

不同施硒方式对设施番茄生长及硒素吸收的影响

肖自斌¹, 马建梅¹, 刘世伟¹, 王继涛², 蒋学勤¹, 余晓慧¹,

杨 惠¹, 张文文³, 关自刚⁴, 黄灵丹⁵

(1. 宁夏回族自治区园艺技术推广站 银川 750002; 2. 宁夏回族自治区农业技术推广总站 银川 750001; 3. 惠农区农业技术推广服务中心 宁夏石嘴山 753600; 4. 宁夏旭日阳光生态果蔬种植养殖专业合作社 银川 750006; 5. 兴庆区农业农村和水务局 银川 750004)

摘要:为探究土施硒(Se)与叶面喷施的协同增效作用,以设施番茄为试验材料,设置4个处理:对照(CK,不施硒肥)、土施(T1)、叶面喷施(T2)、土施+叶面喷施(T3),比较了不同施硒方式对设施番茄光合参数、器官硒生物富集因子、转运效率及品质、产量的影响。结果表明,T3处理的净光合速率显著高于CK和T1,气孔导度和蒸腾速率分别较CK显著提高45.45%和53.49%,胞间CO₂浓度较CK显著降低35.30%,T1处理根硒生物富集因子最高,达1.96,T2处理茎硒生物富集因子最高,T3处理果实生物富集因子(0.39)较CK、T1和T2分别显著提高178.57%、290.00%和160.00%。T1处理土壤-根硒转运效率最高,达1.96,但与T3处理差异不显著,T3处理叶-果实转运效率最高,为0.36,较CK、T1分别显著提高了414.29%、227.27%,表明T3处理在维持根部高效吸收硒的同时,实现了果实硒累积最大化。T3处理番茄的可溶性糖含量、抗坏血酸含量、可溶性蛋白含量、糖酸比、可溶性固形物含量及产量分别较CK显著提高40.07%、3.29%、19.95%、27.12%、14.36%、5.24%。综上,土施+叶面喷施(T3)为设施番茄最优施硒方式,可通过协同调控气孔导度与光合作用过程显著提升光合效能,同时可优化硒元素在根-茎-果实系统的富集分配及转运效率,最终实现果实硒含量、营养品质与产量的同步提升。

关键词:番茄; 硒肥; 光合效率; 硒转运; 品质

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)06-232-07

Effects of different selenium application methods on growth and selenium absorption of tomato in facility

Xiao Zibin¹, Ma Jianmei¹, Liu Shiwei¹, Wang Jitao², Jiang Xueqin¹, Yu Xiaohui¹, Yang Hui¹, Zhang Wenwen³, Guan Zigang⁴, Huang Lingdan⁵

(1. Ningxia Hui Autonomous Region Horticultural Technology Promotion Station, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Technology Extension Station, Yinchuan 750001, Ningxia, China; 3. Huinong District Agricultural Technology Extension Service Center, Shizuishan 753600, Ningxia, China; 4. Ningxia Xuri Sunshine Ecological Fruit and Vegetable Planting and Breeding Professional Cooperative, Yinchuan 750006, Ningxia, China; 5. Xingqing District Bureau of Agriculture, Rural Affairs and Water Resources, Yinchuan 750004, Ningxia, China)

Abstract: To investigate the effects of different selenium(Se) application methods on photosynthetic characteristics, selenium accumulation and distribution, fruit quality and yield of greenhouse tomato, and to clarify the synergistic effect between soil application and foliar spraying, a field experiment was carried out with greenhouse tomato as the test material. Four treatments were set up, including control(CK, no selenium fertilizer applied), soil application(T1), foliar spraying(T2), and combined soil and foliar application(T3). The photosynthetic parameters, selenium bioconcentration factors of various organs, selenium transport efficiency, as well as fruit quality and yield indexes of greenhouse tomato under different selenium application methods were compared and analyzed. The results showed that the net photosynthetic rate of T3 was significantly higher than that of CK and T1. Compared with CK, the stomatal conductance and transpiration rate of T3 increased by 45.45% and 53.49%, respectively, while the intercellular CO₂ concentration decreased by 35.30%. T1 had the highest root selenium bioconcentration factor, reaching 1.96, and T2 had the best selenium accumulation effect in

收稿日期:2025-12-10;修回日期:2026-03-09

基金项目:2022年宁夏回族自治区青年拔尖人才项目(肖自斌)

