

不同用量有机肥和生物菌肥配施对设施番茄土壤性能和品质的影响

许泽华¹, 马 军¹, 李白云¹, 郭鑫年², 邢润东², 周 涛²

(1. 宁夏农林科学院园艺研究所 银川 750002; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所 银川 750002)

摘 要:开展不同施用量牛粪、蚯蚓粪、尾菜土壤施肥处理对设施番茄土壤改良试验,同时探究最优施用量有机肥与生物菌肥配施优化方案,筛选设施番茄生长效果好的试验处理。以土壤理化性质、土壤酶活性、番茄品质为评价指标,进行不同用量有机肥包括和生物菌肥与适量有机肥混合及 CK(不施肥)的试验。结果表明,不同施肥处理对土壤养分含量和果实品质均有显著提升作用。施用有机肥后,番茄品质和土壤改良施用量效果最佳的主要集中于中量或高量,其中牛粪中量改良效果最优;进一步通过最优的筛选牛粪中量与生物菌肥(枯草芽孢杆菌、哈茨木霉菌、解淀粉芽孢杆菌)配施结果表明,哈茨木霉菌消解牛粪的能力最强,显著增加了土壤养分含量,其中哈茨木霉菌与牛粪(中量)的混合施用增加土壤养分含量并显著提升设施番茄品质。相关性分析表明,不同用量有机肥和生物菌肥配施土壤养分与番茄品质存在显著和极显著相关。

关键词:番茄;有机肥;生物菌剂;土壤;品质

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)03-131-07

Effects of different amounts of organic fertilizer and biofungal fertilizer on soil properties and quality of tomato in facility

XU Zehua¹, MA Jun¹, LI Baiyun¹, GUO Xinnian², XING Rundong², ZHOU Tao²

(1. Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: A trial was conducted to explore the effects of different application amounts of cow dung, earthworm manure, and tail soil fertilization treatment on soil improvement in facility tomato. Additionally, the optimal application of organic fertilizer and biofungus fertilizer was investigated for the best grown results. Soil physical and chemical properties, soil enzyme activity, and tomato quality were used as evaluation indicators to compare different amounts of organic fertilizer, including a mixture of biofungus fertilizer and appropriate organic fertilizer as well as CK (no fertilizer). Based on the analysis of soil nutrient characteristics and tomato quality of each treatment fertilizer, the optimal fertilization treatment was selected. The results showed that different fertilization treatments significantly improved soil nutrients and fruit quality. After the application of organic fertilizer, the best effect of tomato quality and soil improvement mainly focused on the medium or high amount, with the best improvement effect of cow dung. Further optimization was carried out by combining the optimal amount of cow dung and biofungal fertilizers (*Bacillus subtilis*, *Bacillus hartsimmermontii*, *Bacillus amyloliquefaciens*). The results showed that *Bacillus hartsimmermontii* had the strongest ability to dissolve the cow dung, significantly increasing soil nutrients. The combination of *Bacterium hartsimmermontii* and medium amount cow dung significantly improved soil nutrient and notably enhanced the quality of facility tomato. Correlation analysis indicated that the combination of different amount of organic fertilizers and biofertilizers showed a significant and high significant correlation with soil nutrients and tomato quality.

Key words: Tomato; Organic fertilizer; Biofungicide; Soil; Quality

番茄是全球人类饮食中仅次于马铃薯的第二大蔬菜作物,具有非常高的营养和经济价值,是人们必不可少的食物^[1],也是宝贵的营养来源,例如是人体所

需的优质维生素 C 的来源^[2]。当前蔬菜系统的主要问题是生产力下降、环境退化和土壤质量退化等,因此,施用有机肥是一种可持续的蔬菜种植策略^[3]。

收稿日期:2024-08-04;修回日期:2024-12-06

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2021BBF2011);宁夏农林科学院对外交流项目(DW-X-2021001)

作者简介:许泽华,男,助理研究员,研究方向为土壤生态与植物营养研究。E-mail:1144100353@qq.com

通信作者:周 涛,男,研究员,研究方向为土壤生态与植物营养。E-mail:zhoutao6084609@163.com

土壤的生物成分对土壤条件变化的反应通常为化学和物理性质,土壤酶活性已被用作土壤肥力的指标,因为它们反映了对耕作、土壤特性和土壤改良的影响^[4]。然而,与单独施用有机肥相比,施用有机肥-生物菌肥复合肥似乎会产生更高的酶活性,因此土壤肥力更高,生产力更高^[5]。此外,与自然发酵相比,生物有机肥中加入生物菌剂,以增加肥料中的有益菌,从而提升土壤养分含量,例如土壤中的 N、P、K、有机质等的含量。在蔬菜集约化种植中,使用微生物菌剂和堆肥形成生物有机肥是一种双赢的方法,可以提高土壤改良效率、增加产量并减少养分损失^[6]。

