

## 施硒对暗棕壤硒状况和森林蔬菜硒积累的影响\*

崔晓阳 曹 楷 郝敬梅

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要** 以培育富硒森林蔬菜为目标, 在暗棕壤上进行了茺蔚、小叶芹、小根蒜、婆婆丁等4种山野菜施硒试验。硒肥种类为亚硒酸钠, 施硒量为 $0.10\sim 10.00\text{mg kg}^{-1}$ , 直接施肥范围为 $0\sim 15\text{cm}$ 表土。经过一个完整的生长周期(1a)后测定土壤和植物硒指标。结果表明, 典型暗棕壤对外源亚硒酸钠态硒具有较强吸收与保持能力, 从低剂量至高剂量施入的硒有 $90\%\sim 70\%$ 以上仍保留在原施硒土层内; 其中 $\text{H}_2\text{O}$ 可溶态硒占全硒的 $6.03\%\sim 3.78\%$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 浸提的有效态硒占全硒的 $19.36\%\sim 37.54\%$ , 而且土壤全硒、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 浸提的有效态硒及 $\text{H}_2\text{O}$ 可溶态硒皆与最初的施硒量呈线性正相关。在土施强化供硒条件下, 4种山野菜均能高量富集硒, 其含硒量为对照的 $1.7\sim 158.9$ 倍; 不同植物的富硒能力有差异, 它们在递增施硒情况下高量富集硒的变化模式也各有特点。总体来看, 山野菜含硒量与施硒量之间为非线性正相关关系, 但在一定的较低施硒量范围内这种关系则是线性的, 线性范围因植物而异; 土壤的可溶态硒、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 浸提的有效态硒甚至全硒等指标与山野菜含硒量之间亦均呈明显的非线性正相关, 且施硒量较低时其关系亦表现为线性。初步得出, 典型暗棕壤控制施硒是在近自然条件下培育富硒森林蔬菜并获取高富硒生物资源的有效途径; 不过, 强烈搅动的砂砾质暗棕壤却不利于硒肥保持和植物吸收, 不适于富硒森林蔬菜栽培。

**关键词** 暗棕壤; 亚硒酸钠; 土壤硒; 森林蔬菜; 硒富集

中图分类号 S718.5 文献标识码 A

近年来, 硒与人群健康的关系受到极大关注<sup>[1~3]</sup>, 富硒生物产品研发也日益展现出良好前景。为了获取植物性有机硒资源, 已有研究者着手从野生植物中筛选富硒类群<sup>[4,5]</sup>。最常见的方式是土壤施硒或农作物喷硒, 使无机硒(部分地)转化为生物有机硒, 通过粮食作物、蔬菜、水果、茶等进入食物链, 以补充人体对硒的需求<sup>[6~13]</sup>。在土壤施硒情况下, 揭示硒肥在土壤—作物系统中的时空迁移和形态转化规律无疑是科学地解决问题的关键。

森林蔬菜(俗称山野菜)是我国东北林区具重要食、药用价值的特产, 因其属于天然健康食品而日渐进入现代人群的食物链。崔晓阳等<sup>[4]</sup>研究发现, 有些山野菜种类还可能是颇具前途的富硒资源。在当前可采伐森林资源濒于枯竭, 国家全面实施天然林保护工程的大背景下, 开发非林木资源对林区经济尤显重要。有鉴于此, 作者提出了培育富硒森林蔬菜的构想: 含硒量符合《食品中硒限量卫生标准》(GB13105-1991)的富硒山野菜直接作为特种农产品利用; 大剂量施硒情况下生产的含硒量超过限量标

准的高硒山野菜则用作食品工业或医药业的富硒生物原料。本研究主要目的是初步弄清下列问题:

- (1) 暗棕壤施硒后外源硒的存留与土壤硒状况;
- (2) 土施强化供硒条件下山野菜植物能否富硒及富硒特征;
- (3) 土壤干扰因素对山野菜植物富硒的影响;
- (4) 施硒条件下土壤硒指标与山野菜含硒量的关系。据此, 初步揭示递增施硒情况下外源硒在暗棕壤—山野菜体系中的转化和富集特征, 为山野菜富硒栽培并获取以“高富硒山野菜”为载体的生物硒资源提供科学依据。

## 1 材料与方法

选择东北林区常见的茺蔚(*Matteucia struthiopteris* Todaro)、小叶芹(*Aegopodium alpestre*)、婆婆丁(*Taraxacum mongolicum*)、小根蒜(*Allium macrostemon*)等4种多年生山野菜作为供试植物材料。其中婆婆丁、小根蒜喜阳, 多生于空旷地; 茺蔚、小叶芹喜阴, 常生于林下。

\* 国家自然科学基金项目(30500117)和黑龙江省自然科学基金项目(C0645)资助

作者简介: 崔晓阳(1964~), 男, 汉族, 山东宁津人, 博士, 教授。主要从事森林土壤与植物营养学研究。Tel: 0451-82131673,

E-mail: C\_xiaoyang@126.com

收稿日期: 2006-08-24; 收到修改稿日期: 2006-11-09

### 1.1 试验地设置

试验地设在东北林业大学帽儿山实验林场老爷岭生态站(127°30′~127°34′ E, 45°20′~45°25′ N)。该区地处张广才岭西部余脉, 低山丘陵地貌, 属温带季风气候, 年均温度 2.8℃, 无霜期 130d 左右; 年均降水量 723.8mm, 主要集中于夏季; 植被类型为

