

## 土壤硒的生物有效性及调控技术研究进展

文雄<sup>1</sup>, 罗沐欣<sup>2</sup>, 柴冠群<sup>2</sup>, 范成五<sup>2</sup>, 赵欢<sup>2</sup>, 秦松<sup>2\*</sup>

(1. 贵州大学, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省农业科学院, 贵州贵阳 550006)

**摘要** 通过阐述硒在土壤中的含量和分布特点, 了解不同土壤类型中硒含量的分布和差异, 明确硒元素在土壤中的普遍迁移规律, 重点总结了影响硒在土壤中生物有效性的因素, 系统说明如何通过调控技术提高土壤中硒的生物有效性。对于探索生物地球化学循环中硒元素的迁移规律, 提高土壤中硒的生物有效性提供参考。

**关键词** 生物有效性; 调控技术; 硒

**中图分类号** S153 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)21-0011-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Advances in Bioavailability and Regulation of Soil Selenium

WEN Xiong<sup>1</sup>, LUO Mu-xin-jian<sup>2</sup>, CHAI Guan-qun<sup>2</sup> et al (1. Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006)

**Abstract** The content and distribution characteristics of selenium in soil were expounded, to understand the distribution and difference of selenium content in different soil types. The general migration law of selenium in soil was clarified and factors affecting the bioavailability of selenium in soil were summarized emphatically. And how to improve the bioavailability of selenium in soil through regulatory techniques was systematically elaborated. This study provides a reference for exploring the migration of selenium in biogeochemical cycles and improving the bioavailability of selenium in soil.

**Key words** Bio-availability; Regulation technique; Selenium

1817年瑞典化学家 Berzalius 首次发现硒元素并定名为 Selenê, 20世纪中叶以前, 硒一直被化学家定性为有害元素<sup>[1]</sup>。动物营养学家在20世纪中叶发现少量的硒元素对动物的健康有益, 将硒认定为动物体内的必需微量元素<sup>[2]</sup>。硒元素对稳定人体内氧化系统的平衡相当重要, 人体中硒含量的稳定水平能够降低疾病的发生率<sup>[3]</sup>。大量研究指出, 土壤中的全硒量和硒在土壤中的赋存形态影响植物对硒的吸收强度<sup>[4-5]</sup>。提高土壤中有效硒含量是高效生产富硒农产品的一个研究热点<sup>[6]</sup>。通过研究土壤中硒的分布特征和迁移规律, 明确硒元素在土壤中的生物有效性及影响因素, 可为开发绿色高效富硒农产品提供技术支撑。

#### 1 土壤硒的含量与分布

硒在土壤中的含量普遍较低但分布广泛, 地壳中的硒平均含量为 0.07 mg/kg<sup>[7]</sup>。通常将硒含量小于 0.13 mg/kg 的土壤叫低硒土壤, 大于 0.40 mg/kg 为富硒土壤, 超过 3.00 mg/kg 称作硒毒害土壤<sup>[8]</sup>。在中国大约 70% 的土壤都存在不同程度的缺硒, 在西北和东南地区有少数土壤富硒外, 其他地区土壤硒含量都很低<sup>[9]</sup>。

土壤硒元素主要来源是岩石, 但是在不同岩性的岩石之间硒的含量差异较大。不同岩石中硒的含量大小顺序为硅质页岩>灰岩>砂岩>碎屑岩>花岗岩>板岩>紫色砂岩<sup>[10]</sup>, 在湖北恩施等富硒地区, 由硅质页岩发育而来的土壤中硒的平均含量为 20 mg/kg, 局部地区硒含量最高可达 90 mg/kg。而在我国南方地区土壤母质是花岗岩、紫色砂岩以及板岩等发

育而来的土壤中硒的含量极低, 甚至低于其平均含量, 最低仅有 0.05 mg/kg。硒在岩石中通过自然界的物理变化及各种化学反应被释放出来, 在水体的流动和微生物的作用下以各种价态存在于土壤中<sup>[11-12]</sup>。

