

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.05.019

管亚玲, 张丽光, 王创云, 等. 土壤施硒酸钠对盐碱地油用向日葵产量及营养品质的影响. 土壤, 2020, 52(5): 1011–1016.

土壤施硒酸钠对盐碱地油用向日葵产量及营养品质的影响^①

管亚玲¹, 张丽光^{2*}, 王创云², 王磊¹, 原红娟¹, 邓妍², 赵丽², 郭虹霞²

(1 运城学院生命科学系, 山西运城 044000; 2 山西农业大学农学院/山西功能农业研究院, 太原 030032)

摘要: 对盐碱地油用向日葵施用硒酸钠, 探讨不同施 Se 量(0、100、200、300、400 g/hm²)对油用向日葵产量及营养品质的影响。结果表明: 施用适量 Se (300 g/hm²) 有利于提高油用向日葵产量, 而过低 (100~200 g/hm²) 或过高量 Se (400 g/hm²) 均降低了油用向日葵产量; 土施 100~200 g/hm² Se, 提高了 K、S、Fe、Zn、Mn、Cu、Se、油酸和亚油酸含量, 降低籽仁 Cr、Cd、Pb 含量; 施用 Se 300 g/hm² 左右有利于降低籽仁棕榈酸和硬脂酸含量。综合考虑油葵产量和各营养指标的变化情况, 在盐碱地生产富 Se 油用向日葵最适宜的施 Se 量为 200~300 g/hm²。

关键词: 油葵; 土施硒; 产量; 品质

中图分类号: S147.7⁺9 **文献标志码:** A

Effect of Applying Sodium Selenate on Yield and Nutritional Quality of Oil Sunflower in Saline-alkali Land

ZAN Yaling¹, ZHANG Liguang^{2*}, WANG Chuangyun², WANG Lei¹, YUAN Hongjuan¹, DENG Yan², ZHAO Li², GUO Hongxia²
(1 Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng, Shanxi 044000, China; 2 Institute of Crop Science, Shanxi Academy of Agricultural Sciences/Shanxi Institute for Functional Agriculture, Taiyuan 030032, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of applying sodium selenate (0, 100, 200, 300 and 400 g/hm²) on the yield and nutritional quality of oil sunflower in order to provide scientific reference for the comprehensive utilization of local saline-alkali land and the production of selenium-rich agricultural products. The results showed that the yield of oil sunflower was increased by applying 300 g/hm² of sodium selenate, while decreased by applying 100–200 g/hm² or 400 g/hm² of sodium selenate; Applying 200–300 g/hm² of sodium selenate increased the contents of K, S, Fe, Zn, Mn, Cu, Se, oleic acid and linoleic acid, inhibited the absorption of Cr, Cd and Pb, and decreased the contents of palmitic and stearic acids in sunflower seed kernels. By considering both yield and its nutritional quality, applying 300 g/hm² of sodium selenate is recommended as the effective way for oil sunflower in the saline-alkali soil.

Key words: Oil sunflower; Soil application selenium; Yield; Nutritional quality

硒(Se)与生物体的健康密切相关, 被誉为“奇效生命元素”。环境中 Se 的含量过多或不足, 均会对人和动物身体产生不良影响。适量 Se 可以增强动物及人体的免疫力、预防多种疾病的产生, 还可以促进作物的代谢生长, 提高作物的产量和品质^[1]。有研究表明, 适宜浓度的 Se 对作物的生长和产量均有促进作用^[2]。土施 Se 可显著提高作物籽粒 Se、Zn、Fe 等元素含量^[3]。翁伯琦等^[4]研究发现, 在 Se 浓度 150 g/hm² 范围以内, 施 Se 可提高植物的株高、茎叶、干重及

总生物量。Se 还能减少作物对一些化学致癌物质的吸收^[5]。通过施用硒肥, 对土壤中有害物质的吸收也会有所降低, 从而提高作物品质。但 Se 含量超过一定的浓度, 就会对生命体发生毒害作用^[2], 植物黄萎、徒长、叶片萎缩干枯、蛋白质合成下降及未老先衰等现象^[6-7]。土壤或人们膳食中 Se 不足会引发一些地方病, 如大骨节病、克山病等。山西是大骨节病的高发区, 运城地区 Se 含量水平低, 夏县等地曾引发大骨节病。因此, 研究当地农作物施 Se 技术, 对于提高

