3 次施入生物炭对日光温室黄瓜生长发育及土壤微生态环境的影响,以期生物炭应用在设施蔬菜连作土壤修复方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试品种 供试黄瓜品种为津优 35,购于天津科润黄瓜研究所。

1.1.2 供试土壤 供试土壤取自河北科技师范学院 2 个连续栽培 14、22 茬黄瓜的日光温室土壤,分别用 C₁₄ 和 C₂₂ 表示,基本理化性质见表 1。

收稿日期:2021-07-16

基金项目:国家重点研发计划(编号:2019YFD1001903);河北省重点研发计划(编号:21326901D);河北省现代农业产业体系项目(编号:HBCT2018030209)。

作者简介:武春成(1979—),男,河北张家口人,博士,教授,从事蔬菜栽培生理与连作障碍等研究。E-mail:wuchuncheng1979@126.com。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤处理	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	pH 值
C ₁₄	4.57	240.33	214.29	324.54	5.85
C ₂₂	5.63	154.00	134.64	411.12	5.84

1.1.3 供试生物炭 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,购自沈阳隆泰生物工程有限公司,其碳化温度为 500 ℃,平均孔径 16.27 nm,粒径 1.5~2.0 mm,C、N、P、K 质量分数分别为 70.38%、1.53%、0.78%、1.68%,pH 值为 8.97。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 于 2019 年 3—9 月在河北科技师范学院园艺试验站日光温室内进行盆栽试验。随机区组设计,共设 6 个处理(表 2),3 个重复,每个重复 10 盆。生物炭按 5% 质量分数加入土壤,同时每盆添加 NPK 复合肥 10 g,混匀后装盆,折合干土 10 kg/盆。于 2019 年 4 月 10 日黄瓜幼苗 2 叶 1 心时定植 1 株/盆,进行常规管理,于 7 月 10 日拉秧。

表 2 试验设计

处理	黄瓜连作茬次	生物炭施入次数	生物炭施入时间
C ₁₄ B ₀	14	0	
C ₁₄ B ₁	14	1	2018 年秋茬
C ₁₄ B ₃	14	3	2018 年春茬、秋茬和 2019 年春茬
C ₂₂ B ₀	22	0	
C ₂₂ B ₁	22	1	2018 年秋茬
C ₂₂ B ₃	22	3	2018 年春茬、秋茬和 2019 年春茬

1.2.2 黄瓜单株产量与品质测定方法 各处理分别单株计产,拉秧后统计单株产量。在黄瓜盛瓜期采摘结瓜部位相对一致、同等大小的果实,采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量^[8],采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[9],采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量^[10],采用数字折光仪测定可溶性固形物含量,采用紫外分光光度法测定硝酸盐含量^[11]。

1.2.3 土壤理化性质测定 在黄瓜拉秧后每个区组随机选取 3 盆,收集黄瓜根区土壤,混合均匀,分为 3 份,一份保存于 4 ℃冰箱中,1 周内测定土壤微生物数量;一份放在 -80 ℃超低温冰箱中保存,用于测定土壤微生物多样性;剩余部分阴干后用于测定土壤理化性状及土壤酶活性。采用烘干法测定土壤含水量,采用环刀取土-烘干法测定土壤容

重,采用上海雷磁多参数水质分析仪 DZS-708 测定土壤 pH 值和 EC 值(土水质量比为 1:5),采用重铬酸钾容量-稀释热法测定土壤有机质含量,采用碱解扩散法测定碱解氮含量,采用钼蓝比色法测定速效磷含量,采用火焰光度法测定速效钾含量,采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定阳离子交换量(CEC)^[12]。

1.2.4 土壤酶活性测定 采用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性,采用磷酸苯二钠比色法测定中性磷酸酶活性,采用邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶活性,采用苯酚-次氯酸钠比色法测定脲酶活性,采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性^[13]。

1.2.5 土壤微生物数量及多样性测定 采用稀释平板法测定细菌、真菌、尖孢镰刀菌数量^[14],采用 Biolog-ECO 方法分析土壤微生物群落多样性^[15]。