成土母质和土壤类型对土壤中硒的分布影响显著, 除此之外, 气候条件也是影响土壤中硒分布差异的重要因子<sup>[13]</sup>。李榕等<sup>[14]</sup>对石门县不同成土母质土壤中硒含量的调查时表明, 灰岩在各地质背景土壤中的含量最高, 其中二叠系灰岩含量最高, 达 0.26 mg/kg; 三叠系中灰岩的含量为 0.25 mg/kg; 奥陶系灰岩硒含量最低仅为 0.10 mg/kg。不同地层间的硒含量分布差异性也很明显, 在对浔郁平原不同地层土壤的研究中发现, 泥盆系地层中土壤硒含量最高, 其平均含量为 1.0 mg/kg, 其次是第四系和古近系中硒含量基本持平, 达到 0.60 mg/kg, 而白垩系中硒含量最低, 为 0.40 mg/kg, 但均大于全国背景值(0.29 mg/kg)。同时也有研究发现, 泥盆系地层岩性富硒区域受碳酸盐系影响较大, 碳酸盐岩发育而来的土壤中硒含量较高<sup>[15]</sup>。地带性的差异是影响硒在不同土壤类型中含量分布不均匀的重要因素。赵少华等<sup>[16]</sup>对不同土壤类型中硒的分布规律研究发现, 在我国东南沿海地带土壤中硒含量高, 该地区的赤红壤中硒含量平均为 0.60 mg/kg, 而黄壤和红壤的平均含量也达到 0.54 和 0.48 mg/kg, 同样以棕漠土和灰钙土为主的西北地区硒含量也较高, 平均含量可达 0.40 mg/kg。相反在我国西南地区(主要是四川和广西)土壤中硒的含量很低, 该地区的土壤类型主要以紫色土为主, 剧烈的淋溶加上其母岩本身缺硒的条件下硒很难在土壤表层中富集。因此以紫色土为主的西南地区四川和广西大部分地区硒含量极低, 平均含量仅为 0.10 mg/kg, 由此得出我国土壤中硒的分布具有东西高中间

**基金项目** 黔农科院青年基金(2018)94号; 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2019]2368号, 黔科合支撑[2018]2338, 黔科中引地[2019]4003号)。

**作者简介** 文雄(1997—), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤学。\*通信作者, 研究员, 博士, 从事土壤肥料研究。

**收稿日期** 2021-03-15

低的显著特点<sup>[17]</sup>。气候条件也影响土壤中硒的分布。降水量比较少的北方土壤硒含量普遍较高,在西北干旱或者半干旱地区甚至出现因为土壤硒含量偏高导致土壤中的植物被毒害,含量最高可达 20 mg/kg,而降水丰富的南方地区硒含量一般偏低,平均含量仅为 0.10 mg/kg<sup>[18]</sup>。

## 2 硒在土壤中的迁移

机械搬运是推动矿质元素在土壤中迁移的主要方式,自然界中的水体流动以及母岩的风化、人为活动都会将硒带入土壤进行物质的循环迁移。经过土壤母岩的风化和降水等作用硒元素进入土壤,受土壤固液气相体系的作用,在土壤中进行迁移至植物根系部分富集。刘永贤等<sup>[15]</sup>研究硒在土壤中的迁移时表明,降雨、干旱和蒸散是驱动土壤中硒迁移的重要因子。王五一等<sup>[19]</sup>研究硒在不同土壤类型中的淋溶发现,不同土壤类型中硒的迁移淋溶率差异明显,表现为紫色土>黄棕壤>黑钙土>黄壤>红壤>赤红壤,紫色土中硒的淋溶率达到了 5%,而赤红壤中仅为 0.5%。人类活动将外源硒带入土壤,使硒在土壤中的自然迁移频率大大提高。顾涛等<sup>[20]</sup>研究硒在珠江三角洲水稻土中迁移发现,在水平方向上,硒在地下水体的流动作用下沿土壤水流动方向往下游迁移最后富集于土壤的低洼处;硒在土壤剖面的垂直方向上则是通过该地区强烈的淋溶条件下垂直迁移到土壤的下层,其中硒主要富集在土壤的中下部的淋溶淀积层。

