

土培条件下外源硒对黄芪吸收和转运硒的影响

耿丽平¹, 乔斌², 赵全利³, 薛培英¹, 刘文菊¹

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071001;

2. 沈阳绿恒环境咨询有限公司, 沈阳 110169; 3. 河北农业大学教学实验场, 河北 保定 071001)

摘要: 以黄芪(*Astragalus membranaceus*)和 2 种价态的硒为主要研究对象, 采用土壤盆栽试验方法探讨了添加不同浓度(0, 2, 4, 6, 8 mg/kg 土)硒酸钠(Se^{VI})和亚硒酸钠(Se^{IV})对黄芪地上部和根系硒累积与分配的影响。结果表明: 土壤中添加硒浓度为 2~6 mg/kg 的亚硒酸钠有利于黄芪地上部和根部干物质的累积, 比 CK 增加 34.55%~38.24%, 但是添加硒浓度超过 2 mg/kg 的硒酸钠抑制了黄芪植株的生长; 添加不同浓度的 2 种形态硒均可显著提高黄芪地上部和根部硒浓度, 且土壤中添加硒酸钠和亚硒酸钠的硒浓度分别与黄芪植株硒含量呈极显著正相关关系(Se^{VI} : $r=0.884^{**}$, Se^{IV} : $r=0.973^{**}$); 随着硒处理浓度的升高, 添加硒酸钠和亚硒酸钠处理的黄芪根系对硒吸收能力高于对照, 转移系数和富集系数均大于 1, 且硒含量地上部>根部, 这表明土壤中添加外源硒可以提高黄芪对硒的吸收和转运能力。综上所述, 在中性偏碱性土壤上施用硒酸钠和亚硒酸钠均可促进黄芪对外源硒的吸收、转运和累积, 且土壤施用 2~6 mg/kg 的亚硒酸钠对黄芪的生长和硒的累积效果更好。

关键词: 外源硒; 黄芪; 干物重; 硒累积和转运

中图分类号: S143.7⁺1; S567.23⁺9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0372-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.054

Effect of Exogenous Se on the Uptake and Translocation of Se in *Astragalus membranaceus* Using Soil Pot Experiment

GENG Liping¹, QIAO Bin², ZHAO Quanli³, XUE Peiying¹, LIU Wenju¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Key Laboratory for

Farmland Eco-Environment, Baoding, Hebei 071001; 2. Green Constant Environmental Consulting Limited Company of

Shenyang, Shenyang 110169; 3. The Teaching Experiment Field, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001)

Abstract: *Astragalus membranaceus* could accumulate selenium (Se) generally, but the uptake and translocation Se in this plant are still not clear. The soil pot experiment was conducted to explore the effects of different concentrations (0, 2, 4, 6, 8 mg/kg soil) as sodium selenite (Se^{IV}) and sodium selenate (Se^{VI}) added in soil on Se uptake, translocation and accumulation in *Astragalus membranaceus*. The results showed that the application of Se at the rate of 2~6 mg/kg as Se^{IV} increased the shoots and roots dry weights of *Astragalus membranaceus* by 34.55%~38.24%, compared to the control, whereas the application of Se with more than 2 mg/kg as Se^{VI} inhibited the growth of *Astragalus membranaceus*. Moreover, the application of different concentrations Se as Se^{VI} and Se^{IV} increased Se concentrations in the shoots and roots, and there were the significant and positive relationships between Se concentrations added in soil and that in plants (Se^{VI} : $r=0.884^{**}$, Se^{IV} : $r=0.973^{**}$). With the increasing of Se application rates, the Se uptake capacity of *Astragalus membranaceus* was higher than the control, and the bioaccumulation factors and transfer factors were more than 1, and Se concentrations in plant shoots were higher than those of roots, which indicated that exogenous Se might improve the uptake and transport of selenium in *Astragalus membranaceus*. In conclusion, sodium of selenite and selenate added in the soil with $\text{pH}>7.0$ could enhanced the uptake, transport and accumulation of Se in *Astragalus membranaceus*, and the application of 2~6 mg/kg in soil would be better for the growth

收稿日期: 2017-09-27

资助项目: 河北省高等学校创新团队领军人才培养计划项目(LJRC016); 国家自然科学基金项目(41471398)

第一作者: 耿丽平(1984—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事土壤环境质量研究。E-mail: genglip486@126.com

通信作者: 刘文菊(1971—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源与环境领域的研究。E-mail: liuwj@hebau.edu.cn

of this plant and Se accumulation in the shoots and roots.