以阔叶树为主的天然次生林和少量人工林, 植物生长期大约在 5 月上旬至 9 月上旬之间; 地带性土壤为暗棕壤(花岗岩母质), 非地带性土壤有草甸土和白浆土等。

共设置了 3 个试验地块(表 1), 其中 A、B 地块位置相近, 土壤类型相同, 为主要试验地。

表 1 试验地基本情况

Table 1 General conditions of the experimental sites

地块编号 Site No	地形与植被特点 Topography and vegetation	土壤类型与性质 Soil type and properties	山野菜种类及生境 Species of wild vegetable plants
A	坡地, 中坡位, 坡度 5~7, 天然次生林, 郁闭度 0.7, 间有小面积的林中空地	典型暗棕壤, 腐殖质层(A <sub>1</sub> )厚度 > 20 cm, 表土(0~20 cm)壤质, 无砂砾, pH6.25, 有机质含量 128.7 g kg <sup>-1</sup> , 养分丰富	林下: 小叶芹( <i>A. dpestre</i> ) + 荚果蕨( <i>M. struthiopteris</i> ) 林隙空地: 婆婆丁( <i>T. mongolicum</i> ) + 小根蒜( <i>A. macrostemon</i> )
B	处于 A 地块的下坡位, 坡度 5~7, 天然次生林, 郁闭度 0.6~0.7	典型暗棕壤, 腐殖质层(A <sub>1</sub> )厚度 > 20 cm, 表土(0~20 cm)壤质, 无砂砾, pH5.92, 有机质含量 119.7 g kg <sup>-1</sup> , 养分丰富	林下: 小叶芹( <i>A. dpestre</i> ) + 荚果蕨( <i>M. struthiopteris</i> )
C	生态站楼前平地, 无上层植被, 阳光充足	搅动暗棕壤(发生层混合), 沙石含量 30%~50%, pH6.97, 有机质含量 32.8 g kg <sup>-1</sup> , 养分状况较差	空旷地: 婆婆丁( <i>T. mongolicum</i> )

### 1.2 试验处理及施用方法

在地块 A 中分别设置了 12 个“婆婆丁+小根蒜”样方和 12 个“小叶芹+荚果蕨”样方, 样方面积 1 m × 2 m, 最小间距 2 m; 设表土(0~15 cm)施硒 0.00、0.10、1.00 和 10.00 mg kg<sup>-1</sup> 4 种处理(相当于施 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 0.00、0.033、0.33 和 3.30 g m<sup>-2</sup>), 每处理重复 3 次, 完全随机排列。在地块 B 中设置了 9 个“小叶芹+荚果蕨”样方, 设表土(0~15 cm)施硒 0.00、0.33 和 3.30 mg kg<sup>-1</sup> 3 种处理(相当于施 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 0.00、0.11 和 1.10 g m<sup>-2</sup>), 各处理重复 3 次, 完全随机排列。在地块 C 中设置了 12 个“婆婆丁”样方, 其处理设置、重复数和排列方式同地块 A。

施用方法: 按设计施用量, 称取一定量的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, 溶于适量水中(水量以刚渗透至 15cm 深度为宜), 用喷壶均匀洒于试验样方内, 然后再洒少量清水, 迅速将沾在植物叶面上的硒剂冲洗干净。施用时期为 5 月中旬, 此时大部分山野菜刚开始生长。由于施硒后不久便过了当年山野菜采收季节(幼嫩期), 所以施硒效果只能留待第 2 年观测。

### 1.3 样品采集、制备与检测

于第 2 年春季同期(5 月中旬)采集试验样方内山野菜可食部位作为植物样品。将采回的植物样品先用自来水冲洗干净, 再用去离子水冲洗, 然后在

60℃的烘箱中烘干, 磨碎, 过 0.25 mm 尼龙筛。同时用土钻采集试验样方内均匀分布的 5 个点的 0~15 cm 深土样, 混合均匀后, 作为该样方的土样。采回的土样捡去细根和杂物, 风干, 压碎, 过 0.25 mm 尼龙筛, 备用。

土壤有效硒分别采用 H<sub>2</sub>O 和 0.5 mol L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 振荡浸提<sup>[14]</sup>, 清液消化预处理<sup>[15]</sup>, XGY-1012 原子荧光光度计测定。样品全硒采用(5:1)HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub> 消化, 4.5 mol L<sup>-1</sup> HCl 还原<sup>[15]</sup>, XGY-1012 原子荧光光度计测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 施硒对土壤硒状况的影响

