

谭卓贤, 杜建军, 孙星, 等. 石灰、磷酸盐及硅酸盐对土壤硒有效性及水稻累积硒的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(3): 450-456.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.03.007

# 石灰、磷酸盐及硅酸盐对土壤硒有效性及水稻累积硒的影响

谭卓贤<sup>1,2</sup>, 杜建军<sup>1</sup>, 孙星<sup>2</sup>, 易琼<sup>2</sup>, 徐培智<sup>2</sup>, 张木<sup>2</sup>

(1. 仲恺农业工程学院资源与环境学院, 广东 广州 510225; 2. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 华南地区酸性土壤硒有效性低, 本研究旨在探讨石灰、磷酸盐及硅酸盐类土壤改良物质对酸性水稻土壤硒有效性及水稻吸收硒的影响。结果表明, 在施 0.25 mg/kg 硒基础上, 石灰、硅酸钠、磷酸氢二钠以及三者配合施用对水稻单株产量影响不大; 对大米硒含量提升效果以石灰、硅酸钠及石灰、硅酸钠、磷酸氢二钠三者配合施用的处理较好; 酸性土壤中各形态硒的含量高低依次为有机物/硫化物结合态硒、残渣态硒、铁锰氧化物结合态硒、交换态硒和水溶态硒。石灰、磷酸氢二钠处理显著提升易被植物吸收的水溶态硒及交换态硒含量, 显著降低难利用残渣态硒含量; 石灰、硅酸钠、磷酸氢二钠三者配合施用的处理显著降低了有机物/硫化物结合态硒的含量。施用石灰以及施用磷酸氢二钠均可有效提升土壤硒的有效性, 并促进水稻对硒的吸收, 施用硅酸盐对土壤硒有效性影响不大, 但能促进水稻对硒的累积。

**关键词:** 硒; 酸性土壤; 有效硒; 石灰; 磷酸盐; 硅酸盐

**中图分类号:** S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)03-0450-07

## Effects of lime, phosphate and silicate on selenium availability in soil and selenium accumulation in rice

TAN Zhuo-xian<sup>1,2</sup>, DU Jian-jun<sup>1</sup>, SUN Xing<sup>2</sup>, YI Qiong<sup>2</sup>, XU Pei-zhi<sup>2</sup>, ZHANG Mu<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The availability of selenium in acidic soils in South China is low. The purpose of this study was to investigate the effects of lime, phosphate and silicate on selenium availability in acid paddy soil and selenium uptake by rice. The results showed that on the basis of 0.25 mg/kg selenium application, lime, sodium silicate, disodium hydrogen phosphate and their combined application had little effect on rice yield per plant. The effect of improving the selenium content of rice was better under the combined application of lime and sodium silicate and the combined application of lime, sodium silicate

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31872176, 42107374); 广东省自然科学基金项目(2021A1515010943); 广东省农业科学院中青年学科带头人培养计划项目(R2020PY-JX013)

作者简介: 谭卓贤(1997-), 男, 广东肇庆人, 硕士研究生, 主要从事植物硒营养机理研究。(E-mail) 735298479@qq.com

通讯作者: 张木, (E-mail) 344387319@qq.com

and disodium hydrogen phosphate. The content of various forms of selenium in acidic soil was in the order of organic/sulfide bound selenium, residual selenium, iron-manganese oxide bound selenium, exchangeable selenium and water-soluble selenium. Lime and disodium hydrogen phosphate treatment significantly increased the contents of water-soluble selenium and exchangeable selenium that were easily absorbed by plants, and significantly reduced

the content of residual selenium that was difficult to use. The combined application of lime, sodium silicate and disodium hydrogen phosphate significantly reduced the content of organic/sulfide-bound selenium. The application of lime and disodium hydrogen phosphate could effectively improve the availability of selenium in soil and promote the absorption of selenium by rice. The application of silicate had little effect on the availability of selenium in soil, but it could promote the accumulation of selenium by rice.

