

不同种植模式下有机无机肥配施对 设施番茄生长和品质的影响

马建梅¹, 肖自斌¹, 蒋学勤¹, 刘世伟¹, 杨惠¹, 张文文², 王继涛¹

(1. 宁夏回族自治区园艺技术推广站 银川 750002; 2. 惠农区农业技术推广服务中心 宁夏石嘴山 753600)

摘要: 为研究不同种植模式下不同生物有机肥配施矿物质肥对番茄生产的增效作用, 采用设施大棚田间试验, 比较了不同种植模式下不同生物有机肥配施矿物质肥对番茄生长、品质、产量及土壤肥力的影响。结果表明, 与 CK 相比, T4(240 cm 垄距, 蚯蚓粪配施矿物质肥)提高了土壤全磷、速效钾及有机质含量, 降低了土壤 pH 值和土壤重金属镉、铬、镍及铅含量。与常规种植(CK)和其他各处理相比, T4 番茄叶片气孔导度和叶片蒸腾速率显著提高, 叶片净光合速率和叶片胞间 CO₂ 浓度均显著高于 CK、T1、T2、T3, 与 T5、T6 相比无显著差异。番茄品质和产量均有提高, 其中番茄总糖、可溶性固形物含量及糖酸比均显著增高, T4 维生素 C 含量与 T2 无显著差异, 显著高于其他处理。综上所述, T4(240 cm 垄距, 蚯蚓粪配施矿物质肥)是实现设施番茄增产提质、培肥土壤的最佳施肥处理。

关键词: 设施番茄; 有机堆肥; 蚯蚓粪; 矿物质肥; 有机无机配施

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)07-144-07

Effects of organic-inorganic fertilizer application on the growth and quality of greenhouse tomato under different planting patterns

MA Jianmei¹, XIAO Zibin¹, JIANG Xueqin¹, LIU Shiwei¹, YANG Hui¹, ZHANG Wenwen², WANG Jitao¹

(1. Ningxia Horticultural Techniques Extension Station, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Huinong District Agricultural Technology Extension Service Center, Shizuishan 753600, Ningxia, China)

Abstract: In order to investigate the synergistic of different bio-organic fertilizers combined with mineral fertilizers on tomato production under different planting patterns, a greenhouse field experiment was conducted to compare the effects of different bio-organic fertilizers combined with mineral fertilizers on tomato growth, quality, yield, and soil fertility under different planting patterns. The results showed that compared with CK, T4 (240 cm ridge spacing, vermicompost organic fertilizer combined with mineral fertilizer) increased the content of total phosphorus, available potassium and organic matter in soil, while decreased the soil pH and the content of heavy metals cadmium, chromium, nickel and lead. Compared with conventional planting (CK) and other treatments, the stomatal conductance and leaf transpiration rate of T4 tomato leaves were significantly increased. The net photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration of leaves were significantly higher than those of CK, T1, T2 and T3, but there was no significant difference compared with T5 and T6. The quality and yield of tomato have both improved, with a significant increase in total sugar content, soluble solids content and sugar-acid ratio. There was no significant difference in vitamin C content between T4 and T2, but it was significantly higher than other treatments. Based on comprehensive analysis, T4 (240 cm ridge spacing, vermicompost organic fertilizer combined with mineral fertilizer) is the best fertilizer treatment to achieve increased yield and quality, as well as improved soil quality of greenhouse tomato.

Key words: Greenhouse tomato; Organic compost; Vermicompost; Mineral fertilizer; Combined application of organic and inorganic fertilizer

收稿日期: 2024-10-25; 修回日期: 2025-02-16

基金项目: 2024 年宁夏回族自治区青年科技托举人才培养项目

作者简介: 马建梅, 女, 农艺师, 研究方向为资源利用与植物保护。E-mail: majianmei_41@163.com

通信作者: 王继涛, 男, 高级农艺师, 研究方向为蔬菜栽培生理生态。E-mail: 87438659@qq.com

番茄是我国设施蔬菜栽培的主要作物之一,其栽培面积和产量均位居前列。统计数据显示,全国设施蔬菜种植面积已突破 266.7 万 hm^2 ,截至 2023 年,每 667 m^2 番茄产量达 5 098.82 $\text{kg}^{[1]}$ 。番茄不仅味道鲜美,而且营养价值高,含有多人体所需营养成分^[2]。随着生活水平的不断提高,人们对健康的关注也与日俱增,高品质番茄越来越受欢迎^[3]。种植模式是影响番茄生长发育的主要因素之一,合理的种植模式能有效提质增产。传统日光温室番茄生产多采用双行种植,垄距窄小,种植密度高,导致植株采光不好,而光照是决定植株光合作用的重要因素,作物长势、产量和品质是光合作用强弱的直接体现^[4]。