①基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31301851)、山西农谷建设科研专项(SXNGJSKYZX201704)、山西省面上青年基金项目(201601D202061)、院级学科项目(XK-2019008)和院士工作站专项资助项目(20190423)资助。

* 通讯作者(wrwcyl@139.com)

作者简介: 管亚玲(1976—), 女, 陕西扶风人, 博士, 副教授, 主要研究方向为植物营养、功能农业。E-mail: zanyaling@126.com

该地区人们的 Se 水平至关重要。

油葵是一种抗旱作物,它具有耐瘠薄、耐高温、适应性广、生育周期短等优点,种植油葵可以减轻盐碱土壤中的盐分,有良好的经济生态效益。但目前对盐碱地向日葵的研究主要集中在育种、栽培等各方面的研究,作物施 Se 技术也主要集中在农业生产区的大豆、玉米、小麦等作物,而对于向日葵的施 Se 技术研究报道较少。因此,研究盐碱地的富 Se 油葵生产技术,对于开发利用盐碱地,提高生产者的效益有着重要价值。2014—2016 年,在盐碱地上进行了硒肥对油用向日葵产量及品质影响的研究,取得初步结果。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验采用随机区组设计,设 5 个处理:硒酸钠的用量分别为 0、100、200、300、400 g/hm²,用 CK、Se100、Se200、Se300、Se400 表示。供试品种为油用向日葵“矮大头 567DW”。基肥用量为 N 120 kg/hm²(尿素)、P₂O₅ 35 kg/hm²(磷酸二铵)、K₂O 130 kg/hm²(硫酸钾)。试验小区面积为 16 m²,重复 3 次。播种前将氮、磷、钾肥及硒酸钠作为基肥一次施入,氮、磷、钾肥直接撒施,硒肥配制成溶液,喷施在每个小区土壤表面,然后将土壤深翻混合均匀,再进行播种。在苗期和花期各灌水一次,田间管理与当地农户相同。

试验于 2014 年 4 月 27 日至 2016 年 8 月 25 日在运城学院校内实训基地进行。该试验基地位于运城西南部,属于黄河流域中部,黄土高原第一台阶,属大陆温带季风气候,海拔高度约 370 m,年平均气温 13.6 ℃,年平均降雨量 559.3 mm,季节分布不均,多集中在 7—9 月。土壤类型为石灰性褐土,土壤全氮 0.62 g/kg,硝态氮 5.42 mg/kg,铵态氮 2.41 mg/kg,有效磷 1.43 mg/kg,速效钾 85 mg/kg,土壤容重 1.22 g/cm³,有机质 8.01 g/kg, pH 8.3。

1.2 测定指标与数据处理

油葵收获时,每小区随机选取 5 株样品,将采集的地上部分植株混合作为植物样品,取部分样品 105 ℃ 杀青 20 min,50~55 ℃ 烘箱中烘干至恒重,磨细后密封备用。样品中矿质元素含量由江西农科院资环研究所检测,全氮含量采用凯氏定氮法测定,其余元素含量采用原子吸收光谱法测定。油葵籽仁脂肪酸含量由陕西省杂交油菜研究中心采用气相色谱法进行测定。

数据采用 Excel、SAS 软件进行数据处理与统计

分析。

2 结果与分析

2.1 不同用量硒酸钠对油葵籽仁产量的影响

从表 1 可看出,施用硒酸钠对油葵籽仁产量有增产效果,但未达显著水平。与对照相比,Se300 处理,油葵籽仁产量达最高值 4 217 kg/hm²,比对照增加 24.9%,继续增加 Se 用量,油葵籽仁产量有下降趋势。由此可见,在盐碱地,土壤施适宜用量 Se (0 ~ 300 g/hm²)有利于提高油葵籽仁产量,而较高用量 Se (≥ 400 g/hm²)对油葵籽仁产量提高有抑制作用。