在设施土壤中用有机肥改良时,会使连作障碍得到缓解。然而,尽管对单独的不同施肥效果进行了有意义的研究,但目前的配施和长期研究数据还不够^[7]。笔者以设施番茄土壤为例,研究了有机肥施用量以及生物菌肥混施对土壤营养、酶活性以及番茄品质的影响。同时,为其他领域土壤有机肥效率研究提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于 2022 年 9 月至 2023 年 11 月在宁夏回族自治区吴忠市孙家滩农业综合开发区内玻璃温室进行,跨度、开间和肩高分别 16、8、8 m。试验选用夏进牧业有限公司好氧发酵完成的奶牛粪,符合 NY 525—2012《有机肥料》质量标准。其基本理化性

质:有机质含量(w,后同)为 47.81%,全氮含量为 8.33 g·kg⁻¹,全磷含量为 5.14 g·kg⁻¹,全钾含量为 20.82 g·kg⁻¹,pH 值为 7.02,全盐含量为 16.76 g·kg⁻¹;腐熟的尾菜和蚯蚓粪来源于吴忠市绿谷源家庭农场,蚯蚓粪基本理化性质:有机质含量为 43%,全氮含量为 10.91 g·kg⁻¹,全磷含量为 3.75 g·kg⁻¹,全钾含量为 13.54 g·kg⁻¹,pH 值为 7.96,全盐含量为 3.75 g·kg⁻¹;尾菜基本理化性质:有机质含量为 77.42%,全氮含量为 4.03 g·kg⁻¹,全磷含量为 3.48 g·kg⁻¹,全钾含量为 6.00 g·kg⁻¹,pH 值为 7.14;哈茨木霉为济南鲁亚生物科技有限公司生产,有效成分 2×(10⁹~10¹⁰) 个·g⁻¹;解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)由宁夏农林科学院植物保护研究所提供;枯草芽孢杆菌为潍坊益昊生物技术有限公司生产,有效成分 10¹¹ 个·g⁻¹。

1.2 方法

采用小区试验方法,每个小区 54 m²,每个小区设置 3 个施肥处理和不施肥处理(CK),3 次重复。土壤处理后定植番茄。撒施腐熟牛粪、腐熟尾菜或蚯蚓粪深度为 5~10 cm,各处理施用量见表 1;然后通过土壤养分和果实品质对单一不同用量有机肥的施用效果进行比较分析,筛选出最佳施肥类型和用量(牛粪中量)并配施枯草芽孢杆菌菌剂、哈茨木酶菌剂、有效菌解淀粉芽孢杆菌剂生物肥进一步加强有机肥效果,各处理施用量见表 2。生长期温度维持在 22~32 ℃,相对湿度 50%左右。每个处理种植 2 行,宽窄行种植,垄宽 60 cm,垄沟宽 20 cm,株距 40 cm,行距 80 cm,每个小区定植 220 株,共 13 个处理。

表 1 各肥料处理施用量
Table 1 Application amount of each fertilizer treatment

肥料处理 Fertilizer treatment	667 m ² 施用量 Application amount per 667 m ²
CK	0
牛粪低量 Low volume of cattle manure	牛粪施用量 2 t Cattle manure application rate 2 t
牛粪中量 Portion of cattle manure	牛粪施用量 4 t Cattle manure application rate 4 t
牛粪高量 High volume of cow manure	牛粪施用量 6 t Cattle manure application rate 6 t
蚯蚓粪低量 Vermicompost low	蚯蚓粪施用量 2 t Vermicompost application rate 2 t
蚯蚓粪中量 Vermicompost medium	蚯蚓粪施用量 4 t Vermicompost application rate 4 t
蚯蚓粪高量 Vermicompost high	蚯蚓粪施用量 6 t Vermicompost application rate 6 t
尾菜低量 Tailgate low	尾菜施用量 2 t Taille application rate 2 t
尾菜中量 Tailgate medium	尾菜施用量 4 t Taille application rate 4 t
尾菜高量 Tailgrass high	尾菜施用量 6 t Taille application rate 6 t