2.1.1 土壤含硒量的增加与外源硒的存留 A、B、C 三地块土壤自然含硒量分别为 0.221、0.261 和 0.103 mg kg<sup>-1</sup> (图 1 和图 2, 数据未显示), 大致处于我国东北地区土壤含硒量的中、上水平<sup>[16]</sup>, 但从全国来看仍属于低硒范围<sup>[17]</sup>。施硒后土壤硒水平皆显著提高。其中, A、B 地块位置相邻, 土壤类型一致(皆为典型暗棕壤), 土壤性质和自然含硒量相近, 所以递增施硒情况下土壤硒的积累或存留符合同一条特征曲线(图 1)。由图 1 可知, 典型暗棕壤施硒层

(0~15 cm) 含硒量与施硒量呈及显著的线性正相关。在 0.10~0.33 mg kg<sup>-1</sup> 较低施硒量情况下, 施入硒的存留率(施硒 1a 后土壤增加的含硒量占原施硒量的百分率) 均在 90% 以上; 施硒量在 1.00 mg kg<sup>-1</sup> 以上时, 存留率虽迅速下降, 但仍保持在 70% 以上; 即便施硒量达到 10.00 mg kg<sup>-1</sup> (约为土壤自然含硒量的 45 倍), 硒存留率仍高达 72.3% (图 1)。可见, 典型暗棕壤对外源亚硒酸钠态硒有很强的吸收、保持能力。C 地块的搅动暗棕壤情况则有所不同: 由于质地粗糙, 土壤胶体物质相对缺乏(表 1), 对硒的吸收、保持能力也较差。在 0.10 mg kg<sup>-1</sup> 低施硒量情况下, 硒存留率就已不足 50%, 而施硒量高达 10.00 mg kg<sup>-1</sup> 时, 硒存留率尚不足 10% (图 2)。

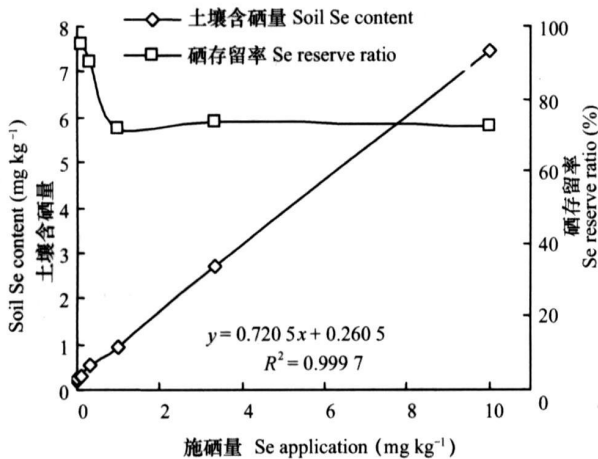


图 1 典型暗棕壤(A、B 地块)施用不同剂量亚硒酸钠 1 a 后土壤(0~15 cm)含硒量和硒存留率

Fig. 1 Effect of application rate of Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> on soil (0~15 cm) selenium content and residue rate of applied selenium in Typic Dark Brown Forest Soil (site A and site B) 1 year after application

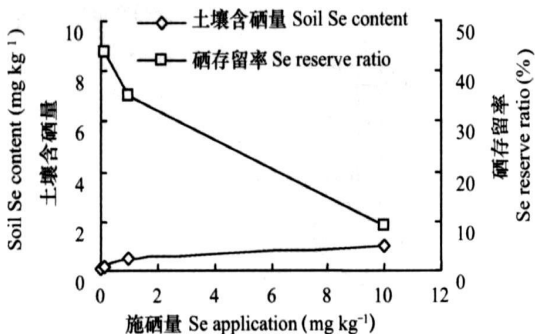


图 2 强烈搅动的砂砾质暗棕壤(C 地块)施用不同剂量亚硒酸钠 1 a 后土壤(0~15 cm)含硒量和硒存留率

Fig. 2 Effect of application rate of Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> on soil (0~15 cm) selenium content and the residue rate of applied selenium in strongly disturbed gravel-textured Dark Brown Forest Soil (site C) 1 year after application

可溶性的亚硒酸钠施入土壤后, 可发生 SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的吸附(包括非专性吸附和专性吸附)、沉淀、氧化还原等物理、化学反应, 也可以被微生物吸收而转化为生物有机态硒, 并随着腐殖化作用而部分地结合到腐殖质中。复杂的形态转化使可溶态硒转变成各种非可溶态, 这应该是暗棕壤吸收、保持硒的主要机制。至于硒的损失, 就施硒层土壤(0~15 cm)而言, 大致有三条迁出途径: (1) 植物吸收; (2) 通过土壤微生物的生物甲基化作用转变成挥发态有机硒化合物而损失<sup>[18]</sup>; (3) 向土壤深层淋失。从不同施硒剂量下植物含硒量(表 3)和植物产量(干物质不足 0.5 kg m<sup>-2</sup>) 推测, 植物吸收不是硒肥的主要去向。土壤微生物导致的硒甲基化损失目前尚难以估计, 从 A、C 地块的基础肥力状况(某种程度上反映了微生物活性)和较高施用量情况下二者硒残留率比较分析, 这似乎也不是硒损失的主要途径。SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (以及转化生成的 SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 向土壤深层淋失可能是决定性因素, A、C 地块土壤质地差异(意味着吸持硒的能力差异)和硒残留率差异的一致性支持这一看法(表 1, 图 1, 图 2)。

