



土壤-植物系统中硒的生物有效性及其影响因素研究进展

杨忠兰, 翟凡, 温莉, 颜蒙蒙, 肖赢, 张永浩, 姚锋先, 曾希柏

引用本文:

杨忠兰, 翟凡, 温莉, 颜蒙蒙, 肖赢, 张永浩, 姚锋先, 曾希柏. 土壤-植物系统中硒的生物有效性及其影响因素研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 464-472.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0194>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硒在动植物及微生物体中的转化规律研究进展

朱燕云, 吴文良, 赵桂慎, 郭岩彬

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 189-198 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0237>

硒对油菜根际土壤微生物的影响

程勤, 胡承孝, 明佳佳, 蔡苗苗, 刘康, 汤艳妮, 赵小虎

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 104-110 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0061>

不同用量腐植酸对土壤有效硒含量和硒的形态以及大蒜硒吸收的影响

安梦鱼, 张青, 章赞德, 王煌平, 栗方亮, 罗涛

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 128-133 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0219>

外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制

周武先, 刘翠君, 段媛媛, 张美德, 艾伦强, 魏海英, 张雅娟

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 618-625 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0382>

宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析

李晓慧, 高宇, 赵万伏, 刘志坚

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 422-429 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0038>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨忠兰, 翟凡, 温莉, 等. 土壤-植物系统中硒的生物有效性及其影响因素研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 464–472.

YANG Z L, ZHAI F, WEN L, et al. Research progress on bioavailability and influencing factors of selenium in soil-plant systems[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 464–472.



开放科学 OSID

土壤-植物系统中硒的生物有效性及其影响因素研究进展

杨忠兰¹, 翟凡¹, 温莉¹, 颜蒙蒙¹, 肖赢¹, 张永浩¹, 姚锋先^{1*}, 曾希柏^{2*}

(1. 赣南师范大学国家脐橙工程技术研究中心/生命科学学院, 江西 赣州 341000; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业农村部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要: 硒的生物有效性是决定硒在土壤-植物系统中转运、积累的关键因素, 然而目前关于该方面研究进展还缺乏系统的总结和论述。本文结合赣南富硒脐橙调查研究结果, 以硒在土壤-植物系统中的运移为切入点, 系统总结和论述了硒在土壤-植物系统中的氧化-还原、吸收、转运过程, 探讨了土壤理化性质、微生物、施肥、农艺管理和植物生长阶段等对硒生物有效性和迁移的影响, 并提出未来硒的研究热点: 土壤微生物活性与硒生物地球化学循环的耦合关系; 植物生长、果实品质与硒代谢相关的分子机制; 结合同位素示踪技术和薄膜扩散梯度(DGT)技术原位探究硒在生物地球化学中的归趋。本综述可为土壤硒生物有效性调控、植物体系中硒的有效积累和农艺生物强化富硒措施方面的研究提供理论参考。

关键词: 硒生物有效性; 土壤-植物系统; 硒转运; 赣南脐橙; 硒形态

中图分类号: S154.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2024)02-0464-09

doi: 10.13254/j.jare.2023.0194

Research progress on bioavailability and influencing factors of selenium in soil-plant systems

YANG Zhonglan¹, ZHAI Fan¹, WEN Li¹, YAN Mengmeng¹, XIAO Ying¹, ZHANG Yonghao¹, YAO Fengxian^{1*}, ZENG Xibai^{2*}

(1. National Navel Orange Engineering Research Center/School of Life Sciences, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Bioavailability of selenium is a key factor in determining the transport and accumulation of selenium in soil-plant system. However, systematic summary data and discussion of research progress are scant. Based on the results of our previous investigation of selenium-rich navel orange in Gannan, this study systematically summarizes and discusses the oxidation-reduction, absorption, and transport processes of selenium in soil-plant system. Furthermore, this study discussed the effects of soil physical and chemical properties, microorganisms, fertilization, agronomic management, and plant growth stages on the bioavailability and transport of selenium. Future hot spots of selenium research are proposed and discussed. These include: the coupled relationship between soil microbial activity and selenium in biogeochemical cycles; molecular mechanisms related to plant growth, fruit quality, and selenium metabolism; combined isotope tracing technique and thin film diffusion gradient technique *in situ* to explore the attribution of selenium in biogeochemistry. This study provides a theoretical reference for investigating the regulations of soil selenium bioavailability, effective accumulation of selenium in plant systems, and agronomic bio-enrichment measures for selenium enrichment.

Keywords: selenium bioavailability; soil-plant systems; selenium transport; Gannan navel orange; selenium morphology

收稿日期: 2023-03-28 录用日期: 2023-06-13

作者简介: 杨忠兰(1989—), 女, 山东烟台人, 博士, 讲师, 主要从事土壤硒营养调控研究。E-mail: zhonglanyang@163.com

*通信作者: 姚锋先 E-mail: fengxianyao@aliyun.com; 曾希柏 E-mail: zengxibai@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42207042); 江西省教育厅项目(GJJ211445); 江西省重点研发计划项目(20223BBF61008); 赣南师范大学博士科研启动基金项目(BSJJ202125, BSJJ202309)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(42207042); Project for Educational Commission of Jiangxi Province of China(GJJ211445); Major Basic Research Development Program of Jiangxi Province(20223BBF61008); Doctoral Start-up Foundation of Gannan Normal University(BSJJ202125, BSJJ202309)

硒(Se)是生物体必需的微量元素,其对提升生物体免疫系统至关重要^[1]。膳食是人体硒的主要摄入渠道,硒摄入不足已成为影响我国居民营养健康的潜在威胁^[2]。目前,我国39%~61%的居民每日硒摄入量低于世界卫生组织(WHO)推荐的标准($26\sim 34\ \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)^[3]。因此,有效提升土壤-植物系统中硒的生物有效性是关键所在。目前关于硒生物有效性学者们已开展了广泛的研究^[4-6],但仍有必要结合具体典型案例,从应用的角度系统地论述和总结硒在土壤-植物系统中的运移机制及影响因素。因此,本文结合国内外最新研究进展,以前期针对赣南富硒脐橙的调查研究为典型案例,系统归纳硒在土壤-植物系统中的环境行为和吸收转运过程,并讨论了影响硒生物有效性的因素,以期提升硒生物有效性及其相关农艺措施的探索提供理论参考。

