

# 提高土壤硒生物有效性的技术措施研究进展

杨谨铭<sup>1</sup>, 胡岗<sup>2</sup>, 范成五<sup>2</sup>, 罗沐欣<sup>2</sup>, 秦松<sup>2\*</sup>

(1. 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州贵阳 550006)

**摘要** 近年来,我国富硒产业经过一段时间的发展已初具规模,天然富硒农产品的生产备受消费者好评。硒的生物有效性低是我国南方区域合理发展硒产业的主要限制因素。从土壤性质对硒有效性的影响进行分析,从耕作与水分管理、肥料与改良剂施用、菌根接种等3个方面综述提高土壤硒有效性的技术措施研究,以期探索土壤硒活化方法和技术措施以及富硒地区合理开发富硒农产品提供参考。

**关键词** 硒元素;生物有效性;形态;活化方法

中图分类号 S158 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)01-0012-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Progress of Technical Measures to Improve Bioavailability of Soil Selenium

YANG Jin-ming<sup>1</sup>, HU Gang<sup>2</sup>, FAN Cheng-wu<sup>2</sup> et al (1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006)

**Abstract** In recent years, China's selenium-rich industry has begun to take shape after a period of development, and the production of natural selenium-rich agricultural products has been well received by consumers. The low bioavailability of selenium has become a major limiting factor for the rational development of selenium industry in southern China. The effects of soil properties on the availability of selenium were described, and the technical measures to improve the availability of selenium in soil were reviewed from three aspects: tillage and water management, fertilizer and improver application, and mycorrhizal inoculation, in order to provide reference for exploring the methods and technical measures of soil selenium activation and the rational development of selenium-rich agricultural products in selenium-rich areas.

**Key words** Selenium element; Bioavailability; Form; The activation methods

我国有接近 70% 的地区属于缺硒(Selenium, Se)或低硒区域,有 2/3 的人口存在硒摄入量不足的问题<sup>[1]</sup>。缺硒会导致人体引发克山病和大骨节病等病症<sup>[2]</sup>,适量硒的摄入对人体抵御过氧化损伤、抗衰老和抗癌等都起到了极其重要的作用<sup>[3]</sup>。硒也是人体的微量元素,过量摄入会对人体造成毒害<sup>[4]</sup>。富硒农产品的食用作为人体补硒最安全、最有效的途径之一<sup>[5]</sup>,对其合理的开发与生产受到社会各界的普遍重视。目前,国内富硒农业经过一段时间的发展已初具规模,富硒大米、富硒茶叶等农产品广受消费者欢迎,富硒农业已成为市场需求巨大、政府鼓励支持、前景光明的朝阳产业<sup>[6]</sup>。为进一步扩大硒产业链,要求对硒资源予以合理利用、综合开发。以外源施加硒肥的方式增加土壤硒储备不失为一种提高农产品硒含量的有效方法,但我国南方富硒地区降雨量充沛,土壤因大量降雨淋溶等原因风化程度较高,大部分土壤呈酸性,导致能被作物直接吸收利用的自由离子态硒(即生物有效态硒)浓度低,是限制富硒农业发展的最主要障碍。因此,采取措施增加土壤硒的生物有效性是实现我国南方酸性富硒地区硒资源合理开发利用最具有可行性的途径。

### 1 土壤性质对硒有效性的影响

土壤酸碱性(pH)与质地等是影响土壤硒有效性的重要因素。我国南方地区降雨充沛,常年处于湿润生物气候条件下形成的土壤大多呈酸性,具有质地黏重、土温低和湿度大等特点。硒在酸性土壤中主要以亚硒酸盐( $\text{SeO}_3^{2-}$ )形态存

在,极易受到 Fe、Al、Mn 氧化物的吸附固定<sup>[7]</sup>,提高土壤 pH 促进硒转化为稳定性更高的硒酸盐态( $\text{SeO}_4^{2-}$ ),能降低土壤颗粒对硒的吸附量<sup>[8]</sup>;在质地黏重的南方土壤中,硒因长时间渍水被还原成为有机结合态硒或元素态硒<sup>[9]</sup>,提高土壤 Eh 使有机结合态硒氧化分解,能有效促进硒有效化<sup>[10]</sup>;在土温低、湿度大的土壤中,有机质分解速率缓慢,经过长时间的积累,有机质中富里酸等结构简单的小分子有机质会逐渐向芳构化程度高的大分子有机质转化,表现出对硒较强的吸附能力<sup>[11]</sup>。因此,必须采取相应措施解决南方富硒区域存在的硒有效性低的问题,例如通过施加酸性土壤改良剂提高土壤 pH 等措施,促使被碳酸盐、铁锰铝氧化物和有机物所固定的硒解吸、溶解于土壤溶液中<sup>[12]</sup>,以利于充分发挥南方富硒土壤自身优势。

