

土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响

蔡保松^{1,2}, 陈同斌^{2*}, 廖晓勇², 谢 华², 肖细元², 雷 梅², 张国平¹

(1. 浙江大学农业与生物技术学院, 杭州 310029; 2 中国科学院地理与资源研究所环境修复室, 北京 100101)

摘要: 对湖南郴州砷污染区的土壤和蔬菜砷含量进行了研究, 结果表明该地区土壤含砷量为 19.5~237.2 mg/kg, 平均为 63.9 mg/kg, 中值为 47.8 mg/kg, 比全国平均土壤含砷量(9.2 mg/kg)高 2~25 倍; 蔬菜可食部分砷含量范围为 0.04~2.64 mg/kg, 平均为 0.74 mg/kg, 中值为 0.54 mg/kg, 54% 的蔬菜可食部分含砷量超过了《蔬菜卫生标准》规定的最大允许量(MPC ≥ 0.5 mg/kg); 菠菜、茼蒿和生菜可食部分超标比较严重, 最大砷含量超出 MPC 5 倍左右。

关键词: 砷; 蔬菜; 污染; 安全; 土壤

Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hu'nan Province

CAI Bao-Song^{1,2}, CHEN Tong-Bin², LIAO Xiao-Yong², XIE Hua², XIAO Xi-Yuan², LEI Mei², ZHANG Guo-Ping¹ (1 College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou, 310029; 2 Laboratory of Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 711~717.

Abstract: Contamination of soils by arsenic (As) results from mining, smelting of sulfide ores, pesticides, timber preservation and As-rich groundwaters. Arsenic contaminated soils, sediments and sludges are major sources of contamination in the food chains and water supplies. The uptake of arsenic (As) by vegetables from contaminated soils presents a health hazard that may affect the use of agricultural land. Contamination of foods by As remains a possible danger under long time consumer.

Within the Hunan Province, Guiyang and Shimen county contain the largest numbers of people living in proximity to sulfide ores, containing As. Because of these ore bodies and mining activity for over 1500 years, high As concentrations in soil are not exceptional. Soil As concentrations > 200 mg/kg occur on 54 km of the region. The effects on As bioavailability were assessed using a range of vegetables grown in the field. Four locations were used, where soil was contaminated by As from different sources. Sweet potato, lettuce, potato, radish and spinach *et al.* were grown at the most contaminated site with a mean of 64 mg/kg in the clay loam. Arsenic concentrations in soils and vegetables collected from Chen Zhou City, Hunan Province, were investigated in this paper. The results showed that As concentrations in the soils were 19.5~327.2 mg/kg, average as 63.9 mg/kg, median as 47.8 mg/kg, respectively, 2~25 times higher than that of average As level in China. While, there were obviously As concentrations existed in edible parts when they grew in As contaminated area, ranging from 0.04 to 2.64 mg/kg, average as 0.74 mg/kg, median as 0.54 mg/kg, respectively; As concentrations of more than 54% of edible parts were far beyond 0.5 mg/kg, the As Maximum Permitted Concentration (MPC) of National Standard of Vegetable Sanitation (GB4810-84); There were serious overstandard of As concentrations in edible parts of spinach, crown daisy and

基金项目: 北京市自然科学基金重大资助项目(6990002); 国家自然科学基金重点资助项目(40232022); 中国科学院知识创新工程重点方向资助项目(KZCX2-401)

收稿日期: 2003-07-30; **修订日期:** 2003-12-16

作者简介: 蔡保松(1971~), 男, 上海人, 讲师, 博士生, 主要从事污染环境修复研究。

通讯作者: Author for correspondence E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

Foundation item: Natural Science Foundation of Beijing (No. 6990002), National Natural Science Foundation of China (No. 40232022) and Chinese Academy of Sciences Innovation Program (No. KZCX-401-01)

Received date: 2003-07-30; **Accepted date:** 2003-12-16

Biography: CAI Bao-Song, Lecturer, mainly engaged in phytoremediation. E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

lettuce, the most As concentrations reached as much as 5 times of MPC.

