

# 土壤硒及其与植物硒营养的关系\*

赵中秋<sup>1</sup> 郑海雷 张春光 马建华

(厦门大学生命科学学院生态研究所, 厦门 361005)

**摘要** 综述了土壤中 Se 的形态分布、有效性及其与植物关系研究方面的进展。论述了不同形态的 Se 在土壤中分布情况、对植物的有效性与土壤 pH 值、化学及矿物学组成、吸附表面、氧化还原状态等物理化学性质的关系; Se 在植物中的富集、转化及其对植物的抗氧化、促进生长、提高产量和质量等各种生物学效应; 并在此基础上对 Se 的应用前景做了展望。

**关键词** 土壤, 硒形态, 植物, 生物效应

中图分类号 946.1<sup>+</sup>1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2003)01-0022-04

**Advances in the studies on selenium in soil and selenium biological effect.** ZHAO Zhongqiu, ZHENG Hailei, ZHANG Chunguang, MA Jianhua (Institute of Ecology, School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1): 22~25.

This paper reviewed advances in the studies on forms and bioavailability of selenium (Se) in soil and the relationship between selenium and plant. The coverage aspects include the relationship between the distribution and bioavailability of various forms of Se and the physical and chemical properties, including pH, chemical and mineralogical composition, adsorbing surface and oxidation-reduction status; the accumulation and biological effect of Se in plant such as anti-oxidizing, growth promoting, mass and quality enhancing. And on this basis, the study and application prospective was previewed.

**Key words** soil, forms of selenium, plant, biological effect.

## 1 引言

自 Schwarz<sup>[38]</sup>发现 Se 元素具有营养作用以来,对 Se 元素的研究引起了人们的重视。其丰缺与人类和动物的正常机体代谢和健康密切相关,生态环境调查和病理学研究表明,许多地方性疾病如克山病、大骨节病、地氟病、克汀病、地方性癌等均与环境的低 Se 水平有关<sup>[22]</sup>。有关 Se 具有防癌抗癌、清除体内自由基、抗膜脂过氧化、防止衰老等作用已经得到证实<sup>[41]</sup>。然而,在农牧业生产中 Se 营养普遍不足,据调查中国有 72% 的县(市)不同程度缺 Se,其中 1/3 为严重缺 Se 区,全世界 2/3 的地区缺 Se<sup>[9]</sup>。在农牧业中,加强生态环境中 Se 的调控和改良,利用植物实现无机硒向有机硒的转化,提高食物中 Se 的含量,是改善人和动物 Se 营养的根本措施。农作物对 Se 的吸收和富集以及 Se 对植物的生物学效应研究也逐渐引起了广泛的重视。

## 2 土壤 Se 形态及其有效态

### 2.1 土壤 Se 的形态

Se 在地壳中一般和金属硫化物伴生,岩石中的

Se 不能被作物吸收。经过风化、物理、化学、微生物等作用,岩石中的 Se 被转化成氧化物,被冲刷进土壤,以各种形态存在于其中。土壤中 Se 的形态大致有以下几种: 元素态 Se。是土壤微生物还原亚硒酸盐或硒酸盐的产物,仅占少量; 硒酸盐和亚硒酸盐; 金属硒化物; 有机结合态,主要由动植物残体形成; 小分子有机硒化物,如含硒蛋白、硒基氨基酸等。在这些形态中,元素态 Se、硒酸盐、亚硒酸盐及有机硒化合物通常为主要存在形式<sup>[37]</sup>。

Se 在土壤中的浓度及形态分布受土壤的不同物理、化学性质影响,包括酸碱度、化学及矿质元素组成、吸附表面和氧化还原状态等<sup>[24]</sup>。不同性质的土壤中,无论是原土 Se 还是外加 Se,其有效硒含量高低顺序均为潮土 > 褐土 > 棕壤<sup>[21]</sup>; 土壤酸碱度和氧化还原状态对土壤 Se 的分布和有效性也有很大的影响<sup>[26,30,32,42]</sup>,一般酸度越强,对 Se 的吸附固定能力越强<sup>[25]</sup>。