1.2.6 数据处理与分析 采用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据进行整理,用 SPSS 软件对试验数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 连续施入生物炭对黄瓜单株产量与品质的影响

由图 1 可知,连作 22 茬与连作 14 茬黄瓜相比减产 70.33%;对于连作 14 茬土壤,C₁₄B₃ 单株产量较 C₁₄B₀、C₁₄B₁ 分别提高 24.06%、6.30%;对于连作 22 茬土壤,C₂₂B₃ 单株产量较 C₂₂B₀、C₂₂B₁ 分别显著提高 61.69%、19.68%。综上,土壤连作茬次越多,单株黄瓜减产越明显,连续施入生物炭可减少连作对黄瓜单株产量的影响。

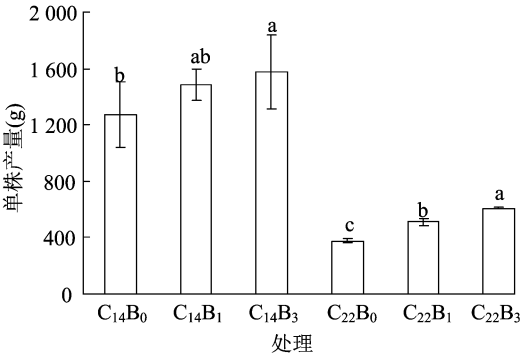


图 1 连续施入生物炭对黄瓜单株产量的影响

由表 3 可知,生物炭施入均能显著提高黄瓜果实中的蛋白质含量、维生素 C 含量和可溶性糖含量,显著降低黄瓜果实中的硝酸盐含量,连续施入

较单次施入效果更加明显。其中,C₁₄B₃ 蛋白质、维生素 C、可溶性糖含量较 C₁₄B₁ 分别提高 15.79%、29.85%、17.43%,而硝酸盐含量显著降低 14.48%;C₂₂B₃ 的蛋白质、维生素 C 和可溶性糖含量较 C₂₂B₁ 分别提高 6.99%、21.45%、19.57%,而硝酸盐含量显著降低 10.55%。

表 3 连续施入生物炭对黄瓜品质的影响

处理	蛋白质含量 (mg/kg)	维生素 C 含量 (μg/g)	可溶性糖含量 (%)	可溶性固形物含量 (%)	硝酸盐含量 (μg/g)
C ₁₄ B ₀	260.89 ± 0.22c	32.7 ± 2.2c	0.96 ± 0.03c	4.33 ± 0.25b	216.44 ± 2.00a
C ₁₄ B ₁	282.89 ± 1.90b	45.9 ± 1.3b	1.09 ± 0.03b	5.07 ± 0.12a	175.93 ± 4.01b
C ₁₄ B ₃	327.56 ± 1.56a	59.6 ± 0.3a	1.28 ± 0.01a	5.27 ± 0.12a	150.46 ± 5.30c
C ₂₂ B ₀	233.33 ± 1.56c	25.9 ± 1.4c	0.78 ± 0.02c	4.27 ± 0.29a	292.82 ± 7.23a
C ₂₂ B ₁	295.41 ± 9.61b	42.9 ± 1.1b	0.92 ± 0.02b	4.70 ± 0.17a	252.31 ± 5.30b
C ₂₂ B ₃	316.07 ± 1.56a	52.1 ± 0.9a	1.10 ± 0.00a	4.87 ± 0.31a	225.69 ± 6.94c

2.2 连续施入生物炭对连作土壤理化性质的影响

由表 4 可知,施入生物炭可以相对改善土壤的理化性质,C₁₄B₃ 较 C₁₄B₁ 可显著提高 pH 值、CEC 值、有机质含量和速效钾含量,其中 pH 值提高

0.60,有机质含量提高 19.63%;C₂₂B₃ 较 C₂₂B₁ 可显著提高 pH 值、CEC 值、有机质含量和速效钾含量,其中 pH 值提高 0.38,有机质含量提高 13.13%,有效减缓了连作土壤的酸化。

