

长白山野生经济植物中 4 种微量元素的含量与变异因素

崔晓阳, 宋金凤, 张 韞

(东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 对长白山不同垂直景观带 141 个野生植物样品中 Fe、Zn、Se、Ge 的含量进行了分析。结果表明, 本区供试野生经济植物含 Fe $1\,003.24 \pm 674.54 \mu\text{g/g}$ 、Zn $69.28 \pm 46.06 \mu\text{g/g}$ 、Se $0.111 \pm 0.071 \mu\text{g/g}$ 、Ge $2.63 \pm 2.40 \mu\text{g/g}$ 。平均来说, 植物的 Fe、Zn 含量都是较丰富的, 而 Se、Ge 则含量不高。不同植物样品中微量元素含量差异相当大, 各元素的总体变异系数(Cv)高达 0.64~0.91。这种差异主要来自生物性因素(种间差异、部位差异); 环境因素(母岩、土壤、气候)也有显著影响, 不同垂直景观带间有显著差异。就供试植物样品总体而言, 不同元素间都表现出正相关趋势, 其中 Fe 与 Zn、Zn 与 Se、Zn 与 Ge、Se 与 Ge 之间的正相关皆达显著或极显著水平。根据相对富集系数(Re)和生物吸收系数(Ac), 筛选出了“微量元素相对富集型”药用和食用植物若干种。

关键词: 长白山; 野生经济植物; 微量元素

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)是人体必需的微量元素, 锗(Ge)是在一定情况下对人体有益的微量元素^[1,2]。随着环境医学和营养医学的发展, 微量元素在疾病防治和营养保健方面的作用日益受到重视, 如缺铁性贫血病和缺硒性大骨节病(克山病)的防治, 以及锌、硒、锗分别在促进小儿智能发育、延缓衰老、抗癌方面的作用^[1,2]。食(药)物补给是人体获取微量元素的主要途径, 而生物有机态的补给方式则是最为安全、有效的^[1~5]。受现代营养医学的推动, 近年来有关食(药)用植物中的人体微量元素状况及富集技术研究已有越来越多的报导^[4~21]。

长白山是我国著名的珍贵野生植物产地, 仅食(药)用植物就有 800 余种^[22]; 同时, 它又是一个独特的自然单元——发育在近代休火山之上的完整自然生态系统。早在 20 世纪 80 年代, 我国学者就从环境学角度对长白山地区微量元素的背景值进行了系统研究, 其中涉及到优势植物中 Fe、Zn、Se 等元素

的背景分析^[23,24]。本文则从另一个完全不同的侧面, 研究该区多种野生经济植物中 Fe、Zn、Se、Ge 等元素的含量状况、变异因素和相关性, 并在此基础上筛选相对富含这些微量元素的植物种类。其主要目的是掌握一些自然状态下的基础资料, 为今后在长白山区定向培育微量元素富集型食(药)用野生植物资源提供理论参考。

1 研究地点与研究方法

1.1 自然概况

长白山位于吉林省东南部的中朝两国交界处($41^{\circ}23' \sim 42^{\circ}36' \text{N}$, $126^{\circ}55' \sim 129^{\circ}00' \text{E}$), 总面积近 8 000 km²。其中心山体为一座巨大的休火山, 主峰白头山海拔 2 691 m, 为我国东北最高峰。山底至山顶相对高度 2 000 m, 气候、土壤、植被呈现出明显的垂直变化, 大致可分为温带针阔混交林带(基带)、山

收稿日期(Received date): 2003-07-11; 改回日期(Accepted): 2003-10-21。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(39500117)。[Founded by National Science Foundation of China(Grant No. 39500117).]

作者简介(Biography): 崔晓阳(1964-), 男, 山东宁津人, 研究员。主要从事森林土壤和植物营养生态领域的研究工作, 发表论文 30 余篇。

[CUI Xiaoyang(1964-), male. Born in Ningjin County, Shandong Province. Professor of Northeast Forestry University, research fields mainly covering forest soil, plant nutrition and ecology, 30 papers have been published. Tel: (0451) 8219 1553; Email: C-xyang@yahoo.com.cn]

地暗针叶林带、亚高山疏林草甸带(岳桦林带)和高山苔原带等四个自然景观带。本区雨量丰沛,物种丰富,是世界著名的自然生态系统保护区。

1.2 样品采集

7月中旬至8月上旬,沿长白山北侧的自然景观带进行采样。在每个景观带的典型地段随机设置多个 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 的样地,样地间的距离为 $200\sim 300\text{m}$ 。如此设置样地的目的是为了尽量满足下列要求:①样地内有足够的植物种类和株数,②样地内的土壤条件基本一致,③样地间的植物组成和土壤条件有较大差异。在每块样地内首先确定有经济价值(或潜在经济价值)的植物种类,然后按植物种及其可利用部位分别进行采样(表1),每个植物样品一般是由均匀分布的5个以上单株以相同部位等量均匀混合而成的混合样;同时,在每株采样植物下面都采集表土(A_1 层,根系主要分布层)样品,然后组成代表该样地的土壤混合样。

各景观带具体采样情况如下:

1)高山苔原带:采样范围在海拔 $2\,000\text{m}$ 以上,土壤为高山苔原土,一般发育在粗面岩、凝灰角砾岩、浮岩、火山灰等基岩寒冻风化物之上,土体浅薄。本带是一个独特的自然景观带,共设样地6块(No.11~No.16),采集高山植物样品45个(表1)。

2)亚高山疏林草甸带:采样范围在海拔 $1\,800\sim 2\,000\text{m}$,土壤为亚高山疏林草甸土,母质为喷出岩风化物或火山灰。共设样地5块(No.21~No.25),采集岳桦疏林下植物样品31个。

3)山地暗针叶林带:采样范围在海拔 $1\,000\sim 1\,800\text{m}$,土壤为山地棕色针叶林土,母岩为玄武岩,但土壤母质明显受火山灰影响。共设样地4块(No.31~No.34),采集植物样品23个。