表 2 中量牛粪处理配施生物菌肥施用量
Table 2 Medium volume cattle manure treatment with biofertilizer application rate

肥料处理 Fertilizer treatment	667 m ² 施用量 Application amount per 667 m ²
牛粪+枯草芽孢杆菌菌剂 Cow manure+Bacillus subtilis agent	牛粪 4 t+枯草芽孢杆菌 40 g·L ⁻¹ Cow dung 4 t + Bacillus subtilis 40 g·L ⁻¹
牛粪+哈茨木酶菌剂 Cow dung+Hatschek's wood enzyme bacteria	牛粪 4 t+哈茨木酶菌 40 g·L ⁻¹ Cow dung 4 t + Hatschek's wood enzyme bacteria 40 g·L ⁻¹
牛粪+有效菌解淀粉芽孢杆菌菌剂 Cow dung+Bacillus amyloliquefaciens agent	牛粪 4 t+有效菌解淀粉芽孢杆菌 40 g·L ⁻¹ Cow dung 4 t + effective bacteria Bacillus amyloliquefaciens 40 g·L ⁻¹

1.3 测定指标

1.3.1 土壤养分测定 参考李白云等^[8-9]方法测定土壤,每个处理在番茄收获期 0~30 cm 土壤进行养分测定,土壤铵态氮、硝态氮含量采用 SmartChem 全自动间断化学分析仪测定,土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定。土壤有机质含量用浓硫酸-重铬酸钾溶法测定。无机氮含量采用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 溶液浸提,用硝酸盐还原法和靛酚蓝比色法,用流动分析仪测定;全氮含量用半微量开氏法测定;有机磷含量用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{OAc}$ 溶液浸提,采用火焰光度法测定;pH 采用 pH 计测定;水溶性全盐总量用残渣烘干,以质量法测定。

1.3.2 果实品质测定 参考刘智斌等^[10]的方法测定果实品质,每个处理成熟时期分别采摘 20 枚果实进行营养品质的测定,采用蒽酮比色法测定可溶性

糖含量,采用 NaOH 滴定法测定可滴定酸含量,采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)含量,采用二氯甲烷的正己烷法测定番茄红素含量,采用 BCA 法测定可溶性蛋白的含量。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2013 软件对数据进行统计,采用 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行处理及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 有机肥处理对土壤理化指标的影响

如表 3 所示,不同施肥处理对土壤理化指标均有显著提升影响。牛粪处理中,相比于 CK,提升效果的施用量集中于中量和高量,即有机质含量显著提升 153.51%和 164.91%、水解氮含量显著提升 192.93%和 200.43%、有效磷含量显著提升 123.53%和 129.94%、速效钾含量显著提升 26.99%和

表 3 有机肥处理对土壤理化指标的影响

Table 3 Effects of organic fertilizer treatment on soil physicochemical indexes

处理 Treatment	施用量 Application amount	pH	w(有机质) Organic matter content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(水解氮) Alkaline N content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(有效磷) Rapid available P content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(速效钾) Rapid available K content/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
牛粪 Cow dung	CK	8.01±0.13 a	11.4±1.8 c	46.0±8.6 c	132.6±10.7 c	421.2±24.2 c
	低 Low	7.85±0.15 b	22.5±3.2 b	111.8±10.2 b	220.3±8.9 b	482.3±15.7 b
	中 Middle	7.71±0.14 b	28.9±1.2 a	134.7±11.4 a	296.4±12.3 a	534.9±16.8 a
	高 High	7.98±0.13 a	30.2±2.1 a	138.2±6.7 a	304.9±14.5 a	536.2±23.4 a
蚯蚓粪 Earthworm manure	CK	7.92±0.11 a	13.4±1.23 b	58.2±6.8 c	143.6±6.9 d	463.2±10.5 c
	低 Low	7.76±0.13 a	17.6±2.3 a	60.5±7.7 c	164.5±5.7 c	594.3±12.6 b
	中 Middle	7.72±0.15 a	17.6±1.8 a	69.0±3.8 b	182.1±10.5 b	625.4±11.9 a
	高 High	7.73±0.17 a	18.8±2.4 a	75.8±2.6 a	216.6±13.8 a	641.7±13.8 a
尾菜 Tailgate	CK	7.86±0.26 a	12.4±1.5 b	69.1±3.4 c	163.6±20.6 b	495.2±10.4 d
	低 Low	7.84±0.18 a	15.6±2.2 a	95.1±6.9 a	238.8±19.2 a	623.0±20.7 b
	中 Middle	7.73±0.19 a	15.9±1.6 a	72.9±8.4 c	220.5±15.7 a	564.9±10.5 c
	高 High	7.75±0.22 a	16.0±2.6 a	87.7±6.7 b	218.7±13.5 a	663.0±12.3 a

