

不同形态硒对金针菇吸收和富集硒的影响^①

万亚男, 罗章, 王晓芳, 王琪, 余垚, 郭岩彬, 李花粉*

(农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:通过基质栽培试验,研究了硒酸钠、亚硒酸钠和硒代蛋氨酸(0~0.8 mg/kg)对金针菇(*Flammulina velutipes*)吸收和富集硒的影响。结果表明,外源硒的添加显著增加了金针菇原基和子实体的硒含量,且硒含量均随硒添加浓度的上升而显著增加。在相同硒浓度水平下,3种外源硒对金针菇子实体硒含量的增加效果为亚硒酸钠>硒代蛋氨酸>硒酸钠:施硒量为0.8 mg/kg时,3种硒处理下金针菇子实体的硒含量分别为0.24、0.12和0.08 mg/kg。此外,亚硒酸钠处理下金针菇子实体和原基的硒回收率大于硒代蛋氨酸和硒酸钠处理。且随着硒添加浓度的增加,硒代蛋氨酸和硒酸钠处理下子实体硒的回收率显著下降:分别从14.28%逐渐降低到6.33%和从13.67%减少到3.70%;而添加硒酸钠时,硒的回收率随添加浓度的增加无显著变化。

关键词:金针菇; 硒酸钠; 亚硒酸钠; 硒代蛋氨酸; 硒回收率

中图分类号: S646.9 **文献标识码:** A

硒(Selenium, Se)是一种人和动物必需的微量元素,参与了哺乳动物体内多种蛋白质与酶(如谷胱甘肽过氧化物酶、硫氧还蛋白还原酶以及碘化甲腺原氨酸脱碘酶等)的合成,在抗氧化、抗突变、抗癌等方面发挥了重要的作用^[1]。我国的硒资源分布不均,缺硒现象严重。人体缺硒时,机体的免疫系统、生殖系统受到损伤,严重缺硒时会引发大骨节病及克山病等^[2]。因此,摄取适量的硒对于保持人体健康具有十分重要的意义。由于硒只能从外界摄入,人体内部的硒水平主要取决于食物中的硒。进行富硒产品的研究和开发,通过日常饮食提高硒的摄入量,对实现缺硒人群的补硒是最经济有效的手段。

近些年来,有多项研究发现,外源硒的添加可以显著提高农作物如小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)和蔬菜类等可食部位的硒含量^[3-5],施用富硒肥料进行作物富硒强化也成为研究热点。由于营养价值高、味道鲜美等特点,食用菌在我国居民日常膳食中的地位日益重要^[6]。金针菇(*Flammulina velutipes*)是世界上最广泛的食用菌之一,且具有很高的药用食疗作用^[7]。金针菇对硒的富集能力较强,有研究发现,在培养液中添加20 mg/kg的硒时,金针菇菌丝体对硒的吸收速率比对照高出18 400多倍^[8]。

因此,金针菇可作为一种硒补充的重要来源。虽然前人对金针菇进行过诸多的研究,但大多只是单一的施用硒酸盐或亚硒酸盐。本次试验将对硒酸钠、亚硒酸钠和硒代蛋氨酸3种外源硒共同施用时进行效果比较,并对金针菇子实体和原基的硒含量和硒利用率进行全面分析,以其为富硒产品的研发提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设置

供试金针菇(*Flammulina velutipes*)为白金针菇,本试验布置于山东省博山区某食用菌基地,在该基地现有的金针菇栽培基础上,进行金针菇的富硒试验。供试硒源为硒酸钠(Na_2SeO_4 ,纯度: $\geq 98\%$)、亚硒酸钠(Na_2SeO_3 ,纯度:99%)和硒代蛋氨酸(SeMet,纯度: $\geq 98\%$)3种,添加量均包括(以Se计)0、0.1、0.2、0.4、0.8 mg/kg基质5个水平,共用空白。每个处理设置4个重复。硒酸钠和亚硒酸钠购于Sigma公司(St Louis, MO, USA),硒代蛋氨酸由山西大学提供。

按每袋0.8 kg基质计算硒添加量称取相应质量的硒酸钠、亚硒酸钠和硒代蛋氨酸配成溶液,与基质充分混匀,灭菌消毒后进行接种,培养。3个月后,

基金项目:中央高校基本科研业务费(2018TC031)和公益性行业(农业)科研专项(201303106)资助。

* 通讯作者(lihuafen@cau.edu.cn)