### 2 提高土壤硒有效性的技术措施

#### 2.1 耕作与水分管理

**2.1.1 耕作模式。**农业生产中,黏性土壤常因渍水处于较低的氧化还原电位,长时间渍水导致水分无法及时排出,土壤处于还原环境,硒易被还原为生物有效性较低的形态,生物有效性降低。针对土壤质地较黏重的土壤,韦本辉等<sup>[13]</sup>采用粉垄栽培技术将土壤粉碎均匀一致且不上翻土壤,能显著加强土壤空气的流通,被证实能有效促进还原态硒的溶解,提高硒的生物有效性<sup>[14]</sup>。

**2.1.2 水分管理。**我国南方稻区以淹水的方式进行耕作,土壤长时间处于还原环境,不利于水稻对硒的吸收。合适的水分管理对于水生作物吸收富集硒起着尤为重要的作用。杨志辉等<sup>[15]</sup>发现土壤淹水处理,土壤处于较低的 Eh 电位时不利于硒在土壤-作物体系的迁移,土壤处于湿润状态的耕作模式较淹水处理能有效活化水稻等作物硒的生物有效

**基金项目** 贵州省科技支撑项目(黔科合[2018]2338,黔科合平台人才[2017]5719,黔科合[2016]2595-1)。

**作者简介** 杨谨铭(1996—),男,侗族,湖南怀化人,硕士研究生,研究方向:重金属治理。\*通信作者,研究员,博士,从事土壤肥料研究。

**收稿日期** 2021-04-26

性<sup>[16]</sup>。水生作物干湿交替水分条件,同样有利于改良土壤酸碱度与提高土壤 Eh 电位,对于提高硒的生物有效性有重要的作用<sup>[17]</sup>。试验证明,干湿交替条件下水稻硒的富集转移系数显著高于淹水处理,表明干湿交替的水分管理方式能够有效提高硒生物有效性<sup>[18-19]</sup>。

## 2.2 施加肥料与改良剂

### 2.2.1 充分施加氮肥

氮作为构成蛋白质的元素,对作物完成各项生理活动起着必不可少的作用,施加氮肥有利于作物转运蛋白的形成,能有效提高作物对硒富集,对硒的吸收、转运与分配可起到重要的作用。在实践生产中,充分施加氮肥为作物提供更多构成蛋白质的原材料促使作物形成更多的根系分泌物和转运蛋白,有利于硒在土壤-作物体系的富集转运。目前,氮肥的不同施用方式中,传统土壤施肥与叶面喷施都被证明对于提高硒的生物有效性具有十分重要的意义。

陈玉鹏等<sup>[20-21]</sup>通过盆栽试验,证实土壤中施加氮肥能够促进小麦吸收富集硒,发现低硒土壤施加氮肥效果高于高硒土壤,与宋晓珂等<sup>[22]</sup>对青稞的研究结论一致,表明低硒土壤采取施加氮肥的方法不失为提高硒的生物有效性的一项措施;氮肥的施用量影响硒在小麦各部位的迁移分配,高氮肥施用量可有效促进硒向地上部的转运分配。在富硒或硒中毒土壤中,高氮处理能促进小麦根部、籽粒的硒转运储存于颖壳中,有效缓解硒对小麦的毒害作用。

### 2.2.2 适当施加磷肥

对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的研究发现,平衡液中加入磷酸二氢钠可以显著降低土壤对亚硒酸盐的吸附量<sup>[23]</sup>。这是因为磷与硒具有相似的物理化学性质,都以阴离子的形式存在于土壤胶体颗粒表面,它们之间存在着竞争吸附作用,共同竞争土壤胶体吸附结合位点,磷酸盐的存在能有效降低土壤对硒的吸附量,被土壤胶体吸附的硒解吸释放,以水溶态的形式存在于土壤溶液中<sup>[24-25]</sup>。充分利用磷与硒存在的交互作用,通过施加磷肥促进亚硒酸根解吸释放,能有效提高土壤硒的生物有效性。