在现代农业可持续发展中,优化肥料类型是减少或消除单一肥料投入的有效方式^[5]。有机堆肥是将农业有机废弃物通过堆肥处理,将其中的可腐物转化为土壤营养物质,其可作为土壤调节改良剂,提高土壤肥力,促进作物对营养物质的吸收利用^[6-7]。大量研究表明,施用有机堆肥后可增加土壤中有机质和速效磷等养分含量,提高作物产量^[8-9]。

蚯蚓粪是利用蚯蚓和微生物分解有机物质而产生的一种腐熟有机肥料,具有通气性强、排水性好、吸附力强等特点^[10]。与常规有机肥相比,蚯蚓粪具有疏松、多孔的团粒结构,富含多种有益微生物、腐植质及植物生长调节物质^[11],能够提高土壤通气性和排水性,促进有益微生物繁殖,加快土壤中氮、磷、钾等营养物质转化,从而提高作物对养分的吸收利用率^[12-13]。杨凯等^[14]研究表明,配施 20%~50% 蚯蚓粪对白菜和西蓝花生产具有较好的提质增产效果。吴珏等^[15]研究表明,与普通商品有机肥相比,施用蚯蚓粪的番茄产量和品质明显改善。

植物生长不仅依赖大量元素,也需要中、微量元素,缺乏中、微量元素同样影响产量和品质^[16]。而矿物质肥也称无机肥,其富含钾、钙、镁等作物生长所需的营养元素,能够改良土壤,提高土壤保水保肥及植物抗病菌能力^[17]。据史海莉等^[18]报道,喷施矿物质肥对葡萄果实品质有显著改良效果。刘自飞等^[19]研究表明,施用矿物质肥对芹菜和生菜均有增产效果。目前来看,有机、无机肥合理配施及大行距单行种植模式对设施番茄生产的影响研究仍鲜有报道。因此,笔者以区域特色有机肥和矿物质肥为材料,研究不同种植模式下不同有机肥配施矿物质肥对番茄生长、品质、产量及土壤肥力的影响,以选出最佳施肥和种植模式,为该地区设施番茄提质增产和土壤培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2024 年 4—7 月在宁夏回族自治区银川市贺兰县金贵镇金贵村日光温室(温室是三代主动蓄热日光温室,坐北朝南,东西方向延长,长 63 m,跨度 10 m,脊高 5.3 m,后墙高 3.6 m,采用 PO 膜 12 丝覆盖)内进行。供试土壤类型为砂壤土,耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质:pH 值 8.34,全氮含量(w ,下同)1.69 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 29.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 230.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 221.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 677 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试蚯蚓粪[pH 值 6.0~8.0;(N+P₂O₅+K₂O)含量 $\geq 2\%$;水分含量 $\leq 30\%$;有机质含量 20%~22%;有益微生物含量 ≥ 0.2 亿 $\cdot \text{g}^{-1}$]来自宁夏万辉生物环保科技有限公司,有机堆肥[pH 值 5.5~8.5;(N+P₂O₅+K₂O)含量 $\geq 4\%$;水分含量 $\leq 30\%$;有机质含量 40%;有益微生物含量 ≥ 0.2 亿 $\cdot \text{g}^{-1}$]和矿物质肥料(碳酸钙镁、硅钛肥、硫酸亚铁、硼砂)来自中卫市丰源生物肥有限公司。

供试番茄品种为伊亚,杂交种,鲜食品种,中熟粉果,无限生长类型。种子购自海泽拉农业技术服务(北京)有限公司。

试验共设计 7 个处理,每个处理设 5 次重复,共 35 垄,各处理随机排列,T1~T6 单行种植,垄高 25 cm,株距 20 cm。T1、T2、T3 均采用有机堆肥+矿物质肥,肥料用量:有机堆肥 22 500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,矿物质肥(碳酸钙镁 750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硅钛肥 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硫酸亚铁 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硼砂 15 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其中:T1 垄距 150 cm,垄面宽 40 cm,垄沟宽 110 cm;T2 垄距 200 cm,垄面宽 40 cm,垄沟宽 160 cm;T3 垄距 240 cm,垄面宽 40 cm,垄沟宽 200 cm。

T4、T5、T6 均采用蚯蚓粪+矿物质肥种植,肥料用量:蚯蚓粪 $1.2 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,矿物质肥(碳酸钙镁 750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硅钛肥 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硫酸亚铁 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硼砂 15 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其中:T4 垄距 240 cm,垄面宽 40 cm,垄沟宽 200 cm;T5 垄距 200 cm,垄面宽 40 cm,垄沟宽 160 cm;T6 垄距 150 cm,垄面宽 40 cm,垄沟宽 110 cm。