作者简介:肖自斌,男,高级农艺师,主要从事园艺作物新品种、新技术引进示范推广工作。E-mail:495086185@qq.com

通信作者:马建梅,女,农艺师,主要从事园艺作物新品种、新技术引进示范推广工作。E-mail:majianmei_41@163.com

stems. The T3 fruit selenium bioaccumulation factor(0.39)significantly increased by 178.57%, 290.00%, and 160.00% respectively compared to CK, T1, and T2. The soil-root transport coefficient of T1 was the highest(1.96), but there was no significant difference between T1 and T3. T3 had the optimal leaf-fruit transport coefficient(0.36), which was significantly 227.27% higher than that of T1 and 414.29% higher than that of CK, indicating that T3 could maintain efficient selenium absorption by roots and maximize selenium accumulation in fruits. Compared with CK, the soluble sugar content, ascorbic acid content, soluble protein content, sugar-acid ratio, soluble solids content and yield of T3 treatment were respectively 40.07%, 3.29%, 19.95%, 27.12%, 14.36% and 5.24% higher than those of CK, respectively. In conclusion, soil application + foliar spraying(T3)is the most effective method for applying selenium to greenhouse tomato. By jointly regulating stomatal conductance and the photosynthetic process, it significantly enhances photosynthetic efficiency. At the same time, it optimizes the accumulation, distribution, and transport efficiency of selenium in the root-stem-fruit system, ultimately achieving simultaneous improvements in fruit selenium content, nutritional quality, and yield.

Key words: Tomato; Selenium fertilizer; Photosynthetic efficiency; Selenium transport; Quality

硒(Se)是人体健康必需的微量营养元素之一,缺乏或过量摄入均会增加疾病风险^[1-3],由于人体无法自主合成硒,通过食物摄取成为重要的补硒途径^[4]。据统计,1993年,我国39%~61%的居民硒摄入量低于WHO/FAO推荐值($26\sim 34\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$),约1.05亿人由于缺硒健康状况受到影响^[5-6],因此发展富硒作物成为安全补硒的关键手段。作为植物健康生长的有益元素,硒不仅能促进种子萌发、调节土壤pH、增强微生物群落多样性^[7-8],还能提高植物光合效率和营养吸收能力。通过施用适宜浓度的硒肥,既可促进作物生长,又能将无机硒转化为人体可直接吸收的氨基酸态硒^[9],这也使富硒农产品成为现代农业与营养科学交叉领域的研究热点。研究表明,不同施硒方式效果差异显著:根施虽能提高部分蔬菜(如上海青、菠菜)硒含量却抑制香菜对硒的吸收,且存在利用率低、易污染土壤等问题^[10];而叶面喷施因用量低、利用率高、污染轻,被认为是更优选择。研究表明,叶面喷施低浓度硒可提升生菜可溶性总糖、总酚、维生素C和粗纤维含量,但高浓度反而抑制生菜生长^[11-12]。因此,精准控制硒肥浓度和施用方式对实现作物增效与生态安全至关重要。

番茄是我国设施栽培的重要作物,兼具食用与营养双重价值^[13]。其独特的“水果蔬菜双重身份”特性,使富硒番茄的开发潜力尤为突出。Lyons等^[14]发现土施硒肥虽显著增加番茄硒积累但存在分配不均问题;Schiavon等^[15]指出叶面喷施硒肥虽可提高植物叶片硒富集却抑制硒向果实转运;Wang等^[16]提出联合施硒方式可提高水稻硒整体转化效率。当前,蔬菜产业面临施硒效率不稳定,导致硒残留超标,果实富集率低,制约营养价值提高,以及成本高昂难以规模化应用等关键问题。因此,亟须深入研究优化施硒方式,以提高硒转化效率、降低环境

风险并实现产业化推广。值得注意的是,设施番茄生产中硒肥施用方式对植株生长及硒转化效率的影响机制尚未明确,这严重制约了富硒番茄产品的标准化生产。本研究通过系统比较不同施硒方式和浓度对番茄硒吸收特性及营养品质的影响,重点探究叶面喷施与根施的协同增效机制,旨在构建设施番茄硒肥高效利用技术体系,为富硒功能型番茄产品的开发提供理论支撑和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2024年9月至2025年6月在宁夏回族自治区银川市兴庆区掌政镇五渡桥村日光温室(温室是三代主动蓄热日光温室,坐北朝南,东西方向延长,长63m,跨度10m,脊高5.3m,后墙高3.6m,采用12丝PO膜覆盖)内进行。供试土壤类型为砂壤土,耕层土壤(0~20cm)基本理化性质:有机质含量(w,后同) $17.54\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮含量 $66.29\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷含量 $172.50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $519.43\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH为8.68,全盐含量0.10%。

