

富硒肥的研究及其应用

薛梅¹, 陈悦¹, 刘红芹¹, 夏季¹, 孙宏杰², 宗良纲³, 裴斐¹, 胡秋辉^{1,4}, 方勇^{1,4*}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院/江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏 南京 210023;
2. 山东省淄博市博山区农业综合开发办公室, 山东 淄博 255200; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院,
江苏 南京 210095; 4. 南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 硒是人体必需的微量元素。富硒肥的开发和应用, 是提高农作物中可食部分的硒含量, 进而改善人类硒营养的重要途径。综述了外源硒的种类与形式、施用硒肥对农作物硒含量及其化学形态和农作物品质的影响, 旨在为富硒肥和富硒农产品的研究和开发提供依据。

关键词: 硒; 肥料; 农作物; 品质

中图分类号: S143.7⁺9

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2016) 01-0001-06

硒是人体必需的微量元素, 是人体中部分抗氧化酶和硒蛋白的重要组成部分^[1-2]。研究表明, 硒具有多种重要的生理功能, 如保护心血管和心肌的健康、抗氧化、防癌抗癌等^[3-5]。人体缺硒会导致如克山病、心脑血管病、癌症、高血压等多种疾病^[6-7]。硒无法在体内生成, 人体所需的硒只能从食物中摄取。中国 72% 的地区属于缺硒或低硒地区, 全国约三分之二人口存在不同程度的硒摄入量不足^[8]。硒虽然不是植物必需的营养元素, 但植物是自然界硒生态循环中的关键环节和人体硒的直接来源^[9]。天然食物中硒含量普遍偏低, 通过富硒技术进行生物强化是目前常见的补硒方式。目前, 富硒肉制品, 微生物为载体的功能食品都得到了相应的研究和开发, 而富硒食品最为常用的载体多为植物类食品^[10]。植物具有通过根和叶片吸收微量元素的特点, 利用植物能够吸收和富集无机态硒, 并将其转化为便于植物吸收利用的形态硒的特性进行外源富硒的研究和研发相应的产品。利用富硒肥对植物强化硒已被证明是一种安全、低成本、高效方便的富硒手段^[11]。在低硒地区, 植物硒含量调节

可以采取根施、叶面喷施、浸种或拌种等方法, 提高植物的根、茎、叶、果实等部位的硒含量, 以满足人和动物的生理需求。

近年来, 国内外学者在硒的理论研究方面取得了一定的进展, 但是富硒肥对农作物中硒形态的转化及农作物品质的研究还不够系统和深入。本文从富硒肥的种类, 施用富硒肥对农作物硒含量及其形态的影响, 施用硒对农作物产量、营养品质和重金属吸收的影响 3 个方面, 综述了近年来外源富硒肥的研究与应用情况, 旨在为富硒肥的开发和富硒农产品的研究提供依据。

1 富硒肥的种类

硒虽然不是植物必需的营养元素, 但随着对硒在农业上的深入研究, 富硒肥的种类也多种多样。按施肥方式的不同可分为叶面富硒肥和基施富硒肥; 按物料状况可分为固体富硒肥、液体富硒肥; 根据肥料的化学成分, 可以分为无机富硒肥、有机富硒肥。近年来, 又出现一批新型富硒肥料。

1.1 无机富硒肥

无机肥为矿质肥料, 成分单纯, 有效成分高, 易溶于水, 被称为“速效性肥料”^[12]。富硒无机肥则一般以无机肥料为载体将硒酸钠、亚硒酸钠、硒矿粉等加入其中而制成。付小丽^[13]研究了硒矿、硒粉、亚硒酸钠和硒酸钠 4 种不同硒源对小麦和油菜生长的影响。研究发现, 亚硒酸钠和硒酸钠更有利于植物对硒的吸收, 改善作物品质。无机硒可以做成叶面肥或基施肥等, 基施富硒肥是直接向土壤中撒施硒

收稿日期: 2014-12-29; 最后修订日期: 2015-02-19

基金项目: 农业部公益性行业专项 (201303106); 江苏省高校自然科学基金项目 (13KJA550001); 江苏省科技支撑计划 (BE2014403); 江苏省教育厅青蓝工程; 江苏省优势学科建设工程项目。

