

肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 2009. 我国主要蔬菜和粮油作物的砷含量与砷富集能力比较 [J]. 环境科学学报, 29 (2): 291 – 296

Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, *et al* 2009. Comparison of concentrations and bioconcentration factors of arsenic in vegetables grain and oil crops in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29 (2): 291– 296

我国主要蔬菜和粮油作物的砷含量与砷富集能力比较

肖细元^{1, 2}, 陈同斌^{1*}, 廖晓勇¹, 阎秀兰¹, 谢华¹, 武斌¹, 王莉霞¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101
2 中南大学冶金科学与工程学院环境工程研究所, 长沙 410083

收稿日期: 2008-01-27 录用日期: 2008-09-23

摘要: 根据国内外文献报道, 对蔬菜和粮油作物中砷的累积特点和富集能力进行总结和分析. 结果表明, 清洁区和污染区蔬菜的砷含量变幅分别为 0.001~1.07 mg kg⁻¹ 和 0.001~8.51 mg kg⁻¹ (鲜重), 均值分别为 0.035 mg kg⁻¹ 和 0.068 mg kg⁻¹. 不同种类蔬菜的砷含量由大到小依次为: 叶菜类 > 根茎类 > 茄果类 > 鲜豆类; 清洁区和污染区粮油作物的砷含量变幅分别为 0.001~2.20 mg kg⁻¹ 和 0.007~6.83 mg kg⁻¹ (干重), 均值分别为 0.081 mg kg⁻¹ 和 0.294 mg kg⁻¹, 其中水稻的砷含量显著高于小麦和玉米. 从富集系数来看, 叶菜类蔬菜的砷富集系数最高, 芹菜、蕹菜、茼蒿、芥菜等蔬菜的抗砷污染能力较弱. 粮食作物玉米的抗砷污染能力较强. 与蔬菜砷限量标准 (GB4810-1994) 相比, 我国砷污染区的蔬菜中有 32.2% 的样本砷含量超标, 其中叶菜类和根茎类的超标率分别为 47.9% 和 12.8%. 与粮食砷限量标准 (GB4810-1994) 比较, 我国污染区粮油作物的样本砷超标率为 34.8%, 其中水稻的超标率高达 42.9%, 玉米和小麦的超标率均高于 20%.

关键词: 砷; 蔬菜; 粮食作物; 油料作物; 富集; 健康风险

文章编号: 0253-2468 (2009) 02-291-06 中图分类号: X821 文献标识码: A

Comparison of concentrations and bioconcentration factors of arsenic in vegetables grain and oil crops in China

XIAO Xiuyan^{1, 2}, CHEN Tongbin^{1*}, LIAO Xiaoyong¹, YAN Xiulan¹, XIE Hua¹, WU Bin¹, WANG Lixia¹

1 Center for Environmental Remediation Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research Chinese Academy of Sciences Beijing 100101
2 Institute of Environmental Engineering School of Metallurgical Science and Engineering Central South University Changsha 410083

Received 27 January 2008; accepted 23 September 2008

Abstract The characteristics of concentrations and bioaccumulation factors of arsenic in edible plant portions of vegetables and grain crops were summarized and analyzed based on the reported data in the literature. The results indicated that the range of As concentrations in vegetables was 0.001~1.07 mg kg⁻¹ and 0.001~8.51 mg kg⁻¹ (fresh weight) in the clean and polluted regions respectively, with geometric means of 0.035 mg kg⁻¹ and 0.068 mg kg⁻¹. Arsenic concentrations in grain crops ranged from 0.001 to 2.20 mg kg⁻¹ and from 0.007 to 6.83 mg kg⁻¹ in clean and polluted regions respectively, with geometric means of 0.081 mg kg⁻¹ and 0.294 mg kg⁻¹. Arsenic concentrations in the different varieties of vegetables followed the trend: leafy vegetables > root-stem vegetables > melon-fruit vegetables > fresh bean vegetables, and the bioconcentration factor (BCF) of As in leafy vegetables was significantly higher than for root-stem vegetables, fruity vegetables and fresh bean vegetables. Results of hierarchical cluster analysis on the As BCFs in different species of vegetables showed that the plants could be statistically separated into two groups based on BCF. Celery (*Apium graveolus*), water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.), crown daisy (*Chcoronarum* var. *spatiosum* Baily), mustard (*Brassica juncea* L.) had higher As BCFs while beetroot (*Beta vulgaris*), peas (*Pisum sativum* L.), cauliflower (*Brassica oleracea* L.), leek (*Allium tuberosum* Rottler), common beet (*Beta vulgaris* L.), squash (*Cucurbita* L.), sweet potato (*Ipomoea batatas* L.), waxgourd (*Benincasa hispida*), tomato (*Lycopersicon esculentum*), kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.), Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*), carrot (*Daucus carota* L.), spring onion (*Aubergine Broccoli*), radish (*Raphanus sativus* L.), chili (*Capsiam annuum* L.), cabbage (*Brassica oleracea* L.), taro (*Colocasia esculenta* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.), pak choi (*Brassica chinensis* L.), and rape (*Brassica napus* L.) had lower As BCFs. The BCF of maize was obviously lower

