

王思妍, 丁增伟, 詹 柠, 等. 不同生境对设施番茄植株生长、果实品质和土壤特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 142-151.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.015

不同生境对设施番茄植株生长、果实品质和土壤特性的影响

王思妍¹, 丁增伟², 詹 柠¹, 程星粹¹, 马 骅¹, 吴龙国¹, 曹云娥¹

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2. 银川市西夏区农牧水务局, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为探究不同生境对设施番茄植株生长、果实品质和土壤特性的影响, 本试验以设施番茄为研究对象, 设置 8 个处理: 生物炭(T1 处理)、蚯蚓粪(T2 处理)、覆盖白车轴草(T3 处理)、生物炭+蚯蚓粪(T4 处理)、生物炭+覆盖白车轴草(T5 处理)、蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T6 处理)、生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T7 处理)和空白对照(CK), 研究不同生境对设施番茄土壤特性、细菌群落及番茄品质和产量的影响。结果表明, 各处理均能改善土壤特性, 其中 T7 处理效果最佳。同时, T7 处理显著提升了番茄植株养分含量、可溶性糖含量、可溶性固形物含量和产量, 且显著减少了有机酸含量。不同生境均优化了土壤细菌群落结构, 提高了细菌群落的相对丰度。综合评价结果显示, T7 处理为设施番茄栽培的最佳生境, 本研究结果可为番茄产业的健康绿色发展提供依据。

关键词: 蚯蚓粪; 番茄; 生物炭; 土壤微生物

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)01-0142-10

Effects of different habitats on tomato plant growth, fruit quality and soil characteristics in greenhouse

WANG Siyan¹, DING Zengwei², ZHAN Ning¹, CHENG Xingcui¹, MA Hua¹, WU Longguo¹, CAO Yun'e¹

(1. School of Enology & Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Xixia District Bureau of Agriculture, Animal Husbandry and Water Affairs of Yinchuan City, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To investigate the effects of different habitats on the growth, fruit quality, and soil characteristics of greenhouse tomatoes, this study focused on greenhouse tomatoes and established eight treatments, including biochar (T1), vermicompost (T2), white clover cover (T3), biochar + vermicompost (T4), biochar + white clover cover (T5), vermicompost + white clover cover (T6), biochar + vermicompost + white clover cover (T7), and a blank control (CK). The study investigated the impact of these different habitats on soil characteristics, bacterial communities, and tomato quality and yield. The results showed that all treatments improved soil characteristics, with the T7 treatment exhibiting the best effects. Simultaneously, the T7 treatment significantly enhanced nutrient content, soluble sugar content, soluble solids content, and yield in tomato plants, while significantly reduced organic acid content. All different habitats optimized the soil bacterial community structure and increased the relative abundance of the bacterial community. Comprehensive evaluation results indicated that the T7 treatment was the optimal habitat for greenhouse tomato cultivation. The findings of this study

can provide a supportive foundation for the healthy and green development of the tomato production.

Key words: vermicompost; tomato; biochar; soil microorganisms

收稿日期: 2025-02-20

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2023BCF01046); 2020 年宁夏青年拔尖人才项目

作者简介: 王思妍(1999-), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培与管理研究。(E-mail) 2484379676@qq.com

通讯作者: 曹云娥, (E-mail) 1935436108@qq.com

设施农业中, 过度集中施用化肥和农药且缺乏

淋洗,易导致土壤养分不均衡和盐分积累,进而降低农产品质量^[1]。研究发现,长期高强度施用化肥和农药会造成土壤板结、pH 值降低以及氮磷养分在土壤中的积累^[2]。研究还发现,在设施条件下连续施肥 3 年的土壤与不施肥的土壤相比,施肥处理的土壤微生物多样性指数和物种丰富度指数相对较低,同时有害菌数量增多^[3-4],这进一步增加了土壤连作障碍的可能性^[5]。综上,长期大量施用化肥和农药会导致设施土壤的氮、磷含量和有害菌数量等超标,造成水体的污染,降低土壤质量,影响作物产量和品质,威胁设施蔬菜产业的可持续发展^[6]。因此,探寻新型的施肥方式和栽培模式至关重要。

生物炭具有疏松多孔的结构和较大的表面积^[7],以及稳定的理化性质,其被施入土壤中,能有效改良土壤理化性质,增强土壤的透气性、提升土壤肥力,并最终提高蔬菜产量^[8-9]。研究结果表明,生物炭能够吸附土壤中的有机碳,减少植物根际激发效应,从而影响土壤有机质矿化过程^[10]。蚯蚓粪作为一种环保的有机肥料,具有全面的养分和良好的通气性与透水性^[11],有助于增强土壤养分和提升作物果实品质。生物炭和蚯蚓粪富含的有益微生物有助于优化土壤结构,增加土壤中细菌与放线菌的数量,从而改善土壤微生物环境^[12-13]。相关研究发现,生物炭配施蚯蚓粪是培肥中低产田土壤、提高养分吸收利用的有效措施^[14]。白车轴草作为地被植物,不仅能够覆盖地表,减少水分蒸发,而且在农业生产中具有改良土壤环境和土壤理化性质的作用^[15]。研究发现,白车轴草覆盖可改善土壤结构、提高土壤含水量和微生物多样性,并通过其固氮作用提供氮营养,从而减少对肥料的需求^[16-17]。

目前,单一应用生物炭、蚯蚓粪及覆盖作物等措施改良设施土壤的研究较多,但将三者有机结合构成复合生境的研究却鲜有报道。因此,本研究拟构建一种生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草相结合的复合生境生产模式,通过比较其对土壤特性、细菌群落以及设施番茄品质和产量的影响,分析不同生境下番茄的生长变化特征,并进行综合评价,以期为设施番茄的绿色生产模式创新提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 试验时间及试验地概况

