

硒肥促进作物提质增产机理研究进展

谢亚萍^{1,2}, 袁明璐¹, 任亮³, 赵宝颢⁴, 张建平¹, 王利民¹, 李闻娟¹, 赵玮¹,
党照¹, 周阳晨², 王兴珍¹, 齐燕妮¹, 安明远⁴

(1. 甘肃省农业科学院作物研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院,
甘肃 兰州 730070; 3. 会宁县农业技术推广中心, 甘肃 会宁 730700;
4. 天水市种子站, 甘肃 天水 741020)

摘要: 硒(Se)是人和动物必需的微量元素。适量施用硒肥可促进作物生长、增强抗性、提高产量、改善品质。不同价态 Se 被广泛应用于减缓作物遭受各种胁迫损伤, 增强作物抗性、光合能力等领域。在资源、环境、人口和农业可持续发展研究日益重要背景下, 对 Se 肥改变作物生长发育、提高产量品质的研究将会不断增加。本文从外源 Se 在作物抵御生物胁迫与非生物胁迫、提高光合效率、促进营养物质摄取、提升产量品质方面发挥的作用, 现有研究的不足和问题, 以及对未来发展趋势的展望进行了综述, 旨在为 Se 肥在农业研究及生产中的应用提供理论依据和参考。

关键词: 硒肥; 提质; 增产; 生物胁迫; 非生物胁迫

中图分类号: S143.7

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)01-0008-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.01.002

Research Progress on the Mechanisms of Selenium Fertilizer in Promoting Crop Quality and Yield

XIE Yaping^{1,2}, YUAN Minglu¹, REN Liang³, ZHAO Baoxie⁴, ZHANG Jianping¹, WANG Limin¹, LI Wenjuan¹,
ZHAO Wei¹, DANG Zhao¹, ZHOU Yangchen², WANG Xingzhen¹, QI Yanni¹, AN Mingyuan⁴

(1. Crop Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 3. Huining County Agricultural Technology Extension Centre, Huining Gansu 730700, China; 4. Tianshui City Seed Station, Tianshui Gansu 741020, China)

Abstract: Selenium (Se) is an essential trace element for humans and animals. The proper application of selenium fertilizer can promote the growth of crops, enhance the resistance, and increase the yield and improve the quality. Selenium of different valence states has been widely used in the fields of alleviating crop stress damage, enhancing crop resistance and photosynthetic capacity. In the context of the increasing importance of research on resources, environment, population and sustainable agriculture, the research on Se fertilizer to change crop growth and development and improve yield and quality will continue to increase. This paper reviews the role of exogenous Se in helping crops resist biotic and abiotic stresses, improving photosynthetic efficiency, promoting nutrient uptake, and enhancing yield and quality. It also discusses the shortcomings and issues in existing research and provides an outlook on future trends. The aim is to provide theoretical basis and reference for the application of Se fertilizer in agricultural research and production.

Key words: Selenium fertilizer; Quality improvement; Yield increase; Biotic stress; Abiotic stress

世界人口在 2050 年预计达 97 亿, 人口的持续增加给农业生产带来前所未有的挑战^[1]。与此同时, 人们对高品质食物的需求急剧增加。气候

变化、有限的自然资源和环境恶化, 如高温、低温、干旱、高盐、重金属污染等, 给农业生产带来很大压力, 影响着作物产量的增加。传统化肥

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 2024年甘肃省重点人才项目(甘组通字[2024]4号); 国家自然科学基金(32460541); 甘肃省农业科学院科技创新专项(2022GAAS52); 国家特色油料产业技术体系(CARS-14-1-05); 安宁区科技计划项目(2023-JB-8); 甘肃省重点研发计划-国合领域(24YFWA002)。

作者简介: 谢亚萍(1976—), 女, 甘肃甘谷人, 副研究员, 主要从事作物高产高效栽培与推广工作。Email: xieyp2012@126.com。

通信作者: 张建平(1972—), 男, 甘肃天水人, 研究员, 硕导, 主要从事胡麻育种及推广研究工作。Email: 401101917@qq.com。

对提高农作物产量和改善品质发挥了极大作用,但也凸显出很多问题,如肥料利用率降低,富营养化等。

伴随农业科技的发展,各种微量元素肥料应运而生,硒(Se)肥是其中之一。硒是动物和人体必需的一种微量营养元素,在人体内起着预防心脑血管疾病、调节人体免疫、降低肿瘤发病危险程度等重要作用,但含量过高会产生毒性^[1]。硒也是有益于农作物生长的营养元素之一,适量 Se 能促进植物生长以及对矿物质的吸收与利用,增强抗氧化能力,降低环境胁迫对植物的伤害,在植物抵御生物胁迫与非生物胁迫中发挥重要作用。研究表明,适量 Se 可增强作物抗性,促进产量增加,品质提升^[2]。本文概述 Se 提升作物产量品质的研究进展,以期 Se 肥在农业领域的研究及应用提供参考,推进 Se 肥在农业生产中的应用。