4)针阔混交林带:为了避免土壤受火山灰的影响,所以在长白山主峰的针阔混交林带直接设置样地。样地设在二道白河中国科学院长白山生态定位站I号标准地周围,海拔高度为 $530\sim 580\text{m}$,典型红松阔叶林,土壤为暗棕壤,母岩以酸性岩浆岩(花岗岩)为主。本带共设暗棕壤样地5块(No.41~No.45,其中No.44号样地为形状不同于其他样地的一段 50m 长的路边地带),采集林下植物样品33个。另外,还设置了一块湿地样地(No.51),该湿地面积不大,发育在旧河床之上,土壤为潜育土,采集沼生植物样品9个(表1)。

1.3 测定方法

采回的新鲜植物样品用清水和去离子水洗净,于 60°C 低温烘干,玛瑙研钵研碎,过 0.25mm 的尼龙筛,充分混匀后装瓶备用。

样品用体积比为4:1的硝酸、高氯酸(优级纯)混合液消化,原子吸收分光光度法测定Fe、Zn含量,等离子发射光谱法(ICP)测定Se、Ge含量。所用仪器分别为美国PE-5000型原子吸收分光光度计和美国J-ASH800直读式ICP光谱仪。

2 结果与分析

2.1 野生经济植物中4种微量元素的含量水平

长白山141个供试野生植物样品含铁量为 $1003.24\pm 674.54\mu\text{g/g}$ (表2),这一数值大约是前人测定的我国近百种常用中药植物含铁量的2倍^[1],因此含铁是相当丰富的。供试样品含锌 $69.28\pm 46.06\mu\text{g/g}$,总体来看含量也比较丰富。有研究者分析10种抗癌植物含锌量,其中8种植物(蒲公英、半枝莲、苦参、射干、桔梗、茵陈、淡竹叶、紫菀)含锌量在 $2.62\sim 32.98\mu\text{g/g}$ 之间,仅2种植物(黄莲、白花蛇草)高于本文的平均水平^[1]。以个别植物为例,四川珠芽蓼根茎含锌 $45.60\mu\text{g/g}$ ^[7],而长白山倒根蓼根茎含锌高达 $108.31\mu\text{g/g}$,显著高于前者。本区成土母岩以基性喷出岩为主,土壤的铁、锌含量及其植物有效性都较高^[18,24],且植物种类大部分为多年生高山植物,这些可能是导致植物富含铁、锌的主要原因。

供试样品含硒 $0.111\pm 0.071\mu\text{g/g}$,属于植物正常值的中等偏低水平。我国东北地区粮食含硒量大部分低于 $0.01\mu\text{g/g}$ ^[25],因此与粮食相比,野生植物自然含硒量是相对较高的。

目前,关于一般植物含锗量的报导很少。本区野生经济植物含锗 $2.63\pm 2.40\mu\text{g/g}$,不同植物间变动性很大(表2)。从总体水平上看,锗是比硒丰富的元素,植物锗含量比硒约高1个数量级。一些抗癌中药的含锗量为:人参 $250\sim 320\mu\text{g/g}$,薏仁 $50\mu\text{g/g}$,大蒜粉 $710\sim 830\mu\text{g/g}$ ^[20,21];与之相比,长白山供试野生经济植物的含锗量却又很低。

