

农药胁迫和硒元素等干预对作物品质的影响

李 栋, 李佳奇, 连文超, 潘灿平*

(中国农业大学理学院, 北京 100193)

摘 要: 农药是控制病虫害、促进作物高产的有效手段, 但农药残留可能会产生药害、并对作物抗氧化系统乃至营养品质和风味产生影响。硒元素是构成抗氧化剂谷胱甘肽过氧化物酶的活性成分, 低浓度的硒在植物中有各种生物学效应, 包括促进植物生长、提高产量并抵消多种非生物因子诱导的氧化应激或病原菌感染, 且有可能通过调节植物内源激素通路而合成更多的黄酮、氨基酸、多酚、萜烯等成分来提升作物营养品质的功效。纳米材料具有扩散阻力小, 吸附能力强和更快的吸附平衡等独特属性, 纳米载体负载营养物质以及微量元素纳米化能够提高植物养分的利用率、减少养分的损失、刺激植物的生长, 其在激活植物健康方面具有广阔的应用前景。纳米硒在上调含硒酶活性方面具有更高的效率, 更低的毒性和更高的生物有效性, 并可以显著提升作物抗氧化活性。本文综述了近些年农药使用对农产品品质影响及成因, 并介绍了碳纳米材料和纳米硒作为植物健康激活剂在农产品提质增效中的应用, 以期指导农药科学使用, 并为农产品提质增效提供理论参考。

关键词: 农产品; 农药; 硒; 纳米材料; 作物品质

Effects of pesticide stress, selenium and other elements intervention on crop quality

LI Dong, LI Jia-Qi, LIAN Wen-Chao, PAN Can-Ping*

(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

ABSTRACT: Pesticides are an effective means to control pests and weeds and promote high yields of crops. However, pesticide residues may cause phytotoxicity and affect crop antioxidant systems and even nutritional quality and flavor. Selenium is the active constituent of the antioxidant glutathione peroxidase. Low concentrations of selenium have various biological effects in plants, including promoting plant growth, increasing yield, and counteracting a variety of abiotic factors-induced oxidative stress or pathogen infections. Moreover, it is also possible to synthesize more flavonoids, amino acids, polyphenols, terpenes, and other ingredients by regulating the endogenous hormone pathway of plants to enhance the nutritional quality of crops. Nanomaterials have unique properties such as low diffusion resistance, strong adsorption capacity, and faster adsorption equilibrium. Nanocarrier loading nutrients and trace element nanocrystallization can improve plant nutrient utilization, reduce nutrient loss,

基金项目: 广西科技重大专项(AA17202038)、农产品供应全程质量控制集成应用及示范基地建设(D171100002017001)、国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-08)

Fund: Supported by Guangxi Science and Technology Major Projects (AA17202038), Beijing Municipal Science and Technology Project (D171100002017001), and Construction of national modern agricultural industrial technology system(CARS-08).

***通讯作者:** 潘灿平, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品和环境中药残留分析、农药风险评估。E-mail: canpingp@cau.edu.cn。

***Corresponding author:** PAN Can-Ping, Ph.D, Professor, College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China. E-mail: canpingp@cau.edu.cn

and stimulate plant growth. It has broad application prospects in activating plant health. Nano-selenium has higher efficiency, lower toxicity and higher bioavailability in up-regulating selenoenzyme activity, and can significantly improve the antioxidant activity of crops. This paper reviewed the effects of pesticide use on the quality of agricultural products in recent years, and introduced the application of carbon nanomaterials and nano-selenium as plant health activators in improving the quality of agricultural products, in order to guide the scientific use of pesticides, and provide a theoretical reference for improving the quality and efficiency of agricultural products.

KEY WORDS: agriculture commodity; pesticide; selenium; nano materials; crop quality

1 引言

在传统的种植农业中, 化学农药的使用虽然能有效防治病虫害并提高作物产量, 但农药残留及其胁迫对作物生长产生的不良影响, 并导致农产品品质大幅度下降的情况时常见到报道^[1-3]。国内外关于农药施用对作物品质影响的研究尚缺少系统性, 缺少对作物整个生产过程农药综合影响的评价, 对不同结构和作用机制农药影响产品品质的规律不清楚、缺少消除农药对作物品质负面影响的干预机制与提升效果的研究。因此, 有必要开发其他方法来提升水果和蔬菜的品质, 保证其安全、有效、经济、增值相兼容, 例如硒(Se)生物强化的作物。硒是氨基酸、硒代半胱氨酸和一些重要酶的组成部分, 包括谷胱甘肽过氧化物酶、碘甲腺氨酸脱碘酶和硫氧还蛋白还原酶, 具有非常特殊的生物学作用。硒在生物体的能量代谢和基因表达中起重要作用, 被认为是正常化细胞增殖和调节体内平衡机制的重要营养素^[4-6]。硒是植物生长发育有益的元素, 参与植物的新陈代谢, 在低浓度下发挥多种有益效果, 包括高等植物的生长促进活性, 通过增强其抗氧化能力来增强植物的耐受性和增加植物对氧化应激的抵抗力^[7,8]。

本文综述了近些年农药使用对农产品品质的影响及成因, 并介绍了碳纳米材料和纳米硒作为植物健康激活剂在农产品提质增效中的应用。以期指导推进农业生态持续发展, 为减少农用化学品投入、提高农产品质量和安全性, 发展基于作物健康和品质管理的种植模式提供参考。

2 农药对作物生长和代谢的影响

农用化学品被引入旨在提高作物产量和保护作物免受害虫侵害。由于害虫对化学品的适应性和抗性, 每年都会使用更高的量和新化合物来保护作物, 造成不良副作用并提高粮食生产成本。农药可通过多种机制影响作物的生长和发育, 如抑制光合作用、细胞分裂、酶功能, 影响土壤和叶际微生物群落、根系生长和叶形成等生物过程, 干扰色素、蛋白质或 DNA 的合成、破坏细胞膜等^[9]。已报导的诸多研究结果表明在作物不同生育期使用农药均可能使作物的生化、生理、不同酶和非酶类抗氧化系统发生改变, 最终影响产量和品

质^[10]。因此, 必须根据农药的性质和特定的农业系统来考虑农药的副作用。研究应该包括农作物中农药的影响和持久性, 农药对土壤微生物菌群、相关的氮代谢等产生的影响。此外, 应该鼓励安全的替代方法, 如开发相对经济的生物纳米农药、开发基于纳米材料的新型肥料等, 来减少农用化学品的使用, 从而达到作物提质增效的效果。