1 硒抵御生物胁迫

作物在生长中面临着外界的诸多挑战,各类病原菌的侵害是其中之一。Se 作为一种重金属离子,在植物受到病原菌入侵后会抑制病原菌的生长。因此,农业生产中,Se 常被用于防治多种作物病害,以减轻病害产生的损失,提高农作物产量及品质。研究发现,外源 Se 能抑制油菜核盘菌的生长,低浓度 Se(<5 mg/L)未显著抑制核盘菌核的萌发,当 Se 浓度达到 50 mg/L 时,显著抑制核盘菌菌丝的生长(抑制率 82.6%),却不能使其致死^[3]。100 mg/L 亚硒酸钠(Na_2SeO_3)对小麦赤霉病的防治效果显著,田间防效达到 43.92%^[4]。外源 Se 在抑制病菌产生的同时,还可以达到富 Se 的效果。李林桂^[5]发现,外源 Se 可显著抑制油菜核盘菌的生长,其抑制核盘菌的最佳浓度为 100 mg/L,抑制率达 78.44%;同时发现,油菜富 Se 效果增强,且处于安全食用范围之内。另外发现外源 Se 能够抑制鲜食玉米采后穗腐病的发生^[6]。吴之琳^[7]研究得出,Se 处理可在有效控制苹果和番茄采后青霉病和灰霉病的同时达到果实富 Se 的功效,且处于安全食用范围之内。Somalraju 等^[8]发现,叶面喷施 Se 可降低马铃薯晚疫病的严重程度和发病率,提高马铃薯产量和品质。

外源 Se 处理可提高植株中 Se 的累积,对作物

病虫害有毒害作用,导致危害作物生长的病虫害的死亡率增加、繁殖率降低、生命周期缩短^[9]。通过外源 Se 处理,诱导植物抗病系统完善,增强其抵抗能力,降低发病率,进而达到对作物生物胁迫的防治。研究发现,喷施 100 mg/L 的 Na_2SeO_3 7 d 后,小麦蚜虫的防治效果达到 57.64%^[4]。20 mg/L 纳米硒(SeNPs)能显著降低向日葵抗氧化酶活性,提高地老虎幼虫的死亡率^[10]。10 mg/L 的 SeNPs 能降低蚜虫在丹参上的存活率和繁殖力^[11]。无机 Se 通过增加斜纹夜蛾的拒食性,对玉米、棉花、花生等作物田间年龄较大或过成熟的斜纹夜蛾幼虫有明显的抑制作用^[12]。用 10 $\mu\text{mol/L}$ Na_2SeO_3 处理水稻,既能促进水稻生长,也能降低白背飞虱的存活率^[13]。

2 硒抵御非生物胁迫

2.1 硒抵御温度胁迫提升作物产量品质

温度过高或过低都会诱导植物氧化应激反应,影响体内多种酶活的稳定,干扰正常的生长发育,影响作物产量和品质^[14]。Se 通过清除植物体内过量自由基,增强植物的抗逆能力,缓解低温对植物的胁迫损伤。叶面喷施外源 Se 能增强高粱植株抗氧化能力,缓解高温胁迫对作物的影响^[15]。用 1:50 稀释倍数的 Se 肥浸种 48 h,可增强低温胁迫下玉米种子的抗逆性,具有显著的促根壮苗作用^[16]。此外,外源 Se 可诱导 *PR1*、*ICE1*、*CYSb*、*LEA1* 和 *Osmotin* 等冷诱导相关基因的表达,从而增强低温胁迫下番茄幼苗的抗冷性^[14]。张雪莲等^[17]研究发现,0.6 mg/kg Na_2SeO_3 明显减少辣椒细胞质膜透性,提高花粉萌发率、抗氧化酶活性和叶绿素含量,增加果实产量及干物质积累量。

