

## 滴灌条件下不同价态外源硒对水稻硒吸收及转运的影响

张栋 史力超 冶军\* 侯振安 王存虎 吴永海

(石河子大学 农学院 农业资源与环境系, 新疆 石河子 832003; \* 通讯联系人, E-mail: yejun.shz@163.com)

### Effects of Selenium Valence on Its Uptake and Translocation in Rice Under Drip Irrigation

ZHAND Dong, SHI Lichao, YE Jun\*, HOU Zhen'an, WANG Cunhu, WU Yonghai

(Department of Resources and Environmental Sciences, College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

\* Corresponding author, E-mail: yejun.shz@163.com)

**Abstract:** 【Objective】To lay a theoretical base for the development of selenium-enriched rice, a field plot experiment was performed to study the effects of selenate and selenite on selenium transformation and bioavailability under drip irrigation. 【Method】The experiment consisted of two factors: (i) amount of Se fertilizer (0.3, 0.6, and 1.2 kg/hm<sup>2</sup>), (ii) type of Se fertilizer (selenate and selenite). 【Result】The results indicated that selenate application at the level of 1.2 kg/hm<sup>2</sup> resulted in the highest soluble selenium concentration one day after fertilization (340% higher than control), 1.2 kg/hm<sup>2</sup> selenite application resulted in the highest exchangeable selenium, Fe oxide-bound selenium and organic matter-bound selenium concentrations four days after fertilization (380%, 56%, 59% higher than control). It could be seen that selenate mainly existed in soluble form in soil, while selenite could be transformed from the soluble form to other three forms, which decreased its bioavailability. We found that under selenite treatment selenium concentration in leaves and seeds was significantly lower than that under selenate treatment. However, under selenite treatment, the selenium content in root was significantly higher than that under selenate treatment. 【Conclusion】The selenium accumulations in shoot and root of rice were significantly higher under selenate treatments than those under the selenite treatments. Compared with the selenate treatment, absorption index, primary transport index and secondary transport index were lower in the selenite treatment. In conclusion, selenite has higher bioavailability than selenite in drip irrigation.

**Key words:** selenite; selenate; rice; bioavailability

**摘要:** 【目的】通过田间小区试验,研究外源硒酸盐及亚硒酸盐施入滴灌稻田中对土壤中不同价态硒含量及其生物有效性的影响,旨在为滴灌条件下富硒水稻的开发提供理论依据。【方法】以水稻品种 T-43 为材料,硒肥为亚硒酸盐与硒酸盐,施硒量为 0.3、0.6、1.2 kg/hm<sup>2</sup>。【结果】研究表明,施肥后 1 d 硒酸盐 1.2 kg/hm<sup>2</sup> 处理土壤中可溶态硒含量最高,比对照高了 340%;可交换态硒、铁氧化物态硒及有机态硒含量在施肥后 4 d 亚硒酸盐 1.2 kg/hm<sup>2</sup> 处理最高,较对照分别提高了 380%、56%、59%,硒酸盐处理铁氧化物态硒及有机态硒含量增加不显著,说明硒酸盐主要以可溶态硒存在,而亚硒酸盐主要以可交换态硒存在,并且由可溶态转化为其他形态,因此降低了其有效性。对水稻的根、茎、叶及籽粒硒含量分析后发现,亚硒酸盐处理的籽粒和叶中的硒含量显著低于硒酸盐处理,而其根部硒含量显著大于硒酸盐处理,茎部硒含量无显著差异,且亚硒酸盐处理的根部硒累积量均大于硒酸盐处理。【结论】说明施用亚硒酸盐大部分积累在水稻根部,硒酸盐处理的地上部硒累积量大于亚硒酸盐处理,同时,硒酸盐处理的根系吸收系数、初级转运系数、次级转运系数均大于亚硒酸盐处理,说明亚硒酸盐大部分积累在水稻根部且向地上部转运较难,硒酸盐随水滴施的生物有效性高于亚硒酸盐。

