

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22456

金线莲施硒的吸收与积累规律

甘勇辉, 王水琦*

(漳州职业技术学院食品工程学院, 福建 漳州 363000)

摘要:为探究金线莲的硒吸收、转化及生长效应,通过种苗繁殖培养基、移栽基质、林下腐殖土添加与叶面喷施等方式进行亚硒酸钠(Se^{4+})施用试验,检测分析金线莲植株形态、主要成分、植株及器官总硒与有机硒、生长量等指标与硒施用量关系。结果表明,施硒能极显著提高金线莲植株含硒量,硒吸收利用率最高为繁殖培养基添加方式,为13.09%,其他依次为叶面喷施、基质添加和林下腐殖土添加方式,分别为6.81%、6.36%和2.79%。植株干品总硒含量随施用浓度提高而增加,有机硒含量为81.8%~92.1%,硒有机转化率不受施用浓度影响。植株各器官硒含量为根>叶>茎,硒有机转化率为叶>根>茎。根部适宜浓度施用硒能促进金线莲植株生长,过高浓度施用抑制生长。叶面喷施硒对金线莲植株生长量无显著影响。施硒对金线莲植株主要成分含量无显著影响。金线莲的硒最佳经济施用量分别为培养基添加4.75 mg/L、叶面喷施0.168 mg/株、基质添加8.00 mg/L、林下腐殖土添加9.50 mg/L。综合各种施用方式效果来看,以种苗繁殖培养基添加硒方式可获得最佳吸收利用率和最佳产量效应。

关键词:金线莲;亚硒酸钠;有机硒;积累

硒(Se, 相对原子质量78.96)是人体必需的“微量元素之王”,人体缺硒易导致人的免疫力下降。威胁人类健康的40多种疾病都和人体缺硒有关。人体硒水平决定于所食用的植物性或动物性食物的含硒量,植物性硒能更好地被人体利用,有机态硒比无机态硒具有更高的生物效价^[1]。硒存在形态包括硒酸盐(SeO_4^{2-} 、 Se^{6+})、亚硒酸盐(SeO_3^{2-} 、 Se^{4+})、硒化物(Se^{2-})、单质(Se)及硒代氨基酸及其衍生物,而硒酸盐、亚硒酸盐是植物的主要吸收来源,前者存在于碱性的土壤中,后者主要在偏酸性介质环境中^[2-3]。通过土壤或叶面施硒等方法提高植物的硒含量有助于指导人们进行富硒作物生产,对缺硒地区的人们补硒、防止硒缺乏症具有重要意义^[1, 3]。金线莲(*Anoectochilus roxburghii*)别名金线兰、金丝草,属兰科(Orchidaceae)开唇兰属(*Anoectochilus*)植物,是名贵珍稀中草药,野生环境主要分布在我国台湾、福建、广西、云南等具多雨潮湿、酸性土壤、中海拔山区。目前,我

国金线莲野生资源已近枯竭,取而代之的是人工大量繁殖组培苗,并进行人工基质栽培的生产方式^[4-5]。采用亚硒酸盐在金线莲种苗组培繁殖培养、移栽种植等不同生产阶段、不同移栽种植条件下施用,进行金线莲的硒吸收、转化及生长效应研究,可为富有机硒金线莲的栽培生产提供借鉴,提高金线莲的应用价值。

1 材料与方法

1.1 供试材料

金线莲试验品种为“红霞”,由儒兰(福建)生物科技有限公司提供。以亚硒酸钠(Na_2SeO_3 , 分子量172.9,分析纯级,西亚化学科技公司提供,含Se 45.66%)为含硒肥源。

1.2 试验方法

1.2.1 种苗繁殖培养基施用

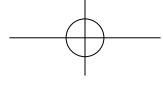
以改良MS培养基配方(NH_4^+ 取1/2量、 NO_3^- 取2/3量)添加香蕉80 g/L、马铃薯30 g/L、蛋白胨1.5 g/L、活性炭1.0 g/L、萘乙酸0.5 mg/L, pH 6.0为培养基。培养基中施用硒肥量分别为:(1) 0(CK); (2) Na_2SeSO_3 2 mg/L; (3) Na_2SeSO_3 4 mg/L; (4) Na_2SeSO_3 6 mg/L; (5) Na_2SeSO_3 8 mg/L。共5个处理。每处理配制12 L培养基分装60瓶(容积620 mL),每瓶培养基接种30个金线莲瓶苗植株单