Key words: arsenic; vegetable; pollution; safety; soil

文章编号: 1000-0933(2004)04-0711-07 中图分类号: Q 143 文献标识码: A

砷污染和砷毒害是一个世界性的污染问题。在孟加拉国、印度的西孟加拉邦、阿根廷和越南, 由于地下水污染导致 3900 万以上的人受到不同程度的砷毒害, 700 万人受到严重伤害^[1~5]; 在智利, 砷污染地区的人群膀胱癌和肺癌的发病率是其它地区的 2 倍^[6]。据统计, 目前世界上有 19 个国家发生较大区域的砷污染。砷除了污染地下水, 也污染粮食和蔬菜。在孟加拉国、越南用污水灌溉的水稻籽粒中砷含量高达 1.7 mg/kg ^[7,8]。砷污染的实际危害程度比预想的大^[4,5,8,9]。我国也存在砷的工业型污染、燃煤型污染和饮水型污染^[10]; 内蒙古、新疆、台湾、陕西等都有相当面积的砷污染区^[11]。

土壤砷的污染主要来自矿山开采、矿石冶炼和工农业中应用的含砷化合物。受污染土壤通过食物链最终危害人类健康。有关砷在土壤-植物系统中的迁移和累积的研究已有很多报道^[12~16]。Klocke^[17]研究土壤砷对植物和植物可食部分积累砷的关系认为, 当土壤砷浓度小于 20 mg/kg 时才能保证植物和植物可食部分砷含量不超过人体最大允许日摄入量(AD I)。我国谷类作物的含砷为 $0.07 \sim 0.83 \text{ mg/kg}$, 豆类为 $0.02 \sim 0.56 \text{ mg/kg}$, 蔬菜类为 $0.001 \sim 0.039 \text{ mg/kg}$, 木本植物 $< 0.78 \text{ mg/kg}$ ^[18]。

湖南省郴州市蕴藏着丰富的毒砂、辰砂等砷矿产^[19,20], 已经有 1500a 的开采历史。该地区自 20 世纪 80 年代初期, 开始出现土法炼砷小工厂, 到 1995 年后土法炼砷逐步被取缔, 但是, 土法炼砷已经给当地土壤和水源造成了严重的污染^[21]。本研究通过对该地区砷污染土壤和蔬菜的调查, 明确砷污染土壤和蔬菜的污染情况并探讨治理对策。

1 材料与方法

1.1 污染区概况

调查点选在湖南郴州的一处废弃的砷冶炼厂附近, 有多年土法炼砷的记录。调查区的污染原因可能有以下几个方面: 炼砷废液、废渣直接进入土壤污染农田; 炼砷废液、废渣通过溪流、地表径流和雨水冲刷进入土壤和农田; 空气中的砷及砷化合物微粒通过降雨进入农田。因此, 采样点的布置以砷冶炼厂为中心, 以砷冶炼厂附近排污溪流为中心线设计样点分布。

1.2 样品的采集

土壤取样深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$, 每个采样点按 S 形收集 5 个点, 并将 5 个样品混合均匀合为 1 个样品。采回的土壤样品在室内风干, 挑出石块和植物残枝, 用玛瑙研钵研细过 100 目筛备用。

植物样品按食用习惯分为可食部分和可饲部分(饲料), 各取样 $1 \sim 2 \text{ kg}$, 装入洁净的聚乙烯塑料袋。在实验室, 先将样品用自来水冲洗干净, 再用去离子水冲洗 3 遍, 晾干后称鲜重, 然后在 80°C 下杀青 15 min , 在 60°C 下烘 24 h , 计干重。烘干后用不锈钢研磨机研磨, 样品保存待测。

1.3 样品分析与测定

土壤砷的测定根据 EPA 3050B 方法^[22]稍加修改。土壤先用 $1:1$ 的 $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2(\text{V/V})$ 进行预消化, 然后用 H_2O_2 进行进一步消化, 消煮液定容后用氢化物发生-原子荧光吸收光谱仪(AFS-2202, 北京海光公司)测定砷浓度。为了保证分析质量, 测定过程中用土壤参比物质(GBW 07401)进行质量控制。

植物样品中砷的测定采用 EPA 3010A^[23]方法稍加修改, 用 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1(\text{V/V})$ 对样品进行消煮, 消煮液定容后用氢化物发生-原子荧光吸收光谱仪(AFS-2202)测定。测定过程中采用植物参比物质(GBW 07604)进行分析质量控制。

1.4 数据的分析与统计

采用 SPSS 统计软件对数据进行方差分析、回归分析和聚类分析, 均值的比较采用 LSD (Least-Significant Difference) 多重比较方法。

