

北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析

陈同斌¹, 宋 波^{1,2}, 郑袁明¹, 黄泽春¹, 郑国砥¹, 李艳霞¹, 雷 梅¹, 廖晓勇¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究中心, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过对北京市蔬菜和菜地土壤砷含量状况进行大规模调查, 研究了蔬菜和土壤砷含量及其健康风险, 并筛选出抗砷污染能力强的蔬菜品种。根据蔬菜的消费量并兼顾品种多样性的原则, 在北京市规模化蔬菜栽培基地 (采集蔬菜及土壤样品) 和蔬菜批发市场 (蔬菜样品) 共采集 93 种蔬菜 400 多份蔬菜样品和 39 个土壤样品系统地分析其砷含量。研究发现: 北京市菜地土壤砷含量范围和平均含量分别为 4.44~25.3 和 9.40 mg/kg, 明显超过北京市土壤砷背景值; 北京市蔬菜砷含量最高达 0.479 mg/kg, 平均含量为 0.028 mg/kg, 均未超过《食品中砷限量卫生标准》(GB4810-94) 的限量值, 但其中有 2 个蔬菜样品 (萝卜和大蒜) 砷含量超过 WHO/FAO 制订的限量标准。北京市蔬菜砷含量在东偏北方向 (偏转 11°-30°) 存在明显的 "U" 型趋势分布。裸露地蔬菜砷含量显著高于设施蔬菜。油菜、萝卜、小白菜、大葱、芥菜、黄瓜、大白菜和甘蓝抗砷污染能力较弱, 而辣椒、云架豆、冬瓜、茄子、菠菜、西红柿、芹菜等抗砷污染能力则较强。北京市居民从蔬菜中摄入砷平均值为 0.016 mg/(人·d), 蔬菜砷对北京市部分人群存在一定的健康风险。

关键词: 北京市; 蔬菜; 砷; 区域分异; 健康风险; 抗污染品种

1 引言

砷是动物和人体的组成元素之一, 也是对动物和人体健康影响较大的元素之一^[1, 2]。人体摄入少量砷可以促进新陈代谢^[3], 但摄入砷过多会产生毒害。世界卫生组织 (WHO) 规定, 成人的砷允许摄入量约为 0.128 mg/人·d; 而对于 0~6 岁的幼儿, 短期和长期砷暴露量分别应低于 0.015 和 0.005 mg/人·d^[4]。环境污染后砷化物通过呼吸、饮水及食物等途径进入人体, 超过限量时会引起人体砷急、慢性中毒, 导致皮肤癌、肺癌、膀胱癌等多种疾病^[5]。砷对人体毒害作用的潜伏期可长达数十年^[6]。

环境中的砷可分为自然来源和人为来源。前者包括来源于中的砷, 它决定了土壤、水体、大气和生物体的背景含砷量, 后者为工农业生产活动直接或间接地将砷排放到土壤、水体和大气中。砷被广泛应用于杀虫剂 (如砷酸钙、砷酸铅、稻脚青、稻宁、亚砷酸钠和巴黎绿等)、防腐剂、医药生产等工农业原料^[7]。

砷在食物中的含量状况及其对人体的健康风险已受到国内外研究者的广泛关注^[8-15]。随着生活水平的提高, 蔬菜消耗量也相应增加, 蔬菜的健康风险问题越来越受到重视。因此, 全面调查和测定蔬菜中的砷, 对于了解其健康风险具有重要意义。但前人的研究往往只随机选取一种或几种蔬菜, 或以某一个或某几个蔬菜生产基地, 抑或随机选取区

收稿日期: 2005-07-26; 修订日期: 2005-12-20

基金项目: 国家杰出青年基金项目(40325003); 国家自然科学基金重点项目(40232022); 北京市自然科学基金重大项目(6990002) [Foundation: The National Science Fund of China for Distinguished Young Scholars, No.40325003; The National Natural Science Foundation of China, No.40232022; The Natural Science Foundation of Beijing, No.6990002]

作者简介: 陈同斌 (1963-), 男, 研究员, 中国地理学会会员, 主要从事植物修复、废弃物资源化利用、区域土壤环境质量与风险评估研究。E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

域内一个或几个农贸市场的部分蔬菜作为研究对象，而这种采样方式只能代表所选的一种或数种蔬菜的砷含量状况，对于区域内蔬菜砷含量总体状况的代表意义有限，更难以满足对蔬菜砷的健康风险进行有效评估的要求。到目前为止，尽管对农产品中的砷含量已做过一些系列调查研究，但这些研究多着眼于砷含量的分析，没有将这些结果与人体健康风险问题联系起来。而对省级行政单元的蔬菜重金属含量的大规模调查研究也鲜见报道。

北京市是一个拥有 1360 多万人口的大都市，蔬菜年消费量近 800 万 t^[16, 17]，而对于北京市菜地土壤和蔬菜砷含量总体状况以及蔬菜砷对居民健康风险等问题仍缺乏系统研究。本文以北京市为例，根据其蔬菜生产和消费结构特点，系统研究北京市主要蔬菜和菜地土壤的砷含量及其健康风险，并探讨不同蔬菜种类对土壤砷的富集情况，以筛选出抗砷污染能力较强的蔬菜品种，为北京市蔬菜种植区化和种植结构的优化提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集与处理

土壤采样点主要布置在具有一定规模的商品蔬菜基地上 (图 1)。土壤样品取自 10×10 m 正方形四个顶点和中心点，各取表层 (0~20 cm) 土壤约 1 kg，混匀后用四分法从中选取 1 kg 土壤作为代表该点的混合样品。采样过程没有与金属工具接触。

预处理方法：土壤样品在室内风干，去除杂物，过 1 mm 尼龙网筛，用四分法取部

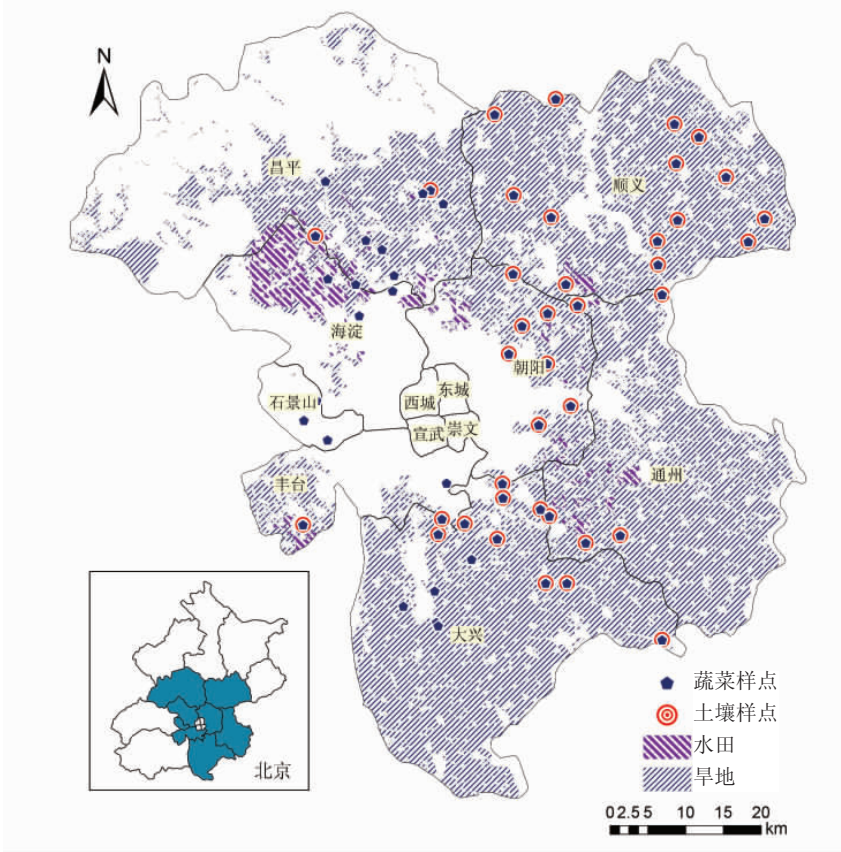


图 1 北京市蔬菜与土壤采样点区域分布图

Fig. 1 A sketch map showing sampling sites of soils and vegetables taken from Beijing