## 3 土壤硒生物有效性的影响因素

影响植物对硒元素吸收的因素主要有两个,一是土壤硒全量,二是土壤中硒的形态。根据硒的赋存形态将土壤中的硒分为有效硒和无效硒<sup>[21]</sup>。其中,不能被植物直接吸收利用的属于无效硒,主要有元素态硒和硒化物;能够直接被植物吸收利用的属于有效硒,包括硒酸盐、亚硒酸盐和有机态硒,有效硒是植物所需的重要硒源<sup>[22]</sup>。土壤有效硒是植物吸收累积硒的关键影响因子,而土壤硒全量、pH、有机质、氧化还原条件和土壤质地则是影响土壤有效硒含量的关键因子。

**3.1 土壤硒全量** 土壤中的全硒量总体代表土壤中硒水平的高低,硒全量的高低不能代表植物对土壤中有效硒的吸收水平,但是硒全量作为土壤中有效硒的来源对硒的有效性具有显著的影响。马迅等<sup>[23]</sup>在研究硒的有效性因素时发现土壤中的有效硒与全硒量呈极显著关系,得出的相关系数为 0.473,在一定的有效硒含量条件下,土壤中的全硒量越高,其向植物提供的有效硒也越高。龚河阳等<sup>[24]</sup>研究也发现,土壤中全硒量越高,会提高土壤中离子态和可交换态硒的含量,而且发现土壤中硒全量与硒的有机结合态具有较强的相关性,得出的相关系数为 0.385,达到显著性水平( $P < 0.05$ )。王松山等<sup>[25]</sup>研究发现,石灰性土壤中硒不同形态之间的转化具有一定的联系,当土壤中硒全量在一定水平条件下时,土壤中的亚硒酸盐以及可交换态硒与土壤硒全量则表现出正相关关系。总体而言,土壤硒全量主要通过影响硒在土壤中各形态含量的变化来提高硒在土壤中的有效性,因此土壤硒全量在一定程度上代表硒的有效性水平。

**3.2 土壤 pH** 土壤 pH 影响硒的生物有效性主要体现在土壤中的黏粒矿物对硒的吸附特性,植物对土壤中硒的吸收富集能力在不同 pH 环境下也有所差异。植物在中性和酸性条件下对亚硒酸盐的吸收明显增强,而在碱性土壤中对硒酸盐和有机态硒的吸收强度较大,大量研究发现在碱性土壤中硒的有效性会显著提高,而在酸性土壤中硒的有效性变化不明显甚至会出现某些价态的硒被固定的情况<sup>[26]</sup>。在酸性土壤条件下,草类叶的植物可以吸收土壤中 40%左右的硒;而在碱性土壤中草类植物对硒的吸收富集能力大大提高,能够达到 80%以上。黑油菜在酸性条件下对亚硒酸盐的吸收量较低,主要原因是在酸性条件下亚硒酸盐会与土壤胶体产生复合吸附作用,除此之外,在酸性条件下土壤中的铁铝氢氧化物含量较高,会与亚硒酸盐发生化学沉淀反应降低硒的有效性,随着 pH 的升高又会重新将固定的亚硒酸盐释放出来,通过降低有效硒的固定从而提高硒的有效性<sup>[27]</sup>。张艳玲等<sup>[28]</sup>研究水稻土壤中硒的迁移转化时发现,土壤 pH 越高,硒在土壤中的生物有效性就越高,主要体现在水溶性硒含量的显著增加,两者之间表现出显著正相关关系( $R = 0.472, P < 0.01$ )。赵少华等<sup>[29]</sup>研究硒的有效性时表明,由于黄壤中的矿物黏粒含量较多,会将硒酸盐吸附络合在其表面,降低了硒酸盐在黄壤中的流动性,除此之外,黄壤中大量存在的铁铝氧化物会与硒酸盐产生化学沉淀反应,从而降低硒的有效性;相反在研究石灰土中硒的有效性时发现,当石灰土中 pH 值大于 8.0 时,土壤中的无效硒(元素态硒和硒化物)会发生氧化还原反应被氧化成硒酸盐,通过释放无效硒促进土壤中硒的有效性提高。