### 2.2 土壤 Se 的有效态

植物对 Se 的吸收和富集与土壤及水中 Se 的丰

\*国家自然科学基金(30271065, 39970438, 39870630)和福建省自然科学基金项目(C97002)资助。

\*\*通讯作者

收稿日期:2001-05-15 改回日期:2002-07-16

缺和形态有直接关系。然而,不同形态的 Se 具有不同的化学和生物学特性,对植物的有效性也有很大的差别。研究表明,水溶态 Se (包括可溶性有机化合物、可溶性亚硒酸盐和硒酸盐 3 种形式)与植物吸收 Se 直接相关<sup>[21,27]</sup>。其中,用  $\text{NaHCO}_3$  (pH8.5) 浸提法提取的 Se 与植物吸收 Se 之间具有极显著的相关性,表明,水溶态硒容易被植物吸收,因此常把水溶态 Se 作为测定土壤有效硒的一种方法,而把  $\text{NaHCO}_3$  溶液浸提法作为评价土壤对植物有效态硒的指标。

水溶性 Se 中,植物对不同形态无机硒的吸收率比例大致为  $\text{Se}^{6+} : \text{Se}^{4-} : \text{Se} = 30\ 000 : 400 : 1$ ,即以  $\text{Se}^{6+}$  的有效性最高,且土壤 pH 值越接近中性,对植物的有效性越高。此外,有机结合态硒相对利用率最低<sup>[27]</sup>。

### 3 植物对 Se 的吸收、转化和富集

#### 3.1 原土 Se 与植物 Se 含量

土壤总硒含量及水溶性 Se 含量与植物 Se 含量有显著的相关性。在某些区域,土壤总硒含量和玉米、小麦、水稻 Se 含量的相关系数为 0.81,0.73 和 0.72,而土壤水溶性 Se 含量和水稻、玉米、和黄豆 Se 含量的相关系数达 0.996,0.995 和 0.995<sup>[7]</sup>。应用它们的高度相关性,通过调控土壤 Se 含量,可以达到调节和提高作物 Se 含量,从而达到改善人和动物的 Se 营养缺乏现状,满足人和动物的 Se 营养水平要求的目的。

#### 3.2 外加 Se 提高植物 Se 含量

全世界有 2/3 的地区为缺 Se 或低 Se 区,富 Se 作物和食品的研究引起了国内外普遍的关注<sup>[11,29]</sup>。人们通过土壤施 Se 或叶面喷施等方法,产生出了富硒茶、富硒大蒜、富硒水稻等产品,为缺 Se 地区人民补 Se、治疗和防止 Se 缺乏症作出了重要贡献。胡秋辉等<sup>[13]</sup>对低 Se 茶园进行土壤施用和叶面喷施亚硒酸钠,茶叶 Se 含量均比对照显著提高,茶叶 Se 含量达  $0.32 \sim 1.45 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其中有机 Se 占 76%~90%。他们又进一步对通过外施 Se 肥产生的富硒茶与高硒区天然富硒茶的含 Se 蛋白进行了电泳分析,结果显示二者化学性质相似,表明,经茶树对外加 Se 的生物转化生产的富硒茶与天然富硒茶无显著差异。富硒茶作为安全、有效性高的保健食品,其营养价值和经济价值已引起了人们的关注。水稻对 Se 有一定的富集能力,对水稻施以 Se 微肥,可显著