表 1 不同处理对油葵产量的影响
Table 1 Seed kernel yields of oil sunflower under different treatments

处理	产量 (kg/hm ²)	增加幅度(%)
CK	3 377 a	
Se100	3 735 a	10.6
Se200	4 017 a	19.0
Se300	4 217 a	24.9
Se400	4 052 a	20.0

注:表中同列字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$),下表同。

2.2 不同用量硒酸钠对油葵籽仁大中量元素含量的影响

从表 2 可看出,施用硒酸钠,油葵籽仁大中量元素的含量呈不同趋势。与对照相比,油葵籽仁中 N、P、Mg 的含量都呈下降趋势,Se200 处理籽仁中 N、P 含量均达最低值,分别为 40.17 g/kg 和 1.47 g/kg,比对照减少了 8.50% 和 48.30%;Se400 处理籽仁中 Mg 含量达最低值 0.065 0 g/kg,比对照降低了 17.55%。油葵籽仁中 K 含量一直呈上升趋势,Se400 处理达最高值 4.98 g/kg,比对照增加了 25.36%。籽仁中 S 的含量呈先上升后下降的趋势,Se100 处理达最高值 2.04 g/kg,Se200 处理达最低值 1.74 g/kg。籽仁中 Ca 的含量呈先下降再上升的趋势,Se100 处理达最低值 0.067 2 g/kg,比对照减少了 4.59%;Se400 处理达最高值 0.074 7 g/kg,比对照增加了 6.01%。

由以上可知,Se 对油葵籽仁中 N、P、Mg 含量的提高有抑制作用,对籽仁中 K 的含量有提高作用。施用 100 g/hm² 硒酸钠有利于籽仁中 S 含量的提高,施用 400 g/hm² 硒酸钠有利于籽仁中 K、Ca 含量的提高;但施用 0 ~ 300 g/hm² 硒酸钠抑制籽仁中 Ca 含量的提高,施 100 ~ 300 mg/hm² 硒酸钠抑制籽仁中 S 含量的提高。

表 2 不同处理对油葵籽仁大中量元素含量的影响
Table 2 Macronutrients contents in seed kernels of oil sunflower under different treatments

处理	大量元素			中量元素		
	N(g/kg)	P(g/kg)	K(g/kg)	S(g/kg)	Ca(g/kg)	Mg(g/kg)
CK	43.90 a	2.84 a	3.97 a	1.92 a	0.070 5 ab	0.078 8 a
Se100	42.00 a	2.44 a	4.75 a	2.04 a	0.067 2 b	0.078 0 a
Se200	40.17 a	1.47 a	4.63 a	1.74 a	0.067 3 ab	0.078 8 a
Se300	41.63 a	2.80 a	4.66 a	1.85 a	0.070 0 ab	0.070 3 a
Se400	42.93 a	1.65 a	4.98 a	1.95 a	0.074 7 a	0.065 0 a

2.3 不同用量硒酸钠对油葵籽仁微量元素含量的影响

从表 3 可看出,施用不同浓度硒酸钠,油葵籽仁中微量元素含量呈不同变化趋势。与对照相比,油葵籽仁中 Zn 和 Se 含量均显著增加,其他元素含量没有明显变化。在 Se100 和 Se200 处理中,籽仁 Zn 和 Se 含量分别达最高值 19.17 mg/kg 和 0.95 mg/kg,分别比对照增加了 31.9% 和 156.8%。籽仁中 Fe、Mn 含量呈先增加后降低的趋势,Se300 处理籽仁 Fe 含量达最高值 52.50 mg/kg, Se200 处理籽仁 Mn 含量达最高值

