

# 硒的生理功能及在主要作物中的吸收富集

孔凡丽<sup>1</sup>, 张恩萍<sup>2</sup>, 曹庆军<sup>1</sup>, 杨粉团<sup>1</sup>, 李刚<sup>1\*</sup>

(1. 吉林省农业科学院/农业农村部东北作物生理生态与耕作重点实验室, 长春 130033; 2. 吉林大学植物科学学院, 长春 130062)

**摘要:** 硒是植物生长的有益元素, 在植物体内具有重要的生理功能。随着生活的改善与人们对微量元素的日益重视, 硒在人体健康中的重要作用受到关注。富硒农产品的研究与开发是当前科研与农业生产关注的热点之一。本文就硒在土壤与植物中的存在形态、硒的生理功能以及在作物中的吸收与转化、富集特征进行了综述, 并对未来研究进行了展望, 以为硒资源的高效利用提供参考。

**关键词:** 农作物; 品质; 矿质元素; 吸收利用; 存在形态

中图分类号: S143.7<sup>9</sup>

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)06-0115-04

## Physiological Function and Absorption Enrichment of Selenium in Staple Crops

KONG Fanli<sup>1</sup>, ZHANG Enping<sup>2</sup>, CAO Qingjun<sup>1</sup>, YANG Fentuan<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1\*</sup>

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Northeast Crop Physiology Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture in People's Republic of China, Changchun 130033; 2. College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130062, China)

**Abstract:** Selenium is one of the essential elements for plant growth and has important physiological functions in plants. With the improvement of living standard, and the important role of selenium in human health has been concerned, thereby selenium-rich agricultural products has become one of the hot spots in scientific research and agricultural production. In this paper, the existing forms of selenium in soil and plants, the main physiological functions together with the absorption and utilization of selenium in crops and the regulation of biological enrichment were summarized, and also the future research was prospected. The purpose of this review was to provide theoretical technology and references for the efficient utilization of selenium resources.

**Key words:** Crops; Quality; Mineral elements; Absorption and utilization; Existential state

### 1 硒的存在形态

硒(Selenium, Se)是一种分散的稀有元素, 形成于石炭纪至第四纪的沉积岩中<sup>[1]</sup>。自然界中通常以硒化物的形式存在于金属硫化矿中<sup>[2]</sup>。Se在植物体内与土壤中以不同的形态存在。在植物体内, Se主要以硒蛋白、硒核酸、硒多糖等生物大分子及硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸等生物小分子形态存在<sup>[2]</sup>。在土壤中, Se主要以硒酸盐、亚硒酸

盐、元素态硒和硒化物等4种价态存在, 其中四价硒和六价硒是植物吸收利用的主要价态<sup>[3]</sup>。相对于四价Se, 氧化态的六价Se不易被土壤吸附固定, 在土壤中有效性相对较高<sup>[4]</sup>。

### 2 硒在植物中的生理功能

Se是一种对植物生长有益的非金属矿质元素, 也是植物生长发育不可缺少的营养元素<sup>[5-6]</sup>。在植物体内, Se是谷胱甘肽过氧化物酶、甲状腺素脱碘酶、硒蛋白等25种含硒蛋白的重要组分<sup>[7]</sup>。因此, Se在植物体内具有非常重要的生理功能, 如提高植物的抗氧化性、增强植物对逆境(干旱、重金属胁迫、低温等)的抗性、提高作物的品质和营养特性<sup>[8]</sup>。

#### 2.1 促进叶绿素的合成以及植物光合作用

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 吉林省农业科技创新工程项目(C82233806、CXGC2017TD011)