作者简介:万亚男(1992—),女,河南新乡人,博士研究生,主要从事环境化学方面的研究。E-mail: 2549354538@qq.com

分子实体(可食部分)和原基(即金针菇菌柄下方老化、需切除的部分)收获。

1.2 样品采集与测定

收获后,称量各原基和子实体的鲜重。然后用液氮冷冻后粉碎,保存鲜样,待测。

用万分之一天平称取子实体和原基的鲜样 0.500 0 g 左右于消煮管中,加入 8 ml HNO₃(GR)冷消化过夜,然后采用密闭式微波消解法(CEM, MARS-5)进行消解,消解结束后,取出冷却,然后将溶液转移至 50 ml 容量瓶中,定容,过滤至 15 ml 离心管中。滤液经 6 mol/L HCl 水浴还原后,用原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司 AFS-920 双道原子荧光光度计)测定硒含量。在整个测定过程中植物样品采用含硒量为 0.20 ± 0.03 mg/kg 的圆白菜(GBW10014 GSB-5)和空白样品进行全程质量控制,标准物质回收率为 93% ~ 110%。

1.3 数据处理

金针菇子实体和原基的回收率是指子实体和原基的硒总量分别占硒施用总量的百分比值,是用来评价富硒效果的指标之一;硒由金针菇原基向子实体的转移系数是指子实体硒含量与原基硒含量的比值,可用来评价植物将离子从根系向地上部的运输和富集能力。金针菇各部位的硒含量(C)用鲜重计,生物量用 B 表示;各部位的硒总量(T)、硒回收率(R)和转移系数(TF)的计算公式如下:

$$T_{\text{子实体}} = C_{\text{子实体}} \times B_{\text{子实体}} \quad (1)$$

$$T_{\text{原基}} = C_{\text{原基}} \times B_{\text{原基}} \quad (2)$$

$$R_{\text{子实体}} = \frac{T_{\text{子实体}}}{T_{\text{添加}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{\text{原基}} = \frac{T_{\text{原基}}}{T_{\text{添加}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$TF = \frac{C_{\text{子实体}}}{C_{\text{原基}}} \times 100\% \quad (5)$$

试验数据为 4 次重复的平均值和标准误差。使用 Excel 进行数据处理,并采用 SAS 9.0 进行方差分析(多重比较采用 Duncan 法),图采用 Sigmaplot 12.5 绘制。

2 结果与分析

2.1 金针菇子实体和原基的硒含量

在基质中添加不同形态的硒均显著提高了金针菇子实体的硒含量,且提高程度随外源硒添加量的升高而增加(图 1A)。与对照(0.02 mg/kg)相比,添加不同含量(0.1 ~ 0.8 mg/kg)的硒酸钠、硒代蛋氨酸和亚硒

酸钠分别使金针菇子实体的硒含量增加了 27.56% ~ 232.48%、52.69% ~ 398.27% 和 1.23 倍 ~ 8.98 倍。施硒水平相同时,3 种外源硒对金针菇子实体硒含量的增加效果为亚硒酸钠>硒代蛋氨酸>硒酸钠。在试验施硒量(0.1 ~ 0.8 mg/kg)下,子实体硒含量之比为:亚硒酸钠处理:硒代蛋氨酸处理:硒酸钠处理=(1.29 ~ 3.00):(1.19 ~ 1.68):1。施硒量为 0.8 mg/kg 时,亚硒酸钠、硒代蛋氨酸和硒酸钠处理下金针菇子实体的硒含量分别为 0.24、0.12 和 0.08 mg/kg。根据陕西省地方富硒食品标准(DB61/T556—2012)中对富硒食用菌(湿基人工栽培)硒含量 0.15 ~ 3.00 mg/kg 的规定,亚硒酸钠作为硒源在 0.8 mg/kg 硒处理时可达富硒金针菇生产的要求,而硒酸钠和硒代蛋氨酸为硒源栽培富硒金针菇需继续提高其施用量。从中国营养学会推荐的最低人均日摄入量 60 μg 来看,添加 0.8 mg/kg 亚硒酸钠处理后的 250 g 左右金针菇就可以满足一个成人的当日硒需求。