**2.1.2 土壤有效态硒** 土壤中对植物有效的硒形态主要是可溶态硒和可交换态硒<sup>[14, 15, 19, 20]</sup>, 而用 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 直接提取的有效态硒包括可溶态硒和交换态硒两部分。研究结果表明, 施硒 1 a 后典型暗棕壤的可溶态硒和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 浸提的有效态硒皆随着施硒量增加而线性增加, 二者与施硒量间的回归方程分别为:  $y = 0.0259x + 0.03$  ( $R^2 = 0.9838^{**}$ ) 和  $y = 0.275x + 0.0149$  ( $R^2 = 0.9973^{**}$ )。由表 2 可知, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 浸提的有效态硒的绝对数量和相对增长率均高于可溶态硒: 从最低施硒量至最高施硒量, H<sub>2</sub>O-Se 从 0.019 mg kg<sup>-1</sup> 增加到 0.282 mg kg<sup>-1</sup>, 增加了 13.8 倍; 而 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-Se 从 0.061 mg kg<sup>-1</sup> 增加到 2.796 mg kg<sup>-1</sup>, 增加了 44.8 倍。可溶态硒在土壤全硒中的分配系数(占全硒的百分数)为 6.22%~3.78%, 且大致随着施硒量增加而降低; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 浸提的有效态硒的分配系数为 19.4%~37.5%, 随着施硒量增加而增高。可见, 在试验施硒量范围内, 典型暗棕壤施硒 1 a 后不仅有较高的硒存留率, 而且存留的硒仍有相当一部分是有效态的。

这些有效态硒的可溶部分应该主要是可溶态的 SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 或许还有少量的可溶态有机硒; 而其可代换部分则应该主要是被水合氧化物、层状硅酸盐黏土矿物及腐殖质吸附的可代换态 SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, 因为

SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 较 SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 更易溶解而较难被吸附<sup>[19,20]</sup>。

表 2 施亚硒酸钠 1 a 后典型暗棕壤的有效性硒状况(A、B 地块, 0~ 15cm)

Table 2 Available selenium contents in Typic Dark Brown Forest Soils (site A and site B; 0~ 15cm) 1 year after NaSeO<sub>3</sub> application

地块编号 Site No	施硒量 Se application (mg kg <sup>-1</sup> )	可溶态硒 H <sub>2</sub> O-Se		KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 浸提的有效态硒	
		含量 Content (mg kg <sup>-1</sup> )	分配系数 Distribution percentage in total Se (%)	含量 Content(mg kg <sup>-1</sup> )	分配系数 Distribution percentage in total Se (%)
A	0.10	0.019±0.006	6.03	0.061±0.011	19.4
B	0.33	0.035±0.005	6.22	0.161±0.027	28.6
A	1.0	0.058±0.010	6.19	0.284±0.029	30.3
B	3.3	0.138±0.022	5.08	0.823±0.066	30.3
A	10	0.282±0.031	3.78	2.796±0.467	37.5

2.2 山野菜植物的硒富集特征

典型暗棕壤(A、B 地块)上生长的 4 种山野菜的自然含硒量(CK) 范围为 0.168~ 0.340 mg kg<sup>-1</sup>(表 3), 平均为 0.249 mg kg<sup>-1</sup>。据统计, 正常土壤中生长的农作物含硒范围为 0.01~ 0.60 mg kg<sup>-1</sup>, 平均 0.10 mg kg<sup>-1</sup>左右<sup>[18]</sup>。与普通农作物相比, 供试山野菜的自然含硒量均较高, 提示这些野生植物可能具有较高的潜在富硒能力。

典型暗棕壤施硒后, 4 种山野菜含硒量均随着

施硒量增加而增加。以最具代表性的 A 地块为例: 在 0.10 mg kg<sup>-1</sup>低施硒量时, 4 种山野菜含硒量 0.383~ 0.882 mg kg<sup>-1</sup>, 为对照的 1.7~ 3.1 倍; 在 1.00 mg kg<sup>-1</sup>中等施硒量情况下, 4 种山野菜含硒量 2.52~ 11.2 mg kg<sup>-1</sup>, 为对照的 11.4~ 52.0 倍; 当施硒量高达 10.00 mg kg<sup>-1</sup>(土壤自然含硒量的 45.5 倍) 时, 山野菜含硒量高达 13.6~ 26.7 mg kg<sup>-1</sup>, 为对照的 43.6~ 158.9 倍(表 3)。可见, 在土施强化供硒条件下, 4 种山野菜都能高量富集硒。

表 3 土壤施亚硒酸钠 1 a 后 4 种山野菜的含硒量

Table 3 Se contents in 4 wild vegetables 1 year after Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> application