表 4 连续施入生物炭对连作土壤理化性质的影响

处理	含水量 (%)	容重 (g/cm ³)	pH 值	CEC (cmol/kg)	EC (μS/cm)	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
C ₁₄ B ₀	17.18 ± 2.16a	1.47 ± 0.13a	5.92 ± 0.05b	418.33 ± 2.60c	507.30 ± 23.02a	7.05 ± 0.19c	256.67 ± 21.39a	299.02 ± 63.30a	385.08 ± 3.66c
C ₁₄ B ₁	18.70 ± 0.74a	1.38 ± 0.03a	6.00 ± 0.09b	469.16 ± 2.60b	502.85 ± 16.96a	13.50 ± 0.07b	165.67 ± 22.50b	343.64 ± 38.99a	564.32 ± 35.46b
C ₁₄ B ₃	19.67 ± 1.67a	1.17 ± 0.17a	6.60 ± 0.01a	482.91 ± 3.61a	471.70 ± 44.85a	16.15 ± 0.21a	128.33 ± 4.04b	393.07 ± 24.96a	642.11 ± 51.38a
C ₂₂ B ₀	14.33 ± 0.87b	1.64 ± 0.06a	5.43 ± 0.04b	432.91 ± 4.38c	782.31 ± 14.71a	8.32 ± 0.37c	156.33 ± 4.04a	249.03 ± 67.37a	522.39 ± 11.40c
C ₂₂ B ₁	15.46 ± 1.16ab	1.54 ± 0.05ab	5.54 ± 0.13b	459.16 ± 1.91b	703.69 ± 27.52a	12.72 ± 0.32b	91.00 ± 7.00b	292.52 ± 76.02a	611.67 ± 6.91b
C ₂₂ B ₃	16.66 ± 0.12a	1.44 ± 0.03b	5.92 ± 0.01a	470.00 ± 3.31a	692.42 ± 89.16a	14.39 ± 0.31a	32.67 ± 8.08c	321.89 ± 112.28a	739.51 ± 13.78a

2.3 连续施入生物炭对连作土壤酶活性的影响

由表 5 可知,C₁₄B₃/C₂₂B₃ 较 C₁₄B₁/C₂₂B₁、C₁₄B₀/C₂₂B₀ 多酚氧化酶活性分别降低 18.89%/6.02%、45.11%/39.06%;C₁₄B₃/C₂₂B₃ 较 C₁₄B₀/C₂₂B₀ 脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性分别提高

77.50%/69.44%、176.19%/255.56%、575.00%/0.00。综上,施入生物炭均能显著降低多酚氧化酶活性,提高脲酶和过氧化氢酶活性,但对中性磷酸酶活性影响不大,连续施入和单次施入之间无显著差异。

表 5 连续施入生物炭对连作土壤酶活性的影响

处理	多酚氧化酶活性 (μg/g)	脲酶活性 [mg/(g·d)]	过氧化氢酶活性 (mL/g)	蔗糖酶活性 [mg/(g·d)]	中性磷酸酶活性 [mg/(g·d)]
C ₁₄ B ₀	13.3 ± 0.5a	0.40 ± 0.02b	0.21 ± 0.14b	0.04 ± 0.01b	2.73 ± 0.22a
C ₁₄ B ₁	9.0 ± 2.6b	0.68 ± 0.12a	0.39 ± 0.15ab	0.26 ± 0.01a	3.07 ± 0.38a
C ₁₄ B ₃	7.3 ± 0.3b	0.71 ± 0.12a	0.58 ± 0.03a	0.27 ± 0.01a	3.29 ± 0.34a
C ₂₂ B ₀	12.8 ± 0.5a	0.36 ± 0.01b	0.09 ± 0.06c	0.26 ± 0.01a	2.97 ± 0.28a
C ₂₂ B ₁	8.3 ± 2.3b	0.59 ± 0.05a	0.27 ± 0.18b	0.26 ± 0.00a	3.05 ± 0.35a
C ₂₂ B ₃	7.8 ± 1.3b	0.61 ± 0.03a	0.32 ± 0.19a	0.26 ± 0.00a	3.12 ± 0.30a