**Key words:** selenium; acid soil; available selenium; lime; phosphate; silicate

硒是人体所必需的营养元素,适当摄入硒不仅能够降低患心血管疾病的概率,还能提高人体免疫力<sup>[1]</sup>。中国有近 2/3 土壤缺硒,缺硒造成各种健康问题严重困扰着超过  $1.5 \times 10^8$  人<sup>[2]</sup>。人体内硒的主要来源是粮食作物中的有机硒<sup>[3]</sup>,是作物通过吸收转化土壤中的无机硒所得<sup>[4]</sup>。中国华南地区土壤普遍呈酸性,大部分的硒被固定在土壤中<sup>[5]</sup>,施加外源硒如液面喷施硒肥、土壤基施硒肥等,虽然能一定程度上提高作物硒含量,但也仅有 5%~30% 能被植物吸收,稍有不慎便会造成资源浪费和硒污染等各种问题<sup>[6]</sup>。土壤全硒含量即便能够达到富硒水平,其中有效硒含量也不一定如一些足硒或少硒地区土壤<sup>[7-8]</sup>,因此土壤全硒量并不能完全用来评价土壤的供硒能力。提升作物硒含量,关键在于如何提高酸性土壤中硒的有效性。酸性土壤中占主导地位的四价硒的溶解度会大大降低,究其原因绝大部分的四价硒都会被黏土矿物吸附,被 Fe、Al 的氧化物固定,或者与有机质发生络合作用而被固定<sup>[9]</sup>。酸性土壤中亚硒酸盐与磷酸盐都能够被土壤中的铁铝氧化物与黏粒矿物吸附,但对磷酸盐的吸附能力大于亚硒酸盐,磷酸盐与亚硒酸盐竞争结合位点<sup>[10]</sup>。硅酸盐在阴离子吸附位点的竞争能力次于磷酸盐但强于亚硒酸盐,硅酸盐与铁氧化物的结合能阻止亚硒酸盐与铁氧化物的结合,且能解除被铁氧化物所吸附的亚硒酸盐<sup>[11]</sup>。当前的研究多集中在改变 pH、磷酸盐含量和硅酸盐含量之后对硒的有效性的影响状况,但是并未揭示改变以上因素之后,土壤硒各种形态的转化及其在植株体内的迁移特征。因此,本研究通过盆栽试验,明确石灰、磷酸盐及硅酸盐类土壤改良物质对土壤硒形态转化以及对水稻吸收累积硒的影响,为提升酸性土壤中稻米硒含量提供技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

本研究于 2020 年 7-11 月在广东省农业科学院

农业资源与环境研究所温室基地(23° 7' N, 113° 15' E)内采用盆栽试验进行,以水稻为研究载体,于 7 月 15 日育苗,8 月 13 日移栽,收获日期为 11 月 18 日。供试土壤为广东省台山市都斛镇的黏壤土,基本理化性质为:pH 值 5.01、有机质含量 3.25%、碱解氮含量 182.72 mg/kg、有效磷含量 35.20 mg/kg、速效钾含量 242.50 mg/kg、总硒含量 0.38 mg/kg。盆栽器具为高密度聚乙烯桶,底面半径 8.0 cm,桶口半径 10.5 cm,高 19.0 cm,每盆盛土 3 kg,每盆栽种水稻 1 穴。共设置 6 个处理,对照不施硒(T1)、0.25 mg/kg 硒(T2)、0.25 mg/kg 硒+1.00 g/kg 石灰(T3)、0.25 mg/kg 硒+1.00 g/kg 硅酸钠(T4)、0.25 mg/kg 硒+0.40 g/kg 磷酸氢二钠(T5)、0.25 mg/kg 硒+1.00 g/kg 石灰+1.00 g/kg 硅酸钠+0.40 g/kg 磷酸氢二钠(T6)。各处理重复 8 次,其中 4 个重复进行水稻栽培,另外 4 个重复为不栽培水稻的空白对照,空白对照水分管理与栽培水稻的处理保持一致。硒肥为分析纯亚硒酸钠( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ),大量元素肥料分别为尿素、磷酸氢二铵、氯化钾,N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  用量分别为每 1 kg 土壤施 0.30 g、0.15 g、0.20 g。每 1 kg 土补充 1 ml 浓缩 1 000 倍的 Arnon 微量元素营养液,以保证水稻生长期间微量元素充足,营养成分根据南方酸性土壤特性适当调整,去除影响试验结果的成分,以保证试验结果的准确性。供试水稻品种为美香占,在 25 d 苗龄时进行移栽,自然光照,定量浇灌水,严格进行病虫害防控。