常规种植为对照(CK),垄距 150 cm,垄面宽 80 cm,垄沟宽 70 cm,垄高 25 cm,双行定植,株距 25 cm,垄上行距 40 cm。底肥为有机肥、复合肥、磷酸二铵。

1.2 植物样品分析

1.2.1 生长势观测 番茄营养生长期,定株测定 3

次,分别为定植后(2024 年 4 月 7 日),第一穗花开放时(2024 年 4 月 25 日),第三穗花开放 50% 时(2024 年 5 月 9 日),每个处理定株 9 株。采用标尺测株高,游标卡尺测茎粗,叶绿素仪测定叶绿素相对含量,GFS-3000 光合仪测定叶片光合指标。

1.2.2 果实品质测定 采集番茄第 3 穗果,分别测定番茄品质指标,采用液相色谱仪测定维生素 C 含量(GB 5009.86—2016),采用阿贝折光仪测定总酸(GB 12456—2021 第一滴定法)、总糖(GB 5009.8—2016 第二滴定法)、可溶性糖(NY/T 1278—2007)和可溶性固形物含量(NY/T 2637—2014),糖酸比=可溶性固形物含量/总酸含量。

1.2.3 产量测定 收获期(2024 年 6 月 10 日)从第 1 穗果到第 5 穗果,每次采摘时定株记产量,记录番茄产量,其中,小区产量=定植株数×单株坐果数×平均单果质量;每 hm² 产量根据小区产量折算。

1.3 土壤样品分析

在收获期,按照不同处理采用五点法取地表 0~20 cm 土壤样品,将五点取的土样均匀混合,去掉杂草和石子等杂质,自然晾干后将土壤放到干净的密封袋中,约 500 g,袋子密封好后贴上标签待测。

测定指标及方法:采用 LRH-150F 生化培养箱(碱解扩散法)测定水解氮含量,采用 L6 物联智能 L 系列紫外分光光度计(碳酸氢钠浸提,紫外分光光度计法)测定有效磷含量,采用 M410 火焰光度计(乙酸铵浸提-火焰光度法)测定速效钾含量,采用 HGK-50 凯氏定氮仪(硫酸-加速剂消解 凯氏蒸馏法)测定全氮含量,采用 L6 物联智能 L 系列紫外分光光度计(氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法)测定全磷含量,采用 M410 火焰光度计(碱熔-火焰光度法)测

定全钾含量,采用 DDS-307A 电导率仪测定全盐含量,采用 PHS-3CpH 计(玻璃电极法)测定 pH 值,采用 ET-ZL1 油浴锅(油浴加热重铬酸钾氧化-重量法)测定有机质含量,采用 AFS-8220 原子荧光光度计(湿消解法)测定重金属砷和汞含量,采用 AA-6880F/AAC 原子吸收分光光度计(湿消解法)测定重金属镉、铅、铬含量。

1.4 数据处理与分析

数据计算采用 Microsoft Excel 2019;数据分析采用 SPSS 20.0 统计软件,差异显著性分析采用 LSD 和 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对土壤理化性质的影响

由表 1 可知,T1、T3、T4、T5、T6 处理土壤全氮含量均显著高于 CK,分别较 CK 提高了 13.33%、13.33%、13.33%、13.33%、6.67%;T1~T6 处理全磷含量分别较 CK 显著提高了 18.18%、9.09%、18.18%、18.18%、18.18%、18.18%;T1、T2、T6 全钾含量与 CK 相比无显著差异,T3、T4、T5 较 CK 显著降低了 9.32%、7.32%、7.82%;T4 碱解氮含量最高,分别较 CK、T1、T2 显著提高了 11.40%、28.73%、27.65%,T4 与 T3、T5、T6 相比无显著差异;T1 有效磷含量最高,较 CK 显著提高了 6.72%,T3、T4、T5 分别较 CK 显著降低了 14.52%、7.44%、8.19%;速效钾和有机质含量 T4 均最高,其中,速效钾含量 T4 较 CK、T1、T2、T3 分别显著提高了 83.28%、45.61%、48.97%、40.79%;有机质含量 T4 较 CK、T1、T2、T3、T6 分别显著提高了 52.23%、19.62%、46.01%、21.34%、9.62%;pH 值 T4 最小,较 CK 显著降低了

表 1 不同处理对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatments on physical and chemical properties of soil