试验在宁夏贺兰县农旅产业园(106.3°E,38.6°

N)内进行,番茄于 4 月 20 日定植,8 月 26 日拉秧。土壤基本理化性质:pH 为 7.21,有机质含量为 56.09 g/kg,全氮含量为 0.60 g/kg,全磷含量为 3.95 g/kg,有效磷含量为 352.00 mg/kg,速效钾含量为 1 020.00 mg/kg。

1.2 试验材料

供试番茄品种为粉宴 1 号,生物炭(主要成分为椰壳,有效碳成分为 95%)由河南泰源环保科技有限公司提供;供试蚯蚓为赤子爱胜蚓,由宁夏万辉生物环保科技有限公司提供,蚯蚓粪来源于蚯蚓对牛粪的异位消解,半腐熟处理后使用。覆盖作物选用白车轴草。供试材料理化性质如表 1 所示。

表 1 供试材料理化性质

Table 1 Physicochemical properties of test materials

材料	氮含量 (%)	磷含量 (%)	钾含量 (%)	有机碳含量 (%)
蚯蚓粪	0.85	2.13	1.20	15.00
生物炭	0.31	0.55	0.72	96.00
白车轴草	3.21	0.59	5.93	43.12

1.3 试验设计

本课题组前期通过梯度试验对生物炭施用量进行优选,确定最优实施方案为 3.00 t/hm²,根据等炭原则,蚯蚓粪添加量为 44.98 t/hm²。本试验采用单因素随机区组设计方法。共设 8 个处理:CK(不做处理),T1(施 3.00 t/hm²生物炭),T2(施 44.98 t/hm²蚯蚓粪),T3(覆盖白车轴草),T4(施 3.00 t/hm²生物炭+44.98 t/hm²蚯蚓粪),T5(施 3.00 t/hm²生物炭+覆盖白车轴草),T6(施 44.98 t/hm²蚯蚓粪+覆盖白车轴草),T7(施 3.00 t/hm²生物炭+44.98 t/hm²蚯蚓粪+覆盖白车轴草)。每个处理设 3 个小区,小区长 5 m、宽 4 m,各小区之间用砖间隔。畦宽 80 cm,畦间距 60 cm,每畦栽 2 行,行间距 40 cm,植株间距 40 cm。各处理的蚯蚓粪和生物炭于番茄定植前作为基肥一次性施入,用旋耕机翻耕,使基肥与土壤混匀,施肥深度为 0~20 cm。白车轴草在定植前撒播至垄面,播种密度为 25.0 g/m²,待白车轴草覆盖垄面后定植番茄。

1.4 样品采集与指标测定

样品采集:于番茄盛果期采集 0~20 cm 土层土壤,测定土壤理化指标;拉秧期将植株根系全部挖出,用剪刀分离地上部和地下部,用于测定植株养分

含量;在盛果期采集番茄果实,测定番茄可溶性糖含量、有机酸含量、维生素 C 含量、可溶性固形物含量。产量测定:将不同小区的番茄分批采收后,统计采收的番茄总重量。

土壤样品和植株样品指标的测定:土壤容重采用环刀法测定;有机质含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定;全氮含量采用凯氏消煮法测定;全磷含量采用钼锑抗比色法测定;全钾含量采用火焰分光光度法测定;速效氮含量采用凯氏定氮法测定;速效磷含量采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化-火焰光度法测定。土壤指标测定具体参考《土壤农化分析》^[18] 中的方法,植株指标测定具体参考赵世杰^[19] 的方法。

番茄样品指标的测定:番茄果实的可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;有机酸含量采用 NaOH 滴定法测定;维生素 C 含量采用钼蓝比色法测定;番茄可溶性固形物含量采用手持糖度计测定^[19]。

微生物高通量测序:土壤细菌多样性分析委托北京奥维森基因科技有限公司完成。使用土壤 DNA 提取试剂盒提取土壤样本的基因组 DNA,使用超微量分光光度计(美国赛默飞世尔科技公司产品)检测 DNA 质量和浓度。扩增后的 PCR 产物使用 1% 琼脂糖凝胶回收,利用 DNA 凝胶回收核酸纯

化试剂盒对回收产物进行纯化,并用荧光定量仪对回收产物进行定量检测。利用诺唯测序仪 6000(因美纳公司,美国)进行高通量测序。

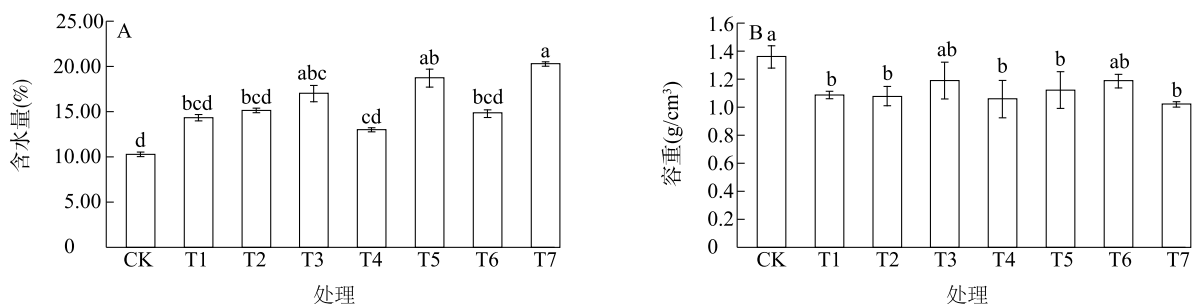
1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2019 进行试验数据统计。采用 SPSS 24.0 软件对数据进行单因素方差分析及主成分分析(PCA)。采用 Origin2024 绘图。采用曼特检验(Mantel test)分析植株养分、番茄品质、产量与土壤环境因子及门属水平优势菌群的相关性。采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同生境对土壤理化性质的影响

由图 1 可知,不同处理的土壤含水量较 CK 均有提高,其中 T3 处理、T5 处理和 T7 处理的土壤含水量显著高于 CK;各处理土壤容重均比 CK 降低,但各处理间均无显著差异。其中,T3 处理和 T6 处理土壤的容重与 CK 无显著差异,而 T1 处理、T2 处理、T4 处理、T5 处理和 T7 处理比 CK 显著降低 17.65%~25.00%。结果表明,施用生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草的施肥方式使土壤物理性质得到有效的改良,同时其他处理也不同程度地使土壤物理性质得到了改良。