1 赣南富硒脐橙调查研究案例

赣南地区是世界重要的优质脐橙生产基地和我国重要的富硒红壤区(富硒耕地占比达30%)^[7]。在结合自身立地优势和天然禀赋的基础上,大力发展富硒脐橙和打造富硒产业是赣南革命老区实现乡村振兴和共同富裕的关键抓手。然而,关于赣南富硒脐橙现状的基础数据还很缺乏,因此有必要开展相关的调查研究。

本研究前期针对赣南地区18个县市,开展了脐橙果实中富硒特征的调查研究,共采集了492个有效样品,样点布局如图1a所示^[8]。研究分别对脐橙果肉硒含量、脐橙果实综合品质相关指标(单果质量、横径、纵径、果皮厚度、可溶性物含量、维生素C含量和滴定酸含量)和果肉中关键营养元素(磷、钾、钙、镁、铁、硼、锰、铜、锌和钼)含量进行分析。调查样品中脐橙果肉硒含量最高达到 $39.56\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $4.92\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,富硒脐橙(果肉总硒 $\geq 10\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)占比仅7.93%,其中于都县、瑞金市、宁都县等地脐橙硒含量较高,而会昌县、大余县、石城县等地含量较低(图1b)。同时,分别对普通脐橙(图1c)和富硒脐橙(1d)中的硒与果实质量和营养元素进行了皮尔逊相关性分析。研究发现,富硒脐橙在果实品质和营养元素的累积方面都略高于普通脐橙,其中富硒脐橙果肉中的硒易受到铜、锌等元素的影响($P<0.05$),磷、钾和镁之间的耦合也间接影响硒的富集。

赣南富硒脐橙调查研究结果表明,硒的生物有效性是影响富硒农业优质发展的关键因素。然而,目前

关于硒生物有效性相关理论认知还缺乏系统的梳理。因此,有必要从应用的角度系统地论述和总结硒在土壤-植物系统中的运移机制及影响因素。

2 土壤中的硒

2.1 土壤中硒的形态

硒的生物有效性不仅取决于土壤中硒的总量,而且受硒价态和形态的影响^[4]。硒是变价元素,自然界中硒主要以硒酸盐 $\text{Se}(\text{VI})$ 、亚硒酸盐 $\text{Se}(\text{IV})$ 、有机或无机硒化物 $\text{Se}(-\text{II})$ 和元素硒 $\text{Se}(0)$ 四个价态存在。 $\text{Se}(\text{IV})$ 包括 SeO_3^{2-} 、 HSeO_3^- 、 H_2SeO_3 ,是中性和酸性还原性土壤的主要形态,容易被矿物固定而降低其溶解性; $\text{Se}(\text{VI})$ 包括 SeO_4^{2-} 、 HSeO_4^- 、 H_2SeO_4 ,存在于碱性氧化土壤溶液中,或以静电引力的形式与矿物结合,其有效性较高^[9]; $\text{Se}(-\text{II})$ 包括 H_2Se 、 HSe^- 、 Se^{2-} ^[12]。无机硒被植物吸收后主要以有机形式,如硒蛋氨酸(SeMet)、硒半胱氨酸(SeCys)和甲基硒半胱氨酸(SeMeCys)存在^[10]。

硒形态是根据其结合的土壤组分的不同而划分的,主要分为水溶态硒(Soluble Se , SOL-Se)、可交换态硒(Exchangeable Se , EXC-Se)、铁/锰氧化物结合态硒($\text{Fe-Mn oxide-bound Se}$, FMO-Se)、有机结合态硒($\text{Organic matter-bound Se}$, OM-Se)和残渣态硒(Residual Se , RES-Se)^[11]。 SOL-Se 是流动性最强、最容易被植物吸收的形态,可用于简单评估土壤硒的生物有效性^[2]。 EXC-Se 主要指被黏土矿物和腐殖质表面吸附的硒^[8],其生物有效性远低于 SOL-Se ,但可以被植物直接吸收。土壤中 OM-Se 占总硒的50%以上,以富里酸(FA)和胡敏酸(HA)结合的硒为主^[4],其中 HA-Se 很稳定,难以分解;而 FA-Se 主要以低分子量的形式存在,容易矿化为无机硒和硒氨基酸,使其生物有效性增强,从而被植物吸收^[9]。 FMO-Se 和 RES-Se 主要存在于铁/锰氧化物和硅酸盐矿物中,很难被植物吸收^[12]。

2.2 土壤中硒的环境行为

硒的生物有效性除了受土壤中硒形态的影响外,也与土壤中硒的环境行为密切相关。但土壤硒的环境行为易受到土壤有机质、土壤矿物、微生物等因素的影响,发生吸附-解吸、络合反应、沉淀-溶解、氧化-还原和甲基化-去甲基化等生物和非生物过程(图2)。

