

宋 波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 2006. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析 [J]. 环境科学学报, 26(8): 1343 - 1353
Song B, Chen TB, Zheng YM, et al. 2006. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(8): 1343 - 1353

[免审稿件] 责任编辑提示: 本刊欢迎广大读者针对免审稿件提出各种意见

北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析

宋 波^{1, 2}, 陈同斌^{1,*}, 郑袁明¹, 黄泽春¹, 郑国砥¹, 罗金发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

收稿日期: 2006-01-01 录用日期: 2006-05-15

摘要: 通过对北京市蔬菜和菜地土壤镉含量状况进行大规模调查, 研究了蔬菜和土壤镉含量及其健康风险, 并筛选出抗镉污染能力强的蔬菜品种。根据蔬菜的消费量同时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 97 种蔬菜 363 个样品和 54 个土壤样品。研究发现: 北京市菜地土壤镉积累明显, 其范围为 $0.091 \sim 0.971 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其算术均值和 Box-Cox 均值分别为 0.229 和 $0.187 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中有两个样点土壤镉含量(0.971 和 $0.886 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)超过《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)中的二级标准($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 北京市蔬菜镉含量范围、算术均值和 Box-Cox 均值分别为 $0.1 \sim 101.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 叶菜类和根茎类蔬菜的镉平均含量显著高于瓜果类和特菜; 北京市本地生产蔬菜与市售外地产蔬菜的镉含量没有显著差异; 裸露地蔬菜镉含量显著高于设施蔬菜; 小白菜、辣椒、茄子、萝卜和大白菜镉富集系数较高, 其抗镉污染能力较弱, 而冬瓜、黄瓜、叶甜菜、大葱、云架豆、甘蓝、西红柿等镉富集系数较低, 其抗镉污染能力较强。北京市居民每人从蔬菜中摄入镉的量为 $12.2 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 蔬菜镉对北京市部分人群存在一定的潜在健康风险。

关键词: 北京市; 蔬菜; 镉; 健康风险; 抗污染品种

文章编号: 0253-2468(2006)08-1343-11

中图分类号: X820.4

文献标识码: A

A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health

SONG Bo^{1, 2}, CHEN Tongbin^{1,*}, ZHENG Yuanming¹, HUANG Zechun¹, ZHENG Guodi¹, LUO Jinfa¹

1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received 1 January 2006; accepted 15 May 2006

Abstract: In order to assess the human health risk posed by elevated concentrations of cadmium in vegetables, and to identify pollution-tolerant vegetable varieties, a large scale survey of cadmium levels in soil and vegetables planted or sold in Beijing was conducted. Fifty-four soil samples were collected from gardens and fields used to grow vegetable plants. In addition, 97 varieties of 363 fresh vegetable samples were obtained from vegetable stalls, supermarkets and wholesale outlets. Cadmium concentrations were measured using graphite furnace atomic absorption spectrometry (GF-AAS). Cadmium concentrations in soils ranged from 0.091 to $0.971 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with arithmetic, geometric and Box-Cox means of 0.229 , 0.201 and $0.187 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Compared with the background cadmium concentrations of soil from Beijing, there appeared to be a significant accumulation of cadmium in soil collected from fields that produce vegetables. Cadmium concentrations in the edible plant portions ranged from less than the analytical detection limit ($0.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ fresh weight) to $101.4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ fresh weight, with arithmetic, geometric and Box-Cox means of 12.8 , 8.4 and $10.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ fresh weight, respectively. In 98.3% of the samples, cadmium was less than the Tolerance Limit of Cadmium in Foods (TLCF) of $50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ fresh weight. The TLCF is the maximum permissible concentration of cadmium in vegetables that will be consumed by people. The highest level of cadmium detected in a vegetable plant was $101.4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was measured in a water shield (*B. nasenia schreberi*) sample obtained from the

基金项目: 国家杰出青年基金项目(No. 40325003); 北京市自然科学基金重大项目(No. 6990002)