2.1 农药对作物生长发育和品质的影响

当作物受到农药胁迫, 其器官尺寸的增加和干物质(生物量)的积累都会受到不同程度的影响, 最终导致产量和品质的下降。不同类别的农药对玉米、番茄、小麦、大蒜、水稻、柑橘生长和品质的影响(表 1)^[11,12]。在二甲戊灵浓度(10.0 mg/kg)条件下, 玉米处理组发芽率急剧下降约 69%, 这可能归因于除草剂干扰淀粉酶合成过程, 对种子储备过程中的萌发产生不利影响^[11]。在玉米种子和幼苗萌发阶段, 高浓度吡丙醚(0.6 mg/kg)同样导致玉米生长参数显著降低, 光合色素除花青素之外, 其他成分含量都下降^[12]。本课题组选取玉米作为研究对象, 高浓度氯吡嘧磺隆抑制其谷胱甘肽 S-转移酶的活性, 导致体内氧化损伤不能逆转, 最终导致植物死亡^[13]。在番茄生长不同生长周期, 发现种子的萌发率、光合作用^[14]、抗氧化成分(番茄红素、总酚等)含量^[15,16]、矿物质养分含量和水溶性代谢物^[17]受到不同程度的影响, 可能会引起质量特征的变化, 影响番茄的品质。在小麦的种植中使用过高浓度的除草剂, 株高和籽粒产量^[18]、叶绿素的含量^[19]均有不同程度的下降, 施用剂量越大抑制作用越明显。在不同浓度毒死蜱、对硫磷灌根胁迫条件下, 大蒜素含量与 2 种农药使用浓度有明显的负剂量效应关系: 即随着用药浓度的增加, 大蒜素的含量逐渐降低, 可能是有机磷农药水解成碱性, 与蒜氨酸或蒜酶发生酸碱中和反应^[20]。

2.2 农药对作物抗氧化系统的影响

农药在种子、茎、叶片或果实上施用后, 被植物体吸收, 从施药部位渗入到植物体内并向其他部位移动。农药对植物的胁迫作用可能促使植物的各种生理反应和氧化损伤, 也能够诱导活性氧(reactive oxygen, ROS)在细胞内过度产生, 与大分子尤其是脂蛋白的反应能够迅速引起过氧化损伤, 从而破坏植物细胞^[21-24]。农药对作物抗氧化系统的影响见表 2。随着施药浓度的增加, 对上海青叶片超氧化物歧化酶

(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)^[25], 蚕豆和玉米 SOD、CAT、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)^[26], 黄瓜 GSH-Px、CAT^[27], 黑三棱过氧化物酶(peroxidase, POD)、SOD、CAT^[28]活性有显著抑制作用。高剂量作用下, 大叶黄杨 SOD^[29]、番茄 CAT、POD、SOD 被激活, 活性也得以提升, 但也发现阿维菌素、噻虫嗪、吡丙醚和啶虫脒影响番茄的抗氧化系统, 番茄茎的干物质、叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量减少, 叶片中的游离脯氨酸和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量升高^[30]。袁兴超等^[31]通过低浓度(2 mg/L)和高浓度(10 mg/L)草甘膦对铜绿微囊藻

进行培养, 深入研究草甘膦对脱氢抗坏血酸还原酶(dehydroascorbic acid reductase, DHAR)和谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)活性的影响, 低浓度(2 mg/L)草甘膦处理可以刺激微囊藻的生长和蛋白合成。这可能是由于 2 mg/L 草甘膦会刺激微囊藻体内的 DHAR 和 GR 酶的活性, 从而再生更多的抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)与谷胱甘肽(glutathione, GSH); 高浓度(10 mg/L)对氧化系统的影响与低浓度的影响恰好相反。张琼等^[32]发现草甘膦在浓度较低(5 mg/L 或 10 mg/L)时可以刺激微囊藻生物量和蛋白合成; 高浓度(20 mg/L 或 40 mg/L)草甘膦诱发了微囊藻的氧化损伤, 激活了 CAT、POD、SOD 等抗氧化酶。

表 1 农药对作物生长发育和品质的影响
Table 1 Effect of pesticides on crop growth and quality

作物	农药	类别	影响	参考文献
玉米	二甲戊灵	除草剂	二甲戊灵浓度(0.5, 1.0, 2.5, 5.0 和 10.0 mg/kg)的增加, 玉米对照组种子萌发最大(95%), 处理组发芽率急剧下降	[11]
	吡丙醚	杀虫剂	吡丙醚(0.4 和 0.6 mg/kg)会对种子萌发和幼苗生长产生不利影响, 显著抑制玉米的生长	[12]
	氯吡嘧磺隆	除草剂	在一定浓度范围内(0.1~1000 µg/L)的氯吡嘧磺隆会引起玉米和大豆次生根、下胚轴, 叶柄和子叶发育不良, 降低游离氨基酸和叶绿素(a, b)含量, 抑制乙酰乳酸合成酶的活性	[13]
番茄	甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、 氯氟菊酯、氯氟氰菊酯、吡虫啉	杀虫剂	高剂量的使用会对种子萌发率、叶绿素的合成产生不利影响	[14]
	环酰菌胺、吡唑啉菌酯和啶酰菌胺	杀菌剂	可溶性固形物的含量提高, 而抗氧化成分咖啡酸、柚皮素和总酚的含量明显降低	[15]
	乙烯利	植物生长调节剂	果实中的 Vc、番茄红素和可溶性固形物的含量都有所降低, 且随着使用剂量的增大降低番茄的品质	[16]
	氟啶脲、百菌清	杀虫剂、杀菌剂	矿质养分含量(Fe 和 P 除外)影响不大, 但影响了矿质养分与可溶性芳香代谢物之间的相关性	[17]
小麦	苯磺隆、使它隆、 异丙隆、骠马、绿麦隆	除草剂	株高和籽粒产量均有不同程度的下降, 施用剂量越大抑制作用越明显	[18]
	二甲四氯	除草剂	随着喷施浓度的不断升高, 叶绿素的含量逐渐下降, 光合作用受到显著抑制	[19]
大蒜	毒死蜱、对硫磷	杀虫剂	随着用药浓度的增加, 大蒜素的含量逐渐降低	[20]
水稻	三环唑、三唑磷、吡虫啉	杀虫剂、杀菌剂	光合速率均不同程度上受到了抑制, 降低了叶片中可溶性还原糖和氨基酸的含量	[21]
柑橘	联苯腈酯、阿维菌素	杀虫剂、杀螨剂	降低维生素 C 含量及固酸比值	[22]

表 2 农药对作物抗氧化系统的影响
Table 2 Effect of pesticides on crop antioxidant system

作物	农药	类别	影响	参考文献
上海青	高效氯氟氰菊酯、 毒死蜱	杀虫剂	SOD、CAT 的活性均受到抑制	[25]
蚕豆、玉米	伏草隆、莠去津、 砒嘧磺隆	除草剂	SOD、CAT、抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX)和 愈创木酚过氧化物酶(guaiacol peroxidase, GPX)的活性有显著 抑制作用, 砒嘧磺隆则对上述 酶类几乎没有影响	[26]
黄瓜	多菌灵	杀菌剂	黄瓜叶中 GPX 和 CAT 的 活性显著降低	[27]
黑三棱	乙氧氟草醚	除草剂	加入乙氧氟草醚的黑三棱初期膜脂 过氧化程度高, POD 活性、SOD 活 性和 CAT 活性先升高后下降, 叶绿 素的合成受到抑制	[28]
大叶黄杨	溴氰菊酯、氧乐果、 吡虫啉、苦参碱、阿维菌素	杀虫剂	叶片中 SOD 和脯氨酸的含量均较 对照植物显著提高	[29]
番茄	阿维菌素、噻虫嗪、 吡丙醚、啶虫脒	杀虫剂	高剂量作用下, 导致叶片电解质渗 出率提高, CAT、POD 和 SOD 的活 性也得以提升	[30]
微囊藻	草甘膦	除草剂	高浓度(10 mg/L)草甘膦处理则 导致微囊藻的生物量减少, 氧化损伤加重	[31]
	草甘膦	除草剂	高浓度(20 或 40 mg/L)时起到明显 抑制作用, 同时 MDA 含量显著增加	[32]