地块编号 Site No	土壤施硒量 Se application in soil (mg kg <sup>-1</sup> )	荚果蕨 <i>M. struthiopteris</i>		小叶芹 <i>A. alpestre</i>		小根蒜 <i>A. macrostemon</i>		婆婆丁 <i>T. mongolicum</i>	
		含硒量 Se content (mg kg <sup>-1</sup> )	对照倍数 Times over CK value	含硒量 Se content (mg kg <sup>-1</sup> )	对照倍数 Times over CK value	含硒量 Se content (mg kg <sup>-1</sup> )	对照倍数 Times over CK value	含硒量 Se content (mg kg <sup>-1</sup> )	对照倍数 Times over CK value
A	0.00(CK)	0.312±0.041	1.0	0.274±0.013	1.0	0.222±0.012	1.0	0.168±0.012	1.0
	0.10	0.882±0.074	2.8	0.520±0.035	1.9	0.383±0.060	1.7	0.517±0.047	3.1
	1.00	11.2±0.952	35.8	8.88±0.621	32.4	2.52±0.874	11.4	8.74±0.698	52.0
	10.00	13.6±0.892	43.6	22.9±1.38	83.6	16.3±0.840	73.6	26.7±1.43	158.9
B	0.00(CK)	0.340±0.025	1.0	0.286±0.021	1.0	-	-	-	-
	0.33	4.83±0.365	14.2	3.23±0.231	11.3	-	-	-	-
	3.30	12.3±0.737	36.3	20.0±1.13	69.8	-	-	-	-
C	0.00(CK)	-	-	-	-	-	-	0.182±0.017	1.0
	0.10	-	-	-	-	-	-	0.264±0.015	1.4
	1.00	-	-	-	-	-	-	1.30±0.113	7.1
	10.00	-	-	-	-	-	-	8.57±0.676	47.1

由于 A、B 地块土壤具相似性, 所以随着施硒量增加, 生长于两不同地块上的同种山野菜( 荚果蕨或小叶芹) 的硒富集变化过程符合同一条规则曲线( 图 3)。据此分析, 不同山野菜种类的富硒能力( 以含硒量表征) 及其在递增施硒条件下高量富集硒的递变模式皆有差异: 荚果蕨在低于  $1.00 \text{ mg g}^{-1}$  施硒量时表现出强富硒能力, 然而在  $1.00 \text{ mg g}^{-1}$  施硒量附近却似乎存在一个“最高临界施硒范围”, 当施硒量继续增加时植物含硒量不再显著增高, 致使在  $3.30 \text{ mg g}^{-1}$  和  $10.00 \text{ mg g}^{-1}$  两种较高施硒量下其含硒量反而是 4 种山野菜中最低的; 小叶芹在较低施硒量时的富硒能力虽不及荚果蕨, 但在  $3.30 \text{ mg g}^{-1}$  较高施硒量时表现出的富硒能力却几乎是荚果蕨的 2 倍, 不过至此也似乎达到了其“最高临界施硒范围”; 小根蒜的情况与荚果蕨相反, 尽管在较低施硒量时富硒能力最差, 高施硒量情况下却有良好表现; 而婆婆丁在各种施硒量下都有较高富硒能力( 图 3)。考虑到土壤含硒量和土壤有效硒指标皆随施硒量增加而线性增加( 图 1, 表 2), 所以“最高临界施硒范围”的存在应该主要是由植物本身因素所决定的。总体来看, 植物含硒量与施硒量之间属于非线性关系, 但在一定的较低施硒量范围内却接近线性, 只是不同植物有着不同的“线性范围”( 图 3), 这可能与不同植物的生理特性、生长构型等差异因素有关。在确定适宜施硒量时, “线性范围”和“最高临界施硒范围”都是有价值的参考指标。

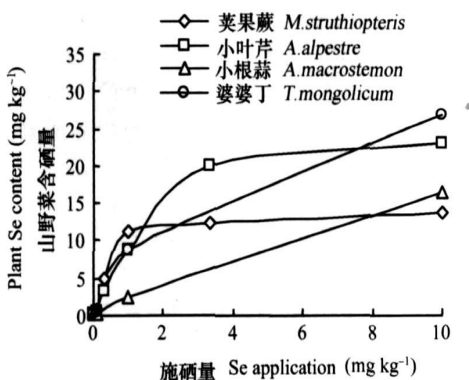


图 3 典型暗棕壤递增施硒条件下 4 种山野菜的硒富集特征曲线

Fig. 3 Selenium enriching curves of 4 wild vegetables with the increase in selenium application rate in Typic Dark Brown Forest Soil

除了植物本身的因素外, 土壤条件对山野菜富硒也有重要影响。C 地块的砂砾质搅动暗棕壤保硒能力差( 图 1), 其上生长的婆婆丁所实际表现出的

富硒量都远低于 A 地块( 表 3)。因此, 粗质地土壤不适于富硒森林蔬菜栽培。

### 2.3 土壤硒指标与山野菜含硒量的关系

将 A、B 地块的数据一并作图( 图 4) 可知, 典型暗棕壤施硒 1a 后, 土壤可溶态硒、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  浸提的有效硒甚至全硒与山野菜含硒量之间均呈明显的非线性正相关, 而且在较低范围内这些土壤硒指标与山野菜含硒量之间的关系接近线性, 线性范围因植物而异。

