

李鸣凤, 邓小芳, 付小丽, 等. 不同硒源对小麦生长、硒吸收利用以及玉米后效的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 1-7.

LI Ming-feng, DENG Xiao-fang, FU Xiao-li, et al. Effects of different selenium sources on wheat growth, selenium uptake and utilization and the aftereffects on maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 1-7.

不同硒源对小麦生长、硒吸收利用以及玉米后效的影响

李鸣凤^{1,2}, 邓小芳^{1,2}, 付小丽¹, 段碧辉³, 张海清^{1,2}, 赵竹青^{1,2}, 刘新伟^{1,2*}

(1.华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2.新型肥料湖北省工程实验中心, 武汉 430070; 3.湖北省富硒产业研究院, 武汉 430034)

摘要:湖北恩施蕴藏有丰富硒矿资源。为了明确植物对硒矿及土壤中几种常见硒形态的吸收利用差异,通过土培试验,研究了不同硒源(亚硒酸盐、硒酸盐、硒矿及硒粉)对小麦生长及硒吸收分配的影响,并分析了其对小麦后茬作物玉米的后效。结果表明,施用硒酸盐、亚硒酸盐及硒粉对小麦各部位生物量无显著影响,施用硒矿显著增加了小麦生物量,其增幅可达11.56%。小麦对不同硒源的吸收能力为硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿>硒粉,不同硒源处理下硒向小麦地上部的转移能力为硒酸盐>硒矿>硒粉>亚硒酸盐。施用硒矿、亚硒酸盐、硒酸盐以及硒粉后小麦籽粒中硒含量的比例为1:2.95:19.19:0.15,其后效在玉米地上部硒含量的比例为1:1.96:6.44:0.07,由此表明硒矿在玉米后效上与亚硒酸盐和硒酸盐处理的差距显著缩小,硒粉则难以被作物吸收利用。总的来看,硒矿对作物生长的改善能力最强,而且具有相对持久的后效。

关键词:小麦;玉米;硒酸盐;亚硒酸盐;硒矿;硒粉窗体顶端

中图分类号:S512.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)01-0001-07 doi:10.11654/jaes.2016-0968

Effects of different selenium sources on wheat growth, selenium uptake and utilization and the aftereffects on maize

LI Ming-feng^{1,2}, DENG Xiao-fang^{1,2}, FU Xiao-li¹, DUAN Bi-hui³, ZHANG Hai-qing^{1,2}, ZHAO Zhu-qing^{1,2}, LIU Xin-wei^{1,2*}

(1. Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Institute of Selenium-rich Industry, Wuhan 430034, China)

Abstract: Human dietary Se intake is largely governed by Se concentrations in plants. In order to clarify the difference of plants uptake and utilization on selenium ore and the other common forms of Se in the soil, we studied the growth, Se uptake and utilization of wheat and analyzed its aftereffect on maize between different sources of Se (selenite; selenate; selenium ore; selenium powder) based on pot experiment. The results showed that the application of selenate, selenite and selenium powder had no obvious effect on biomass of wheat, but selenium ore significantly increased biomass of wheat by 11.56%. The uptake capacity of different selenium sources by wheat followed the sequence of selenate>selenite>selenium ore>selenium powder. The ability of transport Se in wheat from roots to shoots showed a tendency of selenate>selenium ore>selenium powder>selenite. The content of Se in wheat grain had the ratio of 1:2.95:19.19:0.15 when selenate, selenite, selenium ore, selenium powder were applied, respectively the aftereffects of selenium content in shoots of maize had ratio of 1:1.96:6.44:0.07, which suggested that the aftereffect of different selenium sources on maize followed the sequence of selenate>selenite>selenium ore>selenium powder, and the aftereffect of selenium on maize between the selenium ore and selenite, selenate narrowed significantly. Selenium powder was difficult to be absorbed by wheat and maize. In conclusion, selenium ore has the strongest ability to improve crop growth and has a relatively long aftereffect.