供试有机硒肥(双酶多肽硒元素营养液,Se含量 $\geq 5\%$)购自深圳市正升融创有限公司。

供试番茄品种为普罗旺斯,幼苗由宁夏旭日阳光生态果蔬种植养殖专业合作社提供,普罗旺斯为杂交种,粉果,无限生长型,节间较紧凑,连续坐果能力强,中早熟,转色快,果色均匀,硬度较好,耐裂果,耐贮运,口感出众,酸甜适口,耐低温,畸形果少,果实圆形略扁,果型整齐一致。

1.2 试验设计

试验采用完全随机设计,整地前施底肥,底肥施用量均为:有机肥(腐熟农家肥: $2000\sim 2500\text{kg}\cdot 667\text{m}^{-2}$)、复合肥(N:P:K=15-15-15) $40\text{kg}\cdot 667\text{m}^{-2}$ 、磷酸二铵

(总养分含量 $\geq 64.0\%$) $20\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^2$ 。南北向大行距栽培,垄距为 240 cm ,垄面宽 80 cm ,垄沟宽 160 cm ,垄高 25 cm ,双行定植,行距 50 cm ,株距 25 cm ,垄面覆塑料白膜,待番茄长出5片真叶时定植于温室内。小区面积: $2.4\text{ m}\times 9\text{ m}=21.6\text{ m}^2$,定植密度 $2223\text{ 株}\cdot 667\text{ m}^2$ 。试验共设置4个处理,以不施用硒肥为空白对照(CK);T1采用土施方式,于番茄苗期、开花坐果期及果实膨大期,在垄面冲施100倍稀释液,用量为 $3\text{ L}\cdot 667\text{ m}^2$;T2采取叶面喷施处理,各生育期均喷施3次,间隔7d喷施1次,单次喷施100倍稀释液 $3\text{ L}\cdot 667\text{ m}^2$;T3为土施结合叶面喷施方式,土施于各生育期垄面冲施1次100倍稀释液,用量 $2\text{ L}\cdot 667\text{ m}^2$,叶面喷施方式与频次同T2,单次喷施100倍稀释液 $1\text{ L}\cdot 667\text{ m}^2$ 。每个处理3次重复,喷施硒肥时,将硒肥加自来水稀释100倍后,用电动喷雾器喷施。

1.3 指标测定

1.3.1 土壤硒含量测定 在定植前,每个处理均采用五点法取地表0~20 cm处基础土壤样品,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,用袋子密封好后贴上标签待测。采用原子荧光光谱法测定土壤硒含量^[17]。

1.3.2 植株叶片光合特性测定 于第3穗花开放50%时(2025年1月22日)采用GFS-3000光合仪(德国WALZ公司)测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。每个处理测定3株,3次重复。

1.3.3 果实品质测定 采集番茄第3穗果[选择第3穗果是因为它“承上启下”:既摆脱了苗期环境胁迫导致的不稳定(第1穗问题),又未受到植株后期衰老或营养输送限制的影响(上部果穗问题)。是番茄植株在最佳生理状态下结出的果实,最能真实、稳定地反映品种的品质水平和栽培效果],分别测定番茄品质指标,其中,根据GB 5009.86—

2016^[18]测定抗坏血酸(ASA)含量;根据GB 12456—2021^[19]测定总酸含量,并计算糖酸比,糖酸比=总糖含量/总酸含量;根据GB 5009.8—2016^[20]测定总糖含量;根据NY/T 1278—2007^[21]测定可溶性糖含量;根据NY/T 2637—2014^[22]测定可溶性固形物含量。根据GB 5009.93—2017^[23]采用原子荧光光谱法(AFS)测定各器官(根、茎、叶、果实)硒含量。生物富集因子(BCF)=植物组织硒含量/土壤硒含量^[24],硒转运效率(TF)=目标器官硒浓度/源器官硒浓度^[25]。

1.3.4 产量测定 采集成熟的第1~5穗果,每次采摘后定株记产量,记录番茄产量,其中,小区产量=小区定植株数 $\times$ 单株坐果数 $\times$ 平均单果质量,并根据小区产量折算每 hm^2 产量。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据计算;采用SPSS 20.0统计软件进行数据分析,采用LSD和Duncan法进行差异显著性分析($P<0.05$);采用Mantel检验与Spearman相关性分析法进行关联分析。