作者简介: 孔凡丽(1989-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事药用植物方面的研究。

通讯作者: 李刚, 男, 博士, 研究员, E-mail: laoli201@126.com

在植物体内,Se可以通过带有-SH的5-氨基乙酰丙酸脱水酶(ALAD)和胆色素原脱氢酶(PB-GD)两种酶的相互作用调控植株叶绿素的合成。研究表明,小麦经过一定浓度的亚硒酸钠处理,有助于叶片叶绿素及其合成前体5-氨基乙酰丙酸(ALA)的形成,从而提高叶片叶绿素的含量<sup>[9]</sup>。用浓度为12 $\mu\text{g/mL}$ 的Se溶液处理油菜幼苗,可以显著提高苗期叶绿素与胡萝卜素的含量,从而促进油菜的生长发育<sup>[10]</sup>。在水稻上喷施低浓度的Se(<0.10 mg/L),增强了线粒体呼吸速率和叶绿体电子传递速率,表明在植物体内Se同时参与了能量的代谢过程<sup>[11]</sup>。在小麦上利用浓度为1 $\mu\text{mol/L}$ 的 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 溶液可以提高NaCl胁迫下小麦的净光合速率,减轻了对叶绿体超微结构的破坏,从而提高了小麦对盐胁迫的抗性<sup>[12]</sup>。在干旱胁迫下,饲用玉米叶面喷施一定浓度的Se(40 g/L),被证实体内叶绿素总含量和叶片水势分别提高53%与30%,显著提高了作物对干旱胁迫的抗性,同时也提高了饲用玉米的产量与粗蛋白含量<sup>[7]</sup>。

## 2.2 提高植物逆境胁迫的抗性

在低温、高温、干旱以及重金属胁迫条件下,会造成植物体内活性氧(ROS)代谢的增强,主要体现在超氧阳离子和超氧阴离子、过氧化氢等含量的升高,从而对植物产生一定的伤害,进而影响细胞膜的透性。有研究表明,通过施入一定浓度的外源Se,能显著提高植物体内可溶性糖以及游离氨基酸的含量,从而缓解ROS代谢对植物细胞造成的伤害<sup>[13]</sup>。外源Se的施入还可以促进植物体内抗氧化酶SOD、POD、CAT活性,直接降低活性氧的代谢带来的伤害<sup>[8,13]</sup>。水稻通过叶面喷施75 g/hm<sup>2</sup>和100 g/hm<sup>2</sup>的富硒肥料可以显著降低籽粒中Cu、Hg、Pb和Cd的含量<sup>[14]</sup>。说明添加外源Se可以有效拮抗Cu、Hg、Pb和Cd等重金属在作物籽粒中的富集,有利于实现作物安全生产。

## 2.3 提高作物品质

Se对作物品质的影响主要体现在两个方面。一方面,Se本身就是一种对植物生长有益的微量营养元素。Se进入植物体内会形成硒代蛋氨酸等对人体具有重要作用的含Se有机化合物,这是其品质提升的主要体现。在玉米籽粒中有机结合态Se约占总Se的90%,在水稻籽粒中也超过了80%,这些有机Se通过膳食进入人体发挥重要作用。另一方面,外源Se的施入还可以协同促进植物中对人体健康具有重要作用的某些矿质元素的吸收。在玉米抽雄期,叶面喷施浓度为30 g/hm<sup>2</sup>

与45 g/hm<sup>2</sup>的亚硒酸钠,可以显著提高对Mn元素的吸收,同时降低对Pb、Cd和Hg的吸收<sup>[15]</sup>。黑小麦通过叶面喷施亚硒酸钠溶液(15~45 g/hm<sup>2</sup>),可以显著影响籽粒粗蛋白、面筋指数、面团形成时间及稳定时间,但是对湿面筋含量、沉淀指数和吸水量无显著影响<sup>[16]</sup>。水稻通过土壤施硒方式能显著提高籽粒中Mg、S、Fe、Mn和Zn等元素含量以及籽粒粗蛋白、丝氨酸和酪氨酸含量。籽粒中赖氨酸的含量是衡量小麦品种的重要指标,小麦上添加Se可改变籽粒中氨基酸的组成,不但减少苯丙氨酸的含量,而且显著增加了限制性氨基酸赖氨酸含量,从而弥补了小麦赖氨酸含量的不足,提升了营养品质<sup>[17]</sup>。Se施用对提升和改善作物的品质具有重要作用,但也有研究表明过量施硒会抑制作物的生长,最终降低了作物籽粒中淀粉和粗脂肪的积累<sup>[18]</sup>。因此,外源Se的施用必须在其适宜的浓度范围内进行。