Keywords: wheat (*Triticum aestivum* L.); maize (*Zea mays* L.); selenite; selenate; selenium ore; selenium powder

收稿日期: 2016-07-26

作者简介: 李鸣凤(1991—),女,博士研究生,从事植物硒营养特性研究。E-mail: mingfengL0124@163.com

* 通信作者: 刘新伟 E-mail: jiangcunzhe@163.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662016QD015); 江汉平原主要作物富硒施肥体系及富硒产品加工关键技术研究 XKJ201501-21 Project supported: The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2662016QD015); The Rich Selenium Fertilization System of the Main Staple Crop in Jianghan Plain and Key Technology Research of Rich Selenium Product Processing(XKJ201501-21)

硒是人和动物必需的微量营养元素^[1],在地壳中丰度较低,小于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2]。世界范围内,共有 0.3~1 亿人处于缺硒状态^[3]。在中国硒分布极其不均匀,缺硒地区高达 15 个省份,约 1 亿人口膳食中硒含量不足^[4]。研究表明,在低硒的状态下,大骨节病、帕金森以及癫痫等疾病的发病率显著上升^[5-6]。缺硒多发生在以谷物类为主食的人中,其主要原因在于相比海鲜坚果等食物,谷物类作物含硒量较低^[7]。植物中的有机硒是人们获取硒的主要来源^[8],因此通过提高农作物硒含量来增加人体硒摄入量显得尤为重要^[9]。中国低硒地区总膳食摄入硒约 70% 来源于谷类及谷类制品^[10],而小麦、玉米是中国人的主粮,且小麦是硒积累能力最强的谷类^[11]。

植物硒含量主要取决于土壤硒的浓度^[12],同时植物对硒的吸收还与硒的形态以及土壤的类型等有关^[13-14]。植物吸收硒的主要形态为硒酸盐和亚硒酸盐,硒酸盐在土壤中迁移转化能力强,不易被土壤吸附固定,植物对硒酸盐的吸收利用效率高^[15-17]。植物吸收硒酸盐后,迅速将硒从根部向地上部转移^[18],因此在碱性或干旱土壤中易造成硒中毒。研究显示,相比硒酸盐,亚硒酸盐被植物吸收利用率较低,原因在于亚硒酸盐主要存在于酸性土壤中,易被土壤中粘土矿物和胶体尤其是铁铝氧化物等吸附固定^[19]。与硒酸盐不同的是,亚硒酸盐更多的存在于植物根部^[20]。研究表明,施硒后黑麦草^[21]、油菜^[22]和高粱^[23]等的抗氧化活性增强,施硒促进生菜的生物量增加 14%^[24],马铃薯的块茎产量增加 40%^[25]。因此,施硒不仅增加植物硒含量,还增强植物的抗氧化活性,促进植物的生长发育。

现有关于硒的研究主要集中在硒酸盐和亚硒酸盐^[26-28],本试验将增加硒矿和硒粉作为研究对象。朱建明等^[29]研究表明,现阶段已发现 107 种硒的独立矿物,主要以残渣态和有机结合态存在。在湖北恩施境内目前已探明硒储量为 74 t,恩施被誉为“世界硒都”^[30]。本试验以恩施硒矿为研究对象之一,分析其对小麦和玉米硒含量的影响,进而为恩施硒矿的合理开发利用提供理论依据。硒粉是电池原料,工业生产废料,植物难以直接吸收利用。研究表明,硒粉在一定条件下可以转换为高价态的硒酸盐、亚硒酸盐被植物吸收利

用^[31]。研究不同硒源对小麦生长、硒吸收利用以及玉米后效的影响,对于有效开发硒资源以及减少环境污染具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 小麦试验

试验地点为湖北省华中农业大学盆栽场,试验土壤为潮土,质地为壤土,将土风干,过 2 mm 筛,取 8 kg 土与基肥拌匀,装入直径 25 cm、高 27 cm 的塑料桶中,桶外套黑色袋子。其基本理化性质如表 1。

小麦品种为“郑麦 9023”,试验施硒量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,每盆施用硒 40 mg。硒源为:硒酸钠(分析纯)、亚硒酸钠(分析纯)、硒粉(分析纯)和硒矿(硒含量 $4\,054.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。每个处理 4 个重复。其他肥料每盆施用量为 N 2.4 g、 P_2O_5 1.6 g、 K_2O 2.0 g,分别以硫酸铵、磷酸二氢钾以及氯化钾肥料为肥源。硒粉和硒矿先用少量土混匀,再与盆栽土混匀,其他肥料配成溶液浇入土壤,搅拌均匀。小麦籽粒先经 0.5% 的次氯酸钠(NaClO)消毒 15 min,然后用去离子水洗涤 5 次,每次 10 min,冲洗干净的种子在 25 ℃ 的黑暗环境中用去离子水浸泡 24 h 催芽,露白,选取饱满的种子进行直播,每盆直播 10 粒,每盆定苗 2 株,试验期间统一管理。

