

农作物和园艺作物富硒效应研究进展

王裔娜¹,魏新娜¹,吴国良^{1*},王其海¹,周富强¹,刘群龙²

(1. 河南农业大学 园艺学院/河南省果树瓜类生物学重点实验室,河南 郑州 450002;
2. 山西农业大学 园艺学院,山西 太谷 030801)

摘要: 硒是人体和动物必需的营养元素,环境中硒过量或缺乏均会导致人体和动物产生疾病。综述了国内外近年来有关农作物和园艺作物施硒的研究现状、作用机制、应用现状以及富硒研究的最新进展。
关键词: 农作物; 园艺作物; 富硒; 产量; 品质; 生理效应
中图分类号: S63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)05-0007-06

Progress in Research on Selenium-enriched Land-crops and Horticultural Plants in China

WANG Yina¹, WEI Xinna¹, WU Guoliang^{1*}, WANG Qihai¹, ZHOU Fuqiang¹, LIU Qunlong²

(1. College of Horticultural Science, Henan Agricultural University/Henan Key Laboratory of Fruit and Cucurbit Biology, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Horticultural Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Selenium(Se) is one of the essential trace elements required by humans and animals. It will cause diseases for humans and animals when Se is excessive or lack in the environment. This paper summarized the research status of selenium-enriched agricultural crops and selenium-enriched horticultural crops, functional mechanism, application status and the latest progress in the study of selenium enrichment.
Key words: agricultural crops; horticultural crops; selenium enrichment; yield; quality; physiological effects

硒元素是人体和动物必需的一种营养元素,是高等植物机体内谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的重要组分。环境中硒过量或缺乏均会导致人体和动物产生疾病,故硒的重要性受到了空前的重视^[1-3]。研究表明,膳食中硒摄入量不足严重影响人体健康^[4-5]。有关硒能抗癌、抗心血管病、抗克山病、抗大骨节病、清除体内自由基、抗膜脂过氧化、防止衰老、增强机体免疫机能等作用也已经得到证实^[6-8]。人体可吸收利用的硒的形态有无机态硒和有机态硒2类^[9]。与无机态硒相比,有机态硒具有对人体毒性小、在体内存留时间长、易吸收、保护效

应显著等优点。目前我国最普遍的植物性含硒食物中硒的有机化率和利用率均较高^[10-13]。研究总结农作物及园艺作物的富硒规律,开发富硒农产品对人们补硒具有重要意义^[14-16]。笔者就此内容做一综述,以期进一步科学开发利用农业硒资源,为农产品科学富硒研究提供参考。

1 农作物富硒效果及其机制

硒是人体健康和动物体内必需的14种微量元素之一。在估算硒的适宜摄入量时常有2个参照量,即硒的最低需要量(即生命必需的临界量)和硒

收稿日期:2014-12-10
基金项目:国家自然科学基金项目(31171943);河南省重大科技攻关项目(92101110600)
作者简介:王裔娜(1989-),女,河南郑州人,在读硕士研究生,研究方向:果树逆境生理与优质化生产。
E-mail:455578356@qq.com
* 通讯作者:吴国良(1959-),男,山西运城人,教授,博士生导师,主要从事果树遗传育种研究。E-mail:walnut-wu@126.com

的生理需要量(即维持人体正常生理代谢的必要量)。我国曾在 20 世纪末进行了总膳食结构的调查,结果表明,我国居民日常饮食中硒的日均摄入量为 $43.3 \mu\text{g}$, 低于我国营养学会推荐和国家颁布的硒适宜摄入量(国家标准 $50 \mu\text{g}$), 而且那些生活在严重缺硒地区的居民硒日均摄入量更是低于 $20 \mu\text{g}$, 这严重影响了人体的健康^[17]。在硒缺乏地区, 适当提高居民的硒摄入量可有效增强人体免疫力和预防一些疾病。