2.2 硒抵御重金属胁迫提升作物产量品质

随着重金属污染的日益严重,高迁移率的重金属易进入植物根部,随之传递到地上部,导致作物产量的降低以及可食部分中有毒物质的累积。由于 Se 抑制植物细胞内可移动重金属离子的浓度,降低重金属向植物地上部的转运率,使植物具有更高水平的金属解毒机制,缓解植物遭受重金属伤害,另外 Se 通过清除植物体内过量自由基,缓解重金属对植物的胁迫损伤^[14]。因此,通过施加适量 Se 可降低作物受重金属毒害的损伤。Hu 等^[18]通过研究 Se 在水稻体内参与 As 转运活动

相关调控螯合肽酶的活性发现, Se 促进重金属螯合蛋白的形成, 阻碍重金属在植物根部向地上部转移, 缓解 As 对水稻植株的胁迫, 减少水稻籽粒 As 含量, 提升水稻品质。此外, Se 还可以抑制重金属 Cd 的摄取, 缓解作物遭受胁迫伤害, 进而有益于产量品质^[19]。当前, 有关适量 Se 缓解植物重金属毒害的机理研究主要集中在 Se 增强植物抗氧化作用上。韩锋^[20]发现, 施 Se 能减轻生菜氧化损伤, 缓解 Cd 胁迫, 提高生菜鲜干重, 增加生菜对微量元素的吸收, 进而改善品质。此外, Se 能抑制辣椒中 Cd 的蓄积, 降低 Cd 在辣椒中的积累^[21]。Liu 等^[22]研究发现, 外源 Se 显著降低黑粒小麦籽粒中 Pb、As、Hg、Cd 含量, 显著提高籽粒中 Se、Fe、Zn、Mn 含量。Se 对重金属元素有拮抗作用, 表现为硬粒小麦各库源器官中 Pb、As、Cd 含量明显下降^[23]。小白菜叶面喷施 Se 可显著降低根、茎组织中 Cd、Pb 和 Hg 的含量, 增加有机 Se 含量^[24]。外源 Se 能有效增加 Cd 胁迫下樱桃番茄叶片中叶绿素的合成, 降低 Cd 对光系统 II (PS II) 的损伤及热耗散, 有效促进樱桃番茄的光合能力, 提高果实产量、维生素 C、可溶性糖含量及糖酸比, 促进果实中 Ca、Fe、Zn、Cu 的积累, 提高果实风味, 且 Se 可降低果实中 Cd 的积累, 降低 Cd 污染造成的安全风险^[25]。

2.3 硒抵御干旱胁迫提升作物产量品质

干旱胁迫是田间条件下存在最广泛的一种作物生长逆境, 也是制约我国农业发展的主要问题之一。干旱胁迫产生过量活性氧(ROS), 导致植物细胞产生严重的过氧化损伤, 严重时可能造成细胞膨压完全丧失, 直至植株死亡。Se 可通过清除植物体内过量自由基, 缓解干旱对植物的胁迫损伤。因此, 适量 Se 能够显著降低番茄植株 ROS 的水平, 缓解干旱对番茄植株的毒害, 并促进植株在干旱胁迫下的生长^[26]。郁飞燕^[27]研究发现, Se 通过促进可溶性糖和游离氨基酸的转移来缓解干旱对植物造成的胁迫。另有研究表明, Se 可通过调控水分状态来提高植物对干旱胁迫的抗性^[28]。可见, Se 可通过清除植物体内过量的自由基, 促进可溶性糖和游离氨基酸等渗透物转移、调控水分状态来增强作物对干旱胁迫的抗性, 从而提高作物产量、改善品质。

2.4 硒抵御盐胁迫提升作物产量品质

盐胁迫是植物最主要的非生物胁迫之一, 也是影响农作物生长及其产量和品质的主要原因之一。近年来, 随着我国土壤盐渍化问题的日益严重, 提高作物的耐盐性已成为农业生产中亟待解决的问题。Se 作为一种有益的微量元素, 可以提高作物的抗盐性, 促进植物生长发育^[29]。盐分通过在植株体内积累大量 ROS, 抑制光合作用、碳氮代谢, 阻碍作物生长。因此, 盐胁迫下, Se 的添加可以缓解盐胁迫对作物造成的损伤, 提高植物耐盐性。小麦上的研究表明, Se 通过增加抗氧化物和渗透物增强小麦抗盐能力, Se 在 0~5.0 mg/kg 或 0~11.5 mg/L 可有效提高盐碱地小麦的营养品质和产量^[23,30]。在 50 mmol/L NaCl 盐度条件下, Se 能改善草莓和番茄植株的生长和果实品质^[31-32]。