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

27.30%,中量 pH 显著降低 3.75%;蚯蚓粪处理中,相对于 CK,提升效果施用量集中于高量,即 pH 降低 2.40%,显著提升有机质含量 40.30%、水解氮含量 30.24%、有效磷含量 50.84%、速效钾含量 38.54%;尾菜处理中,施用量的影响主要体现在水解氮含量和速效钾含量指标,其他指标提升效果无显著差异,即低施用量显著提升水解氮含量 37.62%,高施用量显著提升速效钾含量 33.90%;综合来看,相比于 CK,牛粪中、高施用量对土壤理化指标提升效果最佳。

2.2 有机肥处理对土壤酶活性的影响

如表 4 所示,不同施肥处理对土壤酶活性均有显著提升。牛粪处理中,相比于 CK,提升效果施用量主要集中于中量,即显著提升蔗糖酶活性 73.17%、脲酶活性提升 84.9%、碱性磷酸酶活性提升 24.79%;蚯蚓粪处理中,相比与对照,提升效果施用量主要集中于中量,即显著提升蔗糖酶活性 16.28%、脲酶活性 42.6%、碱性磷酸酶活性 31.15%;尾菜处理中,中量对土壤蔗糖酶活性提升效果显著,即相比于 CK,显著提升蔗糖酶活性 32.56%。

表 4 有机肥处理对土壤酶活性的影响
Table 4 Effects of organic fertilizer treatment on soil enzyme activity (mg·g⁻¹)

有机肥 Organic fertilizer	处理 Treatment	蔗糖酶活性 Sucrase activity	脲酶活性 Urease activity	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity	过氧化氢酶活性 Hydrogen peroxidase activity
牛粪 Cow dung	CK	0.41±0.01 c	2.58±0.09 c	3.63±0.03 b	5.55±0.06 b
	低 Low	0.66±0.05 b	4.40±0.02 ab	4.30±0.16 a	7.47±0.09 a
	中 Middle	0.71±0.03 a	4.77±0.06 a	4.53±0.19 a	7.65±0.02 a
蚯蚓粪 Earthworm manure	高 High	0.64±0.04 b	4.03±0.05 b	4.42±0.12 a	7.21±0.22 a
	CK	0.43±0.02 b	2.57±0.04 c	3.82±0.04 d	6.55±0.06 a
	低 Low	0.45±0.03 b	3.49±0.05 ab	4.75±0.02 b	5.21±0.08 b
尾菜 Tailgate	中 Middle	0.50±0.04 a	3.68±0.06 a	5.01±0.03 a	6.73±0.09 a
	高 High	0.41±0.06 b	3.25±0.09 b	4.08±0.06 c	6.71±0.08 a
	CK	0.43±0.02 b	2.57±0.02 a	3.93±0.06 a	6.35±0.09 b
	低 Low	0.49±0.03 b	2.36±0.06 a	3.69±0.04 ab	6.65±0.05 ab
	中 Middle	0.57±0.04 a	2.54±0.03 a	3.86±0.05 a	6.95±0.02 a
	高 High	0.53±0.05 a	2.00±0.05 b	3.53±0.04 b	7.05±0.03 a

综合来看,相比于对照,牛粪中量施用量的提升效果最佳。

2.3 生物菌肥消解混合牛粪(中量)对土壤理化指标的影响

结合上述不同有机肥施用量对土壤改良效果的影响,牛粪中量对土壤养分提升效果最佳,考虑

到牛粪在土壤中的转化效果,引入生物菌肥消解牛粪以此提升牛粪有机肥在土壤改良效率。如表 5 所示,生物菌剂的混合施用对土壤理化性质均有显著提升效果,其中牛粪(中量)+哈茨木酶菌处理对土壤理化指标显著高于其他两个处理(除 pH 外),表明该处理对土壤养分含量提升效果最佳,即相比

表 5 生物菌肥混合牛粪(中量)对土壤理化性质影响特征
Table 5 Effects of biofertilizer mixed with cow dung (medium amount) on soil physicochemical properties