2 结果与分析

2.1 采样点分布及基本情况

表 1 列出了采样区的基本情况。采样区涉及 54 hm^2 农田和 8 hm^2 林地, 总污染面积 62 hm^2 。样区的分布以调查中心点和中心线为主线, 按污染程度分类列于表 1。

2.2 砷污染区土壤和蔬菜的污染状况

表 2 是 3 类污染区土壤和蔬菜的含砷量分析结果。由表 2 可以看出, 污染区土壤砷浓度为 $19.5 \sim 237.2 \text{ mg/kg}$, 平均为 63.9 mg/kg , 中值为 47.8 mg/kg 。全国土壤砷背景值(几何平均值)为 9.2 mg/kg ^[24], 污染区土壤砷浓度是全国平均水平的 2~25 倍, 说明该地区土壤已经被严重污染。表 2 结果还显示, 严重砷污染区的蔬菜食用部分的砷浓度为 $0.04 \sim 2.64 \text{ mg/kg}$, 平均砷浓度为 0.74 mg/kg , 中值为 0.54 mg/kg 。可食部分砷浓度超过我国《蔬菜卫生标准》(GB 4810-84)所规定的临界值($\leq 0.5 \text{ mg/kg}$)的 5 倍左右, 说明砷污染土壤生产的蔬菜已经大大超过安全标准, 根本不能食用。

表 1 采样点的基本情况

Table 1 Brief description of the sampling areas		
采样区 A rea	污染程度 Polluted level	污染区基本概况 Description of contam inated sites
I	轻污染(N = 15)	炼砷厂周围山地, 污染物来源主要通过大气沉降带入。主要种植蔬菜和粮食作物。
	Low contam inated	
II	中污染(N = 17)	炼砷厂周围 100~ 500m 及污染溪流周围 0~ 100m, 砷污染主要通过污水灌溉。蔬菜、粮食作物种植面积较大。
	M id contam inated	
III	重污染(N = 16)	炼砷场周围 0~ 100m 范围, 污染物直接进入农田或通过溪流、地表径流和雨水间接带入。本区部分土地已撂荒, 部分地方种植经济树木, 少数地方种植蔬菜和粮食作物。
	High contam inted	

表 2 砷污染区土壤和蔬菜砷污染状况

Table 2 Arsenic concentration in soils and vegetables						
采样区 A rea	样点 Site	蔬菜名称 V egetable	食用部位 Edible part	土壤 Soil part (mg/kg)	蔬菜 Edible parts (mg/kg FW *)	生物富集系数 B F *
I	1	大蒜 Garlic	茎 Stem	24.3	0.066	0.003
	2	菠菜 Spinach	茎 Stem	23.1	1.095	0.047
	3	芹菜 Celery	茎 Stem	23.9	0.591	0.025
	4	红菜苔 Beet	茎 Stem	19.5	0.365	0.019
	5	葱 Welsh Onion	地上部 Shoot	24.5	0.423	0.017
	6	雪里蕻 Mustard	地上部 Shoot	25.5	0.591	0.023
	7	萝卜 Radish	地下部 Shoot	33.9	0.175	0.005
	8	小白菜 Pak-choi	叶 Leaf	33.1	1.007	0.031
	9	胡萝卜 Carrot	地下部 Root	33.3	0.102	0.003
	10	莴笋 Celtuce	茎 Stem	31.1	0.080	0.002
	11	生菜 Lettuce	叶 Leaf	31.0	1.664	0.053
	12	白菜 Chinese Cabbage	叶 Leaf	41.3	0.394	0.009
	13	芫荽 Coriander	叶 Leaf	40.3	0.343	0.009
	14	甘蓝 Cabbage	叶 Leaf	62.8	0.204	0.004
	15	辣椒 Pepper	角果 Fruit	68.4	0.102	0.001
II	16	小白菜 Pak-choi	叶 Leaf	39.3	1.029	0.026
	17	红菜苔 Beet	茎 Stem	38.7	0.606	0.016
	18	茼蒿 Crown Daisy	茎 Stem	37.4	2.387	0.064
	19	菠菜 Spinach	叶 Leaf	49.6	2.124	0.043
	20	芹菜 Celery	茎 Stem	42.3	0.788	0.019
	21	萝卜 Radish	地下部 Shoot	51.2	0.146	0.003
	22	白菜 Chinese Cabbage	叶 Leaf	57.8	0.183	0.003
	23	甘蓝 Cabbage	叶 Leaf	47.1	1.854	0.039
	24	胡萝卜 Carrot	地下部 Shoot	47.8	1.664	0.035
	25	雪里蕻 Mustard	茎 Stem	47.5	1.453	0.031
	26	甘蓝头 Rutabaga	块茎 Stem	56.9	0.080	0.001
	27	甘薯 Sweet Potato	块根 Root	52.8	0.037	0.001
	28	辣椒 pepper	角果 Fruit	85.8	0.307	0.004
	29	葱 Welsh onion	茎 Stem	71.3	0.526	0.007
	30	芫荽 Coriander	叶 Leaf	64.9	0.562	0.009
III	31	姜 Ginger	块根 Root	70.5	0.037	0.001
	32	大蒜 Garlic	地下部 Root	42.6	1.175	0.028
	33	芹菜 Celery	茎 Stem	47.8	1.007	0.021
	34	白菜 Chinese Cabbage	叶 Leaf	47.7	0.489	0.010
	35	红菜苔 Beet	茎 Stem	59.9	0.891	0.015
	36	生菜 Lettuce	叶 Leaf	43.0	2.606	0.061
	37	茼蒿 Crown Daisy	茎 Stem	55.4	1.139	0.020
	38	菠菜 Spinach	叶 Leaf	67.0	2.635	0.039
	39	甘蓝 Cabbage	叶 Leaf	61.7	0.577	0.009
	40	小白菜 Pak-choi	叶 Leaf	95.1	1.241	0.013
	41	胡萝卜 Carrot	地下部 Root	91.2	0.051	0.001
	42	葱 Welsh Onion	茎 Stem	60.6	0.518	0.009
	43	大蒜 Garlic	地下部 Root	168.5	0.569	0.004
	44	甘薯 Sweet Potato	地下部 Root	236.6	0.088	0.001
	45	甘薯 Sweet Potato	地下部 Root	237.2	0.095	0.001
	46	萝卜 Radish	地下部 Root	200.2	0.124	0.001
平均 Mean				63.9	0.745	0.012