盐胁迫也会导致渗透胁迫, 影响植物的生理健康。外源 Se 减少盐胁迫下香菜植株的电解质渗漏, 显著促进植株营养生长、提高果实产量和精油产量^[33]。外源 Se 施用在盐胁迫下栽培的大麦上, 增加了叶片中 Se 的积累, 减缓了细胞膜损伤^[34]。综上所述, 适量 Se 通过增加抗氧化物和渗透物、减轻细胞膜损伤、缓解作物盐胁迫、提高作物抗盐性, 从而增加产量, 改善品质。

2.5 硒增强作物光合能力提升产量品质

外源 Se 通过提高作物叶片光合色素含量、气孔导度、光合速率以及蔗糖和淀粉的合成, 促进光合作用, 增加产量, 改善品质。研究表明, 外源 Se 可促进黄瓜植株生长, 提高叶片叶绿素相对含量和净光合速率, 提高黄瓜果实 Se 含量及营养品质^[35]。3.0 mg/L 的 Na_2SeO_3 处理显著提高了苦荞叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量, 促进叶片中的蔗糖、淀粉的合成和籽粒中的淀粉积累^[36]。外源 Se 能够促进辣椒光合色素含量、干物质和辣椒中 Se 含量增加^[21]。8 $\mu\text{mol/L}$ 的 Na_2SeO_3 处理后, 紫色生菜的光合速率提升, 叶绿素及类胡萝卜素含量升高; 叶片花青素、抗坏血酸和可溶性糖含量增加, K、Ca、Fe 含量显著增加^[37]。叶面喷 Se 显著提升了南瓜的光合特性, Se 含量和产量增加^[38]。玉米叶片施用 1 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 Se, 叶片光合色素、气孔导度、光合速率提高, 光合能力增强^[39]。20 mg/L SeNPs 喷施辣椒叶片,

通过促进光合作用, 促进辣椒素积累, 提升辣椒品质^[40]。

2.6 硒促进作物营养获取提高产量品质

Se 可被植物组织吸收、同化, 进而参与到植物的生长发育、次级代谢和应激反应等过程。利用 10 mg/L 的 SeNPs 喷施甜瓜植株, 叶肉细胞复合淀粉颗粒增多, 果糖、葡萄糖、半乳糖醇等含量升高^[41]。同样浓度的 SeNPs 促进樱桃的葡萄糖分解、丙酮酸和三羧酸循环代谢途径, 增加黄酮类、氨基酸和维生素含量^[42]。在黄瓜上, 施用外源 Se 能提高可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 的含量^[35]。

Se 可促进植物激素乙烯、生长素(IAA)和细胞分裂素的产生^[43]。烟草上的研究表明, 1 mg/L Na₂SeO₃ 处理下, 烟草 IAA 含量增高、生物量显著提高、抗氧化能力增强; 10 mg/L 处理下, IAA 含量降低、生长发育受到抑制^[44]。喷氨基酸 Se 叶面肥, 明显提高了葡萄叶片的玉米素核苷(ZR)和赤霉素(GA₃)含量, 且显著降低了叶片的脱落酸(ABA)含量^[45]。施 Se 提高了苜蓿的总黄酮、花青素、茶多酚、还原糖、可溶性糖、Mn、Fe、Zn、Vc、IAA 含量和牧草产量^[46]。施用 1 500 g/hm² 氨基葡萄糖硒(GlcN-Se)条件下, 茶叶水杨酸(SA)水平上调了 76.58%, 茉莉酸甲酯(MJA)提高了 81.44%, 脱落酸(ABA)提高了 1.22 倍, 并且 GlcN-Se 的施用显著提高了常量元素以及微量元素的含量, 还改善了茶叶非挥发性成分和挥发性成分的含量, 赋予了茶汤鲜甜回味和花蜜芳香^[47]。此外, 50 g/hm² 的 NaSeO₃ 可增强胡麻光合作用, 提高产量, 增加籽粒 Se 含量, 显著提升籽粒营养价值^[48]。使用 20 mg/L 纳米硒喷施辣椒叶片, 辣椒可溶性糖含量提高, 品质提升^[40]。