收稿日期: 2022-07-26; 录用日期: 2023-02-17

项目基金: 福建省科技计划项目(2018N2002); 漳州市自然科学基金项目(ZZ2019J08)。

作者简介: 甘勇辉(1967-), 副教授, 本科, 研究方向为中草药植物生理生态。E-mail: yhgfjzz@163.com。

通讯作者: 王水琦, E-mail: 496247632@qq.com。



芽茎段,在光照强度 4500 lx、(25±1)℃条件下培养 180 d 成苗后进行栽培袋栽方式移栽种植。每瓶苗种植 1 袋,栽培袋长×宽×高=30 cm×25 cm×60 cm,每袋装移栽基质[泥炭:河沙=3.8:1(v/v)+花宝 1 号(美国)1 g/L] 1.7 L。种植袋置于大棚室内地面上,环境温度≤30℃、光照强度≤8000 lx 条件管理。接种后培养 90、180 d 分 2 次各处理随机抽样 10 瓶进行金线莲植株形态指标测定。植株烘干[(85±5)℃, 10 h]后进行主要成分指标及总硒、无机硒含量测定;移栽种植 120 d 后采收,抽样测定各处理金线莲上述相应指标,并以 Na₂SeSO₃ 4 mg/L 处理种植后的金线莲植株干品进行叶、根、茎器官的总硒与无机硒含量测定。

1.2.2 移栽基质施用

以常规(培养基不添加硒肥)金线莲组培苗进行育苗盘移栽种植试验。移栽基质同上,基质添加硒肥量:(1) 0 (CK); (2) Na₂SeSO₃ 2 mg/L; (3) Na₂SeSO₃ 4 mg/L; (4) Na₂SeSO₃ 6 mg/L; (5) Na₂SeSO₃ 8 mg/L。共 5 个处理。基质混配均匀后装入育苗盘(50 cm×30 cm×5 cm),每盘装 4 L 混合基质,每盘定植大小较一致的苗 120 株,每处理定植 9 盘,分 3 组(重复),随机区组方式放置于栏床上,常规温室种植管理(环境温度≤30℃,光照强度≤8000 lx)。移栽种植 120 d 后采收,各处理取样测定形态、主要成分指标及总硒、无机硒含量;以 Na₂SeSO₃ 4 mg/L 处理的金线莲干品进行叶、根、茎器官的总硒与无机硒含量测定。

1.2.3 移栽期叶面喷施

采用常规金线莲组培苗以基质(同上)育苗盘移栽种植后进行硒叶面肥喷施,喷施处理量为:(1) 0 (CK); (2) Na₂SeSO₃ 200 mg/L 喷施 1 次; (3) Na₂SeSO₃ 200 mg/L 喷施 2 次; (4) Na₂SeSO₃ 200 mg/L 喷施 3 次。共 4 个处理。每处理种植 9 盘,分 3 组(重复),每盘种植大小较一致的苗 120 株,随机区组方式放置,常规温室管理(环境温度≤30℃,光照强度≤8000 lx)。每次每盘喷液量 24 mL,平均每次喷施(叶背、面)硒肥量 0.04 mg/株。移栽定植 30 d 后进行第 1 次叶面喷施、45 d 后第 2 次喷施、60 d 后第 3 次喷施。种植 120 d 后取样测定各处理金线莲植株形态、主要成分指标及总硒、无机硒含量;以 Na₂SeSO₃ 200 mg/L 喷施 2 次处理的金线莲干品进行叶、根、茎部总硒与无机硒含

量测定。

1.2.4 林下腐殖土施用

以常规金线莲组培苗进行林下自然腐殖土(含 Se 0.063 mg/kg, pH 5.2)种植试验。硒肥处理量:(1) 0 (CK); (2) Na₂SeSO₃ 2 mg/L; (3) Na₂SeSO₃ 4 mg/L; (4) Na₂SeSO₃ 6 mg/L; (5) Na₂SeSO₃ 8 mg/L。共 5 个处理。每处理 3 个重复,共 15 个小区,随机区组排列。每小区 8 L 混合腐殖土整畦(畦宽×长为 90 cm×50 cm、沟宽 40 cm)种 240 株。移栽后采用单层塑料薄膜小拱棚覆盖,15 d 后去膜,防病、鸟、鼠管理。移栽种植 120 d 后取样测定各处理金线莲各项指标;以 Na₂SeSO₃ 4 mg/L 处理的金线莲干品进行叶、根、茎器官总硒与无机硒含量测定。

1.3 测定方法

以氢化物原子荧光光谱法测定金线莲全株总硒含量[GB 5009.93—2017 第一法],荧光分光光度法测定无机硒含量,以差值法计算有机硒含量[DBS42/002—2022]。采用回流法抽提及芦丁标准曲线法测定黄酮含量^[6];以蒽酮-硫酸法测总糖含量、二硝基水杨酸法测还原糖含量,以总糖含量减去还原糖含量即为多糖含量^[7];采用溴百里酚蓝酸性染料比色法测定金线莲生物碱含量^[8]。

1.4 数据处理方法

硒吸收利用率(%)=(施肥处理植株吸收硒量-对照处理植株吸收硒量)/(肥料施用量×肥料中硒含量)×100^[9];植株吸收硒量=每升培养基(基质)接种(种植)金线莲植株数×单株干重(kg)×干品硒含量。采用 Excel 2016 进行试验数据分析。

