

神农架林区常见蔬菜锶含量测定及变化原因初探

肖潇¹, 崔媛媛¹, 张亭迪¹, 张秀琴², 牛作敬², 刘志国³, 位秀丽^{1,2*}

(1. 湖北医药学院基础医学院, 十堰 442000; 2. 神农架林区公共检验检测中心, 神农架林区 442422;
3. 武汉轻工大学生物与制药工程学院, 武汉 430023)

摘要: 目的 对当地常见的富锶蔬菜进行复核和人工种植, 研究品种及环境因素对蔬菜中锶含量的影响规律。**方法** 针对前期调查中富锶植物的分布规律, 对含锶量较高、生长迅速、便于多次采样的绿叶蔬菜进行大棚种植, 并用富锶水浇灌, 采样后测定锶含量。**结果** 所有检测的35种共229份蔬菜样品中, 有9种蔬菜样品的平均含锶量超过1.0 mg/kg, 与前期普查结果基本相符; 其中, 地皮菜鲜重含锶量5.17 mg/kg, 显著高于其他蔬菜($P<0.05$), 小白菜和苋菜含锶量高于黄瓜和马铃薯($P<0.05$), 且含量较为稳定; 马铃薯、黄瓜、菜豆和韭菜, 富锶水浇灌后, 含锶量提高不明显($P>0.05$)。**结论** 不同品种蔬菜富集锶的能力差异较大, 葫芦科(平均值0.32 mg/kg)、茄科(平均值0.36 mg/kg)富集锶的能力较差, 而苋科(平均值2.47 mg/kg)和十字花科(平均值2.25 mg/kg)等叶菜类富集能力较强; 富锶水浇灌能提高植物含锶量, 但效果不显著。

关键词: 神农架; 锶; 蔬菜; 地皮菜

Determination of strontium content in common vegetables in Shennongjia forest district and variation influential factors investigation

XIAO Xiao¹, CUI Yuan-Yuan¹, ZHANG Ting-Di¹, ZHANG Xiu-Qin², NIU Zuo-Jing²,
LIU Zhi-Guo³, WEI Xiu-Li^{1,2*}

(1. School of Basic Medicine, Hubei University of Medicine, Shiyan 442000, China; 2. Shennongjia Forest Public Inspection and Testing Center, Shennongjia Forest District 442422, China; 3. School of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: Objective To confirm and study the influences of taxonomy and environment factors on strontium enrichment in vegetables by re-checking and artificially planting common strontium-rich vegetables in the area. **Methods** According to the distribution patterns of strontium-rich plants in the previous investigations, the leafy, rapid-grow, convenient-for-multiple-sampling and strontium-rich vegetables were chosen. The vegetables were planted and watered using strontium-mineral water. At last, the vegetables were sampled and the strontium content was determined after sampling. **Results** Multiple detections showed that the average strontium content of 9 kinds of 35 kinds of vegetables from 229 samples were more than 1.0 mg/kg, which was consistent with the previous surveys generally. The strontium content of *Nostoc commune* was the highest, which reached to 5.17 mg/kg fresh weight and significantly higher than other vegetables ($P<0.05$); The strontium contents of Chinese cabbage and *Amaranth* were

基金项目: 湖北省卫健委青年基金项目(WJ2019Q025)、湖北医药学院博士启动基金项目(2015QDJZR06、2018QDJZR12)

Fund: Supported by the Youth Foundation of Hubei Provincial Health Commission (WJ2019Q025), and the Ph.D Research Startup Foundation of Hubei University of Medicine (2015QDJZR06, 2018QDJZR12)

*通信作者: 位秀丽, 博士, 讲师, 主要研究方向为微生物资源与开发利用。E-mail: weixiuli@hbm.u.edu.cn

*Corresponding author: WEI Xiu-Li, Ph.D, Lecturer, Hubei University of Medicine, No.30, South Renmin Road, Maojian District, Shiyan 442000, China. E-mail: weixiuli@hbm.u.edu.cn

significantly higher than that of cucumber and potato ($P < 0.05$), and the content were quite stable; The strontium contents of potatoes, cucumbers, kidney beans and Chinese chives exhibited no significant variation after being irrigated with water rich in strontium. **Conclusion** There were great differences in strontium enrichment ability among diverse species of vegetables. Cucurbitaceae (average 0.32 mg/kg) and Solanaceae (average 0.36 mg/kg) possessed poor strontium enrichment ability, while leafy vegetables such as Amaranthaceae (average 2.47 mg/kg) and Cruciferae (average 2.25 mg/kg) were strong in strontium enrichment. Strontium-rich water irrigation could increase the strontium content of plants, but very slightly. Screening stably strontium-rich vegetables and studying the influencing factors were important for the development of strontium-rich products.

KEY WORDS: Shennongjia; strontium; vegetables; *Nostoc commune*

0 引 言

骨质疏松是一种骨显微结构发生改变的退行性病变,原发性骨质疏松多发于绝经后妇女和老年男性,骨质疏松症的发生不易被察觉,常在骨折发生时或体检时才被发现^[1]。骨质疏松引起的骨折常发生于髌骨和椎骨,常造成严重残疾甚至死亡^[2]。由于骨质疏松的发生存在隐匿性强、治疗周期长和治疗效果差等特点,预防骨质疏松对于提高老年人的生活质量水平具有重要意义。