## 2.4 影响作物产量

一般低浓度或适宜浓度的Se处理对植物生长具有促进作用,而高浓度或者过量的Se施用会造成植物体内硒代半胱氨酸替代半胱氨酸参与蛋白质的合成,反而会对植物生长造成毒害。因此,Se对农作物生长发育的影响具有两面性。在适宜的施用范围内,硒可以显著提高作物对逆境的抗性,有利于对其它矿质元素的吸收,对作物增产有利。匡恩俊等<sup>[19]</sup>通过叶面喷施的方式研究了不同作物对硒的吸收与转化利用效率,结果表明水稻和小麦在低浓度Se处理下具有一定的增产优势,而玉米和大豆却表现出明显的减产趋势,且大豆减产幅度显著高于玉米。除了不同作物产量对Se浓度的响应存在差异外,同一作物不同基因型之间也有明显的差异<sup>[18]</sup>。

# 3 硒在主要作物中的吸收与富集

## 3.1 不同作物对硒的吸收

在自然界中,土壤中的Se是植物Se的主要来源,土壤中的Se按价态可分为单质态Se、硒化物、亚硒酸盐、硒酸盐、有机态硒化物和挥发态Se。植物对Se的吸收与富集除了与土壤性质、土壤中Se的丰缺度、Se存在形态有直接关系外,也与植物类型乃至基因型有密切关系。根据植物对硒吸收能力的差异可以分为富硒植物(100~1 000 mg Se/kg·DW)、超富硒植物(1 000~15 000 mg Se/kg·DW)与不富硒植物,而大部分作物对Se的富集能力都比较弱,属于非富集植物(表1)。在谷类作物中,以小

表 1 不同作物对 Se 富集能力差异

序号	名称	施用方式	Se 的施用浓度	富集范围(mg/kg)	数据来源
1	小麦	叶面喷施	5.0 ~ 20 mg/L	<7.0	参考文献[20]
2	玉米	叶面喷施	10 ~ 25 mg/kg	0.001-0.043 28	参考文献[18]
3	水稻	叶面喷施	10 mg/L	0.181~0.362	参考文献[21]
		叶面喷施	2.85 mg/kg	1.13 ~ 3.3	参考文献[22]
		基施土壤	1 mg/kg	0.081 1 ~ 0.217	参考文献[14]
4	鲜食玉米	叶面喷施	100 mg/kg	0.022 1~0.37	参考文献[23-25]
5	高粱	叶面喷施	75 mg/L	2.1	参考文献[8]
6	大麦	叶面喷施	0.20 mg/kg	0.047	参考文献[26]
7	土豆	基施土壤	0.075 ~ 0.3 mg/kg	0.002 1 ~ 0.007 4	参考文献[27]

麦对外源硒积聚能力最强,其次是水稻、大豆和玉米<sup>[14]</sup>。

植物对 Se 的吸收主要通过根系和叶片。根系吸收的 Se 主要是四价和六价硒,而植物根对四价硒吸收的主要形式是被动吸收,而对六价硒能主动吸收。植物根系吸收的硒酸盐必须经根系细胞质膜上的硫酸盐转运体蛋白(Sultr)介导,跨膜运输进入植物体内(如图 1),经木质部运输到叶

水培条件下植物对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收无显著差异,但在土培条件下硒酸盐更易被吸收和转运,因而生物有效性更高,而亚硒酸盐更易被土壤表面所吸附,但是在叶面喷施条件下由于六价硒必须先在叶中转化为二价硒才能转化为有机硒,而四价硒不需要酶催化就能直接转化为有机硒,这也是生产上多选用亚硒酸盐作为叶面喷施硒肥的主要原因<sup>[1]</sup>。

### 3.2 硒在作物器官中的分布

Se 在进入植物体后,经过一系列的运输和代谢被转移至植物体的不同组织器官中。由于不同作物对 Se 富集能力存在差异,导致不同器官中 Se 的分配也存在显著的差异。研究表明,水稻不同器官 Se 含量依次是地上部(叶片+茎秆)>根系>籽粒<sup>[29]</sup>,类似规律也在小麦等作物上得到证实,但施用方式对 Se 在不同器官中的分配比例也有很大影响。在外源 Se 施用量一致的情况下,对比试验结果表明,Se 肥基施分配比例表现为根系(占 80% ~ 90%)>叶片>茎>籽粒,而叶面喷施 Se 肥分配比例表现为叶片(约占 80%)>茎>根系>籽粒<sup>[21]</sup>。提高作物可食用部位 Se 的有效含量是生产中追求的主要目标。对水稻籽粒中不同部位 Se 富集特征研究表明,Se 含量由高到低依次为糠皮>稻壳>糙米>精米<sup>[30]</sup>,这是因为在抽穗期叶面喷施硒肥时,稻米颖壳已形成,Se 可能以无机 Se 的形式残留在颖壳。精米中胚乳的主要成分是淀粉,Se 含量较低。因此,米糠(糠皮、稻壳)中 Se 的积累程度高于精米。