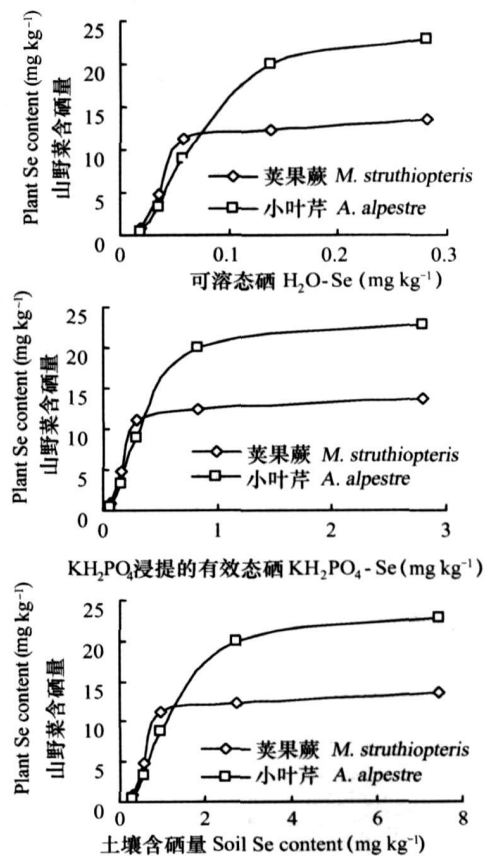


图 4 典型暗棕壤施硒 1 a 后土壤硒指标与山野菜含硒量的关系( 婆婆丁和小根蒜因数较少未作图)

Fig. 4 Relationship between indices of soil selenium and plant selenium content 1 year after  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  applied to Typic Dark Brown Forest Soil (*T. mongolicum* and *A. macrostemon* are not illustrated because of insufficient data)

一些土壤有效硒指标常被用来判断土壤对作物的供硒能力, 包括  $\text{NaHCO}_3$  浸提的有效硒、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  浸提的有效硒及  $\text{H}_2\text{O}$  可溶态硒等。其中,  $\text{NaHCO}_3$  浸提的有效硒往往与作物吸收硒有良好相关性, 所以应用较广<sup>[14, 21~24]</sup>;  $\text{PO}_4^{3-}$  的阴离子交换能力强于  $\text{CO}_3^{2-}$ <sup>[19]</sup>,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  提取的有效硒和  $\text{NaHCO}_3$  浸提的有

效硒都可用作判断土壤对作物供硒能力的指标<sup>[14]</sup>。尽管水溶态硒对植物的有效性最高,但其与作物吸收硒的良好相关性多出现在盆栽实验中<sup>[25]</sup>;在一般田间情况下,土壤水溶态硒的变化性往往较小,与作物吸收硒的相关性较差<sup>[14, 22]</sup>。另外,鉴于贫硒区作物大都缺硒,而高硒区作物则往往富硒<sup>[26]</sup>,所以土壤含硒量(全硒)也被用于定性判断土壤—作物系统的硒状况;不过,在正常土壤上土壤含硒量与作物吸收硒之间的相关性往往并不显著<sup>[14, 22, 27]</sup>。递增施硒条件下情况则有所不同:本研究得出 H<sub>2</sub>O 可溶态硒、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>浸提的有效硒乃至土壤全硒与山野菜含硒量之间均呈明显的正相关;国内同类研究亦得出相似结果<sup>[28]</sup>。考虑到施硒 1 a 后的土壤硒指标并不能完全表征一年来土壤硒状况及其动态变化,所以这种相关性是否意味着土壤硒诸指标均可普遍用以定量评价施硒条件下土壤对植物供硒能力或预测山野菜富硒水平,尚需进一步研究。

### 3 小 结

1) 典型暗棕壤对外源亚硒酸钠态硒具有较强的吸收和保持能力。在试验剂量范围内,施入的硒经过一个完整的生长周期(1 a)后仍大部分保留在原施硒土层中,且有相当一部分仍属于有效态硒。土壤全硒、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>提取的有效硒、水溶态硒与施硒量之间皆呈线性关系。

2) 在土施强化供硒条件下,典型暗棕壤上生长的莱菔蕨、小叶芹、小根蒜、婆婆丁等多年生山野菜都能高量富集硒。山野菜含硒量与施硒量之间为非线性增长关系,而在一定的较低施硒量范围内这种关系则是线性的,线性范围因植物而异。土壤的可溶态硒、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>浸提的有效硒以及全硒等指标与山野菜含硒量之间亦均呈明显的非线性正相关,且施硒量较低时其关系亦表现为线性。