我国的主要粮食作物有水稻、小麦、玉米等, 通过提高其硒含量, 以天然有机硒的形式为人类提供安全有效的补硒途径是必然趋势。因此, 国内外广泛开展了主要粮食作物、油料作物(大豆、油菜、花生)的富硒研究, 并取得了一定成就。

1.1 水稻

水稻是我国乃至全世界最重要的粮食作物之一, 其含硒量高低与人体硒营养状况密切相关。而盛产水稻的地区大多属于缺硒或低硒地区, 因此开展富硒水稻基础理论和应用等研究对我国现代农业和人民健康具有重要的意义^[18]。

目前我国富硒水稻研究的方向主要集中在以下 3 个方面: 一是从生理栽培的角度, 通过施外源硒提高稻米中的硒含量; 二是从遗传育种角度, 根据品种间的基因差异性, 筛选富硒亲本, 选育富硒水稻品种; 三是分析水稻硒的遗传性^[19]。

水稻对硒具有一定的生物富集作用, 施外源硒可以显著促进稻米中硒的积累。国际水稻研究所报道, 土壤特性对水稻籽粒微量元素含量具有显著影响^[20]。在缺硒和低硒地区施用硒肥, 能显著提高水稻的含硒量, 稻田土壤中硒含量的高低与稻米中含硒量在一定程度上呈正相关, 土壤含硒量高低对稻米中硒含量具有较大影响^[21-22], 而且砂质土更有利于硒肥的效应发挥^[23]。稻田土壤施亚硒酸盐后植株各器官硒含量为: 根 > 籽粒 > 叶 > 茎, 表现出硒向籽粒富集的特征^[24]。在一定范围内稻米中硒含量表现出随施硒浓度的增大逐渐增加的趋势^[25]。进一步的研究发现, 土壤施硒提高稻米中硒含量的生理机制是硒元素显著促进了稻株的光合作用, 增加了一系列光合效能, 最终促进了籽粒硒含量的增加^[26]。在水稻硒蛋白中, 硒主要以硒代蛋氨酸和硒代半胱氨酸 2 种结合形态存在^[27], 硒在蛋白质组分中的分布为谷蛋白 > 球蛋白 > 清蛋白 > 醇溶蛋白。这类富含有机态硒的稻米完全可以满足人们的生理需要^[28]。关于施硒时期, 张雪林等^[29]认为, 在水稻齐穗期喷施的籽粒硒含量较高。从水稻不同生育时

期的施硒效果来看, 破口期、齐穗期、灌浆期喷施富硒肥料都可有效提高稻米中的硒含量, 因此, 采用硒肥分次喷施方法较为经济有效^[29-31]。

此外, 施硒肥可提高稻米的产量, 改善稻米品质, 增强水稻抗逆性和对重金属的拮抗作用。其生理机制是硒能提高植株的 GSH-Px 活性, 而 GSH-Px 对高等植物体内的自由基起到清除作用, 减少由于膜脂过氧化引起的损伤, 降低丙二醛(MDA)含量, 增强植物对逆境的抵抗力。需要注意的是, 硒与一些主要营养元素之间会有相互作用。Javkhlan-tuya 等^[32]最近发现, 磷元素可增加土壤中硒元素的有效性, 施用适量的磷可以显著促进作物对硒的吸收。