作者简介: 薛梅 (1986-), 女, 山东临沂人, 实验员, 研究方向为食品营养与化学。E-mail: xuemei163163@163.com。

通讯作者: 方勇, E-mail: fangyong10@njue.edu.cn。

源的施肥方式,虽然能持久解决硒问题,因投资高、易污染环境,在生产应用方面有一定局限性。有研究发现,在水稻中施硒,土壤基施用量以每公顷施亚硒酸钠 150.0 ~ 225.0 g,硒酸钠 22.5 ~ 45.0 g 为宜^[14]。叶面喷施具有便于操作、高效快捷等优点,可以减少土壤因素对施硒有效性的影响,提高硒的利用效率。赵京等^[15]以亚硒酸钠为硒源,配合氮、磷、钾肥和硼砂等掺土混匀后均匀撒入土壤表面,发现该种施肥方式能有效提高紫花苜蓿的产量和品质。

1.2 有机富硒肥

广义上的有机肥通过对各种动物、植物残体或人体代谢物经过堆肥、沤肥等方式形成,它可以提供丰富的有机质、改善土壤的理化性质^[16]。由于无机富硒肥的适用量较难精准把握,作物对硒酸盐反应较为敏感,过量的无机硒会致使作物生长受到抑制,从而出现减产和品质下降现象,进而影响到人体健康和生态环境。此外,无机富硒肥经过水溶解和微生物代谢易产生损失,降低富硒肥利用率^[17]。而有机富硒肥料作为土壤改良剂,在培养富硒作物方面利用率高、效果显著。有机富硒肥的种类较多,有氨基酸硒肥、腐植酸硒肥等。富硒有机肥一般是在发酵腐熟的有机肥或有机肥发酵液中添加亚硒酸钠,或添加亚硒酸钠后同有机肥一起发酵。另外一种氨基酸硒肥,将天门冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸等氨基酸与氮、磷、钾和亚硒酸钠按一定比例调配组成,施用时加水稀释喷施。王斐等^[18]在研究氨基酸硒肥对梨树的影响时发现,氨基酸硒肥可以改善梨果实品质,极显著提高果肉中硒元素的含量,减少石细胞,改善叶片的生长状况。腐植酸硒肥将腐植酸、硅微粉和亚硒酸钠按一定比例混合,肥料用于基施,可改良土壤、调节土壤酸度、增强肥效。

1.3 基施富硒肥和叶面富硒肥

根据施肥方式不同,将富硒肥分为基施富硒肥和叶面富硒肥。前者是最传统,也是最常见的富硒肥,通过改善土壤硒环境增加植物内部硒含量。而叶面富硒肥则是通过叶面补充硒,突出特点是针对性强、养分吸收运转快、避免土壤对硒的固定、增加硒的利用率、施肥量少。杨益花等^[19]分别将叶面和基施富硒肥施用于水稻,结果表明,水稻叶面富硒肥施用量为 34.1 g/hm² 时,稻谷总硒含量 195.69 μg/kg,显著高于基施 121.9 μg/kg 富硒肥。新疆北部土壤是典型的低硒灰漠土,研究发现,在

该土地上种植大豆,在大豆花期叶面喷施液体硒肥(硒酸盐),随着施硒量的增加,籽粒中硒的富集量也随之增加,当叶面富硒肥为 900 mL/hm² (硒酸盐 250 g) 时,大豆籽粒硒含量为 4.28 mg/kg,较对照 (0.74 mg/kg) 增加显著^[20]。