2 结果与分析

2.1 种苗繁殖培养基施用硒对形态指标与主要成分含量的影响

由表 1 可看出,随添加硒肥培养基对金线莲茎段培养时间的延长,金线莲植株硒含量持续增加,尤其是培养后期增加快速,后期吸收量占总吸收量的约 71.0%。与对照相比培养基中添加硒肥极显著提高了金线莲植株硒含量(培养 90 d、 $F=7.33$, 培养 180 d、 $F=10.51$, 移栽种植、 $F=9.26$, $>F_{0.01}=5.99$),移栽种植后施硒金线莲植株干品硒含量达对照的 219.2 倍。金线莲植株对硒有机转化率由培养中期

的最高 79.6% 提高到培养后期 83.3% 以上, 移栽种植后继续提高到 89.2% 以上。硒吸收利用率与施硒量呈负相关, 以培养 180 d 添加硒肥 2 mg/L 处理的硒吸收利用率 15.39% 为最高, 随硒施用量增加, 硒吸收利用率呈下降趋势。培养基中适量的硒肥添加可显著增加金线莲植株干重 (培养 90 d、 $F=3.74$, 培养 180 d、 $F=3.85$, 移栽种植、 $F=3.64$, $>F_{0.05}=3.48$), 但单位硒肥的增产效应呈下降趋势。随硒肥添加量增加, 金线莲植株根鲜重呈下降趋势 (培养 180 d、 $F=4.25$, 移栽种植、 $F=3.51$, $>F_{0.05}=3.48$), 施硒量与金线莲鲜根重相关系数 $|r|=0.949^*$ ($r_{0.05}=0.878$, $r_{0.01}=0.959$, $d_f=3$), 两者呈显著负相关 ($|r|>r_{0.05}$)。试验各阶段各处理金线莲植株的多糖、生物碱、总黄酮含量差异不显著。

表 1 种苗繁殖培养基添加硒培养及移栽金线莲植株形态指标与主要成分含量

处理方式和时间	Na ₂ SeSO ₃ (mg/L)	单株鲜根重 (g)	单株干重 (g)	总硒 (mg/kg DW)	无机硒 (mg/kg DW)	硒有机转化率 (%)	硒吸收利用率 (%)	生物碱 (mg/g DW)	多糖 (mg/g DW)	总黄酮 (mg/g DW)
培养 90 d	0	0.174 ± 0.013a	0.061 ± 0.002b	0.05E	未检出	—	—	5.217 ± 0.202a	40.101 ± 1.316a	18.933 ± 0.852a
	2	0.181 ± 0.009a	0.063 ± 0.002ab	4.21D	0.86	79.6	4.36	5.244 ± 0.197a	40.662 ± 1.308a	18.821 ± 0.653a
	4	0.177 ± 0.015a	0.065 ± 0.002ab	7.71C	1.66	78.5	4.12	5.253 ± 0.213a	40.986 ± 1.340a	18.813 ± 0.728a
	6	0.175 ± 0.012a	0.067 ± 0.002a	10.72B	2.43	77.3	3.93	5.286 ± 0.209a	41.224 ± 1.662a	18.721 ± 0.689a
	8	0.176 ± 0.016a	0.068 ± 0.002a	12.81A	2.98	76.7	3.58	5.274 ± 0.192a	41.566 ± 1.236a	18.678 ± 0.670a
培养 180 d	0	0.403 ± 0.009a	0.144 ± 0.004b	0.05E	未检出	—	—	5.434 ± 0.207a	41.136 ± 1.483a	19.601 ± 0.764a
	2	0.404 ± 0.018a	0.149 ± 0.004b	6.29D	0.93	85.2	15.39	5.477 ± 0.231a	41.550 ± 1.202a	19.533 ± 0.804a
	4	0.395 ± 0.009a	0.152 ± 0.004ab	11.62C	1.74	85.0	14.51	5.536 ± 0.237a	41.767 ± 1.736a	19.390 ± 0.888a
	6	0.384 ± 0.013ab	0.155 ± 0.005ab	16.30B	2.62	83.9	13.83	5.633 ± 0.205a	41.846 ± 1.429a	19.110 ± 0.862a
	8	0.365 ± 0.008b	0.157 ± 0.004a	20.31A	3.39	83.3	13.09	5.678 ± 0.172a	42.022 ± 1.724a	18.928 ± 0.865a
移栽 120 d	0	0.568 ± 0.015a	0.185 ± 0.005b	0.06E	未检出	—	—	5.643 ± 0.279a	47.118 ± 2.268a	20.502 ± 0.740a
	2	0.567 ± 0.012a	0.191 ± 0.005ab	4.17D	0.45	89.2	13.08	5.666 ± 0.222a	47.456 ± 2.284a	20.321 ± 0.828a
	4	0.554 ± 0.010a	0.196 ± 0.004a	7.41C	0.66	91.1	11.93	5.779 ± 0.144a	47.667 ± 2.141a	20.190 ± 0.952a
	6	0.541 ± 0.009ab	0.199 ± 0.005a	10.63B	0.84	92.1	11.58	5.738 ± 0.118a	47.803 ± 1.670a	19.910 ± 0.936a
	8	0.521 ± 0.013b	0.200 ± 0.004a	13.15A	1.41	89.3	10.80	5.787 ± 0.210a	47.991 ± 2.300a	19.815 ± 0.990a