### 1.2 样品采集与测定方法

水稻成熟后采集水稻植株样品,将水稻植株分为根、茎叶、籽粒(大米、谷壳),先用自来水冲洗再用去离子水润洗,放入烘箱中烘干至恒质量,并记录各部位干质量。烘干后的植株样品,粉碎过 100 目筛,而后装入密封袋中,标明信息,保存待测。同时采集各处理不栽培水稻空白处理的土壤样品,风干过筛备测。

水稻各部位的硒含量测定按照国家标准 GB/T 21729-2008 进行<sup>[12]</sup>:称取样品 0.1~0.2 g(精确至

0.001 g)置于微波消解罐中,依次添加  $\text{HNO}_3$  4 ml 和  $\text{H}_2\text{O}_2$  2 ml,然后进行微波消解消化,待消解液冷却后再加 5 ml 6 mol/L HCl 溶液,持续加热使样品至无色透明状态,冷却后转移至 25 ml 聚乙烯管中,最后加入 2.5 ml 100 g/L 铁氯化钾,用去离子水定容待测。

土壤空白处理的土壤样品进行 pH 值测定和硒的形态分析。土壤 pH 值采用 pH 计测定,5:1 水土比浸提<sup>[13]</sup>。土壤不同形态硒分析采用连续化学浸提法,分为水溶态、交换态、铁锰氧化物结合态、有机物硫化物结合态以及残渣态 5 种形态,前 4 种形态的硒分别用 0.25 mol/L HCl 和 0.70 mol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、2.50 mol/L HCl、5%  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 + \text{NH}_3$ (水与浓硝酸 1:1)进行浸提,浸提液采用  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$  进行消解,测定残渣态硒的土壤用  $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$  进行消解<sup>[14]</sup>。各级提取的硒均由北京吉天仪器有限公司采用 AFS-8230 双道原子荧光光度计进行测定。

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 12.0 进行统计分析,各处理的多重比较采用 LSD-test ( $P < 0.05$ )法,采用 Sigmaplot 12.5 进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种类土壤改良物质对水稻单株产量的影响

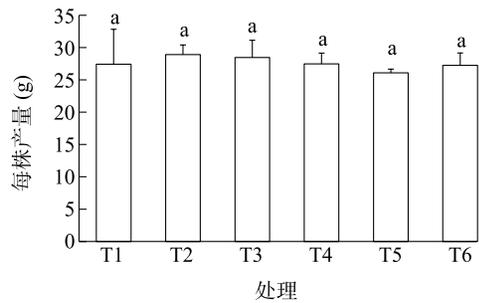
如图 1 所示,与对照(T1)相比,单独施硒(T2)、硒+石灰(T3)、硒+硅酸钠(T4)、硒+磷酸氢二钠(T5)处理,以及硒+石灰+硅酸钠+磷酸氢二钠(T6)处理对水稻单株产量均未产生显著影响。

### 2.2 不同种类土壤改良物质对土壤 pH 值的影响

如图 2 所示,单独施硒处理(T2)对于土壤 pH 值影响不大,施用硒+石灰(T3)、硒+硅酸钠(T4)处理以及硒+石灰+硅酸钠+磷酸氢二钠(T6)处理均显著提高了土壤 pH 值,其中 T6 处理 pH 值提升幅度最大。