1.4 新型富硒肥

1.4.1 生物富硒肥

生物富硒肥是指利用生物技术制造的、对作物具有特定肥效的生物制剂,其有效成分可以是特定的活生物体、生物体的代谢物或基质的转化物等,这种生物体既可以是微生物,也可以是动、植物组织和细胞。陈历程等^[21]将虾壳、蚕粪、鸡粪、猪粪及 EM 菌以适当比例混合,加入无机硒(亚硒酸钠或硒酸钠),持续发酵 4 个星期,制得微生物富硒肥。刘军等^[22]将亚硒酸钠混匀于土壤中,以此为基质培养蚯蚓,利用蚯蚓生物转化亚硒酸钠后得到的富硒蚯蚓粪和富硒蚯蚓氨基酸叶面肥的硒肥料。结果表明,施用蚯蚓转化的富硒肥,在韭菜产量、生物功能和叶片硒含量等方面具有显著地促进作用。因此,生物富硒肥是一类低成本、高效、无毒、环保的新型富硒肥料。

1.4.2 纳米富硒肥

纳米硒是近年来一项新的发明,它的硒单质是纳米级的,易于被植物体吸收和利用,通过植物体的吸收和转运,以无机硒或硒蛋白、硒多糖等有机硒形式存在。因而纳米硒被植物体吸收后能充分发挥有机硒与无机硒的生物活性功能。Maryam 等^[23]研究发现,在水培番茄培养液中添加纳米硒,可以促进植株的生长和成熟,其效果优于普通外源硒,且富硒肥的粒度越小,植株果实增重效果越明显。同时,作为纳米科技的新产品,其最大的特点是安全性高,高浓度硒会对农作物产生毒害作用,污染环境,而纳米硒无毒、稳定,具有较高的生物活性,更容易被植物吸收和转运,在富硒肥料生产和硒污染治理等方面具有巨大的应用潜力^[24-25]。

1.4.3 缓释富硒肥

粮食单产的增加与普通化肥造成的浪费污染是农业生产矛盾。缓释肥料技术的发展为这类问题的解决带来了新的思路和途径,成为了世界肥料研究的热点。缓释肥料是 21 世纪肥料产业的重要发展方向^[26]。缓释富硒肥采用了特殊的方法对硒源进行加工,施用后有效成分缓慢释放出来,延长了肥

效释放期,减少有效态硒在土壤中被吸附或固定,从而提高硒的利用率^[27]。近年来,新型缓释肥的研究引起广泛关注,肥效较传统肥料明显提高,且减少了由肥料损失而引起的环境污染,具有潜在的生态、经济和社会价值^[28]。殷金岩等^[29]研究了不同富硒肥对马铃薯产量、硒含量的影响,通过吸附的方法将亚硒酸钠吸附制成生物炭基富硒肥和保水缓释肥,试验证明这两种肥料硒含量为 1.5 mg/kg 时,马铃薯分别增产 46.91 和 51.23 g/株,效果要优于硒酸钠和亚硒酸钠。

2 富硒肥对农作物硒水平的影响

硒在植物中的含量范围比较大,一般植物中硒含量 0.02 ~ 1.0 mg/kg,这主要取决于植物对硒的吸收程度和其所生长的环境^[30]。目前富硒作物主要分类方法有两种,一种将富硒植物分为聚硒植物和非聚硒植物,聚硒植物可作为硒指示植物,如黄芪属植物,硒含量为 1 ~ 10 g/kg,大部分农作物属非聚硒植物,含硒量不超过 30 mg/kg^[31]。另一种将富硒植物分为累积植物(指示植物)、中度含硒植物与低度含硒植物^[32]。施用硒可提高农作物中硒的水平。植物组织中的硒分为有机硒和无机硒。有机硒形式是多种多样的,小分子形式硒主要是硒代氨基酸及其衍生物,如硒代半胱氨酸、硒代胱氨酸(SeCys_2)、硒-甲基硒代半胱氨酸(MeSeCys)、硒代高胱氨酸、硒代蛋氨酸(SeMet)等,植物体内大分子形式存在的硒则包括硒、含硒核糖核酸、核多糖等。硒在植物体内的无机硒(Se^{IV})经植物生物转化生成有机硒,储存在植物体内,有机硒主要又以可溶性蛋白形式存在^[33-34]。