10.17 mg/kg,继续增加硒用量,籽仁 Fe、Mn 含量呈下降趋势。籽仁中 Cu 含量呈增加的趋势,Se400 处理达最高值 13.47 mg/kg。籽仁中 Cr、Cd、Pb 含量呈先增加后下降的趋势,Se200 处理籽仁 Cd 含量达最高值 0.10 mg/kg,Se300 处理籽仁 Cr、Pb 含量达最高值 1.04、1.09 mg/kg;继续增加 Se 用量,Cr、Cd、Pb 含量有下降的趋势。综合考虑,施 Se 对油葵籽仁 Fe、Zn、Mn、Cu、Se 元素含量有提高作用,对籽仁 Cr、Cd、Pb 含量有抑制增加效应,建议在盐碱地富 Se 油葵的生产中,硒酸钠的用量为 200 g/hm² 左右。

表 3 不同处理对油葵籽仁微量元素含量的影响(mg/kg)
Table 3 Micronutrients contents in seed kernels of oil sunflower under different treatments

处理	Fe	Zn	Cu	Mn	Cr	Cd	Pb	Se
CK	49.37 a	14.53 b	11.93 a	9.76 a	0.82 a	0.07 a	0.97 a	0.37 b
Se100	49.20 a	19.17 a	11.45 a	8.87 a	0.89 a	0.10 a	1.08 a	0.44 b
Se200	52.03 a	17.37 ab	13.13 a	10.17 a	0.88 a	0.10 a	0.94 a	0.95 a
Se300	52.50 a	17.27 ab	12.00 a	9.79 a	1.04 a	0.06 a	1.09 a	0.72 ab
Se400	47.67 a	15.83 ab	13.47 a	9.16 a	0.85 a	0.07 a	1.03 a	0.93 a

2.4 不同用量硒酸钠对油葵籽仁不饱和脂肪酸含量的影响

从表 4 可看出,施硒酸钠对油葵籽仁不饱和脂肪酸含量没有明显影响。与对照相比,籽仁油酸含量呈下降趋势;籽仁亚油酸含量均呈先上升后下降的趋势。Se100、Se200、Se300、Se400 处理,籽仁油酸含量分别下降了 3.25%、0.38%、0.28%、1.64%;Se100 处理,籽仁亚油酸含量达最大值 243.1 g/kg,较对照增加了 8.29%,在 Se200、Se300 处理中,籽仁亚油酸降低了 0.85% 和 0.71%, Se400 处理,籽仁亚油酸含量增加了 4.14%。由以上可知,土施适宜硒肥浓度(100 ~ 200 g/hm²)有利于籽仁油酸和亚油酸含量的提高。

2.5 不同用量硒酸钠对油葵籽仁饱和脂肪酸含量的影响

不同用量硒酸钠对油葵籽仁饱和脂肪酸含量同样没有明显变化(表 4)。与对照相比,籽仁棕榈酸和

硬脂酸含量呈先增加后下降的趋势。在 Se100、Se200 处理中,籽仁棕榈酸和硬脂酸含量分别达最高值 48.2、23.4 g/kg,分别比对照增加了 3.66%、4.46%。继续增加硒用量,籽仁棕榈酸和硬脂酸含量有所下降,Se300 处理,籽仁棕榈酸达最低值为 45.5 g/kg,比对照降低了 2.15%,籽仁硬脂酸比对照仅增加了 0.45%; Se400 处理,籽仁硬脂酸含量下降了 2.23%。

表 4 不同处理对油葵籽仁脂肪酸含量的影响(g/kg)
Table 4 Fatty acids contents in seed kernels of oil sunflower under different treatments

处理	不饱和脂肪酸		饱和脂肪酸	
	油酸	亚油酸	棕榈酸	硬脂酸
CK	689.1 a	224.5 a	46.5 a	22.4 a
Se100	666.7 a	243.1 a	48.2 a	22.2 a
Se200	686.5 a	222.6 a	47.0 a	23.4 a
Se300	687.2 a	222.9 a	45.5 a	22.5 a
Se400	677.8 a	233.8 a	47.0 a	21.9 a