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No 40325003)

Supported by the National Science Foundation of China for distinguished Young Scholars (No 40325003)

作者简介: 肖细元 (1973—), 女, 博士, E-mail: xiaoxy@igsnrr.ac.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chenbt@igsnrr.ac.cn

Biography: XIAO Xiuyan (1973—), female, Ph.D., E-mail: xiaoxy@igsnrr.ac.cn * Corresponding author, E-mail: chenbt@igsnrr.ac.cn

than those of rice and wheat. The As concentrations in 48.2% of all the statistical vegetable samples from As polluted regions in China are higher than the food standard of 0.25 mg kg^{-1} set by WHO/FAO, and the statistical percentage of vegetable samples in which the As concentrations were higher than The Tolerance of Limit of As in foods for China (TLAC) of 0.5 mg kg^{-1} fresh weight in vegetables was 32.2%. The As concentration in 64.1% of leafy vegetable and 27.7% of root-stem vegetables were found to be higher than the TLAC. The As concentrations in 34.8% of all the grain crop samples overman the standard limit of 0.7 mg kg^{-1} dry weight set by China, with the percentage of rice grain samples which exceeded the standard limit of 0.7 mg kg^{-1} reaching 42.9%. Thus the As concentrations in leafy vegetables and rice grain may pose a health risk to humans.

Keywords arsenic bioconcentration grain crop health risk oil crop vegetable

1 引言 (Introduction)

蔬菜和粮食的砷含量是表征农产品质量的重要指标. 国内外对有关蔬菜和粮食等农作物中砷含量及其健康风险等问题开展了大量研究 (Warren *et al.*, 2003; Das *et al.*, 2004; Liao *et al.*, 2005; 谢华等, 2005; 陈同斌等, 2006). Tripathi等 (1997) 研究表明, 人体摄取的砷大部分来源于饮用水和食物, 而通过呼吸途径进入体内的砷不及 1%. 在墨西哥和印度部分地方性砷病区 (DelRazo *et al.*, 2002; Roychowdhury *et al.*, 2002, 2003), 人体从食物中摄入的砷量占总砷摄入量的 20%. 在印度饮用水受到轻度砷污染的地区, 蔬菜和谷类作物的砷输入是人群摄取砷的主要途径, 其摄入量占总砷摄入量的 73.3% 以上 (Uchino *et al.*, 2006). 美国和欧洲普通人群的食物砷摄入量调查显示, 稻米中砷摄入量的贡献率仅次于鱼类产品, 位居第 2 位 (Schoof *et al.*, 1999). 2000 年, 对中国 12 个省、市、自治区的膳食调查表明, 成年男子从蔬菜和粮食类 (包括谷类、豆类、薯类) 中摄入的砷占膳食砷摄入总量的 75.6%, 其中粮食类占 60.4% (李筱薇等, 2006). 王振刚等 (1999) 对湖南石门雄黄矿区附近人群砷暴露 (主要途径为水和食物) 的调查显示, 未受砷污染地区的人群中食物砷的贡献率占 83.6%. 由此可见, 土壤-食物-人体暴露是普通人群摄入砷的最重要途径, 蔬菜和粮食中的砷往往是非职业性暴露的主要摄入途径.