2.1 富硒肥对粮食作物硒含量及硒形态的影响

粮食作物是人类食物的主要来源,富硒粮食作物是人们补硒的重要途径。近年来,有学者以水稻、玉米、豆类、薯类、青稞、蚕豆、小麦为对象,研究了外源硒对农作物硒含量的影响和植物体内硒形态的转化。Chu^[35]对冬小麦进行施硒研究发现,在不同生长时期硒的效果不同,开花结果期施用效果最佳,30 mg/L 的亚硒酸钠可使小麦硒含量提高 296%。Liu 等^[36]以亚硒酸钠对水稻进行富硒处理,研究了糙米蛋白中硒的分布规律,证明外源富硒可显著提高糙米清蛋白和球蛋白的硒含量,84.34% 的硒结合在分子量小于 36.3 kDa 的糙米蛋白中。Lakmalie 等^[37]比较研究了土壤施埋,富硒尿素溶水灌溉,叶面喷施,液态富硒肥施埋、溶水灌溉 4 种

施肥方式对水稻硒含量及形态的影响,表明在抽穗期田间灌溉富硒尿素肥水水稻的硒含量最高,为普通水稻的 5 ~ 6 倍,水稻中主要的硒形态为 SeO_4^{2-} 。

2.2 富硒肥对蔬菜作物硒含量及硒形态的影响

Manteetong 等^[38]研究发现,用不同浓度的亚硒酸钠培养甘蓝 15 d 后,甘蓝干重硒含量最高可达 400 $\mu\text{g/g}$,并用 HPLC-ICP-MS 分析表明,有机硒的形式主要是硒代蛋氨酸和甲基硒代半胱氨酸。方勇等^[39]通过大蒜叶面喷施硒的田间试验,发现大蒜对硒也有较高的富集作用,蒜头的硒含量从 0.047 $\mu\text{g/g}$ 显著提高到 0.200 ~ 0.834 $\mu\text{g/g}$,大蒜茎叶硒含量从 0.043 $\mu\text{g/g}$ 显著提高到 0.291 ~ 0.962 $\mu\text{g/g}$,富硒大蒜中 MeSeCys 、硒代胱氨酸和无机硒的含量显著提高,与普通大蒜相比,有机硒形态为 MeSeCys ,占总提取硒的 81.2%。

2.3 富硒肥对果树作物硒含量及硒形态的影响

近年来,富硒水果因其保健功效越来越受到广大消费者欢迎。牛锐敏^[40]在对苹果春施基肥时混合施入硒(27 g/株)发现,金矮生苹果果皮和果肉中的含硒量明显增加,果皮和果肉中的含硒量分别比普通苹果提高 8.82% 和 292%,此外,单果重、可溶性固形物含量和有机酸含量分别比对照提高了 3.9%、1.1% 和 0.08%。Banuelos 等^[41]研究了富硒刺梨中的硒形态及分布规律,证明刺梨中的硒主要为有机硒,以游离的非蛋白及硒代蛋氨酸形式贮存在果实及扁茎中,具有补硒及抗癌的保健作用。

2.4 富硒肥对真菌硒含量及硒形态的影响

外源施用富硒肥在富硒食用菌的生产和开发领域也得到了广泛的应用。Bhatia 等^[42]用亚硒酸钠溶液培养双孢菇,发现双孢菇中硒含量相对于对照组提高了 700 倍,有机硒主要以 SeMet 形式存在;Maseko 等^[43]研究发现,不同浓度的亚硒酸钠溶液浇灌小蘑菇后硒含量提高了 28 ~ 43 倍,伞盖和伞柄中硒蛋白含量从 13.8 和 14.1 $\mu\text{g/g}$ 分别提高到了 60.1 和 137.0 $\mu\text{g/g}$,硒主要以 SeCys_2 、 SeMet 、 MeSeCys 等硒氨基酸形式存在。Dong 等^[44]研究了富硒蛹虫草中硒的形态与分布,得到蛹虫草子实体中小分子量的硒化合物主要为 SeMet ,与蛋白结合的硒化合物主要为 SeMet 和 SeCys_2 ,虫草尾端富含腺苷、虫草素、胡萝卜素等营养物质,最适宜用于功能食品的开发。Stabnikova 等^[45]利用果蔬产品加工废弃物添加亚硒酸氢钠制备富硒酵母,该富硒酵母合成的活性物质可作为重要的富硒蛋白质资源。