A: 土壤含水量; B: 容重。CK: 对照; T1: 施 3.00 t/hm² 生物炭; T2: 施 44.98 t/hm² 蚯蚓粪; T3: 覆盖白车轴草; T4: 施 3.00 t/hm² 生物炭+44.98 t/hm² 蚯蚓粪; T5: 施 3.00 t/hm² 生物炭+覆盖白车轴草; T6: 施 44.98 t/hm² 蚯蚓粪+覆盖白车轴草; T7: 施 3.00 t/hm² 生物炭+44.98 t/hm² 蚯蚓粪+覆盖白车轴草。不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同生境对土壤含水量和容重的影响

Fig.1 Effects of different habitats on soil water content and bulk density

由表 2 可知,各处理土壤化学性质差异显著。与对照相比, T6 处理、T7 处理 pH 值均显著增加, T2 处理 pH 值则显著降低, T1 处理、T3 处理、T4 处理、T5 处理土壤 pH 值与对照差异不显著。与对照相比,各处理土壤有机质含量、全氮含量、速效氮含量、全钾含

量、速效钾含量、全磷含量和速效磷含量整体上均显著高于对照。T1 处理与 T6 处理、T2 处理与 T3 处理土壤有机质含量差异不显著; T3 处理与 T7 处理土壤全氮含量差异不显著; T3 处理与对照土壤全钾含量无显著差异, T5 处理与 T6 处理土壤全钾含量无显著

差异;T6 处理全氮含量、全磷含量、速效磷含量较对照显著增加,分别增加了 83.81%、23.35%、36.24%。土壤全磷含量在 T1 处理~T4 处理之间均无显著差

异,均较对照显著增加;T4 处理土壤速效磷含量与 T5 处理无显著差异。T4 处理速效钾含量较对照显著增加,增加了 30.35%。

表 2 不同生境对土壤化学性质的影响

Table 2 Effects of different habitats on soil chemical properties

处理	pH	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效氮含量 (mg/kg)	全钾含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)
CK	7.13±0.04c	97.14±0.32f	1.05±0.01g	83.45±0.66f	1.94±0.03f	1 527.41±11.77f	1.97±0.01e	250.50±0.67g
T1	7.12±0.03c	114.65±1.54d	1.06±0.01f	92.73±0.46d	2.42±0.07c	1 964.38±32.32b	2.11±0.02d	311.90±1.55e
T2	7.03±0.02d	102.12±0.65e	1.09±0.01e	93.37±0.06d	2.68±0.03b	1 713.93±13.18e	2.14±0.04d	321.18±1.08d
T3	7.10±0.03c	104.94±1.72e	1.30±0.01d	103.52±0.80a	1.96±0.02f	1 925.18±8.69c	2.13±0.04d	331.25±1.11c
T4	7.13±0.04c	142.46±1.51b	1.69±0.01b	98.27±0.81c	2.19±0.07e	1 990.96±1.36a	2.17±0.03d	291.92±1.64f
T5	7.12±0.02c	125.58±0.61c	1.57±0.01c	100.79±0.46b	2.32±0.04d	1 821.96±3.94d	2.26±0.06c	291.65±1.67f
T6	7.23±0.02b	115.99±1.53d	1.93±0.01a	101.39±1.03b	2.40±0.06cd	1 949.90±1.59bc	2.43±0.05a	341.28±1.19a
T7	7.33±0.03a	171.02±4.73a	1.29±0.01d	91.58±0.59e	3.10±0.08a	1 939.72±8.32bc	2.34±0.04b	335.16±1.60b

CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同生境对土壤细菌多样性及群落结构的影响

2.2.1 不同生境对土壤细菌群落多样性的影响

由表 3 可知,各处理的细菌覆盖度均高达 98%,说明不同生境下测序深度基本覆盖样品中所有的物种,足以反映真实情况。不同处理间细菌的 Chao1 指数以及 Simpson 指数无显著差异;Shannon 指数在 T6 处理与 T3 处理之间有显著差异,但其余处理间差异均未达到显著水平。

表 3 不同生境对土壤细菌多样性的影响

Table 3 Effects of different habitats on soil bacterial diversity

处理	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度 (%)
CK	5 529.93±155.19a	10.08±0.08abc	0.999±0.003a	98±0a
T1	5 498.37±188.50a	10.08±0.07abc	0.999±0.002a	98±0a
T2	5 737.92±519.28a	10.27±0.12abc	0.999±0.004a	98±0a
T3	5 510.32±284.52a	10.05±0.09c	0.999±0.001a	98±0a
T4	5 633.35±208.50a	10.20±0.13abc	0.998±0.004a	98±0a
T5	5 961.76±508.95a	10.27±0.12abc	0.999±0.004a	98±0a
T6	5 673.53±220.02a	10.35±0.09a	0.999±0.002a	98±0a
T7	5 729.25±340.66a	10.15±0.15abc	0.999±0.004a	98±0a