1.2 玉米试验

玉米品种为“花甜糯四号”,为小麦试验的后茬作物。将每盆土壤分别倒出,磨碎,过筛,与基肥混匀,每盆肥料的施用量为 N 2.4 g、 P_2O_5 1.6 g、 K_2O 2.0 g,分别以硫酸铵、磷酸二氢钾以及氯化钾肥料为肥源。玉米种子经 0.5% 的次氯酸钠(NaClO)消毒 15 min,然后用去离子水洗涤 5 次,每次 10 min,冲洗干净的种子在 25 ℃ 的黑暗环境中用去离子水浸泡 24 h 催芽,露白,选取种子饱满的进行直播,每盆直播 10 粒,每盆定苗 2 株,试验期间统一管理,培育 30 d。

1.3 测定指标以及测定方法

1.3.1 植株生物量和产量的测定

取收获的小麦植株根和茎叶分别于 105 ℃ 杀青 30 min,然后于 65 ℃ 烘箱内烘干至恒重,称量干重,磨碎,装入自封袋,待测。小麦成熟期统计穗粒数、成

表 1 土壤的基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

pH(water:soil=2.5:1)	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全硒/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
7.80	18.42	54.92	4.61	113.00	0.28

穗数和千粒重,计产。

取收获的玉米植株根和茎叶分别于 105 ℃下杀青 30 min,然后于 65 ℃烘箱内烘干至恒重,称量干重,磨碎,装入自封袋,待测。

1.3.2 植株硒含量的测定

取小麦的根、茎叶、颖壳、籽粒以及玉米的根、茎叶和籽粒分别测定硒含量。测定过程中所用试剂均为优级纯,硒含量采用 $\text{HNO}_3+\text{HClO}_4$ 混合酸(体积比为 4:1)消煮,6 mol·L⁻¹ HCl 还原,原子荧光光谱法测定。

准确称取磨碎样品,根约 0.1 g,地上部约 0.3 g(精确到 0.000 1 g)于 50 mL 锥形瓶中,加 $\text{HNO}_3+\text{HClO}_4$ 混合酸(体积比为 4:1)10 mL,摇匀后放置过夜。用电热板 160 ℃加热并及时补加混酸,至溶液清亮无色并伴有白烟出现时,继续加热至溶液剩余体积 2 mL 左右时,从电热板上取下冷却,加入 6 mol·L⁻¹ 的盐酸 10 mL,再次加热至溶液变为清亮并伴有白烟出现时取下。冷却并转移至 25 mL 容量瓶中,原子荧光光谱法测定。

1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS18 软件 ANOVA 方差显著性分析和 LSD 检验,采用 Excel 制图。

2 结果与分析

2.1 不同硒源对成熟期小麦各部位生物量的影响

由表 2 可知,相比对照,施用外源硒后小麦各部

分生物量的增加幅度为硒矿>硒粉>亚硒酸盐>硒酸盐,施用硒粉、亚硒酸盐、硒酸盐后小麦的茎、颖壳以及籽粒的生物量之间没有显著差异。施用硒矿后,小麦植物根、茎叶以及籽粒的干重显著增加 17.80%、14.17%、10.10%。这说明,适量硒矿可以提高小麦的生物量,其他外源硒对小麦的生物量无明显影响。

2.2 不同硒源对小麦产量及其构成因子的影响

由表 3 可知,相比对照,施用硒粉、亚硒酸盐、硒酸盐以及硒矿后,小麦的成穗数、千粒重以及产量之间无显著差异。施用亚硒酸盐和硒酸盐后,小麦的产量略微降低 0.39%和 0.78%,施用硒粉和硒矿后,小麦产量增加 3.50%和 10.49%,但这种降低或增加均未达到显著水平。相比对照,施用硒矿后,小麦的穗粒数显著增加 15.49%,成穗数增加 3.52%,千粒重增加 2.71%,说明硒矿主要增加小麦的穗粒数来提高小麦的产量。总的来看,不同外源硒对小麦的产量无显著影响。