2.2.1 吸附-解吸

土壤对硒的吸附-解吸过程是控制硒生物有效性的一个重要因素,并显著受土壤理化性质(如 pH 、 Eh 、铁氧化物、黏土矿物和有机物等)的影响。黏土、

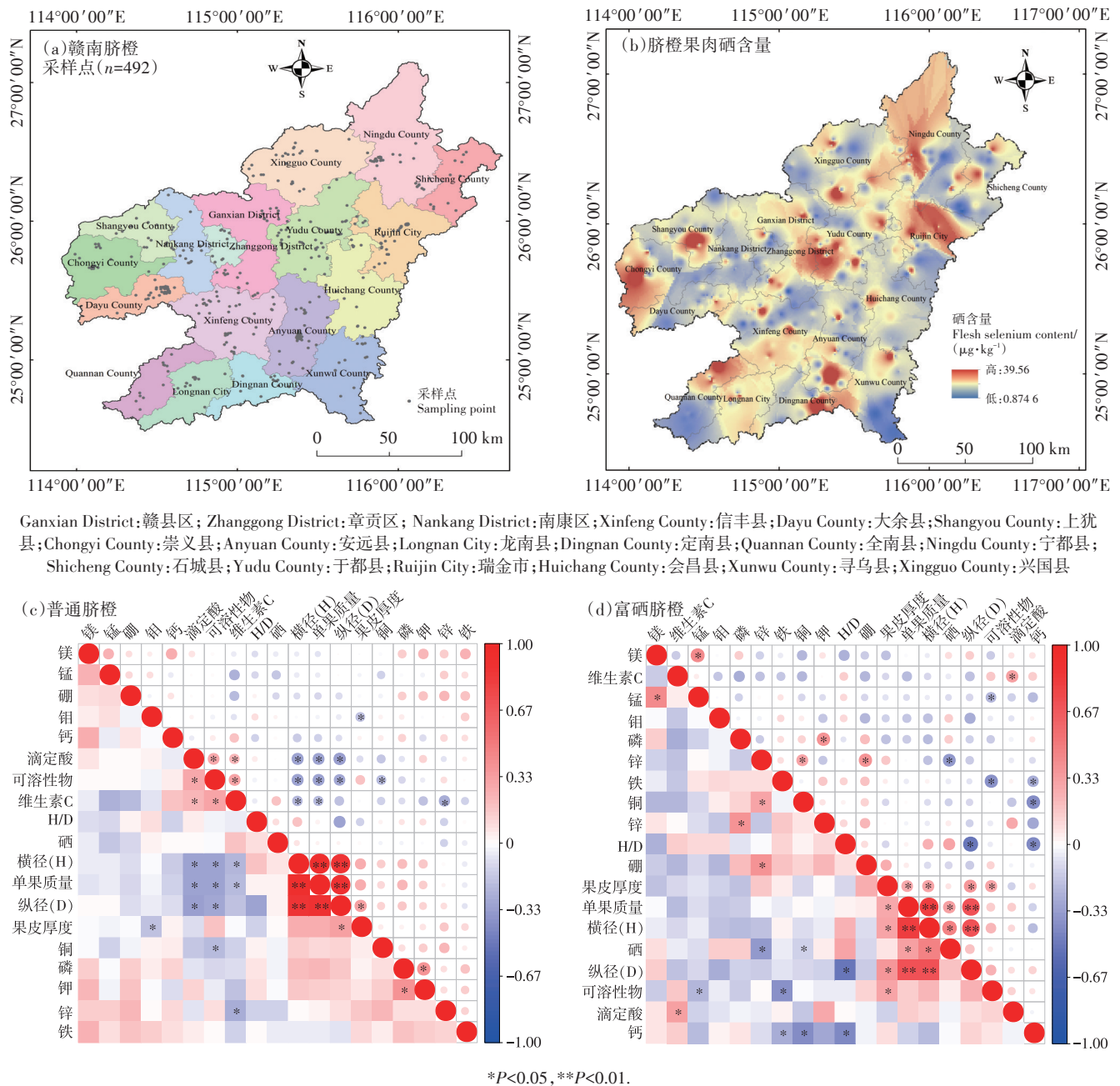


图1 赣南脐橙采样点分布、脐橙果肉硒含量以及普通脐橙、富硒脐橙果实中硒与其质量指标和矿物质元素的相关性^[8]

Figure 1 Sampling sites of Gannan navel orange, selenium content of navel orange pulp, correlation analysis of selenium with its quality index and mineral elements in common and selenium-rich navel orange fruits^[8]

金属氧化物和有机物等土壤成分对 Se(IV) 具有很强的吸附能力,并可形成内圈络合物,而对 Se(VI) 的吸附作用很弱,仅形成外圈复合物^[9],因此 Se(IV) 在土壤中的流动性和生物有效性较低。硒的解吸率与金属氧化物的含量呈负相关,与土壤pH呈正相关,且受土壤中盐基离子的调控^[10];在酸性土壤中, KH_2PO_4 对硒的解吸能力高于KCl,而在碱性土壤中则相反^[13]。

2.2.2 络合反应

土壤中的硒可与有机质(OM)、铁铝氧化物发生络合作用,从而降低硒的生物有效性。Bruggeman等^[14]认为硒可直接与HA结构中的正电荷官能团络合。此外,Dinh等^[15]发现硒离子可与OM官能团和带正电的金属结合,形成Se-金属-OM三元络合物。因此,铁氧化物能增强HA对 Se(IV) 的吸附能力,且FA能提高水铁矿对 Se(IV) 的吸附量^[15]。但 Fe(III) 在硒和HA/FA之间相互作用的机制还需进一步探究。