提高籽粒和秸秆 Se 含量,从而使大米和大量用做动物饲料的稻草的营养更全面,品质更高<sup>[8]</sup>。有人用含有亚硒酸钠培养液培养具有重要食用和医疗保健价值的盐藻,获得了 Se 含量比对照显著提高的富硒盐藻,进一步提高了盐藻的营养和保健价值<sup>[3]</sup>。高学云等<sup>[16]</sup>研究表明,烟草叶片尤其是叶片中的水溶性蛋白对叶面施 Se 有较高的富集性。在低 Se 地区对玉米、小麦、大豆进行叶面喷 Se,能显著提高其籽粒中的 Se 含量<sup>[12]</sup>。随着对植物富硒研究的深入和发展,富硒灵芝、富硒枸杞、富硒荔枝、富硒马铃薯等等越来越多的富硒作物和食品在不断出现,为逐渐满足缺 Se 和低 Se 区人们补 Se 的需求做出了重要的贡献。

#### 3.3 Se 在植物体内的形态

环境中的无机硒经植物生物转化生成具有生物活性的有机硒,储存在植物体内。有机硒主要以可溶性蛋白形式存在。据植物体内 Se 分布的研究表明,植物蛋白质中 Se 含量最高,如大米中水溶性 Se 蛋白占大米 Se 含量的 70%<sup>[24]</sup>,大豆中水溶性硒蛋白占 75%<sup>[18]</sup>,灵芝中水溶性硒蛋白占 73.6%~77.4%<sup>[15]</sup>,茶叶中水溶性硒蛋白占 80%<sup>[10]</sup>。

### 4 Se 对植物的各种生物效应

#### 4.1 Se 对植物产量性状及其营养品质的影响

Se 对动物、微生物的必需性已得到确认,而对植物的必需性目前尚无定论。但随着 Se 对植物各种生理、生化效应研究的不断深入和发展,Se 作为植物必需元素的证据越来越多。

关于 Se 具有增产效果的报道较多。对多种作物的研究表明,适量硒肥具有明显的增产效果。20 世纪 90 年代以来的初步研究认为,Se 可提高水稻种子活力、根系活性,从而促进作物生长,并改善结实性状,增加有效穗和实粒数。彭克勤等<sup>[19]</sup>的研究表明,从早稻分蘖期开始以灌溉水形式施硒,灌浆期促进气孔开放、降低气孔阻力,净光合速率明显提高,从而提高实粒数,减少了空秕粒;大米中 N,Se 含量均明显增加。谭周慈等<sup>[20]</sup>在湖南省 18 个地区对不同水稻品种进行的调查研究表明,在贫 Se 地区施以一定浓度的硒肥,既可提高水稻产量,又可改善大米品质:结实率提高 3.72%~12.07%,水稻产量提高 2.05%~9.67%;大米品质明显得到改善,检测的 16 种氨基酸中,除 3 种有所降低外,其余氨基酸均增加,尤以所测到的 7 种必需氨基酸增加的幅

度较大。李志玉等<sup>[6]</sup>的研究表明,对大豆喷 Se 可增加籽粒蛋白含量,降低油分含量。对马铃薯的研究结果表明,在苗期和花期喷施一定浓度硒肥,可明显提高马铃薯产量和块茎 Se 含量,尤以 1/300 的浓度效果最好<sup>[17]</sup>。Se、S 与作物 N 吸收相互影响,对烟草施以适当浓度比例的 Se 和 S,可改善烟叶品质,生产出优质富 Se 的安全烟叶<sup>[1]</sup>。人工富硒灵芝菌丝中 Zn、Cu 和 Ca 含量低于正常灵芝菌丝,而 Fe、Mg 及各种氨基酸的含量均明显高于正常菌丝,表明人工富硒灵芝具有较高的营养价值和药用价值<sup>[4]</sup>。氨基酸含量是茶叶品质的重要指标,土壤施 Se 和叶面喷 Se 可使茶叶中氨基酸总量分别提高 8.8% 和 14.8%;另外,富硒茶叶中的 Se 还能阻止维生素 C 的氧化,提高茶叶的保鲜品质<sup>[14]</sup>。