2.3 不同硒源对小麦根、茎叶、颖壳和籽粒硒含量影响

由于硒的存在形态是影响植物吸收硒含量的重要因素,本试验施用不同硒源后对小麦不同部位的硒含量进行了测定。结果表明施用不同外源硒后,小麦各部位硒含量均有一定的增加,其中小麦硒含量为硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿>硒粉(表 4)。施用硒酸盐后,小麦籽粒硒含量高达 36.07 mg·kg⁻¹,相比施用硒矿,小

表 2 不同硒源对小麦根、茎叶、颖壳和籽粒生物量的影响

Table 2 Biomass of wheat roots, stems, chaff and grain of different selenium sources additions to soil

硒源	植株生物量/g·株 ⁻¹	不同部位生物量/g·株 ⁻¹			
		根	茎叶	颖壳	籽粒
对照	11.5±0.18b	0.73±0.01c	5.01±0.21b	1.60±0.07a	4.16±0.12b
硒粉	11.75±0.45b	0.81±0.04b	5.16±0.24b	1.67±0.06a	4.42±0.18ab
亚硒酸盐	11.97±0.24b	0.74±0.04c	5.14±0.27b	1.70±0.04a	4.39±0.12ab
硒酸盐	11.49±0.43b	0.70±0.03c	4.97±0.20b	1.60±0.09a	4.22±0.17b
硒矿	12.83±0.48a	0.86±0.02a	5.72±0.33a	1.66±0.10a	4.58±0.09a

注:同列数值后不同字母代表 P<0.05 下差异显著。下同。

Note: Numbers followed by different letters in the same column differ significantly at P<0.05. The same below.

表 3 不同硒源对小麦产量及其构成因子的影响

Table 3 The effect of different selenium source additions to soil on wheat yield and its components

硒源	产量/g·株 ⁻¹	穗粒数/粒·穗 ⁻¹	成穗数/穗·株 ⁻¹	千粒重/g·1000 粒 ⁻¹
对照	5.15±0.20ab	32.15±1.37b	4.83±0.76a	37.58±0.99a
硒粉	5.33±0.28ab	34.05±2.13ab	5.17±0.29a	38.45±0.55a
亚硒酸盐	5.13±0.20ab	31.84±2.40b	4.83±0.29a	37.12±1.54a
硒酸盐	5.11±0.21b	32.27±2.38b	4.83±0.28a	36.10±1.08a
硒矿	5.69±0.47a	37.13±2.95a	5.00±0.50a	38.60±1.98a

表 4 不同硒源对小麦根、茎叶、颖壳和籽粒硒含量的影响

Table 4 The effect of different selenium source additions to soil on wheat roots ,stems ,chaff and grain selenium content

硒源	不同部位硒含量/mg·kg ⁻¹			
	根	茎叶	颖壳	籽粒
对照	0.04±0.03c	0.08±0.07c	0.01±0.01d	0.00±0.00d
硒粉	0.61±0.11c	0.27±0.05c	0.36±0.06d	0.28±0.26cd
亚硒酸盐	19.52±1.081b	3.61±0.55b	3.27±0.43b	5.55±0.53b
硒酸盐	28.88±1.47a	30.50±1.48a	28.93±0.61a	36.07±2.05a
硒矿	1.38±0.38c	1.07±0.24c	1.12±0.18c	1.88±0.21c

麦籽粒硒含量增加了 19.19 倍,表明硒酸盐易被小麦吸收利用。施用硒酸盐后,各部位硒含量为籽粒>茎叶>颖壳>根,表明硒酸盐易向籽粒富集;而施用亚硒酸盐后,各部位的硒含量为根>籽粒>茎叶>颖壳,表明亚硒酸盐易滞留于小麦根部。施用硒矿后,小麦根、茎叶硒含量略微增加,没有达到显著水平,小麦颖壳和籽粒的硒显著增加,表明硒矿易向小麦籽粒中富集;而施用硒粉后,小麦根、茎叶、颖壳和籽粒的硒含量均无明显变化,表明硒粉难以被小麦直接吸收利用。

2.4 不同硒源对小麦根、茎叶、颖壳和籽粒硒分配比例的影响

在对照中,小麦各部位硒含量均较低,可忽略不计(表 4)。由于硒在植物各部位的分布与硒源的形态有一定的关系,本试验对小麦各部位硒累积量进行了测定。结果表明(图 1):小麦籽粒中硒分配比例为硒矿>硒酸盐>亚硒酸盐>硒粉,表明施用硒矿和硒酸盐后,植物硒主要存在于小麦的籽粒,其中硒矿在籽粒中的分配比例高达 48.57%;小麦茎叶中硒累积量的百分比为硒酸盐>硒粉>硒矿>亚硒酸盐,表明施用硒酸盐后硒较易向小麦地上部运输;小麦根中硒累积量的百分比为亚硒酸盐>硒粉>硒矿>硒酸盐,其中亚硒酸盐在小麦根部的分配比例高达 23.09%,表明亚硒酸盐易滞留小麦根部。