分样品过 100 目尼龙筛，备用；样品的混合、装袋、粉碎、研磨等处理均使用木头、塑料或玛瑙工具。

2.2 蔬菜样品采集与处理

采集土壤样品的同时采集蔬菜样品。为能更好地反映北京市蔬菜的重金属含量状况，采取生产量优先和兼顾品种多样性的原则进行蔬菜采样。据 2002 年《北京市统计年鉴》公布的数据^[16]，2001 年北京市蔬菜生产总量为 522.8 万 t，其中 19 种蔬菜的产量之和占北京市蔬菜生产总量的 74.9% (表 1)。除这些大宗蔬菜以外，还根据北京市的蔬菜消费特点采集了牛蒡、乌塌菜、人参果、水晶菜、西洋菜和珍珠菜等特种蔬菜。样品包括叶菜类、根茎类、瓜果类蔬菜,既考虑到产量和播种面积，又兼顾到种植方式 (裸露地蔬菜和设施蔬菜)；既重点考虑大宗蔬菜，又兼顾到消费量较小但在膳食结构中近年来消费比例正在不断增长的特菜品种；既以量大面广的蔬菜品种为主，同时又适当兼顾到少数容易积累重金属的蔬菜类型。

为了保证各蔬菜品种的采样代表性，每种蔬菜的样本数主要根据其产量进行确定。考虑到各品种不应因产量差异太大而造成样本数差异过大，采用每种蔬菜的样本数与其生产量的平方根成正比的原则确定每种蔬菜的样本数。样本数可按方程 (1) 计算：

$$n_i = \frac{\sqrt{a_i}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{a_i}} \times N$$

(1)

式中： n_i 为每种蔬菜的样品数， a_i 为每种蔬菜的年生产量， m 为蔬菜品种数， N 为蔬菜样本总数。

为了掌握北京市市售蔬菜的重金属情况，除从北京市主要蔬菜生产基地采集样品外，调查时还从北京市岳各庄、大钟寺、新发地三大批发市场和部分超市采集市售蔬菜。市售外地蔬菜主要来自山东、广东、内蒙古、天津和河北等地。

预处理方法：蔬菜采样时摘取成熟新鲜的可食部分，采样后马上装入塑料袋中，并

表 1 北京市主要蔬菜产量统计 (2001 年)

Tab. 1 Production of vegetables in Beijing in 2001

蔬菜种类	总产量 (10 ⁴ t)	占全市蔬菜总产量的比例 (%)	累计百分率 (%)
大白菜 (<i>Brassica pekinensis</i>)	130.1	24.9	24.9
黄瓜 (<i>Cucumis sativus</i>)	37.7	7.2	32.1
西红柿 (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	36.0	6.9	39.0
萝卜 (<i>Raphanus</i>)	29.9	5.7	44.7
茄子 (<i>Solanum</i>)	22.8	4.4	49.1
云架豆 (<i>Vigna unguiculata</i>)	20.1	3.8	52.9
芹菜 (<i>Apium graveolens</i>)	17.5	3.3	56.3
大葱 (<i>Allium fistulosum</i>)	14.8	2.8	59.1
冬瓜 (<i>Beninacasa hispida</i>)	12.3	2.4	61.4
菠菜 (<i>Spinacia oleracea</i>)	10.6	2.0	63.5
油菜 (<i>Brassica campestris</i>)	10.2	2.0	65.4
辣椒 (<i>Capsicum annuum</i>)	10.1	1.9	67.3
韭菜 (<i>Allium tuberosum</i>)	10.0	1.9	69.3
元白菜 (<i>Brassica oleracea</i>)	9.3	1.8	71.0
土豆 (<i>Solanum tuberosum</i>)	7.7	1.5	72.5
菜花 (<i>Brassica parachinensis</i>)	4.5	0.9	73.4
莲藕 (<i>Nelumbo adans</i>)	3.3	0.6	74.0
大蒜 (<i>Allium sativum</i>)	2.7	0.5	74.5
小白菜 (<i>Brassica chinensis</i>)	1.9	0.4	74.9
其他蔬菜	131.3	25.1	
全市总计	522.8	100.0	74.9

将袋口密封以防止水分蒸发。大白菜、元白菜、菜花、菠菜、油菜、小白菜等叶菜类蔬菜, 去掉明显腐烂和枯萎的外叶和根; 大葱、大蒜、洋葱等茎菜类蔬菜, 去根及外表皮; 黄瓜、茄子、辣椒、西红柿、云架豆等果菜类蔬菜, 去掉花梗和蒂; 萝卜去掉茎叶, 留下块根。用自来水反复清洗, 去除附在其表面上的泥土, 然后用去离子水反复漂洗, 晾干。用不锈钢刀切成小块, 在 60 °C 下烘 48 h, 粉碎备用。

2.3 砷的测定与质量控制

土壤砷采用美国国家环保局推荐的 USEPA 3050B 方法^[18]消煮和氢化物发生-原子荧光光谱法 (AFS-2202) 测定^[19]。分析过程均加入国家标准参比土壤样品 (GSS-1) 进行分析质量控制。蔬菜样品中砷的测定参照国家标准方法^[20], 即采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{HNO}_3$ 消煮, 氢化物发生-原子荧光光谱法 (AFS-2202) 测定。分析过程加入国家标准参比植物样品 (GSV-3) 进行分析质量控制。质量控制结果符合国家标准参比物质允许范围的为有效数据, 对质量控制不过关的数据则予以剔除。

分析过程所用试剂均为优级纯, 所用的水均为超纯水 (亚沸水)。

2.4 数据统计分析

剔除异常值后, 得到 39 个土壤样品和 310 个蔬菜样品的有效数据, 蔬菜样品中有 155 个样品直接采自北京市各区的菜地, 105 个为市售的本地产蔬菜, 其他 50 个为市售的外地蔬菜。经统计检验, 土壤和蔬菜砷含量均服从对数正态分布 (Shapiro-wilk 检验, $P < 0.05$), 因而经过对数转换后即可进行方差分析等统计检验, 统计中的均数则采用几何均数。样点分布图的制作使用 Arc GIS 软件, 正态分布统计检验用 Origin 软件, 方差分析和聚类分析则采用 SPSS 软件完成。

2.5 蔬菜砷含量空间分布趋势的拟合

北京市蔬菜基地的蔬菜砷含量在空间分布存在一定的趋势, 这种趋势在经过原坐标旋转一定角度后更为明显: 即将采样点的经度 ($long_0$) 和纬度 (lat_0) 进行一定角度 (α) 的偏转投影而得度数 ($long$) 作为横坐标, 公式为:

$$long = \cos(\alpha - \arctg \frac{lat_0}{long_0}) \sqrt{lat_0^2 + long_0^2} \quad (2)$$

2.6 蔬菜砷摄入量的估算

居民每日从蔬菜中摄入砷的总量与北京市各品种蔬菜的消费量权重以及蔬菜砷的含量密切相关。在计算蔬菜的消费量权重时, 应将其样本数进行平方, 因为蔬菜样本数是采用与其生产量的平方根成正比的原则来确定的。其计算方法如方程 (3) 所示:

$$As_{\text{摄入}} = Q \cdot \sum_{i=1}^n \left[\overline{X}_{gi} \cdot \frac{N_i^2}{\sum_{i=1}^n N_i^2} \right] \quad (3)$$

