

硒在辣木-土壤中的迁移转运规律

唐昌贵^{1,2}, 罗顺福³, 芮文洁², 严红梅¹, 尹本林¹, 杜丽娟^{1*}

(1. 云南省农业科学院质量标准与检测技术研究所, 昆明 650223;

2. 永胜县六德乡农业综合服务中心, 丽江 674213; 3. 江城县农业环境保护监测站, 普洱 665900)

摘 要: 目的 研究硒在辣木中的富集效果以及土壤、辣木中硒含量的相关性。**方法** 以盆栽辣木为实验材料, 以电感耦合等离子体质谱仪为检测手段, 以基施和喷施为外源硒添加方式进行研究。**结果** 辣木是较好的硒富集植物, 喷施添加比基施添加对硒的富集作用明显, 喷施处理后, 辣木杆、根及土壤中硒含量比未添加分别增加了约 10 倍、6 倍、1 倍; 基施处理后, 辣木杆、根及土壤中硒含量比未添加分别增加了约 2 倍、2 倍、3 倍; 与基施相比, 喷施后硒的生物可利用性更高。硒添加后, 在辣木-土壤系统中迁移转运, 与从地下部分到地上部分的转运效率相比, 从地上部分到地下部分的转运效率更高, 且硒主要在杆中积累; 且随着喷施量的增加, 硒会逐渐迁移转运至根部, 并在根中积累, 富集效果: 杆 > 根 > 土壤。**结论** 本研究为生产中通过施硒肥的外源调控措施来改善植物中硒含量, 为更合理地开发利用富硒产品提供了技术支撑。

关键词: 硒; 辣木; 土壤; 迁移; 转运

Migration and transportation of selenium in *Moringa oleifera* Lam.-soil system

TANG Chang-Gui^{1,2}, LUO Shun-Fu³, RUI Wen-Jie², YAN Hong-Mei¹, YIN Ben-Lin¹, DU Li-Juan^{1*}

(1. Institute of Agriculture Quality Standards & Testing Technique, Yunnan Academy of Agricultural Science, Kunming 650223, China; 2. Agricultural Comprehensive Service Center of Liude Township Yongde County, Lijiang 674213, China; 3. Agricultural Environmental Protection Monitoring Station, Puer 665900, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the enrichment and transportation of selenium in *Moringa oleifera* Lam.-soil system. **Methods** The potted *Moringa oleifera* Lam. was used as the test materials, the inductively coupled plasma mass spectrometry was used as the detection method, and base application and spraying were used as the exogenous selenium addition way. **Results** *Moringa oleifera* Lam. was a better selenium-enriched plant. With the addition way of spraying and basing, the spray application was more effective than the addition of base to selenium. After spraying, the selenium content in rod, root and soil increased by about 10 times, 6 times and 1 time, respectively; The results showed that the content of selenium in rods, roots and soil increased by 2 times, 2 times and 3 times, respectively; Compared with no addition, and the bioavailability of selenium was higher after spraying. After selenium was added, the transportation efficiency from the aboveground part to the underground part was higher than that from the underground part to the aerial part in the soil-*Moringa oleifera* Lam.-soil system, and then selenium was

基金项目: 国家重点研发计划专项(2018YFD0800603)、云南省农业科学院应用基础研究专项(YJM201701)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Project (2018YFD0800603), and the Yunnan Academy of Agricultural Sciences Applied Basic Research Special Project (YJM201701)

*通讯作者: 杜丽娟, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及营养品质分析研究。E-mail: 36violet@163.com

*Corresponding author: DU Li-Juan, Master, Associate Professor, Institute of Agriculture Quality Standards & Testing Technique, Yunnan Academy of Agricultural Science, Kunming, No.2238, Beijing Road, Kunming 650223, China. E-mail: 36violet@163.com

mainly accumulated in the rod. As the amount of addition increased, selenium would gradually migrate to the soil and accumulate in the soil, thereby effectively improving the selenium deficiency state of the soil, and the enrichment effect of selenium was: rod>root>soil. **Conclusion** The experimental research provides a scientific basis for improving the availability of selenium in plants through exogenous regulation measures of selenium application in production, and provides technical support for more rational development and utilization of selenium-enriched products.