Keywords: exogenous Selenium; *Astragalus membranaceus*; dry weights; Se accumulation and transfer

硒是人体和动物所必需的微量元素^[1], 缺硒可引起人类克山病、大骨节病、地方性癌症等多种疾病^[2]。我国有近 2/3 面积的地区缺硒, 成人每日摄入硒含量仅为 26 μg , 与中国营养学会推荐的每日最低硒摄入量 50 μg 相差较大^[3-4]。就人体和动物对硒的吸收而言, 硒在体内无法自主合成, 人和动物摄入硒元素主要来源于植物, 而土壤中的硒含量状况很大程度上决定了植物硒含量^[5]。我国已研制出一些富硒稻米^[6]、茶^[7]、蔬菜^[8]、灵芝^[9]等产品, 但总体来说, 我国富硒食品、药物的种类和数量仍然很少。

目前国内在黄山贡菊、紫云英、玉米、水稻等作物上采用土壤施入硒的方式进行试验^[3,10-11], 也有通过水培条件下施入硒的方式来探讨大蒜对硒的富集能力^[12]。黄芪属多年生草本植物, 具有富硒^[13]、抗氧化性和抗肿瘤性^[14]等特点, 目前采用土壤施入硒的方式对黄芪的试验较少。因此, 在土壤培养条件下研究黄芪富集硒的特点对于提高黄芪中硒含量及其药用价值有着重要的意义。前期研究^[15]表明, 水培条件下施用硒酸钠和亚硒酸钠可提高黄芪地上部和根干重以及黄芪植株中硒含量。基于此, 本研究拟通过土壤中施入不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠, 以明确黄芪地上部和根部硒含量特征, 探究黄芪对硒的吸收转运能力, 以期对黄芪生产中科学合理地施入硒元素提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

室内试验于 2015 年 3 月 2 日至 9 月 30 日在河北农业大学资环学院人工光照培养室进行。

供试植物: 膜荚黄芪 (*Astragalus membranaceus*), 由安国市元泰中药材种子经营部提供。

供试土壤: 取自河北农业大学教学实验场三分场, 土壤类型为潮褐土, 基本理化性质: 碱解氮 43.5 mg/kg, 速效磷含量 12.5 mg/kg, 速效钾含量 45.8 mg/kg, 全硒含量 268 ng/g, pH 7.21。土壤经风干、磨碎, 过 5 mm 筛。黄芪适宜种植于透水性强的砂质土壤上, 根据该特性开展了前期预试验, 筛选适宜的土砂比, 其中建筑用砂先过 5 mm 筛, 然后洗净备用, 结果显示按土壤: 建筑用砂为 5:1 的比例混合后, 其基质有利于黄芪幼苗的生长, 因此将土壤与洗净烘干的建筑用砂按比例充分混匀后备用, 测定土砂混合的培养基质全硒含量为 230 ng/g。

供试硒源: 硒酸钠 ($\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 和亚硒酸钠 (Na_2SeO_3), 均为分析纯。

1.2 黄芪植株的培养

选取大小均匀、籽粒饱满的黄芪种子 100 粒, 用 10% 的 H_2O_2 浸泡 15 min, 然后用超纯水冲洗后均匀播种到洗净的石英砂中, 深度约为 1 cm, 置于避光处待种子萌发。种子出芽后移入植物培养箱中, 昼夜室温 25/20 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 40%~50%, 光照时间 14 h/d, 光强为 $(240 \pm 20) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。待黄芪种子出芽一周后定期向石英砂中浇营养液, 营养液^[15]组成为: 0.60 mmol/L KNO_3 、0.40 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.10 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.20 mmol/L $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、0.36 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、2.00 $\mu\text{mol}/\text{L}$ H_3BO_3 、0.06 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、0.04 $\mu\text{mol}/\text{L}$ NaMoO_4 、0.10 $\mu\text{mol}/\text{L}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、20.0 $\mu\text{mol}/\text{L}$ FeNa EDTA 。幼苗生长 20 d 后移栽至含有不同硒浓度的土壤中。