2.4 连续施入生物炭对连作土壤微生物数量的影响

由图 2 可知,生物炭施入对土壤微生物数量有显著影响,C₁₄B₃/C₂₂B₃ 较 C₁₄B₁/C₂₂B₁ 细菌数量、细

菌/真菌分别增加 123.78%/116.84%、42.86%/41.72%,真菌、尖孢镰刀菌数量分别减少 29.00%/31.93%、28.17%/28.94%。生物炭的施入改善了根区土壤的种群结构,连续施入较单次施入效果更

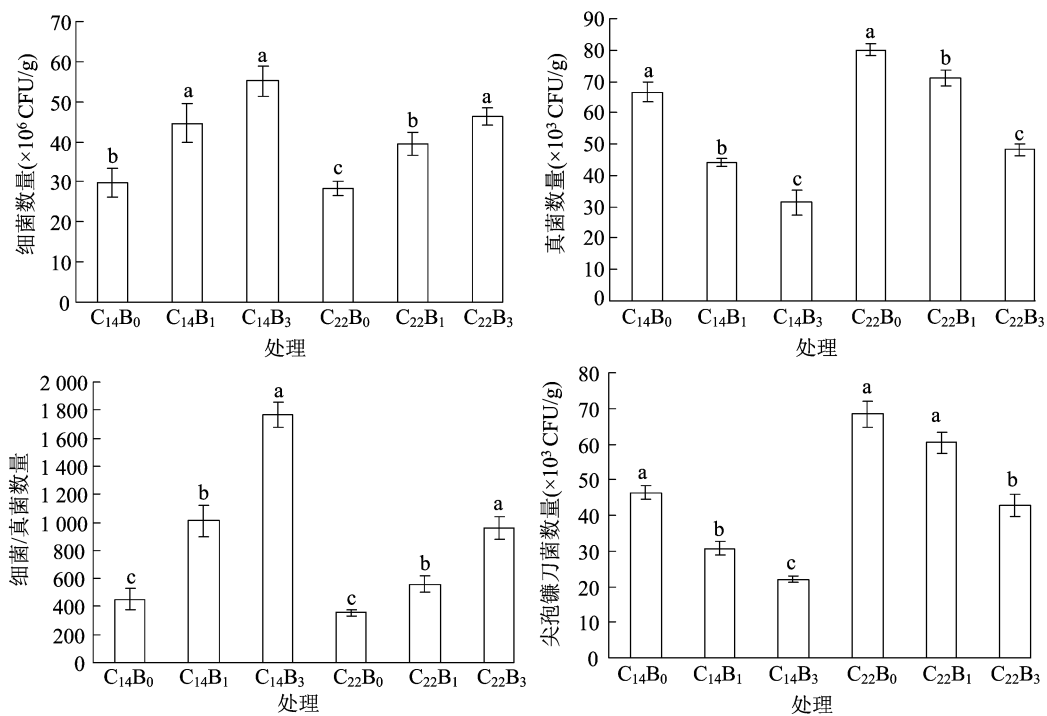


图2 连续施入生物炭对连作土壤微生物数量的影响

加显著。

2.5 连续施入生物炭对连作土壤微生物多样性的影响

AWCD 值代表土壤微生物的代谢活性,由图 3 可知,在整个培养过程中,各处理的 AWCD 值由高到低为 C₁₄B₃ > C₁₄B₁ > C₁₄B₀、C₂₂B₃ > C₂₂B₁ > C₂₂B₀, 生物炭连续施入较单次施入对提高土壤微生物群落代谢活性的影响更大。

根据不同处理碳源的利用情况,取分型较好且相对稳定的 144 h(图 3)的 AWCD 值进行微生物多样性分析,结果见表 6。可见,C₁₄B₃/C₂₂B₃ 较 C₁₄B₀/C₂₂B₀提高了香农指数、优势度指数、均匀度指数和丰富度指数,其中香农指数、优势度指数和均匀度指数差异达显著水平,分别提高 1.51%/1.22%、0.42%/0.31%、27.59%/28.65%。C₁₄B₃ 的均匀度指数显著高于 C₁₄B₁,C₂₂B₃ 的香农指数和优势度指数显著高于 C₂₂B₁。综上,连续施入生物炭

