

引用格式:

李鸣凤, 彭文勇, 刘新伟, 赵竹青. 外源硒对油菜硒积累及土壤硒残留的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 139–143.

LI M F, PENG W Y, LIU X W, ZHAO Z Q. Effects of different selenium sources on rape selenium accumulation and residual selenium form in soil[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 139–143.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



外源硒对油菜硒积累及土壤硒残留的影响

李鸣凤¹, 彭文勇^{2*}, 刘新伟³, 赵竹青³

(1.武汉生物工程学院园林园艺学院, 湖北 武汉 430415; 2.湖北省天门市耕地质量保护与肥料管理局, 湖北 天门 431700; 3.华中农业大学微量元素研究中心, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了解油菜对不同外源硒吸收利用的差异, 以华油杂 9 号为材料, 通过盆栽试验, 研究不同硒源(硒矿、硒粉、硒酸盐、亚硒酸盐)对油菜生长及硒吸收累积规律的影响, 分析土壤中残留硒的形态。结果表明: 相比对照(不施用硒肥), 不同外源硒对成熟期油菜籽粒、果荚、茎叶和根的生物量无显著影响; 施用硒矿、硒酸盐和亚硒酸盐后, 油菜籽粒、果荚、茎叶和根的硒含量均显著增加; 施用不同形态硒后, 油菜在不同生育期对硒累积曲线接近“S”形; 施用硒矿后, 油菜硒最大累积速率出现在花期, 施用其他 3 种形态的硒肥, 油菜硒最大累积速率出现在蕾薹期; 施用硒酸盐后, 油菜各器官的硒含量显著高于其他处理, 其中油菜籽粒硒含量高达 44.56 mg/kg, 硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿、硒粉、对照处理的油菜各器官的硒含量依次降低; 施用硒矿后, 油菜籽粒硒累积分配比例最高, 达 23.20%; 油菜收获后, 硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿、硒粉、对照处理中土壤残留有效态硒含量依次降低。综合分析, 硒酸盐对油菜富硒的效果最强, 亚硒酸盐次之, 而硒矿也能显著的促进油菜籽粒富硒, 硒粉则无显著的富硒效果。

关键词: 油菜; 硒酸盐; 亚硒酸盐; 硒矿; 硒粉; 硒积累; 土壤硒形态

中图分类号: S565.406

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2022)02–0139–05

Effects of different selenium sources on rape selenium accumulation and residual selenium form in soil

LI Mingfeng¹, PENG Wenyong^{2*}, LIU Xinwei³, ZHAO Zhuqing³

(1.College of Landscape and Horticulture, Wuhan University of Bioengineering, Wuhan, Hubei 430415, China; 2.Fertilizer Authority and Quality of Arable Land of Tianmen, Tianmen, Hubei 431700; 3.Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: In order to understand the difference of rape uptake and utilization on different selenium sources, we studied the growth, Se uptake and utilization of rape and the form of residual selenium in soil among different sources of Se (control, selenium ore, selenium powder, selenate, selenite) based on pot experiment. The results showed that different sources selenium had no significant changes in the biomass of each part of rapeseed at the mature stage. Compared with the control, the application of selenium ore, selenate and selenite significantly increased the selenium concentration in each part of rape. The selenium accumulation curve of rape was close to the “S” shape. After applying selenium ore, the maximum accumulation rate of selenium in rapeseed appeared in the flowering stage, and when other forms of selenium fertilizers were applied, the maximum accumulation rate of selenium in rapeseed appeared in the budding stage. After

收稿日期: 2021–04–16

修回日期: 2022–03–29

基金项目: 武汉生物工程学院项目(2019KQ05)

作者简介: 李鸣凤(1991—), 女, 湖北监利人, 博士, 讲师, 主要从事作物营养研究, mingfengL0124@163.com; *通信作者, 彭文勇, 高级农艺师, 主要从事植物养分吸收与利用研究, 767957740@qq.com

applying selenate, the selenium content of each part of rapeseed was significantly higher than that of other treatments, and the selenium concentration of rapeseed seed was as high as 44.56 mg/kg, the selenium concentration of selenate, selenite, selenium ore, selenium powder, and control treated rapeseed decreased in turn. After the application of selenium ore, the proportion of selenium transferred to rape seeds was the highest, reaching 23.20%. After the rapeseed was harvested, the contents of selenate, selenite, selenium ore, selenium powder, and the control treatments in soil residual available selenium decreased in turn. In conclusion, selenate has the strongest effect on selenium enrichment in rapeseed, followed by selenite, and selenium ore could also significantly promote selenium enrichment in rapeseeds, Selenium powder has no significant selenium enrichment effect.