**关键词:** 硒酸盐; 亚硒酸盐; 水稻; 生物有效性

**中图分类号:** S143.7<sup>+</sup>1; S511.06

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7216(2017)01-0065-07

硒是人体和动物所必需的微量元素之一,在增强抗氧化能力、提高免疫力和预防癌症等方面有重要功效<sup>[1-3]</sup>。世界大部分地区环境中硒含量处于偏低水平,而中国 70% 以上的地区不同程度缺硒<sup>[4]</sup>。研究表明,植物硒是人体和动物摄入硒的主要来源,而植物硒主要来源于土壤<sup>[5-6]</sup>,造成植物硒含量低的

主要原因是土壤硒的有效性低<sup>[7]</sup>。长期硒摄入量不足会引起多种疾病<sup>[8-9]</sup>,因此,如何提高粮食作物中的硒含量亟待解决<sup>[9]</sup>。

硒在土壤中迁移转化及有效性主要取决于其存在的形态及价态<sup>[10,11]</sup>。研究表明,土壤中硒的形态根据其其与土壤结合的成分不同可分为可溶态、可交

收稿日期: 2016-04-26; 修改稿收到日期: 2016-07-12。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAD42B02)。

换态、铁氧化物态、有机结合态和残渣态,其中,可被植物吸收利用的主要为可溶态、可交换态及部分有机结合态<sup>[12]</sup>。因此,研究不同价态外源硒在土壤中的形态转化具有重要意义。

水稻是世界上重要的粮食作物之一,而我国稻米硒含量平均值为 0.032 mg/kg,低的仅为 0.016 mg/kg,远远不能满足人体的正常需求。通过土壤增施硒肥来提高水稻籽粒中的硒含量,是改善人体硒营养的重要途径<sup>[13,14]</sup>。因此,研究水稻对外源硒的吸收转运,对提高稻米硒含量,促进人体健康具有重要意义。本研究基于滴灌区施肥特点,研究了不同价态外源硒在滴灌稻田中的形态转化及其对水稻生物有效性的影响,以期在滴灌条件下富硒水稻的开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况与试验材料

试验于 2015 年在新疆石河子市天业化工生态园进行,土壤类型为灌耕灰漠土,耕层土壤基础理化性状如下:pH 值 8.26,有机质含量 26.79 g/kg,碱解氮含量 86.89 mg/kg,有效磷含量 17.44 mg/kg,速效钾含量 354 mg/kg,全硒含量 0.309 mg/kg,供试材料为水稻品种 T-43,硒肥为分析纯亚硒酸钠( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ )和硒酸盐( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ )。

### 1.2 试验设计

硒肥施用方法为滴施,施硒量设 0.3、0.6、1.2 kg/hm<sup>2</sup>,施用亚硒酸盐分别用 Y0.3、Y0.6、Y1.2 表示,施用硒酸盐则以 S0.3、S0.6、S1.2 表示,均以不施硒作为对照(CK)。共 7 个处理,每个处理重复 3 次,小区面积 10 m<sup>2</sup>,小区间设 0.5 m 保护行,硒肥于水稻抽穗期溶于施肥罐随水滴施。

### 1.3 栽培模式与田间管理

试验采用膜下滴灌,一膜三管 12 行种植模式,膜宽 2.2 m,行距配置为 10+26+10+26+10+26+10+26+10+25 cm,穴距 10 cm。采用机械铺膜机械点种,干播湿出,28.5 万穴/hm<sup>2</sup>。全生育期施氮肥(以纯 N 计)270 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥(以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计)180 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(以  $\text{K}_2\text{O}$  计)150 kg/hm<sup>2</sup>。氮磷钾肥分别选择尿素、重过磷酸钙和磷酸钾。灌水量为 10 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

### 1.4 样品采集与项目测定

#### 1.4.1 土壤样品采集与项目测定

分别于硒肥施用后 1、4、8、12、16、20 d,在小区

内随机选取 3~4 个采样点,按 S 型路线采集 0~20 cm 耕层土壤,样品经风干、剔除杂物后分别过 1 mm、0.25 mm 的尼龙筛,备用待测。

土壤不同形态硒含量的分析参照王松山等<sup>[15]</sup>的连续浸提法进行。

#### 1.4.2 植株样品采集与项目测定

水稻收获时,每个处理随机选取 3~4 个大小为 1 m<sup>2</sup>的采样点连根取 20 株水稻,去除根上土壤,用水冲洗,并经蒸馏水洗涤,植株按根、茎、叶、籽粒将各组织分开,于 105℃下杀青 30 min,75℃下烘干至恒重,粉碎过 1 mm 筛,备测待用。