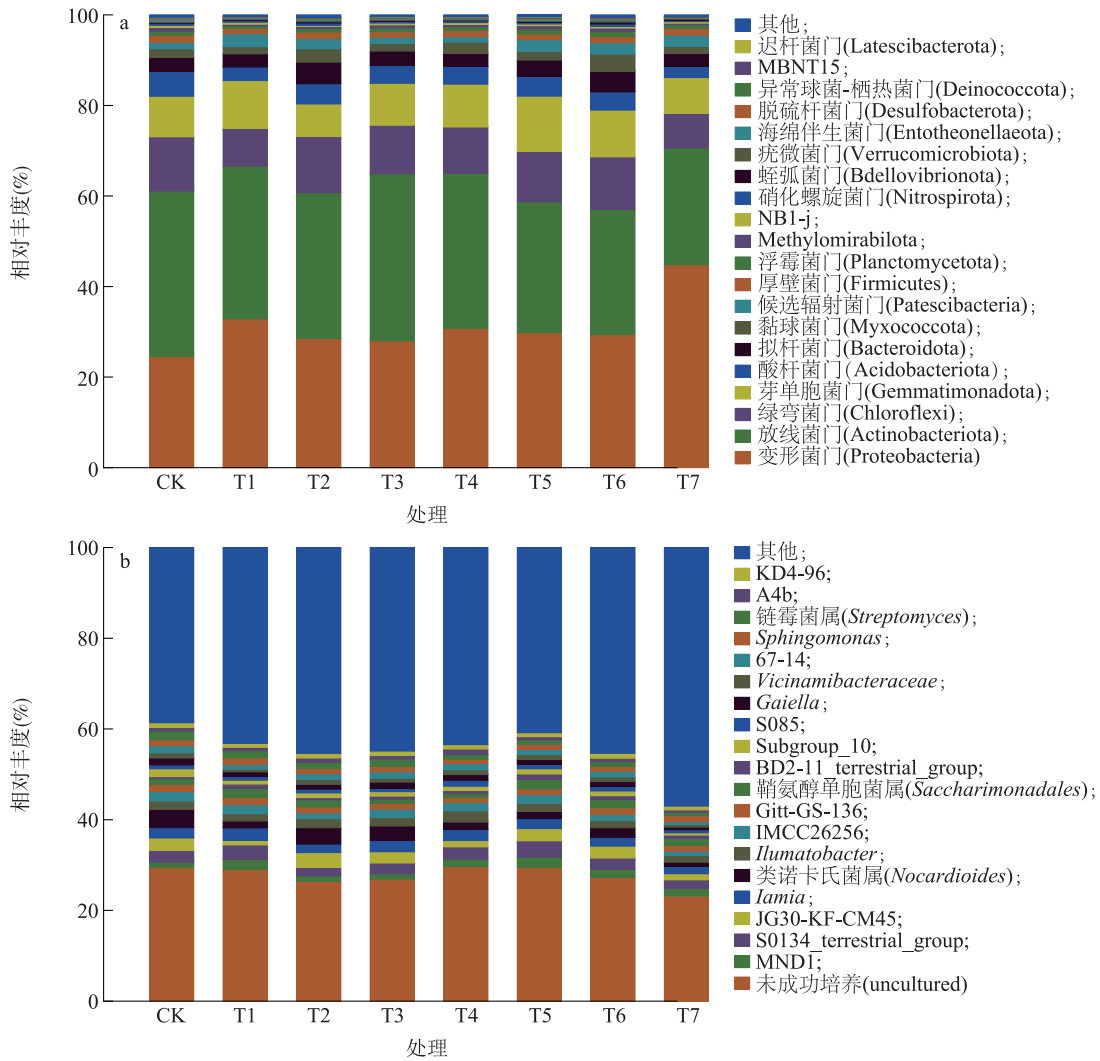
CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2.2 不同生境对土壤细菌群落结构的影响 由图 2a 可知,在细菌门水平上,不同处理得到 21 个相对丰度 > 1.00% 的细菌门,其中优势菌门为变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteriota)、绿

弯菌门 (Chloroflexi) 和芽单胞菌门 (Gemmatimonadota),其相对丰度之和共占全部菌门相对丰度的 79.07%~86.16%。与 CK 相比,T1~T7 处理变形菌门 (Proteobacteria) 相对丰度均有所升高,分别升高 25.34%、13.88%、12.31%、20.30%、17.62%、16.63% 和 45.27%。相反 T7 处理放线菌门 (Actinobacteriota)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和芽单胞菌门 (Gemmatimonadota) 的相对丰度较 CK 均有所降低,分别降低 29.51%、36.46%、11.30%。在属水平,检测到 21 个细菌属 (图 2b),其中相对丰度较高的分别是 uncultured、S0134_terrestrial_group 和类诺卡氏菌属 (Nocardioiides)。其中,T4 处理 uncultured 相对丰度最高,较 CK 升高了 0.67%。T5 处理 S0134_terrestrial_group 细菌属相对丰度比 CK 升高 27.79%,且 T2 处理 MND1 和 S0134_terrestrial_group 细菌属相对丰度最低。CK 类诺卡氏菌属 (Nocardioiides) 相对丰度高于其他处理,而 T7 处理类诺卡氏菌属相对丰度最低,比 CK 低 77.62%。

2.3 不同生境对番茄植株养分含量的影响

由表 4 可知,各处理植株养分含量整体上显著高于 CK。其中,T7 处理植株全氮含量、全磷含量和全钾含量最高,与 CK 相比,3 个指标增幅分别为 32.59%、44.00%、36.43%;其中,T4 处理的植株全氮含量与 T7 处理无显著差异,这可能是由于蚯蚓粪改善了土壤环境,增加了植株对氮的吸收量,同时生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草处理能够促进养分循环和增强植物生理活动,共同促进了植株对氮、磷、钾的吸收。



CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。

图 2 不同生境对土壤细菌门水平优势物种丰度 (a) 和属水平优势物种丰度 (b) 的影响

Fig.2 Effects of different habitats on the abundance of dominant species at the phylum level (a) and the genus level (b) of soil bacteria

表 4 不同生境对植株养分的影响

Table 4 Effects of different habitats on plant nutrients

处理	全氮含量 (%)	全磷含量 (%)	全钾含量 (%)
CK	2.24±0.04d	0.75±0.01g	4.20±0.01g
T1	2.58±0.01c	0.98±0.03b	5.00±0.02d
T2	2.59±0.02c	0.92±0.05d	4.70±0.06e
T3	2.24±0.06d	0.82±0.01f	5.03±0.06d
T4	2.96±0.01a	0.86±0.01e	5.30±0.02b
T5	2.24±0.02d	0.91±0.01d	4.60±0.03f
T6	2.81±0.01b	0.95±0.02c	5.20±0.05c
T7	2.97±0.03a	1.08±0.03a	5.73±0.06a

CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 不同生境对番茄果实品质的影响

由表 5 可知,各处理番茄果实的可溶性糖含量都显著高于 CK,其中 T7 处理的可溶性糖含量最高,比 CK 增加了 73.11%。T3 处理~T6 处理的可溶性糖含量均无显著差异,但均显著高于 T1 和 T2 处理。相反 T7 处理有机酸含量最低,比 CK 显著降低 18.00%, T3 处理~T6 处理有机酸含量显著低于 CK。T1 处理~T7 处理的可溶性固形物含量都显著高于 CK,其中 T1 和 T2 处理的可溶性固形物含量显著低于 T3 处理~T7 处理,T3 处理可溶性固形物含量和 T6 处理没有显著差异,T7 处理可溶性固形物含量最高,比 CK 增加了 69.81%;T1 处理和 T6 处理维生素 C 含量较高,较 CK 分别显著增加了

50.72%和43.61%,T1处理~T7处理的维生素C含量无显著差异。

表5 不同生境对番茄品质的影响

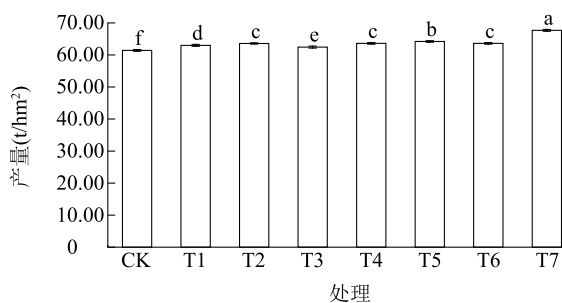
Table 5 Effects of different habitats on tomato quality

处理	可溶性糖含量 (%)	有机酸含量 (%)	维生素 C 含量 (mg/kg)	可溶性固形物含量 (%)
CK	5.43±0.05d	0.50±0.02a	132.30±23.30b	5.40±0.05e
T1	6.20±0.05c	0.51±0.01a	199.40±34.00a	6.00±0.02d
T2	6.21±0.10c	0.51±0.02a	172.70±32.10ab	6.00±0.03d
T3	6.77±0.09b	0.45±0.01b	149.60±65.40ab	6.57±0.06c
T4	6.97±0.13b	0.46±0.02b	184.20±39.80ab	6.87±0.06b
T5	6.96±0.10b	0.45±0.01b	182.00±44.90ab	6.90±0.04b
T6	7.07±0.41b	0.46±0.02b	190.00±16.70a	6.60±0.02c
T7	9.40±0.12a	0.41±0.01c	144.60±78.60ab	9.17±0.06a

CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 不同生境对番茄产量的影响

由图 3 可知,不同处理番茄产量均显著高于对照组,其中生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T7)处理番茄产量最高,达到了 67.69 t/hm²,比 CK 高出 10.21%;其次是生物炭+覆盖白车轴草(T5)处理,比 CK 显著增加了 4.54%;此外,单独使用生物炭(T1)、蚯蚓粪(T2)、覆盖白车轴草(T3)、生物炭+蚯蚓粪(T4)和蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T6)处理,相较于 CK,产量分别显著提升 2.59%、3.54%、1.70%、3.60%、3.58%。上述结果说明,生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草处理能显著提高番茄产量。



CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图3 不同生境对番茄产量的影响

Fig.3 Effects of different habitats on tomato yield

2.6 主成分分析

由表 6 可知,将土壤养分、植株养分等 18 个单项指标经主成分分析得到 5 个主成分的特征值、贡献率和累积贡献率。按照特征值大于 1.00 且成分

贡献率大于 5.00% 的原则提取前 5 个为主成分,贡献率分别为 22.33%、21.83%、18.24%、17.92%、14.06%,累计贡献率达到 94.38%,足以代表原始因子的大部分信息。

表6 不同生境的特征值、贡献率、累积贡献率

Table 6 Characteristic value, contribution rate and cumulative contribution rate of different habitats

类别	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
特征值	5.47	3.14	2.85	1.89	1.17
贡献率 (%)	22.33	21.83	18.24	17.92	14.06
累积贡献率 (%)	22.33	44.16	62.40	80.32	94.38

PC1~PC5 分别表示第 1 主成分至第 5 主成分。

采用主成分分析法对 8 个不同生境土壤养分、植株养分和番茄品质产量进行评价和排序(表 7),综合得分由高到低的顺序为: T7>T6>T3>T5>T4>T2>T1>CK。

表7 主成分分析综合得分

Table 7 Comprehensive score of principal component analysis

处理	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
综合得分	-0.513	-0.487	-0.285	0.275	-0.225	0.037	0.582	0.616
排名	8	7	6	3	5	4	2	1