### 2.3 不同种类土壤改良物质对水稻各部位硒含量的影响

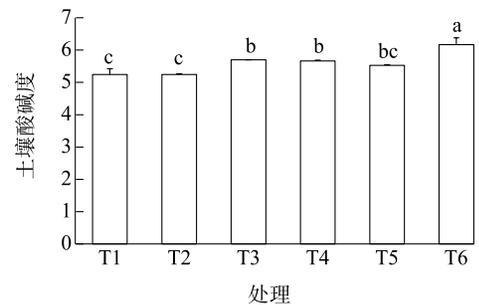
如图 3A 所示,与对照(T1)相比,其他 5 个处理均显著提高了水稻根系硒含量,T2、T3、T4、T5、T6 分别提高 97.0%、129.6%、120.5%、154.7%、118.9%。与单施硒处理(T2)相比,T5 处理根系硒含量提升幅度达 29.3%。T2、T3、T4、T5、T6 处理的地上部茎



T1:不施硒对照;T2:施 0.25 mg/kg 硒;T3:施 0.25 mg/kg 硒 + 1.00 g/kg 生石灰;T4:施 0.25 mg/kg 硒 + 1.00 g/kg 硅酸钠;T5:施 0.25 mg/kg 硒 + 0.40 g/kg 磷酸氢二钠;T6:施 0.25 mg/kg 硒 + 1.00 g/kg 生石灰 + 1.00 g/kg 硅酸钠 + 0.40 g/kg 磷酸氢二钠;图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 不同处理对水稻单株产量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on yield per plant of rice

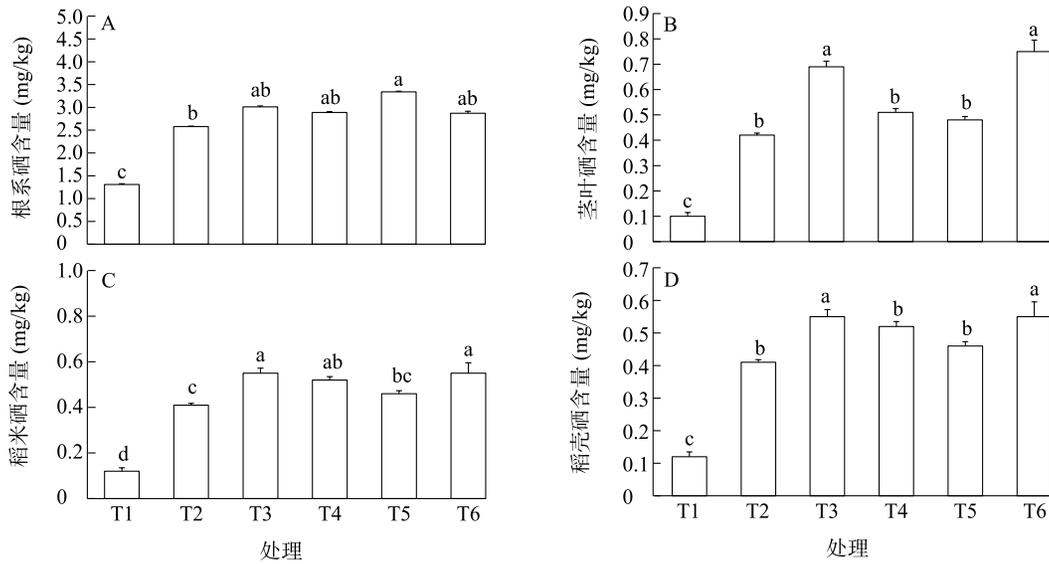


T1~T6 见图 1 注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同处理对土壤 pH 值的影响

Fig.2 Effects of different treatments on soil pH

叶硒含量与对照(T1)相比均有显著提高(图 3B),增幅分别为 317.7%、588.5%、409.5%、375.8%、646.3%;与单施硒处理(T2)相比,T3、T6 处理地上部茎叶硒含量分别提高 63.9%和 77.7%,而 T5 处理也有所提升,但差异不显著。如图 3C 所示,与对照(T1)相比,T2、T3、T4、T5、T6 处理大米硒含量分别提高 243.3%、358.6%、329.6%、284.4%、360.2%;与 T2 处理相比,T3、T4、T6 处理大米硒含量都有不同程度的显著提高,提升幅度为 34.2%、25.7%、34.7%。施硒显著提高了谷壳硒含量(图 3D),与对照(T1)相比,T2、T3、T4、T5、T6 处理谷壳硒含量提高了 91.3%、255.2%、153.3%、135.2%、256.6%;与 T2 处理相比,T3 和 T6 处理谷壳硒含量分别提高 34.2%和 34.7%。