综合考虑油葵品质评定中的高品质油品对低饱和脂肪酸的要求,施硒 300 g/hm^2 左右有利于降低籽仁棕榈酸和硬脂酸含量。

3 讨论

3.1 不同用量硒酸钠对油葵产量的影响

人体补 Se 最安全有效的方法是生物补 Se,在作物栽培时进行土施 Se 或喷施 Se、种子浸种等方式将无机态 Se 转化成有机态 Se,从而达到人体安全有效的补 Se 效果。目前在农业生产中作物补 Se 常用的产品多为硒酸钠、亚硒酸钠等无机态 Se,而有机态 Se、纳米 Se 较少,且价格较高,在大面积的农业生产中使用较少。无机态 Se 毒性较大,土施时对土壤、水体有一定的污染,但作物地上部可食部分 Se 残留较叶喷少。

施用硒酸钠可调节植物的光合作用^[8],清除植物体内自由基,提高植物体内脯氨酸、谷胱甘肽抗氧化酶等酶的活性,增强植株的抗逆性,而且可以增加根际微生物的种类,促进植物根系活力,增强植物对养分的吸收^[9-10],最终提高作物产量;而过量施用 Se 则抑制植物生长,甚至有一定的毒害作用,降低作物产量^[3],这在蔬菜、小麦、玉米等作物上均有证实^[1, 3, 11-14]。李登超等^[15]的研究发现,当营养液中 Se 浓度在 0.5 mg/L 范围以内,菠菜、小白菜的株高、产量增加;当营养液中 Se 浓度大于 0.5 mg/L ,菠菜、小白菜的株高、产量降低。郭天宇等^[16]喷施 2.5 g/hm^2 螯合 Se,水稻产量增产 19.35% 、糙米 Se 达到 0.236 mg/kg 。王晋民等^[17]在胡萝卜上喷施高浓度 Se($50\sim 500\text{ mg/kg}$)时,胡萝卜叶面有 Se 中毒症状,叶片细弱,叶缘焦黄,产量下降。也有研究表明,施 Se 对作物产量及生物量影响不大,但可显著提高作物各部位 Se 的含量^[18]。在本试验中施用 $0\sim 300\text{ g/hm}^2$ 硒酸钠有利于提高油葵籽仁产量,而较高 Se 用量($\geq 400\text{ g/hm}^2$)对油葵籽仁产量提高有抑制作用。可见,适量地施用硒酸钠可促进植物生长发育,进而提高产量,但施用过量的 Se 对植株生长有毒害作用,使作物产量降低。

3.2 不同用量硒酸钠对油葵籽仁矿质元素含量的影响

在植物的抗氧化系统中,Se 对植物必需元素的吸收和分配有一定的调节作用。Se 元素对矿质元素的影响作用较为复杂,与 Se 的施用量、施用方法、植物取样部位等因素有关^[19]。施用高浓度 Se 被植株吸收转化后形成的有机酸可以促进植株对于阳离子

的吸收,而对于 P 等阴离子的吸收有拮抗作用^[17, 20]。但也有研究表明,在低 Se 区或施用 Se 量较低时,Se 和 P 有协同作用,施用 Se 量较高情况下,二者有拮抗作用^[13]。关于 N 元素,Se 参与蛋白质的合成,施用 Se 可提高 N 元素含量。目前大多数研究认为,适量施 Se 促进作物对 N、K 的吸收,然而作物对 P 的吸收在施 Se 水平、作物品种方面表现不同。李登超等^[21]的研究表明,施用 Se 能够提高小白菜体内 N 含量,但小白菜体内 P、K 等元素的含量却降低了。王晋民等^[17]、杨兰芳和丁瑞兴^[22]在胡萝卜及烟草上研究得出,随着 Se 浓度增加,胡萝卜对 K 的吸收一直增强。本试验中,随着硒酸钠施用量的增加,籽仁中 N、P、K 元素含量没有明显变化,N、K 有增加的趋势,而 P 有降低的趋势,这一研究结果与王晋民等^[17]、杜振宇等^[20]研究结果相同。对于 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 元素,不同施 Se 量对这些阳离子吸收的促进作用有所不同,与施 Se 量、作物取样部位等有关。一般来说,在生理浓度的范围以内,总体上施用 Se 后,植物中 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 含量均会增加,极个别元素浓度的减少,被视为稀释效应;若在生理浓度的范围以外,植物中营养元素的含量就会减少^[13]。Avry 等^[23]认为植物体中 Se 与 Mn、Zn 等元素的浓度呈正相关,而与 Fe 等元素呈负相关。胡莹等^[24]研究发现,不同浓度的 Se 对水稻谷壳 Fe 含量有显著降低作用,但对水稻根系、茎叶和糙米中 Fe 没有显著影响。本试验中施用 Se 后 Ca 含量有增加趋势,Mg 有降低趋势,但未达显著水平。施用 100 g/hm^2 硒酸钠处理油葵籽仁中 Zn 含量显著增加,施用 200 g/hm^2 硒酸钠处理籽仁中 Se 含量较高,施用 300 g/hm^2 硒酸钠处理籽仁中 Fe、Mn 含量较高;对于重金属 Cr、Cd、Pb, 200 g/hm^2 硒酸钠处理,籽实 Cr 和 Pb 降低,Cd 在施用 400 g/hm^2 硒酸钠处理中有最低值。可见,施用硒酸钠对植物体内营养元素的吸收和分配与植物种类、部位和施 Se 量等因素都有关系。