锶是人体的一种微量元素,是骨代谢必需的元素之一,对预防骨质疏松、维护骨骼健康具有重要意义^[3-5]。锶的护骨效应得益于它对成骨细胞和破骨细胞的双重作用,在减少骨吸收的同时又促进新骨形成^[6]。有案例表明,口服一定剂量的锶盐可提高股骨和椎骨的骨密度^[6-7],降低骨折风险^[6]、促进坏死部位愈合^[7];与维生素 D、维生素 K 和褪黑素联用在双盲实验中取得良好效果^[8]。自然条件下,人们主要通过饮食获取每日所需的锶约为 1.9 mg^[9]。一项针对西班牙加那利群岛居民饮食中微量元素的调查结果显示,坚果类含锶量较高,约为 (9.759±5.181) mg/kg(鲜重),其次为奶酪(6.016±4.670) mg/kg、荚果(2.712±1.378) mg/kg 和蔬菜类(2.123±1.449) mg/kg,其中蔬菜对日摄入锶贡献为 10.9%^[9]。我国目前对于食物中的稳定性锶元素含量调查研究尚不多见^[10],研究多集中在对矿区放射性锶元素的吸附和修复^[11],而自然界中的锶一般是非放射性的 4 种同位素的混合物^[12]。

神农架林区是我国著名的旅游胜地,前期调查研究发现,神农架林区具有丰富的富锶植物^[10],其中包括多种常见的蔬菜,这些蔬菜是否可作为神农架特色产品进行开发利用,尚需对其含锶量做进一步测定;并研究可能对锶含量造成影响的环境因素。故本研究对林区内常见种植及野生蔬菜进行抽样调查和复核,对含锶量较高、生长迅速、便于多次采样的绿叶蔬菜进行大棚种植,并用富锶水浇灌,采样后测定锶含量,研究品种及环境因素对蔬菜中锶含量的影响规律,以期为林区富锶资源产品开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

仪器: DHG-III 电热恒温鼓风干燥箱(上海新苗医疗器械制造有限公司); FW-100 高速万能粉碎机(北京中兴伟业仪器有限公司); iCAPQc 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); TAS-990 原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限公司); XT-9900A 型智能微波消解仪(上海新拓分析仪器科技有限公司)。

试剂: 硝酸锶(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 乙二胺四乙酸钠盐(ethylene diamine tetraacetic acid disodium salt, EDTA-2Na)(分析纯,北京兰杰柯科技有限公司); 硝酸、高氯酸、NaOH(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

溶液配制参考 GB 8538—2016《食品安全国家标准饮用水天然矿泉水检验方法》和卜怡然等^[10]的方法。称取 1.208 g 硝酸锶,用 0.15%稀硝酸溶解并定容至 500 mL,得到 1.0 mg/mL 的锶标准储备液。称取 37.2 g EDTA-2Na 和 4.0 g NaOH 用水稀释至 500 mL 即得到 EDTA-2Na 的碱性溶液。锶标准储备液用 0.15%稀硝酸溶液稀释 100 倍得到 10 μg/mL 的锶标准工作液。

1.2 实验材料

根据前人调查及文献资料,选择易富集锶的常见蔬菜: 红菜薹(*Brassica rapa*)、落葵(*Basella alba* L.)、苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)、小白菜(*Brassica campestris* L.)、蕹菜(*Ipomoea aquatic* Forsk)、乌塌菜(*Brassica narinosa* L.); 不易富集锶的蔬菜: 韭菜(*Allium tuberosum* Rottler ex Sprengle)、叶用莴苣(*Lactuca sativa* var. *ramose* Hort)、茼蒿(*Chrysanthemum coronarium* L.)、芫荽(*Coriandrum sativum* L.)作为对照,进行大棚种植并用富锶水浇灌。

辣椒(*Capsicum annuum* L.)、黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、豇豆(*Vigna unguiculata* L.)、菜豆(*Phaseolus vulgaris* L.)、番茄(*Lycopersicon esculentum* Miller)、茄子(*Solanum melongena* L.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、结球甘蓝

(*Brassica oleracea* L.)、番薯[*Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill]、西瓜[*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai]、苦瓜(*Momordica charantia* L.)和豌豆(*Pisum sativum* L.)等,成熟期比较集中且短暂,不适宜多次重复采样,常规种植,不浇灌,或只在必要时用普通河水或井水浇灌,取样 1~2 次;紫苏[*Perilla frutescens* (L.) Britt.]、刺儿菜(*Cirsium arvense* var. *integrifolium*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、小葱(*Allium fistulosum* L.)、车前(*Plantago asiatica* L.)、凤仙花(*Impatiens balsamina* L.)、何首乌[*Fallopia multiflora* (Thunb.) Harald.]、灵芝(*Ganoderma lucidum* Karst)和马齿苋(*Portulaca oleracea* L.)等,不适合大棚种植或反复多次采样,其测试结果作为普查数据,和大棚蔬菜进行对比。

本次调查共采集样品 229 份,共 35 种蔬菜,涉及 17 个科,其中十字花科样品最多(37),其次是豆科(32)、茄科(30)、菊科(29)、落葵科(17)、旋花科(17)、苋科(16)、念珠藻科(15)、百合科(10)、葫芦科(9)、伞形科(9)、唇形科(2)及其他车前科、凤仙花科、廖科、灵芝、马齿苋科样本各 1,详见表 1。

一些特殊样品,如地皮菜(*Nostoc commune*)在前期普查中含镉量较高,但无法进行大棚种植,继续采用传统方法进行采集:雨后在草地或路边捡拾。

本研究中采样用的黄豆芽生产方式:从超市购买普通黄豆,用富镉水泡发至芽长约 3~4 cm 时进行取样测定。

1.3 实验方法

每种蔬菜种植面积约(1×2) m²,常规田间管理,施用农家肥,不使用杀虫剂或除草剂。叶菜类植物长至可上市时即采集,瓜菜、茄果类等均参照大众日常食用习惯适时采集,带回实验室进行处理。

新鲜样品取样匀浆后称量进行消解(硝酸消化)^[10];干品则是先取新鲜样品烘干(55 °C)至恒重,烘干过程中记录重量变化以计算含水量和干物质得率,以便进行结果换算,干品粉碎后过 60 目筛,再取样进行测试,方法同鲜品。