T1~T6 见图 1 注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 不同处理对水稻各组织硒含量影响

Fig.3 Effects of different treatments on selenium content in various tissues of rice

#### 2.4 不同种类土壤改良物质对土壤硒赋存形态的影响

如图 4A 所示,与对照(T1)相比,T3、T5、T6 处理水溶态硒显著提高,提高幅度分别为 35.4%、25.6%、16.8%;与 T2 处理相比,T3、T5 处理达到了显著性差异,增幅为 22.7%、13.8%。与不施硒对照(T1)相比(图 4B),T3、T5 处理显著提高了交换态硒含量,提升幅度分别为 24.8%和 14.9%;与单独施硒处理(T2)相比,T3、T5 处理显著提高了交换态硒含量,增幅分别为 21.5%和 11.7%。与不施硒对照(T1)相比(图 4C),T2、T3、T4、T5、T6 处理对土壤铁锰氧化物结合态硒含量均有显著提升作用,增幅分别为 107.5%、107.7%、107.8%、126.9%、118.3%;与单独施硒处理(T2)相比,仅 T5 处理铁锰氧化物结合态硒含量有显著增加。如图 4D 所示,各施硒处理均显著提高了土壤有机物/硫化物结合态硒的含量,提升幅度分别为 31.0%、27.2%、30.7%、29.3%、20.1%;在所有的施硒处理中,仅有 T6 处理较 T2 处理降低了 8.3%。与不施硒对照(T1)相比(图 4E),T2、T4、T5、T6 处理残渣态硒含量达到了显著性差异;在施硒处理中,T3、T5 处理残渣态硒较 T2 处理分别降低了 23.4%和 17.5%。