注: 同一时间不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$; 不同大写字母表示差异极显著, $P<0.01$ 。DW 为干物质量。未检出为 <0.006 mg/kg DW。下同。

2.2 移栽基质施用硒对形态指标与主要成分含量的影响

由表 2 可看出, 与对照相比, 移栽基质中施用硒肥极显著提高了金线莲植株硒含量 ($F=7.62$, $>F_{0.01}=5.99$), 可达对照含量的 197.6 倍。2mg/L 处理植株的硒吸收利用率为 6.36%, 8mg/L 处理下降到 3.74%; 基质添加硒肥方式有机转化率达 82.3%

以上。基质中施用硒肥可显著增加金线莲植株干重, 但单位施硒量的增产效应呈下降趋势。随种植基质中硒施用浓度的增加, 金线莲根的伸长生长受阻, 鲜根重降低, 施硒量与金线莲鲜根重相关系数 $|r|=0.933^*$ ($r_{0.05}=0.878$, $r_{0.01}=0.959$, $d_f=3$), 硒施用量与根鲜重呈显著负相关 ($|r|>r_{0.05}$)。金线莲植株主要成分含量各处理间差异不显著。

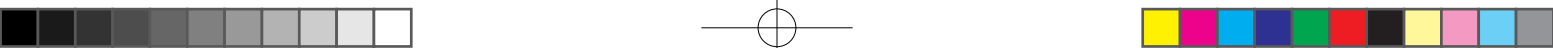


表 2 基质添加硒栽培金线莲植株形态指标及主要成分含量

Na ₂ SeSO ₃ (mg/L)	单株鲜根重 (g)	单株干重 (g)	总硒 (mg/kg DW)	无机硒 (mg/kg DW)	硒有机 转化率 (%)	硒吸收 利用率 (%)	生物碱 (mg/g DW)	多糖 (mg/g DW)	总黄酮 (mg/g DW)
0	0.665 ± 0.022a	0.262 ± 0.01b	0.08 ± 0.00E	未检出	—	—	6.181 ± 0.254a	48.106 ± 1.876a	18.801 ± 1.005a
2	0.661 ± 0.015a	0.272 ± 0.02ab	7.12 ± 0.26D	1.13	84.1	6.36	6.373 ± 0.322a	48.330 ± 1.957a	18.655 ± 1.115a
4	0.655 ± 0.018a	0.278 ± 0.01a	11.24 ± 0.62C	1.94	82.7	5.13	6.418 ± 0.288a	48.584 ± 1.892a	18.483 ± 1.301a
6	0.631 ± 0.022ab	0.284 ± 0.00a	14.69 ± 0.58B	2.60	82.3	4.57	6.522 ± 0.228a	48.733 ± 1.703a	18.413 ± 1.199a
8	0.596 ± 0.023b	0.288 ± 0.01a	15.81 ± 0.70A	2.77	82.5	3.74	6.587 ± 0.274a	48.944 ± 2.065a	18.263 ± 1.152a

2.3 移栽期叶面喷施硒对形态指标与主要成分含量的影响

由表 3 可看出, 随叶面硒肥喷施次数的增加, 金线莲干品硒含量相应增加, 处理间差异达极显著 ($F=8.83$, $>F_{0.01}=7.59$), 硒的吸收利用率随着硒喷施处理次数的增加而下降, 由喷施 1 次处理 (处理量 0.04 mg/株) 的 6.81%, 下降至喷

施 3 次 (处理量 0.12 mg/株) 的 4.42%; 叶面喷施硒有机转化率为 81.8% 以上。叶面喷施硒对金线莲单株产量、根生长量影响不显著。施硒量与金线莲鲜根重相关系数 $|r|=0.508$ ($r_{0.05}=0.950$, $r_{0.01}=0.990$, $d_f=2$), 未达到显著水平。金线莲植株叶面喷施硒主要成分含量各处理间差异均不显著。

表 3 叶面喷施硒植株形态指标及主要成分含量

Na ₂ SeSO ₃ (mg/株)	单株鲜根重 (g)	单株干重 (g)	总硒 (mg/kg DW)	无机硒 (mg/kg DW)	硒有机 转化率 (%)	硒吸收 利用率 (%)	生物碱 (mg/g DW)	多糖 (mg/g DW)	总黄酮 (mg/g DW)
0	0.646 ± 0.015a	0.271 ± 0.012a	0.06 ± 0.00D	未检出	—	—	6.262 ± 0.245a	49.123 ± 2.508a	17.909 ± 0.905a
0.04	0.645 ± 0.015a	0.276 ± 0.011a	4.56 ± 0.22C	0.78	82.9	6.81	6.367 ± 0.343a	49.412 ± 2.132a	17.746 ± 0.963a
0.08	0.642 ± 0.013a	0.281 ± 0.007a	7.01 ± 0.31B	1.14	83.7	5.35	6.764 ± 0.425a	49.533 ± 2.493a	17.547 ± 0.727a
0.12	0.641 ± 0.015a	0.283 ± 0.012a	8.62 ± 0.25A	1.57	81.8	4.42	6.812 ± 0.299a	49.792 ± 1.689a	17.482 ± 0.637a