* B F Bioaccumulation Factor; FW Fresh Weight

表 3 是对砷污染区土壤和蔬菜中砷浓度之间数据关系的统计分析。表 3 的结果显示, 3 个采样区的土壤砷浓度差异达到了显著水平 ($p < 0.05$), 说明采样点的布局比较合理; 对蔬菜中砷浓度的分析显示, 不同采样区蔬菜可食用部分的砷浓度有显著的差异 ($p < 0.05$), 同时, 随土壤砷浓度的增加, 各样区蔬菜中砷平均浓度也增加。为了进一步分析各采样区之间土壤和蔬菜的污染情况, 对各样点进行了多重比较 (LSD), 结果显示样区 I 和样区 II 蔬菜中砷浓度处于同一显著水平, 但与样区 III 蔬菜中砷浓度差异显著 ($p < 0.05$)。

2.3 污染区土壤和蔬菜砷含量的相关关系

表 4 分析了污染区土壤与蔬菜砷浓度之间的相关关系。结果显示, 土壤砷浓度与蔬菜砷浓度之间的相关关系不显著, 但蔬菜砷浓度均与植物的生物富集系数 (BF) 呈极显著相关关系 ($p < 0.01$); 说明生物富集系数的变化可以很好的反映蔬菜砷浓度的变化。

图 1 是依据土壤砷浓度和蔬菜的富集系数对污染区蔬菜进行系统聚类的结果。聚类结果被分成 3 类, 第 1 类有 26 个采样点, 土壤浓度范围为 24.3~237.2 mg/kg, 平均浓度为 80.0 mg/kg, 蔬菜可食部分砷浓度范围为 0.037~1.24 mg/kg, 平均砷浓度为 0.31 mg/kg, 主要蔬菜有萝卜、辣椒、大蒜、胡萝卜、姜、甘蓝头、葱、白菜、莴笋、甘蓝、红菜苔、茼蒿、小白菜和甘薯等; 第 2 类有 16 个采样点, 土壤浓度范围为 19.5~67.0 mg/kg, 平均浓度为 40.7 mg/kg, 蔬菜可食部分砷浓度范围为 0.4~2.6 mg/kg, 平均砷浓度为 1.2 mg/kg, 主要蔬菜有菠菜、甘蓝、雪里蕻、小白菜、红菜苔、芹菜、茼蒿、大蒜、葱、胡萝卜。第 3 类有 4 个采样点, 土壤浓度范围为 23.1~43.0 mg/kg, 平均浓度为 33.6 mg/kg, 蔬菜可食部分砷浓度范围为 1.1~2.6 mg/kg, 平均砷浓度为 1.94 mg/kg, 主要蔬菜有生菜、茼蒿、菠菜。由聚类结果可以看出, 第 1 类蔬菜萝卜、辣椒、大蒜、胡萝卜、姜、甘蓝头、葱、白菜、莴笋、甘蓝、红菜苔、茼蒿、小白菜和甘薯等可食部的砷浓度相对较低, 说明这些蔬菜砷在可食部分的积累较少。可以作为污染区优先考虑种植的品种。第 3 类蔬菜有生菜、茼蒿、菠菜, 这几种蔬菜比较容易积累砷, 而且可食部分积累砷特别高, 这类蔬菜不宜在污染区种植。