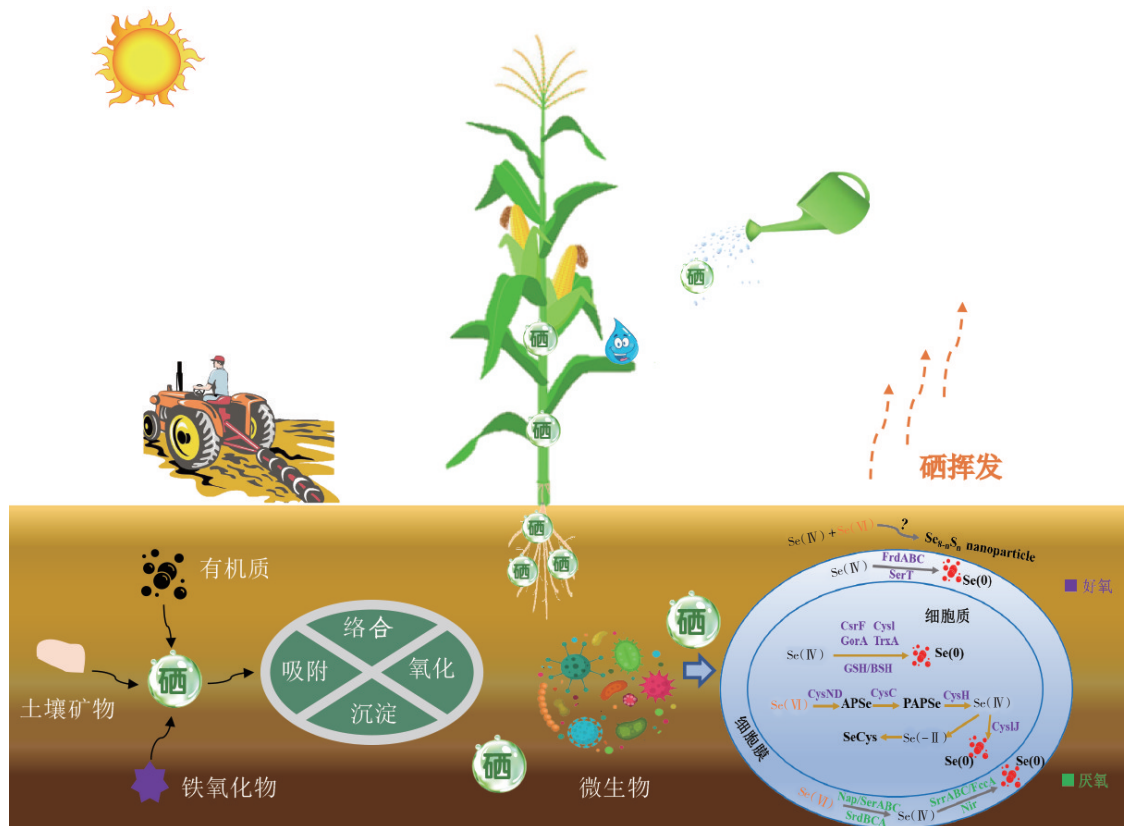


图2 硒在土壤中的环境行为

Figure 2 Environmental behavior of selenium in soil

2.2.3 沉淀-溶解

沉淀和溶解反应是直接影响土壤溶液中硒有效性的重要过程。在硫化物溶液中, Se(IV) 被还原成 Se(0) 或形成 Se-S 沉淀而降低硒的生物利用率。pH 是调控硒沉淀的重要因素, 如酸性环境 ($\text{pH}=4$) 比中性环境 ($\text{pH}=7$) 更有利于 Se-S 沉淀的形成^[16]。在还原条件下, 金属硒化物 (如 FeSe 和 FeSe_2) 的形成可显著降低硒的生物有效性。但有机物中由低分子量和分子量的腐殖质化合物组成的溶解性有机碳 (DOC) 能阻止硒被 Al/Fe/Mn 等氧化物吸附或共沉淀, 进而提高硒的溶解性^[5]。

2.2.4 氧化-还原

在还原条件下, Se(IV) 是土壤溶液中热力学最稳定和最主要的价态, 而 Se(VI) 是氧化条件下最主要的价态。在土壤中, 硒的还原作用大于氧化作用, Se(VI) 可还原为 Se(IV) 并进一步还原成 Se(0) , 且该过程受微生物、竞争性电子受体和环境条件的影响^[17]。 Se(IV) 和 Se(VI) 在微生物同化硒的过程中被还原成 Se(-II) 并运输到植物细胞^[18], 而铁氧化物促进 Se(VI) 还原为 Se(-II) , 但硝酸盐会抑制 Se(VI) 的

还原。除了同化还原,硒的异化还原也是调节硒生物有效性的重要过程。在缺氧条件下,Se(IV)被化学还原剂(如硫化物或羟胺)或生化还原剂(如谷胱甘肽还原酶)异化还原成Se(0),从而降低硒的有效性。

在土壤 pH 增加且通气良好的条件下,根际微生物活性增强,促进 Se(0) 和 Se(IV) 氧化为 Se(VI) ,从而提高硒的生物利用率^[2],但该过程受微生物种类、环境条件和氧化剂的影响。随着温度的升高,过硫酸盐离子也能促进硒的氧化^[19]。硒的生物氧化过程比 Se(VI) 还原过程慢,因此在自然环境中 Se(IV) 与 Se(VI) 共存。

2.2.5 甲基化-去甲基化

甲基化是降低硒的毒性并调控土壤硒挥发
的关键过程,但其易受硒形态、微生物活性、OM和
各种环境条件的制约^[20]。研究表明,多种微生物介
导体系(包括细菌、微藻、真菌和植物等)都能够进
行硒生物甲基化^[21]。但目前关于硒甲基化的产物
还未有统一的认识,有研究认为甲基化反应过程
是 $\text{H}_2\text{Se} \rightarrow \text{CH}_3\text{SeH} \rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{Se} \rightarrow (\text{CH}_3)_3\text{Se}^+{}^{[1]}$,但也有研究提出
甲基化反应最终产物是二甲基硒,而不是三甲基
硒^[9]。

硒的去甲基化与甲基化是相反的微生物过程,其在有氧和无氧条件下都可以发生。如在缺氧沉积物中二甲基硒易被微生物(甲烷菌和硫酸盐还原菌)迅速去甲基化,形成毒性更大的硒化氢;而二甲基硒的有氧去甲基化可以产生 Se(VI) ^[17]。

3 硒在土壤-植物系统中的运移机制

硒作为植物体必需的微量元素,对植物的生长发育起着非常重要的调控作用,主要体现在以下方面:①提高谷胱甘肽过氧化物酶、超氧化物歧化酶的活性和含量,清除活性氧,增强植物的抗氧化性和抗衰老能力^[11];②提高植物对环境胁迫(如高辐射、极端温度、干旱、高盐度)的抵抗力,消除自由基^[22-23];③调节植物中叶片的生物合成,促进叶绿素的形成,激发植物的光合作用,提高淀粉和糖的积累,促进植物的生长和发育^[24];④促进种子萌发、幼苗生长、植物蛋白质的合成,并改善作物的品质^[22]。而此过程中,土壤中硒的生物有效性是主导植物体对硒吸收、积累的关键因素,因此明确硒在土壤-植物系统中的环境行为和吸收转运过程,以及影响硒生物有效性的因素至关重要。硒在土壤-植物系统中的运移机制如图3所示。

3.1 吸收和运输

Se(VI) 、 Se(IV) 、 SeCys 和 SeMet 等可以被植物直

接吸收,但植物对不同形态的硒吸收速率存在差异,且运输速率取决于木质部的负载率和蒸腾作用^[25]。相比于 Se(IV) ,植物根部更易吸收 Se(VI) ,对有机硒的吸收速率介于 Se(VI) 和 Se(IV) 之间^[26]。