Supported by the National Science Fund of China for Distinguished Young Scholars (No. 40325003) and the Program of Beijing Natural Science Foundation (No. 6990002)

作者简介: 宋 波(1972—), 男, 博士研究生, E-mail: songb@igsnrr.ac.cn; *通讯作者(责任编辑), E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

Biography: SONG Bo (1972—), male, Ph.D. candidate, E-mail: songb@igsnrr.ac.cn; *Corresponding author, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

Changping district of Beijing Cadmium was detected at 61.6 and 50.8 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in two eggplant (*Solanum* sp.) samples, 58.0 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in Youmaicai (Chinese lettuce) and 51.0 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in a sugarbeet sample. Only the eggplant samples exceeded the WHO/FAO and European Community (EC) cadmium standard of 50 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for vegetables other than leaves and rhizomes. The cadmium concentration in field-grown vegetables was significantly higher than the concentration of those planted in a greenhouse.

Results of hierarchical cluster analysis on the cadmium bioconcentration factor (BCF) in vegetables indicated that the plants sampled could be separated into two groups based on BCF. Pakchoi (*B. rapa chinensis*), Chinese cabbage (*B. rapa pekinensis*), radish (*Raphanus*), chili (*Capsicum annuum*) and eggplant (*Solanum* sp.) had higher cadmium BCFs while cucumber (*Cucumis sativus*), wax gourd (*Benincasa hispida*), spinach (*Spinacia oleracea*), beans round trellis (*Vigna unguiculata*), welsh onion (*Allium fistulosum*), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and cabbage (*B. rapa caudata*) had lower cadmium BCFs. The average ingestion rate of cadmium from vegetables was 12.2 $\mu\text{g}/\text{individual}/\text{day}$ for people of Beijing. Consuming vegetables with elevated cadmium concentrations may pose a health risk to local residents, particularly the young, elderly, or ill.

Keywords: cadmium; Beijing; vegetables; soil; bioaccumulation; human health risk; pollutant-resistant plants

1 引言 (Introduction)

镉是一种积累性的剧毒元素(夏增禄等, 1987; 陈怀满等, 1996), 人体某些器官中的镉含量随着年龄的增长而增加(陈怀满等, 1996). 对镉的环境行为、污染防治等方面的研究一直受到广泛关注(夏增禄等, 1987; 陈怀满等, 1996; Kaiser, 1998; 陈同斌等, 2002a; 2004). 镉易通过农作物途径进入人体造成毒害. 世界卫生组织(WHO)(2003)和美国环保局(USEPA)(1994)所规定 Cd 的最大允许摄入量(ADI 值)均为 $1\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

环境中镉的来源包括自然来源和人为来源. 前者主要来自岩石和矿物, 后者主要指由工农业生产活动直接或间接地将镉排放到环境中. 镉常被用于电镀、油漆着色剂、合金抗腐蚀和抗磨擦剂、塑料稳定剂、光敏元件的制备以及电池生产等行业(Nriagu *et al*, 1988; 郭笃发, 1994; Kelly *et al*, 1996). 这些行业的发展必然使镉进入土壤、水体和大气环境中(Lindstrom, 2001; Lin *et al*, 2002; Nicholson *et al*, 2003). 此外, 在镀锌的金属、硫化的轮胎、磷肥和污泥中也夹杂着一定数量的镉(Williams *et al*, 1973; 1976; 林忠辉等, 2000; McBride, 2003).

对于动物和大多数人群来说, 食物是镉的主要来源(郭笃发, 1994). 镉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(Zhang *et al*, 1998; 王茂起等, 2003; 蔡一新等, 2004; Munoz *et al*, 2005). 人们通过食物摄取的镉量随食物性质不同而异. 随着人民生活水平的提高, 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镉, 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镉含量状况, 对于区域内蔬菜镉含量总体状况的代表意义有限, 更难以对蔬菜镉的健康风险进行有效评估. 到目前为止, 这些研究多着眼于镉含量的分析, 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.