KEY WORDS: selenium; *Moringa oleifera* Lam.; soil; migration; transportation

1 引言

硒(selenium, Se)位于化学元素周期表第四周期第VI主族,属于非金属元素^[1]。硒是人类及动物体内必需的微量元素之一,是动物和人体内许多蛋白质的重要组分,能平衡体内氧化还原反应,提高机体的免疫水平,预防心脑血管疾病和癌症等^[1-3]。硒与植物之间存在剂量效应,在一定浓度范围内具有促进生长发育、提高产量与品质、增强抗氧化和抗逆性,减弱植物体内重金属毒性,抵抗非生物应力的作用^[4-7]。张璐^[4]研究表明叶面喷施硒可以增加干旱胁迫下油菜籽的产量;徐向华等^[8]研究表明喷施硒可以增加水稻的产量;Mateja 等^[9]研究表明低浓度硒可增加南瓜的产量;Navin 等^[10]研究表明施硒可减轻生物或非生物应力,缓和营养失调,促进植物生长;Amit 等^[11]研究表明经过硒处理后,水稻根苗的生长和生物量有明显增加。因此硒能够促进植物生长,增强植物的抗氧化能力,减少植物体内的活性氧的含量,缓解植物体内脂质过氧化,增加植物体内淀粉和糖的积累从而延缓植株的衰老,促进幼苗的生长^[4]。

辣木(*Moringa oleifera* Lam.),属十字花目白花菜(Capparales)亚目辣木科(Moringaceae)植物^[12,13],喜光、耐旱,为热带落叶乔木^[14],是一种具有独特经济价值的热带植物,享有“生命之树”“素食金”等美誉^[15]。辣木与西洋参、灵芝并称为世界植物三宝,辣木的嫩叶和果荚是营养丰富且味道鲜美的蔬菜,根和皮是中药材,种子可以榨油^[16,17]。辣木是目前已发现的较好的植物蛋白、维生素、硒等矿质元素的主要来源之一,有独特经济价值和保健功效^[18,19]。近年来,对辣木的研究越来越受到关注,辣木这种新型营养植物,已被世界上许多国家认可并作为替代食品和保健食品^[20,21]。随着人们生活水平和膳食营养及健康意识的不断提高,富硒农产品具有很高的附加值和巨大的发展潜力,富硒辣木作为一种高附加值的多功能植物,可用于多样化开发和综合利用^[15]。本研究采用盆栽实验方法,应用生理生化测定技术、等离子体质谱法等技术手段,以幼龄期辣木为主要实验材料,通过土壤基施和根外喷施外源硒的相关实验设置,研究外源硒作用下土壤与辣木中硒含量的相关性,探讨外源硒对辣木硒吸收富集效果的影

响。旨在为了解硒元素及其赋存形态在植物营养化学和土壤环境学上的意义提供科学支持,为更合理的开发利用富硒产品提供技术支撑。

2 材料与方法

2.1 试剂与仪器

Elan DRC-e 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Perkin Elmer 公司);EHD36 石墨炉消解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司);Binder FD115 电热鼓风干燥箱(德国 Binder 公司);ML204 电子分析天平(感量为 0.1 mg,梅特勒-托利仪器股份有限公司)。

硝酸(HNO₃, 电子级, 65%~68%, 苏州晶瑞化学股份有限公司);高氯酸(HClO₄)、氢氟酸(HF)、亚硒酸钠(GR, 国药集团化学试剂有限公司);实验用其他试剂均为优级纯及以上;实验用水为一级水。

硒标准储备液(10 mg/L, 中国计量科学研究院);铈/锆元素储备液(1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

2.2 实验方法

2.2.1 实验材料

实验地点:中国科学院西双版纳热带植物园,位于云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇葫芦岛,东经 101°16',北纬 21°55',海拔 552 m,面积 11.25 km²,属北热带季风气候,年平均气温 21.4 °C,热量丰富,夏无酷暑,冬无严寒,降水充沛,旱雨季分明,年均降雨量 1200~1600 mm,适宜栽种辣木。

实验盆栽用种植土壤取自园区内实验田,属于砖红壤,土壤的基本理化性质为: pH 5.05, 有机质含量 3.23%, 总氮 0.185%, 水解性氮 143 mg/kg, 有效磷(P₂O₅) 22.9 mg/kg, 速效钾(K₂O) 168 mg/kg, 总硒(Se) 0.028 μg/kg;移栽前幼苗的硒含量为秆中 0.093 mg/kg, 根中 0.056 mg/kg。

2.2.2 实验设计

将辣木苗移栽到盆中(移栽时辣木苗株高 15~18 cm, 每盆约装 25 kg 土壤),分别在移栽 30、90 d 后各施 1 次复合肥(18 g/株/次, 复合肥中的 N:P:K=15:15:15), 生长期间通过喷灌保持土壤湿度 60%~70%, 没有使用过任何农药。