## 4 研究与展望

土壤是植物吸收 Se 的主要来源,世界上有 40 多个国家和地区土壤处于缺硒状态,我国是典型的缺硒大国,东北平原富硒土壤面积不足 1%,属于硒分布匮乏地区。随着全球气候变化以及土壤

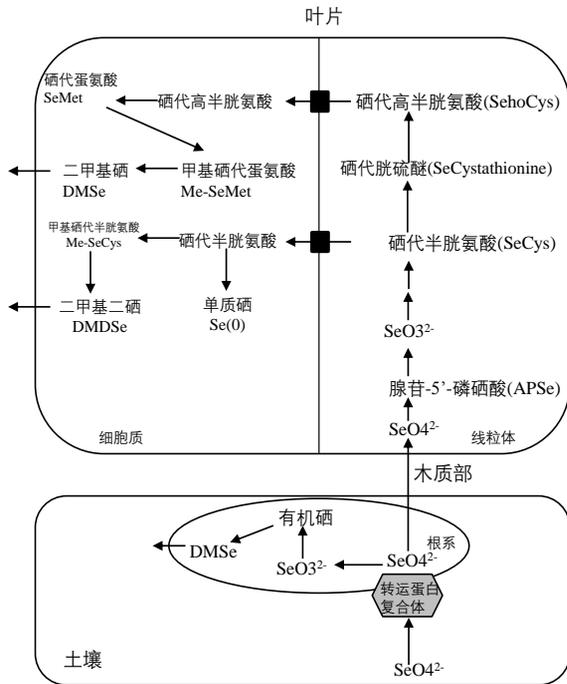


图 1 植物对硒的吸收与转运过程<sup>[1]</sup>

片<sup>[1]</sup>,被 ATP 硫酸酶(ATP sulfurylase)激活,转化成硒代半胱氨酸(SeCys),进而在植物体内进一步转化成硒代蛋氨酸(Selenomethionine)和挥发性的二甲基硒(DMSe)以及二甲基二硒(DMDS<sub>Se</sub>),其中挥发性硒(DMDS<sub>Se</sub>与DMSe)被释放到空气环境中,硒代蛋氨酸则被储存在植物体内<sup>[28]</sup>。关于植物对土壤四价硒的吸收机制还不清楚。研究表明,在

有机碳矿化加剧,未来土壤缺Se状况会进一步加剧<sup>[1]</sup>。缺硒引起的“隐性饥饿”将加剧威胁人类的健康。由于天然食品中Se含量普遍较低,远远不能满足人体的正常需要,通过施入外源Se增加农产品Se含量是缺Se地区人群补Se的重要途径。因此通过提高农作物Se含量来增加人体硒摄入量显得特别重要。富硒农产品开发与高效利用成为生产和科研关注的热点之一。