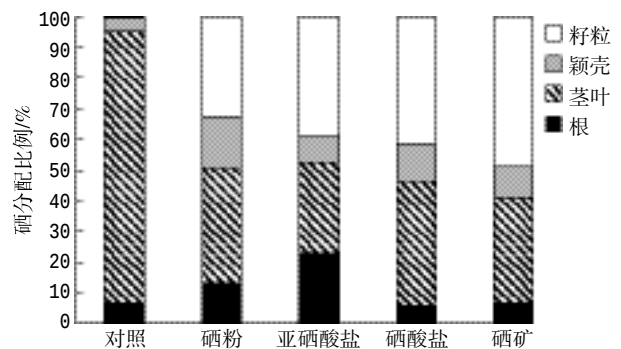


图 1 不同硒源对小麦根、茎叶、颖壳和籽粒硒分配比例的影响
Figure 1 The effect of different selenium source additions to soil on the cumulative percentage of selenium in wheat roots , stems ,chaff and grain

2.5 不同硒源对后茬苗期玉米生物量和硒含量的影响

由于不同形态的硒源在土壤中的后效性不同,笔者对不同硒源在玉米上的后效性进行了研究。结果表明,施用四种不同形态的外源硒后,后茬玉米地上部和根部生物量均无明显变化(表 5)。施用亚硒酸盐、硒酸盐和硒矿对提高玉米硒含量均有一定的后效,其中硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿,说明硒酸盐在土壤中有较强的有效性。施用亚硒酸盐、硒酸盐和硒矿后,玉米地上部与根部硒含量的比例分别为 0.67、1.52 和 2.19,表明不同硒源向玉米地上部转移能力为硒矿>硒酸盐>亚硒酸盐。

表 5 不同硒源对玉米生物量以及硒含量的后效影响

Table 5 The aftereffects of different selenium source additions to soil on corn biomass and selenium content

硒源	生物量/g·株 ⁻¹		硒含量/mg·kg ⁻¹	
	地上部	根	地上部	根
对照	1.04±0.08a	0.50±0.04a	0.00±0.01d	0.00±0.01d
硒粉	1.06±0.12a	0.51±0.02a	0.13±0.08d	0.05±0.08d
亚硒酸盐	0.99±0.11a	0.49±0.03a	3.65±0.47b	5.45±0.50b
硒酸盐	1.05±0.14a	0.48±0.03a	11.97±0.33a	7.85±0.40a
硒矿	1.13±0.16a	0.50±0.03a	1.86±0.61c	0.85±0.18c

3 讨论

3.1 硒源对小麦生物量以及产量的影响

王永勤等^[32]研究表明,硒对于植物生物量等表现为低浓度促进,高浓度抑制。施硒量小于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,促进了小白菜和小麦等多种作物的生长^[23-34]。Liu 等^[35]研究表明,施用 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的亚硒酸盐后小麦的根部和芽的生物量均有一定程度的降低。本试验中硒酸盐和亚硒酸盐显著促进小麦和玉米硒含量(表4、表5),施用亚硒酸盐后小麦以及后茬玉米根部和地上部生物量略微下降,无显著差异,然而施用硒酸盐后小麦和后茬玉米的生物量无明显变化。施用硒矿显著增加小麦生物量 11.56%,主要表现为增加了小麦每穗粒数,从而使产量增幅达 10.48%。其可能原因在于相比硒酸盐和亚硒酸盐,小麦对硒矿的吸收利用较低,适量的硒可通过提高土壤有效磷钾来改善土壤肥力,促进植物生物量的累积^[36];其次硒矿中可能含有其他矿物质促进了小麦的生长,对此有待于进一步研究。施用硒粉后,小麦和后茬玉米的生物量无显著差异(表2)。