植株全硒分析参照于振等<sup>[16]</sup>的方法。于收获前 3 d 随机取样测产,取样面积为 6.0 m<sup>2</sup>,收获后测定产量、成穗数、每穗粒数及千粒重。参照姜超强等的方法<sup>[17]</sup>计算以下参数:根系吸收系数=根系硒浓度/土壤硒浓度;初级转运系数=茎叶硒浓度/根系硒浓度;次级转运系数=籽粒硒浓度/茎叶硒浓度;地上部硒累积量=地上部硒含量×地上部生物量;地下部硒累积量=地下部硒含量×地下部生物量。

### 1.5 数据处理与统计分析

数据处理采用 Excel 2010 进行,数据统计分析采用 SAS 8.1 完成。

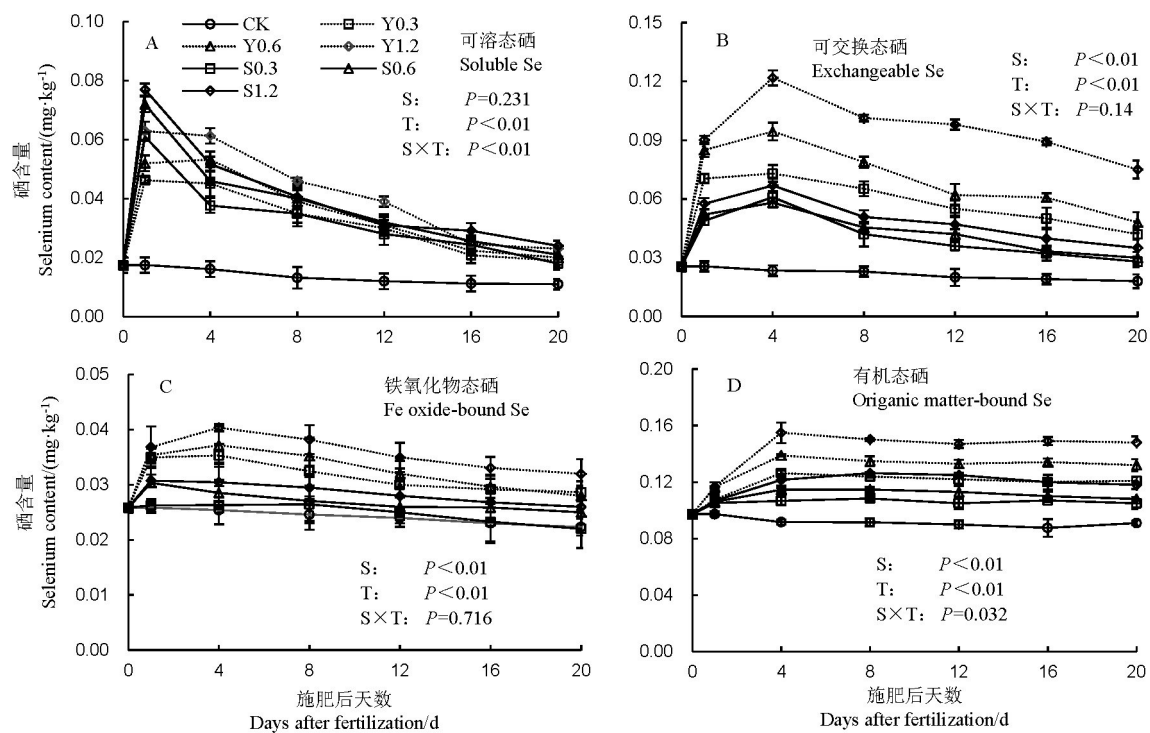
## 2 结果与分析

### 2.1 硒酸盐与亚硒酸盐在土壤中的形态及含量变化

施肥后 1 d,硒酸盐处理土壤可溶态硒含量最高,亚硒酸盐处理次之,CK 处理最低;施肥后 4~20 d 土壤水溶态硒含量呈下降趋势,在等施用量条件下,S0.3 和 Y0.3 处理较 CK 分别增加 71%和 62%;S0.6 和 Y0.6 处理较 CK 分别增加 76%和 66%;S1.2 和 Y1.2 处理较 CK 分别增加 77%和 72%(图 1-A)。