处理 Treatment	pH	w(有机质) Organic matter content/(mg·kg ⁻¹)	w(水解氮) Alkaline N content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Rapid available P content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Rapid available K content/(mg·kg ⁻¹)
CK	7.96±0.06 a	13.4±1.2 b	58.0±6.5 d	143.6±14.7 d	467.2±21.6 d
牛粪+枯草芽孢杆菌 Cow dung + <i>Bacillus subtilis</i>	7.89±0.09 a	24.3±2.2 a	69.3±2.5 c	184.7±12.8 c	592.5±40.2 c
牛粪+哈茨木酶菌 Cow dung + Hatschek's wood enzyme bacteria	7.74±0.08 a	27.0±1.6 a	208.1±12.8 a	359.5±24.6 a	702.1±30.5 a
牛粪+解淀粉芽孢杆菌 Cow dung + <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	7.81±0.05 a	25.6±1.9 a	184.4±14.6 b	224.0±15.7 b	632.9±26.8 b

于 CK,有机质含量显著提升 101.49%、水解氮含量显著提升 258.79%、有效磷含量显著提升 150.35%、速效钾含量显著提升 50.29%。

2.4 生物菌肥消解混合牛粪(中量)对土壤酶活性的影响

如表 6 所示,牛粪+哈茨木酶菌处理土壤酶活

表 6 生物菌肥混合牛粪(中量)对土壤酶活性的影响
Table 6 Effects of biofertilizer mixed with cow dung (medium amount) on soil enzyme activity (mg·g⁻¹·min⁻¹)

处理 Treatment	蔗糖酶活性 Sucrase activity	脲酶活性 Urease activity	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity	过氧化氢酶活性 Hydrogen peroxidase activity
CK	0.41±0.02 c	2.53±0.06 b	3.62±0.08 c	6.55±0.08 b
牛粪+枯草芽孢杆菌 Cow dung + <i>Bacillus subtilis</i>	0.69±0.05 a	2.10±0.08 c	3.40±0.03 c	6.07±0.09 b
牛粪+哈茨木酶菌 Cow dung + Hatschek's wood enzyme bacteria	0.64±0.06 a	5.95±0.09 a	5.14±0.09 a	7.42±0.06 a
牛粪+解淀粉芽孢杆菌 Cow dung + <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	0.56±0.08 b	1.83±0.07 d	4.00±0.04 b	7.69±0.05 a

性显著高于(牛粪+枯草芽孢杆菌处理的蔗糖酶活性处理除外)CK,分别显著提升蔗糖酶活性56.09%、脲酶活性提升135.18%、碱性磷酸酶活性41.99%、过氧化氢酶活性13.28%。

2.5 施肥对设施番茄品质的影响

2.5.1 有机肥施用量对设施番茄品质的影响 如表7所示,尾菜处理中,相比于CK,提升效果施用量主要集中于中量,即显著提升抗坏血酸含量10.98%、可溶性蛋白含量10.45%,总酸含量显著降

低10.84%;蚯蚓粪处理中,相比于CK,提升效果施用量主要集中于中量,即显著提升抗坏血酸含量10.92%、总糖含量11.11%、番茄红素含量16.32%、可溶性蛋白含量36.76%,总酸含量显著降低15.02%;牛粪处理中,不同施用量对设施番茄品质提升效果显著,主要集中于中、高量,即相比于CK,显著提升抗坏血酸含量13.71%和15.43%、总糖含量8.22%和9.59%、番茄红素含量13.78%和18.38%、可溶性蛋白含量42.03%和43.48%,总酸含

表7 有机肥施用量对设施番茄品质的影响
Table 7 Effects of organic fertilizer application amount on quality of facility tomato