本文根据前人关于蔬菜和粮食中砷含量的研究结果, 对农作物的砷累积特点和富集特征进行系统分析, 筛选出抗砷污染能力较强的作物种类, 以便为砷污染风险控制和调整砷污染土壤的种植布局提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 数据来源

为了研究不同农作物的砷含量状况, 本文系统搜集和整理了近 30 年来国内外学术期刊中关于蔬

菜和粮油作物砷含量的数据 (共 112 篇文献、1338 条记录, 其中 1087 条来自于我国), 并建立 Arsenibase 数据库 (由于篇幅限制, 此处不加详细介绍). 文献资料主要来源于外文全文数据库 (Elsevier Science, Springerlink + Kluwer, ACS, Blackwell)、清华同方中国期刊网 (1973~2006)、重庆维普中文全文期刊网 (1989~2006). 鉴于盆栽试验结果与田间条件存在较大差异, 文中所有样本数据均为田间条件下 (野外调查、田间试验及市场抽样) 的调查结果, 不统计盆栽试验的结果.

根据文献报道的农作物来源, 将其分为清洁区和污染区. 清洁区主要为远离污染源的、没有受到明显砷污染的地区, 而污染区则包括矿业活动区周围、砷污染区、地方性砷病区及自然高砷区. 蔬菜种类主要根据食用部位的器官形态划分. 蔬菜的砷含量数据均以鲜重计, 其中文献报道的干重数据, 都按 90% 的含水率折算成鲜重 (谢华等, 2005). 粮油作物中砷含量均以干重计, 鲜重数据则按 20% 的含水率折算成干重.

2.2 统计分析

数据处理、方差分析和聚类分析使用 SPSS 13.0 软件、正态分布检验利用 Origin 7.5 (Shapiro-Wilk 法) 软件及 SPSS (非参数检验 (Sample K-S)) 完成. 经统计检验, 绝大部分样本数据服从对数或近似对数分布类型. 因此, 本文的均值及 95% 的置信区间均采用几何均值及对数转换值.

3 结果 (Results)

3.1 蔬菜砷含量及其与土壤砷含量的关系

从砷含量的统计结果来看, 清洁区蔬菜的砷含量变幅为 $0.001 \sim 1.07 \text{ mg kg}^{-1}$ (鲜重, 下同), 中值为 0.023 mg kg^{-1} , 均值为 0.035 mg kg^{-1} (数据来源: Arsenibase). 污染区蔬菜的砷含量变化幅度较大, 中值和均值分别为 0.080 mg kg^{-1} 和 0.068 mg kg^{-1} .

来自污染区和清洁区各类蔬菜的平均砷含量为: 叶菜类 > 根茎类 > 鲜豆类 > 茄果类 (表 1).

方差分析表明, 污染区叶菜类的砷含量均值显著高于茄果类及鲜豆类蔬菜, 而茄果类蔬菜的砷含量明显低于根茎类. 从表 1 可看出, 清洁区所有类别蔬菜的砷含量明显较低, 与污染区叶菜类、根茎类及茄果类的砷含量有显著差异, 而来自清洁区的茄果类蔬菜的砷含量显著低于叶菜类.

表 1 农作物中的砷含量比较
Table 1 Comparison of As concentrations in vegetables and grain crops