3 小结与展望

Se 是生物体必需的一种微量营养元素。适量 Se 通过清除作物体内过量自由基和活性氧, 增加抗氧化物和渗透物, 缓解生物胁迫及非生物胁迫对作物造成的损伤, 激活作物抗性防御机制, 诱导抗病系统的完善, 增强抗性, 促进作物对矿物质的吸收和利用及营养物质的摄取, 增加光合能力, 最终使得作物提质增产。综上所述, Se 在农业领域的应用较广泛, 且应用前景较大。但部分

作用机制尚不清楚, 且大多数处于研究阶段, 进入推广状态的较少。因此, 未来需从分子生物学角度, 采用多学科分析的手段, 展开多层面探讨。同时, 应对不同价态 Se 赋予作物抗逆性差异进行深入研究, 实现不同价态 Se 在作物生产中的最优应用性。此外, 综合考虑 Se 的施用形态、施用量及其与作物的匹配性, 充分发挥 Se 在作物提质增产中的最大功效。

参考文献:

- [1] KAH M, KOOKANA R S, GOGOS A, et al. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(8): 677–684.
- [2] 郭斌, 胡梅, 张爱琴, 等. 外源硒添加对双孢蘑菇产量和营养品质及重金属富集的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(5): 451–456.
- [3] 贾芬, 朱婷, 赵小虎, 等. 硒对油菜菌核病菌的抑制作用[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(25): 176–181.
- [4] 蒋开放. 矿质元素硒、硅、硼对小麦病虫害的控制作用与小麦富硒增产研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [5] 李林桂. 褪黑素和硒对油菜菌核病的影响及其调控机制初步研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [6] 田睿轩. 硒和褪黑素对鲜食玉米采后穗腐病及贮藏品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [7] 吴之琳. 硒对果蔬采后病害的控制及同步生产富硒果实的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- [8] SOMALRAJU A, MCCALLUM J L, MAIN D, et al. Foliar selenium application reduces late blight severity and incidence in potato and acts as a pathogen growth inhibitor and elicitor of induced plant defence[J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2021, 44(1): 39–55.
- [9] LI Q, XIAN L, YUAN L, et al. The use of selenium for controlling plant fungal diseases and insect pests[J]. *Frontier in Plant Science*, 2023, 14: 1102594.
- [10] AMIN M A, ISMAIL M A, BADAWY A A, et al. The potency of fungal-fabricated selenium nanoparticles to improve the growth performance of *Helianthus annuus* L. and control of cutworm *Agrotis ipsilon*[J]. *Catalysts*, 2021, 11(12): 1551.
- [11] ZHANG Y H, ZHANG T, PAN Y Y, et al. Nano-selenium promotes the product quality and plant defense of *Salvia miltiorrhiza* by inducing tanshinones and salicylic acids accumulation[J]. *Industrial Crops and*