Keywords: rape(*Brassica napus* L.); selenium powder; selenium ore; selenate; selenite; selenium accumulation; soil selenium speciations

硒(Se)是人类和动物的必需元素,成年人的推荐摄入量为 70 $\mu\text{g}/\text{d}^{[1-2]}$ 。人体所需的硒主要从食物中获取。中国有 2/3 的土壤处于缺硒状态,硒含量低于 0.1 mg/kg,导致部分地区传统饮食不能满足每日的硒摄入量^[3]。硒缺乏可能引起心血管疾病、甲状腺机能减退、男性不育和癌症等^[4-5]。

生物强化富硒可以增加人体对硒的天然摄入量^[6]。植物吸收和累积硒的总量虽受土壤总硒含量的影响,但其与土壤硒的形态和价态也有关系^[7-8]。硒在土壤中按价态可划分为 Se^0 (元素态硒)、 Se^{2-} (硒化物)、 Se^{4+} (亚硒酸盐)和 Se^{6+} (硒酸盐)等 4 种价态,其中四价的亚硒酸盐和六价的硒酸盐是植物吸收硒的主要价态,且植物对硒酸盐的吸收能力高于亚硒酸盐^[9]。中国湖北恩施市渔塘坝拥有丰富的硒矿资源,硒含量 230 ~ 6300 mg/kg^[10]。邓小芳^[11]研究表明,恩施硒矿主要以四价和零价的硒形式存在,可被植物吸收利用。开发利用硒矿用于富硒农产品的生产对改善人体硒缺乏具有重要意义。硒粉是工业生产废料。李鸣凤等^[12]研究表明,小麦难以直接吸收利用硒粉中的硒。也有研究^[13]显示,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。若能开发利用硒粉用于农产品,不仅可以提高硒资源的利用,还可减少工业废料硒粉对环境的污染。

研究人员就作物对养分的吸收累积规律进行了不少研究^[14-16],但主要针对的是植物生长必需的营养元素,而硒作为植物的非必需营养元素,对其吸收累积规律的研究较少。本研究中,通过盆栽试验,研究土壤中添加不同硒源对成熟期油菜生物量和硒含量的影响,旨在筛选出油菜富硒效果较好的硒源。

1 材料和方法

1.1 供试材料

2019年,以华油杂9号为材料,在华中农业大学微量元素中心基地进行试验。试验土壤为潮土。土样的主要理化性质:pH 7.81、有机质含量 18.42 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾、全硒含量分别为 54.96、4.63、113.28、0.28 mg/kg。

1.2 试验方法

将试验土风干、磨碎、过筛(孔径 2 mm)后装入直径 25 cm、高 27 cm 的桶中,每桶土壤量为 8 kg,施硒量为 5 mg/kg,桶外套黑色袋子。硒源为:硒酸钠(六价硒),硒含量为 41%;亚硒酸钠(四价硒),硒含量为 45%;硒粉(零价硒),硒含量为 99.99%;硒矿(主要为零价与四价硒),硒含量为 0.4%。以不施硒肥为对照。其他措施均相同。N、 P_2O_5 和 K_2O 的施用量分别为 0.3、0.2 和 0.25 g/kg。所有肥料均配成溶液浇入土壤,充分搅拌均匀。油菜籽粒先经 0.5% NaClO 消毒 15 min,然后用去离子水洗涤 5 次,每次 10 min。将冲洗干净的种子于 25 $^\circ\text{C}$ 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 5 株。每个处理 4 个重复,共 20 盆。

1.3 指标的测定

1.3.1 植株生物量和产量的测定

分别于苗期、蕾期、花期以及成熟期每盆取 1 株油菜植株测定其生物量。成熟期,每盆另取油菜 1 株,将植株分为根、茎、叶、果荚和籽粒。籽粒采用风干的方式,其他器官分别于 105 $^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min,然后于 65 $^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干至恒重,用电子天平

称量干质量, 磨碎, 装入自封袋。油菜成熟期统计产量、果荚数、每荚粒数以及千粒质量。

1.3.2 植株硒含量的测定

分别于苗期、蕾期、花期、成熟期每盆取 1 株植物, 磨碎。成熟期, 每盆另取 1 株油菜植株, 分器官磨碎, 称取根约 0.1 g, 茎叶、果荚、籽粒各约 0.3 g, 采用 HNO₃ 与 HClO₄ 混合酸(体积比为 4:1) 消煮, 6 mol/L HCl 还原, 采用原子荧光光谱法测定硒含量。