土壤中的 Se(VI) 通过硫转运通道以主动耗能的形式被植物根系吸收,其中硫转运子 SULTR1;1 和 SULTR1;2 参与根系的吸收,而 SULTR2;1 、 SULTR2;2 、 SULTR3;1 、 SULTR4;1 和 SULTR4;2 参与植物体内硒的运输^[27]。 Se(VI) 被植物根部吸收进入共质体后,通过硫酸盐转运体运输到木质部维管系统中,进入叶肉细胞和叶绿体^[26],在ATP硫酸化酶(APS)和APS还原酶(APR)介导下被还原为 Se(IV) ^[28],最终同化为 SeCys 和 SeMet 等有机硒化合物^[29]。根系通过被动扩散或主动吸收摄入土壤中的 Se(IV) ,水通道(OsNIP2;1)、硅转运子(LSI1)、磷转运子(OsPT2 、 OsPT8)参与根系对硒的吸收^[12]。植物吸收有机硒可能是通过氨基酸渗透、蛋氨酸转运蛋白转运过程或水通道、钾通道进行运输^[30],但具体机制还需进一步证实。

3.2 积累

不同植物对硒的积累和同化能力差异显著。依据植物对硒的富集能力,可将其分为非富集硒植物($<100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以干质量计,下同)、次富集硒植物($100 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和超富集硒植物($>1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

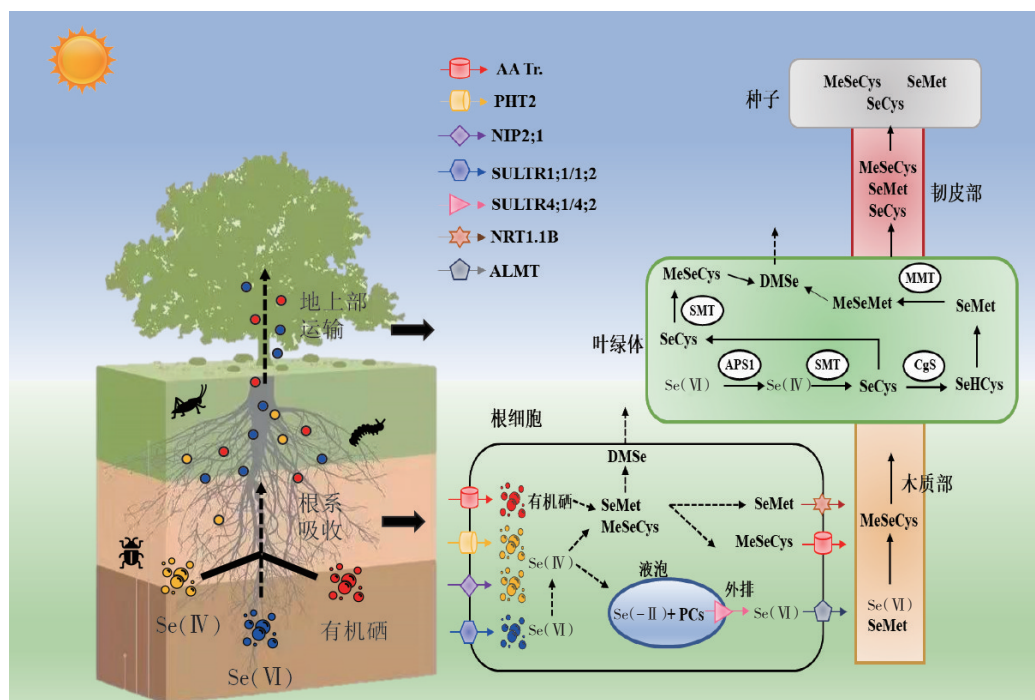


图3 硒在土壤-植物系统中的运移机制^[1]

Figure 3 Selenium transport metabolism in soil-plant system^[1]

kg^{-1})^[31]。不同物种体内硒含量差异较大,且植物体内的硒含量与土壤中硒含量呈显著正相关:农作物对硒的积累能力表现为十字花科植物>黑麦草>豆科植物>谷类;蔬菜作物中,硒含量最高的是大蒜^[2]。蔬菜可食用部分硒含量由高到低依次为葱蒜类>白菜类>绿叶菜类>豆类>瓜类>薯芋类>茄果类^[28,32]。

同种植物的不同部位对硒的积累量也存在差异:在幼苗生长期,嫩叶比成熟叶富集的硒更多^[33];水稻各部位硒含量依次为根>茎>叶>果实(籽粒)^[29];大蒜各部位的硒含量依次为鳞茎>茎>叶>根^[2]。蔬菜不可食用部位硒含量高于可食用部位硒含量。同种植物的不同品种对硒的吸收与积累也存在差异,其中生菜对硒的吸收转化能力大小顺序为玻璃生菜>奶油生菜>红叶生菜^[34]。植株体内所含的硒分为有机硒和无机硒,大多数植物体的有机硒以 SeMet 形式存在。无论是稻谷、水果还是蔬菜,植株有机硒的转化率均在 70% 以上^[13]。

植物基因型对硒积累的影响目前具有争议。Nelson 等^[35]的研究指出不同小麦栽培品种的硒浓度无显著差异,但 Pu 等^[36]认为不同基因型的小麦中存在明显的硒浓度差异。这可能是由于植物在进化过程中,个别基因型受自然选择的压力而改变了特定物种积累硒的能力,但具体原因还需进一步探究。

4 硒生物有效性的影响因素

4.1 pH 和 Eh

土壤 pH、Eh 是调控土壤中硒的生物有效性和价态的关键因素。当 $pE+pH>15$ 时,去质子化的 Se(VI) 是主要的价态,而当 $7<pE+pH<15$ 时 Se(IV) 是主要价态。在相同的 pE 下, pH 与还原硒的量呈负相关^[2]。 pH 影响土壤表面净电荷,因此当 pH 值增加时,土壤与带负电的 Se(VI) 和 Se(IV) 发生静电排斥,从而降低其对硒的吸附量^[10];当 pH 降低时, Se(IV) 更容易被吸附并固定在土壤固相中,导致其生物有效性降低^[10]。土壤 pH 不仅影响吸附过程,也影响硒在土壤微孔中的扩散和沉淀。当土壤 pH 值远低于重金属的 pK_a 时,硒在土壤表面的络合、沉淀及微孔扩散过程随着 pH 的增加而加强,从而降低硒的生物有效性^[37]。