2 结果与分析

2.1 不同施硒方式对番茄叶片光合特性的影响

由表1可知,不同施硒方式显著影响番茄叶片光合特性,T3处理的光合效率最优。T3处理的净光合速率(P_n)最高,为 $21.25\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,较CK和T1分别显著提高了29.50%和22.10%;T2处理 P_n 为 $18.71\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,与T3差异不显著,但较CK提高了14.00%;CK的 P_n 最低。T3处理的气孔导度(G_s)与蒸腾速率(T_r)均最高,分别为 0.64 、 $6.6\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,均显著高于其他处理,分别较CK提高了45.45%和53.49%;T2处理的 G_s 为 $0.51\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, T_r 为 $5.3\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,也均高于CK。T3处理的胞间 CO_2 浓度(C_i)最低,为 $434.87\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,显著低于其他处理,较CK和T1分别降低了35.30%和45.70%。

表 1 不同施硒方式对番茄叶片光合特性的影响

Table 1 Effects of different selenium application methods on photosynthetic characteristics of tomato leaves				
处理 Treatment	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	气孔导度 $G_s/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
T1	17.40 $\pm$ 1.53 b	0.36 $\pm$ 0.03 c	800.67 $\pm$ 10.70 a	3.7 $\pm$ 0.000 2 c
T2	18.71 $\pm$ 1.29 ab	0.51 $\pm$ 0.06 b	604.19 $\pm$ 41.93 b	5.3 $\pm$ 0.000 5 b
T3	21.25 $\pm$ 0.66 a	0.64 $\pm$ 0.01 a	434.87 $\pm$ 1.67 c	6.6 $\pm$ 0.000 1 a
CK	16.41 $\pm$ 1.15 b	0.44 $\pm$ 0.03 bc	672.06 $\pm$ 45.91 b	4.3 $\pm$ 0.000 6 bc

注:同列不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

2.2 不同施硒方式对番茄各器官硒生物富集能力的影响

由表 2 可见,不同施硒方式对番茄各器官硒富集能力的影响不同。在根组织中,T1 处理的生物富集因子(BCF)最高(1.96),分别较 T2、CK 显著提高 34.20%、277.00%,但与 T3 处理差异不显著,表明 T1 处理根部硒富集效果最佳;在茎组织中,T2 处理的 BCF (1.04) 显著高于 T3 和 CK,分别提高 14.29%和 258.62%,但与 T1 无显著差异,说明 T2 处理在茎部硒富集中具有相对优势;叶组织方面,所有施硒处理(T1、T2、T3)的 BCF 值均显著高于 CK(0.43),但各施硒处理间无显著差异。施硒处理叶组织中 BCF 平均值较 CK 提高约 210.00%;果实组织中,T3 处理 BCF(0.39)显著高于其他处理,较 T1、T2 和 CK 分别提高 290.00%、160.00%和 178.57%,表明 T3 处理促进果实硒富集的效果突出。

综合分析可知,不同施硒方式对番茄各器官的硒富集具有选择性影响:土施处理最有利于根部硒富集,叶面喷施处理促进茎叶组织硒富集,土施+叶面喷施处理则显著促进果实硒积累,CK 各组织中的 BCF 值均最低,表明施硒处理能显著增强番茄对硒的生物富集能力。

表 2 不同施硒方式对番茄各组织中硒生物富集因子(BCF)的影响
Table 2 Effects of different selenium application methods on selenium bioenrichment factors (BCF) in various tomato tissues

处理 Treatment	根 BCF Root BCF	茎 BCF Stem BCF	叶 BCF Leaf BCF	果实 BCF Fruit BCF
T1	1.96±0.05 a	1.02±0.02 ab	1.30±0.02 a	0.10±0.03 b
T2	1.46±0.18 b	1.04±0.07 a	1.33±0.06 a	0.15±0.06 b
T3	1.72±0.02 ab	0.91±0.02 b	1.31±0.01 a	0.39±0.00 a
CK	0.52±0.04 c	0.29±0.03 c	0.43±0.09 b	0.14±0.00 b

2.3 不同施硒方式对番茄组织器官间硒转运效率(TF)的影响

由表 3 可知,各转运阶段的硒转运效率差异显著。土壤-根转运阶段,T1 处理的 TF 值最高(1.96),较 T2 和 CK 分别显著提高 34.20%和 277.00%,但与 T3 无显著差异;根-茎转运阶段,各处理 TF 值均无显著差异;茎-叶转运阶段,各处理 TF 值也均无显著差异;叶-果实转运阶段,T2 和 T3 处理均显著高于 T1 和 CK,T3 处理较 T1 和 CK 分别显著提高 227.27%和 414.29%。