土壤和蔬菜的重金属含量及其健康风险是学术界、政府和公众普遍关注的问题. 我们曾就北京市菜地和蔬菜中砷含量状况及其健康风险(陈同斌等, 2006)、不同土地利用方式对北京市土壤重金属含量影响(郑袁明等, 2005a; 2005b; 2005c; 2005d; 2006)、污水灌溉对土壤和粮食作物重金属积累的影响(杨军等, 2005a; 2005b)和北京市蔬菜重金属信息系统(陈煌等, 2003)等问题进行过系统研究, 而对于北京市菜地土壤和蔬菜镉含量总体状况以及蔬菜镉对居民健康风险等问题仍缺乏研究. 根据北京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镉含量及其健康风险, 并探讨不同蔬菜种类对土壤镉的富集情况, 以筛选出抗镉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 (Materials and methods)

2.1 土壤样品的采集与处理

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 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 正方形 4 个顶点和中心点, 各取表层($0 \sim 20\text{ cm}$)土壤 1 kg, 混匀后用四分法从中选取 1 kg 土壤作为混合样品. 采样过程没有与金属工具接触. 土壤样品在室内风干, 去除杂物, 过 1 mm 尼龙筛, 用四分法取部分样品过 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、塑料或玛瑙等工具。

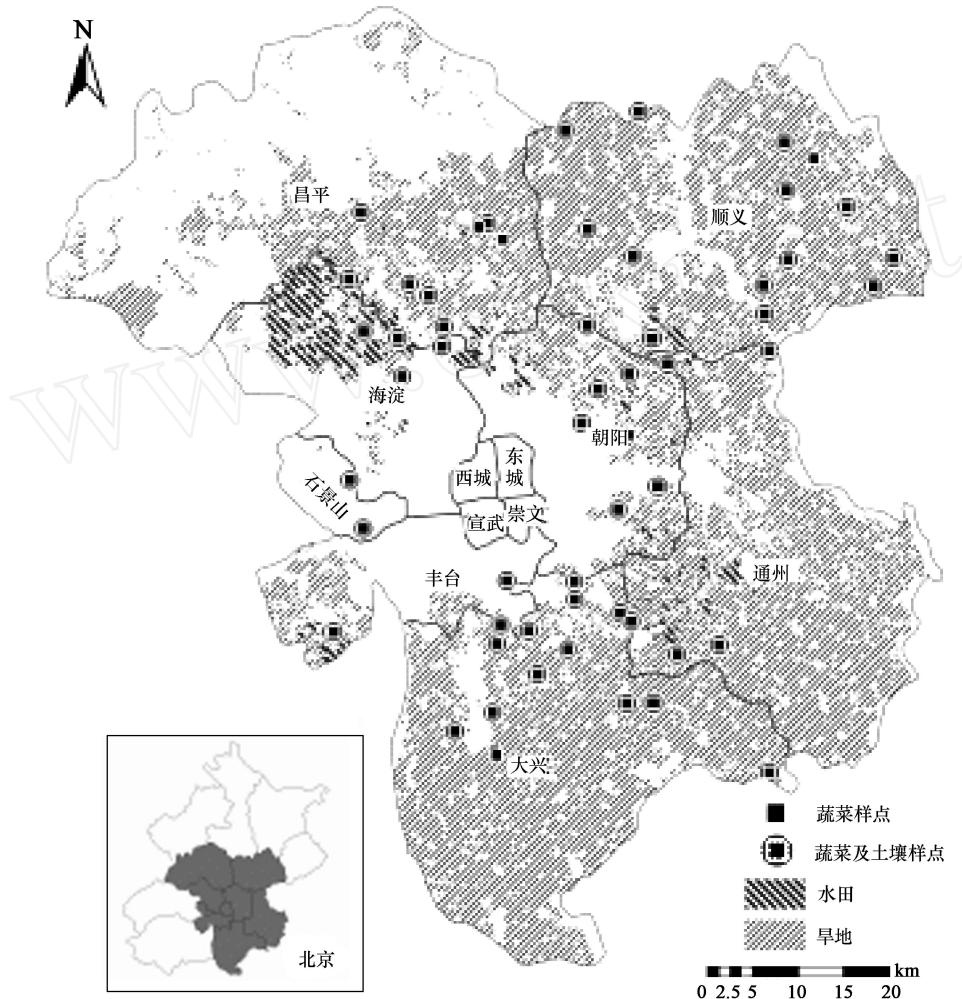


图 1 北京市蔬菜采样点区域分布图

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

2.2 蔬菜样品的采集与处理

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,根据生产量优先并兼顾品种多样性的原则进行蔬菜采样。2001年北京市蔬菜生产总量为 522.8×10^4 t,其中19种蔬菜的产量之和占全市蔬菜总产量的74.9% (北京市统计局, 2002; 陈同斌等, 2006);除采集大宗蔬菜外,根据北京市的蔬菜消费特点还采集了牛蒡、水晶菜、球茎茴香、木耳菜、樱桃萝卜、乌塌菜、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,又兼顾到消耗量较小但在饮食结构中占据一定比例的特菜品种;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分配差异过大,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:

$$n_i = \frac{\sqrt{a_i}}{\sqrt{a_i}} \times N \quad (1)$$