硒的生物有效性随着 Eh 的降低而降低。在氧化条件(Eh 500 mV)下, Se(VI) 是主要的可溶态;在中度还原条件($0<\text{Eh}<200$ mV)下, Se(IV) 是主要价态;在强还原条件下($\text{Eh}<-200$ mV),硒主要以 Se(0) 和金属硒化物形态存在^[38]。土壤 pH 和 Eh 的综合作用可以

直接调控硒的价态转化,并改变硒的生物有效性。

4.2 有机质

土壤有机质(OM)在调节土壤硒的迁移和生物有效性中具有重要作用。有机物包括低分子量和高分子量的腐殖质化合物,其化学(如官能团、疏水性)、物理(如尺寸)特性和结构的不同,导致 OM 在调控硒的有效性方面具有双重作用^[5]。一方面,高分子量有机物具有较大的比表面积和较强的螯合能力,降低了硒的生物利用率;另一方面,低分子量可溶性有机质可以溶解土壤中结合态的硒,提高其生物利用率^[39]。土壤 OM 可以通过产生负表面电荷增强对硒离子的排斥性,从而提高硒的利用率。同时 OM 能与土壤中的黏土矿物和氧化物形成有机-无机化合物胶体,增加土壤颗粒的比表面积和表面活性,从而固定游离态的硒,并在适当条件下再次释放到土壤溶液中,增加硒的可利用性^[40]。此外,70% 以上的根系分泌物是疏水性有机物,这也影响了土壤中硒的生物利用率^[10]。除了化学过程,微生物也会影响土壤的矿化过程,改变 OM 的含量和组成,进而调控 OM 结合态硒向无机硒的转化^[4]。同时,在有氧条件下, Se(IV) 和 Se(VI) 可作为微生物呼吸过程中的电子终端受体^[5]。因此,硒和 OM 之间的相互作用体现在三个方面:①硒与 OM 的吸附位点络合;②硒与 OM-金属的间接络合;③硒在 OM 调控下的微生物还原。

4.3 铁氧化物

铁氧化物具有较大的比表面积和吸附能力,因此可以调控硒的生物有效性。带负电荷的 Se(IV) 和 Se(VI) 首先通过静电作用吸附于铁氧化物表面官能团(Fe-OH)并形成外圈络合物^[10],但随着无定形铁氧化物向晶质铁氧化物的转化,稳定的内圈络合物逐渐形成。Li 等^[15]对我国 18 种土壤进行研究发现无定形铁与 Se(IV) 共沉淀,可降低土壤中硒的生物有效性。但随着无定形铁氧化物表面质子的解离和结合,部分被固定的硒会重新释放到溶液中,其生物有效性提高。

4.4 黏土矿物

黏土矿物对硒有很强的亲和力,是降低硒生物有效性和移动性的关键因素,同时其对硒的吸附能力与土壤 pH 呈负相关^[13]。随土壤 pH 降低,黏土表面(如铝和硅氧化物)负电荷减少,其对硒的吸附增强^[13]。同时,硒也易被带正电荷的高岭土八面体铝层矿物吸附,其中 Se(IV) 易与蒙脱石结合形成外圈和内圈络合物^[24]。此外,黏土颗粒的大小在硒的吸附和固定中

起着重要作用。粒径大于1 mm的土壤颗粒对硒没有固定作用,而小于0.025 mm的黏土对硒的吸附能力较强,能降低硒的生物有效性^[41]。

4.5 微生物

硒的生物地球化学循环是个复杂的过程,土壤微生物在此过程中发挥着重要作用,进而深刻影响着硒的形态转化和有效性^[42]。其主要包括以下过程:①微生物随着土壤环境的变化直接或间接参与Se(IV)、Se(VI)和Se(0)等不同价态硒的氧化还原反应^[18];②土壤微生物的呼吸、代谢可以调整土壤理化性质,进而影响硒的生物有效性^[36,39];③微生物群落将土壤中的有机肥、秸秆等分解为可被植物吸收的有机质,提高OM-Se组分含量从而降低硒的迁移能力^[17];④微生物介导的硒生物甲基化和挥发是硒富集植物体内的解毒过程^[21,43]。

4.6 施肥

有机肥和无机肥的施用会影响土壤-植物体系中硒的迁移和生物有效性,但该过程受到肥料类型、用量和施用方式等影响^[1]。其中N、P和S等无机肥可通过以下机制影响硒的生物有效性:①无机肥与硒竞争土壤颗粒位点^[10];②Se与S和P竞争转运通道从而调控植物对硒的吸收^[1];③无机肥调控土壤性质,如土壤pH降低会增强土壤对硒的固定而降低植物的吸收^[2]。同时有机肥和秸秆中的低分子量有机酸可以通过络合或溶解作用提高土壤溶液中的硒含量,但高分子量有机酸会与硒发生沉淀而降低硒的有效性^[10]。此外,富硒的有机物也可作为缺硒土壤的补充剂。有机、无机肥的施用对植物吸收和积累硒有很大影响,因此在追求高产量以满足粮食需求的同时,应考虑作物对硒的富集和营养需求之间的平衡。

4.7 农艺管理

土壤中硒的生物有效性受到农业管理措施的影响,如耕作方式、灌溉、轮作及间作管理等。传统的耕作会改变土壤的氧含量,破坏土壤聚集体,调控土壤pH、OM含量、微生物群落多样性、酶活性和作物根系分布^[2],硒可以从深层释放到表层土壤,并消除非根际和根际土壤中硒含量的差异,从而促进作物对土壤中硒的吸收和利用。

灌溉措施主要通过以下机制调控土壤中硒的有效性:①灌溉水可作为硒的输入源,增加土壤硒的含量;②灌溉会激发土壤结合态硒的释放,提升土壤水溶态硒含量^[11,44];③灌溉可改变土壤理化性质和土壤微生物活性,进而影响硒的形态转化和有效性^[44];④灌溉水