2.2 植物中4种微量元素含量的差异性及其影响因素

植物的矿质元素主要是从土壤中吸收的,所以植物矿质元素的含量与土壤(尤其是土壤中有效态

表 1 各自然景观带采样情况一览表

Table 1 A list of plots and plant species sampled in different altitude zones

自然景观带	样地号	采样植物种类及部位
Altitude zone	plot No.	Plant species sampled
高山苔原带 Alpine tundra	No. 11	红景天(<i>Rhodiola elongata</i>)[茎叶花/ 根茎]; 高岭凤毛菊(<i>Saussurea alpicola</i>)[茎叶花/ 根]; 大苞柴胡(<i>Bupleurum euphorbioides</i>)[茎叶花/ 根茎]; 毛毡杜鹃(<i>Rhododendron confertissimum</i>)[枝叶]; 长白棘豆(<i>Oxytropis anertii</i>)[茎叶花]
	No. 12	高山龙胆(<i>Gentiana algida</i>)[茎叶花]; 红景天(<i>R. elongata</i>)[茎叶花/ 根茎]; 长白岩菖蒲(<i>Tofieldia nutans</i>) 长白岩黄芪(<i>Hedysarum ussuriense</i>)[茎叶花/ 根]; 岩茴香(<i>Tilingia tachiroei</i>)[茎叶/ 根]; 倒根蓼(<i>Polygonum ochotense</i>)[茎叶/ 根茎]; 高山罂粟(<i>Papaver pseudo-radicatum</i>)[茎叶花/ 根]; 轮叶马先蒿(<i>Podicularis verticillata</i> [茎叶花/ 根]; 牛皮杜鹃(<i>Rhododendron aureum</i>)[枝叶]; 长白米努草(<i>Minuartia macrocarpa</i>)[茎叶花].
	No. 13	松毛翠(<i>Phyllodoce caerulea</i>)[枝叶]; 长白狗舌草(<i>Senecio kirilowii</i>)[嫩株]
	No. 14	宽叶仙女木(<i>Dryas octopetala</i>)[枝叶]; 长白棘豆(<i>Oxytropis anertii</i>)[茎叶花/ 根]; 大苞柴胡(<i>Bupleurum euphorbioides</i>)[茎叶花/ 根茎]; 倒根蓼(<i>Polygonum ochotense</i>)[茎叶/ 根茎]; 大皱蒴藓(<i>Aulacomium turgidum</i>)[地上部分]; 笃斯越桔(<i>Vaccinium uliginosum</i>)[枝叶/ 果];
	No. 15	笃斯越桔(<i>Vaccinium uliginosum</i>)[枝叶/ 果]; 黑穗苔草(<i>Carex arata</i>)[地上部分].
	No. 16	扭果亭劳(<i>Draba borealis</i>)[茎叶花]; 高山石竹(<i>Dianthus chinensis</i>)[茎叶花/ 根]; 长白旱麦瓶草(<i>Silene jenkinsensis</i>)[茎叶花]; 假雪萎陵菜(<i>Potentilla nivea</i>)[枝叶]; 钝叶瓦松(<i>Orostachys malacophyllus</i>)[茎叶花].
亚高山疏林草甸带 (岳桦林带) <i>Betula ermanii</i> forest	No. 21	长白高山芹(<i>Coelopleurum nakaiianum</i>)[茎叶/ 根茎]; 手撑参(<i>Gymnadenia conopsea</i>)[根茎]; 马先蒿(<i>P. resupinata</i>)[茎叶花/ 根].
	No. 22	一枝黄花(<i>Solidago virgaurea</i>)[茎叶花/ 根]; 西伯利亚刺柏(<i>Juniperus sibirica</i>)[枝叶]; 酸模(<i>Rumex acetosa</i>)[茎叶]; 小叶章(<i>Deyeuxia angustifolia</i>)[茎叶]; 烟管蓟(<i>Cirsium pendulum</i>)[嫩株].
	No. 23	二叶舞鹤草(<i>Maianthemum bifolium</i>)[叶/ 根茎]; 石杉(<i>Huperzia selago</i>)[地上部分].
	No. 24	黑果类叶升麻(<i>Actaea asiatica</i>)[茎叶/ 根]; 长白高山芹(<i>Coelopleurum nakaiianum</i>)[茎叶/ 根]; 粗茎鳞毛蕨(<i>Dryopteris crassirhizoma</i>)[叶]; 一枝黄花(<i>Solidago virgaurea</i>)[茎叶花/ 根].
	No. 25	蛇莓萎陵菜(<i>Potentilla cantigrana</i>)[茎叶/ 根]; 高山乌头(<i>Aconitum monanthum</i>)[茎叶花/ 根]; 毛蕊老鹳草(<i>Geranium eriostemon</i>)[茎叶/ 根]; 星叶兔儿伞(<i>Cacalia komaroviana</i>)[茎叶/ 根]; 大白花地榆(<i>Sanguisorba stipulata</i>)[茎叶/ 根].
山地暗针叶林带 Mountainous coniferous forest	No. 31	蕨菜(<i>Pteridium aquilinum</i>)[茎叶].
	No. 32	二叶兰(<i>Listera major</i>)[叶]; 蛇足石杉(<i>Huperzia serrata</i>)[茎叶]; 一枝黄花(<i>Solidago virgaurea</i>)[茎叶花/ 根]; 唢呐草(<i>Mitella nuda</i>)[茎叶]; 大白花地榆(<i>Sanguisorba sitchensis</i>)[茎叶/ 根]; 黑水缬草(<i>Valeriana amurensis</i>)[茎叶/ 根]; 毛蕊老鹳草(<i>Geranium eriostemon</i>)[茎叶果/ 根]; 蓝果七筋菇(<i>Clintonia udensis</i>)[叶]; 大金发蕨(<i>Polytrichum commune</i>)[地上部分].
	No. 33	林奈草(<i>Linnaea borealis</i>)[茎叶]; 一枝黄花(<i>Solidago virgaurea</i>)[茎叶花/ 根]; 泥炭藓(<i>Sphagnum squarrosum</i>)[地上部分].
	No. 34	焊菜(<i>Rorippa globosa</i>)[地上部分]; 单叶返魂草(<i>Senecio integrifolius</i>)[茎叶花]; 长白岩黄芪(<i>Hedysarum ussuriense</i>)[茎叶/ 果]; 红花三叶草(<i>Trifolium pratense</i>)[茎叶花]; 烟管蓟(<i>Cirsium pendulum</i>)[嫩株].
	No. 35	长白岩黄芪(<i>Hedysarum ussuriense</i>)[茎叶/ 果]; 红花三叶草(<i>Trifolium pratense</i>)[茎叶花]; 烟管蓟(<i>Cirsium pendulum</i>)[嫩株].
针阔混交林带 Conifer and deciduous mixed forest	No. 41	大叶柴胡(<i>Bupleurum longeradiatum</i>)[茎叶花/ 根]; 鸡腿蕨菜(<i>Viola acuminata</i>)[茎叶]; 小叶芹(<i>Aegopodium alpestre</i>)[茎叶]; 藜芦(<i>Veratrum nigrum</i>)[茎叶]; 华金腰子(<i>Chrysosplenium trachyspermum</i> — <i>Ch. sinicum</i>)[嫩株].
	No. 42	白花延龄草(<i>Trillium amtschatskense</i>)[茎叶/ 根]; 紫花变豆菜(<i>Sanicula rubriflora</i>)[茎叶/ 根]; 蕨菜(<i>Pteridium aquilinum</i>)[茎叶].
	No. 43	和尚菜(<i>Adiantum himalaicum</i>)[叶/ 根]; 花忍(<i>Polemonium laxiflorum</i>)[地上部分]; 山茄子(<i>Brachytetras paridiformis</i>)[茎叶]; 宽叶苔草(<i>Carex siderosticta</i>)[茎叶].
	No. 44	长白木忽木(<i>Aralia continentalis</i>)[叶/ 果]; 刺老芽(<i>Aralia mandshurica</i>)[叶/ 果]; 山葡萄(<i>Vitis amurensis</i>)[叶/ 果]; 东北茶藨(<i>Ribes mandshuricum</i>)[叶/ 果]; 山里红(<i>Crataegus pinnatifida</i>)[叶/ 果].
	No. 45	苦卖菜(<i>Ixeris denticulata</i>)[叶]; 山尖子(<i>Cacalia hastata</i>)[茎叶/ 根]; 车前(<i>Plantago asiatica</i>)[叶/ 根]; 箭叶蓼(<i>Polygonum siboldii</i>)[茎叶]; 野大豆(<i>Glycine ussuriensis</i>)[茎叶/ 果].
针阔混交林带(湿地) Conifer and deciduous mixed forest(wet land)	No. 51	水芋(<i>Calla palustris</i>)[全株]; 东北天南星(<i>Arisaema amurensis</i>)[全株]; 透茎冷水花(<i>Pilea mongolica</i>)[茎叶花]; 水芹(<i>Oenanthe javanica</i>)[茎叶花/ 根]; 野凤仙花(<i>Impatiens texoni</i>)[茎叶花]; 林大戟(<i>Euphorbia lucorum</i>)[茎叶花/ 根]; 木贼(<i>Equisetum hyemale</i>)[茎].