实验中对盆栽辣木苗进行基施和喷施的外源硒添加处理, 按不同质量称取亚硒酸钠, 加水, 摇匀, 共做 10 个处理, 每个处理做 10 个重复; 基施采用开沟灌根法一次性施入, 即沿每株苗株基部开挖深度约 10 cm 的半环形沟, 将配制好的亚硒酸钠溶液一次性浇入, 然后用土掩埋; 喷施采用均匀喷洒, 即以等量的水配制不同浓度的亚硒酸钠溶液, 小心喷洒于叶面, 避免喷洒过多, 液体顺着茎秆流下来, 对照处理以喷施等量水代替亚硒酸钠溶液。每盆间距 30 cm, 喷施和基施隔行分别进行添加, 喷施时用塑料膜遮于盆上, 以避免喷施硒的时候造成间接污染; 喷施亦采用一次性添加, 选择晴朗的天气进行喷施, 连续喷 3 d。设置实验中硒的添加量见表 1, 共 10 个处理。

表 1 盆栽辣木苗不同硒添加处理 Table 1 Potted <i>Moringa oleifera</i> Lam. seedlings with different selenium addition treatment		
处理编号	不同添加处理	硒添加量
0	不添加	0
1	喷施	0.01 mg /L
2	喷施	0.05 mg /L
3	喷施	0.10 mg /L
4	喷施	0.20 mg /L
5	基施	0.01 mg /kg
6	基施	0.1 mg /kg
7	基施	0.2 mg /kg
8	基施	0.5 mg /kg
9	基施	1.0 mg/kg

2.2.3 试样的采集与处理

硒添加处理后的辣木苗生长半年, 采集整株辣木苗, 用去离子水清洗苗株, 洗干净的苗株晾干表面水分, 切分苗株的杆和根。分别切碎苗株的杆和根, 置于烘箱中, 75 ℃烘干, 取出冷却至室温, 用粉碎机打成粉末并过 0.150 mm 的筛, 装入样品瓶中, 干燥保存, 备用。

采集苗株的同时, 采集盆内土壤, 土壤样品的采集深度为 0~30 cm。带回实验室的土壤样品, 一部分用于测定土壤基本理化性质, 一部分风干备用。将土壤样品放在样品盘上, 摊开, 置于干净整洁的室内通风处自然风干, 翻动土样并除去石子和植物残体, 用四分法进行取舍, 研磨过 0.150 mm 的筛, 装入样品瓶中, 干燥保存, 备用。

2.2.4 标准溶液配制

硒标准工作溶液: 吸取适量储备液, 用 1%的 HNO₃ 溶液定容, 配成标准工作溶液系列。依据样品消解溶液中硒的质量浓度水平, 适当调整标准系列中硒的质量浓度范围。

内标(铑, Rh)使用液: 取适量内标储备液, 用 1%的 HNO₃ 溶液定容, 配成合适浓度的内标使用液。内标溶液即可在配制标准工作溶液和样品消化液中手动定量加入, 也可由仪器在线加入。

由于不同仪器采用的蠕动泵管内径不同, 当在线加入内标时, 需考虑使内标元素在样液中的浓度, 样液混合后的内标元素参考浓度范围为 25~100 μg/L, 低质量数元素可以适当提高使用液浓度。

2.2.5 土壤基本理化指标的测定

土壤 pH 的测定: NY/T 1121.2-2006《土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定》^[22];

土壤有机质的测定: NY/T 1121.6-2006《土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定》^[23];

土壤全氮的测定: NY/T 1121.24-2012《土壤检测 第 24 部分: 土壤全氮的测定自动定氮仪法》^[24];

土壤水解性氮的测定: LY/T 1228-2015《森林土壤氮的测定 第 4 部分: 水解性氮的测定》^[25];

土壤有效磷、速效钾的测定: NY/T 1849-2010《酸性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定 联合浸提-比色法》^[26]。

2.2.6 硒的测定

对植物样品(称取 0.5000 g, 加入混合酸体积比为, HNO₃:HClO₄=10:1)和土壤样品(称取 0.2000 g, 加入混合酸体积比为, HNO₃:HClO₄:HF=10:1:2)均进行石墨炉湿法消解, 消解完全后, 用 1%的 HNO₃ 分别定容至 25 mL 和 100 mL。使用电感耦合等离子体质谱仪, 测定样品中硒的含量。

在调谐仪器达到测定要求后, 编辑测定方法, 根据待测元素的性质选择相应的内标元素, 待测元素和内标元素的 m/z 见表 2。对没有合适消除干扰模式的仪器, 需采用干扰校正方程对测定结果进行校正。