2.4 蔬菜中砷的富集及其食用安全性

富集系数是植物中砷浓度与土壤中砷浓度的比值, 富集系数可以反映植物在同样砷浓度情况下对砷吸收的能力。砷污染区蔬菜中富集系数较低的植物主要有白菜 (0.003)、大蒜 (0.003)、甘蓝 (0.004)、甘蓝头 (0.001)、胡萝卜 (0.001~0.003)、姜 (0.001)、辣椒 (0.001~0.004)、萝卜 (0.001~0.003)、莴笋 (0.002) 和甘薯 (0.001) 等 (表 2)。根据系统聚类分析结果和富集系数结果, 在砷污染区种植萝卜、白菜、莴笋、小白菜、辣椒、大蒜、胡萝卜、姜、甘蓝头、葱、甘蓝、甘蓝头等蔬菜对人体危害比其它蔬菜轻。因为这些蔬菜富集系数比较小, 可食部分对砷的积累能力较弱; 在同样的砷污染条件下, 砷在植物可食部分积累少。当地居民喜食的传统蔬菜是萝卜、白菜、莴笋、大蒜、胡萝卜、甘蓝头等, 其可食部分积累砷较少, 危害相对较小。但是, 生菜、菠菜、茼蒿也是当地农民喜欢的蔬菜, 他们食用部分砷的含量非常高, 长期食用这些蔬菜会对健康造成危害。因此治理土壤砷污染是提高当地民众健康水平的一个重要环节。

3 讨论

3.1 砷污染区蔬菜的安全问题

蔬菜是人民日常生活中必不可少的食物之一, 食用量大, 因此较低水平的污染就可以造成极大的危害, 所以蔬菜的安全问题对污染区人民的健康就非常重要。由表 3 的结果可以看出, 随土壤中砷含量的增加, 蔬菜可食部分砷含量也增加。世界卫生组织 (WHO) 暂时建议砷摄入量为 1 mg/(人·周) (成年人), 它相当于 0.143 mg 人/d^[25]。砷污染地区蔬菜中含砷量最高为 5.3 mg/kg, 如果日摄取蔬菜量按 0.5 kg 计算, 则日摄取 As 为 2.6 mg, 是 WHO 允许摄入量的 6 倍左右。因此, 长期食用这些蔬菜对居民的健康极为不利。应该采取措施控制其土壤和蔬菜的砷污染物。

3.2 污染蔬菜饲用的安全性

砷污染区肉类食品来源主要来自本地区饲养的畜禽, 而这些动物主要以本地区生产的粮食和蔬菜为饲料, 这些饲料中砷的含量也很高。饲料中砷的临界水平究竟应该定为多少, 目前还未取得一致意见。郭笃发^[26]研究牛羊身体中重金属的吸收和排泄, 结果认为, 为了保持牛羊身体中重金属的吸收和排泄平衡, 组织中不发生明显残留, 必须使饲料中重金属含量限制在 3

表 3 砷污染区土壤和蔬菜砷浓度统计分析

Table 3 Statistic of As concentration in soils and vegetables		
采样区 Area	土壤砷浓度 (mg/kg) Soil As	蔬菜砷浓度 (mg/kg) Vegetable As
I	34.4 [#] a	0.48 a
II	53.8 b	0.86 a
III	101.0 c	0.88 b
平均 Mean	63.9 ^{**}	0.75 [*]

^{*}, $p < 0.05$; ^{**}, $p < 0.01$, [#], Values followed by different letters are significant at the 0.5 level