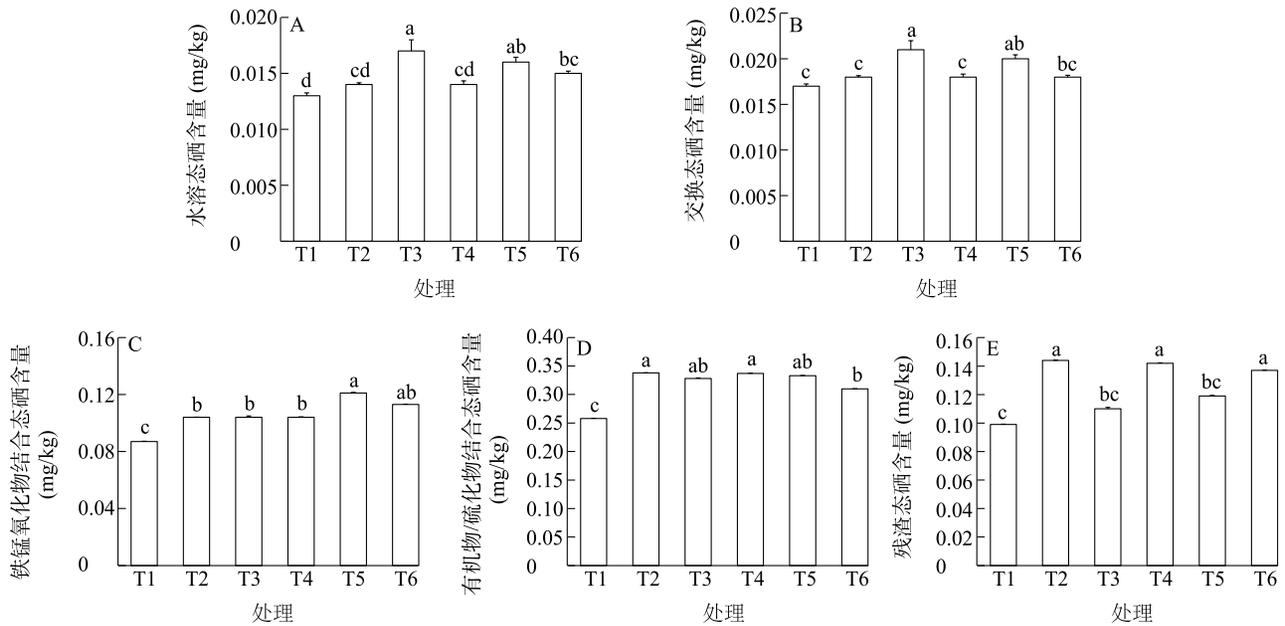
#### 2.5 不同种类土壤改良物质对土壤各形态硒分配比例的影响

如图 5 所示,与不施硒对照(T1)相比,水溶态

硒占比以 T3 处理最高、T2 处理最低;交换态硒含量以 T3 处理最高,其他处理均有所降低;T2、T3、T4 处理铁锰氧化物结合态硒占比有所降低,T5 与 T6 处理有所提高;T2、T3、T4、T5 处理有机物/硫化物结合态硒占比有不同程度的提高,T6 处理有所降低;T2、T4、T6 处理残渣态硒占比有所提升,而 T3、T5 处理有所降低。与单独施硒(T2)处理相比,T3、T4、T5、T6 处理水溶态硒、交换态硒占比均有所提升;T3、T4、T5 处理铁锰氧化物结合态硒占比有不同程度提升;T3 处理有机物/硫化物结合态硒占比有所提升,而 T6 处理则有所降低;T3、T4、T5、T6 处理残渣态硒占比有不同程度的降低,其中 T3、T5 处理有较大的降幅。

### 3 讨论

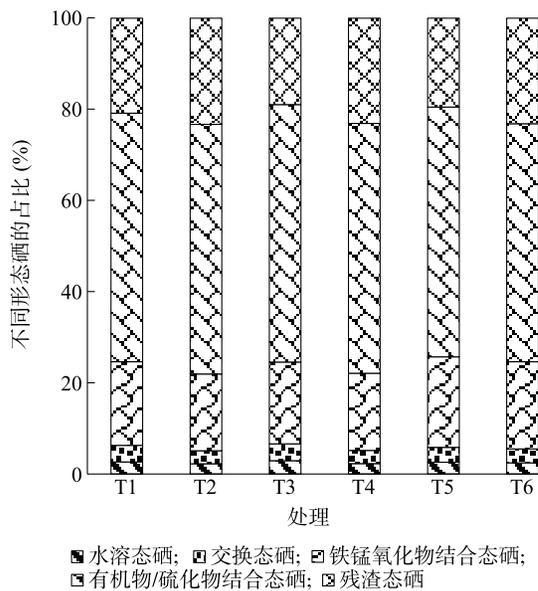
硒是有益元素,低浓度硒可以促进种子发芽、增强植物抗氧化能力、提升作物产量以及缓解重金属胁迫<sup>[15-17]</sup>。本试验中,施硒对水稻各组织中硒的含量均有显著提升作用,对水稻单株产量无显著提升作用。华南地区酸性土壤中硒的有效性较低,大多转化为植物难以吸收利用的铁锰氧化物结合态、有机物/硫化物结合态、残渣态硒,而易被植物吸收利用的水溶态及交换态硒占比则相对偏低<sup>[18]</sup>。在生产富硒稻米时非常有必要通过外源手段提升酸性土壤中硒的有效性,促进水稻对硒的吸收。



T1~T6 见图 1 注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 不同处理对土壤水溶态、交换态、铁锰氧化物结合态、有机物/硫化物结合态和残渣态硒含量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on the contents of water-soluble selenium, exchangeable selenium, iron-manganese oxide bound selenium, organic/sulfide bound selenium and residual selenium in soil



T1~T6 见图 1 注。

图 5 不同处理对不同形态硒占比的影响

Fig.5 Effects of different treatments on the proportion of different forms of selenium