注: [茎叶花] 表示地上部分茎、叶和花的 1 份混合样; [茎叶/ 根] 表示地上部分茎、叶混合样 1 份和地下部分根混合样 1 份, 余类推。
1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

元素的含量)有直接关系;另一方面,植物对矿质元素的吸收具有选择性,不同元素在植物体内含量差异很大,这种差异往往并不与元素在土壤中含量的差异相一致。即使在同一景观地球化学条件或同一土壤条件下,不同种属的植物对同一元素的积聚程

度也会有很大差异。另外,同一植物的不同部位以及不同发育期,对元素的积聚情况也有很大不同。在此我们把这些差异性因素归纳为生态性差异(土壤差异、气候差异),生物性差异(种间差异、部位差异、生长期差异),以及随机性差异等三部分。

表 2 长白山野生经济植物样品微量元素含量统计结果($\mu\text{g/g}$)													
Table 2 Statistics of microelement content in wild plant samples of Changbai Mountain ($\mu\text{g/g}$)													
垂直带	样地号	Fe			Zn			Se			Ge		
Altitude Zone	Plot No	\bar{X}	<i>S</i>	<i>Cv</i>	\bar{X}	<i>S</i>	<i>Cv</i>	\bar{X}	<i>S</i>	<i>Cv</i>	\bar{X}	<i>S</i>	<i>Cv</i>
A. T.	Na 1 (<i>n</i> =8)	1616.16	653.46	0.40	70.00	29.76	0.43	0.129	0.074	0.57	3.76	3.64	0.97
	Na 2 (<i>n</i> =16)	1674.42	659.40	0.39	86.09	53.93	0.63	0.163	0.077	0.48	4.41	3.45	0.78
	Na 3 (<i>n</i> =2)	2468.49	1097.04	0.44	132.13	127.30	0.96	0.196	0.180	0.92	2.06	1.44	0.70
	Na 4 (<i>n</i> =10)	1466.31	598.86	0.41	91.14	56.47	0.62	0.121	0.091	0.75	2.99	2.74	0.92
	Na 5 (<i>n</i> =3)	1089.39	206.85	0.19	34.11	15.79	0.46	0.045	0.032	0.71	0.82	0.54	0.66
	Na 6 (<i>n</i> =6)	2381.04	673.02	0.28	82.43	29.33	0.36	0.163	0.132	0.81	4.19	2.00	0.48
	Total A. T. (<i>n</i> =45)	1708.32 ^A	706.86	0.41	82.44 ^A	50.83	0.61	0.141 ^A	0.091	0.64	3.61 ^A	3.04	0.84
B. F.	Na 1 (<i>n</i> =5)	959.50	258.87	0.27	74.51	30.76	0.40	0.103	0.041	0.40	1.87	1.62	0.87
	Na 2 (<i>n</i> =6)	1012.92	305.20	0.30	70.02	46.42	0.66	0.095	0.063	0.66	3.53	4.29	1.21
	Na 3 (<i>n</i> =3)	728.72	182.37	0.25	95.80	43.36	0.45	0.086	0.016	0.19	2.37	1.64	0.71
	Na 4 (<i>n</i> =7)	865.30	381.62	0.44	61.08	23.39	0.38	0.094	0.050	0.53	2.45	1.27	0.52
	Na 5 (<i>n</i> =10)	797.07	201.07	0.25	88.52	61.32	0.69	0.110	0.051	0.46	2.80	1.92	0.69
	Total B. F. (<i>n</i> =31)	873.83 ^B	277.70	0.32	77.57 ^{AB}	44.63	0.57	0.100 ^B	0.050	0.50	2.67 ^B	2.31	0.87
C. F.	Na 1 (<i>n</i> =1)	807.60	—	—	38.04	—	—	0.036	—	—	0.47	—	—
	Na 2 (<i>n</i> =13)	621.08	163.34	0.26	59.98	36.44	0.61	0.093	0.057	0.61	2.50	1.83	0.73
	Na 3 (<i>n</i> =4)	792.68	332.56	0.42	60.99	25.13	0.42	0.060	0.015	0.25	1.50	0.99	0.66
	Na 4 (<i>n</i> =5)	797.78	272.70	0.34	98.79	53.95	0.54	0.232	0.186	0.80	4.7	2.42	0.51
	Total C. F. (<i>n</i> =23)	689.72 ^B	214.22	0.31	68.30 ^B	40.19	0.59	0.115 ^B	0.102	0.89	2.76 ^B	2.08	0.75
C. D.	Na 41 (<i>n</i> =6)	616.16	267.18	0.43	59.01	26.28	0.45	0.100	0.081	0.81	2.14	1.17	0.55
	Na 42 (<i>n</i> =5)	474.98	308.50	0.65	46.53	42.47	0.91	0.060	0.014	0.23	0.57	0.38	0.67
	Na 43 (<i>n</i> =5)	581.62	241.46	0.41	37.70	6.14	0.16	0.084	0.025	0.30	1.47	0.72	0.49
	Na 44 (<i>n</i> =10)	415.50	215.06	0.51	36.04	20.67	0.79	0.076	0.043	0.57	1.35	0.84	0.62
	Na 45 (<i>n</i> =7)	477.48	183.00	0.38	48.10	14.40	0.30	0.097	0.041	0.42	1.86	1.05	0.56
	Total C. D. (<i>n</i> =33)	499.32 ^C	235.86	0.47	44.61 ^C	23.87	0.54	0.084 ^C	0.043	0.51	1.50 ^C	0.98	0.65
C. D. W.	Na 51 (<i>n</i> =9)	572.54	423.00	0.74	87.82	70.45	0.80	0.084	0.051	0.61	1.39	0.95	0.68
总体统计结果													
Total the region (<i>n</i> =141)		1003.24	674.54	0.67	69.28	46.06	0.66	0.111	0.071	0.64	2.63	2.40	0.91

注: 1) A. T. 一高山苔原带 Alpine tundra zone; B. F. 一亚高山疏林草甸带(岳桦林带) *Betula ermanii* forest zone; C. F. 一山地暗针叶林带 Mountainous coniferous forest zone; C. D. 一针阔混交林带 Coniferous and deciduous mixed forest zone; C. D. W. 一针阔混交林带湿地 Wet land of C. D. 2) 某种元素在各垂直带的平均值之间, 若有一个大写字母相同表示差异不显著。The \bar{X} values within a column marked with the same letter indicate no significant difference ($p \leq 0.05$).