**3.3 土壤有机质** 在土壤漫长的形成过程中伴随着有机质的形成及矿质元素的分解释放,有机质的形成伴随着硒元素在土壤中的富集过程,有机质还可以通过提高土壤微生物的活性和改善土壤理化性质来影响硒的生物有效性。陈雪龙等<sup>[30]</sup>对硒元素在土壤中的迁移研究发现,土壤有机质发生矿质化作用后固定在其表面的硒会释放出来进入土壤提高有效硒含量。马迅等<sup>[23]</sup>对硒的有效性研究发现,土壤有机质不仅影响硒在土壤中的全量,同时也发现硒酸盐和可交换态硒与土壤有机质的含量表现为极显著正相关关系( $R = 0.481, P < 0.01$ )。土壤有机质经过一系列化学反应通过影响土壤微生物的活性从而释放被固定的硒,促进硒在土壤中的循环,提高植物对硒的重复利用率,增强硒在土壤中的有效性。但是土壤中有机质含量增加也会使土壤胶体增加,会导致硒元素被附着在胶体表面的阴离子吸附固定,从而影响硒在土壤中的流动,所以有机质对硒的有效性影响具有两面性<sup>[31]</sup>。有相关研究表明,土壤有机质组成成分中的富啡酸比例越高,有效性硒含量越高,当胡敏酸比例升高时,有效性硒含量则降低,说明影响土壤硒的生物有效性不仅和土壤有机质含量的高低有关,而且有机质的组成要素也影响着土壤硒的生物有效性<sup>[32]</sup>。

**3.4 土壤氧化还原条件** 土壤中硒元素的价态分布与土壤的氧化还原条件密切相关,硒元素价态的差异直接影响植物

对硒的吸收。刘鹏等<sup>[33]</sup>研究发现,土壤中的硒酸盐在强氧化条件下含量很高,达到 22%,硒的有效性明显提高,此时植物主要吸收土壤中的硒酸盐,并且吸收强度很大;而在强还原条件下,土壤中的元素态硒化学性质最稳定,主要以难以利用的元素态硒存在,Se<sup>2-</sup>与金属氧化物形成稳定的金属硒化物,比例达 50%以上,当稳定的硒元素在土壤中的比例较高会导致硒的迁移能力变弱,植物很难吸收土壤中的硒元素导致硒的生物有效性降低。李娟等<sup>[34]</sup>研究黔中地区水稻土含硒量时发现,在高度还原条件下,厌氧微生物通过氧化还原反应可将硒酸盐还原为零价及负二价,从而降低硒的有效性。

**3.5 土壤质地** 硒的有效性土壤质地之间的影响主要表现在黏土矿物表面离子对硒的吸附作用,黏土矿物对硒元素有很强的亲和力。徐强等<sup>[35]</sup>研究方正县土壤的全硒时发现,当土壤中的黏粒量越高,土壤中全硒量也越高,土壤的全硒量在一定程度上决定土壤有效硒的水平,两者之间表现为正相关关系( $R=0.206, P<0.05$ ),而土壤中的砂粒量则影响土壤中的全硒量,两者之间存在负相关关系( $R=-0.266, P<0.05$ )。但土壤中水溶性硒会被黏土矿物表面的离子吸附造成土壤有效硒含量降低,因此随着土壤质地变黏,土壤中硒的有效性反而会降低<sup>[36]</sup>。不同土壤类型和质地对硒酸盐和亚硒酸盐的富集能力不同,在我国南方地区红壤中黏粒含量较高,硒酸盐在质地较黏的红壤中的有效性较高;在我国北方亚硒酸盐在质地较疏松的黑土中的有效性较高<sup>[37]</sup>。Hamdy 等<sup>[38]</sup>调查研究发现,土壤有效硒富集程度在土壤粒径小于 0.08 mm 最高,在粒径为 0.12~0.15 mm 上的富集程度次之。