3) 典型暗棕壤控制施硒是在近自然条件下培育富硒森林蔬菜并获取高富硒生物资源的有效途径,但强烈搅动的砂砾质暗棕壤不适于富硒森林蔬菜栽培。

### 参 考 文 献

- [1] 徐辉碧. 生命微量元素—硒. 武汉: 华中工学院出版社, 1989. Xu H B. Selenium: The Microelement of Life (In Chinese). Wuhan: Publishing House of Huazhong Technical College, 1989
- [2] 张玲, 王德友, 陈义朗, 等. 硒与有机硒化合物的临床意义及含硒化合物的研究进展. 广东微量元素科学, 2001, 8(12): 1~7. Zhang L, Wang D Y, Chen Y L, *et al.* The clinical significance and research progress of selenium and organoselenium compounds (In Chinese). *Microelement Science of Guangdong Province*, 2001, 8(12): 1~7
- [3] 杨荣清, 黄标, 孙维侠, 等. 江苏省如皋市长寿人口分布区土壤及其微量元素特征. 土壤学报, 2005, 42(5): 753~760. Yang R Q, Huang B, Sun W X, *et al.* Soils and trace elements in the distribution area of longevous people in Rugao County of Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 753~760
- [4] 崔晓阳, 宋金凤, 张福. 长白山野生经济植物中 4 种微量元素的含量与变异因素. 山地学报, 2003, 21(6): 653~661. Cui X Y, Song J F, Zhang Y. Microelement analysis in wild economic plants of Changbai Mountain: Content, variation and correlation of Fe, Zn, Se and Ge (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(6): 653~661
- [5] 许又凯, 刘宏茂, 肖春芬, 等. 西双版纳野生蔬菜中硒含量测定. 云南植物研究, 2004, 26(6): 668~672. Xu Y K, Liu H M, Xiao C F, *et al.* An analysis of selenium contents of wild vegetable in Xishuangbanna (In Chinese). *Acta Botanica Yunnanica*, 2004, 26(6): 668~672
- [6] 于忠禾, 宫玉芝, 吴晶, 等. 低硒土壤区玉米植株中硒的分布及调控初探. 土壤肥料, 1994(2): 37~39. Yu Z H, Gong Y Z, Wu J, *et al.* Selenium distribution and regulation in corn plants growing on low-Se soils (In Chinese). *Soil and Fertilizers*, 1994(2): 37~39
- [7] 伊虎英, 郝玉环, 于宏斌, 等. 硒肥对低硒区谷子籽粒含硒量及产量的影响. 土壤通报, 1991, 22(1): 15~18. Yi H Y, Hao Y H, Yu H B, *et al.* Effects of selenium fertilizer on the Se content and production of millet in selenium low regions (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22(1): 15~18
- [8] 肖时运. 湖南省稻田硒含量及硒肥施用效果. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 212~214. Xiao S Y. Study on the Se content and its effect in paddy soil of Hunan (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 212~214
- [9] 魏丹, 杨谦, 迟凤琴, 等. 叶面喷施硒肥对水稻含硒量及产量的影响. 土壤肥料, 2005(1): 39~41. Wei D, Yang Q, Chi F Q, *et al.* Effect of foliage dressing Se fertilizer on the rice in the field (In Chinese). *Soil and Fertilizers*, 2005(1): 39~41
- [10] 史衍玺, 杜振宇, 马丽, 等. 不同施硒方式下小白菜对硒的吸收与积累过程. 土壤通报, 1998, 29(5): 229~231. Shi Y X, Du Z Y, Ma L, *et al.* Selenium absorption and accumulation characteristics of cabbage plants under different se application condition (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(5): 229~231
- [11] 张玲玲, 张培禄, 黄国善, 等. 温州蜜桔追施硒肥对果实含硒量的影响. 浙江农业科学, 1995(2): 70~72. Zhang L L, Zhang P L, Huang G S, *et al.* Effects of Se fertilizer application on the selenium content of orange fruit (In Chinese). *Agricultural Science of Zhejiang Province*, 1995(2): 70~72
- [12] 刘训健, 丁蕾, 沈亚如, 等. 土施硒肥对茶叶含硒量的影响. 茶叶科学, 1995, 15(2): 155~156. Liu X J, Ding L, Shen Y R, *et al.* Effect of soil selenium application on selenium content of Chinese