有机肥 Organic fertilizer	处理 Treatment	w(抗坏血酸) Ascorbic acid content/ (mg·g ⁻¹)	w(总糖) Total sugar content/ (g·kg ⁻¹)	w(总酸) Total acid content/ (g·kg ⁻¹)	w(番茄红素) Lycopene content/ (mg·g ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/ %
牛粪 Cow dung	CK	175±1.5 c	73±1.6 b	4.06±0.7 a	37.0±2.4 b	0.69±0.2 c
	低 Low	183±2.1 b	74±1.5 b	3.85±0.5 b	39.7±2.6 ab	0.81±0.4 b
	中 Middle	199±2.8 a	79±1.2 a	3.67±0.2 b	42.1±2.7 a	0.98±0.3 a
	高 High	202±1.4 a	80±1.4 a	3.66±0.3 b	43.8±2.5 a	0.99±0.2 a
蚯蚓粪 Earthworm manure	CK	174±3.3 b	72±1.7 c	4.06±0.6 a	38.0±2.6 b	0.68±0.1 c
	低 Low	175±2.4 b	77±1.5 b	3.46±0.5 b	40.1±2.7 ab	0.82±0.2 b
	中 Middle	193±1.9 a	80±1.8 a	3.45±0.7 b	44.2±2.8 a	0.93±0.3 a
	高 High	191±2.2 a	79±1.3 a	3.36±0.5 b	44.1±2.7 a	0.87±0.2 b
尾菜 Tailgate	CK	173±2.6 c	70±2.2 c	4.06±0.2 a	36.0±2.7 a	0.67±0.2 b
	低 Low	181±1.8 b	79±2.4 a	3.97±0.3 b	30.6±3.2 b	0.68±0.3 b
	中 Middle	192±2.4 a	75±2.6 b	3.62±0.4 b	36.2±2.7 a	0.74±0.2 a
	高 High	173±1.6 c	77±1.8 ab	4.03±0.2 a	32.6±2.2 b	0.73±0.5 a

量则显著降低9.61%和9.85%。综合来看,相比于对照,牛粪中、高量施用量提升效果最佳。进一步验证了上述2.1和2.2的土壤养分结果,即牛粪中量施用量对土壤改良效果最佳,土壤养分含量提升稳定。

2.5.2 生物菌肥消解混合中量牛粪对设施番茄品质的影响 如表8所示,生物菌剂与牛粪(中量)的混合施用介导土壤养分显著提升设施番茄品质,提升效果主要为牛粪+哈茨木酶菌处理,即与CK相比,显著提升了抗坏血酸含量18.13%、总糖含量

12.86%、番茄红素含量28.92%、可溶性蛋白含量65.15%。进一步验证了上述2.3和2.4结果,即哈茨木酶菌处理对牛粪消解能力较高,对土壤改良效果最佳。

2.6 施肥与设施番茄品质相关性分析

2.6.1 不同有机肥施用量优化条件下土壤指标与番茄品质的相关性 如表9所示,抗坏血酸含量与有机质含量、有效磷含量呈极显著正相关,与水解氮含量、蔗糖酶活性、脲酶活性和过氧化氢酶活性呈显著正相关;总糖含量与有机质含量、有效磷含

表8 生物菌肥与中量牛粪混施对设施番茄品质的影响
Table 8 Effects of biofertilizer mixed with medium amount of cow dung on quality of facility tomato

处理 Treatment	w(抗坏血酸) Ascorbic acid content/(mg·g ⁻¹)	w(总糖) Total sugar content/(g·kg ⁻¹)	w(总酸) Total acid content/(g·kg ⁻¹)	w(番茄红素) Lycopene content/(mg·g ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/%
CK	171±10.4 c	70±5 c	4.06±0.02 a	37.0±5.2 b	0.66±0.02 c
牛粪+枯草芽孢杆菌 Cow dung + <i>Bacillus subtilis</i>	202±16.7 a	74±2 b	4.01±0.03 ab	45.7±3.6 a	1.03±0.06 ab
牛粪+哈茨木酶菌 Cow dung + Hatschek's wood enzyme bacteria	202±18.9 a	79±4 a	3.76±0.05 b	47.7±5.2 a	1.09±0.05 a
牛粪+解淀粉芽孢杆菌 Cow dung + <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	192±13.7 b	74±6 b	4.15±0.04 a	44.6±4.2 a	0.95±0.07 b

表 9 不同有机肥施用量条件下土壤指标与番茄品质的相关性

指标 Index	pH	有机质含量 Organic matter content	水解氮含量 Alkaline N content	有效磷含量 Rapid available P content	速效钾含量 Rapid available K content	蔗糖酶 活性 Sucrase activity	脲酶活性 Urease activity	碱性磷酸酶 活性 Alkaline phosphatase activity	过氧化氢酶 活性 Hydrogen peroxidase activity
抗坏血酸含量 Ascorbic acid content	-0.239	0.796**	0.666*	0.773**	0.196	0.638*	0.658*	0.516	0.601*
总糖含量 Total sugar content	-0.413	0.609*	0.504	0.659*	0.699*	0.359	0.397	0.472	0.307
总酸含量 Total acid content	0.580*	-0.438	-0.131	-0.291	-0.504	-0.141	-0.517	-0.731**	-0.036
番茄红素含量 Lycopene content	-0.128	0.581*	0.243	0.222	-0.028	0.224	0.758**	0.774**	0.153
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	-0.288	0.871**	0.641*	0.658*	0.248	0.593*	0.835**	0.776**	0.433

注:**表示极显著相关 ($p<0.01$);*表示显著相关 ($p<0.05$)。下同。
Note: ** indicates extremely significant correlation ($p<0.01$); * indicates significant correlation ($p<0.05$). The same below.