2.2.1 总体差异

就所有供试植物样品而言, 某种元素含量的总体差异反应了生物性差异、生态性差异及随机性差异的综合影响。根据所有样品的统计结果, 本区野生经济植物中 Fe、Zn、Se、Ge 含量的总体变异系数分别为 0.67、0.66、0.64、0.91(表 2), 其大小顺序为 $Ge > Fe > Zn > Se$ 。这一规律与本区土壤中各元素含量的变动性相似^[18], 反映了植物微量元素含量与土壤间的内在联系。

2.2.2 生物性差异

生物性差异包括种间差异和部位差异两部分。在每块样地内, 气候因素相同, 土壤因素基本一致, 所以样品间的差异主要是生物性差异。由表 2 可以看出, 每块样地内的植物样品之间各元素含量的变动性仍是较大的, 其变异系数与所有样品的总体变异系数相当, 有些情况下还大于总体变异系数, 这也说明在总体差异中生物性差异起了主要作用。

2.2.3 生态性差异

各带之间平均值的差异主要反映了垂直地带性环境因素(气候、土壤、长白山主峰岩性)对植物元素含量的影响, 而生物性因素的影响(种属差异、部位差异)则通过多个样本的平均被大大削弱了。由表 2 可以看出, 四个自然景观带植物 Fe 含量(带内平均值)的变化趋势为: 高山苔原带 $1\ 708.32\ \mu\text{g/g}$ > 亚高山疏林草甸带 $873.83\ \mu\text{g/g}$ > 山地暗针叶林带 $689.72\ \mu\text{g/g}$ > 针阔混交林带 $499.32\ \mu\text{g/g}$ 。经统计检验, 高山苔原带植物含 Fe 量显著高于其他三个带, 而亚高山疏林草甸带和山地暗针叶林带植物含 Fe 量又显著高于针阔混交林带。本文采样的针阔混交林带土壤(花岗岩母质)含 Fe 量和 Fe 的有效性远低于其他三个带(火山灰、玄武岩母质)^[18], 可能导致本带植物含 Fe 量相对较低; 而高山苔原带植物特别高的含 Fe 量除了与土壤有关外, 也可能与高山气候有关。四个自然景观带植物含 Zn 量(带内平均值)的变化趋势为: 高山苔原带 $82.44\ \mu\text{g/g}$ > 亚高山疏林草甸带 $77.57\ \mu\text{g/g}$ > 山地暗针叶林带 $68.30\ \mu\text{g/g}$ > 针阔混交林带 $44.61\ \mu\text{g/g}$, 这一顺序与 Fe 相同, 提示植物 Fe、Zn 之间有一定的内在联系。经统计检验, 高山苔原带和亚高山疏林草甸带植物含 Zn 量显著高于山地暗针叶林带和针阔混交林带, 而山地暗针叶林带又显著高于针阔混交林带。针阔混交林带土壤含 Zn 量和有效 Zn 量远低于山上的三个带^[18], 这可能是导致植物含 Zn 量相对较低的主要原因。

植物 Se 含量的变化趋势为: 高山苔原带 $0.141\ \mu\text{g/g}$ > 山地暗针叶林带 $0.115\ \mu\text{g/g}$ > 亚高山疏林草甸带 $0.100\ \mu\text{g/g}$ > 针阔混交林带 $0.084\ \mu\text{g/g}$ 。经统计检验, 高山苔原带植物含 Se 量显著高于其他三个带, 而针阔混交林带又显著低于其他三个带。植物 Ge 含量的变化趋势与 Se 相似: 高山苔原带 $3.61\ \mu\text{g/g}$ > 山地暗针叶林带 $2.76\ \mu\text{g/g}$ > 亚高山疏林草甸带 $2.67\ \mu\text{g/g}$ > 针阔混交林带 $1.50\ \mu\text{g/g}$ (表 2)。统计检验结果表明, 高山苔原带植物含 Ge 量显著高于其他三个带, 亚高山疏林草甸带和山地暗针叶林带又显著高于针阔混交林带。不同景观带植物 Se、Ge 含量的差异, 亦可能主要是由地质环境因素(岩性、土壤 Se 与 Ge 状况、土壤性质等)决定的。

对于每种元素, 同一景观带内各样地之间的差异是显而易见的(表 2)。由于每块样地中的样品数较少(一般不足 10 个), 所以生物性因素所导致的差异不一定能较好地排除; 但在同一自然景观带内, 不同样地间的差异起码在一定程度上反映了局部土壤因素对植物元素含量的影响。

2.3 富集型野生植物的筛选

2.3.1 根据样品中微量元素含量和相对富集系数(Re)进行筛选

前已述及, 在供试样品的总体差异中, 生物性因素(种属差异和部位差异)起了主要作用。因此, 可以根据样品中元素含量的高低来筛选对某种微量元素有较强富集能力的植物种(乃至部位)。为了较清楚的表达植物的相对富集能力, 在此我们引入相对富集系数(Re)这一指标。每种植物样品的 Re 值按下式计算

$$Re = C/\bar{C}$$

式中 C 为某种植物样品中某元素的含量; \bar{C} 为所有供试植物样品中该元素的平均含量。

对于每种元素, 根据样品中的实际含量值和 Re 值, 筛选出前几种富集能力较强的植物如表 3。

由表 3 可以看出, 对于不同的元素, 所筛选出的前几种富集型植物不尽相同。有些植物(如倒根蓼、烟管蓟、长白米努草、红景天、长白岩黄芪、长白狗舌草等)在几种元素上都被入选, 说明植物可以对多种微量元素有较强的富集能力; 而这种多元素富集能力正是我们所需要的, 筛选这类复合富集型植物比筛选仅对单一元素有较强富集能力的植物更有意义。

表 3 根据样品中元素实际含量和相对富集系数(Re)筛选出的前几种富集型植物

Table 3 A list of microelement-rich plants selected with maximum content and Re value