综合分析表明,T1 处理在土壤-根阶段硒吸收转运效果显著,而 T2 和 T3 处理则在叶-果实转运

中表现突出。值得注意的是,CK 在茎-叶阶段硒转运效率较高,但在叶-果实阶段硒转运效率仅为 0.07,较 T3 处理显著降低 80.60%,这表明 CK 可能在果实发育阶段的硒养分分配或转运过程中存在不足。综合各转运阶段表现,T3 处理最优,不仅维持了土壤-根阶段的高效转运(TF=1.72),更在食用部位(果实)的硒累积上表现最佳(TF=0.36),较 T2 处理提高 20.00%,实现了硒生物利用效率的最大化。

表 3 不同施硒方式对番茄组织器官间硒转运效率(TF)的影响
Table 3 Effects of different selenium application methods on selenium transport factor (TF) among different tissues and organs

处理 Treat- ment	TF(土壤-根) TF(Soil-root)	TF(根-茎) TF(Root-stem)	TF(茎-叶) TF(Stem-leaf)	TF(叶-果实) TF(Leaf-fruit)
T1	1.96±0.05 a	0.52±0.02 ab	1.28±0.01 a	0.11±0.04 b
T2	1.46±0.18 b	0.75±0.14 a	1.28±0.07 a	0.30±0.00 a
T3	1.72±0.02 ab	0.52±0.00 ab	1.44±0.02 a	0.36±0.07 a
CK	0.52±0.04 c	0.56±0.03 a	1.44±0.15 a	0.07±0.02 b

2.4 不同施硒方式对番茄品质的影响

由表 4 可知,不同施硒方式对番茄果实品质的影响较大。T3 处理的多项品质指标均最优:T3 处理 AsA 含量(w,后同)最高,达 235.34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,分别较 CK、T2 显著提高了 3.29%、6.31%,但与 T1 处理差异不显著;T2 处理 AsA 含量最低,为 221.38 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,表明单一叶面喷施硒肥可能存在硒吸收不稳定、氧化胁迫增强等问题,抑制番茄果实 AsA 积累。T3 处理可溶性糖含量最高,达 38.28 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,分别较 CK 和 T1 显著提高了 40.07%和 22.93%,但与 T2 处理差异不显著。T3 处理糖酸比为 7.50,分别较 CK 和 T1 显著提高了 27.12%、22.55%,表明 T3 处理口感风味更佳。T3 处理可溶性蛋白含量达 4.63 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,较 CK(3.86 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和 T1(4.27 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)分别显著提高了 19.95%、8.43%。T3 处理可溶性固

表 4 不同施硒方式对番茄品质的影响
Table 4 Effects of different selenium application methods on tomato quality

处理	w(AsA) Ascorbic acid content/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	w(总酸) Total acid content/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	w(可溶 性糖) Soluble sugar content/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	糖酸比 Sugar- acid ratio	w(可溶 性蛋白) Soluble protein content/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	w(可溶性 固形物) Soluble solids content/ %
T1	229.41 ab	5.09 a	31.14 b	6.12 b	4.27 b	6.01 b
T2	221.38 b	5.11 a	33.37 ab	6.62 ab	4.41 ab	5.85 bc
T3	235.34 a	5.13 a	38.28 a	7.50 a	4.63 a	6.61 a
CK	227.85 b	4.63 b	27.33 c	5.90 b	3.86 c	5.78 c

形物含量也最高(6.61%),分别较 CK、T1、T2 显著提高了 14.36%、9.98%、12.99%。各施硒处理总酸含量均显著高于 CK(4.63 mg·g⁻¹),较 CK 提高 9.94%~10.80%,但各施硒处理间差异均不显著,表明施硒可显著提高番茄总酸积累,但施用方式对总酸含量影响不大。综上可知,T3 处理能够显著提升番茄果实的综合品质。

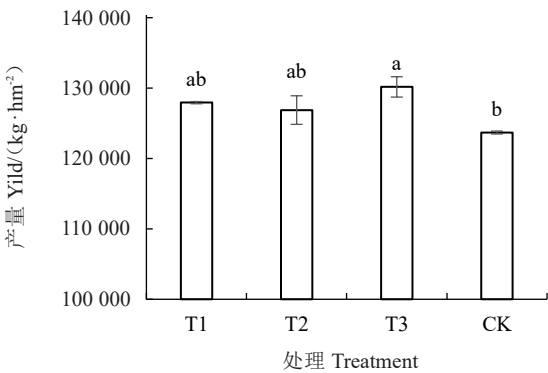
2.5 不同施硒方式对番茄产量的影响

T3 处理产量最高,为 130 176.26kg·hm⁻²(图 1),较 CK 显著提高了 5.24%,但与 T1、T2 差异均不显著,由此可见,T3 处理通过吸收-转运协同效应实现产量显著提升,而 T1、T2 处理可能因吸收路径单一或转运受到抑制,增产效果有限。

2.6 不同施硒方式下番茄叶片光合特性、各器官硒富集能力及品质与产量间的相关性

由图 2 可知,叶片光合生理指标间的相关性:净光合速率与气孔导度呈极显著正相关,净光合速率与蒸腾速率呈显著正相关;气孔导度与蒸腾速率呈极显著正相关。

各器官硒生物富集因子(BCF)间的相关性:根 BCF 与茎 BCF、叶 BCF 均呈极显著正相关;茎 BCF 与叶 BCF 呈极显著正相关。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant differences at 0.05 level.