研究表明,将过磷酸钙和钙镁磷肥施入土壤均能提高硒的生物有效性,高用量效果好于正常用量<sup>[26]</sup>。钙镁磷肥作为磷与硅酸镁所制成的肥料,水溶液呈碱性,能有效提高土壤 pH,有效降低土壤胶体对亚硒酸盐的吸附,被吸附的硒释放于土壤溶液中,成为生物有效性更高的形态从而提高硒的生物有效性。

### 2.2.3 合理施加硒肥

岩石母质中的硒经过地质大循环和生物小循环进入土壤。在母质硒含量较为贫乏的地区,土壤硒含量往往较为贫瘠,通过外源施硒的方式是缺硒地区发展硒产业的有效手段。研究发现,外源施加硒肥在提高土壤硒储量的同时,能够促进有机质结合的硒分解释放,并且有效促进硒的生物有效性增加。对不同价态的硒肥,亚硒酸盐施用的影响较硒酸盐小,硒酸盐的施用使有机态硒转化为有效态硒的效果更为显著<sup>[27]</sup>。但是,不能盲目选择硒酸盐作为硒肥,随意施加硒酸盐容易导致硒毒害。对于缺硒、有效性又不高的酸性土壤可以选择施用硒酸盐,在富硒但有效性不高的酸性土壤施用亚硒酸盐则更为合理,而在富硒且硒的有效性较高

的碱性土壤要避免因施加硒肥而导致硒毒害<sup>[28-30]</sup>。

### 2.2.4 施加有机肥

有机质对硒生物有效性的影响具有两面性<sup>[31]</sup>。一方面,伴随着被大分子有机质如胡敏酸等所结合后表现出不溶于水的性质,硒生物活性降低;另一方面,富里酸等小分子有机质因富含羧基、醇-OH-NH<sub>2</sub>、酚-OH 等活性官能团,能与硒元素络合形成具有亲水性、生物有效性高的硒化合物,易被作物吸收利用<sup>[32-33]</sup>。因此,将小分子有机质如富里酸等施入土壤的措施既能显著提高硒的生物有效性,又能有效避免硒毒害<sup>[34]</sup>。

缺硒土壤中硒的生物有效性低,主要是因为硒大部分被大分子有机质结合<sup>[35]</sup>。南方酸性土壤有机质经过长时间的腐殖化作用,大多转化为胡敏酸等大分子物质,对硒表现出较强的固定能力,所以硒的生物有效性低。因此,选择施用有机肥提高硒的有效性,应关注其组分,避免选择大分子为主的有机质,同时需要适当补充硒肥。针对有机质丰富的酸性土壤,王丹<sup>[11]</sup>提出可以通过以秸秆还田的方式将秸秆施入土壤,秸秆会在微生物作用下向富里酸转化。

### 2.2.5 施加酸性改良剂

土壤改良剂通常会选择一些工业生产、农业活动中的废弃物,或选择一些价格低廉、容易获得的产物,主要包括生石灰以及生物炭等,具有变废为宝、节能环保等优点。通过施用改良剂的方式改变土壤理化性质,使其向有利于硒活化的方向进行转变,促进被吸附的结合态硒活化转化为水溶态硒,是一个具有实际可行性的技术措施。作为最常见的酸性土壤改良剂,施加生石灰能使土壤 pH 升高 1~2 个单位,使硒的有效性提高 0.3~1.0 倍<sup>[36]</sup>。研究发现,施用锅炉及其他设备燃煤后产生的燃煤炉渣对酸性土壤的改良效果为生石灰的 10 倍,能有效活化硒<sup>[37]</sup>。况琴等<sup>[38]</sup>研究了炼钢的副产物钢渣对硒有效性的影响,证实施加钢渣可以促进土壤有效硒含量提高 1.4~2.0 倍,施用钢渣处理的小白菜硒含量提高 30%以上。谢珊妮等<sup>[39]</sup>发现将秸秆烧制成的生物炭(呈碱性,表面具有较多含氧官能团)作为优良的酸性土壤改良剂具有提高硒的生物有效性作用,在施入酸性茶园土壤后显著抑制了土壤 pH 酸化,有效提高了硒的生物有效性。