元素 Element	植物种类 Plant species	最高含量 Max cotent ($\mu\text{g/g}$)	最高 Re 值 Max Re Value	测定部位 Position determined	元素 Element	植物种类 Plant species	最高含量值 Max cotent ($\mu\text{g/g}$)	最高 Re 值 Max Re Value	测定部位 Position determined
Fe	<i>S. kirilowii</i>	3244.20	3.23	嫩株	Se	<i>R. globosa</i>	0.531	4.78	茎叶花
	<i>M. macrocarpa</i>	3204.06	3.19	茎叶花		<i>D. borealis</i>	0.410	3.69	茎叶花
	<i>D. borealis</i>	3179.37	3.17	茎叶花		<i>P. saxatilis</i>	0.327	2.95	地上
	<i>P. nivea</i>	3028.32	3.02	茎叶		<i>H. ussuriense</i>	0.283	2.55	根
	<i>B. euphorbioides</i>	2952.72	2.94	根茎		<i>O. anertii</i>	0.269	2.42	全株
	<i>S. alpicola</i>	2495.46	2.49	根		<i>T. tachiroei</i>	0.264	2.38	根
	<i>R. elongata</i>	2436.09	2.43	根茎		<i>P. ochotense</i>	0.242	2.18	根茎
	<i>S. jenssensii</i>	2367.54	2.36	茎叶花		<i>T. pratense</i>	0.241	2.17	茎叶花
	<i>G. algida</i>	2309.73	2.30	茎叶花		<i>C. trachyspermum</i>	0.240	2.16	嫩株
					Ge	<i>C. rangiferina</i>	13.88	5.28	地上
Zn	<i>C. palustris</i>	246.88	3.56	全株		<i>P. ochotense</i>	12.83	4.88	根茎
	<i>P. ochotense</i>	239.96	3.46	茎叶		<i>C. Pendulum</i>	12.18	4.63	嫩株
	<i>S. Kirilowii</i>	222.14	3.20	嫩株		<i>R. elongata</i>	11.30	4.29	根茎
	<i>A. Monanthum</i>	197.64	2.85	根		<i>V. amurensis</i>	7.41	2.81	根
	<i>C. Pendulum</i>	188.26	2.71	嫩株		<i>S. jenssensii</i>	7.32	2.78	茎叶花
	<i>G. aristemon</i>	178.65	2.58	根		<i>A. monanthum</i>	7.31	2.77	根
	<i>A. turgidum</i>	149.80	2.16	地上		<i>T. tachiroei</i>	7.21	2.74	茎叶
	<i>C. komaroviana</i>	142.18	2.05	根					

注: 测定部位栏为所列部位的混合样。

2.3.2 根据植物对土壤元素的生物吸收系数(Ac)进行筛选

考虑到植物中某种元素的含量终究要受到土壤中该元素状况(含量、有效性)的影响,为了较确切地描述植物对土壤中微量元素的吸收富集能力(而不是植物间的相对富集能力),在此我们再引入生物吸

收系数(Ac)的概念——即植物中元素与土壤中该元素的含量比,又称“生物吸收比”^[23]。根据生物吸收系数,针对各元素筛选出的前几种富集型植物如表 4。与表 3 比较可以发现,虽然两种筛选方法所得结果不完全一致,但仍有许多入选植物是相同的,并且两种方法得出大致相同的复合富集型植物。

表 4 根据生物吸收系数(Ac)筛选出的前几种富集型植物

Table 4 A list of microelement-rich plants selected with bio-accumulation coefficient(Ac)

元素 Element	植物种类 Plant species	Ac 值 Ac value	元素 Element	植物种类 Plant species	Ac 值 Ac value	元素 Element	植物种类 Plant species	Ac 值 Ac value
Fe	<i>M. macrocarpa</i>	0.21	Se	<i>G. aristemon</i>	2.47	Zn	<i>C. trachyspermum</i>	2.02
	<i>R. elongata</i>	0.15		<i>P. ochotense</i>	2.33		<i>P. verticillata</i>	1.96
	<i>P. pseudo-radicatum</i>	0.15		<i>R. elongata</i>	2.32	Ge	<i>C. Pendulum</i>	0.92
	<i>T. nutans</i>	0.12		<i>C. pendulum</i>	2.29		<i>R. elongata</i>	0.85
	<i>H. ussuriense</i>	0.12		<i>A. asiatica</i>	2.23		<i>A. mandshurica</i>	0.72
	<i>T. tachiroei</i>	0.11		<i>D. borealis</i>	2.20		<i>P. ochotense</i>	0.62
	<i>P. verticillata</i>	0.10	Zn	<i>P. ochotense</i>	6.34		<i>A. continentalis</i>	0.54
	<i>B. kirilowii</i>	0.10		<i>H. ussuriense</i>	3.91		<i>V. amurensis</i>	0.49
	<i>B. euphorbioides</i>	0.09		<i>P. pseudo-radicatum</i>	3.37		<i>V. acuminata</i>	0.45
	<i>D. borealis</i>	0.08		<i>C. palustris</i>	3.07		<i>C. trachyspermum</i>	0.45
Se	<i>R. globosa</i>	5.47		<i>T. nutans</i>	2.85		<i>T. pratense</i>	0.43
	<i>C. nakaianum</i>	2.88		<i>V. nigrum</i>	2.76		<i>R. globosa</i>	0.38
	<i>O. anertii</i>	2.87		<i>R. elongata</i>	2.23			
	<i>H. ussuriense</i>	2.62		<i>I. dentiaulata</i>	2.09			

注: 在计算 Ac 时,植物元素含量取所有测定部位的加权平均值,土壤元素含量则以样地 A_1 层为准(植物根系的主要分布层)。

2 4 植物中不同元素间的相关性

从高山苔原带的情况可以看出, 植物中 Fe 与 Zn、Zn 与 Se、Zn 与 Ge、Se 与 Ge 之间都存在显著的正相关(表 5)。

表 5 植物中不同微量元素含量的相关阵
——相关系数 r (高山苔原带, $n=45$)

Table 5 Correlation coefficient(r)between different
microelements in wild plants of alpine tundra zone ($n=45$)

元素 Element	Fe	Zn	Se	Ge
Fe	1			
Zn	0.37 *	1		
Se	0.25	0.44 **	1	
Ge	0.19	0.42 **	0.58 **	1