中的元素会潜在增加与硒的离子竞争,对硒的有效性产生抑制作用^[4]。此外,不同灌溉方式也会对硒的有效性产生影响。如Suarez等^[45]发现,喷灌比漫灌更能增加植物对硒的吸收,减少硒的渗透损失。冬小麦-夏玉米轮作系统中玉米季的生物量和硒积累量高于小麦季,且间作体系土壤中的硒被植物吸收后,补偿的硒不足,会降低土壤中有效硒的含量^[26,36]。

4.8 植物生长阶段

土壤中硒的生物有效性和迁移性提升会促进植物对硒的吸收和累积。在植物的不同生长阶段硒在植物体中的分布展现不同特征^[46]。如用Se(VI)处理西兰花、紫甘蓝、芥菜、胡萝卜和小麦三周后,所有植物的芽和根中的硒含量随着生长而持续下降;但使用Se(IV)处理时,植物根和芽中的硒含量随着生长而逐渐增加,但随后芽中的硒含量下降^[46-49]。拔节期到抽穗期是提高水稻中硒含量的关键时期^[50]。小麦根系对硒的吸收在苗期、伸长期、抽穗期和开花期较高,这是小麦吸收硒的敏感期^[51]。作物对硒的吸收和转化能力与其生长阶段密切相关,通常在植物经济器官形成至贮藏物质积累时期对硒的吸收效率较高。

5 展望

本研究从应用角度出发,结合大尺度调查研究的典型案例,从宏观层面更加全面剖析土壤-植物系统中硒的生物地球化学过程。土壤中可利用硒的价态和形态决定了植物对硒的吸收能力,且吸收量受土壤环境的复杂性以及土壤化学反应的影响。因此在今后的研究中,需要关注以下几方面:

(1)利用同位素探究硒在土壤-植物系统中的积累、转化和运输途径,以期对硒的归趋提供新的视角,以加深对环境中硒的生物地球化学循环的理解。

(2)利用宏基因组学、转录组学和蛋白质组学,进一步分析和阐明微生物转化硒过程中的关键功能基因或代谢通路,更好地了解土壤微生物组与硒循环在分子、生理和群落水平上的相互作用,从而调节富硒土壤中硒的生物有效性,提高作物可食用部分的硒含量。

(3)分析植物体中与硒代谢相关的基因的表达和转录,探究硒调控植物生长、品质和富集硒的关键基因、酶和代谢物的转化机制。

(4)利用原位表征手段,如薄膜扩散梯度(DGT)技术,探究富硒土壤中不同土层硒的分布和有效性差异,以准确评估有效态硒的分布和迁移规律,为发展

富硒产业提供理论支撑。

参考文献:

- [1] ZHOU X B, YANG J, KRONZUCKER H J, et al. Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: a review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 586421.
- [2] DINH Q T, WANG M, TRAN T A T, et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(6): 443-517.
- [3] 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: 294-309.
- [4] WANG D, DINH Q T, THU T A T, et al. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 417-426.
- [5] DINH Q T, LI Z, TRAN T A T, et al. Role of organic acids on the bioavailability of selenium in soil: a review[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 618-635.
- [6] KUSHWAHA A, GOSWAMI L, LEE J, et al. Selenium in soil-microbe-plant systems: sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 52(13): 2383-2420.
- [7] 中国地质调查局. 天然富硒土地的划定与标识[M]. 北京: 地质出版社, 2019. China Geological Survey. Delineation and identification of natural selenium-rich land[M]. Beijing: Geological Press, 2019.
- [8] YAO F X, WEN L, CHEN R, et al. Enrichment characteristics and dietary evaluation of selenium in navel orange fruit from the largest navel orange-producing area in China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 881098.
- [9] HE Y Z, XIANG Y J, ZHOU Y Y, et al. Selenium contamination, consequences and remediation techniques in water and soils: a review[J]. *Environmental Research*, 2018, 164: 288-301.
- [10] LI Z, LIANG D L, PENG Q, et al. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: a review[J]. *Geoderma*, 2017, 295: 69-79.
- [11] WANG S S, LIANG D L, WANG D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427: 159-164.
- [12] ZHANG H, FENG X B, JIANG C X, et al. Understanding the paradox of selenium contamination in mercury mining areas: high soil content and low accumulation in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 188(14): 27-36.
- [13] KUSHWAHA A, RANI R, PATRA J K. Adsorption kinetics and molecular interactions of lead[Pb(II)] with natural clay and humic acid[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 17(3): 1325-1336.
- [14] BRUGGEMAN C, MAES A, VANCLUYSEN J. The interaction of dissolved boom clay and Gorleben humic substances with selenium oxyanions(selenite and selenate)[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(7): 1371-1379.
- [15] LI Z, MAN N, WANG S S, et al. Selenite adsorption and desorption in main Chinese soils with their characteristics and physicochemical properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(5): 1150-1158.
- [16] JUNG B, SAFAN A, BATCHELOR B, et al. Spectroscopic study of Se(IV) removal from water by reductive precipitation using sulfide[J]. *Chemosphere*, 2016, 163: 351-358.
- [17] BOLAN N, KUNHIKRISHNAN A, THANGARAJAN R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils-to mobilize or to immobilize?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 266: 141-166.
- [18] ESWAYAH A S, SMITH T J, GARDINER P H E. Microbial transformations of selenium species of relevance to bioremediation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2016, 82(16): 4848-4859.
- [19] AKIHO H, YAMAMOTO T, TOCHIHARA Y, et al. Speciation and oxidation reaction analysis of selenium in aqueous solution using X-ray absorption spectroscopy for management of trace element in FGD liquor[J]. *Fuel*, 2012, 102: 156-161.
- [20] VRIENS B, BEHRA R, VOEGELIN A, et al. Selenium uptake and methylation by the microalga *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(2): 711-720.
- [21] TERRY N, ZAYED A M, DE SOUZA M P, et al. Selenium in higher plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2000, 51: 401-432.
- [22] MALERBA M, CERANA R. Effect of selenium on the responses induced by heat stress in plant cell cultures[J]. *Plants*, 2018, 7(3): 64.
- [23] HE K Q, YUAN C G, SHI M D, et al. Accelerated screening of arsenic and selenium fractions and bioavailability in fly ash by microwave assistance[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 187: 109820.
- [24] LIDON F C, OLIVEIRA K, RIBEIRO M M, et al. Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality[J]. *Journal of Cereal Science*. 2018, 81: 22-29.
- [25] JIA H F, SONG Z P, WU F Y, et al. Low selenium increases the auxin concentration and enhances tolerance to low phosphorous stress in tobacco[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 153: 127-134.
- [26] FENG R W, WANG L Z, YANG J G, et al. Underlying mechanisms responsible for restriction of uptake and translocation of heavy metals (metalloids) by selenium via root application in plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 402: 123570.
- [27] 雷红量, 丛文宇, 蔡照磊, 等. 植物根系与叶片吸收硒的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1456-1467. LEI H L, CONG W Y, CAI Z L, et al. Main process and factors affecting selenium absorption by plant roots and leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1456-1467.
- [28] 周武先, 张美德, 王华, 等. 有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 457-465. ZHOU W X, ZHANG M D, WANG H, et al. Benefits of partially substituting mineral fertilizers with organic manure combined with foliar selenium on the growth of *Atractylodes macrocephala* Koizd.[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 457-