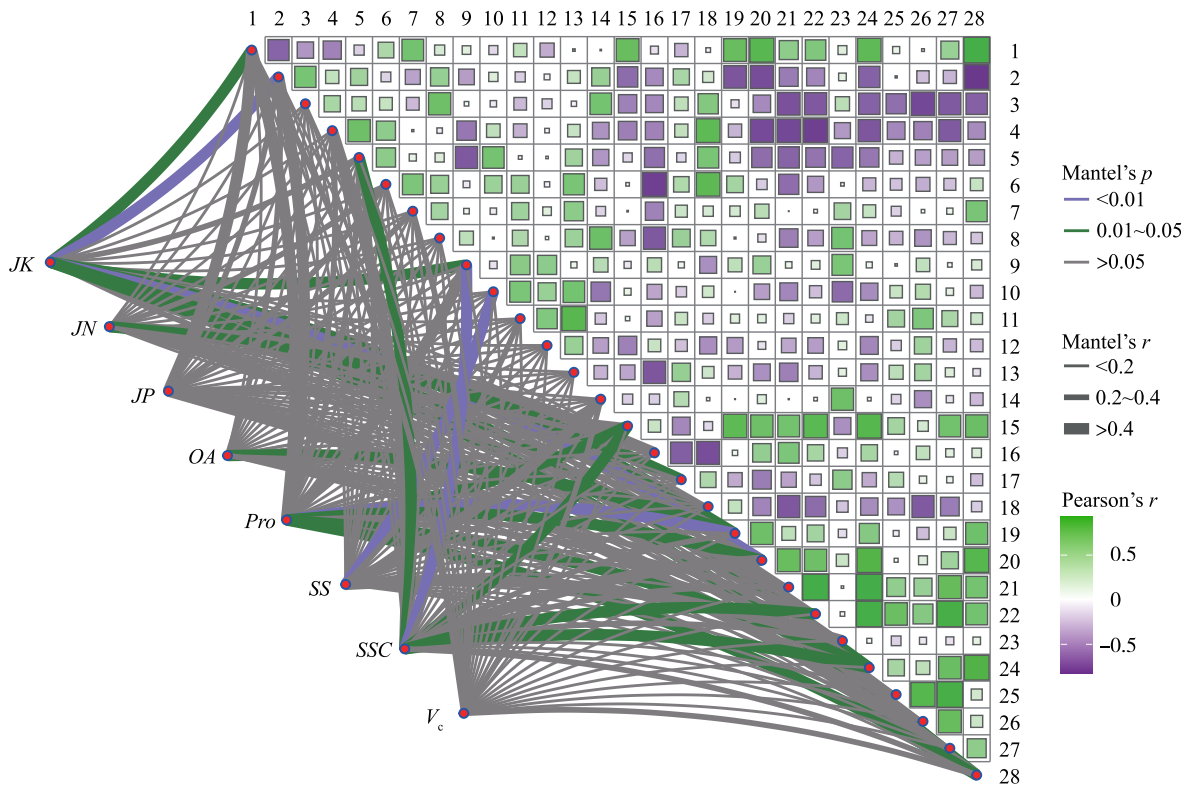
CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 见图 1 注。

2.7 番茄植株养分含量、番茄产量、番茄果实品质与环境因子的相关性分析

对番茄植株养分含量、番茄产量、番茄果实品质与土壤基本理化性质和细菌相对丰度进行相关性分析,结果如图 4 所示,番茄植株全钾含量与土壤含水量、pH、Gaiella 相对丰度、Vicinamibacteraceae 相对丰度,番茄产量与 Streptomyces 相对丰度、Gaiella 相对丰度,可溶性糖含量与速效钾含量、Chao1 指数,可溶性固形物含量与速效磷含量、速效钾含量呈极显著相关。番茄植株全钾含量与土壤容重、速效磷含量、速效钾含量、Saccharimonadales 相对丰度、Sphingomonas 相对丰度、Streptomyces 相对丰度、Gaiella 相对丰度,植株全氮含量与 Saccharimonadales 相对丰度、Sphingomonas 相对丰度,有机酸含量与 Streptomyces 相对丰度、Gaiella 相对丰度,番茄产量与 Nocardioideis 相对丰度、Ilumatobacter 相对丰度、Acidobacteriota 相对丰度、Bacteroidota 相对丰度、Desulfobacterota 相对丰度,可溶性固形物含量与土壤全氮含量、土壤全磷含量、Nocardioideis 相对丰度、Ilumatobacter 相对丰度、Chlo-

roflexi 相对丰度、Gemmatimonadota 相对丰度、Acidobacteriota 相对丰度、Bacteroidota 相对丰度呈显著相关。土壤含水量与 Desulfobacterota 相对丰度,土壤 pH 与 Myxococcota 相对丰度,土壤有机质含量与 Gaiella 相对丰度、Vicinamibacteraceae 相对丰度、Chloroflexi 相对丰度,土壤全磷含量与 Ilumatobacter 相对丰度,Sphingomonas 相对丰度与 Vicinamibacteraceae 相对丰度呈显著正相关。而土壤容重与 Gaiella 相对丰度、Acidobacteriota 相对丰度、Desulfobacterota 相对

丰度,土壤有机质含量与 Sphingomonas 相对丰度,Nocardioideis 相对丰度与 Streptomyces 相对丰度、Vicinamibacteraceae 相对丰度、Acidobacteriota 相对丰度、Verrucomicrobiota 相对丰度、Desulfobacterota 相对丰度,Gaiella 相对丰度与 Acidobacteriota 相对丰度、Desulfobacterota 相对丰度、Vicinamibacteraceae 相对丰度、Chloroflexi 相对丰度、Bacteroidota 相对丰度与 Acidobacteriota 相对丰度、Verrucomicrobiota 相对丰度呈显著负相关。



JN: 植株全氮含量; JP: 植株全磷含量; JK: 植株全钾含量; SSC: 可溶性固形物含量; SS: 可溶性糖含量; OA: 有机酸含量; V_c : 维生素 C 含量; Pro: 产量; 1: 容重; 2: 含水量; 3: pH; 4: 有机质含量; 5: 土壤全氮含量; 6: 土壤全磷含量; 7: 土壤全钾含量; 8: 速效氮含量; 9: 速效磷含量; 10: 速效钾含量; 11: Chao1 指数; 12: Coverage 指数; 13: Shannon 指数; 14: Simpson 指数; 15: Nocardioideis 相对丰度; 16: Ilumatobacter 相对丰度; 17: Saccharimonadales 相对丰度; 18: Sphingomonas 相对丰度; 19: Streptomyces 相对丰度; 20: Gaiella 相对丰度; 21: Vicinamibacteraceae 相对丰度; 22: Chloroflexi 相对丰度; 23: Gemmatimonadota 相对丰度; 24: Acidobacteriota 相对丰度; 25: Bacteroidota 相对丰度; 26: Myxococcota 相对丰度; 27: Verrucomicrobiota 相对丰度; 28: Desulfobacterota 相对丰度。热图中每个色块的颜色表示土壤养分及土壤多样性指数之间的正、负相关系数,色块的大小表示相关系数的绝对值。线的粗细表示相关性的强度,线的颜色表示显著性的程度。