3 硒提升作物品质和增强作物抗氧化系统的研究

3.1 硒提升作物品质的研究

硒(Se)是动物和人类的必需元素, 具有多种重要的生物学功能。硒在自然界的存在方式分为 2 种, 即无机硒和有机硒。无机硒的形态主要有硒单质(Se^0)、硒酸盐(SeO_4^{2-})和亚硒酸盐(SeO_3^{2-}), 有机形态的硒主要是指硒代氨基酸^[33]。土壤中 Se 浓度和形态受各种物理、化学和生物因素的控制, 常见的无机阴离子包括 HSeO_3^{2-} 、 SeO_3^{2-} 、 H_2SeO_4^+ 、 SeO_4^{2-} 和 HSeO_4^{4-} ^[34]。 SeO_4^{2-} 是氧化条件下的优选形式, 而在温和的还原条件下, SeO_3^{2-} 可能占主导地位^[33]。据报道, 不同硒形态在土壤中的作物有效性按以下顺序降低: 硒酸盐>硒代蛋氨酸>硒代半胱氨酸>亚硒酸盐>元素硒>硒化物^[35]。作物对 Se 的吸收依赖于硒浓度和形态, 对硒的吸收(主要是 SeO_4^{2-} 和 SeO_3^{2-}) 均可被还原成硒化物(Se^{2-}) 并通过 S 同化途径转化为硒代氨基酸, 包括硒代半胱氨酸(selenocysteine, SeCys)和硒代蛋氨酸(selenomethionine, SeMet), 这 2 种氨基酸都可以掺入蛋白

质中^[35]。硒对作物的毒性, 可归因于氧化应激和其他代谢异常的产生, 因为硒非特异性取代蛋白质和其他分子中的 S 导致其功能受损^[36]。关于 Se 解毒机制, 涉及金属硫蛋白和总硫醇以及谷胱甘肽-s-转移酶活性, 其在较低的 Se 浓度下增加, 而在过量的 Se 浓度显著降低^[37]。长期施用硒肥对土壤中过量硒的积累, 这可能对农业生态系统产生毒害。因此, 需要进一步研究施硒量、土壤或叶面上的硒形态组成, 有机硒在可食用作物组织中的比例。

硒主要通过食物链进入人体, 其中膳食补充是最重要的环节^[38]。近年来一些研究已经提出了将硒肥施用于作物、积累更多硒的品种的遗传选择、以及增强硒摄取的基因工程等不同的方法来增加作物中的硒含量, 但目前应用最广泛的方法是在种植过程施用外源硒肥^[34,39]。硒肥施用于作物后, 在使作物富硒的同时还能显著地提升作物品质。硒对作物品质的影响见表 3。He 等^[40]在盆栽试验中, 将锌肥($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 和硒肥(Na_2SeO_3) 施用于土壤, 种植的莴苣显著减少了对重金属(Pb, Cd)的积累, 同时增强了营养元素(Fe、Mn、Cu、Ca、

Mg 等)的吸收。在种植中利用含硒植物营养剂处理水蜜桃和沙梨,果实中硒含量比对照分别增加了 1132.7%和 1542.9%,重金属元素铅、镉、汞含量比对照分别减少了 83.5%、65.5%、23.9%和 30.0%、23.9%、6.3%^[41]。以低剂量(5 $\mu\text{mol/L}$ 和 10 $\mu\text{mol/L}$)硒酸盐处理番茄果实根部,会刺激叶片中酚类化合物的合成并降低根中 Mo, Fe, Mn 和 Cu 的水平;在较高剂量(25 $\mu\text{mol/L}$ 和 50 $\mu\text{mol/L}$)下,叶片中谷胱甘肽水平增加 3~5 倍^[42]。因此,硒肥的应用被证明是一种有效可行的改善蔬菜中微量元素营养的方法。Zhu 等^[43]用 1 mg/L 硒酸钠对番茄进行叶面喷施,增加了果实中的硒含量而不影响其他元素(K、Ca、Fe)的浓度。通过蛋白质组学分析,富硒番茄中鉴定了 269 个差异表达的蛋白质。参与碳水化合物代谢,氨基酸代谢和次级代谢的蛋白质受 Se 处理的影响很大,该结果有助于阐明硒处理对改善番茄果实营养品质的作用机理。用 1 mg/L 硒酸钠同时可以抑制乙烯生物合成基因 1-氨基环丙烷-1-羧酸(1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)合酶和 ACC 氧化酶,降低了乙烯产生和呼吸速率,延缓果实成熟,保持果实品质^[44]。水稻叶面喷施亚硒酸钠和硒酸盐(0~300 g/ha),发现谷物硒的积累较高,对脂肪酸,糖和蛋白质的积累具有直接影响^[45]。用不同浓度亚硒酸钠(0、25、50、100、200 mg/kg)喷洒冬枣树叶面,当亚硒酸钠浓度为 50 mg/L 时,与未喷洒的对照树相比,冬枣果实中 Vc,可溶性糖,黄酮类化合物和糖:酸比例含量最高,平均单果重和产量也是最高值^[46]。硒化发芽糙米在不同温度储存下,脂肪酸值、过氧化值、羰基值和挥发性醛含量更低,说明 Se 在水稻长期储存期间对保持高质量和延迟水稻氧化酸败具有积极作用^[47]。从硒化发芽糙米中提取的含硒蛋白质表现出优异的抗氧化活性,可将其用作潜在的抗氧化剂^[48]。

3.2 硒增强作物抗氧化系统的研究

Se 通过直接或间接调节植物体内抗氧化物,来控制 ROS 自由基产生和猝灭^[49,50]。通常在植物中,ROS 水平与两种类型的抗氧化剂直接相关^[51,52]。一种是低分子量物质,如谷胱甘肽(GSH)、抗坏血酸(AsA)和生育酚;另一种是酶,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、愈创木酚过氧化物酶(guaiacol peroxidase)和谷胱甘肽还原酶(GR)^[53-55]。硒对作物抗氧化成分的影响见表 4。用低浓度的亚硒酸钠(5 mg/L)喷施酥梨,显著提高其抗氧化成分(SOD、GSH-Px)的活性,降低脂质过氧化水平,有效延缓叶片衰老^[56]。富硒大蒜显示出较低水平的膜脂过氧化和更高的 GSH-Px 和 CAT 活性,但 SOD 活性更低,说明硒在大蒜的抗氧化系统中起着关键作用,通过减轻过氧化物应激来延缓其衰老^[57]。西蓝花芽苗用硒酸钠(50 $\mu\text{mol/L}$)溶液浸泡处理后,其成熟阶段具有更高量的酚类化合物和抗氧化活性^[58]。