表 2 电感耦合等离子体质谱仪中 Se 分析模式、内标元素 Table 2 Analysis mode of selenium and internal standard elements in inductively coupled plasma mass spectrometer				
元素	分析模式	校正方程	内标元素	m/z
Se	普通/动态反应池	$^{78}\text{Se}=^{78}\text{Se}-0.1869$ $*^{76}\text{Se}$	$^{72}\text{Ge}/^{103}\text{Rh}$	78
Se	普通/动态反应池	无	$^{72}\text{Ge}/^{103}\text{Rh}$	82

2.2.7 数据分析

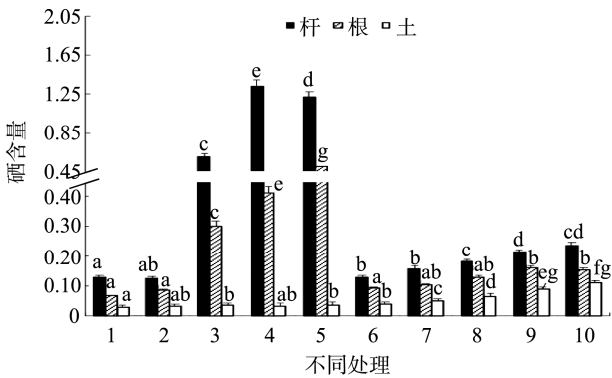
文中的数据分析采用 SPSS 分析, 通过 Bartlett 检验评估数据的方差和正态性的同质性。对于具有均匀方差的数据, 使用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA), 进行邓肯(Dunnett)事后检验, 对实验数据进行差异显著性检验(P<0.05); 通过 Pearson 相关性分析, 来衡量定距变量间的线性关系。文中的图形处理用 Excel 进行分析。

硒的富集系数指地上部硒含量与地下部硒含量的比值,用来评价硒由辣木地下部向地上部的运输和富集能力;硒的转运系数指硒在辣木杆和根中含量的比值,用来评价硒在辣木不同器官中的迁移转运能力。富集系数计算公式: $R=S/L$, 其中 R 为富集系数, S 为地上部分含量(mg/kg), L 为地下部分含量(mg/kg); 转运系数计算公式: $T=S_{\text{杆}}/S_{\text{根}}$ 或 $T=S_{\text{根}}/S_{\text{杆}}$, $S_{\text{杆}}$ 和 $S_{\text{根}}$ 分别为硒在杆和根中的含量(mg/kg)。

3 结果与分析

3.1 辣木植株与土壤中硒含量显著性差异

辣木对土壤中硒的吸收, 不仅受土壤基本性质和气候条件的影响, 还与辣木本身的特性、主动吸收功能、对元素的富集能力、根际分泌物、根际环境微生物的种类和数量有关。对结果进行 Dunnett 事后差异显著性检验 ($P<0.05$), 结果见图 1。



注: a~g: 不同字母表示差异有显著性($P<0.05$)。1~10 分别表示试验处理 0#~9#。

图 1 辣木根、杆及其土壤中硒含量变化(mg/kg)

Fig 1 Significant changes of selenium content in *Moringa oleifera* Lam. root, rod and its rhizosphere soil (mg/kg)

从图 1 可以看出, 外源硒喷施处理后, 辣木杆、根中硒含量均有明显的增加, 且随着喷施量的增加, 杆、根中硒含量逐渐增加, 土壤中硒含量增加不明显; 外源硒基施处理后, 辣木根、土壤中硒含量有明显增加, 且随着基施量的增加, 杆、根、土壤中硒含量逐渐增加。喷施不同浓度的硒, 对辣木杆、根中硒含量的变化有显著性差异, 对土壤中硒含量变化差异不显著($P<0.05$); 基施不同浓度的硒, 对辣木根、土壤中硒含量的变化有显著性差异, 对杆中硒含量变化差异不显著($P<0.05$)。综上分析表明, 外源硒喷施对辣木杆、根中硒含量增加的幅度较基施大, 外源硒基施对土壤中硒含量增加的幅度较基施大, 硒在辣木-土壤系统中, 从上到下迁移转运比从下到上迁移转运快, 且外源硒在辣木杆中更容易富集积累。