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3大批发市场和超市采集市售蔬菜。

蔬菜预处理方法:摘取新鲜成熟期的可食部分作为样品,蔬菜鲜样采集后马上装入塑料袋中,密封以防水分蒸发。大白菜、圆白菜、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;萝卜等块根类蔬菜去掉茎叶,留下块根。样品用自来水反复清洗,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℃下烘48 h,粉碎备用。

2.3 镉的测定与质量控制

土壤样品采用美国国家环保局推荐的USEPA3050B方法消煮(EPA, 1996),石墨炉-原子吸收光谱法测定镉(杨惠芬等, 1998)。分析过程加入国家标准土壤样品(GSS-1)进行质量控制。蔬菜样品采用HNO₃-HClO₄方法消煮,石墨炉-原子吸收光谱法测定镉(杨惠芬等, 1998)。分析过程加入国家标准植物样品(GSV-3)进行质量控制。分析过程所用试剂均为优级纯,所用的水均为超纯水(蒸馏水)。

2.4 数据统计分析

本研究采用Arc GIS制作样点分布图,Origin检验数据频率分布状况(Shapiro-Wilk法,检验结果用P_{SW}表示),方差分析和聚类分析则采用SPSS完成,而用Minitab进行数据的Box-Cox转换。Box-Cox平均值是采用Box-Cox转换的逆运算而得,即z = $\sqrt{y + 1}$,式中,z为Box-Cox平均值,y为Box-Cox转换后的平均值, λ 为最优转换系数。

2.5 蔬菜镉摄入量的估算

居民每日从蔬菜中摄入镉的总量与各品种蔬菜的消费量权重以及蔬菜镉的含量密切相关。在计算蔬菜的消费量权重时,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(2)所示:

$$w_{Cd\text{摄入}} = Q \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\overline{X}_{(B-C)_i}}{N_i^2} \cdot \frac{N_i^2}{n} \right) \quad (2)$$

式中,w_{Cd}摄入为居民从蔬菜中摄入镉的总量;Q为日均蔬菜消费量; $\overline{X}_{(B-C)_i}$ 为i类蔬菜镉含量的Box-Cox均值;N_i为i类蔬菜的样本数;n为蔬菜品种数。

2.6 蔬菜镉综合超标率的计算

区域内蔬菜镉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,采

用与1.5节类似的计算方法,蔬菜镉综合超标率计算方法如方程(3)所示:

$$A = \sum_{i=1}^n \left(a_i \cdot \frac{N_i^2}{N_j^2} \right) \quad (3)$$

式中,A为蔬菜镉综合超标率,a_i为i类蔬菜镉超标率,N_i为i类蔬菜的样本数;n为蔬菜品种数。

3 结果(Results)