Astaneh 等^[59]用不同浓度的硒酸钠(0、4、8 和 16 mg/L)喷施大蒜,在盐胁迫作用下,处理组的总酚含量显著提高,表明硒可以通过保护细胞膜免受脂质过氧化作用增强大蒜的耐盐性。富硒辣椒^[60]、西瓜^[61]在高温胁迫条件下,GSH-Px 和 POD 活性显著提高,叶片 MDA 含量显著降低,这些结果说明硒对高温胁迫下辣椒叶片抗氧化酶具有重要调节作用。Zhu 等^[62]在番茄幼苗移栽后的第 4 周叶面喷施硒酸钠(1 mg/L),发现 Se 刺激番茄植株抗氧化防御系统,有效控制采后番茄果实的灰霉病腐烂,保持番茄果实的品质。叶面喷施硒酸钠可大大提高绿茶中硒,维生素 C 和茶多酚的含量,富硒绿茶在亚油酸和猪油氧化系统中表现出比普通绿茶更高的抗氧化活性^[63,64]。Hu 等^[65]用含有亚硒酸盐和硒酸盐的肥料对绿茶叶面进行喷施,促进了茶树的萌芽,提高了绿茶的产量;绿茶的甜度和香气显著增强,苦味显著降低。

表 3 硒对作物品质的影响
Table 3 Effect of selenium on crop quality

作物	类别	影响	参考文献
莴苣	亚硒酸钠	种植的莴苣显著减少了对 Pb 和 Cd 的积累,同时增强了 Fe、Mn、Cu、Ca 和 Mg 等营养元素的吸收	[40]
番茄	硒酸钠	富硒番茄提高了可溶性糖(葡萄糖和果糖),氨基酸和生物活性化合物(如黄酮类,谷胱甘肽,维生素 C 和维生素 E 等)的含量	[43]
水稻	亚硒酸钠、硒酸盐	谷物硒的积累较高,高浓度硒肥施用还可以增加油酸,亚油酸和棕榈酸的含量	[45]
冬枣	亚硒酸钠	当亚硒酸钠浓度为 50 mg/L 时,与未喷洒的对照树相比,维生素 C、可溶性糖、总黄酮、糖酸比含量分别增加了 20.94%、29.48%、43.48%、41.81%	[46]
水稻	亚硒酸钠	脂肪酸值,过氧化值和羰基值和挥发性醛含量在硒化发芽糙米中的含量更低	[47]
党参	亚硒酸钠	硒肥的施用(1.0 mg/kg 亚硒酸钠对土壤处理)有利于 N、P 和 K 在党参中的积累同时增加了党参中多糖,总黄酮,总皂苷的含量。	[49]

4 纳米技术在植物健康激活以及作物提质增效中的应用

化学农药的毒性较大,长期和频繁的使用易造成病菌和害虫的抗药性不断提高。在施用过程中,不合理用药以及自然因素又会造成有效成分大量流失。科学合理使用农药,引

入植物健康和诱导抗病等理念,可以大幅度提高农药有效利用率并减少农药使用量,对发展生态友好型农业、保障农业生产和农产品质量安全至关重要^[9,66]。随着对植物保护研究的不断深入和消费者对农产品品质需求的日益提升,基于植物内在免疫系统的植物健康管理技术逐步被重视。2001年,美国科学家首次在 Nature 上提出植物免疫系统的概念^[67],明确了植物自身的免疫系统对其防御病虫害、抗逆境等具有重要的调控作用。植物生长在自然环境中不断面临着各种侵染,在长期进化过程中形成了一系列防御机制,其中诱导抗性是植物免疫系统重要的抗病机制之一。近代病理学研究表明植物都存在着潜在的抗病基因,经适当的诱导,基因的抗性功能可以通过免疫系统的反应表达出来,从而使植物获得对病原物的抗性。

表 4 硒对作物抗氧化成分的影响

Table 4 Effect of selenium on antioxidant components in crops

作物	类别	影响	参考文献
酥梨	亚硒酸钠	显著提高其 SOD 和 GSH-Px 等酶的活性,同时降低 H ₂ O ₂ 和 MDA 含量,有效延缓叶片衰老	[56]
辣椒	亚硒酸钠	GSH-Px 和 POD 活性显著提高,SOD 和 CAT 则表现为负效应,叶片 MDA 含量显著降低	[60]
西瓜	亚硒酸钠	富硒西瓜幼苗叶 GSH-Px 活性和 POD 活性显著上升,MDA 的含量呈明显下降,延缓了膜脂过氧化程度	[61]
番茄	硒酸钠	MDA 的含量降低,而脂质合酶、SOD、GSH-Px、抗坏血酸的活性提高	[62]
水稻	亚硒酸钠	硒显著提升了 SOD、POD 和 CAT 的活性,从而增强抗氧化活性,促进水稻的生长	[63]
绿茶	亚硒酸钠	绿茶中总氨基酸和维生素 C 的含量均有所增加	[65]
生菜	亚硒酸钠	低浓度亚硒酸钠(Se≤4.0 mg/L)提高了生菜 SOD、POD 活性,净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,提高光合作用和抗氧化能力,促进了生菜生长发育	[66]

纳米技术在植物健康激活方面的研究属于前沿课题,受到国内外研究学者和农产品产业的关注。碳纳米管作为一种重要的纳米材料,在农业上也得到广泛关注和应用,有研究表明其可以促进植物生长发育、减少植物病害、吸附环境中污染物^[68,69]。碳纳米管还能够被植物吸收,促进植物的生长和与植物胁迫相关基因的表达,引起植物体内结构组织、生理生化、诱导信号或内源激素的变化,提高植物的诱导抗病性^[70]。近年来的纳米科学在农业领域研究重点主要侧重在功

能性小分子的作用、微量元素的微生物纳米转化或仿生合成、纳米碳材料对植物免疫诱导系统的激活等方面。研究表明采用碳纳米管、二氧化钛、银、硅和氧化铝等与农药复配,可以达到杀菌或调节植物生长的目的。本课题组对纳米材料-咪唑胺载药颗粒、纳米介孔二氧化硅-咪唑胺载药颗粒进行了研究,比较了纳米材料载药颗粒与传统的咪唑胺、咪唑胺悬浮剂在黄瓜等作物叶片上的沉积、剂量分布规律的差异,结果表明纳米载药颗粒可以加强在植物体吸收传导,并缓解农药降解、延长农药的药效时间^[71,72]。