3 富硒肥对农作物的产量和品质的影响

3.1 富硒肥对农作物产量的影响

研究发现,施硒在一定程度上能提高农作物产量。Chu 等^[35]对冬小麦进行施硒研究,发现在开花前施低浓度硒可以显著提高小麦的产量,以在抽穗开花期施硒产量提高最为显著,开花之后施硒对产量没有明显影响。Nawaz 等^[46]也通过浸种、滴灌、叶面喷施 3 种方式补硒,证明硒(硒酸钠)可提高小麦产量和品质,其中叶面喷施效果明显。张华华等^[47]通过蚕豆籽粒的基施硒肥盆栽试验,发现尽管施硒能显著提高蚕豆籽粒硒含量,但籽粒硒含量与土壤施硒量之间并非线性增加关系,施少量硒(3.1 mg/kg)便可以极大地提高籽粒硒含量,而高浓度硒则降低蚕豆产量。

3.2 富硒肥对农作物生理功能的影响

研究发现,施用硒可以影响植物的生长发育,参与调控植物的光合和呼吸作用,抵御植物体内自由基伤害,提高植物抗逆能力,拮抗重金属等。Pezzarossa 等^[48]研究发现,番茄培养液中添加适量的硒,除了增加水果的保健功效,还可以延长番茄的成熟期,同时一定程度上抑制叶绿素、类胡萝卜素的降解。Nawaz 等^[46]研究了缺水地区施用富硒肥对小麦抗逆性的影响,发现水分亏缺条件下,小麦籽粒中的硒含量明显降低,叶面喷施 Na_2SeO_4 后,小麦细胞渗透保护能力和抗氧化能力显著提高。还有学者研究了衰老过程中硫、硒配施对大蒜生长、品质及抗氧化能力的影响,结果表明,硒的施用显著降低了丙二醛含量,提高了处理 200 d 的 Fv/Fm 值与叶绿素含量,促进了大蒜的生长^[49]。

3.3 富硒肥对农作物蛋白质、糖类、维生素含量的影响

随着生活水平的提高,人们对膳食营养结构的要求越来越高。蛋白质、糖类、维生素含量和构成是判断食品营养结构的重要指标。有研究发现,施用硒可以提高农作物主要营养物质的含量。殷金岩^[50]研究发现,过量的硒会对马铃薯的生长产生抑制,降低产量和品质,适量的硒提高马铃薯产量和品质,在施硒量 37.9 mg/m^2 时马铃薯的粗蛋白含量增加了 12.18%~20.03%,还原糖提高了 6.45%~12.90%,维生素 C 含量提高 -0.54%~3.11%,淀粉含量增加了 0.73%~1.12%;雷红灵等^[51]在探讨叶面硒对藤茶品质的影响时发现,喷施硒 15~20 d 后藤茶中的

黄酮可溶性蛋白、可溶性糖和游离氨基酸的含量明显提高,提高了茶叶的营养保健价值。

3.4 富硒肥对农作物重金属含量的影响

重金属容易被农作物根部吸收而迁移至地上部分,造成农作物重金属污染,威胁农产品安全。众多研究表明,硒具有拮抗重金属,抑制植物对重金属吸收、转运的功能。Santhak 等^[52]研究证实了硒对于黄豆根部对汞的吸收具有拮抗作用,但是汞并不会影响硒的吸收和在植株中的分布。Scott 等^[53]以吊兰为对象,分别施以不同形态的硒,发现 Se^{VI} (硒酸钾)和 Se^{IV} (亚硒酸钠)都表现出了明显的与砷拮抗作用,抑制吊兰对砷的吸收,且吊兰中硒与砷不会结合于同一化合物。熊仕娟等^[54]研究发现,在镉污染的土壤中施用无机硒(Na_2SO_3)能显著降低黄瓜果实中两种形态镉的含量。Qing 等^[55]研究了卷心菜中硒和铬拮抗机制,发现铬能诱导植物体内脂质过氧化物和超氧化物自由基的生成,而施用富硒肥则可增强超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性来提高植物抗氧化能力,进而缓解铬毒性。He 等^[56]通过卷心菜和生菜的盆栽试验及大田试验研究发现,土壤中施肥的同时供给 Na_2SeO_3 ,可与锌离子(ZnSO_4)协同发挥作用抑制作物对铅和镉积累,同时促进植株对铁、锰、铜、钙、钾等有益矿物质的吸收。