3.1 菜地土壤镉含量特征

本研究共获得54个菜地土壤的有效数据,其中位值为0.193 mg·kg⁻¹,其它统计参数如表1所示。经检验,菜地土壤镉含量呈正偏度分布(图2),由于2个较高异常值(0.971和0.886 mg·kg⁻¹,均出现在顺义区)的影响,数据总体上不服从对数正态分布。若排除2个异常值的影响,菜地土壤镉含量符合对数正态分布(表1);与北京市土壤镉背景含量的几何均值(算术均值为0.145 mg·kg⁻¹,几何均值为0.119 mg·kg⁻¹)(陈同斌等,2004)相比,二者差异达到极显著水平(ANOVA, p < 0.001)。可见,菜地土壤的镉含量偏高,存在明显的积累现象。除顺义区2个样点较高外,北京市菜地土壤镉含量均低于《土壤环境质量标准》(GB15618-95,1995)为农业土壤在碱性环境(pH > 7.5)中设定的标准。因此,除个别样点可能由于受到污染而不适合农业耕作外,对于pH多为7.5~8.5(黄荣金等,1996)的北京市菜地土壤适合蔬菜栽培(图2)。

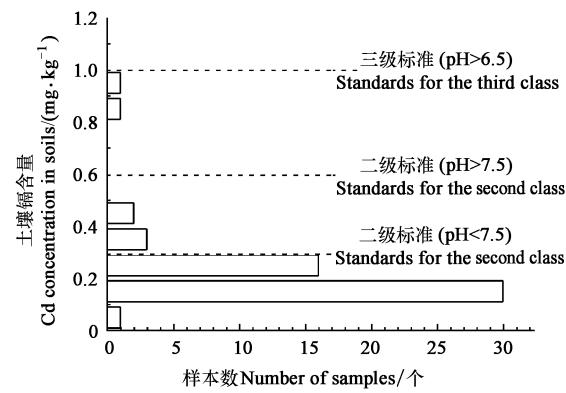


图2 北京市菜地土壤镉含量频率分布图

Fig 2 Distribution of soil Cd in farm fields of Beijing

另外,将北京市菜地土壤镉含量全部数据经Box-Cox(McGrath et al., 2004)转换后服从正态分布,其最优转换系数(λ)为-0.85,Box-Cox均值为0.187 mg·kg⁻¹,低于非正态分布下算术均值和几何

均值.

表 1 北京市菜地土壤镉含量及其分布特征

Table 1 Concentrations and distribution characteristics of soil Cd from farm fields in Beijing

项目	范围 Range	中值 Median	土壤镉含量 Cd concentration in soils / (mg·kg ⁻¹)				Box-Cox p_{SW}	
			算术		几何			
			均值 (标准差) Mean (S D.)	p_{SW}	均值 (标准差) Mean (S D.)	p_{SW}		
原数据 Origin data	0.091 ~ 0.971	0.193	0.229 (0.158)	0	0.201 (1.57)	0	0.187 (0.001)	
修正后 ¹⁾ Data modified	0.091 ~ 0.460	0.190	0.202 (0.077)	0	0.190 (1.41)	0.41	0.181 (0.001)	