农药导致作物农药残留、生理生化、作物营养品质和风味等都受到影响。目前关于如何保障作物安全与质量,改善作物品质以及提升农产品和营养水平研究较少^[73]。因此,需要减少农药化肥使用、发展农产品提质增效技术和“植物健康激活剂”的研发。纳米硒(Se⁰)可以通过物理,化学和生物方法合成,有高度稳定性和生物学活性^[74-79]。纳米硒与亚硒酸盐(SeO₃²⁻)和硒酸盐(SeO₄²⁻)相比,在上调硒酶方面具有更高的效率,并具有更好的生物相容性和更低的毒性^[7]。关于纳米硒在硒肥施用中的应用,在作物营养和保护中的若干专利和产品在不断增加。纳米硒和其他无机硒形式在高等植物中的比较已经发表了一些研究,这些研究涉及不同作物的不同生化和生理影响。此外,微量元素如硅、锌、钙等进行纳米化后,可以提升植物抗病能力。纳米材料在植物健康激活以及作物提质增效中的应用见表 5。

表 5 纳米技术在植物健康激活以及作物提质增效中的应用
Table 5 Application of nanotechnology in plant health activation and crop quality improvement

作物	类别	影响	参考文献
番茄	碳纳米管	在含有碳纳米管(10~40 μg/mL)的培养基上萌发的种子发芽率显著提高	[74]
拟南芥	碳纳米管	拟南芥 PIP1 基因过表达增强了拟南芥对于旱胁迫的耐受性	[75]
大麦	碳纳米管	大麦(PIP1)和玉米(PIP1-1)的水通道蛋白基因转录水平上调	[76]
水稻	碳纳米管	低浓度的碳纳米管可以促进水稻种子发芽、根系生长和根系活力	[77]
黑麦	碳纳米管	在低浓度显著提升抗氧化酶的活性以及光合作用	[78]
黄芪	纳米硒	纳米硒肥(225 kg/hm ²)施用,可促进蒙古黄芪的植株生长,提高其产量,改善其品质	[80]
小麦	纳米硒	低浓度纳米硒处理可以提高小麦籽粒的百粒重,且不会影响小麦的面粉糊化特性	[81]
烟草	纳米硒	纳米硒在较高浓度下显着刺激根再生。纳米硒(50~100 mg/L)使根更加广泛和密集,鲜重也显着增加	[82]

续表 5

作物	类别	影响	参考文献
芽麦菜	纳米硒	复合制剂(10 mg/kg)处理的 3 种芽苗菜芽长、根长、含水量分别增加了 3.86、2.69 cm, 6.66%; 最适浓度范围下(5~10 mg/kg)其 SOD 活性分别增加了 150.99%、196.5%、194.2%	[83]
水稻、柑橘	纳米硒	使用红色纳米硒营养液的水稻和柑橘, 其产量比施用亚硒酸钠溶液高	[84]
玉米	纳米硅	这些硅颗粒增强了表皮角质层的保水性, 降低了玉米叶的咀嚼口感, 从而达到提高抗旱性和抑制虫害的效果	[85]

由于纳米技术的快速发展, 出于生物安全的原因, 必须了解纳米粒子如何与生物体相互作用, 有助于农业中纳米技术应用的发展, 以提高作物产量和减少农用化学品的投入。在纳米材料-作物相互作用的情况下, 作物作为自然和农业生态系统中食物链的基本组成部分, 由于纳米材料在农业和环境应用中的使用或意外释放, 会引起作物生长、基因表达等各种生理过程的影响。纳米材料(如纳米硒)的风险信息有限, 在这个方向上的风险评估方面很重要。因此, 迫切需要解决以下问题: 风险评估和管理, 以及对市场上现有产品的暴露评估。此外, 关于行为, 生物累积和毒性等几个方面的有限信息, 出现了纳米材料风险和暴露评估的现有不确定性, 这些不确定性也对纳米材料的使用进行了有效的调控。也应进一步研究纳米技术在包装, 纳米毒性, 食品加工和风险/效益分析中的应用^[8]。

5 展 望

以上分析表明, 一些农药施用对作物品质降低的主要成因是对土壤和叶际微生物、种子萌发、作物生长的影响(光合作用、营养物质合成), 也可能通过氧化机制影响植物激素等合成。为提升农产品质量并确保农产品安全, 近年来国家有关管理部门相继发布指南, 提出减少农药化肥使用、并大幅度发展农产品提质增效技术和应用推广的指导性意见。在食品部门和农业方面, 纳米技术的若干应用正在开发和商业化, 具有不同的目标, 从改善食品安全, 加工和营养到减少农业投入和增强包装, 以及促进可持续农业的潜力。在这种情况下现代纳米技术的潜在贡献包括^[86]: 1、通过使用植物生长促进剂和基于纳米材料的新肥料提高作物生产力; 2、纳米材料植物保护产品的应用, 包括农药^[87]和除草剂^[88]; 3、使用纳米包封的植物保护产品和缓释肥料, 普遍减少应用的农用化学品; 4、通过引入精准农业优化农业实践的纳米技术^[89,90]。

作物从吸收无机硒到不同形式有机硒的生物转化速率

是物种的特异性, 取决于特定的生物化学途径。关于叶面硒肥的应用, 它是用硒生物强化作物的有效方法。有充分证据表明, 与用硒生物强化土壤施肥相比, 叶面施用的优势在于由土壤吸附、化学或微生物介导的转化而引起的损失较少。此外, 叶面直接摄取途径确保了作物的高度同化, 因为它不依赖于根到茎的易位。纳米硒通过直接施用、叶面喷施等方式施加于土壤或蔬菜叶面上, 可以提升作物抗逆性, 减少作物生产中化学品的使用, 达到作物富硒的目的^[91-93]。关于纳米硒的作物摄取及其易位, 评估纳米颗粒的安全性和毒性通常需要了解不同作物对纳米颗粒的吸收。大多数研究都集中在确定这些纳米粒子的作物毒性, 但尚未建立用于测量作物组织中的纳米粒子的定量方法。因此, 需要进一步研究纳米硒对作物的不同生物效应, 包括植物摄取、易位和作物营养。同时, 纳米硒在作物中的代谢需要进行更详细的生化研究和硒通量研究。