处理 Treatment	w(全氮) Total nitrogen content/%	w(全磷) Total phosphorus content/%	w(全钾) Total potassium content/ (g·kg ⁻¹)	w(碱解氮) Alkali-hydrolyzed nitrogen content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Rapidly available potassium content/ (mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	pH	电导率 Electric conductivity/ (mS·m ⁻¹)
T1	0.169 ab	0.126 b	19.07 ab	109.73 c	70.33 a	399.00 b	26.00 c	9.03 ab	32.13 bcd
T2	0.148 d	0.116 c	19.77 a	123.47 b	69.57 ab	390.00 b	21.30 d	8.80 b	35.37 bc
T3	0.166 b	0.131 a	18.20 b	151.20 a	56.33 d	412.67 b	25.63 c	8.77 b	30.33 bcd
T4	0.173 a	0.131 a	18.60 b	157.07 a	61.00 c	581.00 a	31.10 a	8.73 b	27.03 cd
T5	0.174 a	0.130 a	18.50 b	156.23 a	60.50 c	554.67 a	30.03 ab	8.97 ab	42.30 ab
T6	0.158 c	0.127 a	19.90 a	153.50 a	69.30 ab	551.33 a	28.37 b	8.77 b	49.07 a
CK	0.151 d	0.112 d	20.07 a	109.40 c	65.90 b	317.00 c	20.43 d	9.20 a	21.37 d

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

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

5.11%,与其他各处理相比无显著差异;电导率 T2、T5、T6 较 CK 分别显著提高了 65.51%、97.94%、129.62%。综上所述,T4、T5 土壤理化性质较好,土壤营养丰富,更有助于番茄植株生长。

2.2 不同种植模式对土壤重金属含量的影响

由表 2 可知,T4 土壤重金属镉、铬、镍、铅含量最低,其中,镉含量 T4 较 CK、T1、T2、T3 分别显著降低了 14.29%、7.69%、20.0%、7.69%,T4 与 T5、T6 无显著差异;铬含量 T4 较 CK、T1、T2、T3、T5、T6 分别显著降低了 25.82%、25.41%、28.19%、30.77%、

22.41%、25.41%;镍含量 T4 较 CK、T1、T2、T3 分别显著降低了 11.62%、12.16%、12.27%、12.27%,T4 与 T5、T6 相比无显著差异;铅含量 T4 较 CK、T6 分别显著降低了 6.43%、6.89%,T4 与 T1、T2、T3、T5 相比无显著差异;汞含量 T5 最低,T5 较 CK、T3 分别显著降低了 19.92%、12.30%,T5 与 T1、T2、T4、T6 相比无显著差异;砷含量 T4 最低,但与其他处理间无显著差异。综上所述,T4 土壤重金属含量较低,更有利于番茄植株生长和品质提升。

2.3 不同种植模式对番茄叶片光合特性的影响

表 2 不同处理对土壤重金属含量的影响

Table 2 Effects of different treatments on heavy metal content in soil						(mg·kg ⁻¹)
处理 Treatment	w(镉) Cadmium content	w(铬) Chromium content	w(汞) Mercury content	w(镍) Nickel content	w(铅) Plumbum content	w(砷) Arsenic content
T1	0.132 b	60.333 a	0.159 bc	27.133 a	20.133 ab	10.933 a
T2	0.138 ab	62.667 a	0.164 bc	27.167 a	20.167 ab	11.167 a
T3	0.132 b	62.000 a	0.165 b	27.167 a	20.033 ab	11.100 a
T4	0.120 c	45.000 c	0.161 bc	23.833 b	18.933 b	10.633 a
T5	0.122 c	48.000 b	0.158 c	24.067 b	20.067 ab	11.200 a
T6	0.123 c	50.333 b	0.161 bc	24.067 b	20.333 a	10.667 a
CK	0.142 a	60.667 a	0.181 a	26.967 a	20.233 a	11.033 a

由表 3 可知,番茄叶片净光合速率 T4 显著高于 CK、T1、T2、T3,分别显著提高了 59.13%、22.13%、23.94%、39.74%,T4 与 T5、T6 相比无显著差异;叶片气孔导度 T4 显著高于 CK 和其他处理,分别较 CK、T1、T2、T3、T5、T6 显著提高了 44.23%、78.26%、73.41%、44.23%、20.84%、40.36%;叶片胞间 CO₂ 浓度 T4 显著高于 CK、T1、T2、T3,分别显著提高了 84.12%、61.75%、68.36%、51.99%,T4 与 T5、T6 无显著差异;叶片蒸腾速率 T4 显著高于 CK 和其他处理,分别较 CK、T1、T2、T3、T5、T6 显著提高了 78.38%、60.98%、60.98%、40.43%、22.22%、