**3.6 元素之间拮抗或协同作用** 土壤除了通过吸附固定作用来影响硒的生物有效性外,还可以通过某些离子与硒竞争植物和土壤中的结合位点来影响植物对硒的吸收,其中磷元素和硫元素对硒的生物有效性影响最明显。硫元素在化学性质上跟硒元素具有化学结构的相似性,施入土壤中的含硫元素的化合物会与硒元素之间存在一定的竞争作用导致植物对硒的吸收率降低,硫硒拮抗作用主要影响植物对土壤中硒酸盐类的吸收效率。谢珊妮等<sup>[39]</sup>研究发现,在酸性茶园中施加一定量的磷肥对茶园中硒的有效性提高明显,因为在酸性土壤中亚硒酸盐的比例很高,但是主要被固结在土壤胶体表面,而 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>与亚硒酸根在土壤胶体表面存在相互的竞争关系,因为 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>在土壤中易被土壤胶体上的阳离子吸附在其表面,减少了土壤胶体表面的吸附位点,促进了亚硒酸盐的释放及在土壤中的流动性,提高了植物对亚硒酸盐的吸收效率,加入磷肥后土壤中亚硒酸盐提高了 28.32 mg/kg。姚欢等<sup>[40]</sup>研究发现,将磷肥和有机肥通过不同的配比之后施入茶园,显著提高了茶园土壤中硒的生物有效性( $P<0.01$ ),其中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>不管是在改善土壤理化性质还是提高硒的生物有效性方面都至关重要。

#### 4 土壤硒生物有效性的调控技术

土壤有效硒含量的高低是衡量植物吸收利用土壤中硒

水平的重要因子。通过外源调控技术可以提高土壤中有效硒的含量,达到植物生长所需营养条件。相关研究表明,向土壤中添加土壤调理剂以及外源添加硒等调控技术都能提高土壤中硒的生物有效性<sup>[40]</sup>。张木等<sup>[41]</sup>研究外源硒对水稻富硒调控发现,向土壤中添加外源硒会显著提高土壤中硒的含量,当添加的外源硒含量为 5.0 mg/kg 时提高率最大,非根际土壤的提高率明显大于根际土壤,其中根际土壤与对照相比硒含量提高了 5 倍,而非根际土壤达到 8 倍,外源添加硒同样对水稻各器官中硒含量的提高有促进作用,其中水稻的籽粒和叶片中硒含量提高最明显。土壤中总硒含量的高低虽然不能说明有效硒含量的高低水平,但是总硒含量的高低决定了植物吸收利用土壤中有效硒的水平。磷酸盐与硒酸盐具有相似的化学特性,通过施加磷肥和叶面喷施氨基酸等调控措施,能够使固定在土壤胶体上的硒释放出来,从而促进植物对硒的吸收<sup>[42]</sup>。诸旭东等<sup>[43]</sup>向土壤中添加外源物质时,加入钙镁磷肥以及喷施硒肥等措施对提高土壤及作物中有效硒含量具有显著影响,钙镁磷肥处理下的土壤中有效硒含量达到 0.08 mg/kg,显著增加大米中硒的含量( $P<0.01$ ),达 0.12 mg/kg,达到富硒大米的标准;而外源补硒对硒的生物有效性提高也较大,最大增幅可达 52.5%。添加不同类型的调理剂是提高土壤硒的生物有效性的另一种可行性方法,赵妍等<sup>[44]</sup>在研究富硒茶园土壤时,通过向土壤中添加一定比例的生物肥料与粉煤灰混合改良剂,目的是提高土壤中有效硒的含量来达到富硒茶所需求的土壤硒含量,结果表明这种改良措施实际产生的效果很好,其中生物有机肥处理下的土壤有效硒含量提高了 35.65 μg/kg,茶叶中硒的含量同样提高了 0.24 mg/kg,均达到极显著水平( $P<0.01$ )。杨妮等<sup>[45]</sup>研究发现,分别将秸秆生物炭与生物有机肥的混合调理剂、生物有机肥与钙镁磷肥混合以及生石灰粉与生物有机肥混合等措施来调控茶园土壤中硒的生物有效性,结果表明生物有机肥与钙镁磷肥混合配施的调控效果更好,调控后的土壤有效硒含量是对照的 2 倍,与对照相比提高了 146 μg/kg,达到极显著水平( $P<0.01$ )。