1): “修正后”意为排除 2 个异常值 (0.971 和 0.886 mg·kg⁻¹) 的影响后所得

3.2 蔬菜镉含量特征

本研究共获得 97 种蔬菜 363 个样品的有效数据,蔬菜样品中有 197 个样品直接采自北京市各区的菜地,101 个为市售的本地产蔬菜,其它 65 个为市售的外地蔬菜。从表 2 来看,除莼菜镉含量较高 (101.4 μg·kg⁻¹) 外,还有 4 个样本 (茄子, 61.6 和 50.6 μg·kg⁻¹; 叶甜菜, 51.0 μg·kg⁻¹; 油麦菜, 58.0 μg·kg⁻¹) 的镉含量超过《食品中镉限量卫生标准》(1994) 规定的限量值 (50 μg·kg⁻¹ 鲜重); 但各品种蔬菜中,除莼菜外,其它品种蔬菜镉的平均含量均低于《食品中镉限量卫生标准》(1994)。按照方程 (3) 所示的方法计算,与我国食品卫生标准相比,北京市蔬菜镉含量综合超标率为 0.90%。而与联合国粮农组织 (FAO) 和世界卫生组织 (WHO) 联合制订的限量标准 (叶菜 200 μg·kg⁻¹, 其它蔬菜 50 μg·kg⁻¹) (FAO/WHO, 2001) 以及欧盟制订的限量

标准 (叶菜 200 μg·kg⁻¹, 根茎类 100 μg·kg⁻¹ 和其它蔬菜 50 μg·kg⁻¹) (EC, 2001) 相比较, 只有 2 个茄子样本镉含量超标, 按照方程 (3) 所示的方法计算, 与 WHO/FAO 和欧盟 (EC) 标准相比, 北京市蔬菜镉含量综合超标率为 0.58%。

经检验, 蔬菜 Cd 含量的原始数据呈正偏度分布, 经对数转换后呈负偏度分布, Box-Cox 转换可使数据服从正态分布 (表 3), 为 0.342, 蔬菜镉含量的 Box-Cox 均值介于算术均值与几何均值之间。从表 2 可见, 叶菜类和根茎类蔬菜的镉含量较高, 可划为 I 类; 瓜果类和特菜类蔬菜的镉含量较低, 归为 II 类。方差分析表明, I 类蔬菜的镉含量显著高于 II 类, 但叶菜类和根茎类之间以及瓜果类与特菜类之间的差异均不显著。这与前人的研究结果相似 (罗晓梅等, 2003)。

表 2 北京市各种蔬菜的镉含量

Table 2 Concentrations of Cadmium in vegetables collected from farm fields and markets of Beijing

蔬菜品种 Species of vegetables	样本数 (N) No. of samples	范围 Range	蔬菜镉含量 Cd concentration in vegetables / (μg·kg ⁻¹)					
			算术		几何		Box-Cox	
			平均值 Mean	标准差 S D.	平均值 Mean	标准差 Geom. S D.	平均值 Box-Cox Mean	标准差 Box-Cox S D.
大白菜	41	1.5 ~ 48.6	18.5	8.8	16.2	1.8	17.0	3.1
大葱	20	0.1 ~ 38.3	10.4	8.6	6.6	3.8	8.2	4.5
油(麦)菜 ^A	15	8.1 ~ 58.0	20.7	13.2	18.1	1.7	18.9	3.3
甘蓝 ^B	13	1.6 ~ 20.1	8.0	5.4	6.5	2.0	7.0	3.0
小白菜 ^C	12	11.7 ~ 33.9	22.2	7.5	20.9	1.4	21.4	2.4
苗(芽)菜 ^D	9	0.3 ~ 23.0	4.2	7.1	1.9	3.6	2.4	4.4
菜花	7	4.2 ~ 20.9	14.9	6.8	13.2	1.8	13.8	3.0
芹菜	6	1.9 ~ 2.8	2.4	0.4	2.4	1.2	11.0	2.4
圆白菜	6	5.6 ~ 17.0	11.6	4.8	10.7	1.6	2.4	1.2