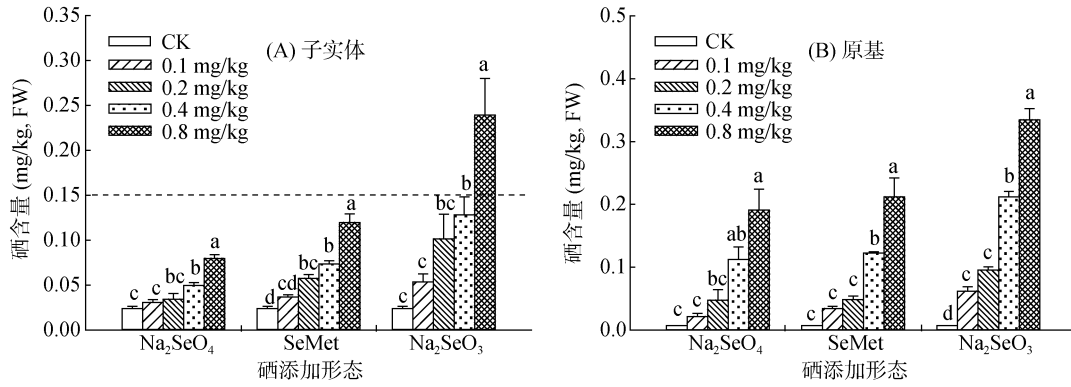
基质中添加硒也可以显著提高金针菇原基的硒含量,且硒含量均随外源硒添加量的上升而显著增加(图 1B)。相比于空白处理(0.03 mg/kg),原基的硒含量在硒酸钠、硒代蛋氨酸和亚硒酸钠处理后分别可以增长 2.11 倍 ~ 26.37 倍、3.93 倍 ~ 29.44 倍和 7.88 倍 ~ 46.99 倍。3 种外源硒在增加金针菇原基硒含量的效果上具有差异,其中亚硒酸钠处理效果较好,硒代蛋氨酸和硒酸钠的效果基本一致,且明显低于亚硒酸钠。

2.2 硒的添加量与子实体硒含量的相关性

将金针菇子实体的硒含量和硒施用量作相关性分析,发现在不同形态硒处理下,子实体的硒含量与硒的施用量均呈一元线性正相关,绝对系数达到极显著水平($P < 0.001$)(表 1)。相当于每施加 1 mg/kg(以 Se 计)的亚硒酸钠、硒代蛋氨酸和硒酸钠到基质中时,分别使金针菇子实体硒含量约增加了 0.07、0.12 和 0.27 mg/kg。若基施硒肥使金针菇达到陕西省地方富硒食品标准《富硒食品及相关产品硒含量标准》(DB61/T556—2012)中富硒食用菌硒含量 0.15 ~ 3.00 mg/kg 的要求,那么则需要硒酸钠的施用量为 1.81 ~ 42.41 mg/kg,硒代蛋氨酸的施用量为 1.05 ~ 25.39 mg/kg,亚硒酸钠的施用量为 0.46 ~ 11.09 mg/kg(以 Se 计)。因此,在富硒金针菇的生物强化过程中,施用亚硒酸钠能够减少硒肥的施用量,更高效、经济和环保。

2.3 硒在金针菇中的回收率与转运

表 2 为不同硒处理下金针菇各部位的硒回收率和转移系数。金针菇子实体中硒的回收率可用来评价



(图中虚线表示陕西省食用菌富硒标准《富硒食品及相关产品硒含量标准》(DB61/T556—2012)下限 0.15 mg/kg；同一硒形态数据小写字母不同表示不同硒含量处理间差异显著($P < 0.05$))

图 1 不同硒处理下金针菇子实体(A)和原基(B)的硒含量

Fig. 1 Se contents in fruiting body (A) and base (B) of *Flammulina velutipes*

表 1 金针菇子实体的硒含量和硒肥施用量之间的相关性
Table 1 Correlation between Se content in fruiting body of *Flammulina velutipes* and application dosage of Se fertilizers

硒添加形式	线性方程	绝对系数(R^2)
Na_2SeO_4	$y = 0.070 2 x + 0.022 6$	0.994 5***
SeMet	$y = 0.117 1 x + 0.027 1$	0.988 4***
Na_2SeO_3	$y = 0.268 1 x + 0.026 0$	0.976 9***