准确称取样品 1.5000 g,置于消解罐中,加入 10 mL 硝酸、2 mL 高氯酸,盖上密封盖,装好保护套,放入微波消解仪,按照程序消解,赶酸至近乎干燥状态,转移至 10 mL 容量瓶中,用 1%硝酸定容至刻度,混匀备用,同时准备空白溶液 2 份,作为空白对照。上机测定时,先将原子吸收光谱仪调至镉最佳工作状态,吸取处理好的样品消化液 10.0 mL 于具塞比色管中,另吸取镉标准工作溶液 0、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 mL 于一系列具塞比色管,用硝酸溶液定容至 10 mL。然后向各比色管中各加入 2.0 mL EDTA-2Na 溶液,混匀。依次将标准系列溶液及消化好的样品溶液喷入原子吸收光谱仪火焰中,测定其吸光度,以质量(μg)为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线。按照 GB 8538—2016 规定,根据消化样品的吸光度在标准曲线上查得镉的质量,根据进样量、消化液质量浓度和样品质量换算出样品中的镉含量。

干品测试得到的结果根据含水量换算成鲜重中的镉含量。按照公式(1)换算:

$$F_{Sr} = D_{Sr} \times (1 - W\%) \quad (1)$$

其中, F_{Sr} 表示鲜重 Fw (Fresh weight) 镉含量, mg/kg; D_{Sr} 表示干重 Dw (Dry Weight) 中的镉含量, mg/kg; $W\%$ 表示样品的含水量。

1.4 数据处理

通过 Excel 2013 对于多次测试结果的样品计算平均值、最大值、最小值和标准偏差,并作柱状图,通过 R 语言(version 4.0.4)非参数 Kruskal-Wallis 检验分析不同种蔬菜中的含镉量差异,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义;通过 SPSS (version 18.0) t 检验分析浇灌对 4 种蔬菜(马铃薯、土豆、韭菜、苋菜)含镉量影响,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 样品采集及检测结果

蔬菜鲜重含镉量详细统计见表 1,在多次采样、复测中,含镉量大于 2.0 mg/kg 的蔬菜有 3 种,分别是地皮菜、小白菜和苋菜;小于 2.0 mg/kg 但大于 1.0 mg/kg 的有 6 种:红菜薹、黄豆芽、蕹菜、毛豆荚、落葵和乌塌菜。普查结果($n=1$ 或 2,测试结果取平均值)中大于 1.0 mg/kg 的有 14 种样品(见表 1)。所有 10 种大棚种植的蔬菜、7 种虽非大棚种植但有多次采样并测试的样品(辣椒、黄瓜、豇豆、菜豆、番茄、茄子、马铃薯)和 3 种非种植或大田采样品(地皮菜、黄豆芽、毛豆荚)的测试结果显示:除地皮菜显著高于其他科(十字花科和苋科除外)、十字花科和苋科显著高于茄科等(包括菊科、葫芦科、百合科、伞形科)外,其他科相互之间差异较小。十字花科、落葵和苋科之间无显著差异,详见图 1。经统计发现,部分蔬菜含镉量标准偏差大于或等于均值(图 1),例如地皮菜、黄豆芽和毛豆荚。其原因可能是野外采样,采样地分散于神农架林区,受所处生长环境的影响(如土壤营养、镉含量、水分、位置等因素),不同地点采集的同一种蔬菜镉含量差异较大^[13-16],也有可能是购买的黄豆芽种子品种差异或不同地块营养状况以及毛豆荚成熟度差异造成标准偏差大于均值。相似的趋势在其他植物中也有发现^[15],统计结果还显示,多种植物品种内镉含量最大值可超最小值 2 倍以上,如:大麦(*Hordeum vulgare* L.)、甘蓝(*Brassica oleracea* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、葡萄(*Vitis vinifera* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、豌豆(*Pisum sativum* L.)等^[15]。

通过 Kruskal-Wallis 检验发现,念珠藻科(野生地皮菜)、苋科和十字花科含镉量显著高于茄科(辣椒、茄子、马铃薯、番茄)、菊科(叶用莴苣、茼蒿)、葫芦科、百合科和伞形科(见图 1)。GOUTHU 等^[17]的研究也发现,十字花科小白菜干重

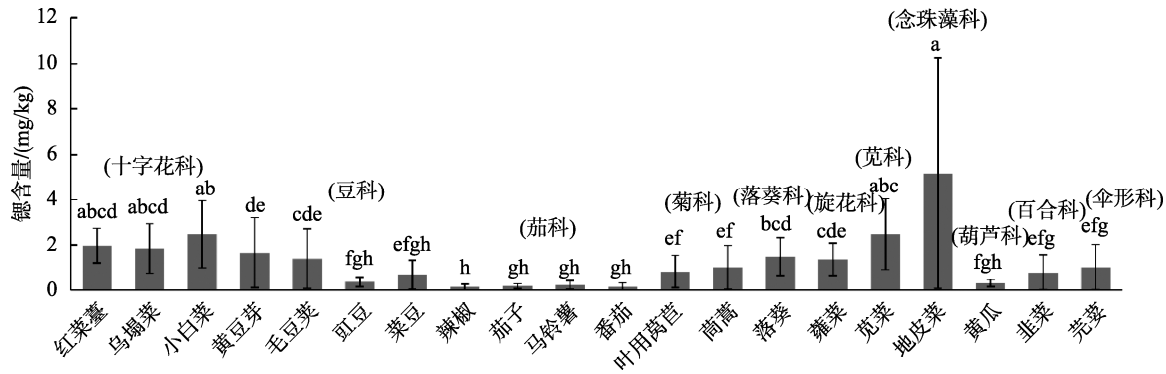
含镉量 $[(0.58\pm 0.22)/100\text{ g}]$ 高于番茄 $[(0.35\pm 0.01)/100\text{ g}]$, 与本研究结果相似。有些藻类, 如 *Micrasterias* 属能够以晶体形式(SrSO_4)储存镉^[18], 有膜包被, 可减少镉沉积对细胞的