37.50%。由此可见,T4 处理更有助于促进番茄叶片光合吸收。

2.4 不同种植模式对番茄植株生长势的影响

由表 4 可知,番茄株高在定植期和始花期均为 T6 最高,T3 次之,其中,定植期株高 T3、T6 分别较 CK 显著提高了 17.29%、17.76%,其他各处理与 CK 相比无显著差异,其他各处理间也无显著差异;始花期株高 T3、T6 分别较 CK 显著提高了 13.49%、18.00%,T4、T5 分别较 CK 显著提高了 10.34%、12.89%。第三穗花开放 50%时,T3 株高最高,较 CK、T1、T2 分别显著提高了 6.02%、7.69%、6.48%。番茄茎粗 3 个时期各处理与 CK 相比均无显著差异,各处理间相比也均无显著差异。叶绿素相对含量定植期和第 3 穗花开放 50%时,各处理与 CK 相比均无显著差异,各处理间相比均无显著差异,始花期 T2 叶绿素相对含量最高,分别较 CK 和 T4 显著提高了 19.04%、16.64%。

2.5 不同种植模式对番茄品质的影响

由表 5 可知,番茄总糖含量各处理均高于 CK,其中 T4 最高,T4 较 CK、T1、T2、T3、T5、T6 分别显著提高了 48.27%、38.23%、27.02%、27.02%、6.09%、25.33%;可溶性固形物含量 T6 与 CK 无显著差异,其他处理均显著高于 CK,T4 最高,分别较 CK、T1、

表 3 不同处理对番茄叶片光合特性的影响
Table 3 Effects of different treatments on photosynthetic characteristics of tomato leaves

处理 Treatment	净光合速率 P _n / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 G _s / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间 CO ₂ 浓度 C _i / (μL·L ⁻¹)	蒸腾速率 T _r / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
T1	17.40 bc	0.36 d	495.01 c	0.004 1 d
T2	17.15 bc	0.37 d	475.57 c	0.004 1 d
T3	15.21 cd	0.44 c	526.79 b	0.004 7 c
T4	21.25 a	0.64 a	800.67 a	0.006 6 a
T5	19.38 ab	0.53 b	794.39 a	0.005 4 b
T6	18.73 ab	0.45 c	785.28 a	0.004 8 c
CK	13.35 d	0.44 c	434.87 d	0.003 7 d

表 4 不同处理对番茄植株生长势的影响
Table 4 Effects of different treatments on the growth potential of tomato plants

处理 Treatment	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/mm			叶绿素相对含量 SPAD		
	定植期 Planting date	始花期 First- flowering date	第三穗花开放 50% 50% of the third spike flower bloom	定植期 Planting date	始花期 First- flowering date	第三穗花开放 50% 50% of the third spike flower bloom	定植期 Planting date	始花期 First- flowering date	第三穗花开放 50% 50% of the third spike flower bloom
T1	22.70 ab	68.70 cd	114.50 c	5.74 a	11.00 a	11.80 a	47.41 a	35.71 abc	32.45 a
T2	23.20 ab	71.50 bcd	115.80 bc	5.67 a	10.43 a	11.85 a	42.47 a	38.20 a	31.63 a
T3	25.10 a	75.70 ab	123.30 a	6.63 a	10.88 a	11.07 a	41.01 a	34.89 abc	35.57 a
T4	23.40 ab	73.60 abc	120.80 ab	6.38 a	10.90 a	11.19 a	44.66 a	32.75 bc	35.37 a
T5	24.20 ab	75.30 ab	118.60 abc	6.39 a	10.51 a	11.04 a	45.53 a	36.50 abc	36.54 a
T6	25.20 a	78.70 a	122.90 a	6.06 a	10.20 a	11.00 a	44.71 a	36.90 ab	37.24 a
CK	21.40 b	66.70 d	116.30 bc	5.67 a	10.54 a	11.84 a	43.17 a	32.09 c	32.92 a

表 5 不同处理对番茄品质的影响
Table 5 Effects of different treatments on tomato quality

处理 Treatment	w(总糖) Total sugar content/ (g·100 g ⁻¹)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	糖酸比 Sugar acids ratio	w(总酸) Organic acids content/ (g·kg ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)
T1	2.27 d	4.84 c	1.16 b	0.97 c	4.99 c	7.78 e
T2	2.47 c	4.88 c	1.15 b	0.98 c	5.00 c	9.86 a
T3	2.47 c	4.84 c	1.23 a	0.93 d	5.22 a	9.14 c
T4	3.13 a	5.43 a	1.01 c	1.06 a	5.13 b	9.95 a
T5	2.95 b	5.00 b	1.12 b	1.00 b	5.00 c	9.68 b
T6	2.50 c	4.54 d	1.00 c	0.89 e	5.13 b	8.56 d
CK	2.11 d	4.52 d	0.89 d	0.89 e	5.08 b	7.81 e