来源	作物	类别	n	分布类型	As含量/(mg kg ⁻¹)						
					范围	95% 置信区间	中值	算术		几何	
								平均值	标准差	平均值	标准差
污染区	蔬菜	叶菜类	149	偏态	0.001~ 8.22	0.127~ 0.235	0.277	0.586	0.971	0.172 b ¹⁾	6.67
		根茎类	76	对数	0.001~ 8.51	0.061~ 0.169	0.105	0.444	1.11	0.101 cd	7.88
		茄果类	57	对数	0.001~ 1.48	0.028~ 0.067	0.031	0.133	0.266	0.043 e	4.69
		鲜豆类	12	对数	0.001~ 0.788	0.009~ 0.362	0.165	0.218	0.215	0.056 cdef	18.8
	粮油	豆类	6	对数	0.011~ 6.82	0.200~ 3.31	0.860	1.73	2.54	0.814 a	3.81
		油料类	7	对数	0.215~ 1.63	0.205~ 1.04	0.310	0.662	0.636	0.462 ab	2.41
		禾谷类	139	对数	0.007~ 5.19	0.224~ 0.355	0.310	0.618	0.871	0.282 ac	3.95
清洁区	蔬菜	叶菜类	319	对数	0.001~ 1.02	0.021~ 0.028	0.027	0.057	0.106	0.024 f	4.21
		根茎类	137	对数	0.001~ 1.07	0.015~ 0.026	0.020	0.068	0.165	0.020 fg	4.87
		茄果类	202	偏态	0.001~ 0.527	0.012~ 0.018	0.020	0.033	0.050	0.014 g	4.60
		鲜豆类	61	对数	0.001~ 1.02	0.012~ 0.026	0.025	0.069	0.189	0.017 fg	5.15
	粮油	豆类	12	对数	0.003~ 0.320	0.029~ 0.143	0.084	0.101	0.086	0.064 cde	3.59
		禾谷类	151	对数	0.003~ 1.27	0.067~ 0.096	0.100	0.139	0.170	0.080 d	3.15
		油料类	10	对数	0.011~ 2.20	0.040~ 0.479	0.128	0.455	0.700	0.137 bcd	5.75

注: 1), 小写字母表示竖行内不同农作物的砷含量的显著性检验结果: 有相同字母表示无显著差异, 无相同字母表示存在显著差异, $p < 0.05$

无论是清洁区还是污染区, 茄果类蔬菜的砷含量普遍较低, 表明茄果类蔬菜对砷的积累相对较低(表 1). 普通植物吸收砷后, 主要累积在根部, 以避免其向地上部转运 (Berry, 1986; Meharg *et al.*, 1991). 因此, 在通常情况下, 植物体内砷的分布规律为: 根 > 叶茎 > (果实) 籽粒 (Carbonell-barrachina *et al.*, 1995).

蔬菜中的砷含量, 不仅与蔬菜作物本身对砷的吸收特性有关, 同时还受土壤砷含量的影响. 经检验, 蔬菜的砷含量与土壤砷含量呈极显著正相关(表 2).

表 2 土壤和农作物砷含量与农作物的砷富集系数的相关关系
Table 2 Correlation between BCF and As concentration in vegetables and grain crops and soils

	蔬菜 (n= 365)		粮食 (n= 158)	
	砷富集系数	砷含量	砷富集系数	砷含量
土壤砷含量	- 0.094	0.203**	- 0.189	0.275**
砷富集系数		0.557**		0.222**

注: *, $p < 0.05$ **, $p < 0.01$

3.2 粮油作物砷含量及其与土壤砷含量的关系

来自清洁区的粮油作物的砷含量变幅为 0.001~ 2.20 mg·kg⁻¹ (干重, 下同), 均值较低 (0.081 mg·kg⁻¹). 清洁区水稻的砷含量为 0.003~ 1.27 mg·kg⁻¹, 均值为 0.140 mg·kg⁻¹, 小麦和玉米的砷含量相对较低, 分别为 0.046和 0.055 mg·kg⁻¹. 污染区粮油作物的砷含量变幅较大 (0.007~ 6.83 mg·kg⁻¹), 均值为 0.294 mg·kg⁻¹.

方差分析表明, 污染区的粮油作物的砷含量为: 豆类 > 油料类 > 禾谷类, 而来自清洁区的粮油作物的砷含量为: 禾谷类 > 油料类 > 豆类(表 1). 水稻的砷含量显著高于小麦和玉米(表 3), 其砷超标的风险高于旱地作物. 一种可能的原因是: 在淹水条件下, 土壤中的砷主要以 As(III)形式存在 (Abedin *et al.*, 2002), 而 As(III)的可溶性强, 易被作物吸收 (Marin *et al.*, 1992).

土壤砷浓度直接影响粮油作物的砷含量. 经检验, 土壤中砷含量与粮油作物的砷含量呈极显著的正相关(表 2).