注：***表示显著水平为 $P < 0.001$ 。

不同形态、不同含量硒的富硒效果。结果发现，在施硒量为 0.1 mg/kg 时，不同形态的硒处理对金针菇子实体的硒回收率无显著影响，分别为 13.67%、14.28% 和 13.03%。而当施硒量增加时(0.2 ~ 0.8 mg/kg)，子实体硒的回收率为亚硒酸钠处理(13.08%

~ 17.44%)>硒代蛋氨酸处理(6.33% ~ 11.19%)>硒酸钠处理(3.70% ~ 7.26%)。施硒量 0.8 mg/kg 下，3 种硒处理下子实体硒回收率的比值为 3.26 : 1.71 : 1。此外，随着施硒量的增加，硒代蛋氨酸和硒酸钠作为硒源时，子实体硒的回收率显著下降($P < 0.05$)，分别从 14.28% 逐渐降低到 6.33% 和从 13.67% 减少到 3.70%，表明硒的利用效率与添加量成反比；而添加亚硒酸钠时，硒的回收率随添加量的增加无显著变化。施加不同形态的硒也可以显著影响金针菇原基的硒回收率，在所有施硒量处理下，添加亚硒酸钠时原基硒的回收率大于硒代蛋氨酸和硒酸钠。3 种不同形态硒处理下，硒的添加量对原基硒的回收率均无显著影响。

表 2 硒在金针菇中的回收率和转移系数(TF)
Table 2 Se recovery and transfer factor (TF) in *Flammulina velutipes*

硒添加浓度(mg/kg)	硒添加形式	子实体回收率(%)	原基回收率(%)	转移系数
0.1	Na_2SeO_4	13.67 ± 1.90 a	2.01 ± 0.15b	1.14 ± 0.18 a
	SeMet	14.28 ± 1.49 a	2.29 ± 0.34 b	1.09 ± 0.11 a
	Na_2SeO_3	13.03 ± 2.19 a	4.05 ± 0.63 a	0.72 ± 0.05 a
0.2	Na_2SeO_4	7.26 ± 1.41 b	2.77 ± 0.56 a	1.04 ± 0.06 a
	SeMet	11.19 ± 1.51 b	1.82 ± 0.38 a	0.93 ± 0.17 a
	Na_2SeO_3	17.44 ± 0.14 a	3.51 ± 0.62 a	0.80 ± 0.06 a
0.4	Na_2SeO_4	4.77 ± 0.50 c	1.94 ± 0.19 b	0.61 ± 0.06 a
	SeMet	7.88 ± 0.10 b	1.84 ± 0.14 b	0.61 ± 0.02 a
	Na_2SeO_3	15.70 ± 0.67 a	4.03 ± 0.31 a	0.72 ± 0.06 a
0.8	Na_2SeO_4	3.70 ± 0.45 b	1.58 ± 0.37 b	0.45 ± 0.06 a
	SeMet	6.33 ± 0.48 b	1.56 ± 0.31 b	0.60 ± 0.11 a
	Na_2SeO_3	13.08 ± 1.25 a	2.98 ± 0.08 a	0.58 ± 0.01a

注：表中同一浓度下小写字母不同表示不同形态硒处理间差异显著($P < 0.05$)。

转移系数可用来评价植物将离子从根系向地上部的运输和富集能力，转移系数越大，则从根系向地

上部的转运能力越强。不同形态的硒对硒由原基向子实体的转移系数无显著差异。且在添加硒含量为 0.1

和 0.2 mg/kg 时, 硒酸钠和硒代蛋氨酸处理组中硒的转移系数略大于亚硒酸钠处理组。此外, 硒酸盐和硒代蛋氨酸处理下, 硒的转移系数随着硒添加量的增加呈现下降趋势, 分别从 1.14 降低到 0.45 和从 1.09 降低到 0.60; 而在亚硒酸盐处理下, 不同含量的外源硒处理下硒的转移系数无显著差异。