#### 5 结论

硒元素在土壤中的分布广泛但不均匀,决定土壤硒含量最主要的因素是成土母质的性质和组成。土壤中的硒在地表径流以及淋溶作用下沿土壤剖面向下迁移,最后在中下部分的淋溶淀积层富集。影响土壤有效硒含量的因素主要有土壤硒全量、pH、有机质、氧化还原条件和土壤质地。通过向土壤中添加外源硒、土壤改良剂以及生物有机肥等调控技术,可以提高土壤硒的生物有效性,提高植物对硒的富集能力。

#### 参考文献

- [1] ALLMANG C, KROL A. Selenoprotein synthesis: UGA does not end the story[J]. Biochimie, 2006, 88(11): 1561-1571.
- [2] HATFIELD D L, GLADYSHEV V N. How selenium has altered our understanding of the genetic code[J]. Mol Cell Biol, 2002, 22(11): 3565-3576.
- [3] 马秀杰, 张跃安. 硒对人体健康影响研究进展[J]. 中国公共卫生, 2009, 25(8): 1021-1023.
- [4] 安梦鱼, 张青, 王焯平, 等. 土壤植物系统硒累积迁移的影响因素及调

- 控[J]. 中国农学通报, 2017, 33(11): 64-68.
- [5] 王源菲. 硒元素形态分析方法的研究进展[J]. 化工管理, 2018(21): 23-24.
- [6] 何巧. 水稻中硒的转运和积累特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [7] 邴逸根, 董翔, 郑洁, 等. 地质因素影响下的硒在土壤-水稻系统中的迁移转化[J]. 物探与化探, 2007, 31(1): 77-80.
- [8] 张庆华, 李霞. 贵州发展富硒农产品的潜力分析及展望[J]. 天津农业科学, 2019, 25(6): 61-67.
- [9] 马雄. 4-6月龄绒山羊羔羊日粮中硒的适宜水平研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [10] 杨海滨, 邓敏, 盛中雷, 等. 土壤中硒元素研究进展[J]. 南方农业, 2014, 8(22): 36-39, 44.
- [11] BARRON E, MIGEOT V, RABOUAN S, et al. The case for re-evaluating the upper limit value for selenium in drinking water in Europe[J]. J Water Heal, 2009, 7(4): 630-641.
- [12] 廖彪, 金华峰. 紫阳县富硒区土壤和岩石中的硒含量[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(1): 49-51.
- [13] 宋晓珂. 富硒土壤中硒形态和价态分布及生物硒富集能力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [14] 李榕, 黄栋良, 何梓华, 等. 湖南省石门县土壤及柑橘富硒程度调查及评价[J]. 国土资源导刊, 2018, 15(4): 31-36.
- [15] 刘永贤, 陈锦平, 潘丽萍, 等. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1139-1144.
- [16] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1197-1203.
- [17] 黄建国, 袁玲. 四川盆地主要紫色土硒的状况及其有效性研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 152-159.
- [18] 赵成义. 土壤硒的生物有效性研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 184-187.
- [19] 王五一, 王大成, 王卫中, 等. 我国土壤中硒的淋溶[J]. 地理研究, 1992, 11(2): 34-40.
- [20] 顾涛, 赵信文, 雷晓庆, 等. 珠江三角洲崖门镇地区水稻田土壤-植物系统中硒元素分布特征及迁移规律研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 545-555.
- [21] 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.
- [22] 姬丙艳, 沈骁, 姚振, 等. 青海柴达木盆地绿洲农业区硒地球化学特征: 以诺木洪绿洲为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 199-206.
- [23] 马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1588-1593.
- [24] 龚河阳, 李月芬, 汤洁, 等. 吉林省西部土壤硒含量、形态分布及影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(2): 177-184, 190.
- [25] 王松山, 吴雄平, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒在石灰性土壤中的形态转化及其生物有效性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2499-2505.
- [26] GISSEL-NIELSEN G. Influence of pH and texture of the soil on plcm uptake of added selenium[J]. J Agric Food Chem, 1971, 19(6): 1165-1167.
- [27] HAYGARTH P M, HARRISON A F, JONES K C. Plant selenium from soil and the atmosphere[J]. J Environ Qual, 1995, 24(4): 768-771.