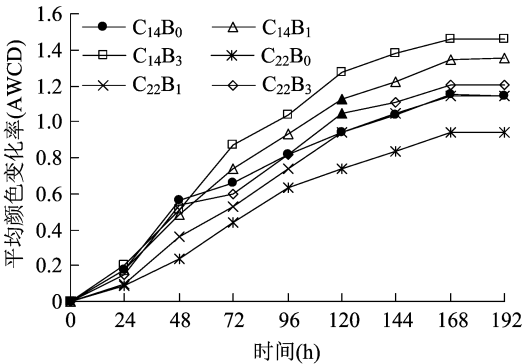


图3 连续施入生物炭对连作土壤微生物AWCD的影响

对连作土壤微生物群落多样性提高水平要高于单次施入。

3 讨论与结论

王彩云等认为,施入生物炭能够促进黄瓜生长,提高黄瓜单株产量^[16]。本研究结果表明,连作土壤施入生物炭可显著提高黄瓜的单株产量及果

表 6 单次施入与连续施入生物炭对连作土壤微生物群落多样性指数的影响

处理	平均颜色变率	香农指数	优势度指数	均匀度指数	丰富度指数
C ₁₄ B ₀	0.94 ± 0.02c	3.31 ± 0.02b	0.960 ± 0.00b	6.38 ± 0.09c	29.33 ± 0.58a
C ₁₄ B ₁	1.13 ± 0.01b	3.35 ± 0.01a	0.963 ± 0.00a	7.27 ± 0.09b	29.67 ± 0.58a
C ₁₄ B ₃	1.27 ± 0.00a	3.36 ± 0.00a	0.964 ± 0.00a	8.14 ± 0.10a	30.00 ± 1.00a
C ₂₂ B ₀	0.74 ± 0.01c	3.27 ± 0.01b	0.958 ± 0.00b	5.27 ± 0.05b	25.67 ± 1.15a
C ₂₂ B ₁	0.95 ± 0.01b	3.24 ± 0.01c	0.958 ± 0.00c	6.69 ± 0.08a	26.33 ± 0.58a
C ₂₂ B ₃	1.04 ± 0.03a	3.31 ± 0.00a	0.961 ± 0.00a	6.78 ± 0.06a	27.33 ± 0.58a

实蛋白质、维生素 C、可溶性糖含量,显著降低果实中的硝酸盐含量,且连续施入对黄瓜单株产量及品质的提高影响更大;其中 $C_{14}B_3$ 单株产量较 $C_{14}B_0$ 、 $C_{14}B_1$ 分别提高 24.06%、6.30%, $C_{22}B_3$ 单株产量较 $C_{22}B_0$ 、 $C_{22}B_1$ 分别显著提高 61.69%、19.68%。

随着作物连作年限的增加,设施土壤质量逐渐下降,普遍表现为土壤容重增大、土壤通气孔隙比例降低、有机质含量下降、土壤 pH 值降低,EC 值升高等现象^[17-18]。黄剑等认为,施入生物炭能够提高土壤中团聚体的含量,使土壤疏松,通气透水性良好,土壤含水量增加^[19]。本研究也发现了相似的规律,尤其是连续施入生物炭较单次施入在提高连作土壤含水量、CEC 值、pH 值、有机质含量、速效磷含量、速效钾含量,降低容重、EC 值,改善土壤理化性质上的作用更加明显。

土壤酶活性对土壤微生态环境的物质转化、能量流动及土壤肥力的形成起着重要作用,可以作为评价土壤肥力的重要指标^[21]。本研究发现,施入生物炭均能显著降低多酚氧化酶活性,提高脲酶和过氧化氢酶的活性,但对中性磷酸酶活性影响不大,连续施入和单次施入之间无显著差异。可能是由于连作年限过长,土壤酶活性受到严重破坏,生物炭的施入量与频次可能会影响连作土壤的修复改善情况。