- 465.
- [29] WHITE P J. Selenium accumulation by plants[J]. *Annals of Botany*, 2017, 117(2):217-235.
- [30] 史雅静, 史雅娟, 王玉荣, 等. 无机硒肥对土壤有效氮含量及菠菜品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2):274-283. SHI Y J, SHI Y J, WANG Y R, et al. Effects of inorganic selenium fertilizer on available nitrogen content in soil and spinach quality[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(2):274-283.
- [31] BODNAR M, KONIECZKA P, NAMIESNIK J. The properties, functions, and use of selenium compounds in living organisms[J]. *Journal of Environmental Science & Health Part C: Environmental Carcinogenesis Reviews*, 2012, 30(3):225-252.
- [32] 刘新伟, 王巧兰, 段碧辉, 等. 亚硒酸盐对油菜幼苗硒吸收、根系形态及生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):2050-2056. LIU X W, WANG Q L, DUAN B H, et al. Effects of selenite addition on selenium absorption, root morphology and physiological characteristics of rape seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7):2050-2056.
- [33] YANG H, YANG X F, NING Z P, et al. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: an overview[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422:126876.
- [34] 史雅静, 史雅娟, 王玉荣, 等. 土壤酶对外源有机硒和无机硒的动态响应[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3):1189-1196. SHI Y J, SHI Y J, WANG Y R, et al. Dynamic responses of soil enzymes to exogenous sodium selenite and selenomethionine[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3):1189-1196.
- [35] NELSON A G, QUIDEAU S A, FRICK B, et al. The soil microbial community and grain micronutrient concentration of historical and modern hard red spring wheat cultivars grown organically and conventionally in the black soil zone of the Canadian prairies[J]. *Sustainability*, 2011, 3(3):500-517.
- [36] PU Z E, YU M, HE Q Y, et al. Quantitative trait loci associated with micronutrient concentrations in two recombinant inbred wheat lines [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(11):2322-2329.
- [37] WANG Y N, ZENG X B, LU Y H, et al. Effect of aging on the bio-availability and fractionation of arsenic in soils derived from five parent materials in a red soil region of southern China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 207(15):79-87.
- [38] NAKAMARU Y M, ALTANSUVD J. Speciation and bioavailability of selenium and antimony in non-flooded and wetland soils: a review[J]. *Chemosphere*, 2014, 111:366-371.
- [39] WANG D, PENG Q, YANG W X, et al. DOM derivations determine the distribution and bioavailability of DOM-Se in selenate applied soil and mechanisms[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259:113899.
- [40] LIU Y L, TIAN X L, LIU R, et al. Key driving factors of selenium enriched soil in the low-Se geological belt: a case study in red beds of Sichuan basin, China[J]. *Catena*, 2021, 196:104926.
- [41] XU W, TANG W H, KUANG C L, et al. Analysis on content of Se in soil of Hainan Province and its influencing factors[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(6):3026-3027.
- [42] WANG D, RENSING C, ZHENG S X. Microbial reduction and resistance to selenium: mechanisms, applications and prospects[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421:126684.
- [43] LYU C H, QIN Y J, CHEN T, et al. Microbial induced carbonate precipitation contributes to the fates of Cd and Se in Cd-contaminated seleniferous soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 423:126977.
- [44] 王瑞昕, 杨静, 方正, 等. 水分管理对水稻籽粒硒积累及根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6):1574-1584. WANG R X, YANG J, FANG Z, et al. Effects of water management on selenium accumulation in rice grains and bacterial community diversity in rhizosphere soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6):1574-1584.
- [45] SUAREZ D L, GRIEVE C M, POSS J A. Irrigation method affects selenium accumulation in forage *Brassica* species[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26(1):191-201.
- [46] GUO Q X, YE J H, ZENG J M, et al. Selenium species transforming along soil-plant continuum and their beneficial roles for horticultural crops[J]. *Horticulture Research*, 2023, 10:uhac270.
- [47] PENG Q, WANG D, WANG M, et al. Prediction of selenium uptake by pak choi in several agricultural soils based on diffusive gradients in thin-films technique and single extraction[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256:113414.
- [48] 李鸣凤, 邓小芳, 付小丽, 等. 不同硒源对小麦生长、硒吸收利用以及玉米后效的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1):1-7. LI M F, DENG X F, FU X L, et al. Effects of different selenium sources on wheat growth, selenium uptake and utilization and the aftereffects on maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1):1-7.
- [49] ZHANG D, DONG T Y, YE J, et al. Selenium accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by coapplication of either selenite or selenate with phosphorus[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 63(1):37-44.
- [50] 何巧. 水稻中硒的转运和积累特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019:24-32. HE Q. Research on the characteristics of translocation and accumulation of selenium in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019:24-32.
- [51] 王敏. 施硒方式对小麦硒吸收、转运和形态分布的影响及机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021:20-25. WANG M. Effect of selenium application methods on selenium uptake, transport and speciation in wheat (*Triticum aestivum* L.) and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021:20-25.