1.3 试验设计

供试土壤中硒含量接近我国土壤平均硒含量 210 ng/g, 属于贫硒土壤, 为了进一步明确黄芪地上部和根部对土壤硒的富集能力, 本研究分别以硒酸钠和亚硒酸钠作为硒源在土壤中添加不同含量的硒, 2 种价态硒的添加浓度均为 2, 4, 6, 8 mg/kg 土, 并设 1 个对照, 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 27 盆。具体操作: 每个培养钵中装入 700 g 培养基质 (土砂比为 5:1), 由于添加的 2 种形态硒的浓度较低, 为了避免直接称重固体试剂将其混入土壤中产生较大的误差, 采用硒酸钠溶液、亚硒酸钠溶液的形式混入土壤中。根据硒浓度处理将不同硒浓度的等量溶液混入土壤中, 充分混匀后装盆, 每 3 个重复为 1 组进行培养基质与处理液混匀, 其中对照混入等量的蒸馏水。全部处理完成后, 每盆加入蒸馏水 300 mL, 平衡 2 周。待培养基质为湿润状态后, 选取大小一致的 4 株黄芪幼苗栽入培养钵中, 在每盆土壤上部铺一层 2 cm 厚的石英砂以保证黄芪幼苗的成活。每天适量 (2 mL/盆) 喷洒营养液供黄芪幼苗吸收利用。每周浇蒸馏水 2 次, 每次 200 mL, 相对湿度保持在 70%, 6 个月后收获黄芪植株地上部、根部及土壤样品。

1.4 样品的制备与分析

土壤样品制备: 将收获的土壤样品风干, 用木棍压碎, 混匀, 采用四分法取压碎样, 过孔径 1 mm 尼龙筛。过筛后的样品充分混匀, 用玛瑙研钵研磨至全部过孔径 0.15 mm 筛, 装袋备用, 编号。

植物样品制备: 用自来水冲洗除去黄芪植株和根部的泥土等附着物, 分别用蒸馏水、超纯水冲洗 3 遍, 阴干, 将全部黄芪地上部与根部分开, 分别放入干净

的自封袋内,编号。在 65 ℃烘箱中烘至恒重,用微型粉碎机(塑料内胆,不锈钢刀片)粉碎后备用。

植物、土壤样品分别采用 $\text{HNO}_3\text{—H}_2\text{O}_2$ 和 $\text{HNO}_3\text{—HClO}_4$ 闷罐消解法进行前处理^[16],用原子荧光光度计(AFS9600,北京海光仪器有限公司)测定黄芪地上部、根部以及土壤中 Se 含量。分析样品同时以国家一级标准物质(土壤:GBW 07404;植物:GBW 07603)进行准确度和精密度控制,回收率为 95%~120%。

1.5 数据分析与处理

转运系数:地上部与根中 Se 浓度的比值,表示 Se 由根系被转运至地上部的能力^[17]。

富集系数:地上部和根系中 Se 浓度分别与土壤中 Se 浓度的比值,分别表示 Se 在黄芪体内的富集情况^[17]。

黄芪根系对硒的吸收能力^[18]:表示根系对硒的吸收能力,用黄芪吸收的硒总量除以黄芪的根干重。用 Specific Arsenic Uptake 来表示,计算公式为:

$$\text{SAU}=(T_{\text{Root-Se}}+T_{\text{Shoot-Se}})/\text{Root biomass}$$

所得数据采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 添加不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠对黄芪生长状况的影响