表 3 不同污染程度下主要粮食作物中砷含量的差异分析

Table 3 ANOVA statistical results of As concentrations in grain crops from different regions						
样品来源	作物	lg C _{As} 平均数之差				
		污染区		清洁区		
		小麦 (25)	玉米 (35)	水稻 (62)	小麦 (40)	玉米 (39)
污染区	水稻 (65)	0.259 ^a	0.349 ^b	0.412 ^c	0.860 ^d	0.939 ^e
	小麦		0.090	0.153	0.601 ^c	0.680 ^d
	玉米			0.064	0.511 ^b	0.591 ^b
清洁区	水稻				0.448 ^c	0.528 ^c
	小麦					0.080

注: * 显著性差异水平 $p < 0.05$ 括号内为样本数.

3.3 蔬菜和粮油作物的砷富集系数

砷富集系数是植物砷含量与土壤中砷含量的比值,它可大致反映植物对土壤砷的吸收能力和富集情况.砷富集系数越小,则表明植物吸收砷的能力越弱,抗土壤砷污染的能力较强.总的来看,蔬菜的砷富集系数变幅为 0~14.0(干重计,下同),粮油作物的砷富集系数较低,其变幅为 0~0.419

(表 4).从不同类别蔬菜的砷富集系数来看,叶菜类蔬菜的砷富集系数均值明显高于根茎类、瓜果类和鲜豆类,而根茎类、瓜果类和鲜豆类蔬菜之间的砷富集系数差异不显著.粮油作物中玉米、豆类和油料类的砷富集系数显著低于各类别蔬菜的砷富集系数.

表 4 我国主要农作物中的砷富集系数¹⁾

Table 4 As bioconcentration factor (BCF) of vegetables and grain crops										
作物	种类	n	分布类型	As富集系数						
				范围	95%置信区间	中值	算术		几何	
							平均值	标准差	平均值	标准差
蔬菜	叶菜类	192	对数	0~2.080	0.019~0.034	0.027	0.119	0.238	0.025 a ²⁾	7.62
	根茎类	84	对数	0~14.00	0.009~0.021	0.012	0.214	1.525	0.013b	7.89
	茄果类	71	对数	0~0.381	0.010~0.021	0.018	0.036	0.061	0.014b	4.80
	鲜豆类	22	对数	0~0.307	0.007~0.039	0.021	0.048	0.070	0.016 ab	6.97
粮油	水稻	73	对数	0~0.419	0.008~0.018	0.012	0.035	0.063	0.012 bc	5.11
	小麦	27	对数	0~0.364	0.007~0.018	0.001	0.035	0.088	0.011 bc	3.50
	玉米	38	对数	0~0.056	0.001~0.005	0.003	0.009	0.014	0.002d	6.94
	豆类	13	对数	0~0.081	0.001~0.006	0.001	0.012	0.024	0.001d	10.80
	油料类	10	对数	0.001~0.059	0.002~0.009	0.002	0.009	0.018	0.003 cd	3.56

注: 1) 作物中的砷富集系数均以干重计, 2) 小写字母表示竖行内作物的砷富集系数的显著性检验结果: 有相同字母表示无显著差异, 无相同字母表示存在显著差异, $p < 0.05$.

由于植物遗传的特异性,不同种类作物对砷的吸收和积累存在较大差异.从不同蔬菜种类来看,青菜、菠菜、菜苔、芹菜、芥菜、蕹菜、生菜、蒜、苋菜、胡萝卜等蔬菜的砷富集系数变幅较大(图 1).根据蔬菜的砷富集系数高低,采用层级聚类法可将蔬菜分为 4 类(图 2): 芹菜的砷富集系数归于第一类,其对砷的富集砷能力最高; 蕹菜、茼蒿、芥菜等蔬菜的砷富集系数次之,划为第二类; 菜苔、生菜、菠菜、蒜、葱、黄秋葵、豇豆、苋菜、茄子的砷富集系数属于第三类.富集系数最低的为甜菜根、豌豆、花椰菜、韭菜、甜菜、南瓜、红薯、冬瓜、番茄、四季豆、大白菜、胡萝卜、洋葱、萝卜、辣椒、甘蓝、芋头、土豆、青菜、油菜等,划为第四类.第四类蔬菜的砷富集系数较低,其可食部位对砷的吸收能力较弱.在相同土