式中: $As_{\text{摄入}}$ 为居民从蔬菜中摄入砷的总量; Q 为蔬菜日均消费量; \overline{X}_{gi} 为各品种蔬菜砷含量的几何平均值; N_i 为各品种蔬菜的样本数; n 为蔬菜品种数。

2.7 蔬菜砷综合超标率的计算

区域内蔬菜砷综合超标率与各种蔬菜的超标率及该种蔬菜占蔬菜总消费量的权重密切相关, 因此采用与 2.6 节类似的计算方法。蔬菜砷总超标率计算方法如方程 (4):

$$A = \sum_{i=1}^n \left[a_i \cdot \frac{N_i^2}{\sum_{i=1}^n N_i^2} \right] \quad (4)$$

式中: A 为蔬菜砷综合超标率; a_i 为各种蔬菜砷超标率; N_i 为各品种蔬菜的样本数; n 为蔬菜品种数。

表 2 北京市各种蔬菜的砷含量

Tab. 2 Concentrations of arsenic in vegetables collected from farm fields and markets of Beijing

蔬菜分类	品种	n	范围	蔬菜砷含量 (mg/kg, 鲜重)			
				算术		几何	
				平均数	标准差	平均值	标准差
叶菜类	大蒜 ^A	5	nd-0.310 ⁽¹⁾	0.075	0.132	0.013	7.44
	小白菜 ^B	11	nd-0.223	0.047	0.062	0.027	2.82
	大葱	17	0.004-0.138	0.042	0.036	0.029	2.61
	空心菜	2	0.024-0.046	0.035	0.016	0.033	_(2)
	大白菜	23	nd-0.190	0.028	0.042	0.009	7.00
	元白菜	11	nd-0.066	0.026	0.029	0.009	8.96
	生菜	5	0.003-0.044	0.022	0.016	0.016	3.36
	茼蒿 ^C	3	0.011-0.034	0.020	0.013	0.017	1.83
	甘蓝 ^D	8	0.002-0.077	0.020	0.027	0.009	3.91
	油菜 ^E	15	0.003-0.071	0.019	0.020	0.012	2.81
	苋菜	2	0.013-0.020	0.017	0.005	0.016	-
	芥菜 ^F	5	0.005-0.029	0.014	0.011	0.011	2.36
	西兰花	2	nd-0.013	0.012	0.001	0.012	1.05
	菠菜 ^G	8	nd-0.030	0.012	0.011	0.007	3.46
	韭菜	2	0.008-0.014	0.011	0.004	0.011	1.45
	芹菜	8	0.003-0.020	0.009	0.007	0.007	2.09
	菜花 ^H	10	0.000-0.033	0.009	0.010	0.004	5.10
	豆苗(芽) ^I	5	nd-0.007	0.003	0.002	0.003	2.56
	叶菜类	142	nd-0.310	0.026	0.040	0.011	4.46
根茎类	萝卜 ^J	18	0.004-0.479	0.069	0.114	0.033	3.25
	莲藕	1	0.028	0.028	-	0.028	-
	土豆	6	0.001-0.038	0.016	0.014	0.009	4.50
	芦笋	2	0.004-0.025	0.014	0.015	0.010	-
	洋葱 ^K	6	0.002-0.012	0.008	0.004	0.007	2.08
	茼苣	2	0.002-0.007	0.004	0.003	0.004	2.44
	竹笋	1	0.004	0.004	-	0.004	-
	根茎类	36	0.001-0.479	0.040	0.085	0.016	3.99
瓜果类	黄瓜 ^L	15	0.002-0.126	0.041	0.038	0.022	3.70
	辣椒 ^M	21	0.001-0.116	0.038	0.035	0.021	3.56
	豆角 ^N	16	0.001-0.202	0.038	0.050	0.017	4.29
	毛豆	4	nd-0.127	0.035	0.061	0.007	-
	茄子 ^O	13	0.004-0.075	0.024	0.021	0.017	2.32
	西红柿 ^P	24	nd-0.138	0.019	0.029	0.009	4.50
	丝瓜 ^Q	2	0.003-0.033	0.018	0.021	0.011	-
	冬瓜	12	nd-0.065	0.011	0.018	0.005	3.80
	西葫芦	3	0.000-0.025	0.009	0.014	0.002	18.67
特菜类	瓜果类	110	nd-0.202	0.028	0.035	0.013	4.23
	春菜	2	0.005-0.058	0.032	0.038	0.017	-
	其他特菜 ^R	15	0.001-0.107	0.024	0.027	0.014	3.52
	茴香	2	0.013-0.031	0.022	0.013	0.020	1.88
	紫贝天葵	2	0.011-0.025	0.018	0.010	0.017	-
	蕃杏	1	0.008	0.008	-	0.008	-
	特菜类	22	0.001-0.107	0.024	0.024	0.015	3.24
全部蔬菜样品		310	nd-0.479	0.028	0.045	0.012	4.25

(1) “nd”表示未检出；(2) “-”表示无数据；
A 包括大蒜和蒜苗；B 包括小白菜、小白菜苔和奶油白菜； C 包括茼蒿和蒿子杆； D 包括羽衣甘蓝、紫甘蓝和圆白菜； E 包括油菜、小油菜、油麦菜； F 包括芥菜、芥蓝和野生芥菜； G 包括菠菜和叶甜菜； H 包括菜花和菜心； I 包括豆瓣菜、黑豆苗、豆芽、绿豆苗和豌豆苗； J 包括白萝卜、水萝卜、卞萝卜、胡萝卜、钢笔萝卜和樱桃萝卜； K 包括洋葱和红洋葱； L 包括黄瓜、迷你黄瓜和荷兰黄瓜； M 包括辣椒、尖椒，包括大椒、彩椒（红）、彩椒（黄）和青椒； N 包括云架豆、四季豆、豌豆、豇豆、蚕豆、荷兰豆； O 包括茄子和荷兰茄子； P 西红柿、樱桃西红柿、圣女西红柿和香蕉西红柿； Q 包括丝瓜和凉瓜； R 包括乌塌菜、香白凤菜、长琪、黑果、牛蒡、人参果、软化菊苣、水晶菜、西洋菜、香椿、香菇、香杏、珍珠菜、珍珠菇和紫三地。

3 结果与讨论

3.1 菜地土壤砷含量特征

菜地土壤砷含量的数据符合对数正态分布，变幅为 4.44-25.3 mg/kg，中值为 8.72 mg/kg，算术均值和标准差分别为 9.40 mg/kg 和 3.84 mg/kg，几何均值和标准差分别为 8.79 mg/kg 和 1.44 mg/kg。经对数转换后与北京市土壤砷背景值的几何均值对数（算术均值为 7.81 mg/kg，几何均值为 7.09 mg/kg^[21]）相比，二者差异达到极显著水平（ $P = 0.001$ ），菜地土壤的砷含量明显偏高。

3.2 蔬菜砷含量及其空间分异

从表 2 来看，北京市各种蔬菜的砷平均含量均低于我国食品卫生标准^[22]所规定的限量值（0.5 mg/kg 鲜重）。但其中两个样品（萝卜 0.479 mg/kg；大蒜 0.310 mg/kg）砷含量较高，超过世界卫生组织（WHO）与联合国粮农组织（FAO）联合制订的食品卫生标准的限量值（0.25 mg/kg 鲜重）。经正态分布检验，全体蔬菜样本和各大类蔬菜样本的砷含量均服从对数正态分布。从几何平均值来看，蔬菜的平均含砷量存在以下趋势：根茎类 > 特菜类 > 叶菜类 > 瓜果类（表 2）。但是，各类蔬菜砷含量的非参数检验比较表明，其差异并不显著。