#### 4.2 Se 对作物抗氧化作用的影响

对 Se 在生物体的抗氧化过程中的作用的认识主要来自动物,作为动物体内谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性中心的必需组分(即使其成为必需元素的原因),已得到普遍证实和接受<sup>[33,36]</sup>。自 Stadtman<sup>[39]</sup>在海洋硅藻中发现 GSH-Px 以来,人们陆续在油菜、大豆、玉米、小麦等高等植物中检测到了 GSH-Px 的活性,并开始转向 Se 对植物抗氧化作用的研究。植物在逆境条件下,体内会产生过量自由基,使自由基含量增加,氧化分解膜脂不饱和脂肪酸、蛋白质等生物大分子,从而破坏膜的完整性。

吴永尧等<sup>[7]</sup>对 Se 影响下水稻丙二醛、氧自由基的研究表明,丙二醛含量、氧自由基的产生速率及其它自由基的生成量均随 Se 浓度( $< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )增加而降低,说明适量 Se 在植物体内清除过量自由基、防止过氧化方面发挥着重要作用。刘元英等<sup>[40]</sup>研究了连作条件下 Se 对大豆 GSH-Px 活性的影响,表明,土壤施 Se 能显著提高大豆叶片中 GSH-Px 活性,丙二醛含量明显降低。大豆在连作条件下的一个主要反应就是自由基含量增加,从而导致了膜脂破坏,产量降低,该实验表明适量 Se 通过提高 GSH-Px 活性缓解大豆体内自由基引起的膜脂过氧化作用,降低连作对大豆的不利影响,为克服大豆连作障碍提供了一条有效途径。

#### 4.3 Se 与其它金属元素的拮抗作用

Parizek 等<sup>[35]</sup>的研究最早证明了 Se 与 Hg 之间的代谢拮抗作用。随后许多研究均表明,低浓度 Se 对重金属 As、Cd、Pb 和 Ag 的毒性也具有拮抗作用<sup>[28,31,34]</sup>。最近 Thangavel 等<sup>[9]</sup>研究了 Se 与 Hg

对药用植物马齿苋叶片再生的相互影响,表明,低浓度 Se( $0 \sim 0.25 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )促进马齿苋叶片根和芽的产生和生长,且在与 Hg 混合作用时,对 Hg 的毒害效应有拮抗作用,并降低 Hg 对根生成产生的抑制作用。对施 Se 地区水稻调查研究发现,即使土壤中 As 和 Pb 含量都很高,而大米中的 As 和 Pb 含量却甚微,认为这可能是 Se 的拮抗作用所致<sup>[2]</sup>。Se 和 S 为同一族元素,二者之间的相互作用比较复杂。Se 在一定条件下可刺激植物对 S 的吸收,也能抑制或减少植物对 S 的吸收,对植物 Se 含量的影响随植物种类及 Se 和 S 浓度的不同有一定的差异<sup>[2]</sup>。

## 5 结 语

近几十年来,国内外对 Se 在土壤中形态分布规律研究的深入为研究 Se 与植物的关系奠定了基础。Se 在土壤中的分布及存在形态与土壤理化性质、酸碱度、氧化还原状态等有关,而植物 Se 含量与土壤总硒含量及其分布形态高度相关,因而高 Se 和低 Se 地区的植物 Se 含量差异很大。

Se 作为动物体内的必需元素,其生物学效应的研究较成熟,并得到了普遍接受。近几年来,研究的热点逐渐转向 Se 与植物的关系。Se 是否也是植物体内的一种必需微量元素,目前尚无确切定论,但在植物体内也发现了与动物相类似的 GSH-Px,Se 构成 GSH-Px 活性中心的组成部分并参与其催化反应。大量的生物学效应研究也倾向于证明 Se 对植物的必需性。适当浓度的 Se 具有提高种子活力、促进生长、抗氧化、促进光合作用、增产及提高产品质量等效应。