4 展望与问题

肥料作为农作物的粮食,对农作物的产量和品质起着不可替代的作用。富硒肥不仅可以提高农作物的硒含量和产量,还可以抑制作物对重金属的吸收,改善作物营养品质。然而,硒在肥料中如何与其它组分相互作用,硒参与的微生物和植物体内循环以及转化机制尚不明确,硒的施用对农业环境的安全影响有待进一步调查、研究。因此,外源硒的安全、高效利用,硒在环境中的形态和转化,以及富硒农作物品质改善的机制都有待深入研究,这对于提高人们膳食营养水平,保证农产品安全等方面具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] Zhu Y G, Pilonismitz E A H, Zhao F J, et al. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation [J]. Trends in Plant Science, 2009, 14 (8): 436-442.
- [2] Terry N, Zaved A M, Souza M P, et al. Selenium in higher plants [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Mo-

- lecular Biology, 2000, 51 (1): 401–432.
- [3] Hou J, Wang T, Liu M F, et al. Suboptimal selenium supply: a continuing problem in Keshan disease areas in Heilongjiang province [J]. Biological Trace Element Research, 2011, 143 (3): 1255–1263.
 - [4] Tsai C, Ou B, Liang Y, et al. Growth inhibition and antioxidative status induced by selenium-enriched broccoli extract and selenocompounds in DNA mismatch repair-deficient human colon cancer cells [J]. Food Chemistry, 2013, 139 (1–4): 267–273.
 - [5] Fatma M E D. Antioxidant effect of vitamin E and selenium on lipid peroxidation, enzyme activities and biochemical parameters in rats exposed to aluminum [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2004, 18: 113–121.
 - [6] Miguie N A, Carmen C V. Selenium in food and the human body: A review [J]. Science of The Total Environment, 2008, 400 (1–3): 115–141.
 - [7] Kieliszek M, Blazejak S. Selenium: Significance, and outlook for supplementation [J]. Nutrition, 2013, 29 (2): 713–718.
 - [8] Gao J, Liu Y, Huang Y, et al. Daily selenium intake in a moderate selenium deficiency area of Suzhou, China [J]. Food Chemistry, 2011, 126 (2): 1088–1093.
 - [9] Helina H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18 (4): 309–318.
 - [10] Banuelos G S, Arroya I, Pickering I J, et al. Selenium bio-fortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator *Stanleya pinnata* [J]. Food Chemistry, 2015, 166 (1): 603–608.
 - [11] Chen L C, Yang F, Xu J, et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilisation of selenite and selenate on selenium content of rice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50 (18): 5128–5130.
 - [12] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106 (2): 268–274.
 - [13] 付小丽. 不同硒源对小麦和油菜生长及硒累积的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
 - [14] Varo P. Commercial fertilizers and geo medical problems [M]. Lag: Norwegian University Press, 1987.