1.4 数据分析与处理

采用 SPSS 18.0 进行方差显著性分析和 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 不同硒源对成熟期油菜各器官生物量和硒含量的影响

不同外源硒对成熟期油菜籽粒、果荚、茎叶和根的生物量均无显著影响(表 1)。从表 2 可以看出, 成熟期油菜各器官硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿、硒粉、

表 1 不同硒源处理成熟期油菜籽粒、果荚、茎叶和根的生物量

Table 1 Biomass of rape seeds, pods, stems and leaves, and roots of different selenium sources additions to soil g

处理	单株生物量			
	籽粒	果荚	茎叶	根
对照	6.33±0.31	6.75±0.64	12.60±1.43	2.95±0.12
硒矿	7.02±0.10	6.89±0.39	12.96±0.46	3.14±0.38
硒粉	6.86±0.49	6.64±0.37	12.45±0.13	2.91±0.26
硒酸盐	6.80±0.22	7.19±0.11	13.82±0.82	3.01±0.12
亚硒酸盐	6.78±0.32	7.11±0.02	12.49±0.15	3.10±0.14

表 2 不同硒源处理成熟期油菜根、茎叶、果荚和籽粒的硒含量

Table 2 Selenium content of rape seeds, pods, stems and leaves, and roots of different selenium sources additions to soil

处理	硒含量/(mg·kg ⁻¹)			
	籽粒	果荚	茎叶	根
对照	(0.09±0.05)d	(0.29±0.05)d	(0.18±0.01)c	(0.06±0.02)d
硒矿	(0.94±0.07)c	(1.19±0.19)c	(0.81±0.06)c	(0.98±0.10)c
硒粉	(0.20±0.03)cd	(0.32±0.07)cd	(0.19±0.02)c	(0.37±0.06)d
硒酸盐	(44.56±0.89)a	(51.43±1.27)a	(42.88±0.91)a	(31.78±0.59)a
亚硒酸盐	(2.86±0.13)b	(5.53±0.66)b	(2.44±0.09)b	(7.62±0.24)b

同列数据不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

对照处理的硒含量依次降低。与对照相比, 施用硒粉后, 油菜各器官硒含量略有升高, 但差异不显著, 表明油菜难以直接吸收硒粉中的硒; 施用硒矿后, 成熟期油菜籽粒、果荚和根的硒含量均显著增加, 表明硒矿中的硒可被植物直接吸收利用; 施用硒酸盐后, 油菜各器官的硒含量显著高于其他处理, 其中油菜籽粒硒含量高达 44.56 mg/kg; 施用硒酸盐处理油菜籽粒、果荚、茎叶以及根的硒含量分别是施用亚硒酸盐处理的 15.58、9.30、17.57、4.17 倍。施用硒酸盐后, 油菜果荚、籽粒、茎叶、根的硒含量依次降低, 说明硒酸盐易向油菜果荚和籽粒富集; 施用亚硒酸盐后, 油菜根、果荚、籽粒、茎叶的硒含量依次降低, 表明亚硒酸盐易滞留于油菜根部。

2.2 不同硒源对成熟期油菜籽粒、果荚、茎叶和根硒累积百分比的影响

从表 3 可以看出, 对照处理吸收的硒主要富集在茎叶中, 施用硒矿、硒粉、硒酸盐和亚硒酸盐后, 油菜籽粒中硒累积分配比分别为 23.20%、19.57%、22.26%、17.17%, 表明施用硒矿后, 硒更多的从营养器官向籽粒中迁移; 亚硒酸盐、硒粉、硒矿、硒酸盐、对照处理根部硒累积量分配比依次降低, 表明施用亚硒酸盐后, 硒滞留在油菜的根部较多。相比亚硒酸盐处理, 施用硒矿后, 油菜籽粒硒累积分配比增加 35.12%。

表 3 不同硒源处理成熟期油菜籽粒、果荚、茎叶和根的硒累积百分比

Table 3 The cumulative percentage of selenium in rape seeds, pods, stems and leaves, and roots of different selenium sources additions to soil %

处理	百分比			
	籽粒	果荚	茎叶	根
对照	11.69	39.38	45.13	3.80
硒矿	23.20	28.84	37.13	10.84
硒粉	19.57	30.81	33.94	15.68
硒酸盐	22.26	27.16	43.55	7.02
亚硒酸盐	17.17	34.85	27.04	20.94