至于土壤可交换态硒含量,在灌水施肥后 0~4 d,亚硒酸盐及硒酸盐处理呈增加趋势,在等施入量条件下,S0.3 和 Y0.3 处理较 CK 分别增加 58%和 65%;S0.6 和 Y0.6 处理较 CK 分别增加 56%和 73%;S1.2 和 Y1.2 处理较 CK 分别增加 62%和 79%,施肥后 8~20 d 土壤中可交换态硒含量呈下降趋势(图 1-B)。

至于土壤铁氧化物态硒及有机态硒含量,在灌水施肥后 0~4 d,亚硒酸盐处理及硒酸盐处理呈增加趋势,其中,亚硒酸盐处理土壤中铁氧化物态硒及



S—不同价态硒；T—不同处理时间。S0.3、S0.6、S1.2 分别表示硒酸盐的用量为 0.3、0.6 和 1.2 kg/hm<sup>2</sup>；Y0.3、Y0.6 和 Y1.2 分别表示亚硒酸盐的用量为 0.3、0.6、1.2 kg/hm<sup>2</sup>。下同。

S indicate different valence selenium; T indicate different treatment time. S0.3, S0.6, S1.2 indicate selenate application levels of 0.3, 0.6 and 1.2 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. Y0.3, Y0.6 and Y1.2, Selenite application levels of 0.3, 0.6 and 1.2 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The same as in figures and tables below.

图 1 不同价态外源硒在土壤中的形态转化  
Fig. 1. Transformation of different valence selenium in soil.

有机态硒含量大于硒酸盐处理,CK 处理含量最低,施肥后 8~20 d 土壤铁氧化物态硒(图 1-C)及有机态硒(图 1-D)含量变化不显著。

2.2 不同价态外源硒的生物有效性

2.2.1 不同价态外源硒对水稻根系、茎、叶和籽粒硒含量的影响

水稻的根系、茎、叶及籽粒硒含量均随着外源硒施用量的增加而增加。在等施用量条件下,亚硒酸盐处理的根部硒含量均大于硒酸盐处理,且亚硒酸盐处理(Y1.2)根部硒含量最高,较 CK 处理提高了 195%。硒酸盐处理的叶部及籽粒硒含量均大于亚硒酸盐处理,且在硒酸盐处理最大施用量(S1.2)时叶部及籽粒硒含量最高,较 CK 提高了 176% 和 568%。茎的硒含量在不同价态硒处理间无显著差异,但均大于 CK 处理。不同价态硒及施硒量对茎无显著影响,对水稻的根、叶及籽粒硒含量均有显著影响(表 1)。

2.2.2 不同价态外源硒对水稻地上部及地下部硒累积量的影响

水稻的地上部及地下部硒累积量随着外源硒施用量的增加而增加。在等施用量条件下,亚硒酸盐处理的根部硒累积量均大于硒酸盐处理,且亚硒酸盐处理(Y1.2)根部硒累积量最高,较 CK 处理提高了 198%,而硒酸盐处理的地上部硒累积量大于亚硒酸盐处理,且在硒酸盐处理(S1.2)最大施用量时地上部硒累积量最高,较 CK 提高了 508%,不同价态硒及施硒量对水稻地上部及地下部硒累积量均有显著影响(表 2)。

2.2.3 水稻对土壤硒的吸收和转运

由表 2 可见,硒酸盐及亚硒酸盐处理的水稻根系对土壤硒的吸收系数随着施用量的增加而增加,且均大于 CK 处理,在等施硒量下比较发现硒酸盐处理均大于亚硒酸盐处理。初级转运系数以硒酸盐处理最高,CK 处理其次,亚硒酸盐处理最低,且随

表 1 不同价态硒处理下水稻根系、茎、叶和籽粒的硒含量

Table 1. Effects of Se valence on its contents in root, stem, leaf and grain of rice.