参考文献

- [1] Mtra J, Raghu K. Pesticides-non target plants interactions: An overview [J]. *Archiv Agronom Soil Sci*, 1998, 43(6): 445-500.
- [2] 刘井兰, 于建飞, 印建莉, 等. 化学农药对植物生理生化影响的研究进展[J]. *农药*, 2006, 45(8): 511-514.
Liu JL, Yu JF, Yin JL, *et al.* Research progress on the effect of chemical pesticides on plant physiology and biochemistry [J]. *Agrochemicals*, 2006, 45(8): 511-514.
- [3] 潘攀, 杨俊诚, 邓仕槐, 等. 土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2389-2398.
Pan P, Yang JC, Deng SH, *et al.* Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, 30(12): 2389-2398.
- [4] 万海英, 向极钎, 杨永康, 等. 植物对硒的吸收、转化及生理功能研究综述[J]. *安徽农业科学*, 2014, (21): 6923-6925.
Wan HY, Xiang JQ, Yang YK, *et al.* Review of selenium in absorption, transformation and physiological function on plant [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, (21): 6923-6925.
- [5] Gupta M, Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants [J]. *Front Plant Sci*, 2017, (7): 2074.
- [6] Lauchli A. Selenium in plants: uptake, functions, and environmental toxicity [J]. *Botanica Acta*, 1993, 106(6): 455-468.
- [7] El-Ramady H, Abdalla N, Taha HS, *et al.* Selenium and nano-selenium in plant nutrition [J]. *Environ Chem Lett*, 2016, 14(1): 123-147.
- [8] El-Ramady HR, Szabolcsy ED, Abdalla NA, *et al.* Selenium and nano-selenium in agroecosystems [J]. *Environ Chem Lett*, 2014, 12(4): 495-510.
- [9] Parween T, Jan S, Mahmooduzzafar S, *et al.* Selective effect of pesticides on plant—a review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2016, 56(1): 160-179.
- [10] Stark JD, Banks JE. Selective pesticides: Are they less hazardous to the environment [J]. *AIBS Bullet*, 2001, 51(11): 980-982.
- [11] Rajashekar N, Prakasha, Murthy TCS. Seed germination and physiological behavior of maize (cv. Nac-6002) seedlings under abiotic stress (pendimethalin) condition [J]. *Asian J Crop Sci*, 2012, 4(2): 80-85.
- [12] Coskun Y, Kilic S, Duran RE. The effects of the insecticide pyriproxyfen

- on germination, development and growth responses of maize seedlings [J]. Fresen Environ Bullet, 2015, 24(1): 278–284.
- [13] Pan DJ, Li QX, Lin ZX, *et al.* Interactions between salicylic acid and antioxidant enzymes tilting the balance of H₂O₂, from photorespiration in nontarget-crops under halosulfuron-methyl stress [J]. Pesticid Biochem Physiol, 2017, (143): 214–223.
- [14] Shakir SK, Kanwal M, Murad W, *et al.* Effect of some commonly used pesticides on seed germination, biomass production and photosynthetic pigments in tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Ecotoxicology, 2016, 25(2): 329–341.
- [15] Dominguez I, Ferreres F, Riquelme FPD, *et al.* Influence of preharvest application of fungicides on the postharvest quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Postharv Biol Technol, 2012, (72): 1–10.
- [16] 马冲, 周欣欣, 张佳, 等. 乙烯利催熟番茄应用现状及对品质的影响 [J]. 农药科学与管理, 2014, 35(2): 64–70.
- Ma C, Zhou XX, Zhang J, *et al.* The application status and effect analysis of ethephon on tomato [J]. Pesticid Sci Admin, 2014, 35(2): 64–70.
- [17] Watanabe M, Ohta Y, Licang S, *et al.* Profiling contents of water-soluble metabolites and mineral nutrients to evaluate the effects of pesticides and organic and chemical fertilizers on tomato fruit quality [J]. Food Chem, 2015, (169): 387–395.
- [18] 王正贵, 于倩倩, 周立云, 等. 几种除草剂对小麦籽粒产量及生理特性的影响 [J]. 核农学报, 2011, 25(4): 791–795.
- Wang ZG, Yu QQ, Zhou LY, *et al.* Effects of herbicides on grain yield and physiological characteristics of wheat [J]. J Nuclear Agric Sci, 2011, 25(4): 791–795.
- [19] 郭剑. 除草剂 2 甲 4 氯(MCPA)对冬小麦生长发育及生理特性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- Guo J. The influence of herbicide MCPA on growth and physiological characteristics of winter wheat [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015.
- [20] 赵卫星, 孙治强, 张楠, 等. 有机磷农药对大蒜素含量的影响及其原因 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7(1): 13–15.
- Zhao WX, Sun ZQ, Zhang N, *et al.* Effect of selected organophosphorus pesticides on allicin content in garlic and its reasons [J]. J Saf Environ, 2007, 7(1): 13–15.
- [21] 胡井荣. 化学农药对水稻生理生化和品质的影响及其残留效应分析 [D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- Hu JR. Effects of chemical pesticide on physiology and biochemistry of rice plant and rice quality and analysis of residues [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [22] 张娇娇. 33%联苯腈·阿维菌素悬浮剂在柑桔和土壤中的残留及其对品质的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- Zhang JJ. Residue dynamics of 33% bifenthrin-avermectin SC in citrus and soil and its effect on quality [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [23] Jan S, Parween T, Siddiqi TO, *et al.* Anti-oxidant modulation in response to gamma radiation induced oxidative stress in developing seedlings of *Psoralea corylifolia* L [J]. J Environ Radioactiv, 2012, (113): 142–149.
- [24] 李海峰, 王瑞华, 韩琛. 农药胁迫对植物抗氧化系统的研究现状 [J]. 农产品加工, 2018, (3): 1–4.
- Li HF, Wang RH, Han C. The research status of pesticide stress to antioxidant system in plants [J]. Farm Prod Process, 2018, (3): 1–4.
- [25] 李英涛. 上海青对四种不同类型农药胁迫的抗氧化防御反应研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- Li YT. Studies on antioxidant defense response of four types of pesticides stress in *Brassica chinensis* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.
- [26] Hassan NM, Alla MMN. Oxidative stress in herbicide-treated broad bean and maize plants [J]. Acta Physiolog Plantarum, 2005, 27(4): 429–438.
- [27] Zhang LZ, Wei N, Wu QX, *et al.* Anti-oxidant response of *Cucumis sativus* L. to fungicide carbendazim [J]. Pesticid Biochem Physiol, 2007, 89(1): 54–59.
- [28] 贺潇潇. 除草剂对中药三棱品质的影响 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2014.
- He XX. Effect of herbicide on quality of *Sparganii rhizome* [D]. Nanjing: Nanjing University of Chinese Medicine, 2014.
- [29] 曲爱军, 郭丽红, 孙绪良, 等. 农药胁迫对大叶黄杨 SOD 和脯氨酸含量的影响 [J]. 农药, 2006, 45(1): 38–40.
- Qu AJ, Guo LH, Sun XG, *et al.* Effects of pesticide stress on free proline and SOD content in euonymus japonica [J]. Chin J Pesticid, 2006, 45(1): 38–40.
- [30] Yildiztekin M, Kaya C, TunaAL, *et al.* Oxidative stress and antioxidative mechanisms in tomato (*Solanum lycopersicum* L) plants sprayed with different pesticides [J]. Pakistan J Botan, 2015, 47(2): 717–721.
- [31] 袁兴超, 裴兆虎, 赵健, 等. 草甘膦对铜绿微囊藻生长及抗坏血酸-谷胱甘肽抗氧化防御系统的影响 [J]. 现代农业科技, 2016, (10): 85–87.
- Yuan XC, Pei ZH, Zhao J, *et al.* Effects of glyphosate on microcystis aeruginosa growth and AsA-GSH antioxidant defense systems [J]. Mod Agric Sci Technol, 2016, (10): 85–87.
- [32] 张琼, 袁兴超, 裴兆虎, 等. 草甘膦对铜绿微囊藻生长的影响及其机理研究 [J]. 安徽农业科学, 2015, (36): 157–159.
- Zhang Q, Yuan XC, Pei ZH, *et al.* Effects of glyphosate on microcystis aeruginosa growth and related mechanisms [J]. J Anhui Agric Sci, 2015, (36): 157–159.
- [33] Reinhold MW, Schreiner M, Baldermann S, *et al.* Mechanisms of selenium enrichment and measurement in *Brassicaceous* vegetables and their application to human health [J]. Frontier Plant Sci, 2017, (8): 1365.
- [34] Zhu YG, Pilon SEAH, Zhao FJ, *et al.* Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation [J]. Trend Plant Sci, 2009, 14(8): 436–442.
- [35] Sors TG, Ellis DR, Salt DE. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants [J]. Photosynthesis Res, 2005, 86(3): 373–389.
- [36] Germ M, Stibilj V, Osvald J, *et al.* Effect of selenium foliar application on chicory (*Cichorium intybus* L.) [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(3): 795–798.
- [37] Sharma G, Sharma AR, Bhavesh R, *et al.* Biomolecule-mediated synthesis of selenium nanoparticles using dried *Vitis vinifera* (raisin) extract [J]. Molecules, 2014, 19(3): 2761–2770.
- [38] Thavarajah D, Ruszkowski J, Vandenberg A. High potential for selenium biofortification of lentils (*Lens culinaris* L.) [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(22): 10747–10753.
- [39] Broadley MR, White PJ, Bryson RJ, *et al.* Biofortification of UK food crops with selenium [J]. Proceed Nutr Soc, 2006, 65(2): 169–181.
- [40] He PP, Lv XZ, Wang GY. Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables [J]. Environ Int, 2004, 30(2): 167–172.