3.3 不同用量硒酸钠对油葵籽仁脂肪酸含量的影响

在食用油中,不饱和脂肪酸(亚油酸、亚麻酸、油酸)对人体的作用比饱和脂肪酸(棕榈酸、硬脂酸)的作用大,不饱和脂肪酸中,亚油酸的含量越高,其营养品质就越好。Se 是不饱和脂肪酸代谢过程两种重要酶的成分(烯酰-CoA 异构酶和 2,4-二烯酰-CoA),施 Se 量多少影响了酶的活性,从而影响脂肪酸的含量^[25]。关于 Se 对油料作物油葵脂肪酸成分影响的相

关研究较少。胡居吾和熊华^[26]在天然 Se 土壤中研究得出 Se 对大豆油脂有显著的负效应,但对脂肪酸组成没有显著影响,对软脂酸和硬脂酸、亚油酸和亚麻酸的比例在数量上有一定的变化。本试验发现,土施适宜硒肥量(100 ~ 200 g/hm²)有利于籽仁油酸和亚油酸含量的提高,施用硒酸钠 300 g/hm²左右有利于降低籽仁棕榈酸和硬脂酸含量。一般来说,土壤施 Se 对籽仁脂肪酸组分的影响是:亚油酸>硬脂酸>棕榈酸>油酸。尽管受 Se 用量的影响,油葵籽仁油酸的含量下降,但是油葵的主要品质指标亚油酸的比例却上升了。从经济和社会的需求角度以及盐碱地的改良与开发利用角度考虑,在盐碱地种植富 Se 油用向日葵,对有效利用盐碱地、扩大食用油来源、提高食用油品质、提升当地人们 Se 水平营养将是一个非常有益的方案。由以上可知,综合考虑油葵产量、籽仁矿质元素含量,尤其是 Se 含量、高品质油品要求高不饱和脂肪酸和低饱和脂肪酸的要求,在盐碱地的富 Se 油用向日葵的生产技术中,土施 Se 200 ~ 300 g/hm²有利于提高油用向日葵的营养品质。

4 结论

本研究中,施用 0 ~ 300 g/hm² 硒酸钠有利于油葵产量的提高;施用 100 ~ 200 g/hm² 硒酸钠,可提高油葵籽仁 K、S、Fe、Zn、Mn、Cu、Se、油酸和亚油酸含量,降低籽仁重金属 Cr、Cd、Pb 含量;施用硒酸钠 300 g/hm² 左右有利于降低籽仁棕榈酸和硬脂酸含量。综合考虑,建议在盐碱地富 Se 油葵的生产中,施用 200 ~ 300 g/hm² 硒酸钠对于提高当地油用向日葵的 Se 水平及营养品质效果较好,并且可以适当减少 Fe、Cu、Mn 等微量元素的施用。在后续的研究中,考虑到无机态 Se 的风险性,可以将生物有机 Se、纳米 Se 的制备及吸收机理作为研究重点。