由表 1 可知,以硒酸钠作为硒源时,不同浓度处理的黄芪地上部、根部干重均显著低于 CK($P<0.05$)。在 Se 添加浓度为 2 mg/kg 时,黄芪地上部和根部干重最大,显著高于其他硒浓度处理($P<0.05$),但低于对照;硒浓度 8 mg/kg 处理的黄芪地上部和根部干重最小,分别比 CK 降低 75.74%和 70.37%;硒浓度 4,6 mg/kg 处理组之间黄芪地上部干重差异不显著($P>0.05$),其他各处理组之间的差异显著($P<0.05$)。以亚硒酸钠作为硒源时,硒浓度 2,4,6 mg/kg 处理的黄芪地上部的干重比 CK 显著增加了 34.55%~38.24%($P<0.05$),但这 3 个处理之间差异不显著($P>0.05$);硒浓度 8 mg/kg 处理的黄芪地上部干重最小,比 CK 降低 22.79%;但是,硒浓度 2,4,6,8 mg/kg 处理的黄芪根部干重比 CK 显著增加了 30.86%~125.93%($P<0.05$)。

综上所述,土壤中添加浓度为 2,4,6 mg/kg 亚硒酸钠有利于增加黄芪地上部和根部干重的累积,但在添加硒酸钠浓度超过 2 mg/kg 时却抑制了黄芪植株的生长。

2.2 添加不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠对黄芪地上部和根部硒含量的影响

随着硒浓度的升高,添加硒酸钠的黄芪地上部和根部硒含量均呈先上升后下降的趋势,添加亚硒酸钠的黄

芪地上部和根部硒含量呈逐渐升高的趋势(表 2)。所有添加外源硒的黄芪硒含量均呈现地上部>根部。此外,对同一浓度硒酸钠和亚硒酸钠的黄芪地上部与根部硒含量进行单因素方差分析,结果表明添加硒酸钠的黄芪地上部和根部中硒含量均高于亚硒酸钠处理,且差异显著($P<0.05$),土壤中添加硒酸钠和亚硒酸钠的硒浓度分别与黄芪植株硒含量呈极显著正相关关系($\text{Se}^{\text{VI}}:r=0.884^{**};\text{Se}^{\text{IV}}:r=0.973^{**}$)。

表 1 不同浓度硒酸钠和亚硒酸钠对黄芪地上部和根部干重的影响 单位:g/盆

Se 处理浓度/ (mg·kg ⁻¹)	硒酸钠		亚硒酸钠	
	地上部干重	根部干重	地上部干重	根部干重
0	1.36±0.08a	0.81±0.04a	1.36±0.08b	0.81±0.04d
2	1.15±0.05b	0.55±0.06b	1.83±0.02a	1.30±0.03b
4	0.66±0.04c	0.29±0.03c	1.88±0.03a	1.82±0.07a
6	0.76±0.08c	0.35±0.05c	1.86±0.05a	1.83±0.01a
8	0.33±0.06d	0.24±0.00c	1.05±0.06c	1.06±0.05c

注:表中数据为 3 个重复的平均值,同列数据不同字母表示不同处理浓度间差异达 0.05 显著水平。下同。

对于添加不同浓度硒酸钠和亚硒酸钠黄芪地上部、根部硒含量而言,各处理与 CK 相比差异显著($P<0.05$)。在外源硒添加浓度为 6 mg/kg,添加硒酸钠的黄芪地上部和根部硒含量最高,分别为 CK 的 77.54,39.91 倍,其中 4,8 mg/kg 浓度处理之间差异不显著($P>0.05$),其他处理组之间差异显著($P<0.05$);在外源硒添加浓度为 8 mg/kg,添加亚硒酸钠的黄芪地上部和根部硒含量最高,分别是对照的 19.67,11.16 倍,其中 4,6 mg/kg 处理之间差异不显著($P>0.05$),其他处理组之间差异显著($P<0.05$)。由此可见,无论是添加硒酸钠还是亚硒酸钠,2,4,6,8 mg/kg 土均可增加黄芪地上部和根部硒含量。