图 1 不同施硒方式对番茄产量的影响
Fig. 1 Effects of different selenium application methods on tomato yield

果实品质指标间的相关性:可溶性糖含量与糖酸比、可溶性固形物含量均呈极显著正相关;糖酸比与可溶性固形物含量呈极显著正相关;可溶性蛋白含量与可溶性糖、可溶性固形物含量均呈显著正相关。

叶片光合生理指标、各器官硒生物富集因子及果实品质指标与产量的相关性:气孔导度、蒸腾速率、根 BCF、茎 BCF、叶 BCF、总酸含量与产量均呈

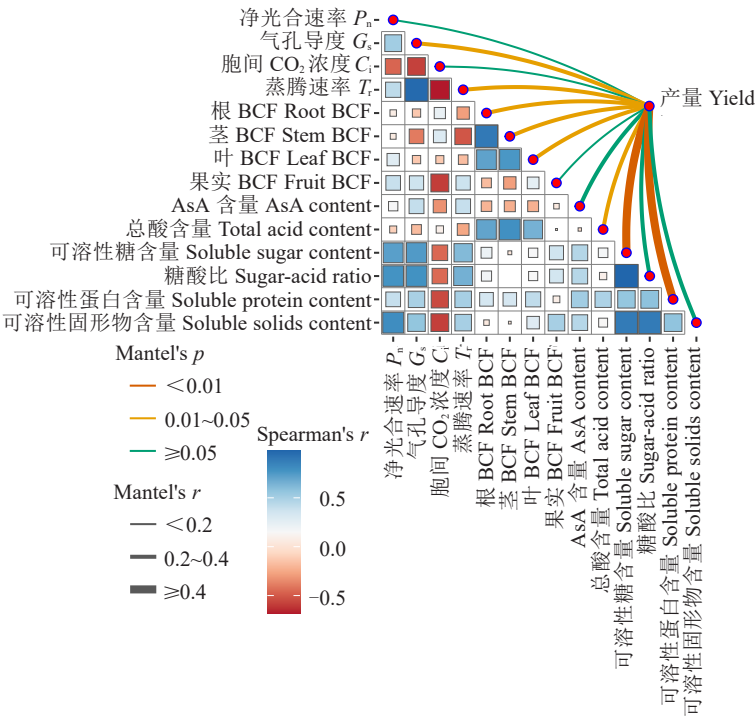


图 2 不同施硒方式下番茄叶片光合特性、各器官硒富集能力及品质与产量间的相关性
Fig. 2 Correlation between leaf photosynthetic characteristics, selenium enrichment capacity of each organ and quality and yield of tomato under different selenium application methods

显著正相关;可溶性糖含量、可溶性蛋白含量与产量均呈极显著正相关。

3 讨 论

3.1 不同施硒方式对番茄光合特性的影响

与 CK 相比,T3 处理显著提高了番茄叶片的净光合速率($P_n=21.25 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度($G_s=0.64 \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和蒸腾速率($T_r=6.6 \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),表明土施+叶施联合施用硒能够改善叶片光合特性,提高光合效率。前人研究也表明,叶面喷施硒肥可以提高黄瓜、花生叶片的净光合速率、叶绿素含量、蒸腾速率^[26-27]。在本研究中,CK 的 P_n 最低($16.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),说明硒缺乏会导致光合效率降低,这一研究结果进一步印证了补硒能够有效提高设施番茄光能利用率^[28]。

3.2 器官特异性硒富集动态与转运分配

本研究中,T1 处理根 BCF(1.96)最高,这可能是由于土施硒通过根系直接吸收并滞留于根组织^[29]。T2 处理茎硒 BCF 最高(1.04),较 CK 显著提高了 258.62%,可能因叶面吸收硒后通过韧皮部优先向茎运输^[30]。T3 处理果实 BCF 达 0.39,较单一施硒方式提高 160.00%~290.00%,印证了联合施硒通过协同提升源-库转运效率强化食用部位硒积累的假说^[31]。