提高农产品Se的有效含量对于提高商品附加值具有重要意义。在生产中应注意的问题:一是作物对Se吸收利用的范围较窄,Se施用不当可能会造成不良效果甚至作物减产,这方面必须引起足够的重视;二是Se矿属于稀有资源,随着Se肥需求量的增加,必然会导致Se矿的过度开采,未来Se的污染问题值得关注。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Gupta M, Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants[J]. *Frontiers in plant science*, 2016, 7: 2074.
- [ 2 ] 王晓芳,陈思杨,罗章,等.植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. *农业资源与环境学报*, 2014(6): 539-544.
- [ 3 ] 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, 6933.
- [ 4 ] 马友华,丁瑞兴,张继榛,等.植物体内硒和硫的相互作用[J]. *植物生理学通讯*, 2001(2): 161-166.
- [ 5 ] Fan A M, Kizer K W. Selenium, nutritional, toxicologic, and clinical aspects[J]. *Western Journal of Medicine*, 1990, 153(2): 160.
- [ 6 ] 范轶欧,胡小琪,何宇纳,等.中国成年居民营养素日常摄入量的研究[J]. *营养学报*, 2011(4): 376-379, 384.
- [ 7 ] Nawaz F, Naeem M, Ashraf M Y, et al. Selenium supplementation affects physiological and biochemical processes to improve fodder yield and quality of maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions[J]. *Frontiers in plant science*, 2016, 7: 1438.
- [ 8 ] Djanaguiraman M, Prasad P V, Seppanen M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2010, 48(12): 999-1007.
- [ 9 ] 王宁宁,杜晓光,朱亮基.亚硒酸钠对转绿小麦叶片内叶绿素生物合成和某些抗氧化作用的影响[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 1994(2): 21-24, 46.
- [ 10 ] 张驰,吴永尧,彭振坤.硒对油菜苗期叶片色素的影响研究[J]. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2002, 20(3): 63-65.
- [ 11 ] 吴永尧,卢向阳,彭振坤,等.硒在水稻中的生理生化作用探讨[J]. *中国农业科学*, 2000(1): 103-106, 116.
- [ 12 ] Jiang C, Zu C, Lu D, et al. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na<sup>+</sup> accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress[J]. *Scientific reports*, 2017, 7: 42039.
- [ 13 ] Sajedi N A, Ardakani M R, Madani H, et al. The effects of selenium and other micronutrients on the antioxidant activities and yield of corn (*Zea mays* L.) under drought stress[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2011, 17(3): 215-222.
- [ 14 ] 方勇,陈曦,陈悦,等.外源硒对水稻籽粒营养品质和重金属含量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(4): 760-765.
- [ 15 ] 黄丽美,徐宁彤,曲琪环,等.硒对玉米产量及籽粒营养品质、重金属含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(10): 59-61.
- [ 16 ] 蒋方山,张海军,吕连杰,等.叶面喷施亚硒酸钠对黑粒小麦籽粒硒含量、产量及品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(12): 1496-1503.
- [ 17 ] 孙崇延,李德安,冯杰,等.施加硒化肥对麦粒的化学元素及氨基酸含量的影响[J]. *微量元素与健康研究*, 1995(3): 39-40, 45.
- [ 18 ] 郝玉波,刘华琳,慈晓科,等.硒对两种类型玉米硒元素分配及产量、品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 411-418.
- [ 19 ] 匡恩俊,迟凤琴,张久明,等.叶面喷硒对不同作物籽粒硒含量及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(4): 133-136.
- [ 20 ] 张妮.不同价态外源硒对小麦硒吸收与转运的影响[D]. 石河子:石河子大学,2016.
- [ 21 ] 陈雪,沈方科,梁欢婷,等.外源施硒措施对水稻产量品质及植株硒分布的影响[J]. *南方农业学报*, 2017, 48(1): 46-50.
- [ 22 ] Sharma S, Goyal R, Sadana U S. Selenium Accumulation and Antioxidant Status of Rice Plants Grown on Seleniferous Soil from Northwestern India[J]. *Rice Science*, 2014, 21(6): 327-334.
- [ 23 ] 郝小琴,吴子恺.鲜食甜糯玉米籽粒硒含量的研究[J]. *作物杂志*, 2004(5): 15-17.
- [ 24 ] 徐长青,吴红霞,潘国云,等.鲜食糯玉米补硒技术初探[J]. *上海农业科技*, 2007(6): 122.
- [ 25 ] 刘春菊,刘夫国,陈伟,等.叶面喷施硒肥对鲜食玉米富集的影响[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(4): 713-716.
- [ 26 ] Yan J, Wang F, HaiBo Q, et al. Natural variation in grain selenium concentration of wild barley, *Hordeum spontaneum*, populations from Israel[J]. *Biological trace element research*, 2011, 142(3): 773-786.
- [ 27 ] Turakainen M, Hartikainen H, Seppanen M M. Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2004, 52(17): 5378-5382.
- [ 28 ] Malagoli M, Schiavon M, dall'Acqua S, et al. Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality[J]. *Frontiers in plant science*, 2015, 6: 280.
- [ 29 ] 张城铭,周鑫斌.不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 186-194.
- [ 30 ] 周鑫斌,施卫明,杨林章.水稻籽粒硒累积机制研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008(3): 503-507.

(责任编辑:刘洪霞)