损害^[18]。HERMOSO 等^[19]在海洋浮游植物中发现了两个富集镉的藻类: *Scyphosphaera* 和 *Pontosphaera*, 对镉的富集程度比其他报道高出一个数量级。

表 1 样品含镉量统计(鲜重)($n\geq 3$)
Table 1 Strontium content statistics of samples (fresh weight) ($n\geq 3$)

科名(样品数)	序号	样品名称	均值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	标准偏差/%
十字花科(37)	1	结球甘蓝	1.47	1.47	1.47	—
	2	红菜薹	1.98	2.62	0.25	0.76
		青菜薹	0.06	0.06	0.06	—
	3	萝卜	0.34	0.34	0.34	—
		萝卜叶	0.09	0.18	0.00	0.13
		乌塌菜	1.85	3.05	0.43	1.09
	豆科(32)	6	小白菜	2.48	5.24	0.55
7		白菜根	12.18	12.18	12.18	—
		黄豆芽	1.66	3.99	0	1.54
8		毛豆荚	1.39	3.37	0.32	1.31
		豇豆	0.36	0.64	0.00	0.22
		菜豆	0.69	1.66	0.00	0.65
10		豌豆荚	0.00	0.00	0.00	—
	豌豆尖	0.27	0.27	0.27	—	
	辣椒	0.14	0.34	0.00	0.13	
茄科(30)	12	茄子	0.18	0.30	0.00	0.11
	13	马铃薯	0.22	0.55	0.00	0.19
		番茄	0.16	0.38	0.00	0.16
	14	番茄叶	2.94	2.94	2.94	0.0
菊科(29)	15	叶用莴苣	0.82	2.15	0.00	0.72
		叶用莴苣根	1.98	1.98	1.98	—
	16	茼蒿	1.00	2.69	0.00	0.98
	17	刺儿菜	3.15	3.43	2.88	0.39
落葵科(17)	18	蒲公英	1.83	1.83	1.83	—
	19	落葵根	1.36	1.36	1.36	—
		落葵(茎叶)	1.50	3.18	0.32	0.84
20	蕹菜	1.37	2.34	0.35	0.71	
	21	苕尖	0.03	0.05	0.00	0.03
21	红薯	1.54	1.54	1.54	—	
	22	苋菜	2.47	5.22	0.83	1.56
23	地皮菜	5.17	19.72	0.68	5.09	
百合科(10)	24	小葱	1.21	1.42	1.00	0.30
	25	韭菜	0.77	2.29	0.00	0.75
		黄瓜	0.32	0.57	0.06	0.16
葫芦科(9)	26	苦瓜	0.32	0.32	0.32	0.0
	28	西瓜	0.20	0.20	0.20	—
		芫荽	0.91	2.42	0.00	1.05
29	芫荽根	4.51	4.51	4.51	—	
	30	紫苏	3.74	6.72	0.67	4.22
31	车前草	11.53	11.53	11.53	—	
32	凤仙花子	0.00	0.00	0.00	—	
33	何首乌根	0.32	0.32	0.32	—	
34	灵芝	2.13	2.13	2.13	—	
35	马齿苋	0.37	0.37	0.37	—	

注: —表示无此项, 下同。



注: a-h: 标注不同字母表示具有统计学差异, $P < 0.05$; 有相同字母表示无统计学差异, $P > 0.05$ 。

图1 不同种蔬菜中的含锶量及差异显著性分析($n \geq 3$)

Fig.1 Strontium content in different plants and difference significance analysis ($n \geq 3$)

2.2 样品干重及不同部位含锶量

小白菜、苋菜、蕹菜和落葵等是常见蔬菜,容易种植、长势良好,方便多次采样。鲜重直接取样进行测试,结果发现,不同批次之间含锶量差异较大。如小白菜,最低含锶量 0.55 mg/kg,最高则达 5.24 mg/kg;苋菜最低含锶量 0.83 mg/kg,最高达 5.22 mg/kg。为排除含水量对样品含锶量的影响,将样品烘干至恒重,测得含水量和干物质得率,测试换算至鲜重含锶量。每批次每个样品测试 2 次(详细结果见表 1~2),测试结果发现同一样品的 2 次结果较为一致,因此可排除人为操作误差。但不同批次之间含锶量有较大差异,有可能在植物的生长过程不同阶段中吸收和累积锶的能力不同^[20]。例如,老化阶段的种子成熟期,比较有利于锶的积累^[21],有研究认为植物生长时间越长,锶元素累积也越多^[20]。另外,相比叶菜、非叶类蔬菜、块根/茎、豆类、豆科饲料,谷物对锶的转运能力最低;通过比较植物不同生长阶段的转运能力发现,中期的转运能力高于收获期。此外,土壤施肥也会导致转运能力降低,这可能是由于肥料中的 NH_4^+ 、 K^+ 或 Ca^{2+} 竞争作用^[22]。

除地上部分外,对小白菜、落葵、叶用莴苣和茼蒿 4 种蔬菜的根也进行了含锶量测试,结果发现,落葵根(22.69 mg/kg)和叶用莴苣根(33.00 mg/kg)低于同批样品茎叶含锶量(平均