对各品种蔬菜砷含量的几何均值（表 2）进行快速聚类（K-Means）分析，共分为四类：大葱、小白菜、空心菜、萝卜和莲藕为第一类，其砷含量最高；茼蒿、生菜、苋菜、春菜、黄瓜、辣椒、茄子、豆角、茴香、紫贝天葵为第二类，其砷含量稍低；第三类包括大蒜、西兰花、油菜、韭菜、芥菜、丝瓜、芦笋、大白菜、甘蓝、元白菜、土豆、西红柿、蕃杏和其他特菜；第四类包括菠菜、菜花、芹菜、豆苗（芽）、洋葱、莴苣、竹笋、冬瓜、毛豆、西葫芦等，砷含量最低。非参数检验比较表明，各类之间的差异均达到极显著水平。

从北京各行政区的蔬菜（不包括市售蔬菜）砷含量统计分析结果可以看出（表 3），不同区域蔬菜砷含量变异性较大，其算术标准差与平均值相当，呈明显偏态分布。非参数检验比较表明：朝阳区和昌平区蔬菜砷含量较低，其中朝阳区蔬菜砷含量显著低于石景山、通州、大兴、顺义和海淀区，而昌平区显著低于丰台、通州和朝阳。

从表 3 可以看到，北京市蔬菜砷含量在各区域分布存在一定的差异。那么，这种差异是否存在一定的空间分布趋势呢？采用方程（2）中的方法，将坐标旋转不同角度后发现，在东北方向偏转 11°-30°

时，北京市蔬菜砷含量存在明显的“U”型分布趋势（图 2）（ $P < 0.05$ ， $R^2 = 0.116-0.129$ ）。即顺义的东北部以及石景山、丰台和大兴一带蔬菜砷含量较高，而昌平、朝阳区北部、顺义区西南部和通州北端则较低（图 3）。对于产生这一现象的原因，目前还难以解释。在北京市本地种植的蔬菜中，设施蔬菜约占 30%^[23]，但分布较为分散，并未形成区域性分布，不同蔬菜种植方式可能不是导致蔬菜砷含量区域性差异的主

表 3 北京市不同行政区的蔬菜砷含量
Tab. 3 Concentration of arsenic in vegetables from farm fields of different districts of Beijing

区域	n*	范围	蔬菜砷含量 (mg/kg, 鲜重)			
			算术		几何	
			平均值	标准差	平均值	标准差
大兴	32	0.003-0.214	0.043	0.048	0.069	3.76
海淀	11	0.008-0.074	0.035	0.020	0.038	2.55
昌平	21	0.002-0.088	0.028	0.024	0.036	2.10
顺义	27	0.001-0.190	0.041	0.040	0.029	1.92
朝阳	41	0.000-0.223	0.032	0.044	0.026 ⁽¹⁾	3.12
通州	12	0.006-0.072	0.044	0.022	0.025	2.99
丰台	4	0.029-0.479	0.148	0.221	0.019	2.83
石景山	7	0.012-0.202	0.058	0.066	0.014	3.95
北京市	155	0.000-0.479	0.041	0.053	0.023	3.20

(1) 朝阳区蔬菜砷含量几何均值为剔除砷含量为 0.000mg/kg（樱桃西红柿）的样本后的其他 40 个样本的计算结果。

* 丰台区和石景山区蔬菜基地较少，因此采集的蔬菜样本数较少。

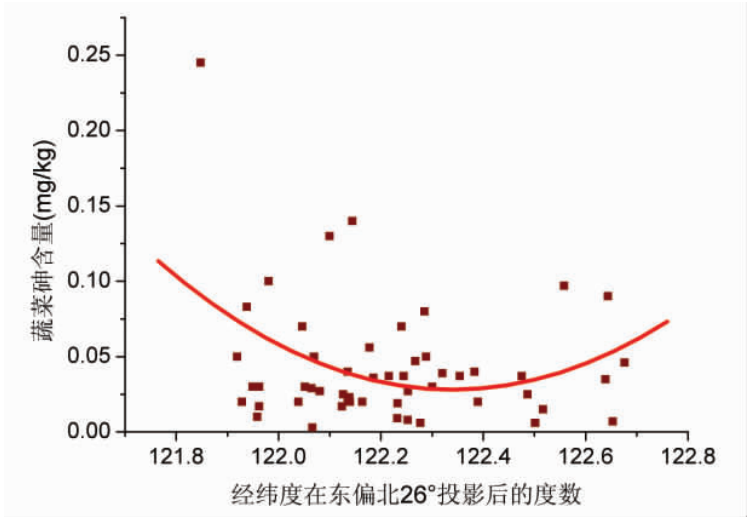


图 2 北京市蔬菜砷含量空间分布趋势图

Fig. 2 Trend curve of arsenic in vegetables from farm fields of Beijing

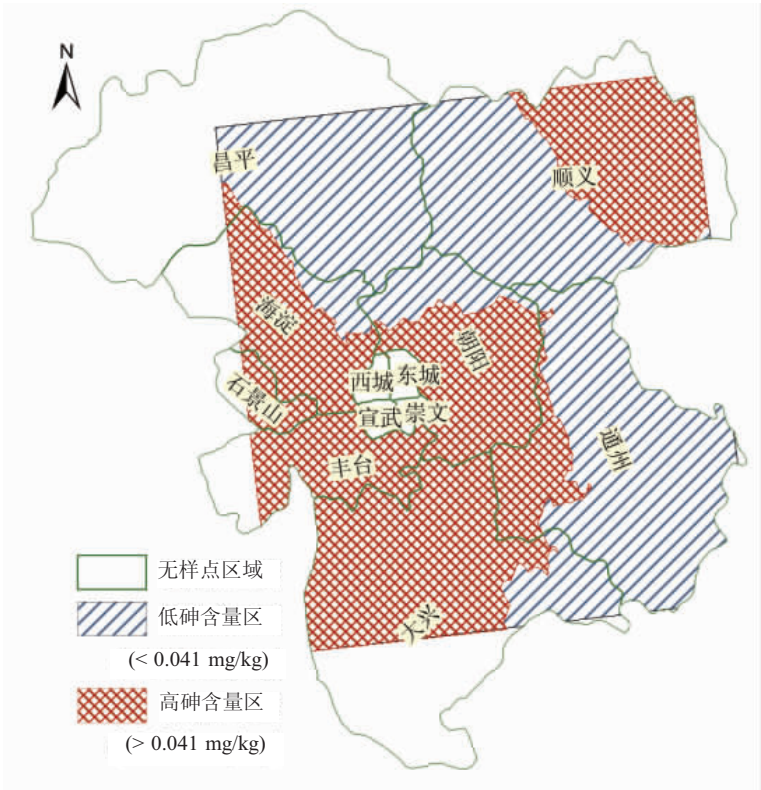


图 3 北京市蔬菜基地的蔬菜砷含量空间分异

Fig. 3 A sketch map showing spatial distribution of arsenic in vegetables from Beijing

要原因；同时，在蔬菜砷含量存在明显差异的两个区域中，蔬菜种类也没有存在明显的差异，因而不同蔬菜的砷富集能力差异可能也不是引起这种差异的主要原因。统计分析表明，北京市菜地土壤和蔬菜砷含量相关性不显著（表 7）。可见，北京市菜地土壤砷含量差异可能也不是导致上述蔬菜砷含量区域性差异的主要原因。因此，北京市蔬菜砷含量区域性差异可能是蔬菜种植方式、土壤砷含量差异、不同富集系数的蔬菜品种、大气沉

表 4 北京市本地产蔬菜和市售外地产蔬菜砷含量的比较
Tab. 4 Comparison of arsenic concentrations in vegetables produced in Beijing with those sold in Beijing markets produced from other provinces of China