续表

蔬菜品种 Species of vegetables	样本数 (N) No. of samples	范围 Range	蔬菜镉含量 Cd concentration in vegetables / ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)					
			算术		几何		Box-Cox	
			平均值 Mean	标准差 S.D.	平均值 Mean	标准差 Geom. S.D.	平均值 Box-Cox Mean	标准差 Box-Cox S.D.
菠菜	5	11~23.4	18.1	5.2	17.4	1.4	17.6	2.1
芥菜 ^E	4	9.6~38.5	21.0	12.4	18.5	1.8	19.3	3.6
生菜	4	6.7~21.4	15.7	6.4	14.4	1.7	14.9	2.8
甜菜	3	0.7~51.0	22.7	25.7	8.4	9.2	13.6	14.3
西兰花	3	3.6~37.1	21.3	16.8	14.6	3.4	17.1	7.3
茼蒿	3	2.8~5.2	4.0	1.2	3.8	1.4	3.9	1.6
大蒜	3	3.6~14.5	8.1	5.7	6.8	2.0	7.2	3.2
菜心	3	8.6~26.2	17.3	8.8	15.6	1.7	16.2	3.2
空心菜	1	27.9	27.9	—	27.9	—	27.9	—
叶菜类	158	0.1~58.0	14.9	10.5	10.5	2.8	12.2	4.5
萝卜 ^F	24	2.6~36.6	15.2	9.4	12.8	1.9	13.6	3.3
土豆	3	6.4~32.9	17.7	13.7	14.2	2.3	15.3	4.8
蒜苗	3	4.2~10	8.1	3.3	7.5	1.6	7.7	2.3
莴苣	2	8.1~36.6	22.3	20.2	17.2	2.9	19.0	7.3
洋葱	1	2.8	2.8	—	2.8	—	2.8	—
藕	1	10	10.0	—	10.0	—	10.0	—
根茎类	34	2.6~36.6	14.7	10.0	11.9	2.0	12.8	3.6
黄瓜	23	0.1~15.4	4.6	3.5	2.6	4.3	3.5	3.6
西红柿 ^G	22	0.9~16	7.5	4.9	5.7	2.3	6.4	3.2
云架豆 ^H	21	0.1~14.9	7.9	4.1	6.0	3.0	6.9	3.2
辣椒 ^I	18	4.6~46.4	17.9	11.3	14.8	1.9	15.8	3.7
茄子	17	5.2~61.6	19.2	15.9	15.0	2.0	16.2	4.4
冬瓜	11	1.2~13	4.6	3.2	3.8	1.9	4.1	2.5
荷兰豆	4	1.3~14.1	7.2	6.6	4.5	3.4	5.4	4.8
西葫芦	3	3.7~6.2	4.5	1.5	4.4	1.4	4.4	1.6
毛豆	1	30.9	30.9	—	30.9	—	30.9	—
丝瓜	1	1.5	1.5	—	1.5	—	1.5	—
瓜果类	121	0.1~61.6	10.0	10.0	6.3	3.2	7.6	4.4
彩椒 ^J	6	2.5~22.5	13.2	7.1	10.8	2.2	11.8	3.6
特种萝卜 ^K	5	2.3~17.1	9.5	6.9	7.3	2.4	8.0	3.8
荷兰黄瓜	4	0.4~14	4.5	6.4	2.0	4.4	2.7	5.1
圣女西红柿	3	6.5~11.4	9.7	2.8	9.4	1.4	9.5	1.8
白凤菜	2	4.9~13.1	9.0	5.8	8.0	2.0	8.3	3.2
紫贝天葵	2	9.6~31.4	20.5	15.4	17.3	2.3	18.4	5.3
韭菜	2	2.1~9	5.5	4.9	4.3	2.8	4.7	3.9
荷兰茄子	1	4.4	4.4	—	4.4	—	4.4	—
莼菜	1	101.4	101.4	—	101.4	—	101.4	—
蕃杏	1	1.0	1.0	—	1.0	—	1.0	—
其它特菜 ^L	23	0.6~37.2	10.1	9.0	6.2	3.2	7.6	4.8
特菜类	50	0.4~101.4	11.7	15.3	6.6	3.2	8.2	5.3
全部种类	363	0.1~101.4	12.8	11.3	8.4	3.0	10.0	4.7