TF 分析表明,各施硒处理中,T1 处理土壤-根 TF 最高,为 1.96,但叶-果实 TF 最低(0.11),说明土施硒易滞留于地下器官^[32]。T2 和 T3 处理叶-果实 TF 均显著高于 T1,符合叶面施硒通过维管系统定向转运的规律^[33]。CK 的茎-叶 TF 与各施硒处理均无差异,但叶-果实 TF 降至 0.07,较 T3 处理显著降低了 80.60%,说明常规栽培条件下硒向果实转运受到限制^[34]。

3.3 硒联合施用对果实品质的代谢调控

T3 处理 AsA ($235.34 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、可溶性糖 ($38.28 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)及可溶性蛋白($4.63 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)含量均高于其他处理,表明硒的联合施用可改善果实营养品质,这与熊信果等^[35]关于硒能调控果蔬抗氧化物质代谢、提升产品品质的研究结论相一致。与 CK 相比,施硒处理均可提高果实糖酸比,表明硒能够改善果蔬风味品质,与唐珂璠等^[36]的结果一致,而 T2 处理的 AsA 含量最低,说明叶面施硒可能抑制 AsA 的合成^[37]。

3.4 产量提升的“源-库”协同作用

T3 处理产量($130\ 176.26 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)较 CK 显著

提高了 5.24%,其增产效应可能是因为土施硒肥可提供稳定硒源,叶面施硒可促进养分转化,2 种施硒方式相互配合、共同发挥作用^[38]。单一施硒处理(T1、T2)由于硒吸收途径单一或存在转运抑制效应,增产效果有限,而土施+叶面喷施的方式(T3 处理)能够有效提升番茄植株全生育期硒养分供应水平及硒高效转运能力。

3.5 不同施硒方式下番茄光合特性、各器官硒富集能力、品质与产量间的协同关联性

相关性分析表明,番茄叶片净光合速率与气孔导度、蒸腾速率呈显著或极显著正相关,说明气孔发育与水分代谢协同提升光合效率,这与任平等^[39]在番茄光合作用研究中得出的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率三者呈显著正相关的结论一致,反映番茄光合系统具有稳定的协同调控机制。番茄根、茎、叶硒生物富集因子(BCF)间均呈极显著正相关,说明硒由根系吸收后向地上部转运具有高度协调性,根系硒富集能力直接决定茎、叶硒累积水平,与刘浩等^[40]的硒在番茄植株内吸收、转运、富集同步性的结果高度吻合。果实品质指标中,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、糖酸比间呈极显著或显著正相关,说明番茄内在品质性状具有同步提升特征,与郜晨鹏等^[41]对番茄品质指标相关性分析结论相一致,体现品质性状间的内在统一性。气孔导度、蒸腾速率、各器官硒富集能力、可溶性糖含量、可溶性蛋白均与产量呈显著或极显著正相关,说明提升光合能力、促进硒富集与改善品质可共同实现番茄增产增效,这与辛朗等^[42]关于外源硒可调控番茄光合、品质、产量协同提升的结果一致。这印证了外源施硒能够联动调控番茄光合生理、硒素富集与果实品质、产量形成过程的论点,各指标间的正向协同关联是不同施硒方式实现提质增产的重要内在动因,而 T3 处理的多指标协同增效效果更为优异。

4 结 论

综上,T3 处理(土施+叶面喷施)通过协同光合增效、硒转运优化及代谢调控,实现硒高效富集与果实品质提升同步的目标,为设施番茄硒生物强化提供了理论依据与技术支持。

参考文献

- [1] 高慧雅. 硒肥用量对谷子根际微生物特性及产量品质的影响[D]. 河北保定:河北农业大学,2021.
- [2] Zhou H H, Wang T, Li Q, et al. Prevention of Keshan disease by selenium supplementation: A systematic review and meta-analy-