表 4 污染区土壤和蔬菜砷含量的相关分析

Table 4 Correlation analysis of soil and vegetable As concentrations			
项目 Item	土壤砷浓度 Soil As	蔬菜砷浓度 Vegetable As	生物富集系数 BF
土壤砷浓度 Soil As	1	NS	NS
蔬菜砷浓度 Vegetable As		1	0.913 ^{**}
生物富集系数 BF			1

^{*} $p < 0.05$; ^{**} $p < 0.01$ NS= No Significance

mg/kg以下。我国新制订的《饲料砷含量标准》^[27]规定: 饲料中砷浓度应 $\leq 18\text{ mg/kg}$ (动物不产生明显残留)。而当地农民经常饲喂牲畜的根菜类蔬菜砷浓度平均高达 29.1 mg/kg (干重), 最高达 72.8 mg/kg (干重)。因此, 污染区通过动物饲料对人体产生的两次砷污染应该引起足够的重视。

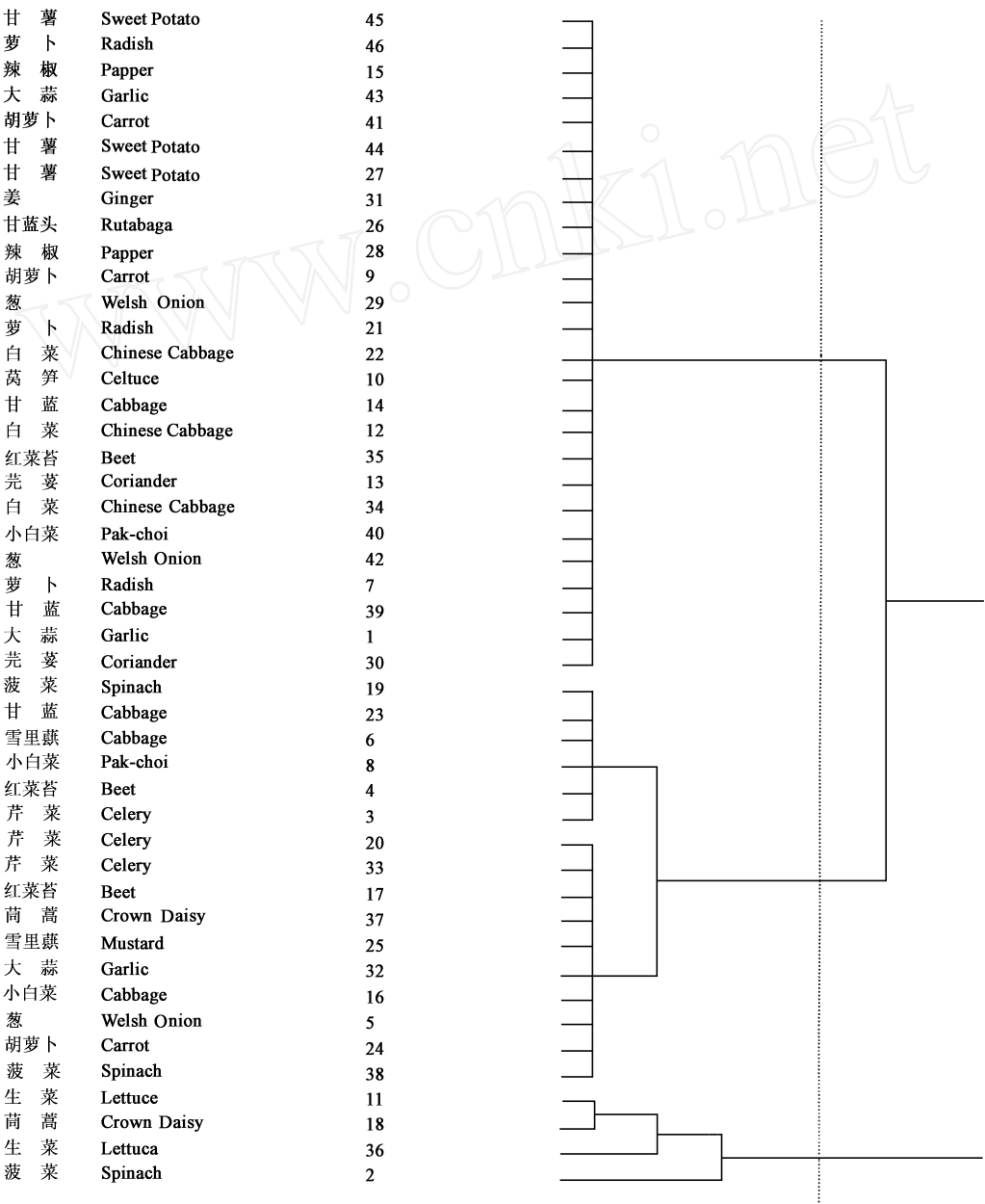


图 1 污染区蔬菜聚类图

Fig. 1 Dendrogram using complete vegetables in contaminated areas

3.3 砷污染土壤的修复问题

虽然不同植物对砷的积累存在明显的差异,但是通常土壤砷污染是引起植物组织中砷污染的主要因素。根据国际上的报道,在正常土壤上生长的植物含砷量一般不超过 0.8 mg/kg ^[18]。