壤砷含量下,砷在第四类蔬菜的可食部位中积累较少,即使是种植在砷含量相对较高的土壤上,其可食部位吸收的砷也不容易超标.在种植蔬菜时,应根据土壤砷含量状况选择砷吸收能力较弱的蔬菜品种.我国砷矿资源分布相对集中、矿冶活动比较密集的西南地区土壤砷污染问题非常突出(肖细元等, 2008).所以,在高砷土壤中,不要种植芹菜、茼蒿、蕹菜等易富集砷的叶菜类蔬菜,宜选种砷富集系数较低的蔬菜,合理安排蔬菜种植布局,以尽量避免砷进入食物链.粮食作物中玉米的砷富集系数均值为 0.002,显著低于水稻和小麦的砷富集系数(表 4),表明玉米对土壤砷的吸收能力较弱.因此,在砷污染区可以优先考虑选种植玉米,以规避砷污染的风险.

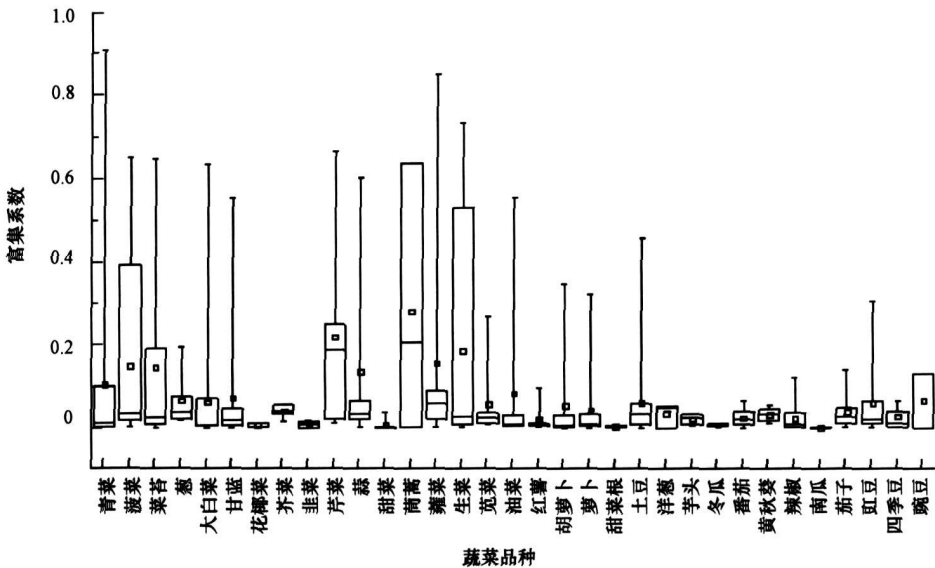


图 1 主要蔬菜品种的砷富集系数箱式图

Fig 1 Box and Whisker plots showing median, mean, upper and lower 25% percentiles of As BCFs in vegetables

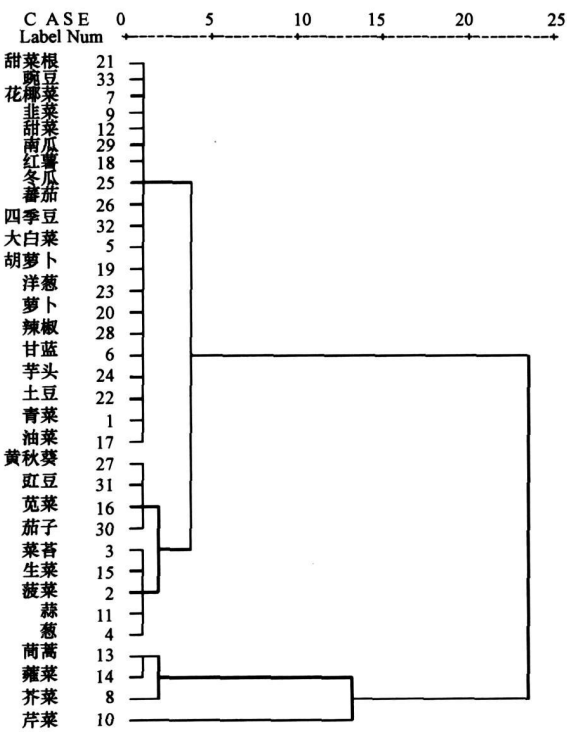


图 2 基于蔬菜砷富集系数几何均值的层级聚类分析结果
Fig 2 Hierarchical cluster analysis based on geometric means of As BCF of vegetables

经检验, 蔬菜的砷富集系数与土壤砷含量的相关性不显著, 但粮油作物的砷富集系数与土壤砷含量呈显著负相关(表 2).