蔬菜来源	n	分布类型	蔬菜砷含量 (mg/kg, 鲜重)			
			范围	平均值	中值	标准差
北京市本地生产	260	对数正态	0.000-0.479	0.029 a	0.015	0.045
市售外地生产	50	对数正态	0.047-0.310	0.024 a	0.010	0.047

表 5 裸露地蔬菜和设施蔬菜砷含量的比较
Tab. 5 Comparison of arsenic concentrations in vegetables grown in open fields with those grown in greenhouse

蔬菜来源	n	分布类型	蔬菜砷含量 (mg/kg, 鲜重)			
			范围	平均值	中值	标准差
裸露地蔬菜	114	对数正态	0.001-0.479	0.048 a	0.031	0.059
设施蔬菜	146	对数正态	0.000-0.138	0.014 b	0.008	0.019

降、农药和肥料的施用^[8]等因素综合作用的结果。

3.3 不同来源的蔬菜的砷含量差异

3.3.1 本地蔬菜与外地蔬菜的砷含量比较 据统计，2000 年北京市蔬菜自给率为 65%^[17]，其余则主要由河北、山东、广东、内蒙古和天津等地供应。研究发现，北京市本地产蔬菜与外地产蔬菜的砷含量没有显著差异 (表 4)。

3.3.2 裸露地蔬菜和设施蔬菜的砷含量比较 设施栽培具有日光、水分利用效率高，生育期短，能反季节生产，经济效益高，颇受到农民的青睐。近年来，北京市设施农业发展迅速，2003 年北京市设施栽培面积约为 2.35 万 hm²，其中蔬菜栽培约占 68%，其产量达 1.543 × 10⁶ t^[23]。因此，设施蔬菜的品质也越来越受到关注。从北京市裸露地蔬菜和设施蔬菜砷含量的比较结果看 (表 5)，裸露地蔬菜中砷平均含量高于设施蔬菜，其差异达到极显著水平 ($P < 0.001$)。

3.4 不同蔬菜种类对砷的富集系数与抗污染品种的选择

富集系数是植物中砷含量与土壤中砷含量的比值，它可大致反映植物在相同土壤砷浓度条件下对砷的吸收能力^[24]。砷富集系数越小，则表明蔬菜吸收砷的能力越差，抗土壤砷污染的能力则较强。经检验，北京主要蔬菜的砷富集系数呈对数正态分布 (表 6)，因此，采用蔬菜富集系数几何均值进行层级聚类分析 (图 4) 以比较各品种的抗砷污染能力。

根据蔬菜富集系数高低，采用层级聚类法可将蔬菜分为四类 (图 4)：油菜、小白菜和萝卜类蔬菜富集系数最高，划为第一类；其次为大葱、芥菜、黄瓜、大白菜和甘蓝，划为第二类；再其次为辣椒、云架豆、冬瓜和茄子，划为第三类；富集系数最低的包括豆苗 (芽)、菠菜、西红柿、芹菜、黑果、软化菊苣和长琪等特菜，划为第四类。后两类的蔬菜富集系数较低，其可食部分对砷的积累能力较弱；在相同砷含量的土壤条件下，砷在这些蔬菜可食部分中的积累较少，即便是种植在砷含量相对较高一些的土壤中，其可食部分吸收的砷也不容易超标。因此，在种植蔬菜时，应根据土壤砷含量状况选择对砷富集能力较差的蔬菜品种 (第三类和第四类)。

为进一步探讨蔬菜砷含量、蔬菜砷富集系数与土壤砷含量之间的关系，对三者进行了相关分析 (表 7)。其结果显示：蔬菜砷含量与土壤砷含量没有显著相关性，但与砷富集系数呈极显著正相关，说明生物富集系数的变化可以很好地反映蔬菜砷浓度的变化，这与前人研究结果相似^[25]。蔬菜砷富集系数与土壤砷含量呈极显著的负相关。

3.5 北京市与国内外其他地区的蔬菜砷含量的比较

总结他人的研究结果并与本研究进行比较 (表 8) 可以看出，北京市蔬菜砷平均含

表 6 北京市主要蔬菜的砷含量、砷富集系数及其土壤砷含量

Tab. 6 Arsenic concentrations in vegetables and soils, and bioconcentration factor (BCF) of vegetables

品种	n	蔬菜砷含量 (mg/kg, 鲜重)		土壤砷含量 (mg/kg)		蔬菜砷富集系数	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
萝卜	13	0.086	0.131	9.38	5.64	0.010	0.013
小白菜	5	0.077	0.085	9.15	1.93	0.010	0.012
大白菜	12	0.048	0.050	7.86	2.48	0.007	0.006
黄瓜	8	0.062	0.042	11.52	6.09	0.007	0.005
大葱	13	0.038	0.036	7.58	2.66	0.006	0.005
油菜	4	0.042	0.025	7.88	3.37	0.005	0.002
辣椒	12	0.037	0.036	15.48	7.40	0.004	0.004
芥菜	1	0.029	- ^a	8.32	-	0.004	-
甘蓝	1	0.077	-	25.3	-	0.003	-
西红柿	4	0.024	0.025	13.92	7.79	0.002	0.003
云架豆	4	0.023	0.026	9.92	1.30	0.002	0.002
冬瓜	1	0.012	-	12.90	-	0.001	-
茄子	5	0.010	0.005	8.12	2.18	0.001	0.001
芹菜	1	0.005	-	9.72	-	0.001	-
菠菜	1	0.002	-	25.3	-	0.000	-
豆苗 (芽)	1	0.007	-	25.3	-	0.000	-
其他特菜 ^b	3	0.005	0.004	25.3	0.00	0.000	0.000
总计	89	0.046	0.064	11.10	6.37	0.006	0.007

注：a“-”表示无数据； b 其他特菜是指黑果、软化菊苣和长琪。

量(本研究结果)较低，但变异度较大，个别地区的某些蔬菜品种砷含量较高。大致来说，本次研究所采集的北京市蔬菜的砷平均含量显著高于广东中山市、山东泰安市以及克罗地亚等普通区域内的蔬菜砷平均含量，同时也高于北京市和湖北武汉市的远离污染源所采集的蔬菜砷含量；但较四川成都、陕西西安、福建省部分地区、中国 2000、2001 年部分省市的平均水平以及孟加拉国普通区域的蔬菜砷含量要低；而与广东部分地区及英国莱斯特市的蔬菜砷含量相当。一般来说，砷污染区蔬菜砷积累较为严重，其蔬菜砷含量要高于普通区域的蔬菜砷含量。

3.6 北京市居民蔬菜砷摄入量的健康风险分析

据 2002 年的统计资料^[16]，北京市总人口为 1366.6 万人，蔬菜生产量达 522.8 万 t，而北京市蔬菜自给率约为 65%^[17]。照此推算，北京市人均蔬菜消费量约为 1.6 kg/(人·d)。结合各品种蔬菜占北京市蔬菜总量的百分比(表 1)和各品种蔬菜砷含量的几何平均值(表 2)等参数，按照方程 (3) 所示的方法计算，北京市居

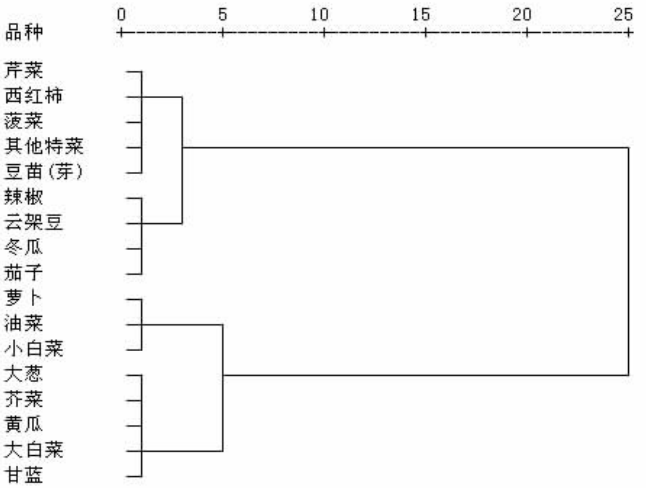


图 4 基于蔬菜砷富集系数几何均值的层级聚类分析结果

Fig. 4 Hierarchical cluster analysis based on geometric means of BCF of arsenic in vegetables from Beijing