2.4 林下腐殖土施用硒对形态指标与主要成分含量的影响

由表 4 可看出, 林下腐殖土施硒种植极显著提高金线莲植株干品硒含量 ($F=6.83$, $>F_{0.01}=5.99$)。硒吸收利用率则随着硒施用量增加先升高后降低, 由 2 mg/L 处理的 2.46%, 提高到 4 mg/L 处理的 2.79%, 再降低至 8 mg/L 处理的 2.39%; 林下腐殖

土施硒种植硒有机转化率达 84.1% 以上。林下腐殖土中添加适宜浓度硒肥种植可显著增加金线莲植株产量 ($F=3.69$, $>F_{0.05}=3.48$)。施硒量与金线莲鲜根重相关系数 $|r|=0.948^*$ ($r_{0.05}=0.878$, $r_{0.01}=0.959$, $d_f=3$), 硒施用量与根鲜重呈显著负相关 ($|r|>r_{0.05}$)。金线莲植株主要成分含量指标各处理间差异不显著。

表 4 林下腐殖土添加硒种植金线莲植株形态指标及主要成分含量

Na ₂ SeSO ₃ (mg/L)	单株鲜根重 (g)	单株干重 (g)	总硒 (mg/kg DW)	无机硒 (mg/kg DW)	硒有机 转化率 (%)	硒吸收 利用率 (%)	生物碱 (mg/g DW)	多糖 (mg/g DW)	总黄酮 (mg/g DW)
0	0.575 ± 0.019a	0.258 ± 0.011b	0.07 ± 0.00E	未检出	—	—	6.130 ± 0.203a	51.123 ± 2.094a	18.843 ± 0.981a
2	0.572 ± 0.014a	0.268 ± 0.008ab	2.79 ± 0.16D	0.43	84.6	2.46	6.159 ± 0.211a	51.362 ± 2.231a	18.651 ± 1.020a
4	0.559 ± 0.014ab	0.276 ± 0.010ab	6.16 ± 0.15C	0.88	85.7	2.79	6.386 ± 0.367a	51.554 ± 2.380a	18.576 ± 1.097a
6	0.549 ± 0.014ab	0.283 ± 0.006a	8.32 ± 0.50B	1.25	85.0	2.58	6.515 ± 0.458a	51.617 ± 2.089a	18.507 ± 1.047a
8	0.518 ± 0.013b	0.286 ± 0.009a	10.17 ± 0.60A	1.62	84.1	2.39	6.576 ± 0.413a	51.898 ± 2.218a	18.436 ± 0.800a

2.5 不同施硒方式金线莲植株各器官硒含量差异

由表 5 可看出,在试验的硒施用方式中,金线莲根的硒含量均最高,其次为叶,最低的是茎;其中根部施用方式金线莲根部硒含量占植株总硒含量的 50.8% 以上。金线莲硒有机转化率则以叶部最

高,达 85.2% 以上,其次为根,高于 80.9%,茎最低,低于 77.5%。试验结果表明,金线莲叶部细胞对硒合成转化能力强于根部细胞,而根部细胞又强于茎部细胞。金线莲根部表现为对硒有累积吸收效应,同时又惧怕根际过高的硒浓度。

表 5 不同施硒方式金线莲植株各器官含硒量状况

施用方式 (处理)	根				茎				叶			
	重量 (g/100g)	含硒量 (mg/kg DW)	含硒量 占比 (%)	硒有机 转化率 (%)	重量 (g/100g)	含硒量 (mg/kg DW)	含硒量 占比 (%)	硒有机 转化率 (%)	重量 (g/100g)	含硒量 (mg/kg DW)	含硒量 占比 (%)	硒有机 转化率 (%)
培养基添加 (4 mg/L)	26.3	9.34	58.4	80.9	44.0	1.75	18.3	76.0	29.7	3.31	23.3	88.0
基质添加 (4 mg/L)	21.4	15.87	51.8	81.3	47.4	2.97	21.5	75.4	31.2	5.62	26.7	86.5
腐殖土添加 (4 mg/L)	20.2	4.95	50.8	82.2	48.3	0.91	22.3	77.5	31.5	1.67	26.9	87.6
叶面喷施 (0.08 mg/株)	23.8	8.11	41.7	83.4	43.6	2.22	21.0	74.7	32.6	5.30	37.3	85.2