表 2 不同浓度硒酸钠和亚硒酸钠处理下黄芪地上部和根部硒含量 单位:mg/kg

Se 处理浓度/ (mg·kg ⁻¹)	硒酸钠		亚硒酸钠	
	根部硒含量	地上部硒含量	根部硒含量	地上部硒含量
0	3.70±0.06d	3.99±0.16d	3.70±0.06d	3.99±0.16d
2	76.09±2.74c	40.21±4.25c	21.15±1.55c	19.36±0.45c
4	225.56±9.92b	129.60±7.69b	49.49±3.81b	26.58±2.39b
6	286.77±4.76a	159.06±2.53a	51.07±1.25b	30.09±1.02b
8	230.93±8.98b	135.57±7.90b	72.74±1.97a	44.47±4.35a

2.3 添加不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠对黄芪吸收硒能力的影响

用单位吸硒能力(specific arsenic uptake,SAU)来表示黄芪根系对硒的吸收能力。从表 3 可以看出,土壤中添加不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠,黄芪根系吸收硒的能力均高于 CK,说明土壤中添加外源硒,可以提高黄芪根系对硒的吸收能力。添加硒酸钠的黄芪根系对硒的吸收能力呈先上升后下降的趋势,在

6 mg/kg 处理浓度时, 硒的吸收能力达最大, 为 797.45 mg/kg, 与 4 mg/kg 处理浓度差异不显著($P>0.05$), 但是与其他处理差异显著($P<0.05$); 添加亚硒酸钠的黄芪根系对硒的吸收能力呈现逐渐升高的趋势, 在 8 mg/kg 处理浓度时, 硒的吸收能力达最大, 为 116.75 mg/kg, 与其他处理差异显著($P<0.05$)。

在 Se 添加浓度为 2, 4, 6, 8 mg/kg 时, 添加硒酸钠的黄芪对硒的吸收能力分别是添加亚硒酸钠的 4.06, 8.39, 9.72, 2.23 倍。

表 3 添加不同浓度硒酸钠和亚硒酸钠
黄芪对硒的吸收能力 单位: mg/kg

Se 处理浓度/ (mg · kg ⁻¹)	吸收能力	
	硒酸钠	亚硒酸钠
0	10.20±0.25d	10.20±0.25d
2	200.33±17.03c	49.03±2.00c
4	650.98±66.92a	77.58±4.75b
6	797.45±106.49a	82.01±2.46b
8	285.13±39.05b	116.75±11.83a

表 4 添加不同浓度硒酸钠和亚硒酸钠黄芪地上部、根部对硒的富集系数和转运系数

Se 处理浓度/ (mg · kg ⁻¹)	硒酸钠			亚硒酸钠		
	转运系数	地上部富集系数	根部富集系数	转运系数	地上部富集系数	根部富集系数
0	0.93	2.26	2.44	0.93	2.26	2.44
2	1.93	5.67	3.03	1.09	2.90	2.65
4	1.75	7.98	4.56	1.87	3.78	2.03
6	1.80	8.28	4.60	1.70	2.34	1.38
8	1.71	4.82	2.82	1.67	2.63	1.61

3 讨论

硒是人体所必需的微量元素, 对植物来说也是必不可少的有益元素。硒可刺激植物的生长发育, 提高作物的产量和品质, 增强植物抗性等^[19]。本研究显示, 添加一定浓度(2~6 mg/kg)的亚硒酸钠和低浓度(<2 mg/kg)的硒酸钠有利于河北地产草药黄芪的生长, 生物量可增加 30% 以上(表 1); 已有的调查显示, 甘肃省定西区的中草药—黄芪、甘草、当归、板蓝根和柴胡这 5 种中草药对硒有一定的生物积累作用, 且以黄芪硒积累量最高^[20]。黄芪属植物具有硒的累积特性在本研究中也得到证实, 表明土壤中硒含量的高低直接决定黄芪对硒的富集能力。在贫硒的土壤上(CK)种植黄芪, 硒在黄芪中的含量较低, 且其地上部和根部含量差异不大(表 2), 但是无论添加外源六价硒或四价硒, 均显著促进了黄芪对土壤中硒的富集。赵中秋等^[21]研究表明土壤总硒含量及水溶性 Se 含量与植物 Se 含量呈现显著的正相关性; 翁伯琦等^[22]研究表明, 随着硒浓度的提高可以增加草药圆叶决明植株中硒含量; 孔娟娟等^[10]发现土壤施亚硒酸钠可显著提高黄山贡菊各部位总硒含量; 付小丽^[5]发现土壤施用硒酸钠后小麦、油菜中硒含量表现