- [41] 张志元, 张翼, 郭清泉, 等. 含硒植物营养剂对桃和梨吸收铅、镉、汞的拮抗作用[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 368–369.
Zhang ZY, Zhang Y, Guo QQ, *et al.* Antagonism role of containing selenium plant nutrition agent used on peach and pear in absorption of lead, cadmium and mercury [J]. *Crop Res*, 2011, 25(4): 368–369.
- [42] Schiavon M, Acqua SD, Mietto A, *et al.* Selenium fertilization alters the chemical composition and antioxidant constituents of tomato (*Solanum lycopersicon* L.) [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(44): 10542–10554.
- [43] Zhu Z, Zhang Y, Liu J, *et al.* Exploring the effects of selenium treatment on the nutritional quality of tomato fruit [J]. *Food Chem*, 2018, (252): 9–15.
- [44] Zhu Z, Chen YL, Shi GQ, *et al.* Selenium delays tomato fruit ripening by inhibiting ethylene biosynthesis and enhancing the antioxidant defense system [J]. *Food Chem*, 2017, (219): 179–184.
- [45] Lidong FC, Oloveira K, Ribeiro MM, *et al.* Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality [J]. *J Cere Sci*, 2018, (81): 22–29.
- [46] Jing DW, Du ZY, Ma HL, *et al.* Selenium enrichment, fruit quality and yield of winter jujube as affected by addition of sodium selenite [J]. *Scientia Horticult*, 2017, (225): 1–5.
- [47] Li Y, Liu K, Chen F. Effect of selenium enrichment on the quality of germinated brown rice during storage [J]. *Food Chem*, 2016, (207): 20–26.
- [48] Liu K, Gu Z. Selenium accumulation in different brown rice cultivars and its distribution in fractions [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(2): 695–700.
- [49] Zhu LX, Wang P, Zhang WJ, *et al.* Effects of selenium application on nutrient uptake and nutritional quality of *Codonopsis lanceolata* [J]. *Scia Horticult*, 2017, (225): 574–580.
- [50] Feng R, Wwi C, Tu S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses [J]. *Environ Exper Bot*, 2013, (87): 58–68.
- [51] Foyer CH, Mullineaux P. Causes of photooxidative stress and amelioration of defense systems in plants [J]. *Acta Ophthalmolog*, 1994, 44(4): 522–538.
- [52] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. *Trend Plant Sci*, 2002, 7(9): 405–410.
- [53] Meharg AA, Hartley WJ. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species [J]. *New Phytolog*, 2002, 154(1): 29–43.
- [54] Cao X, Ma LQ, Tu C. Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator Chinese brake fern (*Pteris vittata* L) [J]. *Environ Pollut*, 2004, 128(3): 317–325.
- [55] Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions [J]. *Plant Physiol*, 2006, 141(2): 391–396.
- [56] 刘群龙, 王朵, 吴国良, 等. 硒对酥梨叶片衰老及抗氧化酶系统的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(11): 2059–2066.
Liu QL, Wang D, Wu GL, *et al.* Effects of selenium on leaf senescence and antioxidase system in *Pyrus bretschneider* "Dangshan Suli" [J]. *Acta Horticult Sin*, 2011, 38(11): 2059–2066.
- [57] Cheng B, Lian HF, Liu YY, *et al.* Effects of selenium and sulfur on antioxidants and physiological parameters of garlic plants during senescence [J]. *J Integr Agric*, 2016, 15(3): 566–572.
- [58] Bachiega P, Salgado JM, Carvalho JED, *et al.* Antioxidant and antiproliferative activities in different maturation stages of broccoli (*Brassica oleracea*, Italica) biofortified with selenium [J]. *Food Chem*, 2016, 190(7): 771–776.
- [59] Astaneh RK, Bolandnazar S, Nahandi FZ, *et al.* Effect of selenium application on phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity, phenol leakage and total phenolic content in garlic (*Allium sativum*, L.) under NaCl stress [J]. *Inform Process Agric*, 2018, (5): 339–345.
- [60] 尚庆茂, 陈淑芳, 张志刚. 硒对高温胁迫下辣椒叶片抗氧化酶活性的调节作用[J]. 园艺学报, 2005, 32(1): 37–40.
Shang QM, Chen SF, Zhang ZG. Regulation of selenium on antioxidative enzymes activity in pepper leaves under high temperature stress [J]. *Acta Horticult Sin*, 2005, 32(1): 37–40.
- [61] 郝晓杰, 朱世东, 李进成, 等. 硒对高温胁迫下西瓜幼苗叶片光合特性和抗氧化系统的影响[J]. 现代园艺, 2012, (13): 3–4.
Hao XJ, Zhu SD, Li JC, *et al.* Effects of selenium on photosynthetic characteristics and antioxidant system in leaves of watermelon seedlings under high temperature stress [J]. *Acta Horticult Sin*, 2012, (13): 3–4.
- [62] Zhu Z, Chen Y, Zhang XJ, *et al.* Effect of foliar treatment of sodium selenate on postharvest decay and quality of tomato fruits [J]. *Sci Horticult*, 2016, (198): 304–310.
- [63] 钟松臻, 张宝军, 张木, 等. 硒对水稻光合作用及抗氧化作用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 134–139.
Zhong SZ, Zhang BJ, Zhang M, *et al.* Effects of selenium on photosynthesis and antioxidation of rice [J]. *Soil Fertiliz Sci Chin*, 2017, (4): 134–139.
- [64] Xu J, Zhu SG, Yang FM, *et al.* The influence of selenium on the antioxidant activity of green tea [J]. *J Sci Food Agric*, 2003, 83(5): 451–455.
- [65] Hu Q, Xu J, Pang G. Effect of selenium on the yield and quality of green tea leaves harvested in early spring [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(11): 3379–3381.
- [66] 杜慧玲, 冯两蕊, 牛志峰, 等. 硒对生菜抗氧化酶活性及光合作用的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 226–229.
Du HL, Feng LR, Niu ZF, *et al.* The effect of selenium on protection-enzyme activity and photosynthesis speed of lettuce [J]. *Chin Agric Sci Bullet*, 2007, 23(5): 226–229.
- [67] Dangi JL, Jones JDG. Plant pathogens and integrated defence responses to infection [J]. *Nature*, 2001, 411(6839): 826.
- [68] Smith SC, Rodrigues DF. Carbon-based nanomaterials for removal of chemical and biological contaminants from water: A review of mechanisms and applications [J]. *Carbon*, 2015, (91): 122–143.
- [69] Sarlak N, Taherifar A, Salehi F. Synthesis of nanopesticides by encapsulating pesticide nanoparticles using functionalized carbon nanotubes and application of new nanocomposite for plant disease treatment [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(21): 4833–4838.
- [70] Zaytseva O, Neumann G. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications [J]. *Chem Biol Technol Agric*, 2016, 3(1): 17.
- [71] Zhao PY, Cao L, Ma D, *et al.* Synthesis of pyrimethanil-loaded mesoporous silica nanoparticles and its distribution and dissipation in cucumber plants [J]. *Molecules*, 2017, 22(5): 817.
- [72] Zhao PY, Cao L, Ma D, *et al.* Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plants [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(4): 1798–1806.
- [73] 李如男, 董丰收, 吴小虎, 等. 农药对农产品营养和风味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(14): 31–37.