 - [15] 赵京, 介晓磊, 胡华锋, 等. 基施硒肥对紫花苜蓿不同形态硒含量和积累量的影响 [J]. 中国草地学报, 2013, 1 (1): 110–114.
 - [16] 杨帆, 李荣, 崔勇, 等. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, (4): 77–82.
 - [17] Žnidarcic D. Selenium and its species in the environment [J]. Acta Agriculturae Slovenica, 2011, 97: 73–83.
 - [18] 王斐, 蒋淑苓, 欧春青, 等. 不同时期和不同方式施用氨基酸硒肥对梨树的影响 [J]. 中国南方果树, 2013, 42 (6): 89.
 - [19] 杨益花, 袁卫明, 单建明, 等. 叶面硒肥施用量对稻谷总硒含量及产量的影响 [J]. 河北农业科学, 2013, 17 (3): 51–54.
 - [20] 冶军, 单维东, 褚贵新. 叶面喷施硒肥对大豆产量和质量效应的初步研究 [J]. 新疆农业科学, 2009, 46 (3): 506–509.
 - [21] 陈历程, 杨方美, 张艳玲, 等. 我国部分大米含硒量分析及生物硒肥对籽粒硒水平的影响 [J]. 中国水稻科学, 2002, 16 (4): 341–345.
 - [22] 刘军, 刘春生, 史庆华, 等. 新型富硒肥料对韭菜生长及品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (16): 164–167.
 - [23] Maryam H, Reza A, Jaime A, et al. Low and high temperature stress affect the growth characteristics of tomato in hydroponic culture with Se and nano-Se amendment [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 178: 231–240.
 - [24] Wang H L, Zhang J S, Yu H Q. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2007, 42 (10): 1524–1533.
 - [25] 李吉祥, 吴文良, 郭岩彬. 细菌生物合成纳米硒的研究进展 [J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31 (6): 551–554.
 - [26] Zhang M, Gao B, Chen J J, et al. Slow-release fertilizer encapsulated by graphene oxide films [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 255 (1): 107–113.
 - [27] 向天勇, 何文辉, 张正红, 等. 含硒缓释复合肥在菠菜生产上的应用 [J]. 浙江农业科学, 2010, (2): 253–255.
 - [28] 邓正春, 李丕炎, 喻米玲, 等. 维生素锌硒肥对水稻产量及品质的影响 [J]. 中国稻米, 2011, 17 (4): 30–31.
 - [29] 殷金岩, 耿增超, 孟令军, 等. 不同硒肥对马铃薯产量硒含量及品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报, 2012, (9): 123.
 - [30] Temmerman L D, Waegeneers N, Thiry C, et al. Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468–469: 77–82.
 - [31] 果秀敏, 牛君仿, 方正, 等. 植物中硒的形态及其生理作用 [J]. 河北农业大学学报, 2003, 26 (增刊): 142–147.
 - [32] 赵春梅, 曹启民, 唐群峰, 等. 植物富硒规律的研究进展 [J]. 热带农业科学, 2010, 30 (7): 82–86.
 - [33] Freeman J L, Tamaoki M, Stushnoff C, et al. Molecular mechanisms of selenium tolerance and hyperaccumulation in *Stanleya pinnata* [J]. Plant Physiology, 2010, 153 (4): 1630–1652.
 - [34] Freeman J L, Zhang L H, Marcus M Q, et al. Spatial imaging, speciation, and quantification of selenium in the hyperaccumulator plants *Astragalus bisulcatus* and *Stanleya pinnata* [J]. Plant Physiology, 2006, 142 (3): 124–134.
 - [35] Chu J Z. The effects of selenium on physiological traits, grain selenium content and yield of winter wheat at different development stages [J]. Journal Biological Trace Element Research, 2013, 151 (3): 434–440.