1.2 小麦

小麦是我国北方居民非常重要的粮食作物, 小麦制品在人们日常饮食结构中占有重要地位, 其含硒量的高低与人体的硒营养状况密切相关。研究表明, 同地区不同作物含硒量不同, 而同一作物在不同地区含硒量也有很大差异^[32-33]。比利时的试验显示, 叶菜类作物的硒含量远高于麦类, 而小麦和马铃薯的硒含量与土壤类型有明显的相关性^[32]。国外很早就春小麦上进行施硒研究, 使春小麦籽粒的硒含量从 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/kg}$ 提高到 $0.7 \sim 1.3 \text{ mg/kg}$ ^[34]。我国冬麦区的试验表明, 冬小麦生长发育过程中叶面喷施多种粮用型富硒制剂(粮油型富硒增甜素、富硒增产素等), 通过小麦自身的生理生化反应, 可将无机硒转化为人体能够吸收利用的有机硒。河南省、河北省均为我国北方的冬麦主产区, 硒可富集在小麦籽粒中而成为富硒小麦^[35-36], 如河北地区施硒质量浓度为 $0.1 \sim 0.25 \text{ mg/kg}$ 时, 可使小麦硒含量达 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg/kg}$, 同时小麦可增产 $8.57\% \sim 16.08\%$ ^[37]。小麦施硒的最佳形式是微粒液肥, 在小麦苗期 5~7 片叶时及拔节期、抽穗期使用效果最佳^[38]。对于土壤硒含量低的地区, 国外最新发现一种近似芽孢杆菌的细菌(*Bacillus pichinotyi*), 可明显促进小麦植株对硒的吸收, 与清水对照相比, 硒的增加量在麦草中为 252%, 籽粒中为 167%, 同时还可以使籽粒中的 Fe 含量增加 70%^[39]。但要注意, 硒对小麦表现双重作用即低浓度时具有促进生长作用而高浓度时正相反^[40]。

小麦施硒已成为我国北方商品粮基地产业化建设的一项新内容。在富硒面粉利用的基础上, 开发富硒小麦苗粉中的 β -胡萝卜素, 作为食品添加剂和营养增补剂, 国外早就有此类报道^[41-42]。焦宇知等^[43]报道, 富硒小麦苗粉中 β -胡萝卜素含量为

4.86 mg/kg,高于文献报道的大麦苗中 β -胡萝卜素含量(4.268 mg/kg)^[44],经氧化镁柱层析分离纯化后, β -胡萝卜素得率达93.37%。

1.3 玉米及其他作物

研究发现,富硒玉米籽粒中,硒元素主要以有机结合态的形式存在,其含量占玉米籽粒中总硒量的近90%;在有机态硒中蛋白质硒含量较高,其中碱溶蛋白质硒占总硒的50.62%。说明玉米籽粒中的硒很大部分是容易被人体吸收利用的,其为玉米产业化开发提供了理论依据。在富硒玉米的开发中,既有选育出的含硒量高的新品种^[45],其天然硒含量为0.473 mg/kg,远高于一般玉米品种,又有多种高新技术集成,采用人工富硒技术施硒实现农民增收和产品的梯级开发、多层次增值^[46]。作为加工利用基础,向东山等^[47]研究确定了富硒玉米籽粒中含硒化合物提取的最佳工艺条件:先用超声波破碎样品5 min,然后用体积为样品20倍的0.05 mol/L NaOH溶液提取2 h。

花生、大豆、油菜、芝麻是我国最重要的四大油料作物,其中花生和大豆是我国主要的食用油原料来源。花生种植面积广,富硒能力强,开发前景很好。花生籽粒中的硒主要是以蛋白质结合硒和多糖结合硒形式存在,花生蛋白质结合硒含量最高,占总硒的69.29%,脂肪态结合硒含量较少^[48]。富硒花生油中的亚油酸含量高于油酸,富硒花生蛋白中必需氨基酸含量为22.306%,非必需氨基酸含量为63.816%,富硒花生油和富硒花生蛋白的硒含量分别为2.570 mg/kg和1.830 mg/kg^[49]。

2 园艺作物富硒效果及其机制

2.1 果树

硒作为一种必需微量元素对果树也有重要的生理作用,但由于果树为多年生植物,给研究富硒规律带来一定困难。目前有关报道多见于以下2点:一是关于施硒后果树树体生命代谢规律的研究,二是关于富硒果品对人体和动物细胞积极作用的机制。

我国北方的果品主产区多为低硒或缺硒区,水果的硒含量多在0.018~0.034 $\mu\text{g/g}$ ^[50]。南方的猕猴桃和番木瓜虽处低硒区,但鲜果硒含量较高,达高富硒水平(分别为0.09 $\mu\text{g/g}$ 和0.027 $\mu\text{g/g}$)^[51-52]。