3.4 我国蔬菜和粮油作物的砷超标情况

为了控制砷对人体健康的潜在威胁, 有关国家

和国际组织限定了食物砷含量的最大允许值. 世界卫生组织 (WHO) 和联合国粮农组织 (FAO) 联合制定的食品卫生标准的限量值为 $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜重), 我国规定的蔬菜砷含量限量标准为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜重) (GB4810-1994). 根据蔬菜砷含量的频数分布统计结果 (表 5), 来自我国污染区的蔬菜样本中有 48.2% 的样本砷含量超过 WHO/FAO 的推荐标准; 32.2% 的蔬菜样本的砷含量超过 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB4810-1994), 其中叶菜类和根茎类的污染程度较大, 超标率分别为 47.9% 和 12.8%. 与我国的蔬菜砷含量限量标准比较, 清洁区的蔬菜样本的砷含量超标率均小于 5%.

表 5 我国蔬菜的砷含量超标情况

Table Percentages of vegetable samples exceeding the As concentration standard in China

种类	统计样本的砷含量超标率			
	> $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ *		> $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ **	
	污染区	清洁区	污染区	清洁区
叶菜类	64.1%	3.1%	47.9%	1.0%
根茎类	27.7%	2.8%	12.8%	1.9%
茄果类	18.5%	2.5%	3.7%	1.5%
鲜豆类	37.5%	5.1%	12.5%	1.7%
全部	48.2%	3.0%	32.2%	1.4%

注: * WHO/FAO 标准; ** GB4810-1994

对我国粮油作物样本的统计发现, 与我国食品砷含量限量标准 ($\leq 0.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比, 来自污染区的全部粮油作物样本的砷超标率为 34.8%, 其中水稻、玉米、小麦的超标率都高于 20% (表 6).

表 6 我国主要粮食作物的砷含量超标情况

Table 6 Percentages of staple grain samples from China exceeding the As concentration standard

种类	砷含量超标率 ($> 0.7\text{ mg kg}^{-1}$) ¹⁾ 的样本比例	
	污染区	清洁区
水稻	42.9%	5.0%
小麦	21.7%	0
玉米	30.4%	0
全部	34.8%	2.9%

注: 1) GB4810-1994

4 结论 (Conclusion)

1)大量样本的统计表明,农作物的砷含量呈现:豆类 > 油料类 > 禾谷类 > 叶菜类 > 根茎类 > 鲜豆类 > 茄果类的趋势; 丰富集系数为: 叶菜类 > 鲜豆类 > 根茎类 ≈ 茄果类 > 油料类 > 豆类, 其中玉米的抗砷污染能力较强.

2)无论是蔬菜还是粮油作物,其砷含量都与土壤砷含量呈显著正相关,土壤污染是导致农产品砷超标的主要原因.

3)我国污染区有 32.2% 蔬菜和 34.8% 主要粮油作物的样本砷含量高于我国食品砷限量标准 (GB4810-1994).

参考文献 (References):

Abedin J M, Cresser M S, Meharg A A, *et al*. 2002 Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environment Science and Technology*, 36: 962-968

Berry W L. 1986. Plant and factors influencing the use of plant analysis as a tool for biogeochemical prospecting [A]. In: Carlise D, Berry W L, Kaplan I R and Watterson J R (ed.). *Mineral Exploration: Biogeochemical Systems and Organic Matter* [C]. Prentice-Hall Englewood Cliffs, N J: 5-13

Carbonell-Barnachina A A, Burlo F, Matix J. 1995 Arsenic uptake, distribution and accumulation in tomato plants: effect of arsenite on plant growth and yield [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 18(6): 1237-1250