3 讨论

试验结果表明, 施加亚硒酸钠、硒酸钠和硒代蛋氨酸对于增加金针菇子实体中的硒含量均具有显著效果, 且子实体的硒含量与外源硒的添加量呈显著线性正相关。这与铁梅^[9]的研究结果类似: 以亚硒酸钠作为硒源, 当施加量小于 200 mg/L(以 Se 计)时, 金针菇子实体的硒含量随液体基质硒浓度的增加而显著增大, 硒含量可达普通金针菇的 2 倍 ~ 630 倍。对其他菌类如秀珍菇(*Pleurotus geesteranus*)、香菇(*Lentinula edodes*)、茶树菇(*Agrocybe aegerita*)和猴头菇(*Hericium erinaceus*)等的研究也发现, 在培养基中添加硒酸钠或者亚硒酸钠时, 在一定浓度范围内, 浓度越高, 子实体对硒的富集量越大^[10-12]。结果显示, 除了在硒添加量为 0.1 和 0.2 mg/kg 下, 硒酸钠和硒代蛋氨酸处理时金针菇中的硒含量为子实体原基(转移系数 1)外, 其他处理中原基的硒含量均大于子实体(转移系数为 0.45 ~ 0.80)。而李华为等^[13]的研究发现, 同一浓度培养基中生长的金针菇, 子实体的硒含量为菌盖>菌柄>菌根, 具有顶端优势。出现差异的原因可能在于李华为等的研究结果来自干样分析, 而本研究采用鲜样分析, 其原基和子实体的含水率分别在 75% 和 90% 左右, 经换算得出的结论即与李华为等的结论一致。

本试验中, 在施硒量相同时, 不同硒源对于金针菇子实体硒含量的提高效果为亚硒酸钠>硒代蛋氨酸>硒酸钠。植物对硒的吸收和向地上部的转移与硒的形态有关^[14]。硒酸盐的水溶性高于亚硒酸盐, 土壤胶体或铁氧化物等对其的吸附作用较亚硒酸盐弱, 具有更高的植物有效性^[15-16]。被植物吸收后, 硒酸盐在植物中的移动性较强, 被根系吸收后很容易通过木质部向地上部转运; 而亚硒酸盐被植物根系吸收后主要累积在根部, 只有极少一部分转运到植物地上部^[17-18]。万亚男等^[19]研究发现, 土培条件下, 在施硒水平为 100、200 g/hm² 时, 相同施硒量下硒酸钠处理的韭菜(*Allium tuberosum*)可食部位的硒含量显著高于亚硒酸钠处理。对其他作物如油菜(*Brassica napus* L.)、小麦等的研究也发现这一规律^[20-21]。本试

验的相反结果可能是因为金针菇是在基质中培养的, 没有土壤固相的吸附, 外源硒的有效性较高。而在离子状态下, 与硒酸盐相比, 亚硒酸盐更易被植物根系吸收, 水培条件下生长的水稻(*Oryza Sativa*)幼苗, 相同浓度(5 μmol/L)下, 亚硒酸钠处理下根系的硒含量约为硒酸钠处理下的 5 倍 ~ 22 倍^[22]。Milovanović 等^[23]研究发现, 食用菌吸收和利用无机硒的途径为: 先还原为 H₂Se, 接着转化为硒蛋白、甲基硒化物和硒单质等, 硒酸盐转化为亚硒酸盐是限制植物吸收利用硒的主要步骤。因此硒酸盐对食用菌的利用率低于亚硒酸盐。Gharieb 等^[24]在酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)对亚硒酸盐吸收试验中, 观察到了一个快速、代谢独立的阶段, 认为是一个非生物吸附和被动扩散的过程。Wang 等^[25]研究发现, 呼吸抑制剂使金针菇吸收亚硒酸盐的速率降低了 11%。而植物对硒酸盐的吸收是一个主动运输的过程^[17]。植物对硒代蛋氨酸的吸收还未明确, 王琪^[26]通过对水稻的研究发现硒代蛋氨酸主要通过水通道进入根系; 而 Abrams 等^[27]认为小麦对硒代蛋氨酸的吸收是一个主动运输的过程。对猴头菇、茶树菇和香菇进行研究发现, 3 种食用菌对亚硒酸钠的富集效率明显高于硒酸钠^[12, 28]。在双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)的类似试验中, 硒水平为 5 mg/kg 下其子实体硒含量为: 硒代蛋氨酸处理(26.9 mg/kg)>亚硒酸钠处理(20.0 mg/kg)>硒酸钠处理(6.0 mg/kg)^[29]。而王琪^[26]的研究表明硒代蛋氨酸处理下小麦和玉米各部位的硒含量和回收率和亚硒酸钠处理的结果相近, 且小麦根系、秸秆和籽粒的硒含量为亚硒酸处理略大于硒代蛋氨酸处理。本试验中亚硒酸钠的利用效率高于硒代蛋氨酸, 这可能是因为不同作物对不同外源硒的吸收和富集规律存在一定的差异, 还需要进一步的研究证明。此外, 还有可能是硒代蛋氨酸在基质中被微生物分解而挥发流失。