苹果为非积累硒植物^[53];硒在葡萄植株体内的分布不同,各部位累积量的顺序为叶>根>新梢>果实>主蔓,果实中含硒量达到0.062 mg/kg^[54];硒在猕猴桃植株中的分布为叶>花>果,果实中硒含量达到0.032 $\mu\text{g/g}$ ^[51];番木瓜植株各器官硒含量从

高到低为:根>茎>叶>果>花,果实中含量高达0.102 $\mu\text{g/g}$ ^[52]。

一般而言,适宜的外源硒浓度对果实品质有较好的影响。可溶性固形物含量是果实品质的重要指标,施硒后在果实硒含量增加的同时,桃的可溶性固形物含量可提高0.2%,葡萄可提高1.5%^[55],无花果可提高2.7%~4.1%^[56]。猕猴桃上增质效应最显著,维生素C(Vc)含量提高20.57%^[51]。苹果施用外源硒后,果实的含糖量提高27.33%,单果质量增加6 g,可溶性固形物含量和有机酸含量分别提高1.1%和0.08%^[53]。施硒肥后温州蜜柑果肉硒含量增加43.6%~369.2%^[57]。果树富硒的机制尚不明确,但最新研究^[58]发现,硒可增强果树光合效能,促进光合作用中心光系统II酶活性的提高,而这种酶活性的提高可以促进硒相关蛋白质的合成。

2.2 蔬菜

Kathleen等^[59]研究表明,草莓、萝卜、西红柿和生菜均可有效地积累硒,但以生菜叶片中的硒含量最高(达97.5%)。茄子中的有机硒含量随外源硒浓度的增加而增大,施用相对高浓度的硒(0.60~3.00 $\mu\text{g/g}$)时,其有机硒转化率显著降低^[60]。外源硒的施用提高了萝卜中有机硒的含量,当土壤施硒质量浓度为0.15 $\mu\text{g/g}$ 时有机硒转化率达到最大值,而后随施硒的增加而逐渐下降。用添加外源硒的营养液培养洋葱时发现,洋葱有机硒的质量分数及转化率均随外源硒的增多而迅速减小^[61]。大蒜总硒大部分以有机硒的形式存在,有机化程度为36.05%~78.24%^[62]。莴苣根系吸收的无机态硒在体内可高效率地转化为有机态硒,转化效率随营养液中硒浓度的升高而降低。在土壤中高量施硒条件下,小白菜在生长后期对硒仍然有大量的吸收和累积^[63]。侯燕等^[64]采取在油菜生长期喷施硒肥的方法,使油菜籽获得显著的富硒效果,尤其是在终花至结荚期喷施,硒的积累比清水对照增加500倍。外源硒影响蔬菜品质主要是通过影响体内某些有机化合物的水平来实现的。在小白菜水培试验中发现,在适宜浓度范围内,外源硒可增加小白菜地上部的可溶性总糖、还原糖含量,提高植株体内的总蛋白含量,降低蔗糖、淀粉及纤维的含量^[63]。

2.3 茶叶

有“中国硒都”之称的恩施位于湖北西部地区,盛产绿茶,形成茶与硒天然结合的产物——恩施富硒茶。目前我国富硒茶的开发进展很快,除恩施富硒茶之外还有紫阳富硒茶、福州富硒茶等产品。高硒区茶叶平均含硒量为1.493 $\mu\text{g/g}$,超过粮食高硒