* $p\leq 0.05$ ** $p\leq 0.01$

由于同一垂直带内土壤条件较为一致, 所以 4 种元素的这种相关性表明大多数植物在吸收积累这些元素方面都有一定的协同作用。可见, 要获得同时富含几种微量元素的植物初级产品, 除了筛选特定的复合富集型植物外, 利用元素在大多数植物中的协同关系, 通过合理的土壤微肥调控措施, 也有望达到预期目标。

3 结 论

通过对长白山野生经济植物中 Fe、Zn、Se、Ge 等微量元素的分析, 可以得出以下初步结论:

1. 长白山供试野生经济植物样品含 Fe $1003.24 \pm 674.54 \mu\text{g/g}$ 、Zn $69.28 \pm 46.06 \mu\text{g/g}$ 、Se $0.111 \pm 0.071 \mu\text{g/g}$ 、Ge $2.63 \pm 2.40 \mu\text{g/g}$ 。平均来说, 植物的 Fe、Zn 都是较丰富的; Se 则处于中等偏低水平; Ge 虽然比 Se 丰富, 但与某些抗癌中药比其含量却不高。
2. 不同植物样品中几种微量元素含量差异很大, 这种差异一方面来自环境因素(土壤差异、气候差异), 另一方面更主要的则来自生物因素(种间差异、部位差异)。因此, 通过相对的“富集型植物”筛选或环境调控(如土壤添加微肥)都有望达到培育微量元素富集型野生植物资源的目标。
3. 根据相对富集系数(Re)和生物吸收系数(Ac), 分别筛选出对 Fe、Zn、Se、Ge 等微量元素有较强富集能力的一系列野生植物种类。其中有些植物

(如 *Hedysarum ussuriense*、*Polygonum ochotense* 等)对几种微量元素都有较强的富集能力, 属于“复合富集型”。

4. 供试植物中的 4 种微量元素之间都表现出正相关趋势, 其中 Fe 与 Zn、Zn 与 Se、Zn 与 Ge、Se 与 Ge 之间的正相关均达显著或极显著水平。这种相关性对于在一定的**人工控制条件下获取微量元素复合富集型食(药)用野生植物资源具有现实意义。

5. 对于筛选出的“富集型野生植物”, 其栽培条件下的实际富集能力有待进一步检验。

参考文献(References):

[1] Chen Qing, Lu Guocheng. Microelements and Human Health[M]. Beijing: Beijing University Press, 1989. 168 ~ 175. [陈清, 卢国呈. 微量元素与健康[M]. 北京: 北京大学出版社, 1989, 168 ~ 175.]

[2] Lin Nianfeng. Environ-geo-chemistry Related to Medicine [M]. Changchun: Science and Technology Press of Jilin Province, 1991, 132 ~ 196. [林年丰. 医学环境地球化学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991, 132 ~ 196.]

[3] Hou Shaofan, Zhu Zhenyuan. The Bio-availability of Selenium[J]. Foreign Medical Science, 1982, (2): 52 ~ 57. [侯少范, 朱振源. 硒的生物学有效性[J]. 国外医学, 1982 (2): 52 ~ 57.]

[4] Shi Yanxi, Du Zhenyu, Ma Li, et al.. Selenium Absorption and Accumulation Characteristics of Cabbage Plants under Different Se-application Conditions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1998, 29(5): 229 ~ 231. [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特征[J]. 土壤通报, 1998 29(5): 229 ~ 231.]

[5] Wang Shuzhen. Biological Transformation of Ge in Grains[J]. Food Science, 1994, 173(5): 60 ~ 64. [王淑珍. 锗的粮食生物转化[J]. 食品科学, 1994, 173(5): 60 ~ 64.]

[6] Baebos G S, Meek D W. Accumulation of Selenium in Plant Grown on Selenium-treated Soil[J]. Environ Qual, 1990, 19: 10 ~ 12

[7] Chen Shijiang, Zeng Wei, Yin Dinghua. Microelement Analysis in the Rhizome of *Polygonum viviparum* [J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 1994 (3): 61 ~ 62. [陈仕江, 曾伟, 尹定华. 珠芽蓼根茎中的微量元素分析[J]. 特产研究, 1994 (3): 61 ~ 62.]

[8] Huang Xinjiang, Kang Yulin, Liu Xuejun, et al.. Study on the Zinc-enrichment and Zinc-toleration Properties of Cucumber Plants[J]. Soil and Fertilizers, 1992, (2): 39 ~ 41. [黄新江, 康玉林, 刘学军, 等. 黄瓜富锌与耐锌能力的研究[J]. 土壤肥料, 1992 (2): 39 ~ 41.]

[9] Liu Xunjian, Ding Lei, Shen Yan, et al.. Effect of Soil Selenium Application on Selenium Content of Chinese Tea[J]. Chinese Tea Science, 1995 15(2): 155 ~ 156. [刘训健, 丁雷, 沈亚如, 等. 土施硒肥对茶叶含硒量的影响[J]. 茶叶科学, 1995, 15(2): 155 ~ 156.]

[10] Meng Xiangying, Yang Shihai, Lu Qi. Inorganic Element Analysis of 10 Chinese-medicine Plants[J]. Ginseng Research, 1996, 3: 29 ~ 31. [孟祥颖, 杨世海, 鲁歧. 10 种抗癌植物药中无机元素的分析[J]. 人参研究, 1996, 3: 29 ~ 31.]