Lyons 等^[37]研究表明,施用亚硒酸盐后,油菜单粒重量无明显变化,然而油菜单株产量显著增加。施用硒矿后小麦生物量以及每穗粒数增加的原因可能在于低浓度硒促进了植株的光合以及抗氧化活性^[31],同时 Wang 等^[38]研究表明,施硒后水稻的抗氧化活性增加了 90%,在小麦中需要进一步研究来证实这种现象。Turakainen 等^[25]研究表明,施用硒酸盐后促进了马铃薯对碳水化合物的累积从而增加了马铃薯产量。Ekanayake 等^[39]研究表明,施用亚硒酸盐扁豆的产量显著增加,而施用硒酸盐后,扁豆的产量略微上升,无显著差异。本研究中施用亚硒酸盐、硒酸盐以及硒粉后小麦的产量、成穗数以及千粒重均无明显变化。

3.2 硒源对小麦根、茎叶、颖壳和籽粒硒含量以及分配比例影响

Kikkert 等^[40]研究表明,小麦吸收亚硒酸盐的速率高于硒酸盐的约 100 倍。Huang 等^[41]研究表明,施用硒酸盐和亚硒酸盐后水稻各部位的硒浓度相似。然而 Liu 等^[35]研究表明,在水培试验中小麦吸收硒酸盐的能力远大于吸收亚硒酸盐,施用硒酸盐后小麦地上部硒含量是施用亚硒酸盐后硒含量的 16~50.2 倍,而根部则是 2.7~13.8 倍。本试验也验证了小麦吸收硒酸盐的能力显著大于吸收亚硒酸盐的能力,施用硒酸盐后,小麦根、茎叶、颖壳以及籽粒的硒含量分别是施用

亚硒酸盐后的 1.47、8.45、8.85、6.50 倍(表4)。在不同的研究中硒酸盐与亚硒酸盐的相对吸收速率变化的原因可能在于土培与水培以及不同类型土壤对不同形态硒的吸附固定量不同。小麦对不同形态硒的吸收能力为硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿>硒粉。相比对照,施用硒酸盐和亚硒酸盐后,小麦各部位的硒含量均显著上升。施用硒矿后,小麦的颖壳和籽粒的硒含量显著增加,而施用硒粉后小麦各部位硒含量均无明显变化。这表明硒矿的有效硒含量较低,而硒粉中的硒小麦不能直接吸收利用。

植物吸收硒酸盐后迅速运转转移到地上部,而吸收亚硒酸盐后则更多地保留在根部^[17,20]。陈思杨等^[42]研究表明,硒酸盐处理下水稻中的硒转移能力为亚硒酸盐的 10.1 倍。刘新伟等^[43]研究表明,硒酸盐处理下的小麦硒转移能力为亚硒酸盐的 7.5~18.1 倍。在本试验中,施用硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿以及硒粉后小麦根中硒累积的百分比分别为 5.45%、23.1%、6.75% 以及 12.93%,由此表明在小麦中硒的转移能力为硒酸盐>硒矿>硒粉>亚硒酸盐。值得注意的是本研究中施硒量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比其他研究施硒量偏高,主要原因在于大量关于硒的研究集中在硒酸盐和亚硒酸盐,硒的有效性较高,而本研究中新增硒源为硒矿和硒粉,其硒的形态主要为缓效态或无效态,硒的吸收利用程度低。

3.3 硒源对后茬苗期玉米生物量和硒含量的影响

研究表明,硒肥施入土壤后其当季利用率仅为 5%~30%,还有 70%~90% 的硒残留于土壤中^[44]。在小麦玉米轮作中,施用硒酸盐、亚硒酸盐后,后茬作物玉米地上部和根部的硒含量显著增加(表5),小麦硒含量为硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿>硒粉,除硒粉外,不同的外源硒均可以显著提高后茬玉米硒含量,表明施用外源硒后,土壤中的硒可作为长期的硒源供植物吸收利用。值得注意的是,硒矿、亚硒酸盐、硒酸盐以及硒粉在小麦籽粒中硒含量的比例为 1:2.95:19.19:0.15,在玉米地上部硒含量的比例为 1:1.96:6.44:0.07,表明硒矿在玉米中的有效性增强,可能由于土壤因素以及根际微生物等作用影响了硒矿中硒的形态^[45]。施用硒粉后后茬玉米的硒含量无明显变化。