- tea (In Chinese). *Chinese Tea Science*, 1995, 15(2): 155~ 156
- [13] 徐春霞, 李向民, 肖永绥. 土施硒肥与茶叶含硒量和产量的关系. *西北农业学报*, 1996, 5(10): 71~ 75. Xu C X, Li X M, Xiao Y S. Effect of adding selenite selenium to the se content and yield of tea (In Chinese). *Acta Agriculture Boreali occidentalis Sinica*, 1996, 5(10): 71~ 75
- [14] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 上海不同地区土壤中硒的形态分布及其有效性研究. *土壤学报*, 1998, 35(3): 398~ 403. Qu J G, Xu B X, Gong S C. Study on speciation distribution and availability of selenium in different soils of Shanghai (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 398~ 403
- [15] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 氢化物发生无色散原子荧光光度法测定土壤中有效态硒和总硒. *土壤通报*, 1998, 29(1): 47~ 封三. Qu J G, Xu B X, Gong S C. The determination of available selenium and total selenium in soils by hydride generation atomic fluorescence spectrophotometry (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(1): 47~ inside back cover
- [16] 程伯容, 鞠山见, 岳淑容. 我国东北地区土壤中的硒. *土壤学报*, 1980, 17(1): 55~ 61. Cheng B R, Ju S J, Yue S R. Selenium in soils of northeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1980, 17(1): 55~ 61
- [17] 布和敖斯尔, 张东威, 刘力. 土壤硒区域环境分异及安全阈值的研究. *土壤学报*, 1995, 32(2): 186~ 193. Buher A, Zhang D W, Liu L. Regional environmental differentiation and regional safety threshold of soil selenium (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(2): 186~ 193
- [18] 何念祖, 孟赐福. 植物营养原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. He N Z, Meng C F. Principles of Plant Nutrition (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987
- [19] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态. *环境化学*, 1997, 16(3): 277~ 283. Qu J G, Xu B X, Gong S C. Sequential extraction techniques for determination of selenium speciation in soils and sediments (In Chinese). *Environmental Chemistry*, 1997, 16(3): 277~ 283
- [20] 吴少尉, 池泉, 陈文武, 等. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究. *土壤*, 2004, 36(1): 92~ 95. Wu S W, Chi Q, Chen W W, et al. Sequential extraction a new procedure for selenium of different form in soil (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(1): 92~ 95
- [21] 侯军宁, 李继云. 土壤硒的形态及有效硒的提取. *土壤学报*, 1990, 27(4): 405~ 410. Hou J N, Li J Y. Foms of selenium in soil and extraction of available selenium (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(4): 405~ 410
- [22] 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉, 等. 江苏省几种低硒土壤中硒的形态分布及生物有效性. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(3): 355~ 359. Zhang Y L, Pan G X, Hu Q H, et al. Selenium fractionation and bio availability in some low se soils of central Jiangsu province (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 355~ 359
- [23] Poole B. The determination of extractable plant available selenium from soils by electrothermal atomic absorption spectroscopy. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 1988, 19(15): 1681~ 1691
- [24] 王子健, 彭斌. 大骨节病区水土中有机物对硒存在形态和生物有效性的影响. *环境科学学报*, 1991, 12(4): 86~ 89. Wang Z J, Peng B. Effects of soil and water organic compounds on the chemical form and biological availability of selenium in Kaschir Beck disease regions (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, 12(4): 86~ 89
- [25] Balistrieri L S, Chao T T. Selenium adsorption by goethite. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51(5): 1145~ 1151
- [26] 雒昆利, 邱小平. 陕西安康地区紫阳县富硒作物分析. *西北农业学报*, 1994, 3(1): 68~ 72. Luo K L, Qiu X P. Analysis of selenium rich crops in Ankang District, Shaanxi: The case of Ziyang County (In Chinese). *Acta Agriculture Boreali occidentalis Sinica*, 1994, 3(1): 68~ 72
- [27] 王雅玲, 潘根兴, 刘洪莲, 等. 皖南茶区土壤硒含量及其与茶叶中硒的关系. *农村生态环境*, 2005, 21(2): 54~ 57. Wang Y L, Pan G X, Liu H L, et al. Soil and tea selenium in tea gardens in south Anhui (In Chinese). *Rural Eco Environment*, 2005, 21(2): 54~ 57
- [28] 杨兰芳, 丁瑞兴. 低硒土壤施硒对烤烟硒含量及其体内分布的影响. *南京农业大学学报*, 2000, 23(1): 47~ 50. Yang L F, Ding R X. Effects of selenium application on selenium content and distribution in flue cured tobacco grown on Se low soils (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, 23(1): 47~ 50

## EFFECTS OF $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ APPLICATION ON SELENIUM STATUS IN DARK BROWN FOREST SOILS AND SELENIUM ACCUMULATION IN SEVERAL FOREST VEGETABLES

Cui Xiaoyang Cao Kai Hao Jingmei

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract** To explore the resources of selenium enriching forest vegetables, an experiment was carried out of cultivating four species of wild forest vegetables, i. e. *Matteuccia struthiopteris* Todaro, *Aegopodium alpestre*, *Taraxacum mongolicum* and *Allium macrostemon* in Dark Brown Forest Soil, using  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  for fertilization, varying in application rate from Se 0. 10 to 10. 00  $\text{mg kg}^{-1}$ , directly into the top 15 cm soil layer. Soil and plant samples were collected and Se contents were determined one year (a full growth cycle) after the application. Results show that Typic Dark Brown Forest Soil displayed a high capacity of adsorbing

and reserving around 90% ~ 70% of the applied Se, from low to high application rate, in the top 15 cm soil layer. Of the total soil Se, about 6.03% ~ 3.78% was water-soluble Se and 19.36% ~ 37.54%  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  extractable Se, they were all linearly related to the initial Se application rate. All the four species of wild vegetables tested were found capable of accumulating Se extraordinarily from soils with strengthened soil selenium supply. And the Se contents in these plants were 1.7 ~ 158.9 times as high as that in the plants in control (CK), varying with the application rate. The four species of plants were very different from each other in Se accumulation capacity and in variation pattern of Se accumulation with increasing Se application rate. On the whole, plant Se content was non-linearly related to Se application rate, but when the application rate was low, a linear relationship was found and varying in range from species to species. It was also found that plant Se content was also significantly, positively but nonlinearly related to the contents of soil total Se,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  extractable Se and water-soluble Se, and linearly related when the application rate was low. It is hence concluded that properly controlled soil  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  application in Typic Dark Brown Forest Soil would be an effective way to cultivate Se-rich forest vegetables and to exploit Se-rich vegetable resources under the quasi-natural conditions of the forest region, except heavily perturbed coarse-textured soil.

**Key words** Dark Brown Forest Soil;  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ; Soil selenium; Forest vegetables; Selenium enrichment