3.2 不同添加方式和处理对硒富集/转运系数的影响

自然环境下, 硒在植物-土壤系统中的迁移和吸收转运受到土壤-植物屏障的有效控制, 根部吸收是硒进入辣木的主要途径, 并在其体内进行运转和再分配。根系吸收系数(根/土的富集系数)表示土壤中该元素的生物有效性, 值越大说明土壤中硒的有效性越高, 且土壤中的硒容易被作物吸收^[27]。从表 3 可以看出, 根系吸收系数均 >1 , 说明基施后, 土壤中硒的有效性较高, 较容易被作物吸收。采取喷施方式, 硒从辣木杆进入到根、土壤及从辣木根进入土壤的转运系数 $>$ 未添加; 采取基施方式, 硒从土壤进入辣木根的富集系数及辣木根进入到杆的转运系数 $>$ 未添加。

采取喷施方式, 杆到根、根到土壤的转化系数是喷施 0.10 mg/L、0.20 mg/L 时较高, 所以在喷施一定量浓度的外源硒时, 硒从杆到根再到土壤迁移转运, 主要积累于杆中; 随着喷施量的增加, 积累部位从杆逐渐向根中转移; 当喷施量达到一定浓度, 硒在杆、根中积累达到相对饱和, 多余的外源硒可能会积累在根部和土壤中。采取基施方式, 随着基施量的增加, 土壤到根的富集系数逐渐增加, 根到杆的转化系数比未添加高, 但与基施量相关性不明显, 且硒从土壤到根再到杆迁移转运过程较喷施缓慢。综上分析表明, 辣木是较好的硒富集植物, 在土壤-辣木系统中, 硒从土壤到根再到杆的迁移速率明显比从杆到根再到土壤的迁移速率小的多, 并在杆中积累, 印证了图 1 的结论; 在辣木-土壤系统中, 当喷施量增加, 过量的硒会迁移转运, 并在根部积累。

表 3 辣木杆、根及其土壤中硒富集/转运系数
Table 3 Transport coefficient of selenium in *Moringa oleifera* Lam., root and its rhizosphere soil

处理编号	杆/根	根/土
0	1.96±3.3b	2.37±2.5cd
1	1.49±3.6a	2.69±3.3d
2	1.51±2.1a	11.9±1.8f
3	4.29±4.2d	9.31±3.4e
4	2.43±2.9c	13.7±4.0g
5	1.42±5.1a	2.44±2.3cd
6	1.55±2.0a	2.07±5.4bc
7	1.42±4.9a	1.96±5.6bc
8	1.33±6.0a	1.82±4.1ab
9	1.55±4.5a	1.39±3.5a

注: a~g: 不同字母表示差异有显著性($P<0.05$)。

3.3 不同添加处理后硒含量的相关性

通过 Pearson 相关性分析, 来衡量两个变量是否成线性关系, 相关系数的绝对值越大, 相关性越强。从表 4 可以看出, 不同的外源硒添加处理对土壤中硒含量变化有显著性相关性, 说明随着添加量的增加, 土壤中硒含量增加, 且增加趋势明显; 不同的外源硒添加处理后, 辣木杆和根中硒含量的变化有显著性相关性, 说明无论哪种处理方式, 硒从杆到根或从根到杆中迁移转运速率有明显变化。采取喷施处理, 硒从杆到根的迁移转运速率增加; 采取基施处理, 硒从根到杆的迁移转运速率增加。综上分析表明, 喷施处理对辣木杆、根、土壤的影响较基施处理的大, 说明硒较易从上往下迁移转运, 即从杆到根再到土壤的迁移转运。

表 4 辣木杆、根及其土壤中硒含量相关性 Table 4 Correlation between selenium content in <i>Moringa oleifera</i> Lam., root and its rhizosphere soil				
	处理	杆	根	土
处理	1			
杆	-0.2	1		
根	-0.128	0.852**	1	
土	0.857**	-0.297	-0.209	1

注: **在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

4 结论与讨论

硒因其双重生理学行为而被定性为“双刃剑”, 硒的必要性和毒性间的关键区别在于生物和物种之间, 且取决于硒的水平和形态。可食用植物的硒含量与种植土壤中硒含量密切相关, 因此监测土壤硒含量及在土壤-植物中的转移至关重要。硒是植物的有益元素, 在低剂量下, 保护植物免受不同类型的非生物胁迫, 增强植物生长, 在较高浓度下, 则扰乱植物代谢抑制植物生长、差异的产生, 除植物自身的营养特性差异之外, 与植物环境条件、养分供应状况都有一定关系^[28,29]。在植物内部, 硒通过木质部通道转移并主要在枝条组织中积累, Carey 等研究表明低浓度的硒有利于转移到枝条组织^[30]; Bin 等^[31]研究表明, 施用亚硒酸盐后苜蓿中硒的积累量增加, 苜蓿在土壤培养中从根到茎的运输效率相对较高; Castillo 等^[32]研究表明, 在番茄的茎中的硒含量, 添加处理后比对照高 53.1%; Liu 等^[33]研究表明土壤施用亚硒酸盐后, 植物吸收的大部分硒在杆中积累; Longchamp 等^[34]研究表明, 玉米杆中硒的积累率可达到 60%; Boldrin 等^[35]研究表明, 在施用硒酸盐的土壤中, 水稻吸收的大部分硒(70%)在秸秆中积累; 张栋等^[27]研究表明, 水稻的地上部及地下部硒积累量随着外源硒施