2.3 不同硒源对油菜硒累积速率的影响

以单株硒累积量 y 为纵坐标, 以出苗后的时间 t 为横坐标, 对油菜单株硒累积作回归分析(表 4)。油菜单株硒累积曲线图形接近“S”形, 可用指数方程 $y = a \exp(-b/t)$ 拟合。该指数函数为连续函数, 可

求导计算出单株硒累积量的最大累积速率及其时间。施用硒矿后,单株油菜硒最大累积速率出现在花期,对照及其他硒源处理的单株油菜硒最大累积速率出现在蕾薹期。硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿、硒

粉、对照处理的最大累积速率依次降低,硒矿、亚硒酸盐、硒酸盐、对照、硒粉处理最大累积速率出现的时间依次提前。

表4 不同硒源对油菜硒累积速率

Table 4 The accumulation rate of selenium in rape of different selenium sources additions to soil

处理	硒累积回归方程	R^2	最大累积速率出现的时间/d	单株最大累积速率/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)
对照	$y=10.633\exp(-217.10/t)$	0.647 4	108.550	0.03
硒矿	$y=154.45\exp(-321.19/t)$	0.957 9	160.600	0.26
硒粉	$y=14.46\exp(-198.07/t)$	0.859 5	99.035	0.04
硒酸盐	$y=5703.50\exp(-250.76/t)$	0.920 8	125.380	12.31
亚硒酸盐	$y=499.44\exp(-287.18/t)$	0.869 8	143.590	0.94

2.4 不同硒源对成熟期油菜土壤残留硒形态的影响

从表5可以看出,相比对照,施用外源硒显著增加了土壤残留的硒量,4种外源硒处理的土壤总硒含量差异不显著。土壤残留硒主要形态为残渣态硒,特别是施用硒粉,其残渣态硒比例高达70.13%,表明硒粉对后茬作物的富硒效果较差。硒酸盐、亚

硒酸盐、硒矿、硒粉处理的土壤有效态硒(含水溶态和交换态)含量依次降低,其比例分别为30.29%、21.25%、5.26%和1.44%,表明油菜土壤施用硒酸盐、亚硒酸盐和硒矿后,对后茬作物具有一定的生物有效性。

表5 不同硒源处理成熟期油菜土壤残留的硒组份含量

Table 5 Contents of residual selenium components in soil after harvest of rapeseed at mature stage treated with different selenium sources

处理	不同形态的硒含量/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)					总硒含量
	水溶态	交换态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态	
对照	(15.24±2.86)c	(28.71±6.43)d	(21.92±3.06)d	(99.29±17.73)c	(63.92±4.51)e	(229.08±26.69)b
硒矿	(69.99±9.38)c	(186.44±29.81)c	(852.62±61.87)b	(990.30±66.45)a	(2777.32±288.48)b	(4876.67±348.99)a
硒粉	(17.07±4.83)c	(54.99±8.97)d	(338.10±34.45)c	(1079.61±155.51)a	(3497.69±284.51)a	(4987.46±456.32)a
硒酸盐	(588.06±75.90)a	(861.32±55.40)a	(1122.67±118.51)a	(708.07±40.30)b	(1505.06±156.16)d	(4785.18±291.01)a
亚硒酸盐	(227.47±26.73)b	(758.81±75.65)b	(807.72±70.97)b	(834.55±71.62)b	(2013.11±197.71)c	(4641.66±200.34)a

同列数据不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

硒作为植物非必需营养元素,对作物的增产效果受土壤类型、施硒方式、作物种类及环境胁迫等因素的影响^[11]。前人^[17-19]研究发现,少量或适量施用外源硒可促进植物的生长发育,增加其生物量。本研究结果显示,不同外源硒对成熟期油菜籽粒、果荚、茎叶和根的生物量无显著影响。袁光咏等^[20]研究认为,土壤施硒的临界值为15~20 mg/kg,一旦过量,会干扰植物体内过氧化物酶的合成,降低作物的产量或生物量。

植物对硒的吸收和储存受多种因素影响,如外源硒形态、土壤类型、施硒方式、施硒时间和施硒浓度等^[11-12]。邓小芳^[11]发现,施硒酸盐的大豆籽粒

硒含量约为施亚硒酸盐的24~29倍。本研究中,油菜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,油菜籽粒、果荚、茎叶以及根的硒含量分别是施用亚硒酸盐后的15.58、9.30、17.57、4.17倍。一方面原因在于土壤中的硒酸盐有30.29%的硒以水溶态和交换态的有效态形式存在,而亚硒酸盐仅有21.25%的硒以有效态的形式存在,且在有效态硒组分中,硒酸盐处理下有效性更高的水溶态硒占比高于亚硒酸处理;另一方面,作物对硒酸盐和亚硒酸的吸收转运机制不同,根细胞从土壤吸收硒酸盐是通过和硫酸盐竞争硫转运蛋白被吸收的^[5,21],而亚硒酸盐的吸收是由磷酸盐转运子OsPT2介导的^[22]。油菜对硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿、硒粉的吸收能力依次降低,原因在于硒源中硒酸盐