处理 Treatment	施硒量 Selenium application level / (kg · hm <sup>-2</sup> )	硒含量 Selenium content /(mg · kg <sup>-1</sup> )			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	籽粒 Grain
对照 CK	0	0.156±0.024 d	0.063±0.003 c	0.109±0.006 d	0.024±0.003 f
硒酸盐 Selenate	0.3	0.279±0.003 c	0.083±0.004 c	0.189±0.015 b	0.078±0.005 c
	0.6	0.255±0.016 c	0.116±0.006 b	0.203±0.019 b	0.106±0.002 b
	1.2	0.345±0.026 b	0.221±0.003 a	0.301±0.003 a	0.162±0.009 a
亚硒酸盐 Selenite	0.3	0.300±0.009 bc	0.067±0.011 c	0.097±0.006 d	0.046±0.002 e
	0.6	0.419±0.007 a	0.134±0.008 b	0.142±0.010 c	0.062±0.002 d
	1.2	0.460±0.025 a	0.205±0.019 a	0.143±0.006 c	0.076±0.001 c
两因素方差分析 (F 值) Two-way ANOVA (F value)					
不同价态硒(Se) Different valence of Se		101.60 *	0.88 <sup>n</sup>	339.30 *	533.21 *
施硒量(C) Selenium content		195.81 *	324.16 *	130.20 *	515.84 *
Se×C		27.12 *	4.77 <sup>n</sup>	61.25 *	103.87 *

相同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异不显著; \* 0.05 水平显著, <sup>n</sup>0.05 水平不显著。  
Common letters indicate no significant difference among treatments at 0.05 level. \* Significant difference at 0.05 level; <sup>n</sup> No significant difference at 0.05 level.

着施硒量的增加而增加,而次级转运系数,亚硒酸盐处理与 CK 处理无显著差异,硒酸盐处理最高且随着施硒量的增加而增加。

综上所述,水稻根系对土壤硒的吸收利用随着外源硒施入量的增加而增加,硒酸盐的有效性较高,且在硒酸盐处理条件下,硒由水稻的根系转运到茎叶及由茎叶转运到籽粒的能力高于亚硒酸盐处理。

2.2.4 不同价态外源硒对水稻产量及产量构成因素的影响

由表 3 可见,随着施硒量的增加,硒酸盐及亚硒酸盐处理与不施硒处理在水稻成穗数、每穗粒数、千粒重及产量上均无显著差异。在等施硒量条件下,硒酸盐处理水稻的产量构成因素及产量与亚硒酸盐

处理无显著差异,随着施硒量的增加硒酸盐处理水稻产量及其构成因素与亚硒酸盐处理的无显著差异。

3 讨论

3.1 硒酸盐与亚硒酸盐对土壤中不同形态硒含量的影响

土壤中的硒是作物吸收利用硒的主要来源,作物从土壤溶液中不断地吸收利用硒,不断将土壤中各形态硒间的平衡打破。土壤中不同形态硒施能够互相转化的。研究表明,与有机质结合的硒可经矿化作用转变为可被植物吸收利用的硒到土壤中来补充因作物吸收缺失的硒<sup>[18]</sup>。

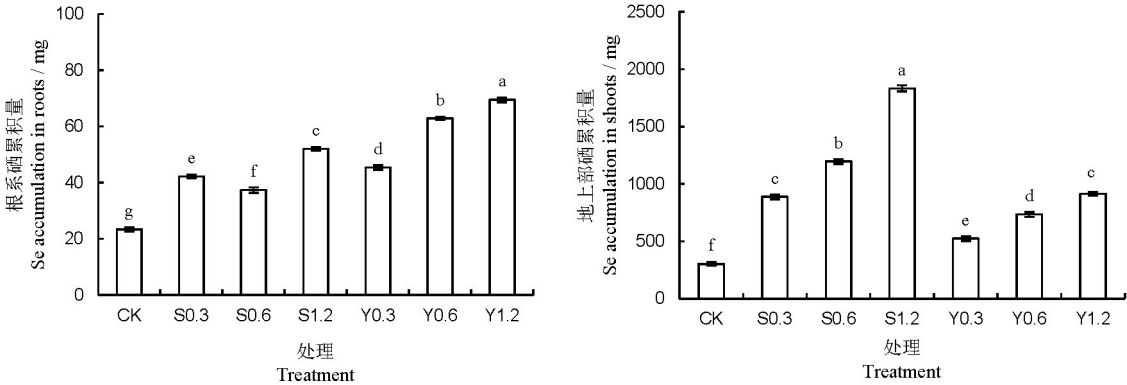


图 2 不同价态硒处理下水稻地上部及地下部硒累积量  
Fig. 2. Effects of Se valence on its accumulation in shoots and roots of rice.