虽然植物对土壤中的重金属都具有一定吸收作用,但是,仅仅种植作物的情况下,土壤砷污染问题很难通过自然净化过程来解决,而且这样生产出来的食物也很不安全。根据调查结果,砷污染区土壤的平均浓度为 58.9 mg/kg ,如果耕作层土壤每 666.7 m^2 按 150000 kg 计算,整个耕作层含砷 $8.8\text{ kg}/666.7\text{ m}^2$;在实际生产中,蔬菜的种植类型和种植模式变化较大,如果以采样区蔬菜的平均砷含量作为蔬菜可以带出农田部分的砷含量,为 10.2 mg/kg (干重);调查点每年种收3季以上蔬菜;每次的蔬菜收获量平均为 $4000\text{ kg}/666.7\text{ m}^2$ 左右,年收获总量大约每 666.7 m^2 在 12000 kg 左右;按此计算,每 666.7 m^2 蔬菜每年可以带

走砷 0.2 kg, 完全净化平均浓度为 58.9 mg/kg 的污染土壤至少需要 55a。董健^[28]等研究作物净化土壤中砷的试验结果也显示, 20a 连续种植作物只能减少土壤中总砷的 0.5~2.0%。

利用超富集植物进行植物修复土壤是一个有效的降低土壤中砷污染的措施。根据陈同斌等^[29,30]的研究, 超富集植物蜈蚣草叶片砷浓度可以达到 5070 mg/kg, 每亩干重可以达到 1200 kg 以上, 蜈蚣草每年可以吸收土壤中砷达 6.1 kg/666.7m²。按此计算, 在最佳条件下蜈蚣草可以在 2a 的时间内修复砷污染区的土壤。在湖南郴州的试验结果显示蜈蚣草 1a 可以降低土壤中总砷达 5%~24%, 为普通植物的 200 倍以上。因此, 利用超富集植物蜈蚣草修复污染土壤, 是一种比较快速、低成本的绿色修复技术。