值分别为 26.84 和 37.89 mg/kg 干重,仅指其同批次采样测试结果,不同于表 1 中多次测试的结果平均值,下同),而茼蒿根(34.69 mg/kg)和小白菜根(76.14 mg/kg)则高于同批次相应样品的茎叶含锶量(平均值分别为: 22.13 和 54.31 mg/kg)。对茄科蔬菜:番茄和马铃薯叶片进行含锶量测试结果显示,番茄叶(2.94 mg/kg,数据来自本研究)、马铃薯叶(1.2 mg/kg,数据来源卜怡然等^[10]的研究)含锶量远远高于各自的可食用部分(含锶量平均值分别为 0.16 和 0.23 mg/kg)。因此,蔬菜根、茎、叶中锶分布差异很大。

卜怡然等^[10]在普查过程中发现地皮菜含锶量(52.77 mg/kg),显著高于其他植物样品($P < 0.05$)。因此,本研究中也多次采集地皮菜进行测试,结果发现,地皮菜鲜重含锶量最高为 19.72 mg/kg,最低 0.68 mg/kg。分析可能的原因:除不同地点样品本身有差异外,地皮菜本身的特殊性也与含锶量差异有关系。地皮菜又名雷公菌、地软儿等,由于雨后能够快速生长,因此又称为“雨来菇”,太阳出来后会很快速收缩、干燥,变成又薄又脆的耳片状,因此含水量对于地皮菜含锶量测试结果影响很大。本研究将不同地点采集到的地皮菜烘干之后进行含锶量测试,结果显示,最低含锶量为 12.90 mg/kg,最高含锶量 289.71 mg/kg(见表 2),说明了地皮菜含水量对结果影响确实非常大,因此对此类样品应该以干重测试结果为准。

表 2 样品含锶量统计(干重)
Table 2 Strontium content in samples (dry weight)

科名称	序号	样品名	平均值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	标准偏差/%
豆科	1	黄豆芽	10.23	16.61	1.90	5.42
		毛豆荚	6.55	11.61	1.90	4.66
		豇豆	4.91	5.80	4.10	0.81
		菜豆	15.86	16.63	15.08	0.77
十字花科	4	红菜薹	33.28	33.32	33.23	0.05
		乌塌菜	34.39	60.96	8.50	25.90
		白菜根	76.14	76.14	76.14	0.00
十字花科	6	小白菜	32.51	56.62	8.50	21.93

表 2(续)

科名称	序号	样品名	平均值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	标准偏差/%
落葵科	7	落葵	19.50	29.19	6.30	9.21
		落葵根	22.69	22.69	22.69	0.00
苋科	8	苋菜	24.03	43.39	6.30	17.22
旋花科	9	蕹菜	16.37	31.86	4.10	11.58
百合科	10	韭菜	21.95	22.92	20.97	0.98
		马铃薯	2.58	2.62	2.54	0.04
茄科	12	辣椒	3.19	4.10	2.24	0.91
		番茄	4.12	6.38	1.90	2.22
菊科	14	叶用莴苣根	33.00	33.00	33.00	0.00
		叶用莴苣	29.19	42.91	10.70	12.77
		茼蒿	16.71	23.64	4.10	8.19
伞形科	16	芫荽	22.13	22.53	21.72	0.41
		芫荽根	34.69	34.69	34.69	0.00
念珠藻科	17	地皮菜	154.81	289.71	12.90	104.98
葫芦科	18	黄瓜	8.18	13.59	1.90	5.24

2.3 表面附着及富镉水浇灌对含镉量的影响

从测试结果可以看出, 虽然多次测试结果之间有偏差, 地皮菜含镉量多次测试结果平均值仍然远远高于其他蔬菜样品。地皮菜生长具有特殊性, 紧贴地面生长, 且采集过程中, 有可能沾染地面尘土, 为了避免可能的污染物对含镉量的影响, 将采集到的地皮菜用清水浸泡, 彻底清洗, 与同一来源地、同批次的未清洗地皮菜同时烘干至恒重, 然后进行测试。结果发现, 清洗后地皮菜含镉量略有下降, 但不显著($P=0.281$, 鲜重含镉量; $P=0.061$, 干重含镉量)(见表 3), 因此, 地皮菜含镉量来源于样品本身, 与污染无关。文献中藻类对镉的超富集能力也多有报道^[18-19], 与本研究结果一致。

黄豆芽比黄豆粒含镉量有所提高, 与毛豆荚含镉量较为相似。由于黄豆本身含镉量很低, 因此黄豆芽中的含镉量可能与水中的镉附着以及吸收有一定关系, 也与镉易在植物叶片中累积有关^[23], 有研究表明镉可以刺激大豆新

梢和根鲜重生长^[24]。

卜怡然等^[10]的研究结果显示, 用富镉水浇灌蔬菜后可能会提高蔬菜镉含量。将本研究中用富镉水浇灌的 4 种含镉量较低的蔬菜: 马铃薯、菜豆、韭菜和苋菜, 与周边未浇灌蔬菜(见表 4)进行对比后发现, 富镉水浇灌能提高蔬菜含镉量, 但不显著(P 值均大于 0.1), 统计结果见表 5。

表 3 地皮菜清洗前后的含镉量对比(mg/kg)

Table 3 Comparison of strontium content in *Nostoc commune* before and after cleaning (mg/kg)

样品编号	未清洗		清洗	
	干重含镉量	鲜重含镉量	干重含镉量	鲜重含镉量
地皮菜 1	246.51	19.72	249.73	4.99
地皮菜 2	222.47	11.12	213.74	4.27
地皮菜 3	289.71	5.79	149.43	2.99
地皮菜 4	270.23	5.40	144.44	11.55

表 4 周边与大棚种植蔬菜含镉量对比(mg/kg)

Table 4 Comparison of strontium content in vegetables between surrounding and greenhouse planting (mg/kg)