表 2 不同价态硒处理下水稻对土壤硒的吸收和转运系数

Table 2. Effects of Se valence on its absorption and transport coefficients of rice.

处理	吸收系数	初级转运系数	次级转运系数
Treatment	Absorption index	Primary transport index	Secondary transport index
CK	0.581±0.009 d	0.457±0.003 c	0.350±0.007 c
S0.3	0.841±0.011 ab	0.487±0.008 c	0.575±0.006 b
S0.6	0.853±0.008 ab	0.600±0.010 b	0.693±0.004 a
S1.2	0.922±0.005 a	0.759±0.008 a	0.623±0.007 ab
Y0.3	0.717±0.003 c	0.256±0.008 e	0.317±0.006 c
Y0.6	0.800±0.009 bc	0.329±0.009 d	0.331±0.010 c
Y1.2	0.860±0.004 ab	0.365±0.008 d	0.373±0.009 c

相同小写字母表示处理间差异不显著( $P>0.05$ )。  
Common letters indicate no significant difference among treatments at 0.05 level.

表 3 不同价态硒处理下水稻产量构成因素及产量

Table 3. Effects of Se valence on yield and its components.

处理	单株成穗数	每穗粒数	千粒重	产量
Treatment	Panicle number per plant	Grain numbers per panicle	Thousand grain weight /g	Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	11.3±0.6 a	114.7±0.6 a	22.6±0.3 a	10 110±248.5 a
S0.3	11.3±0.6 a	116.3±0.6 a	22.4±0.6 a	10 179±233.8 a
S0.6	12.0±1.0 a	114.0±2.0 a	21.7±1.2 a	10 193±291.9 a
S1.2	11.3±0.6 a	117.0±1.0 a	22.4±0.2 a	10 202±242.0 a
Y0.3	11.3±0.6 a	116.0±1.0 a	22.3±1.0 a	10 084±241.2 a
Y0.6	11.3±0.6 a	114.3±1.2 a	22.9±0.2 a	10 201±312.4 a
Y1.2	11.7±0.6 a	116.3±1.5 a	21.8±0.1 a	10 200±338.0 a

相同小写字母表示处理间差异不显著( $P>0.05$ )。  
Common letters indicate no significant difference among treatments at 0.05 level.

硒在土壤中各组分间的分配是一个动态平衡的过程,在土壤中施入外源硒后破坏了土壤中原有的硒形态间的平衡。随着时间的延长在土壤中又建立新的平衡。研究表明,硒酸盐水溶液在一个月内仍有 80% 残留,而亚硒酸盐完全被沉淀物固定<sup>[19]</sup>,在无作物种植条件下外源硒酸盐在土壤中经 65 d 转化后仍有 59% 以上可溶态存在<sup>[20]</sup>。本研究发现,在种植作物的条件下,土壤中施用硒酸盐主要以可溶态硒形式存在,亚硒酸盐主要以可交换态硒形式存在,且由可交换态硒形式转化成稳定态硒,这与 Li 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致,亚硒酸盐施入土壤后易被有机质和铁氧化物吸收,施入土壤中的亚硒酸盐主要以可交换态、铁氧化物态及有机态形式存在,相反,硒酸盐不易被土壤吸附,施入土壤后其水溶性及流动性都比较高,且土壤中主要以可溶态形式存在。同时,有研究表明,土壤中有效态硒主要为可溶态硒和可交换态硒<sup>[12]</sup>,说明土壤中施用硒酸盐的生物有效性大于亚硒酸盐。