随着 Se 对植物的生物学效应研究引起普遍关注和深入发展,富硒食品的研究与开发已逐渐成为近年来研究的热点。Se 开始被作为一种微肥用于增产、提高作物产品品质、优化产品营养结构等,并逐渐得到推广。同时,利用植物能够吸收和富集外施无机态硒并将其转化为生物有效态硒的特性,富硒植物的研究和生产也逐渐展开,并得到应用和推广。在缺 Se 地区施加 Se 微肥或在高 Se 地区栽培富硒能力强的植物,生产出了富硒水稻、富硒大蒜、富硒马铃薯、富硒大豆等作物及富硒茶、富硒灵芝、富硒荔枝、富硒人参等各种保健食品,这对缺 Se 地区人民补充 Se 营养、治疗和预防 Se 缺乏症具有重要的应用价值。

## 参考文献

- [1] 马友华,丁瑞兴,张继榛,等. 1999. 硒和硫相互作用对烟草氮吸收和积累的影响[J]. 安徽农业大学学报, 26(1):95~100.
- [2] 马友华,丁瑞兴,张继榛,等. 2000. 和硫相互作用对烟草硫吸收与积累的影响[J]. 土壤通报, 31(5):231~235.
- [3] 王大志,高亚辉,程兆第. 1997. Se 对两种盐藻的影响及其在细胞中的累积和分布[J]. 海洋学报, 19(5):110~115.
- [4] 牛丽颖,石玉娥,刘振国,等. 1998. 人工富 Se 灵芝菌丝中微量元素及氨基酸含量分析[J]. 中国食用菌, 17(6):31~32.
- [5] 刘元英,罗盛国,赵久明,等. Se 对大豆谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响[J]. 大豆科学, 1998, 17(2):157~161.
- [6] 李志玉,郭庆元,涂学云,等. 1994. 大豆施 Se 效应和 Se 元素积累特性的初步研究[J]. 中国油料, 16(1):41~44.
- [7] 吴永尧,卢向阳,彭振坤,等. 2000. Se 在水稻中的生理生化作用探讨[J]. 中国农业科学, 3(1):100~103.
- [8] 吴永尧,罗泽民,彭振坤. 1998. 不同供 Se 水平对水稻生长及水稻对 Se 的富集作用[J]. 湖南农业大学学报, 24(3):176~179.
- [9] 吴永尧,彭振坤,罗泽民. 1997. Se 的多种生物学功能与人和动物的健康[J]. 湖南农业大学学报, 23(3):294.
- [10] 杜其珍,沈星荣,方兴汉,等. 1991. 茶叶中的 Se 成分分析[J]. 茶叶科学, 11(2):133~137.
- [11] 陈铄连,黄键. 1999. 我国富锌和富 Se 功能食品研究与开发[J]. 食品研究与开发, 20(1):33~37.
- [12] 罗盛国,徐宁彤,刘元英. 1999. 叶面喷 Se 提高粮食中的 Se 含量[J]. 东北农业大学学报, 30(1):18~22.
- [13] 胡秋辉,潘根兴,丁瑞兴. 1999. 低 Se 土壤茶园茶叶富 Se 方法及其富 Se 效应[J]. 南京农业大学学报, 22(3):91~94.
- [14] 胡秋辉,潘根兴,朱建春,等. 2000. Se 提高茶叶品质效应的研究[J]. 茶叶科学, 20(2):137~140.
- [15] 姚敏. 1997. 微量元素 Se 在灵芝子实体中的富集及分布[J]. 浙江农业大学学报, 23(5):39~42.
- [16] 高学云,张劲松,黄镇,等. 1997. 喷施亚 Se 酸钠对烟叶和烟叶可溶性蛋白质中 Se 的生物利用率的影响[J]. 中国烟草学报, 3(4):49~52.
- [17] 黄景新,秦昕. 1999. Se 对马铃薯块茎产量及含 Se 量的影响[J]. 马铃薯杂志, 13(2):94~95.
- [18] 谢申猛,王子建,彭安. 1994. SDS-PAGE 和 HPLC-FID 分离恩施高 Se 地区大豆中的含 Se 蛋白. 环境科学, 15(5):61~62.
- [19] 彭克勤,洪亚辉,夏玮. 1997. Se 对早稻光合作用和产量性状的影响[J]. 湖南农业大学学报, 23(5):432~434.
- [20] 谭周慈,陈平,陈嘉勤,等. 1997. Se 在水稻上的应用[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 20(3):62~65.
- [21] 魏显有,刘云惠,王秀敏,等. 1999. 土壤中硒的形态分布及有效态研究[J]. 河北农业大学学报, 22(1):20~23.
- [22] 谭见安(编译). 1989. 环境 Se 与健康[M]. 北京:人民卫生出版社, 219~224.
- [23] Whanger P D, et al. 1990. (彭安,王子建译). Se 的环境生物学[M]. 北京:科学出版社, 20~25.
- [24] Beilstein M A. 1991. Chemical forms of selenium in corn and rice grown in high selenium area of China[J]. Biomed. and Environ. Sci., 1:357~379.
- [25] Dhillon K S, Dhillon S K. 1999. Adsorption-desorption reactions of selenium in some soils of India[J]. Geoderma, 93:19~31.