T2、T3、T5、T6 显著提高了 20.113%、12.19%、11.27%、12.19%、8.60%、19.52%；可溶性糖含量各处理均显著高于 CK，其中 T3 最高，分别较 CK、T1、T2、T4、T5、T6 显著提高了 38.57%、6.02%、6.94%、22.51%、9.79%、22.92%；糖酸比各处理(除 T6 外)均显著高于 CK，其中，T4 分别较 CK、T1、T2、T3、T5、T6 显著提高了 19.17%、8.94%、8.19%、14.03%、5.67%、19.17%，T6 与 CK 相比无显著差异；总酸含量 T3 最高，分别较 CK、T1、T2、T4、T5、T6 显著提

高了 2.82%、4.68%、4.47%、1.75%、4.53%、1.75%，T4、T6 与 CK 之间均无显著差异；维生素 C 含量 T4 最高，分别较 CK、T1、T3、T5、T6 显著提高了 27.40%、27.89%、8.86%、2.82%、16.28%，T2 与 T4 无显著差异，T1 与 CK 无显著差异。由此可见，T4 有利于提高番茄品质。

2.6 不同种植模式对番茄产量的影响

由图 1 可知，T4 番茄果实平均单果质量和总产量均最高。其中，平均单果质量显著高于 CK 和其

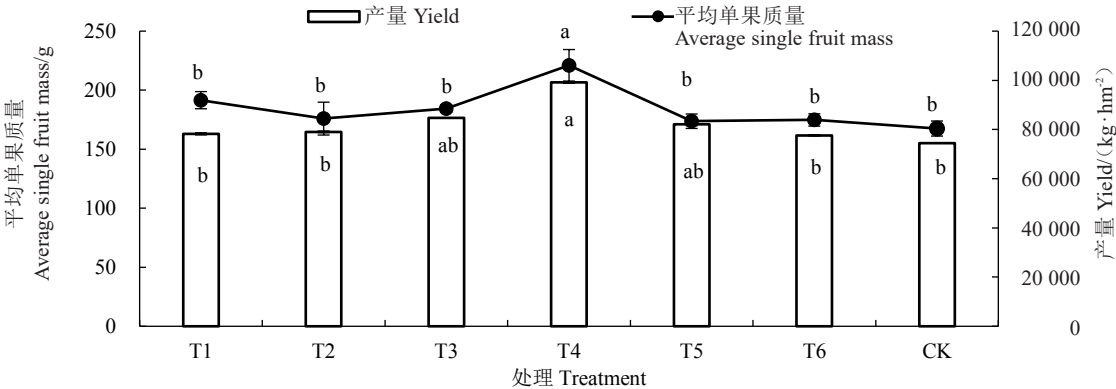


图 1 不同处理对番茄产量的影响
Fig. 1 Effects of different treatment on tomato yield

他处理,分别较 CK、T1、T2、T3、T5、T6 显著提高了 31.97%、15.41%、25.66%、19.86%、27.26%、26.48%;总产量分别较 CK、T1、T2、T6 显著提高了 24.88%、21.11%、20.28%、21.73%,T3、T5 与 T4 之间均无显著差异。由此可见,T4 更有利于提高番茄产量。

3 讨论与结论

3.1 大行距栽培能提质增产

行距和株距决定栽培密度,栽培密度是决定设施蔬菜栽培产量高低的重要因素。在本研究中,240 cm 垄距、单行种植模式有效促进了番茄提质增产。这可能与栽培定植密度降低、光照面积增大、增强光合作用、提高光照利用率有关^[20]。有研究表明,栽培密度过高会降低植株光合效率,而番茄品质受栽培密度影响较大,随着栽培株数增加,番茄果实中可溶性固形物、番茄红素及维生素 C 含量受到负面影响,其中维生素 C 含量下降最为明显^[21]。而在本研究中,T4 番茄果实总糖含量、可溶性固形物含量、糖酸比均显著高于 CK 和各处理。

3.2 蚯蚓粪配施矿物质肥能改善土壤质量

前人研究表明,施用蚯蚓粪可改善土壤质量^[22]。在碱性土壤中施用蚯蚓粪后土壤 pH 值较 CK 显著降低了 5.34%,这可能与蚯蚓粪具有较大的酸碱缓冲容量有关。施用蚯蚓粪后土壤有机质含量 T4 较 CK、T1、T2、T3、T6 分别显著提高了 52.23%、19.62%、46.01%、21.34%、9.62%,这与 Cui 等^[23]试验结果基本一致。有研究表明,蚯蚓粪养分全面并富含腐植酸,施入后不仅增加土壤有机质含量,而且能促进矿物分解和养分释放,增加土壤氮、磷、钾等养分含量^[24-26]。T4 速效钾含量较 CK、T1、T2、T3 分别显著提高了 83.28%、45.61%、48.97%、40.79%,这与赵成雷等^[27]的研究成果基本一致。可能与蚯蚓粪中含有大量钾元素有关。同时,这可能也与配施矿物质肥有关,矿物质肥富含钾、钙、镁等植物生长所需的营养元素,能够改善土壤质量^[17],但碱解氮、有效磷含量各处理差异并不明显,这可能另有他因,还需进一步探究。综合来看,蚯蚓粪配施矿物质肥缓解了土壤碱化,增加了土壤有机质含量,提高了土壤养分含量。