- Li RN, Dong FS, Wu XH, *et al.* Influences of pesticides on nutrients and flavor of agricultural products [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(14): 31–37.
- [74] Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M, *et al.* Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(10): 3221–3227.
- [75] Vander WC, Postaire O, Tournaire RC, *et al.* Expression and inhibition of aquaporins in germinating *Arabidopsis* seeds [J]. *Plant Cell Physiol*, 2006, 47(9): 1241–1250.
- [76] Khodakovskaya MV, De SK, Nedosekin DA, *et al.* Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions [J]. *Proceed Nation Acad Sci Unit Stat Am*, 2011, 108(3): 1028–1033.
- [77] 姜余梅, 刘强, 赵怡情, 等. 碳纳米管对水稻种子萌发和根系生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014, (5): 1010–1012.
Jiang YM, Liu Q, Zhao YQ, *et al.* Effects of Carbon nanotubes on seed germination and root growth of rice [J]. *Hubei Agric Sci*, 2014, (5): 1010–1012.
- [78] Gusev A, Zaytseva O, Selivanova OA, *et al.* Impact of multi-Walled carbon nanotubes to rye seedlings [J]. *Adv Mater Res*, 2015, (1085): 237–241.
- [79] Wadhvani SA, Shedbalkar UU, Singh R, *et al.* Biogenic selenium nanoparticles: Current status and future prospects [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2016, 100(6): 2555–2566.
- [80] 席旭东, 姬丽君, 李海东. 纳米硒植物营养剂对蒙古黄芪产量及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(25): 262–266.
Xi XD, Ji LJ, Li HD. Effects of Nano-selenium plant nutrients on yield and quality of the *Astragalus membranaceus* [J]. *Chin Agric Sci Bullet*, 2014, 30(25): 262–266.
- [81] 李韬, 孙发宇, 龚盼, 等. 施纳米硒对小麦籽粒硒含量及其品质性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 427–433.
Li T, Sun FY, Gong P, *et al.* Effects of nano-selenium fertilization on selenium concentration of wheat grains and quality-related traits [J]. *J Plant Nutr Fertiliz*, 2017, 23(2): 427–433.
- [82] Domokos SE, Marton L, Sztrik A, *et al.* Accumulation of red elemental selenium nanoparticles and their biological effects in *nicotiniatabacum* [J]. *Plant Growth Regul*, 2012, 68(3): 525–531.
- [83] 李桥. 油菜素内酯-纳米硒复合制剂对三种芽苗菜生长影响的研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.
Li Q. Effect of BR-nano sized selenium on the growth of three sprouts [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2015.
- [84] 董雍, 李红强, 蒋光月. 红色纳米硒在水稻和柑橘上的应用研究[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(7): 61–62.
Dong Y, Li HQ, Jiang GY. Study on the application of red nano selenium in rice and citrus [J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2016, 22(7): 61–62.
- [85] 张聪聪, 张静怡, 李杨, 等. 纳米硅喷施对玉米抗旱性和抗虫性的影响[J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, (4): 348–353.
Zhang CC, Zhang JY, Li Y, *et al.* The effect of spraying nano silicon on drought and insect resistance of maize [J]. *J Hebei Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, (4): 348–353.
- [86] Khot LR, Sankaran S, Maja JM, *et al.* Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review [J]. *Crop Protect*, 2012, (35): 64–70.
- [87] Kumar RSS, Shiny PJ, Anjali CH, *et al.* Distinctive effects of nano-sized permethrin in the environment [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20(4): 2593–2602.
- [88] Pereira AES, Grillo R, Mello NFS, *et al.* Application of poly (epsilon-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control weeds and reduce damage to the environment [J]. *J Hazard Mater*, 2014, (268): 207–215.
- [89] Auernhammer H. Precision farming--the environmental challenge [J]. *Comput Electron Agric*, 2001, 30(1–3): 31–43.
- [90] Zaytseva O, Neumann G. Carbon nanomaterials: Production, impact on plant development, agricultural and environmental applications [J]. *Chem Biolog Technol Agric*, 2016, 3(1): 17.
- [91] 翟晓娜. 壳聚糖纳米硒体系的制备及其物化特性和生物活性的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
Zhai XN. Synthesis, physicochemical characteristics and bioactivity of selenium nanosystem stabilized by chitosan [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [92] Husen A, Siddiqi KS. Plants and microbes assisted selenium nanoparticles: Characterization and application [J]. *J Nanobiotechnol*, 2014, 12(1): 28.
- [93] Shoeibi S, Mozdziak P, Golkar NA. Biogenesis of selenium nanoparticles using green chemistry [J]. *Topic Curr Chem*, 2017, 375(6): 88.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



李 栋, 博士研究生, 主要研究方向为农药与农产品品质安全、生物刺激素作用机制与作物健康。

E-mail: lidong1105@cau.edu.cn



潘灿平, 博士, 教授主要研究方向为农产品和环境中药残留分析、农药风险评估。

E-mail: canpingp@cau.edu.cn