背景值 13.6 ~ 19.2 倍,由此可知茶叶硒素在改善人类硒营养方面作用显著^[65]。

叶面喷施含硒生物制剂,显著促进早春茶树提前发芽,土壤施硒肥可比清水对照增产 6.8% ~ 18.4%,清明前优质高档茶叶产量提高 2 倍^[66]。施硒同样可以有效改善茶叶的品质。李静等^[66]认为,叶面喷施和土壤施亚硒酸钠 2 种方式对茶叶硒含量的提高及品质的改善都非常有利。改善茶叶品质特别是春茶品质,土壤施硒肥的作用比叶面喷施硒肥的作用更显著。不同来源富硒茶蛋白质的氨基酸组成表明,由于人工富硒茶及天然富硒茶氨基酸总量、必需氨基酸、含硒氨基酸(甲硫氨酸和胱氨酸)均比低硒茶叶高,特别是含硒氨基酸随茶叶含硒量的提高而显著增加,因此,低硒土壤施硒是提高茶叶品质的一种有效途径。适宜浓度的硒使植物体内脯氨酸合成上升、MDA 合成量降低,促进叶及根系生长,地上和地下部质量显著提高^[67-68]。相反,高浓度的硒则抑制茶叶的生长。

3 硒与农业环境保护

硒可拮抗不良环境对农作物的胁迫和重金属毒害,因为硒与多种重金属元素间有拮抗作用。果树施硒在生产富硒果品的同时,还能有效地抑制果实中铅、汞、铬、砷等有毒重金属的积累,从而有益于人体健康,这在草莓^[69]、甜柿^[70]、桃和沙梨果^[71]上均有显著效果,如桃果实中硒在积累的同时有效地抑制了重金属元素铅、镉、汞的积累,硒含量比清水对照增加了 132.7%,铅、镉、汞含量分别减少了 83.5%、65.5%、23.9%^[71]。国外的试验结果也证明花椰菜上施硒可有效抑制镉的累积^[14]。草莓在展叶期和盛花期对硒的吸收能力最强,因此,叶面施硒不仅是草莓补充硒肥的较好手段,而且可减少草莓对镉和铅的吸收,降低重金属的毒害作用^[69]。杨燕君等^[70]在甜柿上的富硒试验结果也表现了相似的趋势:喷施 150 mg/L 外源硒对甜柿兴津 20 镉、汞含量的抑制作用最为明显,对次郎果实含铅量的抑制作用最强。此外,由于硒所具有的生物学特性对蔬菜的生长环境具有调节功能,还可以增强蔬菜抵抗重金属污染、病虫害侵袭和逆境胁迫^[72]的能力,这对于提高蔬菜产量、改善品质具有重要的研究价值。

4 问题及展望

随着人们生活水平的提高,科学养生蔚然成风,富硒农产品深受市场追捧,富硒米、富硒果和富硒茶生产和经营的效益日渐高涨。根据我国当前农业生

产结构和规模,可以在水稻、小麦、玉米等主粮作物以及果、菜、茶大宗园艺产品的生产基地有组织地进行富硒农产品的生产。在生产富硒农产品时,要逐步与食品检验、农业科研单位合作,走产学研相结合的路子而不能盲目生产。硒毕竟只是人和动物的微量元素,食用及吸收过多反而会有一定害处^[17]。这就特别要强调富硒农产品生产中合理控硒的技术和方法。严格按照富硒生产技术规范进行组织生产,在产品收获后和加工过程中要进行检测,保证符合标准且食用安全。在销售过程中,消费者对富硒农产品的认可一般依据其品牌的信誉,因此,富硒农产品生产和开发必然要通过产业化的途径走向市场。由于不同作物种类富硒特性的差异较大,所以选育富硒作物时要注意其品种资源和经济器官的类型,同时也要注意硒、硫之间的互作,提高硒元素利用率是今后研究的主要方向之一。

用发展眼光看,农作物富硒会经历由人工施硒向开发利用天然富硒植物资源方向^[45]、由单一富硒向综合富集微量元素的方向转变。此外,随着我国工业化进程的发展,环境破坏和环境污染呈现加重的趋势,农业生产由于长期施用农药和化肥导致微生态系统失调,农作物施硒对重金属的拮抗作用逐渐受到重视^[69]。硒元素还会成为农田或果园的重金属污染修复剂,该领域相关研究应用的深度和广度令人期待。