- sis[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 186(1): 98-105.
- [3] 黄婵婵. 水稻种植下富硒土壤微生物群落结构及水稻对硒的吸收[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [4] 刘欢. 富硒植物根际微生物多样性及硒还原菌的分离和功能鉴定[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020.
- [5] Wang J, Li H R, Yang L S, et al. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, 39(1): 221-229.
- [6] Dinh Q T, Cui Z, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review[J]. Environment International, 2018, 112(3): 294-309.
- [7] 秦蕾, 尹庆喆, 马慧丽, 等. 硫、硒处理对洋葱产量及主要功能成分的影响[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(3): 17-25.
- [8] 程芮琪. 施硒方式对蔬菜生长及元素含量的影响[D]. 武汉: 湖北大学, 2023.
- [9] 廖继超. 相互混种对三种基因型樱桃番茄生长及硒富集的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2020.
- [10] 谯祖勤, 周昌平, 陈文兴, 等. 根施有机无机复混腐殖酸硒肥对蔬菜及其土壤硒含量的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(6): 23-25.
- [11] 袁伟玲, 刘志雄, 吴金平, 等. 不同施硒方式对叶用莴苣产量、含硒量和硒转化率的影响[J]. 中国蔬菜, 2021(2): 80-84.
- [12] 袁伟玲, 刘志雄, 吴金平, 等. 硒对生菜生长、品质、养分吸收和硒转化率的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(增刊1): 189-194.
- [13] 邓小芳. 湖北省几种作物对硒肥的利用及其富硒特征的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [14] Lyons G H, Genc Y, Soole K, et al. Selenium increases seed production in Brassica[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1): 73-80.
- [15] Schiavon M, Pilon-smits E A H. The fascinating facets of plant selenium accumulation - biochemistry, physiology, evolution and ecology[J]. New Phytologist, 2017, 213(4): 1582-1596.
- [16] Wang X, Li Y, Zhang L, et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. Plant and Soil, 2024, 491(1-2): 325-338.
- [17] 刘佳, 宋健翔. 原子荧光光谱法测定土壤中硒含量[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(10): 178-180.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家卫生健康委员会. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定: GB 12456—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定: GB 5009.8—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 中华人民共和国农业部. 蔬菜及其制品中可溶性糖的测定 铜还原碘量法: NY/T 1278-2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [22] 中华人民共和国农业部. 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法: NY/T 2637—2014[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [23] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中硒的测定: GB 5009.93—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 廖启林, 王吉秀, 窦韦强, 等. 富硒土壤典型作物硒的富集与转运特征[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 612-620.
- [25] Huang Y, Zhang L, Liu H, et al. Selenium uptake and translocation in rice under different selenium species[J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(15): 2289-2302.
- [26] 石彦召, 和爱玲, 朱桢桢, 等. 叶面喷施硒肥对花生光合特性、经济性状、籽仁硒含量及产量的影响[J]. 陕西农业科学, 2024, 70(11): 74-80.
- [27] 何璇, 张平安, 丁光武, 等. 外源硒对黄瓜富硒及抗氧化反应和营养品质的影响研究[J]. 核农学报, 2024, 38(8): 1568-1574.
- [28] 贾玮, 吴隼, 屈婵娟, 等. 硒调控植物光合生理与抗逆机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(14): 171-176.
- [29] 彭琴, 李哲, 梁东丽, 等. 不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1667-1674.
- [30] 陈锦平, 刘永贤, 曾成城, 等. 植物叶面硒吸收转运及体内分配规律研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 421-427.
- [31] 刘浩, 庞婕, 李欢欢, 等. 土施与叶面喷施硒肥对番茄硒积累及产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(11): 2145-2156.
- [32] 钟庆祥, 张豫, 陶贞, 等. 土壤-植物系统硒迁移转化与根系滞留特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2023, 38(1): 44-56.
- [33] 雷红量, 丛文字, 蔡照磊, 等. 植物根系与叶片硒吸收转运途径及调控因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1456-1467.
- [34] 周诗悦, 李荣, 周晨霓, 等. 作物硒向果实、籽粒转运分配及限制因素研究[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 231-244.
- [35] 熊信果, 熊婧, 邹小云, 等. 硒对植物抗氧化系统及活性物质代谢的调控效应[J]. 江西农业学报, 2022, 34(1): 63-70.
- [36] 唐瑞琦, 张智, 康淑铭, 等. 外源硒施用对果蔬营养品质与风味物质形成的影响[J]. 福建农业学报, 2023, 38(7): 864-872.
- [37] 崔科飞, 代惠萍, 朱佳妮, 等. 硒胁迫对大叶紫花苜蓿生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2016(4): 133-136.
- [38] 高虎, 穆晓国, 安磊, 等. 蛋氨酸硒不同增施方式对南瓜品质、产量及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 153-159.
- [39] 任平, 常青, 付博, 等. 砷穗互作对越冬番茄光合作用及生长与产量的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(9): 1325-1334.
- [40] 刘浩, 庞婕, 李欢欢, 等. 叶面喷施硒与土壤水分耦合对番茄产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(22): 4433-4444.
- [41] 邵晨鹏, 杨燕宁, 程博, 等. 基于主成分和隶属函数法评价不同番茄果实品质[J]. 中国瓜菜, 2026, 39(3): 113-119.
- [42] 辛朗, 宋嘉雯, 付媛媛, 等. 咸淡水轮灌对设施番茄光合特性及叶片超微结构的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(19): 3784-3798.