蚯蚓粪配施矿物质肥以 T4 土壤重金属镉、铬、镍及铅含量均最低,这可能是由于蚯蚓粪具有较强的吸附能力,可以增加土壤透气性并增强土壤保水能力,从而吸附土壤中的重金属^[28]。且蚯蚓粪中含

有大量养分及植物生长调节物质,有助于调节微生物群落结构^[13],重金属在微生物群落作用下被土壤中有有机、无机胶体富集和沉淀,从而降低土壤重金属含量^[29]。

3.3 蚯蚓粪配施矿物质肥能增产提质

施用蚯蚓粪可明显提高番茄叶片光合参数值,以 T4 效果最明显,可能是由于蚯蚓粪施入土壤后,促进了土壤氮素的增加,进而使得叶片光合参数值升高,这与张彭良等^[30]研究结果相一致。在本研究中,产量以 T4 效果最好,说明蚯蚓粪配施矿物质肥有良好的增产作用,这与赵成雷等^[27]的研究结果基本一致。一方面可能是因为蚯蚓粪中含有大量养分及植物生长调节物质,可通过增加微生物数量和增强活性来改善根际土壤微生物环境和调节植株生理状态,促进植株生长和干物质积累^[13];另一方面可能是由于蚯蚓粪可增加番茄果实、叶片和根系中氮、磷、钾的累积量,降低叶片和根系中脯氨酸和可溶性蛋白含量,提高番茄光合能力并促进更多碳水化合物从叶片向果实转运^[31]。同时,也与刘自飞等^[19]的研究结果一致,其研究表明,施用矿物质肥的芹菜和生菜均有增产效果。原因可能是矿物质肥富含农作物生长所需的营养元素,能够改良土壤,提高土壤保水保肥能力及植物的抗病能力^[17],进而促进植株生长,提高产量。

蚯蚓粪配施矿物质肥能显著改善番茄果实品质,以 T4 品质最佳,T4 番茄果实总糖、可溶性固形物、维生素 C 含量及糖酸比均显著高于 CK 和其他处理,一方面是因为蚯蚓粪中富含谷氨酸、甘氨酸、天门冬氨酸等必需氨基酸,可通过作物根部参与到可溶性糖代谢过程,从而促进作物果实可溶性固形物含量提升^[32];另一方面,蚯蚓粪中钙、锰、铁和锌等微量元素含量较高,微量元素可以提高蔬菜果实中维生素 C 和糖分含量,并降低有机酸含量,从而改善蔬菜品质^[13,27,32]。与此同时,也可能与配施矿物质肥有关,李子双等^[33]研究结果表明,矿物质肥对白菜、芹菜等的可溶性固形物含量提升有促进作用,李经洽等^[34]试验表明,矿物质肥能提高梨果实中维生素 C 含量和还原糖含量,降低果实总酸含量,改善果实品质。

综上,大行距(240 cm)、单行种植,可明显增大番茄植株光照面积,增强光合作用,提高光照利用率,促进植株生长;且采用蚯蚓粪配施矿物质肥,能有效改善土壤质量,提升番茄品质,增加番茄产量,进而有助促进农民增收。