加量的增加而增加, 地上部增加明显; 外源硒的喷施通常比基施更具生物可利用性, 与土壤施用亚硒酸盐相比, 叶面喷施的亚硒酸盐提高了水稻植物的硒吸收能力^[36]。本研究表明, 分别对盆栽辣木苗进行外源硒喷施和基施处理, 喷施处理后, 辣木杆、根及土壤中硒含量比未添加分别增加了约 10 倍、6 倍、1 倍; 基施处理后, 辣木杆、根及土壤中硒含量比未添加分别增加了约 2 倍、2 倍、3 倍; 杆中硒的含量明显高于根系中; 这一结果与前人对其它不同植物物种进行硒处理后, 硒在枝条或杆中主要积累且喷施处理硒的生物可利用性较高的结论一致。

土壤中硒是植物吸收利用硒的主要来源, 植物从土壤中不断的吸收利用硒, 不断将土壤中各形态硒间的平衡打破。硒在土壤中各形态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了新的平衡^[27]。目前普遍认为, 将硒补充到土壤和植物中, 以满足人和动物饮食中硒的不足是比较持久而稳定的方法。国内外关于施用外源硒进行植物富硒的研究已有很多报道。人们通过基施或喷施等各种措施, 获得了富硒产品, 为缺硒地区人群补硒、防止硒缺乏症做出了重要贡献。文中研究表明, 在喷施一定量浓度的外源硒时, 硒主要积累于杆中, 随着喷施量的增加, 积累部位从杆逐渐向根和土壤中转移, 并在根部和土壤中积累。采取基施方式, 硒从地下部分向地上部分转移, 迁移速率较慢, 可能是由于植物根系对四价硒是被动吸收, 对硒酸盐是主动吸收, 而试验中添加的硒源为亚硒酸盐。有研究证明, 向土壤中添加硒酸盐有利于植物硒的积累, 硒通过高亲和力的硫酸盐转运蛋白转移到枝条, 而亚硒酸盐则利于改善土壤的缺硒状态^[37-39]。实验对辣木苗进行了亚硒酸盐基施添加, 也印证了该结论, 但无法说明硒酸盐对其的影响, 下一步实验将对此做进一步的比较验证。

辣木是较好的硒富集植物, 喷施对辣木杆、根及土壤中硒含量增加的幅度较基施大; 硒在辣木-土壤系统中迁移转运, 主要在杆中积累; 随着喷施量的增加, 硒会迁移转运至土壤中, 并在根部和土壤中积累; 无论哪种添加方式, 硒的富集效果均是: 杆 > 根 > 土壤。虽然土壤硒缺乏是导致植物中硒含量偏低的主要原因, 但是不同植物类型富硒能力的差异也会对植物可食部位硒含量产生重要影响。随着植物富硒工作的广泛开展, 人们开始关注硒对植物的生态和生物效应的研究。由于不同施硒方式所导致的硒的利用率差异, 必将会造成富硒生产过程中, 部分未被有效利用的外源硒进入土壤和地下水, 对环境带来危害。因此, 进行富硒生产时, 不仅要考虑富硒生产过程中的经济效益, 还要关注富硒生产对环境造成的影响, 应对土壤和地下水中的硒进行实时监测, 避免因盲目追求富硒产品中的硒含量而引发环境污染。