- [36] Liu K L, Chen F S, Zhao Y, et al. Selenium accumulation in protein fractions during germination of Se - enriched brown rice and molecular weights distribution of Se - containing proteins [J]. Food Chemistry, 2011, 127: 1526 - 1531.
- [37] Lakmalie P, Mike J M, Ason K K, et al. Selenate - enriched urea granules are a highly effective fertilizer for selenium biofortification of paddy rice grain [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2012, 60: 6037 - 6044.
- [38] Mantetong S, Chookhampaeng S, Chantiratikui A, et al. Hydroponic cultivation of selenium - enriched kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra* L.) seedling and speciation of selenium with HPLC - ICP - MS [J]. Microchemical Journal, 2013, 108 (1): 87 - 91.
- [39] 方勇, 罗佩竹. 大蒜的生物富硒作用及其硒的形态分析 [J]. 食品科学, 2012, 33 (17): 1 - 5.
- [40] 牛锐敏. 施用硒肥对金矮生苹果品质和含硒量的影响 [J]. 落叶果树, 2011, (2): 13 - 14.
- [41] Banuelos G S, Fakra S C, Walse S S, et al. Selenium accumulation, distribution, and speciation in spineless prickly pear cactus: a drought and salt - tolerant, selenium - enriched nutraceutical fruit crop for biofortified foods [J]. Plant Physiology, 2010, 155 (1): 315 - 327.
- [42] Bhatia P, Aureli F, Damato M, et al. Selenium bioaccessibility and speciation in biofortified Pleurotus mushrooms grown on selenium - rich agricultural residues [J]. Food Chemistry, 2013, 140 (1 - 2): 225 - 230.
- [43] Maseko T, Callahan D L, Dunshea F R, et al. Chemical characterisation and speciation of organic selenium in cultivated selenium - enriched *Agaricus bisporus* [J]. Food Chemistry, 2013, 141 (4): 3681 - 3687.
- [44] Dong J Z, Ding J, Yu P Z. Composition and distribution of the main active components in selenium - enriched fruit bodies of *Cordyceps militaris* link [J]. Food Chemistry, 2013, 137: 164 - 167.
- [45] Stabnikova O, Wang J Y, Ding H B, et al. Biotransformation of vegetable and fruit processing wastes into yeast biomass enriched with selenium [J]. Bioresource Technology, 2005, 96: 747 - 751.
- [46] Nawaz F, Ashraf M Y, Ahmad R, et al. Supplemental selenium improves wheat grain yield and quality through alterations in biochemical processes under normal and water deficit conditions [J]. Food Chemistry, 2015, 175: 350 - 357.
- [47] 张华华, 李放, 李航宇, 等. 基施硒肥对蚕豆籽粒硒含量、营养成分及抗氧化性的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2014, 19 (5): 66 - 72.
- [48] Pezzarossa B, Rosellini I, Borghesi E, et al. Effects of Se - enrichment on yield, fruit composition and ripening of tomato (*Solanum lycopersicum*) plants grown in hydroponics [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 165: 106 - 110.
- [49] 成波, 连海峰, 刘世琦, 等. 硫硒配施对衰老期大蒜生长、品质及抗氧化能力的影响 [J]. 植物生理学报, 2015, 51 (1): 44 - 50.
- [50] 殷金岩. 不同硒肥对马铃薯硒素吸收转化及其产量、品质影响的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [51] 雷红灵, 周大寨, 郑小江, 等. 叶面喷硒对藤茶硒含量及品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报, 2012, 40 (2): 190 - 194.
- [52] Santhak V Y, Joseph A C. A study of Se - Hg antagonism in Glycine max (soybean) roots by size exclusion and reversed phase HPLC - ICPMS [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, 389: 715 - 723.
- [53] Scott E A, Brittany C, Joseph A C. Elucidating the selenium and arsenic metabolic pathways following exposure to the non - hyperaccumulating *Chlorophytum comosum*, spider plant [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60 (4): 1289 - 1297.
- [54] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36 (1): 286 - 294.
- [55] Qing X, Zhao X, Hu C. Selenium alleviates chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*) leaves [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 114: 179 - 189.
- [56] He P P, Lv X Z, Wang G Y. Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables [J]. Environment International, 2004, 30: 167 - 172.

Study of selenium-enriched fertilizer and its application

XUE Mei¹, CHEN Yue¹, LIU Hong-qin¹, XIA Ji¹, SUN Hong-jie², ZONG Liang-gang³, PEI Fei¹, HU Qiu-hui^{1,4}, FANG Yong^{1,4*} (1. College of Food Science and Engineering/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023; 2. Agricultural Comprehensive Development Office of Boshan, Zibo 255200; 3. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; 4. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Abstract: Selenium is an essential trace element in human beings. The development and application of selenium-enriched fertilizer is an important way to improve its selenium content, and the selenium nutrition for human. This paper reviewed the form of exogenous selenium, the influence on the quality, selenium contents and selenium speciation of the crops with application of selenium-enriched fertilizer, which will provide reference for further investigation and development of selenium-enriched fertilizer and Se-enriched agro-food.

Key words: selenium; fertilizer; crops; quality