### 2.3 接种菌根

作物的根系活动通过改变根际土壤理化性质等途径,能有效活化硒元素,使根际土壤有效态硒含量显著高于非根际土壤<sup>[40-41]</sup>。将菌根真菌接种至作物根系使其产生共生体,菌根真菌能为作物吸收养分与水分,有效扩大作物根系对硒元素的活化范围,有效解决在硒有效性不高的土壤种植作物的缺硒问题。刘丽丽等<sup>[42]</sup>将 *Glomus versiforme* (Gv)、*Glomus mosseae* 和 *Glomus etunicatum* 3 种丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)接种至猕猴桃根系,发现 3 种 AM 均能促进猕猴桃富集转运硒,猕猴桃叶片的硒含量显著提高。有研究将 3 种 AM 真菌接种至水稻根部后发现,接种丛枝菌根 *Funneliformis mosseae* (Fm) 和 Gv 能有效促进水稻对硒的富集,接种菌根后根际土壤水溶态、可交换态硒含量显著提高<sup>[43]</sup>。研究者将 Fm 接种至大豆根系后发现, Fm 能提高土壤水溶态硒含量,大豆对硒的富集能力在接种菌根后显著提

高<sup>[44]</sup>。有学者筛选出一种能有效提高蓝莓硒的有效性的方法,即将具有富硒能力的菌根真菌接种至蓝莓根部<sup>[45]</sup>。

### 3 展望

开发富硒产业仅仅运用单一的物质或手段是不够的。在生产实践中,通过肥料与改良剂进行合理的配施,或是采用几种措施有机结合的方式,对于合理开发硒资源可起到重要的作用。

有机质对硒生物有效性的影响具有两面性,对有机质匮乏的土壤施用有机肥增加硒的有效性,反而会吸附固定硒,降低其生物有效性。有机肥对硒有效性的影响受有机质的物质组成以及官能团的构成等特性决定,随着施用时间的延长,富里酸等小分子有机物会转变为胡敏酸等大分子有机物,导致硒有效性的下降。为此,深入探究不同种类有机肥对提高硒有效性的长效性具有重要的实践意义。

通过施加肥料与改良剂提高有效硒含量的措施见效快,但具有生态环境风险。长期给土壤施加肥料,一旦超过土壤的环境容量,氮、磷等元素会随着降雨淋溶进入河流造成水体富营养化。过量施入以石灰为代表的酸性土壤改良剂会破坏土壤结构,使土壤板结失去原本的生产力。进一步对这些措施进行合理的环境风险与土壤生态风险评估十分重要。

土壤微生物(硒氧化细菌)能够提高硒的生物有效性,富硒细菌在富硒农业生产中具有实际应用价值。而关于微生物硒氧化作用效果与机制的研究并不透彻,相关文献报道较少,探索更多能提高硒有效性的微生物并探究其机理,具有重要的应用价值。

### 参考文献

- [1] 王金达,于君宝,张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[J]. 地理科学,2000,20(5):469-473.
- [2] 曾静,罗海吉. 微量元素硒的研究进展[J]. 微量元素与健康研究,2003,20(2):52-56.
- [3] RAYMAN M P. The argument for increasing selenium intake[J]. Proceedings of the nutrition society,2002,61(2):203-215.
- [4] GERLA P J,SHARIF M U,KOROM S F. Geochemical processes controlling the spatial distribution of selenium in soil and water,west central South Dakota,USA[J]. Environmental earth sciences,2011,62(7):1551-1560.
- [5] RAYMAN M P. Food-chain selenium and human health;Emphasis on intake[J]. British journal of nutrition,2008,100(2):254-268.
- [6] 陈武,朱生亮,谯文浪. 贵州省富硒地层及其农业地质应用[J]. 贵州科学,2015,33(5):27-32.
- [7] LI J,PENG Q,LIANG D L,et al. Effects of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils[J]. Chemosphere,2016,144:2351-2359.
- [8] 王锐,余涛,杨忠芳,等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(7):1647-1654.
- [9] 邢颖,刘永贤,梁潘霞,等. 土壤硒形态及其相互转化因子的研究[J]. 中国农学通报,2018,34(17):83-88.
- [10] 樊建新,曾宇,孙蛟霞,等. 淹水过程中土壤硒的形态转化[J]. 江苏农业科学,2019,47(6):279-283.
- [11] 王丹. 秸秆还田对土壤硒生物有效性的影响及作用机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [12] 谢薇,杨耀栋,侯佳渝,等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及其影响因素[J]. 环境化学,2019,38(10):2306-2316.
- [13] 韦本辉,甘秀芹,陈保善,等. 农耕新方法粉垄整地土壤速效养分研究[J]. 广东农业科学,2011,38(17):42-45.