参考文献

- [1] 严佳. 磷-硒交互作用对茶园土壤硒吸附行为及有效性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
Yan J. Effects of interaction of phosphorus-selenium on the adsorption behavior and avail ability of selenium on tea garden soil [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [2] Lönnerdal B, Vargas FE, Whitacre M. Selenium fortification of infant formulas: Does selenium form matter [J]. Food Funct, 2017, 8(11): 3856–3868.
- [3] 胡莹, 黄益宗, 刘云霞. 砷-硒交互作用对水稻吸收转运砷和硒的影响[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 952–958.
Hu Y, Huang YZ, Liu YX. Interactions between arsenic and selenium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. Environ Chem, 2013, 32(6): 952–958.
- [4] 张璐. 土壤-水稻系统硒汞交互作用机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
Zhang L. Interaction mechanism of selenium and mercury in soil- rice system [D]. Chongqing: Southwest University, 2016
- [5] Han D, Xiong SL, Tu SX, *et al.* Interactive effects of selenium and arsenic on growth, antioxidant system, arsenic and selenium species of *Nicotiana tabacum* L [J]. Environ Exp Bota, 2015, 117: 12–19.
- [6] Jahid AM, Shilpa G, Navneet KS, *et al.* Selenium antagonizes the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms [J]. Environ Exp Bota, 2012, 77(2): 242–248.
- [7] 赵秀峰, 张强, 程滨, 等. 硒对砷胁迫下小白菜生理特性及砷吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 37(9): 3583–3589.
Zhao XF, Zhang Q, Cheng B, *et al.* Effects of selenium on the physiological characteristics and As uptake of park choy under As stress [J]. J Agro-Environ Sci, 2017, 37(9): 3583–3589.
- [8] 徐向华, 刘传平, 唐新莲, 等. 叶面喷施硒硅复合溶胶抑制水稻砷积累效应研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 1064–1069.
Xu XH, Liu CP, Tang XL, *et al.* Foliar application of selenium – silicon sol reduced arsenic accumulation in rice [J]. Ecol Environ Sciences, 2014, 23(6): 1064–1069.
- [9] Mateja G, Ivan K, Jože O. Influence of UV-B exclusion and selenium treatment on photochemical efficiency of photosystem II, yield and respiratory potential in pumpkins (*Cucurbita pepo* L.) [J]. Plant Physiol Biochem, 2005, 43(5): 445–448.
- [10] Navin K, Shekhar M, Ram NY, *et al.* Co-application of selenite and phosphate reduces arsenite uptake in hydroponically grown rice seedlings: toxicity and defence mechanism [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2013, 91(2): 171–177.
- [11] Amit K, Rana PS, Pradyumna KS, *et al.* Selenium ameliorates arsenic induced oxidative stress through modulation of antioxidant enzymes and thiols in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecotoxicology, 2014, 23(7): 1153–1163.
- [12] 肖正春, 张广伦. 神奇的辣木与人类生活[J]. 中国野生植物资源, 2016, 35(1): 64–66.
Xiao ZC, Zhang GL. The magic *Moringa oleifera* Lam. and human life [J]. Chin Wild Plant Res, 2016, 35(1): 64–66.
- [13] Kim YJ, Asha JC, Daniel M, *et al.* A 14-day repeated-dose oral toxicological evaluation of an isothiocyanate-enriched hydro-alcoholic extract from *Moringa oleifera* Lam. seeds in rats [J]. Asian Agric Res, 2018, 5: 418–426.
- [14] 彭磊, 田洋, 解静, 等. 世界辣木发展现状及市场前景分析[J]. 世界农业, 2015, 9(437): 143–146.
Peng L, Tian Y, Xie J, *et al.* Analysis of the development status and market prospects of *Moringa oleifera* Lam. in the world [J]. World Agric, 2015, 9(437): 143–146.
- [15] Liang PX, Liu YX, Sha GX, *et al.* Current development and prospects of selenium enriched *Moringa oleifera* Lam. industry in Guangxi [J]. Asian Agric Res, 2018, 10(6): 14–17.
- [16] 龙继明, 杨朴丽, 李海泉, 等. 锯末蔗渣不同配比栽培基质对辣木产量的影响[J]. 热带农业科技, 2017, 40(1): 23–25, 38.
Long JM, Yang PL, Li HQ, *et al.* Effect of different proportions of sawdust and bagasse on the *Moringa* production in greenhouse [J]. Trop Agric Sci Technol, 2017, 40(1): 23–25, 38.
- [17] Maria JP, Oscar S, Teodoro GW, *et al.* Rodrigo. Selenium biofortification in bread-making wheat under Mediterranean condition: influence on grain yield and quality parameters [J]. Crop Pasture Sci, 2014, 65: 362–369.
- [18] Joanna B, Michael G. Mercury and selenium levels in 19 species of saltwater fish from New Jersey as a function of species, size, and season [J]. Sci Total Environ, 2011, 409(8): 1418–1429.
- [19] Agbogidi OM, Ilondu EM. *Moringa oleifera* Lam.: Its potentials as a food security and rural medicinal item [J]. J Bio Innov, 2012, 11(6): 156–167.
- [20] 李国华, 刘昌芬. 辣木的医疗保健功效及其开发前景[C]. 中国热带作物学术学会, 2005, 271–276.
Li GH, Liu CF. The health care effect of *Moringa oleifera* Lam. and its development prospects [C]. Chinese Tropical Crops Academic Society, 2005, 271–276.
- [21] 许义凯, 刘宏茂, 肖春芬, 等. 西双版纳野生蔬菜中硒含量测定[J]. 云南植物研究, 2004, 26(6): 668–672.
Xu YK, Liu HM, Xiao CF, *et al.* An analysis of selenium contents of wild vegetable in Xishuangbanna [J]. Acta Botan Yunnan, 2004, 26(6): 668–672.
- [22] NY/T 1121.2-2006 土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定[S].
NY/T 1121.2-2006 Soil testing-Part 2: Determination of soil pH [S].
- [23] NY/T 1121.6-2006 土壤检测第 6 部分: 土壤有机质的测定[S].
NY/T 1121.6-2006 Soil testing-Part 6: Determination of soil organic matter [S].
- [24] NY/T 1121.24-2012 土壤检测第 24 部分: 土壤全氮的测定自动定氮仪法[S].
NY/T 1121.24-2012 Soil testing-Part 24: Determination of soil total nitrogen automatic nitrogen analyzer method [S].
- [25] LY/T 1228-2015 森林土壤氮的测定 第 4 部分: 水解性氮的测定[S].
LY/T 1228-2015 Forest soil nitrogen determination-Part 4: Determination of hydrolyzable nitrogen [S].
- [26] NY/T 1849-2010 酸性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定 联合浸提-比色法[S].
NY/T 1849-2010 Determination of ammonium nitrogen, available phosphorus and available potassium in acidic soil-Combined extraction colorimetric method [S].
- [27] 张栋, 史力超, 冶军, 等. 滴灌条件下不同价态外源硒对水稻吸收及转