4 结论

(1)施用硒酸盐、亚硒酸盐及硒粉对小麦各部位生物量及产量无显著影响,施用硒矿显著提升了小麦生物量,其增幅可达 11.56%。同时,施用硒矿显著提

升了小麦穗粒数。

(2)小麦对不同形态硒的吸收能力为硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿>硒粉, 硒酸盐和亚硒酸盐均能显著增加小麦各部位硒含量, 硒矿主要增加小麦颖壳和籽粒硒含量, 硒粉中的硒为无效态硒, 小麦不能直接吸收利用。

(3)施用硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿以及硒粉后小麦根中硒分配比例分别为 5.45%、23.1%、6.75% 以及 12.93%, 表明小麦对硒的转移能力为硒酸盐>硒矿>硒粉>亚硒酸盐。

(4)不同外源硒对后茬作物玉米的有效性为硒酸盐>亚硒酸盐>硒矿>硒粉, 硒矿、亚硒酸盐、硒酸盐以及硒粉在小麦籽粒中硒含量的比例为 1:2.95:19.19:0.15, 其在玉米地上部硒含量的比例为 1:1.96:6.44:0.07, 表明硒酸盐和亚硒酸盐具有良好的后效性, 而硒矿在玉米中的相对有效性增强。

参考文献:

- [1] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. *Science*, 1973, 179(4073): 588-590.
- [2] Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants[M]. CRC Press.
- [3] Combs G F. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5): 517-547.
- [4] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
GUO Yu. Geochemistry of selenium in Enshi area and experimental study of selenium-enriched crop cultivation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [5] Fairweather-Tait S J, Bao Y, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants and Redox Signaling*, 2011, 14(7): 1337-1383.
- [6] 吕瑶瑶, 余涛, 杨忠芳, 等. 大骨节病区硒元素分布的调控机理研究: 以四川省阿坝地区为例[J]. *环境化学*, 2012, 31(7): 935-944.
LU Yao-yao, YU Tao, YANG Zhong-fang, et al. The regulation mechanism of selenium distribution in Kaschin-Beck disease area: A case study in Aba area, Sichuan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(7): 935-944.
- [7] Rayman M P. Selenium and human health[J]. *The Lancet*, 2012, 379(9822): 1256-1268.
- [8] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake[J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 100(2): 254-268.
- [9] Zhang M, Tang S, Huang X, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 107: 39-45.
- [10] Hawkesford M J, Zhao F J. Strategies for increasing the selenium content of wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3): 282-292.
- [11] Lee S, Woodard H J, Doolittle J J. Effect of phosphate and sulfate fertilizers on selenium uptake by wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(5): 696-704.
- [12] Durán P, Acuña J J, Jorquera M A, et al. Enhanced selenium content in wheat grain by co-inoculation of selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi: A preliminary study as a potential Se biofortification strategy[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 275-280.
- [13] Renkema H, Koopmans A, Kersbergen L, et al. The effect of transpiration on selenium uptake and mobility in durum wheat and spring canola [J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1/2): 239-250.
- [14] Zhao C, Ren J, Xue C, et al. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277(1/2): 197-206.
- [15] Banuelos G S, Lin Z Q. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: A greenhouse feasibility study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 62(3): 309-316.
- [16] Keskinen R, Turakainen M, Hartikainen H. Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 301-313.
- [17] Panfili F, Manceau A, Sarret G, et al. The effect of phytostabilization on Zn speciation in a dredged contaminated sediment using scanning electron microscopy, X-ray fluorescence, EXAFS spectroscopy, and principal components analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(9): 2265-2284.
- [18] Sors T G, Ellis D R, Salt D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants[J]. *Photosynthesis Research*, 2005, 86(3): 373-389.
- [19] Barrow N J, Whelan B R. Testing a mechanistic model VIII: The effects of time and temperature of incubation on the sorption and subsequent desorption of selenite and selenate by a soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1989, 40(1): 29-37.
- [20] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92-102.
- [21] Smrkolij P, Stibilj V, Kreft I, et al. Selenium species in buckwheat cultivated with foliar addition of Se(VI) and various levels of UV-B radiation[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(4): 675-681.
- [22] Lyons G H, Genc Y, Soole K, et al. Selenium increases seed production in Brassica[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 73-80.
- [23] Djanaguiraman M, Prasad P V V, Seppanen M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 999-1007.
- [24] Xue T, Hartikainen H, Piironen V. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(1): 55-61.
- [25] Turakainen M, Hartikainen H, Seppanen M M. Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(17): 5378-5382.