- [14] 周灵芝,韦本辉,甘秀芹,等. 粉垄耕作对稻谷富硒营养化及重金属含量的影响[J]. 现代农业科技,2017(14):7-9.
- [15] 杨志辉,葛旦之,熊远复. 淹水条件下土壤有效硒变化规律的初步研究[J]. 土壤通报,1998,29(4):182-184.
- [16] 周越,吴文良,孟凡乔,等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(6):527-532.
- [17] 章萍,相明雪,王亲媛,等. 水分管理对鄱阳湖南矶山土壤硒形态及藜蒿硒吸收的影响[J]. 南昌大学学报(理科版),2019,43(3):269-273.
- [18] 张青,王煌平,孔庆波,等. 干湿交替灌溉对富硒土壤硒形态及水稻硒积累的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(1):327-331,338.
- [19] 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/OL]. 土壤学报,2020-09-22[2020-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200922.1255.002.html>.
- [20] 陈玉鹏,梁东丽,宋卫卫,等. 氮素对不同生育期小麦植株硒积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(2):395-402.
- [21] 陈玉鹏,彭琴,梁东丽,等. 施氮对小麦硒(VI)吸收、转运和分配的影响[J]. 环境科学,2017,38(2):825-831.
- [22] 宋晓珂,李宗仁,王金贵. 施氮对青稞硒吸收、转运和分配的影响[J]. 土壤通报,2019,50(5):1196-1202.
- [23] 周鑫斌,于淑慧,谢德体. pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报,2015,52(5):1069-1077.
- [24] 严佳,宗良纲,杨旒,等. 不同pH条件和P-Se交互作用对茶园土壤Se(IV)吸附行为的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(5):935-942.
- [25] 邢颖,刘永贤,梁潘霞,等. 磷对富硒赤壤与红壤上小白菜硒吸收及土壤硒形态的影响[J]. 土壤,2018,50(6):1170-1175.
- [26] 姚欢,宗良纲,孟蝶,等. 增施磷肥对提高强酸性高硒茶园土壤硒有效性的效果[J]. 安全与环境学报,2015,15(4):288-293.
- [27] 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.
- [28] 黄青青,杜威,王琪,等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报,2013,33(5):1423-1429.
- [29] 刘慧,杨月娥,王朝辉,等. 中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控[J]. 中国农业科学,2016,49(9):1715-1728.
- [30] 张木,唐拴虎,钟松霖,等. 施硒对水稻土壤硒有效性的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(9):2979-2987.
- [31] 何振立,杨肖娥,祝军,等. 中国几种土壤中的有机态硒及其分布特征[J]. 环境科学学报,1993,13(3):281-287.
- [32] 邹光中,任海清. 腐植酸与硒的吸附模型研究[J]. 稀有金属,2003,27(3):413-415.
- [33] 杨志才,陈亮. 富里酸硒的合成及应用[J]. 微量元素与健康研究,2004,21(1):32-33.
- [34] 安梦鱼,张青,章赞德,等. 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[J]. 农业资源与环境学报,2017,34(2):128-133.
- [35] 罗倩. 名山河流域不同土地利用方式土壤硒的形态及其有效性研究[D]. 雅安:四川农业大学,2014.
- [36] 江官军. 南方红壤硒的有效性调控研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
- [37] 谢邦廷,贺灵,江官军,等. 中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J]. 岩矿测试,2017,36(3):273-281.
- [38] 况琴,吴山,黄庭,等. 生物质炭和钢渣对江西丰城典型富硒区土壤硒有效性的调控效果与机理研究[J]. 岩矿测试,2019,38(6):705-714.
- [39] 谢珊妮,宗良纲,张琪惠,等. 3种改良剂对强酸性高硒茶园土壤硒有效性调控效果与机理[J]. 茶叶科学,2017,37(3):299-307.
- [40] 陈秋香. 不同水稻品种苗期根际土壤硒的化学形态及氮素营养对硒吸收的调控[D]. 北京:中国科学院研究生院,2009.
- [41] 史艳美,宗良纲,张艳萍,等. 茶树根际与非根际土壤硒特性及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报,2018,37(9):1903-1909.
- [42] 刘丽丽,刘仁道,黄仁华. 丛枝菌根真菌(AMF)对红阳猕猴桃叶片富硒能力及光合特性的影响[J]. 食品工业科技,2014,35(10):234-237,242.
- [43] 陈雪. 丛枝菌根真菌对水稻硒吸收、积累的机理研究[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [44] 苗秀妍. 丛枝菌根真菌和微肥施用对大豆生长及锌、硒积累的影响[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [45] 安徽大学. 一种促蓝莓富硒的菌根真菌的筛选方法及其鉴定方法及其应用:CN201710035222.0[P]. 2017-05-24.