量和速效钾含量呈显著正相关;总酸含量与 pH 呈显著正相关,与碱性磷酸酶活性呈极显著负相关;番茄红素含量与有机质含量呈显著正相关,与脲酶活性和碱性磷酸酶活性呈极显著正相关;可溶性蛋白含量与水解氮含量、有效磷含量和蔗糖酶活性呈显著正相关,与有机质含量、脲酶活性和碱性磷酸酶活性呈极显著正相关。综上所述,整体

来看,有机质与番茄综合品质相关性最强。
2.6.2 生物菌肥与中量牛粪混施条件下土壤指标与番茄品质的相关性 如表 10 所示,抗坏血酸含量与蔗糖酶活性呈显著正相关;总糖含量与有效磷含量和速效钾含量呈显著正相关;总酸含量与脲酶活性呈显著负相关;番茄红素含量与有机质含量呈显著正相关;可溶性蛋白含量与有机质含量呈显著正相关。

表 10 生物菌肥与中量牛粪混施条件下土壤指标与设施番茄品质的相关性

指标 Index	pH	有机质含量 Organic matter content	水解氮含量 Alkaline N content	有效磷含量 Rapid available P content	速效钾含量 Rapid available K content	蔗糖酶 活性 Sucrase activity	脲酶 活性 Urease activity	碱性磷酸酶 活性 Alkaline phosphatase activity	过氧化氢酶 活性 Hydrogen peroxidase activity
抗坏血酸含量 Ascorbic acid content	-0.718	0.933	0.497	0.647	0.863	0.982*	0.362	0.395	0.130
总糖含量 Total sugar content	-0.937	0.856	0.794	0.961*	0.956*	0.728	0.779	0.839	0.476
总酸含量 Total acid content	0.572	-0.367	-0.400	-0.803	-0.559	-0.434	-0.955**	-0.778	-0.093
番茄红素含量 Lycopene content	-0.845	0.978*	0.666	0.762	0.948	0.921	0.448	0.543	0.328
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	-0.807	0.962*	0.610	0.737	0.924	0.946	0.441	0.508	0.256

3 讨论与结论

番茄果实抗坏血酸、可溶性蛋白、总糖、番茄红和可滴定酸含量是果实的主要品质特征,是其栽培和生产中的重要指标^[11]。Mufty 等^[12]对 Albion 和 Rubyfen 品种的草莓施用海藻肥料和腐殖酸,发现

两种草莓的产量都显著提高。与仅使用无机肥料的地块相比,在地块上施用堆肥显著增加了草莓叶面积、花数量、枝条数量和产量。此外,不同类型的有机肥料能够促进作物生长和提高作物产量,例如,随着田间鸡粪施用量的增加,蔬菜和玉米植株的生长参数显著增加^[13],羊粪有机肥显著提高玉米

产量,稻草和农家肥的施用有助于甘薯的生长和根系产量的增加^[14]。鸡粪处理增加了番茄的可溶性糖含量,改善了番茄收获时的营养品质和风味^[15]。同样,本试验结果表明,不同的有机肥施用增加了番茄果实中抗坏血酸、可溶性蛋白、总糖和番茄红素的含量,降低了总酸含量,这可能归因于营养有效性和植物对根际养分的吸收能力的提高。从数值上看,牛粪施用的土壤养分含量较高,这归因于牛粪有机肥中丰富的氮(N)、磷(P)、钾(K)含量,进一步验证了上述研究结果。