- Products, 2023, 195: 116436.
- [12] VICKERMAN D B, SHANNON M C, BANUELOS G S, et al. Evaluation of atriplex lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest[J]. Environmental pollution, 2002, 120(2): 463-473.
- [13] 郑金艳, 孙乾阳, 张 宁, 等. 外源硒对水稻生长及白背飞虱存活的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(27): 121-125.
- [14] 吴 红. 外源硒与不同激素及其互作对低温胁迫下番茄幼苗抗冷性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [15] DJANAGUIRAMAN M, PRASAD P V V, SEPPANEN M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 999-1007.
- [16] 王淑英, 樊廷录, 程万莉, 等. 硒肥浸种对低温胁迫玉米种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(6): 54-58.
- [17] 张雪莲, 罗德旭, 杨 红, 等. 外源褪黑素和硒对高温胁迫下辣椒生理特性和抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1729-1738.
- [18] HU Y, DUAN G L, HUANG Y Z, et al. Interactive effects of different inorganic as and Se species on their uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L) seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(5): 3955-3962.
- [19] 杨 静, 王瑞昕, 方 正, 等. 叶面喷施硅和硒对水稻种积累及光合参数的影响[J]. 土壤, 2022, 54(3): 547-555.
- [20] 韩 锋. 施硒缓解生菜镉-微塑料联合胁迫效应的机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- [21] 陈星旺. 钙、硒相互作用对辣椒蓄积镉的影响研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2024.
- [22] LIU Y, HUANG S, JIANG Z, et al. Selenium biofortification modulates plant growth, microelement and heavy metal concentrations, selenium uptake, and accumulation in black-grained wheat[J]. Frontier in Plant Science, 2021, 12: 748523.
- [23] 梁 勇. 外源硒对硬粒小麦营养积累及盐胁迫缓解效应研究[D]. 成都: 成都大学, 2020.
- [24] ZHU Y Z, DONG Y W, ZHU N, et al. Foliar application of biosynthetic nano-selenium alleviates the toxicity of Cd, Pb, and Hg in *Brassica chinensis* by inhibiting heavy metal adsorption and improving antioxidant system in plant[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 240: 113681.
- [25] 谢永东. 樱桃番茄响应镉胁迫的基因型差异及外源硒的缓解效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
- [26] 宋嘉雯. 干旱胁迫下叶面施硒对温室番茄生长发育和产量品质的调控效应[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2023.
- [27] 郁飞燕. 干旱胁迫下硒对小麦种子萌发的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.
- [28] PROIETTI P, NASINI L, DEL BUONO D, et al. Selenium protects olive (*Olea europaea* L.) from drought stress[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 165-171.
- [29] 于兰箫. 不同硒源及施用方式对番茄耐盐性、产量及品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [30] ELKELISH A A, SOLIMAN M H, ALHAITHLOUL H A, et al. Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 137: 144-153.
- [31] ZAHEDI S M, ABDELRAHMAN M, HOSSEINI M S, et al. Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles[J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 246-258.
- [32] MORALES-ESPINOZA M C, CADENAS-PLIEGO G, PÉREZ-ALVAREZ M, et al. Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under NaCl stress[J]. Molecules, 2019, 24(17): 3030.
- [33] EL-KINANY R G, BRENGI S H, NASSAR A K, et al. Enhancement of plant growth, chemical composition and secondary metabolites of essential oil of salt-stressed coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants using selenium, nano-selenium, and glycine betaine[J]. Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants, 2019, 6(3): 151-173.
- [34] HABIBI G, ALEYASIN Y. Green synthesis of Se nanoparticles and its effect on salt tolerance of barley plants[J]. International Journal of Nano Dimension, 2020, 11(2): 145-157.
- [35] 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.
- [36] 甘 圳. 外施硒对苦荞生长发育、产量品质及转录

- 调控表达的影响分析[D]. 成都: 成都大学, 2024.
- [37] 黄思杰, 刘丹丹, 杨育文, 等. 外源硒对紫色生菜生理指标及营养品质的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(18): 6126–6133.
- [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] JIANG C Q, ZU C L, LU D J, et al. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress[J]. Scientific reports, 2017, 7: 42039.
- [40] LI D, ZHOU C R, ZHANG J B, et al. Nanoselenium foliar applications enhance the nutrient quality of pepper by activating the capsaicinoid synthetic pathway[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(37): 9888–9895.
- [41] KANG L, WU Y L, ZHANG J B, et al. Nano-selenium enhances the antioxidant capacity, organic acids and cucurbitacin B in melon (*Cucumis melo* L.) plants[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 241: 113777.
- [42] CHENG B X, WANG C X, CHEN F R, et al. Multiomics understanding of improved quality in cherry radish (*Raphanus sativus* L. var. radculus pers) after foliar application of selenium nanomaterials[J]. Science of the Total Environment, 2022, 824: 153712.
- [43] BADAWEY S A, ZAYED B A, BASSIOUNI S, et al. Influence of nano silicon and nano selenium on root characters, growth, selectivityion, yield, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity conditions [J]. Plants, 2021, 10(8): 1657.
- [44] 罗 勇, 刘胜波, 张 涛, 等. 不同浓度硒对烟草根系形态、生长素含量及相关基因表达的影响[J]. 烟草科技, 2019, 52(7): 1–9.
- [45] 王 帅. 设施葡萄延迟栽培叶片衰老生理及抗衰老技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [46] 张士敏. 硒调控紫花苜蓿生长发育及木质素代谢的机制研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2023.
- [47] 张亚园. 外源硒对茶树生长和茶叶品质的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
- [48] 王文霞, 畅博凯, 夏 清, 等. 叶面喷硒对胡麻生理特性、产量及品质的影响[J]. 作物杂志, 2024, 40(4): 130–137.