2.6 不同施硒方式的硒施用效应差异

从不同硒施用方式施用量对产量效应的拟合分析结果(表 6)可看出,以繁殖培养基添加硒肥培养后经栽培袋移栽方式的最高产量施用量、最佳经济施用量和单株最佳施用量分别为 9.000 mg/L、4.750 mg/L 和 0.032 mg/株。移栽基质添加施用方式的分别为 12.250 mg/L、8.000 mg/L 和 0.267 mg/株。林下

腐殖土添加施用方式的分别为 13.750 mg/L、9.500 mg/L 和 0.317 mg/株。叶面喷施方式的最高产量施用量和最佳经济施用量分别为 0.169 和 0.168 mg/株。在试验的硒施用方式中,硒施用效应最佳的为繁殖培养基添加培养后种植,此外依次为叶面喷施、移栽基质添加和林下腐殖土添加。

表 6 金线莲不同施硒方式的硒施用效应分析

施用方式	硒肥施用效应拟合方程	R^2	F	x_1 、 x_2 (mg/L)	最佳施肥量 (mg/株)
培养基添加	$y=-0.0002x^2+0.0036x+0.1849$	0.9993	150.49** $>F_{0.01}(2, 2)=99.00$	9.000、4.750	0.032
基质添加	$y=-0.0002x^2+0.0049x+0.2623$	0.9978	226.62** $>F_{0.01}(2, 2)=99.00$	12.250、8.000	0.267
腐殖土添加	$y=-0.0002x^2+0.0055x+0.2579$	0.9996	109.16** $>F_{0.01}(2, 2)=99.00$	13.750、9.500	0.317
叶面喷施	$y=-0.4688x^2+0.1588x+0.2709$	0.9948	5273.47** $>F_{0.01}(2, 1)=4999$	0.169*、0.168*	0.168

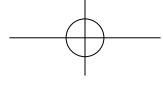
注:**表示 $F>F_{0.01}$ 。 x_1 为最高产量施用量、 x_2 为最佳经济施用量。亚硒酸钠 0.0051 元/mg,金线莲干品 3 元/g。*为每株喷施量,mg/株。

3 讨论

3.1 不同施硒方式对金线莲硒吸收利用的影响

已有研究表明,硒(Se^{4+})在酸性条件下易与铁形成水溶性很低的铁铝氧化物或水合氧化物而被

固定,且随酸性增强,越难被植物吸收^[10-11]。植物叶片可通过角质层和气孔细胞通道吸收微量元素进而向其他部位转移,故叶面喷施硒可提高植物组织中硒含量^[12]。叶面喷施硒可以减少土壤因素对施硒效率的影响,从而降低硒的施用量^[12]。高贞



攀等^[13]研究表明,叶面喷施硒(Se^{4+})可显著提高谷粒中硒含量。刘庆等^[14]以喷施硒(Se^{4+})方式研究表明,小麦对硒的利用率在3.3%~19.0%之间,随硒喷施量的增加而降低。王晋民等^[15]研究表明叶面喷施硒(Se^{4+})可显著提高青花菜、胡萝卜和大蒜全硒、有机硒含量。在本研究中,金线莲硒(Se^{4+})不同施用方式均可显著提高硒含量,其中硒吸收利用率最高的是以繁殖培养基中添加培养成苗后移栽的施用方式,移栽后硒(Se^{4+})吸收利用率为13.09%,其次是叶面喷施方式为6.81%,移栽基质添加方式为6.36%、林下腐殖土添加方式为2.79%。可能是组培繁殖培养基以水与琼脂(含量0.5%)为基质,前述的影响其有效性的铁、铝等含量少或没有,根系吸收效率得以较大幅度提高;泥炭、林下腐殖土具有较强酸性影响金线莲根系对硒的吸收,因亚硒酸盐(Se^{4+})为被动吸收,酸性环境影响了溶液中 H_2SeO_3 、 SeO_3^{2-} 和 HSeO_3^- 的存在形式,从而影响其吸收效率^[1, 3]。此外,与上述水稻、小麦等禾本科及青花菜、胡萝卜等十字花科植物一样,兰科开唇兰属植物金线莲叶部施硒可较基质、林下腐殖土施硒方式具有较高的硒吸收利用效率。

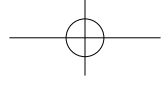
3.2 不同施硒方式对金线莲硒合成转化与各器官含量的影响

刘庆等^[14]以喷施硒(Se^{4+})方式研究表明,小麦籽粒中总硒和有机硒含量随施硒量提高而增加,且有机硒占总硒的比例稳定在78.5%~82.1%之间。王永勤等^[16]研究表明,不同施硒(Se^{6+})方式大蒜含硒量随处理浓度提高而提高,但硒有机转化率下降,土壤施用方式有机硒含量由98.0%降至81.3%,叶面喷施方式有机硒含量由98.0%降至83.0%。在本研究中,金线莲植株体内总硒含量均随根部施用浓度或叶面喷施次数的提高而增加,金线莲植株有机硒含量从组培培养前阶段的平均78.0%、培养后阶段的平均84.4%到移栽阶段的平均90.4%呈连续增加趋势。本研究施硒方式中金线莲有机硒含量并不随施硒浓度的提高而下降,可能是金线莲植株在把硒(Se^{4+})进一步还原、同化形成硒代氨基酸后,仍有较强的进一步甲基化修饰形成甲基硒代氨基酸(如 Me-SeCys)、二甲基硒化物(DMSe)等并在体内累积的能力,也可能是有相当部分硒同化形成硒多糖并在体内累积,具体原因有待探究。