土壤 pH 值是硒有效性的决定性因素,对土壤 pH 进行调节,是提升土壤硒有效性的重要手段<sup>[19]</sup>。

土壤中的水溶态、交换态硒通常是由呈四价或者六价的无机硒构成<sup>[20]</sup>,不同价态硒的溶解性差异明显,硒的价态越低溶解性越差;当土壤呈碱性时,六价硒是土壤中的主要硒形态,随着 pH 值下降,土壤中硒会逐步转变成低价态硒,溶解性也随之下降<sup>[21]</sup>。在本试验的酸性土壤环境中,土壤中的水溶态硒及交换态硒总体占比较低,二者合计占比不足 25%,植物难以吸收利用形态的硒占比高达 75% 以上。土壤 pH 能改变硒在土壤中与其他离子的竞争吸附能力。酸性环境中硒易被铁铝氧化物吸附或与有机质络合导致有效性降低<sup>[22]</sup>,pH 值逐渐升高时土壤中与硒竞争吸附的离子增多,竞争离子代替硒被吸附,减少硒的固定<sup>[23]</sup>。同时土壤表面官能团发生质子分离而带负电,与土壤中带负电的硒酸根、亚硒酸根离子相互排斥,土壤中自由的硒含量增多,从而提高土壤有效硒。土壤 pH 还能通过改变具有可变电荷的土壤表面的净电荷量来调控硒的有效性<sup>[24]</sup>。本研究中,施用石灰处理的土壤 pH 值均有提升,有效态硒含量及相应占比也得到提高,水稻根系、茎叶、糙米及谷壳硒含量均大幅增加。

亚硒酸盐和磷酸盐在土壤环境中存在着较为复

杂的化学关系,在土壤中竞争相同的吸附位点,土壤对磷酸盐的吸附作用大于亚硒酸盐<sup>[25]</sup>。磷酸盐可能会优先占据吸附位点,适量添加磷酸盐可能会提升土壤硒的生物有效性;在植物吸收层面,植物通过磷酸盐转运蛋白吸收亚硒酸盐,两者拥有相同的转运通道,因此在植物营养元素吸收上又存在竞争关系<sup>[26]</sup>。本试验结果与之相符,添加磷酸盐的处理显著提高了土壤有效硒的含量,同时也增加了水稻根系中硒的含量,表明在本试验中磷酸盐促进水稻吸收硒的作用占主导地位。

土壤中硅酸盐与亚硒酸盐之间也存在着竞争吸附的关系,在吸附能力上硅酸盐强于亚硒酸盐,硅酸盐与碱性土壤中的金属氧化物的结合优先于亚硒酸盐与铁氧化物的结合,且能解除铁氧化物对亚硒酸盐的吸附,硅酸盐能够将固定的硒重新析出<sup>[11]</sup>。但是,在本研究中硅酸盐对土壤有效硒提升效果不显著,可能硅酸盐与硒酸盐之间的竞争关系转化与土壤理化性质有关,本试验中供试土壤为华南地区脱硅富铝化的酸性土壤。0.25 mg/kg硒+1.00 g/kg硅酸钠的处理对水稻根系、茎叶、稻米及谷壳硒含量均有不同程度提升,表明硅酸盐能通过其他路径促进水稻对硒的吸收。水稻中的硅是通过运输蛋白OsNIP2;1进入植物内部的,有研究者指出亚硒酸盐也能够通过此运输蛋白进入水稻体内,或许对硒的吸收转运具有促进作用,本研究中水稻组织硒含量有所提升可能与该过程有关<sup>[27]</sup>。值得注意的是,石灰、硅酸盐及磷酸盐配合施用处理在对土壤硒有效性提升方面以及水稻吸收硒方面均发挥一定的作用,但并未实现三者效应的叠加放大。

## 4 结论

硒与石灰、硅酸钠、磷酸氢二钠及其3种土壤改良物质配施对水稻根、茎叶、谷壳及大米的硒含量均有提升作用,其中硒与石灰及3种土壤改良物质配施对稻米硒含量提升效果较好;石灰以及磷酸氢二钠均可有效提升土壤硒的有效性,并促进水稻对硒的吸收,硅酸盐对土壤硒有效性影响不大,但能促进水稻对硒的累积。综合水稻栽培试验和不栽培水稻土壤培养试验结果得出以下结论:磷酸盐类物质增加水稻对硒的累积可能是源于促进土壤硒有效性的提升,而硅酸盐类物质增加水稻对硒的累积可能是源于在代谢过程中促进水稻对硒的吸收转运。