本试验解决的主要问题是不同类型有机肥结合施用量调整以及与生物菌肥的配施是否通过改变土壤性质和土壤酶活性来影响番茄生长品质。有人认为使用有机肥料(如有机废物和堆肥)不仅可以增加 SOM 含量、土壤养分的可用性和土壤结构的稳定性,还有助于维持土壤 pH 值的稳定性^[16]。从果实品质来看,施用有机肥可以提高番茄品质,因为适当增施有机肥,可以与有机质产生更好的协作效应,增加土壤有机碳和养分含量、微生物数量以及提高酶活性,促进植株生长和品质提升^[17]。本研究结果表明,不同有机改良剂均会对土壤有改良影响,同时合适的有机肥施用量更能显著提升土壤养分含量,从而促进番茄生长,这验证了以上观点。进一步研究表明,在适量的有机肥基础上与生物菌剂配施效果更佳。总的来说,中量有机肥更易促进土壤中养分的累积,少量施用对土壤养分含量提升不足,过量施用则会超出作物吸收阈值而导致土壤养分的富集减少,同时伴随着单独施用有机肥的自然发酵模式导致生物利用率较低^[18]。试验结果表明,过量牛粪、蚯蚓粪和尾菜处理对土壤养分和酶的富集及迁移起到了抑制作用,中量牛粪配施生菌肥(哈茨木酶菌)促进有机肥的消解,进一步提升土壤养分含量和有效土壤营养迁移效率。综上所述,适当的有机肥和生物菌肥配施能够使土壤中养分的生物有效性显著提升并大幅增强土壤中营养和酶的稳定性,从而提升番茄果实品质。

综上所述,在宁夏引黄灌区土壤比较贫瘠的环境下,牛粪结合哈茨木酶菌效果最好,显著促进了番茄生长,提高了土壤养分含量和酶活性;在适量有机肥还田中,土壤速效养分增加,土壤酶活性增强。因此,合理施用有机肥和生物菌肥配施可以成为保持土壤健康、提高作物品质的有效手段。

参考文献

- [1] MA Z J, ZHANG X K, BAI J Y, et al. Effects of different water and nitrogen on tomato growth and root zone soil environment under the facility condition[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(22): 59-63.
- [2] TSOUVALTZIS P, GKOUNTINA S, SIOMOS A S. Quality traits and nutritional components of cherry tomato in relation to the harvesting period, storage duration and fruit position in the truss[J]. Plants, 2023, 12(2): 315.
- [3] 王光娟. 我国设施番茄产业种植效益分析[J]. 北方园艺, 2021(16): 155-161.
- [4] 张红娟, 陈梦华, 何珊珊, 等. 有机肥配施生物炭对设施番茄产量、品质及土壤养分和重金属累积的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(12): 1978-1986.
- [5] ALKORTA I, AIZPURUA A, RIGA P, et al. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health[J]. Reviews on Environmental Health, 2003, 18(1): 65-73.
- [6] LANG Y Q, MA Y, WANG G L, et al. Optimized fertilization shifted soil microbial properties and improved vegetable growth in facility soils with obstacles[J]. Horticulturae, 2023, 9(12): 1303.
- [7] 刘亚军, 逯昀, 王文静, 等. 有机肥与土壤调理剂对连作甘薯生长发育及土壤肥力的影响[J]. 作物杂志, 2024(3): 168-174.
- [8] 李百云, 许泽华, 郭鑫年, 等. 不同土壤改良措施对富士苹果生长、果实品质和土壤肥力的影响[J]. 中国果树, 2023(2): 5-10.
- [9] 李百云, 许泽华, 郭鑫年, 等. 宁夏不同生态类型区土壤养分状况比较分析[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(5): 434-440.
- [10] 刘智斌, 薛晓蓉, 郭志奋, 等. 硝态氮对设施番茄产量与品质的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(7): 1375-1384.
- [11] 李文龙, 林晨雪, 张娟. 不同颜色地膜对设施番茄生长发育和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2024(15): 40-45.
- [12] MUFTY R K, TAHA S M. Response two strawberry cultivars (*Fragaria × ananassa* Duch.) for foliar application of two organic fertilizers[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 910: 012033.
- [13] 蒋强, 刘子凡, 王燕武, 等. 生物有机肥替代化肥对樱桃番茄产量、品质及土壤理化性质的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(10): 71-77.
- [14] 杜宏辉, 贾学刚, 杨涛. 化肥减量及配施生物有机肥对马铃薯产量、矿质元素含量及土壤肥力的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(9): 66-74.
- [15] 胡静姝, 周新萍. 生物炭和鸡粪改良剂对铅胁迫下番茄生理生化、铅吸收及土壤性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(9): 181-188.
- [16] ASSEFA S, TADESSE S. The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity-a review[J]. Agricultural Research and Technology: Open Access Journal, 2019, 22(2): 556192.
- [17] GAO F C, LI H J, MU X G, et al. Effects of organic fertilizer application on tomato yield and quality: A meta-analysis[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2184.
- [18] HASAN M R, SOLAIMAN A H M. Efficacy of organic and organic fertilizer on the growth of *Brassica oleracea* L. (Cabbage) [J]. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 2012, 4(3): 128-138.