- [26] Di Gregorio S, Lampis S, Malorgio F, et al. Brassica juncea can improve selenite and selenate abatement in selenium contaminated soils through the aid of its rhizospheric bacterial population[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285(1/2): 233-244.
- [27] Li J, Liang D, Qin S, et al. Effects of selenite and selenate application on growth and shoot selenium accumulation of pak choi (*Brassica chinensis* L.) during successive planting conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(14): 11076-11086.
- [28] 刘新伟, 段碧辉, 赵小虎, 等. 外源四价硒条件下硫对小麦硒吸收的影响机制[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(2): 241-250.
LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, ZHAO Xiao-hu, et al. Effects of sulfur on selenium uptake in wheat and its mechanism when amended with selenite[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(2): 241-250.
- [29] 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.
ZHU Jian-ming, LIANG Xiao-bing, LING Hong-wen, et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(1): 75-81.
- [30] 于勤勤. 恩施富硒区硒元素迁移转化规律及开发研究[D]. 合肥工业大学, 2009.
YU Qin-qin. Developmental research and migrating transforming law of selenium element in the rich selenium areas of Enshi[D]. Hefei University of Technology, 2009.
- [31] 赵中秋, 郑海雷, 张春光, 等. 土壤硒及其与植物硒营养的关系[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(1): 22-25.
ZHAO Zhong-qiu, ZHENG Hai-lei, ZHANG Chun-guang, et al. Advances in the studies on selenium in soil and selenium biological effect[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1): 22-25.
- [32] 王永勤, 曹家树, 李建华, 等. 施硒对大蒜产量和含硒量的影响[J]. *园艺学报*, 2001, 28(5): 425-429.
WANG Yong-qin, CAO Jia-shu, LI Jian-hua, et al. Effect of selenium application on the yield of garlic and its selenium content[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28(5): 425-429.
- [33] 付冬冬, 王松山, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒对冬小麦生长及生理代谢的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1500-1507.
FU Dong-dong, WANG Song-shan, LIANG Dong-li, et al. Effects of exogenous selenite and selenate on the growth and physiological metabolism of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1500-1507.
- [34] 付冬冬, 段曼莉, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒对小白菜生长及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 358-365.
FU Dong-dong, DUAN Man-li, LIANG Dong-li, et al. Effect of selenite and selenate on growth and nutrient absorption of pakchoi[J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 358-365.
- [35] Liu X, Zhao Z, Hu C, et al. Effect of sulphate on selenium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) supplied with selenate or selenite[J]. *Plant and Soil*, 2016, 399(182): 295-304.
- [36] 田秀英, 李会合, 王正银. 施硒对苦荞 N, P, K 营养元素和土壤有效养分含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 112-115.
TIAN Xiu-ying, LI Hui-he, WANG Zheng-yin, et al. Effect of Se application on contents of nitrogen, phosphorus and potassium in tartary buckwheat and content of available nutrients in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 112-115.
- [37] Lyons G H, Genc Y, Soole K, et al. Selenium increases seed production in Brassica[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 73-80.
- [38] Wang Y D, Wang X, Wong Y S. Generation of selenium-enriched rice with enhanced grain yield, selenium content and bioavailability through fertilization with selenite[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2385-2393.
- [39] Ekanayake L J, Vial E, Schatz B, et al. Selenium fertilization on lentil (*Lens culinaris Medikus*) grain yield, seed selenium concentration, and antioxidant activity[J]. *Field Crops Research*, 2015, 177: 9-14.
- [40] Kikkert J, Berkelaar E. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 65(3): 458-465.
- [41] Huang Q, Wang Q, Luo Z, et al. Effects of root iron plaque on selenite and selenate dynamics in rhizosphere and uptake by rice (*Oryza sativa*) [J]. *Plant and Soil*, 2015, 388(1/2): 255-266.
- [42] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 284-289.
CHEN Si-yang, JIANG Rong-feng, LI Hua-feng. Uptake and translocation of selenate or selenite by wheat and rice seedlings[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 284-289.
- [43] 刘新伟, 段碧辉, 夏全杰, 等. 硫酸盐对两种硒形态处理下小麦硒吸收和转运的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1190-1197.
LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, et al. Effects of sulfate on the uptake and translocation of selenium in wheat under selenite and selenate conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 1190-1197.
- [44] Eich-Greatorex S, Sogn T A, Øgaard A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(3): 221-231.
- [45] Stroud J L, Broadley M R, Foot I, et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilizers applied to soil[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1/2): 19-30.