- 运的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 65–71.
- Zhang D, Shi LC, Ye J, *et al.* Effects of selenium valence on its uptake and translocation in rice under drip irrigation [J]. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31(1): 65–71.
- [28] Gupta M, Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants [J]. *Front Plant Sci*, 2016, 7: 2074.
- [29] Natasha, Muhammad S, Nabeel KN, *et al.* A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health [J]. *Environ Poll*, 2018, 234: 915–934.
- [30] Carey AM, Scheckel KG, Lombi E, *et al.* Grain accumulation of selenium species in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(10): 5557–5564.
- [31] Bin QB, Zi W, Limin G, *et al.* Effects of selenite on the growth of alfalfa (*Medicago sativa* L. cv. Sadie 7) and related physiological mechanisms [J]. *Acta Physiol Plant*, 2019, 41: 78.
- [32] Castillo GRG, Foroughbakhch PR, Benavides M. Effect of selenium on elemental concentration and antioxidant enzymatic activity of tomato plants [J]. *J Agric Sci Technol*, 2016, 18: 233–244.
- [33] Liu X, Wang Q, Hu C, *et al.* Regulatory effects of sulfur on oilseed rape (*Brassica napus* L.) response to selenite [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2016, 62: 247–253.
- [34] Longchamp M, Castrec RM, Biron P, *et al.* Variations in the accumulation, localization and rate of metabolization of selenium in mature Zea mays plants supplied with selenite or selenate [J]. *Food Chem*, 2015, 182: 128–135.
- [35] Boldrin PF, Faquin V, Ramos SJ, *et al.* Soil and foliar application of selenium in rice biofortification [J]. *J Food Comp Anal*, 2013, 31(2): 238–244.
- [36] Deng XF, Liu KZ, Li MF, *et al.* Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages [J]. *Field Crops Res*, 2017, 211: 165–171.
- [37] Philip JW. Selenium accumulation by plants [J]. *Annal Botany*, 2016, 117(2): 217–235.
- [38] 张艳玲, 潘根兴, 李正文, 等. 土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 388–391.
- Zhang YL, Pan GX, Li ZW, *et al.* Translation of selenium in the syetem of soil-plant and it's regulation in food-chain [J]. *Soil Environ Sci*, 2002, 11(4): 388–391.
- [39] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 蓝莓对外源硒的吸收、转化及其对品质效应的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(8): 1151–1158.
- Liu Q, Tian X, Shi YX. Absorption and transformation of exogenous Se and its quality effects in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) [J]. *Plant Physiol J*, 2016, 52(8): 1151–1158.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介

唐昌贵, 副研究员, 主要研究方向为
农技推广。
E-mail: tcg555@126.com

杜丽娟, 硕士, 副研究员, 主要研究方
向为农产品质量安全及营养品质分析研究。
E-mail: 36violet@163.com