序号	样品名称	周边采集	大棚种植(富镉水浇灌)
1	小白菜	0.81	2.564, 1.084, 5.238, 4.130, 3.484, 3.397, 3.388
2	菜薹	0.568	0.252, 2.468, 2.192, 1.637, 2.620, 2.332, 2.326, 0.057
3	菜豆	0.231	0.000, 1.508, 1.663
4	马铃薯	—	0.000, 0.534, 0.551
5	辣椒	0.000, 0.000	0.000, 0.071, 0.129, 0.179, 0.185
6	番茄	0	0.000, 0.000, 0.383, 0.377
7	茄子	0.000	0.289, 0.304
8	茼蒿	0	0.000, 1.122, 1.332, 1.282, 2.600, 2.492

表 4(续)

序号	样品名称	周边采集	大棚种植(富锶水浇灌)
9	韭菜	0.268	0.000, 0.806, 0.252, 0.353, 0.731, 2.292, 2.097
10	葱	0.404, 0.568	1.418, 0.996
11	蕹菜	—	0.806, 1.804, 1.806, 1.472, 1.886, 1.854, 1.911, 1.894
12	红薯	0.138	1.544
13	苕尖	0.138, 1.892, 0.568, 0.568	0.000, 0.049
14	苋菜	1.002	1.360, 2.192, 2.468, 2.007, 0.793, 0.369

表 5 浇灌对 4 种蔬菜含锶量影响的独立样本检验

Table 5 Independent sample test of the effect of irrigation on strontium content in 4 kinds of vegetables

蔬菜名称		方差方程的 Levene 检验		均值方程的 <i>t</i> 检验			
		<i>F</i>	Sig.	<i>t</i>	<i>df</i>	Sig.(双侧)	均值差值
马铃薯	假设方差相等	5.512	0.047	-0.123	8	0.095	-0.18363
	假设方差不等	—	—	-0.181	7.670	0.861	-0.18363
菜豆	假设方差相等	19.978	0.003	-1.077	7	0.317	-0.415873
	假设方差不等	—	—	-1.209	4.403	0.287	-0.415873
韭菜	假设方差相等	3.615	0.090	-0.892	9	0.396	-0.461667
	假设方差不等	—	—	-1.454	8.027	0.184	-0.461667
芫荽	假设方差相等	4.227	0.055	-0.898	17	0.382	-0.928525
	假设方差不等	—	—	-1.606	8.510	0.145	-0.928525

结球甘蓝、茼蒿、小葱、刺儿菜、紫苏、红薯、车前草、灵芝和蒲公英与人们日常生活关系密切,含锶量 1~2 次测试结果大于 1.0 mg/kg,其中车前草和蒲公英,都是骨质疏松和关节炎治疗中常用的药材^[25]。YANG 等^[26]发现,灵芝多糖提取物具有减少骨丢失和预防骨质疏松的作用。秦俊法等^[27]发现,多种中草药中具有较高的锶含量,尤其是抗癌药,含锶量平均值显著高于其他类药物,临床上也确有氯化锶用于癌症治疗的先例^[28],放射性 Sr⁸⁹亦广泛用于骨癌化疗。卜怡然等^[10]普查的结果显示,猪苓、何首乌的含锶量也较高。因此,中草药中微量元素和药效间的相关性值得进一步研究和探索。

3 结论与讨论

本研究通过对神农架常见种植及野生蔬菜中含锶量的普查、调查和复核,发现蔬菜品种及类型对含锶量影响很大,藻类、十字花科和苋科富集锶的能力较强,而茄科、葫芦科和豆科富集锶的能力较差。上述结果,与其他研究规律基本一致,如 BURGER 等^[29]认为,十字花科的拟南芥是一种能够高度累积锶的植物,可以在高浓度的锶环境中生活而不表现明显毒害作用;CHU 等^[30]发现苋菜对锶的积累不敏感;而姜晓燕等^[31]的研究结果则显示辣椒(茄科)对锶的积累主要集中于根系和叶片,果实中很少,与本研究

对茄科植物的测试结果一致。ABDI 等^[32]对萝卜、黄瓜、辣椒等植物对包括锶在内的微量元素富集结果显示,均在安全范围内,DRESLER 等^[23]也认为锶优先在大豆的叶片而不是籽粒中积累。富锶水浇灌未能显著提高蔬菜含锶量,需进一步分析是否由于长期富锶水浇灌,导致土壤中含锶量过高,超出了植物所能利用的安全范围,从而导致对植物的胁迫或毒害。

不同蔬菜种类间含锶量的差异可能与其对锶的生理响应机制有关。适宜的土壤锶浓度能够促进植物生长,如低浓度锶能够提高叶绿素含量、促进植物光合作用,提高氧化酶系统活性和降低脂质过氧化作用;高浓度的锶抑制植物生长,能够富集锶的植物可通过形成晶体、提高活性氧簇(reactive oxygen species, ROS)水平等机制消除锶对细胞器和机体的胁迫效应^[20-21]。

植物不同生长期体内含锶量也有很大差异,例如 GANZHA 等^[21]对 10 种水生植物体内积累锶的研究结果表明,锶积累主要集中在老化阶段的种子成熟期。不同植物的不同部位,锶含量差异也较大,例如在 SASMAZ 等^[33]对 9 种植物含锶量测试结果表明,茎中的锶含量远高于根系;DRESLER 等^[23]对大豆的研究结果表明,锶优先在叶片中积累;姜晓燕等^[31]的研究结果则表明,辣椒果实中的锶含量远低于叶片。生长期时间长短也会对锶的积累量造成影响,例如多年生植物对锶的吸收一般高于一年生植物^[20],

但也有藻类在细胞死亡的时候, 体内晶体溶解, 锶含量下降^[18]。除植物本身及生长时间外, 土壤及环境因素也会机体吸收锶的效率造成影响^[20], 这也是解释了本研究多批次采样之间测试结果相差较大的原因。因此, 富锶蔬菜的种植不但要充分考虑蔬菜种类, 还需考虑生长时期和土壤、灌溉、施肥等田间措施实行标准化管理。