- [26] Elrashidi M A, et al. 1989. Solubility, speciation and transformations of selenium in soils[A]. In: Selenium in Agriculture and Environment, SSSA Special Publication no 2[C]. Madison: American Society of Agronomy, 51~63.
- [27] Fordyce F M, et al. 2000. Soil grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China[J]. Appl. Geochem., 15:117~132.
- [28] Frost D V, Lish P M. 1975. Selenium in biology. Annual review of pharmacology[J]. Palo Alto CA, Annul: Review Vol., 15:259.
- [29] Grling C A. 1984. Selenium in agriculture and environment[J]. Agric. Ecosystems and Environ., 11(1):37~65.
- [30] Jayaweera G R, Biggar J W. 1996. Role of redox potential in chemical transformations of selenium in soils[J]. Soil Sci. Soc. Amer. J., 60:1056~1063.
- [31] Jonnalagadda S B, et al. 1993. Toxicity, bioavailability and metal speciation[J]. Comp. Biochem. Physiol., 106C:585~595.
- [32] Masscheleyn P H, et al. 1990. Transformations of selenium as affected by sediment oxidation-reduction potential and pH[J]. Environ. Sci. Technol., 24:91~96.
- [33] Mills G C. 1957. Hemoglobin catabolism, . Glutathione peroxidase, an erythrocyte enzyme which protects Hemoglobin from oxidative breakdown[J]. J. Biol. Chem., 229:189.
- [34] Mukherjee A. 1988. Effects of cadmium and selenium on cell division and chromosomal aberrations in Allium sativum L. [J]. Water Air Soil Pollut., 37:433~438.
- [35] Parizek J, et al. 1969. Mineral metabolism in pediatrics[M]. Oxford:Blackwell.
- [36] Rotruck J T, et al. 1973. Se Biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. Science, 179:588.
- [37] Seby F, et al. 1997. Selenium speciation in soils after alkaline extraction[J]. The Sci. Total Environ., 207:81~90.
- [38] Schwarz K, Foltz C. 1957. Se as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration[J]. J. Amer. Chem. Soc., 79:3292.
- [39] Stadtman T C. 1991. Specific occurrence of selenium in enzymes and amino acid TRNAS[J]. FASEB J., 1:357~379.
- [40] Thangavel P, et al. 1999. Interactive effects of selenium and mercury on the restoration potential of leaves of the medicinal plant, Portulaca oleracea Linn[J]. The Sci. Total Environ., 243/244:1~8.
- [41] Wortzman M S, et al. 1980. Effect of dietary selenium on the interaction between 2-acetylaminofluorene and rat liver DNA in vivo[J]. Cancer Res., 40:2670.
- [42] Zawislanski P T, Zavarin M. 1996. Nature and rates of selenium transformations: a laboratory study of Kesterson reservoir soil [J]. Soil Sci. Soc. Amer. J., 60:791~800.

作者简介 赵中秋,女,1977年生,博士研究生,主要从事植物生理生态学研究。发表论文8篇。  
责任编辑 王伟