参考文献:

- [1] Hamilton J W, Beath A. Selenium uptake and conversion by certain crop plants [J]. *Agronomy Journal*, 1963, 55: 528-530.
- [2] Hartfiet W, Schulte W. Selenium deficiency in the federal pupublic of Germany [J]. *Aktuel Ernaechrungsmed*, 1988, 13(3): 77-82.
- [3] 张雯, 耿增超. 外源硒对蔬菜硒积累和产量品质影响的研究现状 [J]. *园艺学报*, 2012, 39(9): 1749-1756.
- [4] 蒋彬. 人体微量元素硒营养 [J]. *广东微量元素科学*, 2002, 9(2): 1-6.
- [5] 荀黎红, 吴丛雅. 低硒与疾病 [J]. *国外医学(医学地理分册)*, 2005, 26(1): 4-7.
- [6] Ognjanovic B I, Markovic S D, Pavlovic S Z, et al. Effect of chronic cadmium exposure on antioxidant defense system in some tissues of rats: Protective effect of selenium [J]. *Physiol Res*, 2008, 57: 403-411.
- [7] Dale V, Eugene J, Hiliaras R, et al. Protective effect of selenium on aluminium-induced oxidative stress in mouse liver in vivo [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2011, 31: 302-306.

- [8] Mirza H, Hossain M A, Fujita M. Exogenous selenium pretreatment protects rapeseed seedlings from cadmium-induced oxidative stress by upregulating antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems[J]. Biol Trace Elem Res, 2012, 149: 248-261.
- [9] 吴求亮, 杨玉爱. 微量元素与生物健康[J]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2000: 255-260.
- [10] Nyberg S. Multiple use of plants: Studies on selenium incorporation in some agricultural species for the production of organic selenium compounds[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1991, 41: 69-88.
- [11] Hu Qiuhui, Pan Genxing, Zhu Jianchun. Effect of fertilization on selenium content of tea and the nutritional function of Se-enriched tea in rats[J]. Plant and Soil, 2002, 238: 91-95.
- [12] 蒋英子, 陈龙, 潘道东, 等. 有机硒保护肝损伤组织脂质过氧化反应及其机制研究[J]. 营养学报, 2005, 27(2): 105-109.
- [13] Finley J W. Bioavailability of selenium from foods[J]. Nutrition Reviews, 2006, 64(3): 146-151.
- [14] Zoyne Pedrero, Yolanda Madrid. Novel approaches for selenium speciation in foodstuffs and biological specimens: A review[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 634(2): 135-152.
- [15] Wu Guoliang, Tian Jianbao. Progress of fruit plants in selenium-enriched research in China[J]. Acta Hort, 2009, 841: 599-602.
- [16] Wu Guoliang, Jian Zaihai, Liu Qunlong, et al. Dynamic absorption by stem dripping injection of selenium element in "Red Fuji" apple trees[J]. Acta Hort, 2009, 841: 595-598.
- [17] 中国国家标准委员会. GB 13105—91 食品中硒限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [18] Zhang Hua, Feng Xinbin, Jiang Chengxin, 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: 27-36.