References

- [1] Deba P S, Kunnath S S. Arsenic poisoning in West Bengal. *Science*, 1996, **274**: 1285~1289
- [2] Nickson R, McArthur J, Burgess W, et al. Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater. *Nature*, 1998, **395**: 338
- [3] Chowdhury T R, Basu G K, Mandal B K. Arsenic poisoning in the Ganges delta. *Nature*, 1999, **401**: 545~546
- [4] Karim M M. Arsenic in groundwater and health problems in Bangladesh. *Water Research*, 2000, **34**: 304~310
- [5] Christen K. The arsenic threat worsens. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**: 286~291
- [6] Mary L B, Reina H, Lee M, et al. Arsenic laced water in Chile. *Science*, 1998, **281**: 783
- [7] Meharg A A, Rahman M D. Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: implications for rice contribution to arsenic consumption. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**: 229~234
- [8] Berg M, Tran H C, Nguyen T C, et al. Arsenic contamination of ground water and drinking water in Vietnam: A human health threat. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**: 2621~2626
- [9] Kirk D N. Worldwide occurrences of arsenic in groundwater. *Science*, 2002, **296**: 2143~2145
- [10] Xu H N, Xu J L. Cause of formation and distribution of arsenic in abnormal area of China. *Soil*, 1996, **28**: 80~84
- [11] Pandey P K, Yadav S, Nair S, et al. Arsenic contamination of the environment: A new perspective from central-east India. *Environment International*, 2002, **28**: 235~245
- [12] Zhang S Q, Yang J R. Absorption and dynamics of Cd, Pb and As in crops. *Agro-environmental Protection*, 1992, **11**: 171~175
- [13] Yang J R, Ren Y. Impact on soil microorganism and soil biochemical activity by arsenic. *Soil*, 1996, **28**: 101~104
- [14] Xu J L, Yang J R. Influence the factors and crop interact in arsenic contaminated soil. *Soil*, 1996, **28**: 85~89
- [15] Abedin J, Cresser M, Meharg A A. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**: 962~968
- [16] Abedin M T, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice (*Oryza Sativa* L.) plant. *Plant Physiology*, 2002, **128**: 1120~1128
- [17] Klocke A. Soil contamination by heavy metals. Proceedings of International Workshop on Risk Assessment of Contaminated Soil, Denter, Netherlands, 1986. 42~54
- [18] Liao Z J. Pollution and danger of the metallic element a little concentration in Environment. Beijing: Science Press, 1989. 101~138
- [19] Xiong X X, Liu C T. Mineralogical study of realgar from the Shimen As(Au) deposit, Hunan province. *Acta petrologica et mineralogical*, 1998, **17**: 378~384
- [20] Chen T B, Liu G L, Xie K Y, et al. As content of soil and crop contaminated critical value in high As district of Hunan province. *Soil and Fertilizer*, 1992, **2**: 1~4
- [21] Liao X Y, Chen T B, Xiao X Y, et al. Space variation character of As content in contaminated Paddy soil. *Geographical Research*, 2003, **22**: 635~643
- [22] EPA 3050B. www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm, revision 2, 1996, 3050B: 1~12
- [23] EPA 3010A. www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm, revision 2, 1996, 3010A: 1~5
- [24] China National Environmental Monitoring Center (CNEMC). The background values of soil elements in China. Beijing: Chinese Environment Science Press, 1990. 87
- [25] World Health Organization (WHO). Environmental Health Criteria 18, Arsenic, International Programme on Chemical Safety, Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, Switzerland, 1984, **1**: 53
- [26] Guo D F. Environmental sources of Pb and Cd and their toxicity to human and animal. *Advances in Environmental Science* 1994, **2**: 71~75
- [27] Ji Z H, Wang S Y. Criterion collected of fodder by industrial standard. China Standard Press, 1999. 56~62
- [28] Tong J. Pollution of the heavy metals to soil can't be ignored. *Environmental Science*, 1989, **10**: 37~38

- [29] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al* Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**: 207~ 210
- [30] Chen T B, Fan Z L, Lei M, *et al* Effect of phosphorus on arsenic accumulation in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its implication *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**: 1156~ 1158

参考文献:

- [10] 徐红宁, 许嘉琳 我国砷异常区的成因及分布 *土壤*, 1996, **28**: 80~ 84
- [12] 张素芹, 杨居荣 农作物对镉铅砷的吸收与动力 *农业环境保护*, 1992, **11**: 171~ 175
- [13] 杨居荣, 任燕 砷对土壤微生物及土壤生化活性的影响 *土壤*, 1996, **28**: 101~ 104
- [14] 许嘉琳, 杨居荣 砷污染土壤的作物效应及其影响因素 *土壤*, 1996, **28**: 85~ 89
- [18] 廖自基 环境中微量重金属元素的污染与危害 北京: 科学出版社, 1989 101~ 138
- [19] 熊先孝, 刘昌涛 湖南石门砷(金)矿床中雄黄的矿物学研究 *岩石矿物学杂志*, 1998, **17**: 378~ 384
- [20] 陈同斌, 刘更另, 谢开云, 等 湖南省高砷地区土壤含量及其作物污染的临界值 *土壤肥料*, 1992, **2**: 1~ 4
- [21] 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 等 污染水稻田土壤含砷量的空间变异特征 *地理研究*, 2003, **22**: 635~ 643
- [24] 国家环境监测总站 中国土壤元素背景值 北京: 中国环境科学出版社, 1990 87
- [26] 郭笃发 环境中的铅和镉的来源及其对人和动物的危害 *环境科学进展*, 1994, **2**: 71~ 75
- [27] 季之华, 王随元 饲料工业标准汇编 北京: 中国标准出版社, 1999 56~ 62
- [28] 童健 重金属对土壤的污染不容忽视 *环境科学*, 1989, **10**: 37~ 38
- [29] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等 超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 *科学通报*, 2002, **47**: 207~ 210
- [30] 陈同斌, 范稚莲, 雷梅, 等 磷对超富集植物蜈蚣草吸收砷的影响及其科学意义 *科学通报*, 2002, **47**: 1156~ 1158