表 7 土壤和蔬菜砷含量与蔬菜砷富集系数的相 关关系 (R)

Tab. 7 Correlation between BCF and arsenic concentrations in vegetables and soils

	土壤砷含量	蔬菜砷富集系数 (BCF)
蔬菜砷含量	-0.179	0.902**
土壤砷含量		-0.346**

**，表示 P < 0.01 (n = 89)

表 8 本次研究结果与其他研究结果比较

Tab. 8 Comparison of the results from the present study with those published by other researchers						
调查区域及样品来源		蔬菜种类	n	蔬菜砷含量 (mg/kg, 鲜重)		分析质 量控制
				范围	平均值 (标准差)	
普通 区域	北京市蔬菜生产基地和农贸市场 (本研究)	大白菜、黄瓜、西红柿、萝卜、茄子、云架豆、菠菜等共 100 个品种	310	nd-0.479	0.028 (0.045)	有
	重庆市近郊蔬菜基地 ^[27]	丝瓜、黄瓜、苦瓜、包白菜、茼蒿、萝卜、小白菜、虹豆、茄子等	52	-	0.027	不明
	浙江杭州市郊蔬菜基地 ^[28]	叶菜类	70	-	0.040	有
		根茎类			0.017	
		瓜果类			0.019	
		豆类			0.038	
	四川成都蔬菜基地和农贸市场 ^[29]	大白菜、菠菜、西红柿、甘蓝、黄瓜、韭菜、芹菜、油菜、花菜	152	0.003-0.095	0.042	不明
	陕西西安蔬菜基地和农贸市场 ^[12]	黄瓜、豇豆、芹菜、茼蒿、青椒、西红柿、茄子、生菜、油麦菜	80	0.001-0.357	0.046	不明
	山东泰安市农贸市场 ^[30]	韭菜类、小白菜、豆*/角、卷心菜、大白菜、菜花、西红柿、黄瓜	108	nd-0.235	0.006	有
	北京市东城区市场 ^[11]	品种不详	26	nd-0.075	0.016	不明
	广东省韶关、湛江、汕头、深圳和广州市场 ^[31]	小白菜、大白菜、菜心、空心菜、油菜、苋菜、圆白菜等 12 种	135	0.001-0.240	0.024	不明
	福建省福州、泉州、龙岩、尤溪的超市和农贸市场 ^[10]	叶菜	103	-	0.124 (0.222)	有
		根茎类	69	-	0.079 (0.147)	
		瓜果类	73	-	0.042 (0.056)	
	广东中山市农贸市场 ^[13]	莲藕、菜心、生菜、小塘菜、青瓜、西洋菜、菠菜、茄瓜	88	nd-0.110	0.008	不明
远离 污染 源 污染 土壤 或污 染区 域	中国 10 省市 (2000 年) ^[9]	品种不详	305	-	0.061	有
	中国 11 省市 (2001 年) ^[9]	品种不详	664	-	0.055	有
	英国莱斯特市农贸市场 ^[15]	胡萝卜、萝卜、土豆、豌豆、甘蓝、茄子、洋葱、韭葱	24	0.005-0.087	0.024	有
	克罗地亚农贸市场 ^[32]	品种不详	149	nd-0.0015	0.0004	有
	北京市蔬菜基地 ^[26]	黄瓜、油菜、萝卜	8	0.003-0.011	0.006	不明
	湖北武汉蔬菜基地 ^[26]	萝卜、油菜、云架豆	8	0.003-0.027	0.008	不明
	三峡蔬菜生产基地 ^[33]	青菜、白菜、萝卜	25	0.016-0.069	0.041	不明
	湖北荆州市靠近高速公路的蔬菜基地 ^[34]	芹菜	40	0.055-0.613	0.323	不明
	三峡燃煤污染区 ^[33]	菠菜	20	0.077-0.526	0.302	不明
		青菜、白菜、萝卜	73	0.000-0.130	0.061	不明
	湖南郴州砷污染土壤 ^[35]	辣椒、菠菜、小白菜、芹菜、雪里蕻、青菜、胡萝卜、萝卜、葱蒜等 14 种	18	0.70-22.8 (干重)	5.81 (干重)	有
	湖南郴州污染区土壤 ^[25]	白菜类、萝卜类、菠菜、葱蒜类、甘蓝、芹菜、甘薯、茼蒿、菜苔	46	0.04-2.64	0.74	有
	智利蔬菜生产基地 ^[36]	大蒜、甜菜、土豆、胡萝卜、洋葱	16	0.008-0.60	0.114 (0.029)	有
	印度孟加拉邦砷毒害发病家庭 ^[14]	土豆、洋葱、大蒜、海芋叶、豆、萝卜、番木瓜、菠菜	142	0.000-0.69	0.109	不明
	孟加拉国蔬菜生产基地 ^[15]	海芋、茄子、南瓜、 <i>Kantola</i> 、 <i>Shatkora</i> <i>lime</i> 、土豆、辣椒、萝卜	68	0.005-0.540	0.054(0.061)	有

民从蔬菜中摄入砷的量为 0.016 mg/(人·d)，低于 WHO 规定的每日无机砷允许摄入量 (ADI 值) 0.128 mg (成人，以 60kg 计)。但在中国普通人群的膳食结构中，蔬菜砷只占总砷摄入量的很少部分，约为 5%，其主要来源是谷类粮食(大米、面粉和杂粮等)，砷贡献率达 83.2%^[37]。有研究表明^[36, 38]，蔬菜中的砷大部分为毒性较强的无机砷 [As(III)和 As(V)]，两者约占蔬菜总砷含量的 87%。若以此进行折算，总体上来讲，北京市居民从蔬菜中摄入的砷的量已达到 ADI 值的 12.5%，超过全国平均水平的 5%。可见，蔬菜砷含量对北

京市居民的健康已构成一定的潜在威胁。以每天消耗蔬菜 1.6 kg 计,只要蔬菜无机砷含量达到 0.08 mg/kg (折算成总砷含量为 0.092 mg/kg),砷的摄入量即与 WHO 制订的 ADI 值相当。按照方程 (4) 所示的方法计算,北京市蔬菜砷含量高于 0.092 mg/kg 的占总样本的 0.98%,贡献率较大的蔬菜包括大白菜、萝卜、黄瓜、大葱、西红柿、大蒜等大宗蔬菜。上述计算未考虑其他食品以及大气吸入、饮用水等途径的贡献率。据研究,对于城区人群,街道尘土吸入带来砷健康风险不容忽视^[5],而饮用水还可能成为人体摄入砷的重要来源之一^[39, 40]。如将通过蔬菜摄入砷的贡献率设为 20%,那么蔬菜砷含量只要高于 0.018 mg/kg,北京市居民砷摄入量即可达到 ADI 值。而在本研究中,采用方程 (4) 所示的方法计算,北京市蔬菜砷含量高于 0.018 mg/kg 的蔬菜样本占总样本的 7.5%,其贡献率较大的几种蔬菜包括大白菜、黄瓜、萝卜、大葱、西红柿、茄子和元白菜等大宗蔬菜。