在不同含量亚硒酸钠处理下金针菇子实体中硒的回收率为 13.03% ~ 17.44%, 说明亚硒酸钠作为硒源进行金针菇富硒栽培时硒的利用效率稳定。胡海涛等^[30]在 4 种食用菌(杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*)、灵芝(*Ganoderma lucidum*)、云芝(*Coriolus versicolor*)和鸡腿菇(*Coprinus comatus*))的液体基质中添加 50 mg/L 亚硒酸钠进行培养后, 得出硒的利用率为 11% ~ 22%。硒酸钠和硒代蛋氨酸的利用率随着添加量的升高而降低, 在 0.8 mg/kg 处理时仅为 3.70% 和 6.33%。李红丽等^[10]对秀珍菇的研究发现, 硒酸钠处理下, 随着基质硒含量的增加(0.69、1.16、5.00、17.93 和

98.16 mg/kg), 子实体对硒的回收率呈现先降低后增加的趋势, 为 7.38%~12.72%。本试验中, 硒在子实体中的回收率为 3.70%~17.44%, 硒在基质中残留较多。因此可以考虑金针菇生产残余的基质采取类似堆肥等再次利用手段, 减少硒的浪费, 也可避免对环境造成额外的硒污染。

4 结论

1) 在试验施硒量(0.1~0.8 mg/kg)下, 对金针菇基施不同形态的硒均可显著提高子实体的硒含量, 提高效果为亚硒酸钠>硒代蛋氨酸>硒酸钠。且金针菇子实体的硒含量与硒添加浓度均呈显著线性正相关。

2) 添加亚硒酸钠时金针菇子实体和原基硒的回收率大于硒代蛋氨酸和硒酸钠处理。且随着硒添加含量的增加, 子实体硒的回收率在硒代蛋氨酸和硒酸钠处理时显著下降; 而在添加硒酸钠时无显著变化。说明亚硒酸钠作为硒源时硒的利用效率较稳定。

参考文献:

- [1] Brown K M, Arthur J R. Selenium, selenoproteins and human health: A review[J]. *Public Health Nutrition*, 2001, 4: 593-599
- [2] Fairweather-Tait S J, Bao Y, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants and Redox Signaling*, 2011, 14(7): 1337-1383
- [3] Li Y, Xu W H, Xie W W, et al. Effect of exogenous selenium on activity of glutathione peroxidase and uptake and conversion of selenium in several *Brassica* vegetables[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20(2): 463-470
- [4] Wang Q, Yu Y, Li J, et al. Effects of different forms of selenium fertilizers on Se accumulation, distribution and residual effect in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2017, 65(6): 1116-1123
- [5] 张木, 胡承孝, 孙学成, 等. 钼硒配施对小白菜钼硒形态及硒价态的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 894-900
- [6] 程琳琳, 张俊飏. 中国食用菌主要品种时序演进及空间差异——以香菇和平菇为例[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2015(5): 48-58
- [7] Yang W, Yu J, Pei F, et al. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196(1): 860-866
- [8] 何炎焯, 李能树. 富硒金针菇栽培及成分分析研究[J]. *农学学报*, 2015(2): 75-78
- [9] 铁梅. 食用菌中硒的形态分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2006
- [10] 李红丽, 尹雪斌, 李朝品. 利用硒酸钠进行秀珍菇硒强化试验研究[J]. *食用菌*, 2011(3): 29-31
- [11] 曹德宾, 王广来, 张克著, 等. 富硒香菇栽培关键技术[J]. *蔬菜*, 2017(5): 65-67
- [12] Niedzielski P, Mleczek M, Siwulski M, et al. Efficacy of supplementation of selected medicinal mushrooms with inorganic selenium salts[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B-pesticides Food Contamination*, 2014, 49(12): 929-937
- [13] 李华为, 铁梅, 张崑, 等. 金针菇子实体富硒栽培特性及 HPLC-ICP-MS 法对硒的分布研究[J]. *菌物学报*, 2012(1): 86-91
- [14] 周鑫斌, 赖凡, 张城铭, 等. 不同形态硒向水稻籽粒转运途径及品种差异[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1251-1258
- [15] Neal R H, Sposito G. Selenate adsorption on alluvial soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 70-74
- [16] Neal R H, Sposito G, Holtzclaw K M, et al. Selenite adsorption on alluvial soils: I. Soil composition and pH effects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1161-1165
- [17] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44: 1083-1087
- [18] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178: 92-102
- [19] 万亚男, 王晓芳, 罗章, 等. 不同形态硒对韭菜吸收富集及土壤累积硒的影响[J]. *园艺学报*, 2017, 44(4): 703-711
- [20] 郭璐, 满楠, 梁东丽, 等. 小白菜对外源硒酸盐和亚硒酸盐动态吸收的差异及其机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3272-3279
- [21] 付小丽. 不同硒源对小麦和油菜生长及硒累积的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013
- [22] Huang Q Q, Yu Y, Wang Q, et al. Uptake kinetics and translocation of selenite and selenate as affected by iron plaque on root surfaces of rice seedlings[J]. *Planta*, 2015, 241(4): 907-916
- [23] Milovanović I, Brčeski I, Stajić M, et al. Potential of *Pleurotus ostreatus* mycelium for selenium absorption[J]. *The Scientific World Journal*, 2014. DOI: 10.1155/2014/681834
- [24] Gharieb M M, Gadd G M. The kinetics of ⁷⁵[Se]-selenite uptake by *Saccharomyces cerevisiae* and the vacuolization response to high concentrations[J]. *Mycological Research*, 2004, 108(12): 1415-1422
- [25] Wang J, Bo W, Dan Z, et al. Selenium uptake, tolerance and reduction in *Flammulina velutipes* supplied with selenite[J]. *Peerj*, 2016. DOI: 10.7717/peerj.1993
- [26] 王琪. 水稻和小麦对有机硒的吸收、转运及形态转化机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
- [27] Abrams M M, Shennan C, Zasoski R J, et al. Selenomethionine uptake by wheat seedlings[J]. *Agronomy Journal*, 1990, 82(6): 1127-1130

- [28] Zhou F, Yang W, Wang M, et al. Effects of selenium application on Se content and speciation in *Lentinula edodes*[J]. Food Chemistry, 2018, 265: 182–188
- [29] Lin Z Q, Haddad S, Hong J, et al. Use of selenium-contaminated plants from phytoremediation for production of selenium-enriched edible mushrooms[J]. Selenium in the Environment and Human Health, 2013: 124–126
- [30] 胡海涛, 袁林喜, 郑璞, 等. 4 种食用菌硒积累能力比较与硒形态研究[J]. 中国食用菌, 2012, 31(3): 38–41

Effect of Selenate, Selenite and Selenomethionine on Selenium Accumulation in *Flammulina velutipes*

WAN Yanan, LUO Zhang, WANG Xiaofang, WANG Qi, YU Yao, GUO Yanbin, LI Huafen*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The effects of basal-applied selenate, selenite and selenomethionine (SeMet) (0 – 0.8 mg/kg) on selenium accumulation in *Flammulina velutipes* were studied in soil-less culture. Results showed that Se contents in *Flammulina velutipes* fruiting body and base increased significantly with the increase of Se addition. The application of selenite showed better effect than SeMet and selenate in increasing Se content in *Flammulina velutipes*. For the substrate amended with 0.8 mg/kg selenite, selenate and SeMet, the Se levels in fruiting body were 0.24, 0.12 and 0.08 mg/kg (fresh mass), respectively. The recovery (fruiting body and root) of Se applied as selenite was greater than SeMet and selenate. What's more, the recovery of Se in fruiting body in SeMet and selenate decreased significantly from 14.28% to 6.33% and from 13.67% to 3.70%, respectively, with the increase of Se levels in substrate; while no significant difference in the recovery (fruiting body) of Se among different Se levels when applied selenite.

Key words: *Flammulina velutipes*; Selenate; Selenite; Selenomethionine; Se recovery