本研究在前人研究的基础上^[10]进一步确认了念珠藻科地皮菜对锶的富集能力, 神农架林区地皮菜含锶量显著高于其他常见蔬菜(除小白菜、苋菜外), 但由于地皮菜的特殊生长方式, 目前尚无法实现人工种植, 因此暂时无法对地皮菜富集锶的机制进行深入研究。加上地皮菜的生长受到温度、阳光、降雨量及降雨时间等的影响, 采样无法保证条件一致; 所种植蔬菜受时间、地理位置及交通所限, 田间管理粗放, 不同批次样本数据差异较大, 导致偏差较大, 因此, 仅供作为富锶蔬菜开发的数据参考。

锶对健康的影响主要体现在其护骨效应上, 有研究证明, 一些含锶化合物可以抑制破骨细胞的活性, 刺激成骨细胞形成, 从而提高骨密度、减少骨丢失, 能缓解绝经后妇女及老年男性的骨质疏松症^[34], 掺锶化合物具有较好的抗炎作用和促进骨缺损恢复的作用^[35]; 一项对我国 314 个城市饮水调查结果表明, 饮水锶浓度与老年人骨密度成正相关^[36]。由此可见, 地皮菜作为人们喜爱的食品, 还具有抗癌和免疫调节等作用^[37], 其多糖提取物具有促进伤口愈合的作用^[38], 结合其含锶量高的特点, 可作为功能性保健食品开发资源, 其应用价值值得进一步开发。

综上所述, 本研究初步研究和探讨了神农架林区常见蔬菜及野生普通念珠藻类中的锶含量, 结合多次测试结果及差异分析, 地皮菜、小白菜、苋菜、乌塌菜和落葵 5 种蔬菜含锶量较为稳定, 生长期短, 在人们日常生活中出现频率高, 可进一步研究开发。

参考文献

- [1] ORTEGA RM, JIMÉNEZ OA, MARTÍNEZ GRM, *et al.* Nutrition in the prevention and control of osteoporosis [J]. *Nutr Hosp*, 2021, 37(2): 63–66.
- [2] ANTHAMATTEN A, PARISH A. Clinical update on osteoporosis [J]. *J Midwifery Wom Heal*, 2019, 64(3): 265–275.
- [3] MIRANDA TS, NAPIMOGA MH, FRANCO DL, *et al.* Strontium ranelate improves alveolar bone healing in estrogen-deficient rats [J]. *J Periodontol*, 2020, 91(11): 1465–1474.
- [4] PRABHA RD, NAIR BP, DITZEL N, *et al.* Strontium functionalized scaffold for bone tissue engineering [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2019, 94(1): 509–515.
- [5] KOŁODZIEJSKA B, STĘPIEŃ N, KOLMAS J. The influence of strontium on bone tissue metabolism and its application in osteoporosis treatment [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(12): 6564.
- [6] WESTBERG SM, AWKER A, TORKELOSON CJ. Use of strontium chloride for the treatment of osteoporosis: A case report [J]. *Altern Ther Health Med*, 2016, 22(3): 66–70.
- [7] PAN WL, CHEN PL, LIN CY, *et al.* Strontium ranelate treatment in a postmenopausal woman with osteonecrosis of the jaw after long-term oral bisphosphonate administration: A case report [J]. *Clin Interv Aging*, 2017, 12: 1089–1093.
- [8] MARIA S, SWANSON MH, ENDERBY LT, *et al.* Melatonin-micronutrients osteopenia treatment study (MOTS): A translational study assessing melatonin, strontium (citrate), vitamin D₃ and vitamin K₂ (MK7) on bone density, bone marker turnover and health related quality of life in postmenopausal osteopenic women following a one-year double-blind RCT and on osteoblast-osteoclast co-cultures [J]. *Aging (Albany NY)*, 2017, 9(1): 256–285.
- [9] GONZÁLEZ-WELLER D, RUBIO C, GUTIÉRREZ AJ, *et al.* Dietary intake of barium, bismuth, chromium, lithium, and strontium in a Spanish population (Canary Islands, Spain) [J]. *Food Chem Toxicol*, 2013, 62(12): 856–858.
- [10] 卜怡然, 吴礼邦, 黄强, 等. 神农架富锶植物资源调查研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(3): 278–283.
- [11] BU YR, WU LB, HUANG Q, *et al.* Investigation on the resources of strontium-rich plants in Shennongjia [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(3): 278–283.
- [12] 元琳, 杨莹博, 张博, 等. 丛枝菌根真菌强化高粱幼苗修复锶污染土壤的研究[J]. *草业学报*, 2018, 27(12): 103–112.
- [13] QI L, YANG YB, ZHANG B, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhance phytoremediation of strontium-contaminated soil by *Sorghum bicolor* seedlings [J]. *Acta Pratacul Sin*, 2018, 27(12): 103–112.
- [14] NIELSEN SP. The biological role of strontium [J]. *Bone*, 2004, 35(3): 583–588.
- [15] ERMAKOV V, BECH J, GULYAEVA U, *et al.* Relationship of the mobile forms of calcium and strontium in soils with their accumulation in meadow plants in the area of Kashin-Beck endemia [J]. *Environ Geochem Health*, 2020, 42(1): 159–171.
- [16] QI L, QIN X, LI FM, *et al.* Uptake and distribution of stable strontium in 26 cultivars of three crop species: Oats, wheat, and barley for their potential use in phytoremediation [J]. *Int J Phytoremediat*, 2015, 17(3): 264–271.
- [17] PENROSE B, BERESFORD NA, BROADLEY MR, *et al.* Inter-variety variation in caesium and strontium uptake by plants: A meta-analysis [J]. *J Environ Radioactiv*, 2015, 139: 103–117.
- [18] KUKU D, SHUJUAN L, YINGXUE H, *et al.* Simulating the transfer of strontium-90 from soil to leafy vegetables by using strontium-88 [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2016, 227(11): 414.
- [19] GOUTHU S, ARIE T, AMBE S, *et al.* Screening of plant species for comparative uptake abilities of radioactive Co, Rb, Sr and Cs from soil [J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 1997, 222(1): 247–251.
- [20] NIEDERMEIER M, GIERLINGER N, LÜTZ-MEINDL U, *et al.* Biomineralization of strontium and barium contributes to detoxification in the freshwater alga *Micrasterias* [J]. *J Plant Physiol*, 2018, 230: 80–91.
- [21] HERMOSO M, LEFEUVRE B, MINOLETTI F, *et al.* Extreme strontium concentrations reveal specific biomineralization pathways in certain coccolithophores with implications for the Sr/Ca paleoproductivity proxy [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0185655
- [22] BURGER A, LICHTSCHEIDL I. Strontium in the environment: Review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes

- [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 653: 1458–1512.
- [21] GANZHA CD, GUDKOV DI, GANZHA DD, *et al.* Accumulation and distribution of radionuclides in higher aquatic plants during the vegetation period [J]. *J Environ Radioact*, 2020, 222: 106361.
- [22] AL-OU DAT M, AL ATTAR L, OTHMAN I, *et al.* Transfer factor of ^{137}Cs and ^{90}Sr to various crops in semi-arid environment [J]. *J Environ Radioact*, 2021, 228: 106525.
- [23] DRESLER S, WÓJCIAK-KOSIOR M, SOWA I, *et al.* Effect of long-term strontium exposure on the content of phytoestrogens and allantoin in soybean [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(12): 3864.
- [24] SOWA I, WÓJCIAK-KOSIOR M, STRZEMSKI M, *et al.* Biofortification of soy [*Glycine max* (L.) Merr.] with strontium ions [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(23): 5248–5252.
- [25] 王传秀. 一种用于骨质疏松症治疗的药物组合物及其制备方法: 中国, CN105412848A[P]. 2016-03-23.
WANG CX. A pharmaceutical composition and preparation method for osteoporosis: China, CN105412848A [P]. 2016-03-23.
- [26] YANG Y, YANG B. Anti-osteoporosis effect of *Ganoderma* (Lingzhi) by inhibition of osteoclastogenesis [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2019, 1182: 263–269.
- [27] 秦俊法, 荣廷文, 张厚绍, 等. 中草药中微量元素的能量色散X射线分析[J]. *中草药*, 1982, 13(9): 14–18.
QIN JF, RONG TW, ZHANG HS, *et al.* Energy dispersive X-ray analysis of trace elements in Chinese herbal medicine [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 1982, 13(9): 14–18.
- [28] TANG J, FU X, HU Y, *et al.* Monitoring and handling of ^{89}Sr injection site extravasation in a patient with breast cancer [J]. *Clin Nucl Med*, 2020, 45(7): 568–569.
- [29] BURGER A, WEIDINGER M, ADLASSNIG W, *et al.* Response of *Arabidopsis halleri* to cesium and strontium in hydroponics: Extraction potential and effects on morphology and physiology [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 184: 109625.
- [30] CHU Q, WATANABE T, SHA Z, *et al.* Interactions between Cs, Sr, and other nutrients and trace element accumulation in *Amaranthus* shoot in response to variety effect [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(8): 2355–2363.
- [31] 姜晓燕, 刘淑娟, 闫冬, 等. 镉在土培辣椒不同器官中的富集与迁移规律[J]. *癌变·畸变·突变*, 2020, 32(4): 309–316.
JIANG XY, LIU SJ, YAN D, *et al.* Enrichment and migration of strontium in different organs of soil cultured pepper [J]. *Carcinogenesis, Teratogenesis Mutagenesis*, 2020, 32(4): 309–316.
- [32] ABDI MR, REZAEE-EBRAHIM SK, FARD MR, *et al.* Potential health concerns of trace elements and mineral content in commonly consumed greenhouse vegetables in Isfahan, Iran [J]. *Adv Biomed Res*, 2015, 4: 214.
- [33] SASMAZ M, USLU SG, OBEK E. Strontium accumulation by the terrestrial and aquatic plants affected by mining and municipal wastewaters (Elazig, Turkey) [J]. *Environ Geochem Health*, 2021, 43(6): 2257–2270.
- [34] KOŁODZIEJSKA B, STĘPIEŃ N, KOLMAS J. The influence of strontium on bone tissue metabolism and its application in osteoporosis treatment [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(12): 6564.
- [35] ZHANG S, DONG Y, CHEN M, *et al.* Recent developments in strontium-based biocomposites for bone regeneration [J]. *J Artif Organs*, 2020, 23(3): 191–202.
- [36] PENG H, YAO F, XIONG S, *et al.* Strontium in public drinking water and associated public health risks in Chinese cities [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28(18): 23048–23059.
- [37] LI Z, GUO M. Healthy efficacy of *Nostoc commune* Vaucher [J]. *Oncotarget*, 2017, 9(18): 14669–14679.
- [38] YANG M, LI R, WANG X, *et al.* Preparation, characterization and wound healing effect of alginate/chitosan microcapsules loaded with polysaccharides from *Nostoc commune* Vaucher [J]. *Biomed Mater*, 2021, 16(2): 025015.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



肖潇, 博士, 讲师, 主要研究方向为微生物生态。

E-mail: 843335150@qq.com



位秀丽, 博士, 讲师, 主要研究方向为微生物资源与开发利用。

E-mail: weixiuli@hbmu.edu.cn