2.4 添加不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠对黄芪富集、转运硒的影响

由表 4 可知, 随着添加硒浓度的升高, 添加硒酸钠和亚硒酸钠的黄芪中 Se 转运系数呈先上升后下降的趋势, 且均>1>CK; 在硒酸钠和亚硒酸钠浓度处理分别为 2, 4 mg/kg 时, 黄芪中硒的转运系数最大, 分别为 1.93 和 1.87。

随着添加硒浓度的升高, 添加硒酸钠和亚硒酸钠的黄芪地上部、根部富集系数均呈先上升后下降的趋势, 富集系数均>CK>1, 这表明土壤中添加外源硒可提高黄芪不同部位对硒的富集能力。添加硒浓度为 6 mg/kg 的硒酸钠处理黄芪, 其地上部和根部对硒的富集系数最大, 分别为 8.28 和 4.60; 在亚硒酸钠浓度处理为 2, 4 mg/kg 时, 黄芪根部和地上部富集系数最大, 分别为 2.65 和 3.78; 除 CK 外, 添加硒酸钠和亚硒酸钠处理的黄芪对硒富集能力为地上部>根部。

为地上部>根部, 这与本研究中结果相一致。但是周鑫斌等^[23]的研究表明土壤中添加适量浓度的亚硒酸钠后水稻中硒含量表现为根>籽粒>叶>茎, 与本研究结果不同, 这是因为水稻生长在淹水的环境中, 而黄芪生长在旱地土壤中, 两种土壤氧化还原状态不同, 从而土壤硒酸盐和亚硒酸盐的分配比例存在差异, 前者土壤主要是亚硒酸盐, 后者黄芪生长的土壤中主要是硒酸盐。前人研究表明植物以主动运输的形式吸收硒酸盐, 以被动运输的形式吸收亚硒酸盐^[24], 并且植物体内是以硒酸根的形态进行转移的, 当土壤中亚硒酸盐含量较高时, 水稻根系将吸收来的亚硒酸根离子转化为硒酸根离子再运往其他组织, 但转化过程明显慢于吸收过程, 因此会导致根系中硒含量较高^[25], 而黄芪可以直接吸收和转运硒酸盐, 根系吸收的硒酸盐会很快被转移至地上部。因此, 本研究中添加硒的处理地上部硒含量显著高于根部(表 2)。

一般而言, 亚硒酸盐是土壤中硒的主要赋存形态, 广泛分布在温带湿润地区, 硒酸盐是土壤硒存在的最高价态, 主要存在于通气性好的碱性土壤中。河北地产草药黄芪生长在通气良好的石灰性土壤中, 二者都易被植物吸收利用; 添加同一浓度的硒酸钠的黄

芪地上部、根部硒含量均高于施用亚硒酸钠,除了以上原因外,由于硒酸钠易溶于水,不易被铁氧化物固定,易被植物吸收^[26],而亚硒酸钠盐易与铁结合形成水溶性很低的氧化物或水合氧化物而被固定,导致土壤中部分亚硒酸钠不易被植物吸收,土壤中有效硒含量降低^[15]。而徐文^[26]的研究表明在供应等量硒时,植物吸收硒酸盐的能力是吸收亚硒酸盐的 8~10 倍,这与本研究中添加硒酸钠的吸收能力是亚硒酸钠的 2.23~9.72 倍结果相一致。

虽然土壤中施用硒酸钠对比施用亚硒酸钠有利于黄芪对硒的富集,但是本研究中添加硒酸钠抑制了黄芪的生长,可能是因为外源硒的浓度过高。施用适量浓度的亚硒酸钠可促进黄芪的生长,提高黄芪体内硒含量;综上所述,在中性偏碱性土壤上施用硒酸钠和亚硒酸钠可促进黄芪对外源硒的吸收、转运和累积,且土壤施用 2~6 mg/kg 土的亚硒酸钠对黄芪的生长和累积硒的效果更好。