[11] Shi Heping, Zhang Yingju, Liu Zhensheng. Absorption, Distribution

- and Transformation of Selenium in the Tomato Plants[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1993, 35(7): 541~546. [施和平, 张英聚, 刘振声. 番茄对硒的吸收、分布和转化[J]. 植物学报, 1993, 35(7): 541~546.]
- [12] Sun Shuying, Wang Hongan, Wang Lei. Determination of Necessary Trace Elements in 100 Kinds of Usually Used Chinese Herbal Medicine [J]. *Natural Product Research and Development*, 1997, 9(3): 52~58. [孙树英, 王洪存, 王磊. 100种常用中药必需微量元素的含量测定[J]. 天然产物研究与开发, 1997, 9(3): 52~58.]
- [13] Wang Qibing, Wu Jinsui, Zhao Yifang, et al.. Research on the Dynamics of Se Uptake and Accumulation in Different Peanut Organs[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(2): 164~168. [王其兵, 吴金绥, 赵义芳, 等. 落花生不同器官对硒元素吸收和积累动态的研究[J]. 植物学报, 1997, 39(2): 164~168.]
- [14] Wu Jingui, Li Zhengming, Xu Yueding, et al.. Study on Characteristics of Luxury Absorption of Zinc by Vegetable Plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(5): 228~229. [吴金桂, 李正明, 徐跃定, 等. 蔬菜奢侈吸锌特性研究[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 228~229.]
- [15] Wu Qingsheng. A Comparison of Microelement Content in Different Organs of American Ginseng Produced in Jirzai County[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 1994, (2): 42~44. [吴庆生. 金寨县产西洋参的不同药用部位微量元素比较分析[J]. 特产研究, 1994, (2): 42~44.]
- [16] Xu Chunxia, Li Xiangmin, Xiao Yongsui. Effect of Adding Selenite-Selenium to the Soils on the Se-content and Yield of Tea[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1996, 5(1): 71~75. [许春霞, 李向民, 肖永绥. 土施硒肥与茶叶含硒量和产量的关系[J]. 西北农业学报, 1996, 5(1): 71~75.]
- [17] Xu Jing, Zhu Maoxiang, Chen Wanhua, et al.. Study on Assimilation of Spirulina to Inorganic Selenium[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(2): 170~174. [徐晶, 朱茂祥, 陈婉华, 等. 螺旋藻富集同化无机硒研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(2): 169~174.]
- [18] Yin Shoudong. Study on Human-needing Microelements in the Soils and Wild Plants of Changbai Mountain[D]. Thesis of Master Degree, Northeast Forestry University, 1999, 9~15. [尹守东. 长白山野生植物及土壤中的人体微量元素研究[D]. 硕士论文, 东北林业大学, 1999, 9~15.]
- [19] Zhao Xiaosong, Zhao Shuiyuan, Liu Zhaorong, et al.. Accumulation and Distribution of 5 Microelements in 4, 6-year-old Ginseng Plants[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 1993, 4: 3~7. [赵晓松, 赵淑媛, 刘兆荣, 等. 五种微量元素在4~6年生人参体内的积累与分配[J]. 特产研究, 1993(4): 3~7.]
- [20] Qiu Peilin. Photometric Determination of Organic and Inorganic Ge in Garlic Samples[J]. *Food Science*, 1998, 19(10): 47~50. [邱培琳. 光度法测定大蒜中的有机锗和无机锗[J]. 食品科学, 1998, 19(10): 47~50.]
- [21] Han Guoxia. Organic Germanium Medicines; prospective New Anticancer Medicine[J]. *University Chemistry*, 1991, 6(1): 48~50. [韩国霞. 有机锗药物—有希望的抗癌新药[J]. 大学化学, 1991, 6(1): 48~50.]
- [22] Gao Wenyong, Fu Guodong. Flora of Wild Economic Plant in Southwest Changbai Mountain[M]. Changchun: Science and Technology Press of Jilin Province, 1984. [高文由, 富国栋. 长白山西南坡野生经济植物志[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1984.]
- [23] Fu Deyi, Huang Xichou, Zhu Yanming. Research on Trace Elements in Plants on Tundra of Changbai Mountain[J]. *Research of Forest Ecosystem*, 1981, (2): 147~157. [富德义, 黄锡畴, 朱颜明. 长白山高山苔原带植物中微量元素的研究[J]. 森林生态系统研究, 1981, (2): 147~157.]
- [24] Fu Deyi, Zhu Yanming, Huang Xichou. A Research on Chemical Background of Ecological Environment of Changbai Mountain[J]. *Research of Forest Ecosystem*, 1984, (4): 25~86. [富德义, 朱颜明, 黄锡畴. 长白山森林生态系统的化学环境背景研究[J]. 森林生态系统研究, 1984(4): 25~86.]
- [25] Cheng Borong, Ju Shanjian, Yue Shurong, et al.. Geo-chemical Background of Selenium in Rocks, Soils and Grains of Northeast China[J]. *Academia Sinica Institute of Forest Soil Science*, 1980, (4): 159~164. [程伯容, 鞠山见, 岳淑容, 等. 中国东北岩石、土壤和粮食中微量元素硒的地球化学背景值[J]. 中国科学院林业土壤研究所集刊, 1980(4): 159~164.]

Microelement Analysis in Wild Economic Plants of Changbai Mountain: Content, Variation and Correlation of Fe, Zn, Se and Ge

CUI Xiao-yang, SONG Jin-feng, ZHANG Yun

(Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040 China)

Abstract: 141 samples of wild plants were collected from the Changbai Mountain of Northeast China, and the contents of Fe, Zn, Se and Ge were analyzed. It resulted that, wild plants of the region contained Fe $1\,003.24 \pm 674.54 \mu\text{g/g}$, Zn $69.28 \pm 46.06 \mu\text{g/g}$, Se $0.111 \pm 0.071 \mu\text{g/g}$, Ge $2.63 \pm 2.40 \mu\text{g/g}$, which represented higher average levels of Fe and Zn, but lower levels of Se and Ge. Values of different plant samples varied considerably, and the coefficient of variation (C_v) for each of the elements reached $0.64 \sim 0.91$. This variation was dominated by bio-factors (species difference, organ/tissue difference), but environ-factors (rock, soil, climate) also brought important influence with significant differences between different altitude zones. In respect of the plant samples analyzed, different elements tended to be positively correlated with each other, of which the Fe-Zn, Zn-Ge, Se-Ge relationship came to significant or very significant level. Finally, a variety of microelement-rich plants was selected according to relative enrichment ratio (Re) or bio-accumulation coefficient (Ac).

Key words: Changbai Mountain; wild plants; microelements

《山地学报》致作者

为不断改进本刊质量, 提高编辑水平, 也为便于本刊对您的宣传和为您评选优秀论文提供材料, 请您随时留意论文发表后的社会反响, 将其被引用、转载、收录等信息, 以及因此而被授奖(包括由获奖成果、总结撰写的论文和因论文发表而导致的成果获奖情况), 应邀讲学或参加学术活动, 开展合作研究等情况尽量收集并及时反馈给我们。

编者