参考文献

- [1] 许静, 项朝阳, 刘梅. 我国番茄产业成本收益分析及提质增效路径研究[J]. 中国蔬菜, 2025(6): 1-8.
- [2] WANG X X, ZHAO F Y, ZHANG G X. Vermicompost improves tomato yield and quality and the biochemical properties of soils with different tomato planting history in a greenhouse study[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1978.
- [3] GUTIERREZ V, ELISABETH E. An overview of recent studies of tomato (*Solanum lycopersicum* spp.) from a social, biochemical and genetic perspective on quality parameters[J]. Basic Microbiol, 2018, 50: 211-217.
- [4] REYNOLDS M, BONNETT D, CHAPMAN S C, et al. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(2): 439-452.
- [5] 张瑞平, 苟小梅, 张毅, 等. 生物有机肥与化肥配施对植烟土壤养分和真菌群落特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 85-92.
- [6] 田浩, 杜涛, 王晨, 等. 食用菌菌渣资源化利用研究进展概况分析[J]. 再生资源与循环经济, 2024, 17(1): 41-43.
- [7] 周祥, 严媛媛, 陈爱晶. 食用菌菌渣资源化利用研究进展[J]. 食用菌, 2018, 40(1): 9-12.
- [8] LOU Z, SUN Y, ZHOU X X, et al. Composition variability of spent mushroom substrates during continuous cultivation, composting process and their effects on mineral nitrogen transformation in soil[J]. Geoderma, 2017, 307: 30-37.
- [9] ZHU H J, SUN L F, ZHANG Y F, et al. Conversion of spent mushroom substrate to biofertilizer using a stress-tolerant phosphate-solubilizing *Pichia farinose* FL7[J]. Bioresource Technology, 2012, 111: 410-416.
- [10] FONG C J, CHUANG Y Y, LAI H Y. Effects of amendment with various vermicomposts on the soil fertility, growth of *Brassica chinensis* L., and resistance of *Spodoptera litura* fabricius larvae[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 9441.
- [11] 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.
- [12] FU X Y, HUANG K, CUI G Y. Dynamics of bacterial and eukaryotic community associated with stability during vermicomposting of pelletized dewatered sludge[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2015, 104: 452-459.
- [13] ROGHAYEH R, KHALESRO S, HEIDARJ G. Vermicompost and zeolite improve yield, nutrient uptake, essential and fixed oil production, and composition of *Nigella sativa* L[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2023, 7: 1214691.
- [14] 杨凯, 董青君, 李其胜, 等. 餐厨蝇粪替代化肥对白菜和西蓝花光合、抗氧化性及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 934-942.
- [15] 吴珏, 李建勇, 刘娜. 蚯蚓粪有机肥对番茄产量、品质和土壤化学性质的影响[J]. 上海农业学报, 2018, 34(4): 16-19.
- [16] 兰成云, 舒锐, 姚甜甜, 等. 矿物肥料在我国农业生产上的应用现状[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(35): 143-146.
- [17] 闫丰. 矿物肥料在农业生产中的应用现状[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(8): 89-90.
- [18] 史海莉, 刘利鸿, 陈攀红, 等. 叶面喷施天然矿物肥对“巨峰”葡萄品质和抗氧化酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2016(3): 13-16.
- [19] 刘自飞, 曲明山, 廖洪, 等. 不同矿质肥料在蔬菜上的施用效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 108-111.
- [20] PAPADOPOULOS A P, ORMROD D P. Plant spacing effects on yield of the greenhouse tomato[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1990, 70(2): 565-573.
- [21] 马如海. 不同栽培模式对黄沙基质番茄产量和品质的影响研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2022.
- [22] QASIM M, JU J, ZHAO H T. Morphological and physiological response of tomato to sole and combined application of vermicompost and chemical fertilizers[J]. Agronomy, 2023, 13(6): 1508.
- [23] CUI X W, ZHANG Y Z, GAO J S. Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of central South China[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 16554.
- [24] LIM S L, WU T Y, LIM P N. The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1143-1156.
- [25] YAN S, NIU Z Y, YAN H T. Influence of soil organic carbon on the aroma of tobacco leaves and the structure of microbial communities[J]. Current Microbiology, 2020, 77(6): 931-942.
- [26] 周星, 陈骋, 常海娜, 等. 蚓堆肥热干扰后对土壤质量和作物生长的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 142-152.
- [27] 赵成雷, 于建, 郭新送, 等. 有机肥替代化肥对设施番茄产量、品质及土壤性状的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(8): 116-120.
- [28] 谭川疆, 潘忠图, 罗有发, 等. 不同改良剂对黔西北锌冶炼区农用地土壤重金属修复效果研究[J]. 地球与环境, 2022, 50(4): 575-585.
- [29] 李扬, 乔玉辉, 莫晓辉, 等. 蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊1): 250-255.
- [30] 张彭良, 李静, 王丹丹. 生物有机肥对春小麦生理特性及土壤养分和微生物的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 66-72.
- [31] WU D, CHEN C L, LIU Y F. Vermicompost improves tomato yield and quality by promoting carbohydrate transport to fruit under salt stress[J]. Horticulturae, 2023, 9(9): 1015.
- [32] TURAN M, KOCAMAN A, TUFENKCI S. Development of organic phosphorus vermicompost from raw phosphate rock using microorganisms and enzymes and its effect on tomato yield[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 321: 112323.
- [33] 李子双, 贺洪军, 赵同凯, 等. 辣椒的矿物质肥、氮肥、磷肥优化施肥方案及经济效益分析[J]. 山东农业科学, 2012, 44(11): 74-77.
- [34] 李经治, 克热木·伊力, 艾克拜尔·伊拉洪, 等. 配方施肥对库勒勒香梨果实品质及叶片矿质营养含量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(2): 232-239.