因此,尽管北京市蔬菜砷的平均含量低于《食品中砷限量卫生标准》(GB4810-94),但对部分人群而言,摄入过量蔬菜砷的健康风险仍值得关注。

4 结论

(1) 与土壤背景值相比,研究样点蔬菜基地的土壤砷含量明显偏高。

(2) 本研究中蔬菜的砷平均含量均低于我国《食品中砷限量卫生标准》(GB4810-94),但有个别样品砷含量较高,超过 WHO/FAO 制订的食品卫生标准的限量值。蔬菜砷对北京市的部分人群存在一定的潜在健康风险。

(3) 北京市裸露地蔬菜的砷含量显著高于大棚设施栽培蔬菜。本地蔬菜与外地进京蔬菜的砷含量差异不显著。油菜、萝卜、小白菜、大葱、芥菜、黄瓜、大白菜和甘蓝抗砷污染能力较弱,而辣椒、云架豆、冬瓜、茄子、菠菜、西红柿、芹菜等抗砷污染能力较强。

(4) 蔬菜砷富集系数与蔬菜砷含量呈极显著的正相关关系,而与土壤砷含量呈显著的负相关关系。

致谢:本文的研究工作先后持续 4 年多时间,许多人员曾参与部分工作:中国科学院地理科学与资源研究所罗金发研究员、吴洪涛、周建利、冯建波、陈煌、陈宝华等人曾参与调查取样和样品分析工作,北京市农林科学院植物营养与资源研究所张成军、首都师范大学傅桦教授曾参与或协助取样调查工作。在此表示谢意!

参考文献 (References)

- [1] Hung C L H, So M K, Connell D W et al. A preliminary risk assessment of trace elements accumulated in fish to the Indo-Pacific Humpback dolphin (*Sousa chinensis*) in the Northwestern waters of Hong Kong. *Chemosphere*, 2004, 56(7): 643-651.
- [2] Ferreira B L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25): 4501-4512.
- [3] Xie Zhengmiao. Effects of combined pollution of lead, zinc and arsenic on rice growth. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14 (2): 215-217. [谢正苗. 铅锌砷复合污染对水稻生长的影响. *生态学报*, 1994, 14(2): 215-217.]
- [4] Joyce S T, Robert B, Rosalind A et al. Health effect levels for risk assessment of childhood exposure to arsenic. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2004, 39(2): 99-110.
- [5] Badal K M, Kazuo T S. Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 2002, 58: 201-235.
- [6] Tsuda T, Babazono A, Yamamoto E et al. Ingested arsenic and internal cancer: a historical cohort study followed for 33 years. *American Journal of Epidemiology*, 1995, 141: 198-209.
- [7] Xie Zhengmiao, Liao Min, Huang Changyong. Effects of arsenic pollution on plants and human health and countermeasures. *Journal of Guangdong Trace Elements*, 1997, 4(7): 17-21. [谢正苗, 廖敏, 黄昌勇. 砷污染对植物和人体健康的影响及防治对策. *广东微量元素科学*, 1997, 4(7): 17-21.]

- [8] Chen Tongbin, Zheng Yuanming, Chen Huang et al. Arsenic accumulation in soils for different land use types in Beijing. *Geographical Research*, 2005, 24(2): 229-235. [陈同斌, 郑袁明, 陈煌 等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征. *地理研究*, 2005, 24(2): 229-235.]
- [9] Wang Maoqi, Wang Zhutian, Ran Lu et al. Study on food contaminants monitoring in China during 2000-2001. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32(4): 322-326. [王茂起, 王竹天, 冉陆 等. 2000-2001 年中国食品污染物监测研究. *卫生研究*, 2003, 32(4): 322-326.]
- [10] Cai Yixin, Jue Shaocong, Hua Yongyou. The backgrounds and distributing analysis of lead, arsenic and cadmium of vegetables from Fujian Province. *Hygiene Research*, 2004, 33(4): 500-501. [蔡一新, 阙少聪, 华永有. 福建省蔬菜中铅、砷、镉含量背景值与分布分析. *卫生研究*, 2004, 33(4): 500-501.]
- [11] Yu Xiaohui, Yang Yong, Zheng Lihong et al. Research on heavy metals of vegetables collected from markets. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2005, 4(1): 25-27. [余晓辉, 杨勇, 郑丽红 等. 部分市售食品金属污染物调查. *中国卫生工程学*, 2005, 4(1): 25-27.]
- [12] Ma Wangxiao, Zhou Le, Duan Min et al. Analysis of heavy metal of vegetables from Xi'an. *Journal of Northwest Science Technology University of Agriculture and Forest (Natural Science Edition)*, 2003, 31(6): 178-180. [马往校, 周乐, 段敏 等. 西安市蔬菜中重金属污染状况分析. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2003, 31(6): 178-180.]
- [13] Zhou Ridong, Wu Huigang, Huang Cheng et al. Research on mercury, lead, cadmium, arsenic and chromium of vegetables from markets of Zhongshan City, China. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2002, 12(5): 582-583. [周日东, 吴惠刚, 黄诚 等. 中山市市售蔬菜中汞、铅、镉、砷、铬含量调查. *中国卫生检验杂志*, 2002, 12(5): 582-583.]
- [14] Roychowdhury T, Uchino T, Tokunaga H et al. Survey of arsenic in food composites from an arsenic-affected area of West Bengal, India. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40: 1611-1621.
- [15] Al Rmallia S W, Harisa P I, Harringtonb C F et al. A survey of arsenic in foodstuffs on sale in the United Kingdom and imported from Bangladesh. *The Science of the Total Environment*, 2005, 337: 23-30.
- [16] Beijing Municipal Bureau of Statistics. *Beijing Statistical Yearbook*, 2002. Beijing: China Statistics Press, 2002. 72; 173. [北京市统计局. 2002 北京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2002. 72; 173.]
- [17] Liu Mingchi. The present state and perspectives on the vegetables planting of Beijing. *Journal of Beijing Agricultural Sciences*, 2002, 20(1): 1-4. [刘明池. 关于首都蔬菜生产现状和发展的思考. *北京农业科学*, 2002, 20(1): 1-4.]
- [18] Environmental Protection Agency (EPA). Acid digestion of sediments sludge and soils. USEPA 3050B. <http://www.epa.gov/SW-846/pdfs/3050b.pdf>. Revision 2, 1996, 1-12.
- [19] Yang Hui fen, Li Mingyuan, Shen Wen. *Handbook of Physicochemical Test Standards on Food Hygiene*. Beijing: Standards Press of China, 1997. 92-94. [杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册. 北京: 中国标准出版社, 1997. 92-94.]
- [20] GB/T 5009.11-1996, Determination of Total Arsenic in Foods. Beijing: Standards Press of China, 1996. [GB/T 5009.11-1996, 食品中总砷的测定方法. 北京: 中国标准出版社, 1996.]
- [21] Chen Tongbin, Zheng Yuanming, Chen Huang et al. Background concentrations of soils heavy metal in Beijing. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 117-122. [陈同斌, 郑袁明, 陈煌 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究. *环境科学*, 2004, 25(1): 117-122.]
- [22] GB4810-94. Tolerance Limit of Arsenic in Foods. Beijing: Standards Press of China, 1994. [GB4810-94, 食品中砷限量卫生标准. 北京: 中国标准出版社, 1994.]
- [23] Beijing Municipal Bureau of Statistics. *Beijing Statistical Yearbook*, 2004. Beijing: China Statistics Press, 2004. 219. [北京市统计局. 2004 北京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2004. 219.]
- [24] Chen Tongbin, Wei Chaoyang, Huang Zechun et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(3): 207-210. [陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. *科学通报*, 2002, 47(3): 207-210.]
- [25] Cai Baosong, Chen Tongbin, Liao Xiaoyong et al. Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 711-717. [蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响. *生态学报*, 2004, 24(4): 711-717.]
- [26] Xia Lijiang, Hua Luo, Wei Dongpu. Arsenic contents in vegetables from several areas. *Soils*, 1996, (2): 105-110. [夏立江, 华璐, 韦东普. 部分地区蔬菜中的含砷量. *土壤*, 1996, (2): 105-110.]
- [27] Li Qilin, Zhao Zhongjin, Huang Yun. Present situation of quality in soils and vegetables of the vegetables bases in suburbs of Chongqing. *Environmental Science of Chongqing*, 2000, 22(6): 33-37. [李其林, 赵中金, 黄昀. 重庆市近郊蔬菜基地土壤和蔬菜中重金属的质量现状. *重庆环境科学*, 2000, 22(6): 33-37.]
- [28] Jiao Li, Ye Xuhong, Hu Qinhai et al. Heavy metal content research of vegetable in Hangzhou vegetable base. *Environment Pollution and Protection*, 2003, 25(4): 248-249. [焦荔, 叶旭红, 胡勤海 等. 杭州市区蔬菜基地蔬菜重金