和亚硒酸盐均易溶于水；硒粉则以不易溶于水的单质形态存在；硒矿的成分复杂，主要以不易溶于水的单质硒和易溶于水的亚硒酸盐的形态存在。施用硒矿后，成熟期油菜籽粒、果荚和根的硒含量均显著增加，而施用硒粉后油菜各器官的硒含量无显著变化，说明硒矿中的有效硒含量虽低，但可被植物直接吸收利用，而硒粉中的硒植物难以吸收利用。

植物吸收硒酸盐后迅速转运至地上部，而吸收亚硒酸盐后则更多地保留在根部^[23-25]。本研究中，施用硒矿、硒粉、硒酸盐和亚硒酸盐后，油菜籽粒中硒累积分配比分别为 23.20%、19.57%、22.26%、17.17%，表明在油菜吸收利用硒矿、硒酸盐、硒粉、亚硒酸盐转移储存于籽粒的能力依次减弱，施用硒矿或硒酸盐后硒更易累积于油菜籽粒。硒的单株累积量取决于硒吸收量和油菜生物量。本试验中，施用硒酸盐和亚硒酸盐，油菜生物量无显著变化，而施用硒酸盐后油菜各器官的硒含量高于亚硒酸盐处理。原因在于硒酸盐被土壤吸附和固定较少，具有较高的生物利用度，而亚硒酸盐易被铁/铝氧化物或氢氧化物吸附固定，生物利用度较低^[26]。

本研究中，油菜单株硒累积量受外源硒形态的影响，其动态变化符合“S”形曲线。究其原因，生育前期，植株生长缓慢，油菜硒含量的高低对单株硒累积量的贡献较大；生育中期，植株生长加快，表现出对养分的稀释效应；成熟期，油菜叶片黄化、凋落，叶片中的硒随之返还于土壤。硒矿、亚硒酸盐、硒酸盐、硒粉处理油菜单株硒最大累积速率出现的时间依次提前。硒矿处理最大累积速率出现的时间较迟，可能是因为硒矿施入土壤后不断发生吸附/解吸、沉淀/溶解等过程，矿化态的硒可被土壤和植物活化，从而使土壤中交换态硒以及潜在生物有效态硒(铁锰氧化物结合态、有机结合态等)含量显著增加。

综合以上分析，可得知：4 种外源硒对成熟期油菜各器官的生物量均无显著影响，施用硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿可有效提高油菜硒含量；油菜单株硒累积量受外源硒形态的影响，对硒酸盐、亚硒酸盐、硒矿的吸收能力较强；油菜土壤上施用硒酸盐、

亚硒酸盐和硒矿后，对后茬作物具有一定的生物有效性，施用硒粉则无显著的富硒效果。

参考文献：

- [1] FAIRWEATHER-TAIT S J, BAO Y P, BROADLEY M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2011, 14(7):1337-1383.
- [2] KIPP A P, STROHM D, BRIGELIUS-FLOHÉ R, et al. Revised reference values for selenium intake[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2015, 32: 195-199.
- [3] 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.
- [4] JONES G D, DROZ B, GREVE P, et al. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(11): 2848-2853.
- [5] WHITE P J. Selenium accumulation by plants[J]. *Annals of Botany*, 2016, 117(2): 217-235.
- [6] MOULICK D, SANTRA S C, GHOSH D. Effect of selenium induced seed priming on arsenic accumulation in rice plant and subsequent transmission in human food chain[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 152: 67-77.
- [7] 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.
- [8] WANG D, DINH Q T, ANH THU T T, et al. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 417-426.
- [9] PENG Q, WANG M K, CUI Z W, et al. Assessment of bioavailability of selenium in different plant-soil systems by diffusive gradients in thin-films (DGT)[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 637-643.
- [10] 彭祚全, 黄剑锋. 世界硒都恩施硒资源研究概述[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [11] 邓小芳. 湖北省几种作物对硒肥的利用及其富硒特征的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [12] 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.

(下转第 221 页)