连作作物根系分泌物和植株残茬腐解物给病原菌提供了丰富的营养,使病原菌数量增加,病原拮抗菌和有益菌数量减少,增加了设施蔬菜土传病害发生的程度^[22]。本研究也发现,长期连作改变了土壤微生物的种群结构,促使由“细菌型”向“真菌型”转变;连续施入生物炭可以显著改善微生物的菌群数量,增加有益菌群,减少有害菌群。如 $C_{22}B_3$ 较 $C_{22}B_1$ 细菌数量、细菌/真菌的值分别增加 1.17、1.72 倍,真菌、尖孢镰刀菌数量分别减少 68%、71%。通过 Biolog-ECO 方法分析可知,连续施入较单次施入生物炭可以提高土壤微生物的 AWCD 值,增加微生物的代谢活性,同时提高微生物多样性指数,改善土壤微生物生态环境。

综上所述,相对于单次生物炭施入,连作土壤连续施入对温室黄瓜产量与品质提高效果更加明显,可能是由于生物炭连续施入可以改善土壤的理化性状,提高土壤相关酶活性、细菌数量及细菌/真菌以及土壤微生物群落多样性,降低真菌以及尖孢镰刀菌数量等方面作用更加明显,从而有效改善黄瓜根区的土壤微生态环境,减弱了连作对黄瓜生长

发育的抑制作用。

参考文献:

- [1] 申书兴. 河北省蔬菜产业发展形势与高质量发展对策[J]. 河北农业大学学报(社会科学版), 2020, 22(4): 1-5.
- [2] 王长义, 郝振萍, 陈丹艳, 等. 设施土壤连作障碍产生原因及防治方法综述[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(8): 1-6.
- [3] 吕丰娟, 肖运萍, 魏林根, 等. 根系分泌物的生态效应与作物连作障碍关系研究进展[J]. 江西农业学报, 2016, 28(10): 8-14.
- [4] 李顺江, 山楠, 杜连凤, 等. 不同施肥模式对土壤氮磷含量及作物吸收特征的影响[J]. 中国蔬菜, 2013(22): 59-63.
- [5] Gomez J D, Denef K, Stewart C E, et al. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 28-39.
- [6] Lai W Y, Lai C M, Ke G R, et al. The effects of woodchip biochar application on crop yield, carbon sequestration and greenhouse gas emissions from soils planted with rice or leaf beet[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2013, 44(6): 1039-1044.
- [7] 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对沙壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137-142.
- [8] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [10] 冷家峰, 刘仙娜, 王泽俊. 紫外吸光度法测定蔬菜鲜样中硝酸盐氮[J]. 理化检验(化学分册), 2004, 40(5): 288-289.
- [11] 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.
- [12] 张彦雄, 李丹, 张佐玉, 等. 两种土壤阳离子交换量测定方法的比较[J]. 贵州林业科技, 2010, 38(2): 45-49.
- [13] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [14] 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[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1359-1366.
- [15] 孔滨, 杨秀娟. Biolog 生态板的应用原理及碳源构成[J]. 绿色科技, 2011(7): 231-234.
- [16] 王彩云, 武春成, 曹霞, 等. 生物炭对温室连作土壤黄瓜生长、叶片结构及产量的影响[J]. 北方园艺, 2018(19): 23-27.
- [17] 何进勤. 宁夏设施农业土壤理化性状演变规律及其评价指标研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2008.
- [18] 高慧, 冯佳萍, 刘奕. 不同种植年限设施土壤容重与孔性分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(26): 14399-14400, 14405.
- [19] 黄剑, 张庆忠, 杜章留, 等. 施用生物炭对农田生态系统影响的研究进展[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 232-239.
- [20] 程效义, 兰宇, 任晓峰, 等. 生物炭对连作设施土壤酶活性及黄瓜根系性状的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 418-423.
- [21] 邹春娇, 张勇勇, 张一鸣, 等. 生物炭对设施连作黄瓜根域基质酶活性和微生物的调节[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1772-1778.
- [22] 王雪玉, 马建华, 李明, 等. 生物炭对不同种植年限土壤黄瓜生长及真菌丰度的影响[J]. 中国瓜菜, 2018, 31(11): 22-25, 3.