- 属含量研究. 环境污染与防治, 2003, 25(4): 248-249.]
- [29] Luo Xiaomei, Zhang Yirong, Yang Dingqing. Pollution analysis and assessment of heavy metals in vegetables from Chengdu. *Sichuan Environment*, 2003, 22(2): 49-51. [罗晓梅, 张义蓉, 杨定清. 成都地区蔬菜中重金属污染分析与评价. *四川环境*, 2003, 22(2): 49-51.]
- [30] Wang Yulian, Liu Bing, Liu Qun. The present situation of chemical pollutant on vegetables in the summer and the preventing measures. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2004, 35(2): 191-195. [王玉莲, 刘冰, 刘群. 泰安市夏季蔬菜中化学污染物污染状况及预防控制措施的研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 35(2): 191-195.]
- [31] Liang Chunsui, Deng Feng, Huang Weixiong et al. Network monitoring and dynamic analysis of chemical contaminants in agricultural products in Guangdong. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2003, 15(5): 395-401. [梁春穗, 邓峰, 黄伟雄等. 广东省食物中化学污染物的网点监测与动态分析. *中国食品卫生杂志*, 2003, 15(5): 395-401.]
- [32] Jasenka S P, Davorin B C, Helena K. Estimation of dietary intake of arsenic in the general population of the Republic of Croatia. *The Science of the Total Environment*, 1996, 191: 119-123.
- [33] Pu Chaowen, Xiong Xiangzhong, Cao Yong et al. Analysis on arsenic content in of food and drinking water in the area of Three Gorge Project. *Journal of Preventive Medicine Information*, 2001, 17(6): 429-430. [蒲朝文, 熊祥忠, 曹勇等. 三峡地区食物及饮用水砷含量调查. *预防医学情报杂志*, 2001, 17(6): 429-430.]
- [34] Zhang Zhuqing, Yang Yuhua. The present state and influence factors of heavy metal and arsenic pollution in Jingzhou city, Hubei Province. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2001, 21(2): 141-143. [张竹青, 杨玉华. 荆州市蔬菜重金属和砷污染现状及影响因素. *湖北农学院学报*, 2001, 21(2): 141-143.]
- [35] Xie Hua, Liao Xiaoyong, Chen Tongbin et al. Arsenic in plants of farm land and its healthy risk, Chenzhou City, Hunan Province. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 151-159. [谢华, 廖晓勇, 陈同斌等. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估. *地理研究*, 2005, 24(1): 151-159.]
- [36] Ociel M, Oscar P D, Irma L et al. Vegetables collected in the cultivated Andean area of northern Chile: total and inorganic arsenic contents in raw vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50: 642-647.
- [37] Zhang Lei, Gao Junquan. Comparison of the quantity of harmful elements in dietary of China with several developed countries. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32(3): 268-271. [张磊, 高俊全. 中国与一些发达国家膳食有害元素摄入量状况比较. *卫生研究*, 2003, 32(3): 268-271.]
- [38] Oscar P D, Irma L, Ociel M et al. Contribution of water, bread, and vegetables (raw and cooked) to dietary intake of inorganic arsenic in a rural village of northern Chile. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52: 1773-1779.
- [39] Dante D C, Paulina P, Nestor M et al. Exposure to inorganic arsenic in drinking water and total urinary arsenic concentration in a Chilean population. *Environmental Research*, 2005, 98(2): 151-159.
- [40] Kris C. The arsenic threat worsens. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(13): 286-291.

A Survey of Arsenic Concentrations in Vegetables and Soils in Beijing and the Potential Risks to Human Health

CHEN Tongbin¹, SONG Bo^{1,2}, ZHENG Yuanming¹, HUANG Zechun¹,
ZHENG Guodi¹, LI Yanxia¹, LEI Mei¹, LIAO Xiaoyong¹

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS,
Beijing 100101, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to assess the risks to human health posed by elevated concentrations of arsenic in vegetables, and to identify pollution-tolerant vegetable varieties, a large scale survey of arsenic levels in soils and vegetables planted or sold in Beijing was conducted. Thirty-nine soil samples were collected from gardens and fields used to grow vegetable plants. In addition, 93 varieties of more than 400 fresh vegetable samples were obtained from vegetable stalls, supermarkets and wholesale outlets. Arsenic concentrations were measured using hydride

generation atomic fluorescence spectroscopy (HG-AFS). Arsenic concentrations in soils ranged from 4.44 to 25.3 mg kg⁻¹, with arithmetic and geometric means of 9.40 and 8.79 mg kg⁻¹, respectively. Compared with the background arsenic concentrations of soil from Beijing, there appeared to be a significant accumulation of arsenic in soil collected from gardens/fields that produce vegetables. Arsenic concentrations in the edible plant portions ranged from less than the analytical detection limit (0.1 µg kg⁻¹ fresh weight) to 0.479 mg kg⁻¹ fresh weight, with a mean of 0.028 mg kg⁻¹ fresh weight. In all of the samples, arsenic was less than the Tolerance Limit of Arsenic in Foods for China (TLAFC) of 0.5 mg kg⁻¹ fresh weight. The TLAFC is the maximum permissible concentration of arsenic in vegetables that will be consumed by people. The highest level of arsenic detected in a vegetable plant was 0.479 mg kg⁻¹, which was measured in a radish (*Raphanus* sp.) sample obtained from the Fengtai District of Beijing. Arsenic was detected at 0.331 mg kg⁻¹ in a garlic sample collected from Shandong Province, which is higher than the standard of 0.25 mg kg⁻¹ set by WHO/FAO. The spatial distribution of arsenic concentrations in vegetables planted in Beijing presented apparently a "U-shaped" pattern at the northeast deflection angle of 11°-30°. The arsenic concentration in field-grown vegetables was significantly higher than the concentration of those planted in a greenhouse. Results of hierarchical cluster analysis on the arsenic bioconcentration factor (BCF) in vegetables indicated that the plants sampled could be separated into two groups based on BCF. Rape (*Brassica campestris*), radish (*Raphanus* sp.), pakchoi (*Brassica chinensis*), onion (*Allium fistulosum*), mustard (*Brassica juncea*), cucumber (*Cucumis sativus*), Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*) and cabbage (*Brassica caulorapa*) had higher arsenic BCFs while chili (*Capsicum annuum*), beans round trellis (*Vigna unguiculata*), wax gourd (*Beninacasa hispida*), eggplant (*Solanum* sp.), spinach (*Spinacia oleracea*), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and celery (*Apium graveolens*) had lower arsenic BCFs. The average ingestion rate of arsenic from vegetables was 0.016 mg/person/day for people of Beijing. Consuming vegetables with elevated arsenic concentrations may pose a health risk to local residents, particularly the young, elderly, or ill.

Key words: arsenic; Beijing; vegetables; soil; regional differentiation; human health risk; pollutant-resistant plants