- [19] 张现伟, 郑家奎, 张涛, 等. 富硒水稻的研究意义与进展[J]. 杂交水稻, 2009, 24(2): 5-9.
- [20] Gregorio G B, Senadhira D, Htut T, et al. Improving iron and zinc value of rice for human nutrition[J]. Agriculture et Development, 1999, 23(9): 77-81.
- [21] 吴永尧, 彭振坤, 罗泽民. 水稻对硒的生物富集作用动态研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 1998, 32(4): 490-494.
- [22] 肖时运. 湖南省稻田硒含量及硒肥施用效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 212-214.
- [23] Fernandes K F M, Berton R S, Coscione A R. Selenium biofortification of rice and radish: Effect of soil texture and efficiency of two extractants[J]. Plant Soil Environ, 2014, 60(3): 105-110.
- [24] Zhao Chengyi, Ren Jinghua, Xue Chengze, et al. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake[J]. Plant and Soil, 2005, 277: 197-206.
- [25] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. 土壤, 2007, 39(5): 731-736.
- [26] Zhang Mu, Tang Shuanhu, Huang Xu, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 107: 39-45.
- [27] 吴永尧, 罗泽民, 陈建英, 等. 水稻硒蛋白及其 Se 结合形态研究[J]. 华中师范大学学报, 2000, 34(2): 223-225.
- [28] 谭周磁, 陈平, 陈嘉勤, 等. 硒在水稻上的应用Ⅲ. 稻田土壤硒含量及施硒对水稻产量与米质的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1997, 20(3): 62-65.
- [29] 张雪林, 姚鼎汉. 水网地区水稻土的含硒量及根外施硒对糙米硒含量的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 242-249.
- [30] 纪国成, 李秀琪, 黄洪明. 富硒增产剂在水稻上应用效果研究初报[J]. 中国稻米, 2003(6): 31.
- [31] 王金英, 江川, 郑金贵. 硒肥和锌肥对水稻产量及糙米矿质营养的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 207-210.
- [32] Javkhlantuya A, Yasuo M N, Shinya K, et al. Effect of long-term phosphorus fertilization on soil Se and transfer of soil Se to crops in northern Japan[J]. Chemosphere, 2014, 107: 7-12.
- [33] 王明远. 中国粮食硒含量的地区分布[J]. 地理研究, 1982(2): 51-57.
- [34] Yagodin B A, Torshin S P. Accumulation of selenium in spring wheat in relational conditions[J]. Agrokhimiya, 1999, 60: 66-73.
- [35] 唐玉霞, 王慧敏, 杨军方, 等. 河北省冬小麦硒的含量及其富硒技术研究[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 347-351.
- [36] 宋家永, 王海红, 朱喜霞, 等. 叶面喷硒对小麦抗氧化性能及籽粒硒含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 178-181.
- [37] Martin R B, John A, James A, et al. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilization[J]. Plant Soil, 2010, 332: 5-18.
- [38] Yasin M, EL-Mehdawi A F, Anwar A, et al. Microbial-enhanced selenium and iron biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.)—Applications in phytoremediation and biofortification[J]. International Journal of