参考文献:

- [1] Wang J W, Wang Z H, Mao H, et al. Increasing Se concentration in maize grain with soil- or foliar-applied selenite on the Loess Plateau in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 83–90.
- [2] 戴志华, 高菲, 赵敏, 等. 作物对硒的吸收利用及合理施用硒肥[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 415–420.
- [3] 咎亚玲, 王朝辉, 毛晖, 等. 施用硒、锌、铁对玉米和大豆产量与营养品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 252–256.
- [4] 翁伯琦, 黄东风, 熊德中, 等. 硒肥对豆科牧草圆叶决明生长和植株养分含量及其固氮能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1056–1060.
- [5] Shibusawa K. Selenium and cancer[J]. *Bibliotheca Nutritio Et Dieta*, 1998, 35(54): 141.
- [6] Mengeil K, Kirkbye A. Principles of plant nutrition[M]. Bern: International Potash Institute, 1987: 687.
- [7] Rankama K. Selenium: Its geological occurrence and its biological effects in relation to botany, chemistry, agriculture, nutrition, and medicine. Sam F. trelease, orville A. beath[J]. *The Journal of Geology*, 1951, 59(2): 184.
- [8] Läubli A. Selenium in plants: Uptake, functions, and environmental toxicity[J]. *Botanica Acta*, 1993, 106(6): 455–468.
- [9] 杨兰芳, 后丹, 万佐玺, 等. 加硒和培养时间对土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2010, 41(5): 1064–1068.
- [10] 咎亚玲, 王磊. 外源硒肥对盐碱地油葵幼苗生长和生理特性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2016(8): 35–39.
- [11] 吴雄平, 梁东丽, 鲍俊丹, 等. Se(IV)和 Se(VI)对小白菜生长及生理效应的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(10): 2163–2171.
- [12] 郭开秀, 姚春霞, 周守标, 等. 施用硒肥对鸡毛菜产量、品质及生理特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 195–198, 203.
- [13] Mao H, Wang J, Zan Y, et al. Mineral nutritional quality of grains improved by soil application of Se and Zn in Loess Plateau of China[J]. *Research on Crops*, 2013, 14(4): 1062–1072.
- [14] Mao H, Wang J, Wang Z, et al. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(2): 459–470.
- [15] 李登超, 朱祝军, 韩秋敏, 等. 硒对菠菜、小白菜生长及抗氧化活性的研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2003, 21(1): 5–8.
- [16] 郭天宇, 徐宁彤, 曲琪环. 叶面喷施不同硒肥对水稻含硒量及产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(7): 59–61.
- [17] 王晋民, 赵之重, 李国荣. 硒对胡萝卜含硒量、产量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 2240–2244.
- [18] 黄太庆, 江泽普, 廖青, 等. 外源硒与不同物料配施对水稻硒素营养及硒利用率的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 269–278.
- [19] 秦玉燕, 王运儒, 时鹏涛, 等. 土壤施硒对茶叶叶片硒及矿质元素含量的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(2): 387–394.
- [20] 杜振宇, 史衍玺, 王清华. 土壤施硒对萝卜吸收转化硒及品质的影响[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 56–60.

- [21] 李登超, 朱祝军, 徐志豪, 等. 硒对小白菜生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 353–358.
- [22] 杨兰芳, 丁瑞兴. 叶面施硒对烤烟生化品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2000, 39(1): 51–53.
- [23] Avry M P, Thiersault M, Doireau P, et al. Some aspects of selenium relationships in soils and plants[J]. *Commune Soil Sci Plant Anal*, 1992, 23: 1397–1407.
- [24] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4119–4125.
- [25] Zhang B W, Zhou K, Zhang J L, et al. Accumulation and species distribution of selenium in Se-enriched bacterial cells of the *Bifidobacterium animalis* 01[J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(2):727–734.
- [26] 胡居吾, 熊华. 土壤中不同硒含量对大豆中主要成分的影响[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(3): 464–471.