3.2 不同价态外源硒对水稻硒吸收及转运的影响

硒的形态决定了作物吸收的硒从地下部向地上

部转运的能力,且水稻吸收不同价态硒的机制有显著差异。施加亚硒酸盐 3 h 内,硒大部分积累在根部,而硒酸盐处理的植株地上部硒含量显著大于亚硒酸盐处理<sup>[21]</sup>。本研究发现,施用不同价态硒,随着施用量的增加,水稻根、茎、叶及籽粒的硒含量均增加,在等施用量的条件下,硒酸盐处理的叶片、籽粒硒含量均大于亚硒酸盐处理,而亚硒酸盐处理的根部硒含量均大于硒酸盐处理,茎部无显著差异,且亚硒酸盐处理的根部硒累积量均大于硒酸盐处理。说明施用亚硒酸盐大部分积累在水稻根部,硒酸盐处理的地上部硒累积量大于亚硒酸盐处理,造成这一现象的主要原因是水稻吸收亚硒酸盐后通过氧化还原作用和代谢作用在其根部转化为硒酸盐和其他硒化物才能向地上部转运,而水稻根部吸收亚硒酸盐的过程较亚硒酸盐转化过程快<sup>[22]</sup>。

根系吸收系数表示土壤中该元素的生物有效性<sup>[17]</sup>,值越大说明土壤中硒的有效性越高且土壤中的硒越容易被水稻吸收。本研究发现,在等量施硒条件下硒酸盐处理的根系吸收系数均大于亚硒酸盐处理,且施硒处理较不施硒处理显著增加。初级转

运系数及次级转运系数反映作物由地下部向地上部转运该元素的能力<sup>[17]</sup>。本研究发现,在等施硒条件下,硒酸盐处理的初级转运系数及次级转运系数均大于亚硒酸盐处理,造成这一现象的主要原因是植物体内转移的硒主要是硒酸盐形态<sup>[22]</sup>,说明在滴灌稻田中硒酸盐有效性高于亚硒酸盐,且进一步说明施用亚硒酸盐易积累在水稻根部且不易向地上部转运。

研究表明,在土壤-植物系统中,施硒增加了土壤有效磷、钾的含量,且会影响土壤酶活性,从而改善植物的养分环境,最终影响植物的产量<sup>[23]</sup>。本研究条件下,施硒各处理对水稻的产量及其构成的影响未达显著水平。

## 4 结论

1)施入土壤中的硒酸盐主要以可溶态硒形式存在,亚硒酸盐在土壤中主要以可交换态硒存在,而由于土壤对亚硒酸盐的吸附大于硒酸盐,因此,施入土壤中的亚硒酸盐易由有效态硒转化为稳定态硒,因此,造成亚硒酸盐生物有效性低于硒酸盐。

2)由于作物对不同价态硒的吸收及转运机制不同,施用亚硒酸盐时大部分硒累积在水稻根部,相反硒酸盐易由水稻地下部转运至地上部,因此,在农业生产中建议选用硒酸盐作为硒肥使用。