- Phytoremediation, 2015, 17: 341-347.
- [39] Guerrero B, Llugany M, Palacios O, *et al.* Dual effects of different selenium species on wheat[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83: 300-307.
- [40] Stahl W, Sies H. Bioactivity and protective effects of natural carotenoids[J]. *Biochimic Biophysica Acta*, 2005, 1740(2): 101-107.
- [41] Agocs A, Nagy V, Szabo Z, *et al.* Comparative study on the carotenoid composition of the peel and the pulp of different citrus species[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2007, 8(3): 390-394.
- [42] 张金民. 商丘市富硒小麦产业基地建设的可行性分析[J]. *农业科技通讯*, 2011, 27(8): 14-15.
- [43] 焦宇知, 翟玮玮. 富硒小麦苗中 β -胡萝卜素的提取及纯化[J]. *食品科学*, 2011, 32(22): 124-127.
- [44] 酆红岩, 朱惠芬, 杨琴. HPLC 法测定大麦苗提取物中 β -胡萝卜素的含量[J]. *现代中药研究与实践*, 2011, 25(1): 50-51.
- [45] 向东山, 翟琨, 刘晓鹏. 富硒玉米籽粒中硒赋存形态研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(5): 93-95.
- [46] 杜登科, 邓正春, 吴仁明, 等. 富硒玉米优质高产栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2011(14): 59-60.
- [47] 向东山, 翟琨. 富硒玉米籽粒中含硒蛋白质提取工艺的研究[J]. *中国粮油学报*, 2008, 23(2): 48-51.
- [48] 李娟, 史衍玺, 杜志勇, 等. 富硒花生中硒的赋存形态研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(21): 57-59.
- [49] 程祥, 熊华, 胡居吾, 等. 富硒花生油和富硒花生蛋白的基本性质研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(7): 95-97.
- [50] 杨龙彪, 张燕, 倪蓉, 等. 断续流动氢化物发生原子荧光光谱法测定水果中微量硒的研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2004, 14(5): 551-552.
- [51] 陈莉华, 张永康, 刘建福, 等. 硒肥对猕猴桃含硒量和品质的影响研究[J]. *吉首大学学报: 自然科学版*, 1999, 20(1): 50-52.
- [52] 刘德兵, 陈晓雪, 魏军亚, 等. 海南番木瓜主产区土壤、植株硒含量及施硒效应研究[J]. *中国南方果树*, 2007, 36(6): 34-36.
- [53] 呼世斌, 冯贵颖, 赵晓农, 等. 苹果对硒的吸收及其积累特征的研究[J]. *西北植物学报*, 1998, 18(1): 110-115.
- [54] 朱丽琴, 魏钦平, 许雪峰, 等. 葡萄对硒的吸收、分布和积累特性的初步研究[J]. *园艺学报*, 2007, 34(2): 325-328.
- [55] 黄海帆, 乔宝营, 夏立, 等. 保健葡萄生产技术研究[J]. *北方园艺*, 2008(2): 35-37.
- [56] 孟艳玲, 薛玉平, 宋春霞, 等. 富硒无花果生产试验初报[J]. *北方园艺*, 2011(23): 31-32.
- [57] 张玲玲, 张培禄, 黄国善, 等. 温州蜜柑追施硒肥对果实含硒量的影响[J]. *浙江农业科学*, 1995(2): 70-72.
- [58] 宁婵娟, 丁宁, 吴国良, 等. 喷硒时期与浓度对红富士苹果果实品质及各部位全硒和有机态硒含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1109-1117.
- [59] Kathleen M C, Maria T G W, Robert F B, *et al.* Effects of selenium supplementation on four agricultural crops[J]. *Agric Food Chem*, 2003, 51: 704-709.
- [60] 杜振宇, 史衍玺, 王清华, 等. 施硒对茄子吸收转化硒和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 298-301.
- [61] 殷红清, 王萌, 马进. 洋葱无土栽培硒富集试验研究[J]. *湖北民族学院学报: 自然科学版*, 2012, 30(2): 146-149.
- [62] 段咏新, 傅庭治, 傅家瑞. 硒在大蒜体内的生物富集及其抗氧化作用[J]. *园艺学报*, 1997, 24(4): 343-347.
- [63] 史衍玺, 杜振宇, 马丽, 等. 不同施硒方式下小白菜对硒的吸收与累积特征[J]. *土壤通报*, 1998, 29(5): 229-231.
- [64] 侯燕, 孙向彤, 许乾丽, 等. 硒肥对优质油菜品质的影响[J]. *贵州科学*, 1999, 17(3): 204-207.
- [65] 方兴汉, 吴彩, 沈星荣, 等. 从我国茶叶含硒量状况谈我国高硒茶的开发[J]. *中国茶叶*, 1990(6): 6-8.
- [66] 李静, 夏建国, 巩发永, 等. 外源硒肥对茶叶硒含量及化学品质的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 104-109.
- [67] 胡秋辉, 潘根兴, 安辛欣, 等. 富硒茶硒的浸出率及其化学性质的研究[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(5): 69-72.
- [68] 刘群龙, 宁婵娟, 王朵, 等. 硒对酥梨叶片自然衰老及抗氧化酶系统的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(11): 2059-2066.
- [69] 张海英, 韩涛, 田磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(3): 409-416.
- [70] 杨燕君, 刘晓华, 宁婵娟, 等. 叶面施硒对甜柿果实品质及重金属含量的影响[J]. *园艺学报*, 2013, 40(3): 523-530.
- [71] 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.
- [72] 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): 35-38.