吴永尧等^[17]对水稻富硒作用的研究表明,外源硒(Se^{4+})旺盛参与水稻的代谢,施硒后水稻各部位含量为根>茎>叶>穗。李鸣凤等^[18]以小麦对不同硒源吸收利用研究表明,施用硒(Se^{4+})易滞留于小麦根部,根部含量显著高于茎、叶,后作种植的玉米根部含量也明显高于地上部。李喻等^[19]研究发现马铃薯各器官富集硒的能力为茎>叶>根>块茎。本研究结果表明,金线莲植株各器官含硒量表现为根>叶>茎,尤其是根部施硒方式中根部含硒量占到全植株含硒量的50.8%以上。此结果与上述水稻、小麦根部含量最高的结果相似,而与马铃薯的研究结果明显不同,其他器官则是叶部高于茎部,此结果也与上述水稻、小麦不同,这些差异可能是物种遗传特性差异原因导致的。本研究结果还表明,金线莲各器官有机硒含量为叶>根>茎,即硒有机合成转化率以叶部最高,其次为根部,茎部最低。

3.3 不同施用方式对金线莲生长量及主要成分含量的影响

谭周磁等^[20]调查45个地块土壤硒含量在0.08~2.78 mg/kg之间,并结合浸种与叶面喷施等研究表明施硒可提高水稻产量2.05%~9.67%。李鸣凤等^[18]以多种硒源进行小麦根部施用研究表明对小麦产量无显著影响。Hao等^[21]通过盆栽试验发现,亚硒酸盐(Se^{4+})浓度低于10 mg/kg时可以显著增加玉米生物量和籽粒产量,当亚硒酸盐(Se^{4+})浓度高于25 mg/kg时明显降低了玉米生物量和籽粒产量。王永勤等^[16]研究表明,施硒(Se^{6+})对大蒜产量影响为随施硒浓度提高呈先升高后降低的趋势。付冬冬等^[22]以小白菜盆栽施硒研究表明低浓度促进生长而高浓度为抑制生长。刘庆等^[14]研究表明,小麦喷施硒(Se^{4+})对小麦产量无明显影响。王晋民等^[15]研究表明,叶面喷施亚硒酸钠(Se^{4+})在10 mg/L以下可提高大蒜产量、0.1 mg/L以下提高青花菜产量外,其他浓度与产量呈负相关。吕臣浩等^[23]研究表明,硒(Se^{4+})叶面喷施生姜可显著增产。在本研究中,金线莲种苗繁殖培养基中添加亚硒酸钠低于9.00 mg/L、移栽种植基质添加浓度低于12.25 mg/L和林下腐殖土添加低于13.75 mg/L时可显著增加金线莲植株生长量,但过量浓度则抑制金线莲植株生长,此结果与上述水稻、玉米、大蒜、小白菜等研究结果相似。叶面喷施硒(Se^{4+})对金线莲产量无显著影响,此结果与上述



小麦研究结果相似,而与大蒜、青花菜及生姜等硒(Se^{4+})喷施对产量存在显著影响的研究结果存在差异。

高贞攀等^[13]研究表明叶面喷施硒(Se^{4+})可改善谷粒品质。吕臣浩等^[23]研究表明硒(Se^{4+})叶面喷施生姜可提高品质。本研究中,根部、叶部施硒对金线莲植株主要成分含量无影响。原因可能是不同作物的硒营养特性存在差异,具体原因有待探究。

4 结论

施硒能极显著提高金线莲植株含硒量,硒吸收利用率最高的是种苗繁殖培养基添加施用方式,为13.09%,其他依次为叶面喷施、基质添加和林下腐殖土添加方式,分别为6.81%、6.36%和2.79%。

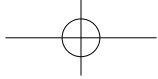
金线莲植株干品总硒含量随施用浓度提高而增加,有机硒含量为81.8%~92.1%,硒有机转化率不受施用浓度影响。植株各器官硒含量为根>叶>茎,硒有机转化率为叶>根>茎。

金线莲的硒(Se^{4+})最佳经济施用量以种苗繁殖培养基添加为4.75 mg/L、叶面喷施为0.168 mg/株、移栽基质添加为8.00 mg/L、林下腐殖土添加为9.50 mg/L。

移栽种植期进行叶面喷施硒对金线莲植株生长量无显著影响。施硒对金线莲植株主要成分含量无显著影响。

参考文献:

- [1] 王晓芳,陈思杨,罗章,等. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 539-544.
- [2] Eich-Greatorex S, Sogn T A, Øgaard A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertilizer as influenced by soil organic matter content and pH[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(3): 221-231.
- [3] 陈刚,颜雪梅,宋家鸿,等. 植物硒营养元素吸收和代谢分子生物学研究最新进展[J]. 宜春学院学报, 2019, 41(12): 92-98.
- [4] 肖小华,林彩霞,吴序栋,等. 金线莲的化学成分及生物活性研究进展[J]. 现代食品科技, 2018, 34(5): 267-275.
- [5] 沈廷明,吴仲玉,黄春情,等. 金线莲化学成分、药理、组培及栽培研究进展[J]. 海峡药学, 2016, 28(12): 26-30.
- [6] 陈莹,张巧生,任丽,等. 金线莲总黄酮提取工艺优化及不同月龄、品系金线莲黄酮含量比较[J]. 食品工业科技, 2019(8): 184-189.
- [7] 张志信,张铁,赵保发,等. 文山野生金线莲总黄酮及多糖含量测定[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(6): 1362-1364.
- [8] 金斌,金蓉莺,何宏肾. 酸性染料比色法测定洋金花药材中总生物碱的含量[J]. 中国中药杂志, 1995, 20(11): 651-653.
- [9] 罗定棋,张永辉,夏建华,等. 硒在烤烟栽培上的应用效果研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(2): 372-376.
- [10] 吴永尧,彭振坤,罗振民. 植物对硒的吸收及其效应[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 1997, 15(3): 10-13.
- [11] 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.
- [12] 迟凤琴. 土壤环境中的硒和植物对硒的吸收转化[J]. 黑龙江农业科学, 2001(6): 33-34.
- [13] 高贞攀,郭平毅,原向阳,等. 叶面喷施亚硒酸钠对谷子籽粒含硒量及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(5): 157-161.
- [14] 刘庆,田侠,史衍玺. 施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿物质元素含量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 778-783.
- [15] 王晋民,赵之重,段冰. 叶面施硒对不同蔬菜硒富集和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 103-106.
- [16] 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.
- [17] 吴永尧,彭振坤,罗振民. 水稻对硒的生物富集作用动态研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 490-494.
- [18] 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.
- [19] 李喻,张百忍,刘运华,等. 马铃薯对硒的吸收及生物富集规律[J]. 中国马铃薯, 2013, 27(6): 358-361.
- [20] 谭周磁,陈平,陈嘉勤,等. 硒在水稻上的应用Ⅲ. 稻田土壤硒含量及施硒对水稻产量与米质的影响[J]. 湖南大学自然科学学报, 1997, 20(3): 62-65.
- [21] Hao Y B, Liu H L, Ci X K, et al. Effects of applying selenium on selenium allocation, grain yield, and grain quality of two maize cultivars[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 411-418.
- [22] 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.
- [23] 吕臣浩,邓小芳,陈友恩,等. 生姜硒营养特性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 117-121.



Absorption and accumulation rules of selenium in *Anoectochilus roxburghii*

GAN Yong-hui, WANG Shui-qi* (School of Food Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou Fujian 363000)

Abstract: The objectives of this study were to understand the effects of selenium application on the selenium accumulation and transformation from inorganic to organic form in *Anoectochilus roxburghii* and the influence of selenium on its growth. Sodium selenite application test was conducted by adding to seedling propagation medium, transplanting substrate, humus soil under the forest and by foliage spraying, and then the relationship between the indexes of the shape and main components of *A. roxburghii*, total selenium and organic selenium of plant and organs, growth amount of plant and selenium application amount were detected and analyzed. The results showed that selenium application significantly increased the selenium content of the plants and the highest absorption and utilization rate of selenium was 13.09% for adding to seedling propagation medium, followed by foliage spraying, adding to transplanting substrate and humus soil under the forest, which were 6.81%, 6.36% and 2.79%, successively. The total selenium content of dry plant increased with the application concentration, the organic selenium content was 81.8%–92.1%, and the selenium organic conversion rate was not affected by the application concentration. The selenium content in each organ of the plant ranked as root>leaf>stem, and the conversion rate of organic selenium in plant organs ranked as leaf>root>stem. The proper concentration of selenium applied to the root could promote the growth of *A. roxburghii*, while excessive concentration could inhibit its growth. Foliage spray selenium had no significant effect on the growth of the plants. Selenium application had no significant effect on the content of main components in the plants. The best economic application amount of selenium in the plants of *A. roxburghii* was 4.75 mg/L in seedling propagation medium, 0.168 mg/plant in foliage spraying, 8.00 mg/L in transplanting substrate and 9.50 mg/L in humus soil under the forest. From the comprehensive application effect, the best absorption and utilization efficiency and the best yield effect could be obtained by adding selenium to the seedling propagation medium.

Key words: *Anoectochilus roxburghii*; sodium selenite; organic selenium; accumulation