## 参考文献:

- [1] 李莉萍,王军. 土壤-植物系统中硒的赋存形态及其分析方法研究进展. *热带农业科学*, 2009, 29(2): 58-66.  
Li L P, Wang J. Advances on existing form of analysis methods for selenium in soil-plant system. *Chin J Trop Agric*, 2009, 29(2): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵中秋,郑海雷,张春光,马建华. 土壤硒及其与植物硒营养的关系. *生态学杂志*, 2003, 22(1): 22-25.  
Zhao Z Q, Zheng H L, Zhang C G, Ma J H. Advance in the studies on selenium in soil and selenium biological effect. *Chin J Ecol*, 2003, 22(1): 22-25. (in Chinese with English abstract)
- [3] Sharma S, Bansal A, Dhillon S K, Dhillon K S. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plant Soil*, 2010, 329(1-2): 339-348.
- [4] Cao Z H, Wang X C, Yao D H, Zhang X L, Wong M H. Selenium geochemistry of paddy soils in Yangtze River Delta. *Environ Int*, 2001, 26(6): 335-339.
- [5] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake. *Brit J Nutr*, 2008, 100(2): 254-268.
- [6] Zhu Y G, Pilonismitis E A, Zhao F J, Williams P N, Meharg A A. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. *Trends Plant Sci*, 2009, 14(8): 436-442.
- [7] Miguel N A, Carmen C V. Selenium in food and the human body: A review. *Sci Total Environ*, 2008, 400(1-3): 115-141.
- [8] Haug A, Graham R D, Christophersen O A, Lyons G H. How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food. *Microb Ecol Health Dis*, 2007, 19(4): 209-228.
- [9] Keskinen R, Turakainen M, Hartikainen H. Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass. *Plant Soil*, 2010, 333(1): 301-313.
- [10] Harada T, Takahashi Y. Origin of the difference in the distribution behavior of tellurium and selenium in a soil - water system. *Geochem Cosmo Chim Acta*, 2008, 72(5): 1281-1294.
- [11] Banuelos G S, Lin Z Q. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: A greenhouse feasibility study. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2005, 62(3): 309-316.
- [12] 瞿建国,徐伯兴,龚书椿. 氢化物发生-无色散原子荧光光度法测定土壤中有效态硒和总硒. *土壤通报*, 1998, 29(1): 47-53.  
Qu J G, Xu B X, Gong S C. Determination of bio-available and total selenium in soil by hydride generation non-dispersive AFS. *Chin J Soil Sci*, 1998, 29(1): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- [13] Gangadhara, Kumar P R, Prakash V. The structure functional catalytic activity of rice brain lipase in the presence of selenium and lithium. *Europ Food Res Technol*, 2010, 230(4): 551-557.
- [14] 周鑫斌,施卫明,杨林章. 水稻子粒硒累积机制研究. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 503-507.  
Zhou X B, Shi W M, Yang L Z. Study on mechanisms of selenium accumulation in rice grains. *Plant Nutr Fert Sci*, 2008, 14(3): 503-507. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王松山,吴雄平,梁东丽,薛瑞玲,鲍俊丹. 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. *环境科学学报*, 2010, 30(12): 2499-2505.  
Wang S S, Wu X P, Liang D L, Xue R L, Bao J D. Transformation and bioavailability for Pak choi (*Brassica chinensis*) of different forms of selenium added to calcareous soil. *Acta Sci Circum*, 2010, 30(12): 2499-2505. (in Chinese with English abstract)
- [16] 于振,李建科,李梦颖,马倩倩,黄瑞蕊,何晓叶,李佳. 食品中微量硒测定方法研究进展. *食品工业科技*, 2012, 33(18): 371-377.  
Yu Z, Li J K, Li M Y, Ma Q Q, Huang R R, He X Y, Li J. Research progress in determination of trace selenium in food. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(18): 371-377. (in Chinese with English abstract)

- [17] 姜超强, 沈嘉, 祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运. 应用生态学报, 2015, 26(3): 809-816.
- Jiang C Q, Sheng J, Zu C L. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soils. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26(3): 809-816. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究. 杨陵: 西北农林科技大学, 2012.
- Wang S S. Fractionation and speciation of selenium in soil and its bioavailability. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [19] Fujita M, Ike M, Hashimoto R, Nakagawa T, Yamaguchi K, Soda S O. Characterizing kinetic of transport and transformation of selenium in water-sediment microcosm free from selenium contamination using a simple mathematical model. *Chemosphere*, 2005, 58(6): 705-714.
- [20] Munier-Lamy C, Deneux-Mustin S, Mustin C, Merlet D, Berthelin J, Leyval C. Selenium bioavailability and uptake as affected by four different plants in a loamy clay soil with particular attention to mycorrhizae inoculated ryegrass. *J Envir Radioac*, 2007, 97(2-3): 148-158.
- [21] 黄青青. 水稻和小麦对硒的吸收、转运及形态转化机制. 北京: 中国农业大学, 2015.
- Huang Q Q. Mechanisms of selenium uptake, translocation and speciation transformation in rice and wheat. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [22] Sun G X, Liu X, Williams P N, Zhu Y G. Distribution and translocation of selenium from soil to grain and its speciation in paddy rice (*Oryza sativa* L.). *Environ Sci Technol*, 2010, 44(17): 6706-6711.
- [23] 董广辉, 陈利军, 武志杰. 植物硒素营养及其机理研究进展. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1487-1490.
- Dong G H, Chen L J, Wu Z J. Research advances in plant selenium nutrition and its mechanism. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(11): 1487-1490. (in Chinese with English abstract)
- [24] Li J, Liang D, Qin S, Feng P, Wu X. Effects of selenite and selenate application on growth and shoot selenium accumulation of pak choi (*Brassica chinensis* L.) during successive planting conditions. *Environ Sci Poll Res*, 2015, 22(14): 11076-86.