## 参考文献:

- [1] 熊咏民,杨晓莉,张丹丹,等. 硒的生物学效应与环境相关性疾病的研究进展[J]. 土壤,2018,50(6):1105-1112.
- [2] 印遇龙,颜送贵,王鹏祖,等. 富硒土壤生物转硒技术的研究进展[J]. 土壤,2018,50(6):1072-1079.
- [3] 宋晓珂,李宗仁,王金贵. 青海东部农田土壤硒分布特征及其影响因素[J]. 土壤,2018,50(4):755-761.
- [4] 王加冕. 施硒对小麦农艺性状、产量和硒、镉、铅累积效应[D]. 荆州:长江大学,2018.
- [5] 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.
- [6] 祝姣姣,聂兆君,赵 鹏,等. 磷硒配施对郑麦 9023 硒吸收及土壤硒形态转化的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(6):722-729.
- [7] 梁若玉,和 娇,史雅娟,等. 典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性与剖面分布分析[J]. 环境化学,2017,36(7):1588-1595.
- [8] 梁东丽,彭 琴,崔泽玮,等. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J]. 生物技术进展,2017,7(5):374-380.
- [9] 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.
- [10] 马 迅,诸旭东,宗良纲,等. 不同调控措施对酸性富硒土壤硒有效性及水稻产量性状的影响[J]. 土壤,2018,50(2):284-290.
- [11] TIAN Q Z, BAI Y C, PAN Y H, et al. Influence of aluminate and silicate on selenate immobilization using alkaline-earth metal oxides and ferrous salt[J]. Science of the Total Environment,2022,851:158126.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21729-2008 茶叶中硒含量的检测方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:25-106.
- [14] 刘秀金,杨 柯,成杭新,等. 四川省泸州市页岩和碳酸盐岩区水稻根系土 Se 含量和生物有效性的控制因素[J]. 地质通报,2020,39(12):1919-1931.
- [15] SHEKARI L, AROIEE H, MIRSHEKARI A, et al. Protective role of selenium on cucumber (*Cucumis sativus* L.) exposed to cadmium and lead stress during reproductive stage role of selenium on heavy metals stress[J]. Journal of Plant Nutrition,2019,42(10):1-14.
- [16] 赵剑敏. 外源硒肥对小麦产量、品质形成及硒元素积累的影响[D]. 晋中:山西农业大学,2020.
- [17] ALEKSANDRA, SENTKOWSKA, KRYSZYNA, et al. Investigation of antioxidant activity of selenium compounds and their mixtures with tea polyphenols[J]. Molecular Biology Reports,2019,46(3):3019-3024.
- [18] 陈东平,张金鹏,聂合飞,等. 粤北山区连州市土壤硒含量分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学学报,2021,41(7):2838-

- 2848.
- [19] 王志强,杨建锋,魏丽馨,等. 石嘴山地区碱性土壤硒地球化学特征及生物有效性[J]. 物探与化探,2022,46(1):229-237.
- [20] 秦海波,朱建明,李社红,等. 环境中硒形态分析方法的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008(2):180-187.
- [21] TOAN D Q. 有机肥施用对土壤-植物体系中硒生物有效性的影响及其机理[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [22] 李玉超,王诚煜,于成广. 辽宁丹东地区土壤 Se 元素地球化学特征及其影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(6):1766-1775.
- [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] 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.
- [25] 邢 颖,刘永贤,梁潘霞,等. 磷对富硒赤红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):1770-1775.
- [26] ZHANG L H, HU B, LI W, et al. OsPT2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice[J]. The New Phytologist,2014,201(4):1183-1191.
- [27] ZHAO X Q, MITANI N, YAMAJI N, et al. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2;1 in selenite uptake in rice[J]. Plant Physiology,2010,153(4):1871-1877.

(责任编辑:黄克玲)