图 4 植株养分含量、番茄产量、番茄果实品质与环境因子的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of plant nutrients, tomato yield, tomato fruit quality and environmental factors

3 讨论

通过比较不同生境对番茄植株土壤理化性质的影响,本研究发现生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草

(T7 处理)土壤含水量最高,达到 20.26%,较 CK 增加了 49.25%,相反该处理使得土壤容重降至 1.02 g/cm^3 ,相较于 CK 减少了 25.00%。同时研究还发现,施用生物炭+蚯蚓粪(T4 处理)能显著提升土壤

中的速效钾含量,相较于CK增加了30.35%,该结果与李文慧等^[20]的研究结果一致。此外,悦飞雪等^[21]发现单一施用生物炭可显著增加速效钾含量,其原因在于生物炭表面丰富的孔隙结构能够吸附外源施加的养分,减少养分的淋失^[22]。生物炭中的磷元素可以通过矿化作用缓慢释放,提高土壤中磷元素的含量^[23-24],生物炭自身具有较高的钾含量且多为水溶性钾和交换性钾^[25],能显著提高土壤养分含量。本研究结果表明,单一覆盖白车轴草(T3处理)对土壤速效氮含量的提高有显著促进作用。这可能源于白车轴草的根际固氮功能,它能够将大气中的氮转化为植物可吸收的形式,从而大幅提升土壤中的氮含量^[26]。本研究发现生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T7处理)处理显著增加了土壤全钾含量,较CK增加了59.79%,这与安明远^[27]的研究结果一致。原因可能是蚯蚓粪中的微生物可分解白车轴草的根系分泌物,进一步释放钾,而生物炭具有吸附作用,可以减少钾的流失,使得更多的钾被保留在土壤中供植物所利用^[28]。然而,本研究发现生物炭+蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T7处理)显著提高了土壤的各养分含量,与王帅等^[29]的研究结果一致,进一步验证了蚯蚓粪能够促进土壤中养分的循环;而白车轴草作为覆盖作物,可通过其根系分泌物,增加土壤中氮含量,同时生物炭具有高的比表面积和多孔性,能够吸附和固定土壤中的养分^[30-31]。

同时本研究发现,两两混合处理较单一处理均有不同程度的促进作用,与对照相比,生物炭+蚯蚓粪(T4处理)植株全钾含量提高最显著,这与李金焯等^[32]、王星林等^[33]的研究结果一致。由此可见,生物炭能够刺激植物产生生长素,进而促进植物细胞的生长,导致细胞壁松弛,促进了生物量的积累。且蚯蚓粪中丰富的养分为植物提供了更多的营养^[34-36]。同时,本研究发现蚯蚓粪+生物炭+覆盖白车轴草(T7处理)较CK显著提高了植株氮、磷、钾的含量。这是因为生物炭、蚯蚓粪和白车轴草组合处理可以通过改善土壤结构和增加有机质含量来提高土壤通气性和保水能力,从而促进植物根系的延伸和生长,进而提高植株对养分的吸收效率^[37]。本研究还发现,与CK相比,蚯蚓粪+生物炭+覆盖白车轴草(T7处理)有效提高了番茄中可溶性糖和可溶性固形物的含量,并增加了产量,同时减少了有机酸含量,这与刘婵娟等^[38]、曹雪娜等^[39]的研究结果一

致。刘学才等^[40]研究发现,蚯蚓粪处理的番茄产量和果实中可溶性糖含量、维生素C含量都显著提高。

进一步研究发现,生物炭+蚯蚓粪(T4处理)显著提高了细菌群落的相对丰度,这与郭晓雯等^[41]的研究结果一致。同时,细菌群落多样性分析结果表明,与对照相比,蚯蚓粪+覆盖白车轴草(T6处理)Shannon指数提高最显著,其余指数无显著差异。相关性分析结果表明,土壤含水量、土壤pH、土壤有机质含量和土壤全磷含量的变化主要与细菌群落的丰度变化有关,表明不同生境处理会通过改变土壤理化性质而影响土壤细菌群落多样性和丰富度。Cho等^[42]研究发现,不同的土壤pH值会影响土壤细菌群落的组成和多样性,因为不同的细菌种类对pH值的适应性不同。Zhang等^[43]研究发现,土壤养分循环与土壤微生物之间存在相互依赖的关系。本研究发现,植株全钾含量、土壤速效磷含量、速效钾含量的提高会促进Saccharimonadales、Sphingomonas和Acidobacteriota的生长繁殖;土壤有机质含量、全氮含量、速效磷含量、速效钾含量的提高会促进Acidobacteriota和Bacteroidota的生长繁殖;土壤容重、有机质含量、全氮含量、全磷含量的提高会抑制Viciniabacteraceae的生长繁殖。综上所述,不同生境处理可以改善土壤理化性状、细菌群落多样性和群落结构,有利于番茄植株养分和果实品质、产量的提升。

4 结论

本研究通过对比不同生境条件下的土壤理化性质、番茄植株养分含量、番茄果实品质和产量,发现蚯蚓粪、生物炭和白车轴草的组合使用对土壤养分调控具有显著效果。特别是蚯蚓粪+生物炭+覆盖白车轴草(T7处理),显著提高了土壤含水量、pH、有机质含量和全钾含量,这些土壤营养状况的改善促进了细菌相对丰度的提高,进而增强了番茄植株对氮、钾元素的吸收,最终促进了番茄果实品质和产量的提升,其中蚯蚓粪+生物炭+覆盖白车轴草(T7处理)番茄产量比对照增加了10.21%。主成分分析结果表明,蚯蚓粪+生物炭+覆盖白车轴草(T7处理)在改善设施土壤理化性质、植株养分含量、番茄产量和品质方面表现最佳。

参考文献:

- [1] VOCA H, PISCITELLI L, MEZZAPESA G N, et al. Biochar effect on crop performance and Pb and Zn uptake of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants grown on heavy metals contaminated Kosovo soils[J]. Journal of Environmental Science and Health. Part. B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2020, 55(9):844-853.
- [2] 张光星,王靖华. 番茄无公害生产技术[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [3] KODAOULU B, MOHAMMED I, WANG Y T, et al. Assessment of phosphorus status in a calcareous soil receiving long-term application of chemical fertilizer and different forms of swine manures[J]. Journal of Environmental Quality, 2024, 53(1):112-122.
- [4] 李玉涛,李博文,马理,等. 不同种植年限设施番茄土壤理化性质变化规律的研究[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(1):63-68.
- [5] DONG J L, GRUDA N, LI X, et al. Impacts of elevated CO₂ on nitrogen uptake of cucumber plants and nitrogen cycling in a greenhouse soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 145:103342.
- [6] LIANG L Z, ZHAO X Q, YI X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(2):161-168.
- [7] 潘占东,马倩倩,陈晓龙,等. 添加生物炭对黄土高原旱作农田土壤养分、腐殖质及其组分的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2):14-24.
- [8] 李昌娟,杨文浩,周碧青,等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2):387-397.
- [9] 陈斐杰,夏会娟,刘福德,等. 生物炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1):161-172.
- [10] 段春燕,沈育伊,徐广平,等. 桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果[J]. 环境科学, 2020, 41(9):4234-4245.
- [11] 魏永霞,肖敬萍,王鹤,等. 施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3):305-314.
- [12] 李少杰,孙晓丽,曹云娥. 不同蚯蚓粪施用量对设施甜瓜生长及品质的影响[J]. 农业科学研究, 2018, 39(2):37-42.
- [13] ZALLER J G. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2):191-199.
- [14] ATIYEH R M, LEE S, EDWARDS C A, et al. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth[J]. Bioresource Technology, 2002, 84(1):7-14.
- [15] HARUNA S I, EKE D, HAQUE M A, et al. Cover crop effects on select soil physicochemical and biological properties[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2025, 393. DOI: 10.1016/j.agee.2025.109817.
- [16] 李云,杨彩琴. 不同覆草处理对兰州百合生长发育及根系土壤理化性质的影响[J]. 现代园艺, 2024, 47(12):36-38.
- [17] 吴军虎,邵凡凡,刘侠. 蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):81-87.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [19] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 1998.
- [20] 李文慧,王继涛,安明远,等. 蚯蚓原位堆肥与不同比例生物炭对基质理化性质及番茄品质的作用研究[J]. 核农学报, 2024, 38(5):943-954.
- [21] 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] 王庆阳,曹殿云,王迪,等. 长期施用生物炭对棕壤养分及腐殖质组分的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(13):2612-2622.
- [23] 马珍,黄凯文,张珍明,等. 添加生物炭对土壤磷素有效性影响研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(8):89-96.
- [24] 徐刚,张友,武玉,等. 生物炭对土壤中氮磷有效性影响的研究进展[J]. 中国科学:生命科学, 2016, 46(9):1085-1090.
- [25] XIU L Q, GU W Q, SUN Y Y, et al. The fate and supply capacity of potassium in biochar used in agriculture[J]. Science of the Total Environment, 2023, 902:165969.
- [26] 张道勇,李会科,郭宏,等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5):39-45.
- [27] 安明远. 蚯蚓粪持续更新无土栽培系统初探[D]. 银川:宁夏大学, 2022.
- [28] COUËDEL A, ALLETTO L, TRIBOUILLOIS H, et al. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 254:50-59.
- [29] 王帅,徐广亚,杨海波,等. 蚯蚓堆肥与生物炭对瓜草复合系统土壤及植株的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(8):1332-1343.
- [30] 王潇敏,李恋卿,潘根兴,等. 胶冻芽孢杆菌与生物炭复配及对番茄产量和品质的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3):479-485.
- [31] 李义红,郭丽,任燕利,等. 施用生物炭对梨园土壤肥力及果实品质的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(增刊1):307-313.
- [32] 李金辉,陈洁,吴建富,等. 秸秆及其生物炭还田对水稻养分吸收分配和产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(5):1118-1128.
- [33] 王星林,刘颖,胡雨松,等. 蚯蚓粪对日光温室袋培甜瓜生长及营养吸收的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(2):345-354.
- [34] 颜振峰,林晶晶,张林琳. 化肥减量配施蚯蚓粪对连作番茄产

- 量、养分利用及经济效益的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(2):183-190.
- [35] 冯云星, 朱红艳, 虎志瑞, 等. 蚯蚓原位堆肥配施生物炭对土壤性质及辣椒品质产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(24):212-219.
- [36] 王艳阳, 叶爱萍, 王平平, 等. 蚯蚓粪有机无机复混肥对陕南烟田有机碳及烤烟品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(2):78-83.
- [37] WILBER W L, WILLIAMSON J G. Effects of fertilizer rate on growth and fruiting of containerized southern highbush blueberry [J]. HortScience, 2008, 43(1):143-145.
- [38] 刘婵娟, 叶放, 徐顺安, 等. 蚯蚓粪肥配施对设施番茄生长、氮素利用和土壤肥力的影响[J/OL]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2024; 1-12[2024-12-08]. [https://link.cnki.net/](https://link.cnki.net/urlid/33.1247.S.20240507.1408.002)
- [39] 曹雪娜, 孟军, 杨铁鑫, 等. 生物炭对樱桃番茄果实品质及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4):101-104.
- [40] 刘学才, 陈玲, 李胜奇, 等. 施蚯蚓粪对日光温室土壤及番茄产量与品质的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2):549-556.
- [41] 郭晓雯, 向贵琴, 张发朝, 等. 生物炭和秸秆还田对咸水滴灌棉田土壤微生物群落特征及功能差异的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(6):3571-3583.
- [42] CHO S J, KIM M H, LEE Y O. Effect of pH on soil bacterial diversity[J]. Journal of Ecology and Environment, 2016, 40(1):10.
- [43] ZHANG S, HU W J, XU Y, et al. Linking bacterial and fungal assemblages to soil nutrient cycling within different aggregate sizes in agroecosystem[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13:1038536.

(责任编辑:陈海霞)