陈同斌, 宋波, 郑表明, 等. 2006 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析 [J]. *地理学报*, 61(3): 297-310

Chen T B, Song B, Zheng Y M, *et al*. 2006 A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health [J]. *Acta Geographica Sinica*, 61(3): 297-310 (in Chinese)

Das H K, Mitra A K, Sengupta P K, *et al*. 2004. Arsenic concentrations in rice, vegetables and fish in Bangladesh: a preliminary study [J]. *Environment International*, 30: 383-387

Del Razo L M, Garcia-Vargas G G, Garcia-Salcedo J, *et al*. 2002. Arsenic levels in cooked food and assessment of adult dietary intake of arsenic in the region Lagunera, Mexico [J]. *Food Chemistry and Toxicology*, 40(26): 1423-1431

李筱薇, 高俊全, 王永芳, 等. 2006. 2000年中国总膳食研究——膳食砷摄入量 [J]. *卫生研究*, 35(1): 63-66

Li X W, Gao J Q, Wang Y F, *et al*. 2006. 2000 Chinese total dietary study—the dietary arsenic intakes [J]. *Journal of Hygiene Research*, 35(1): 63-66 (in Chinese)

Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al*. 2005. Soil As contamination and its risk assessment in areas near the industrial districts of Chenzhou City, southern China [J]. *Environment International*, 31: 791-798

Marin A R, Pezeshki S R, Massadelen P H, *et al*. 1992. The influence of chemical form and concentration of arsenic in rice growth and tissue concentration [J]. *Plant and Soil*, 139: 175-183

Meharg A A, Macnair M R. 1991. Uptake, accumulation and translocation of arsenate in arsenate tolerant and non-tolerant *Thalictrum flavum* L. [J]. *New Phytologist*, 117: 225-231

Roychowdhury T, Uchino T, Ando M. 2002. Survey of arsenic in food composites from an arsenic-affected area of West Bengal [J]. *Indian Food and Chemical Toxicology*, 40: 1611-1621

Roychowdhury T, Tokunaga H, Ando M. 2003. Survey of arsenic and other heavy metals in food composites and drinking water and estimation of dietary intake by the villagers from an arsenic-affected area of West Bengal, India [J]. *The Science of the Total Environment*, 308: 15-35

Schoof R A, Yost L J, Eickhoff J, *et al*. 1999. A market basket survey of inorganic arsenic in food [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 37: 839-845

Tripathi R M, Raghunath R, Krishnamoorthy T M. 1997. Arsenic intake by the adult population in Bombay City [J]. *The Science of the Total Environment*, 208: 89-95

Uchino T, Roychowdhury T, Ando M, *et al*. 2006. Intake of arsenic from water, food composites and excretion through urine, hair from a studied population in West Bengal, India [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 44: 455-461

王振刚, 何海燕, 严于伦, 等. 1999. 石门雄黄矿附近地区慢性砷中毒流行病学特征 [J]. *环境与健康杂志*, 16(1): 4-6

Wang Z G, He H Y, Yan Y L, *et al*. 1999. Epidemiological characters of chronic arsenic poisoning among areas near realgmine in Shimen County [J]. *Journal of Environment and Health*, 16(1): 4-6 (in Chinese)

Warren G P, Alkway B J, Lepp N W, *et al*. 2003. Field trials to assess the uptake of arsenic by vegetables from contaminated soils and soil remediation with iron oxides [J]. *The Science of the Total Environment*, 131: 19-33

肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 2008. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题 [J]. *地理研究*, 27(1): 201-212

Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, *et al*. 2008. The area distribution of major mineral resources containing arsenic and arsenic pollution in China [J]. *Geographical Research*, 27(1): 201-212 (in Chinese)

谢华, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 2005. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估——以湖南郴州邓家塘为例 [J]. *地理研究*, 24(1): 151-159

Xie H, Liao X Y, Chen T B, *et al*. 2005. Arsenic in plants of farmland and its healthy risk: a case study in an As-contaminated site in Dengjiatang, Chenzhou City, Hunan Province [J]. *Geographical Research*, 24(1): 151-159 (in Chinese)