4 结论

(1)土壤中添加 Se 浓度为 2~6 mg/kg 的亚硒酸钠可增加黄芪地上部和根部干重,但添加 Se 浓度超过 2 mg/kg 的硒酸钠抑制了黄芪生长。

(2)土壤中添加不同浓度的硒酸钠和亚硒酸钠可显著提高黄芪地上部、根部硒含量,且土壤中以硒酸钠和亚硒酸钠添加的硒浓度分别与黄芪植株硒含量呈极显著正相关关系($Se^{VI}:r=0.884^{**}$, $Se^{IV}:r=0.973^{**}$)。

(3)土壤中添加外源硒可提高黄芪对硒的吸收和转运能力。

参考文献:

- [1] 牛艳,王彩霞,李彩虹,等.施硒对宁夏枸杞含量及品质的影响[J].北方园艺,2016(20):159-162.
- [2] Rayman M P. Selenium and human health[J]. Lancet, 2012,379(9822):1256-1268.
- [3] 铁梅,韩杰,李宝瑞,等.土壤施硒对燕麦硒含量及产量的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(5):74-80.
- [4] 彭祚全,张欣,牟敏,等.富硒食品含硒量范围标准的研究[J].微量元素与健康研究,2013,30(1):41-43.
- [5] 付小丽.不同硒源对小麦和油菜生长及硒源累积的影响[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [6] 黄青青,杜威,王琪,等.水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J].环境科学学报,2012,33(5):1423-1429.
- [7] 吴一群,林琼,颜明娟,等.施硒对紫云英硒积累及土壤硒状况的影响[J].热带作物学报,2017,38(1):24-27.
- [8] 刘新伟,王巧兰,段碧辉,等.亚硒酸盐对油菜幼苗硒吸收、根系形态及生理指标的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):2050-2056.
- [9] 胡海涛,袁林喜,尹雪斌,等.耐硒驯化灵芝菌种的液态发酵中硒的富集特征[J].食品与发酵工业,2012,38(8):7-11.
- [10] 孔娟娟,周守标,奚功芳,等.2种施硒方式对黄山贡菊生长、生理特性及硒积累的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):310-316.
- [11] 郝玉波,刘华琳,慈晓科,等.施硒对两种类型玉米硒元素分配及产量、品质的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):411-418.
- [12] 王晋民,蔡甲福.不同硒处理对大蒜含硒量及产量和品质的影响[J].中国农学通报,2006,22(4):342-344.
- [13] 赵全利,耿丽平,乔斌,等.施硒对黄芪生长硒含量及转运的影响[J].中国农学通报,2017,33(6):91-96.
- [14] 张亚非,吴凤兰,张明珠.硒化黄芪多糖对小鼠的抑瘤和抗氧化作用研究[J].中国公共卫生学报,1997,16(4):229-230.
- [15] 乔斌.黄芪对硒的富集转运特性研究[D].河北保定:河北农业大学,2013.
- [16] 褚卓栋,刘文菊,肖亚兵,等.中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价[J].环境科学,2010,31(6):1600-1607.
- [17] 高宁大,耿丽平,赵全利,等.外源磷或有机质对板蓝根吸收转运的影响[J].生态学报,2013,33(9):2719-2727.
- [18] 刘文菊,胡莹,毕淑芹,等.苗期水稻吸收和转运硒的基因型差异研究[J].中国农学通报,2006,22(6):356-360.
- [19] 杨柳,石卓功.植物体内硒素的研究进展[J].现代农业科技,2011(2):37-38.
- [20] 汪喜生,许洲,饶姗姗.土壤中硒元素在中草药中的富集[J].光谱实验室,2005,22(3):625-627.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 周鑫斌,施卫明,杨林章.富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J].土壤,2007,39(5):731-736.
- [24] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Journal of Experimental Botany,1993,44(263):1083-1087.
- [25] Asher C J, Butler G M, Peterson P J. Selenium transport in root systems of tomato[J]. Journal of Experimental Botany,1997,28(103):279-291.
- [26] 徐文.硒的生物有效性及植物对硒的吸收[J].安徽农学通报,2009,15(3):46-47.