- [28] 张艳玲, 潘根兴, 李正文, 等. 土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 388-391.
- [29] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤-植物系统中硒的浸提形态研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 2395-2397.
- [30] 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 159-162.
- [31] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 75-81.
- [32] 殷金岩, 耿增超, 李致颖, 等. 硒肥对马铃薯吸收、转化及产量、品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 823-829.
- [33] 刘鹏, 杨志辉, 葛旦之, 等. 淹水条件下土壤硒迁移行为的研究I. 还原淋溶作用下土壤硒的溶液迁移[J]. 湖南农业大学学报, 2000, 26(1): 1-4.
- [34] 李娟, 龙健, 汪境仁. 黔中地区水稻土的含硒量及其对糙米硒含量的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 571-574.
- [35] 徐强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 方正县土壤全硒空间变异研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 18-25.
- [36] 吴丽霞, 林立弘, 方楚凝. 影响富硒土壤产出富硒农产品的因素[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12): 3546-3549.
- [37] 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.
- [38] HAMDY A A, GISSEL-NIELSEN G. Fixation of selenium by clay minerals and iron oxide[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 1977, 140(1): 63-70.
- [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] 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.
- [41] 张木, 唐控虎, 钟松臻, 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.
- [42] 徐聪, 刘媛媛, 孟凡乔, 等. 农产品硒含量及与土壤硒的关系[J]. 中国农学通报, 2018, 34(7): 96-103.
- [43] 诸旭东, 宗良纲, 马迅, 等. 内源调控与外源补硒对红壤中硒有效性及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 398-404.
- [44] 赵妍, 马爱军, 宗良纲, 等. 不同调控措施对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[C]//中国农业生态环境保护协会. 十一五农业环境研究回顾与展望——第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 北京: 中国农业生态环境保护协会, 2011: 8.
- [45] 杨旒, 宗良纲, 严佳, 等. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1069-1075.

(上接第10页)

- [51] 杨虎德, 马彦, 冯丹妮. 甘肃省农田氮磷流失特征及影响因素研究[J]. 甘肃农业科技, 2020(21): 21-27.
- [52] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193.
- [53] 张爱平, 刘汝亮, 杨世琦, 等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 555-562.
- [54] 尹洪斌, 石元亮. 控释肥料的研究现状与进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 422-425.
- [55] 李咏玲. 镁渣基缓释性硅钾肥的制备及性能研究[D]. 太原: 山西大学, 2016: 12.
- [56] 许秀成. 缓释、控释肥料生产、使用前景展望[J]. 磷肥与复肥, 2006, 21(6): 9-11.
- [57] 连煜阳, 刘静, 金书秦. 农业面源污染治理探析——从新型肥料生产环节视角[J]. 中国环境管理, 2019, 11(2): 18-22.
- [58] 高文胜, 陈宏坤, 王玉霞, 等. 控释肥对苹果生长发育和果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(1): 88-92.
- [59] 王恩飞, 崔智多, 何璐, 等. 我国缓/控释肥研究现状和发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21): 12762-12764, 12767.
- [60] 陈小奔. 基于农户施肥行为的肇州县农业面源污染防控研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019: 28.
- [61] 靳前龙, 郭智勇, 韩文君, 等. 基于化肥视角下的全球农业面源污染现状及防治措施探究[J]. 农业科技通讯, 2018(11): 180-183.