A. 油麦菜、油菜和小油菜；B. 羽衣甘蓝、紫甘蓝、元白菜和抱子甘蓝；C. 小白菜、奶油白菜和小白菜苔；D. 萝卜苗、豆瓣菜、豌豆苗、黑豆苗、黑豆芽、黄豆芽、豌豆苗和绿豆芽；E. 芥蓝、芥菜和野生芥菜；F. 萝卜、白萝卜、水萝卜和胡萝卜；G. 西红柿、樱桃西红柿和香蕉西红柿；H. 云架豆、豇豆和豆角；I. 辣椒、尖椒、大椒和青椒；J. 黄彩椒和红彩椒；K. 樱桃萝卜、卞萝卜和钢笔萝卜；L. 乌塌菜、茴香、香杏、香菇（猴头菇）、羌、水晶菜、紫三地、马兰菜、香椿、球茎茴香、黑果、京舟一号、长琪、珍珠菜、牛蒡、香葱、珍珠菇、芦笋、人参果、软化菊苣、凉瓜、金珠、茭白。

表 3 北京市各类别蔬菜镉含量的峰度、偏度以及正态检验结果

Table 3 Kurtosis, skewness and p_{SW} for Cd in vegetables collected from farm fields and markets of Beijing

蔬菜类别 vegetables types	样本数 (N) No. of samples	原数据 Origin data			对数转换 Logarithmic transformation			Box-Cox转换 Box-Cox transformation		
		峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	p_{SW}	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	p_{SW}	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	p_{SW}
叶菜类 leaf vegetables	158	2.1	1.1	0	3.4	-1.55	0.00	0.01	-0.40	0.05
根茎类 rootstalk vegetables	34	0.5	1.2	0	0.04	-0.16	0.22	-0.20	0.44	0.06
瓜果类 gourd and fruit vegetables	121	8.5	2.6	0	3.8	-1.44	0	0.89	0.33	0.20
特菜类 special vegetables	50	24.6	4.4	0	-0.03	-0.43	0.24	2.11	0.81	0.06
全部蔬菜 all vegetables	363	12.0	2.5	0	2.9	-1.31	0.00	0.29	0.06	0.74

3.3 不同来源的蔬菜镉含量差异

3.3.1 本地产蔬菜与外地产蔬菜镉含量 据统计, 2000年北京市蔬菜自给率为65% (刘明池, 2002), 其余则主要由河北、山东、广东、内蒙古和天津等地供应。从表4来看, 北京市本地产和市售外地产蔬菜

镉含量原数据呈正偏度分布, 经过Box-Cox转换可使数据呈正态分布。Box-Cox均值差异分析结果表明, 北京市本地产蔬菜与市售外地产蔬菜的镉含量没有显著差异。

表 4 北京市本地产和市售外地产蔬菜镉含量比较

Table 4 Comparison of Cd concentrations in vegetables produced in Beijing with those sold in Beijing markets produced from other Provinces of China

蔬菜来源 Sources	样本数 (N) No. of samples	蔬菜镉含量 Cd concentration in vegetables / ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)					原数据 Origin data		Box-Cox转换 Box-Cox transformation	
		范围 Range	算术		Box-Cox			p_{SW}	偏度 Skewness	p_{SW}
			平均值 Mean	标准差 S D.	平均值 Cox mean	标准差 Cox S D.				
本地 Beijing City	298	0.1~101.4	13.0	11.3	10.2	4.6	2.67	0	0.07	0.79
外地 Other cities	65	0.1~48.6	12.1	10.9	9.1	5.1	1.40	0	0.07	0.64

3.3.2 裸露地蔬菜与设施栽培蔬菜镉含量 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 $2.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中蔬菜栽培约占68%, 其产量达 $154.3 \times 10^4 \text{ t}$ (北京市统计局,

2004)。表5为北京市裸露地蔬菜和设施栽培蔬菜镉含量的比较结果。从结果来看, 裸露地蔬菜中镉含量的Box-Cox均值高于设施蔬菜, 其差异达到极显著水平 (ANOVA, $p < 0.013$)。

表 5 裸露地蔬菜和设施栽培蔬菜镉含量比较

Table 5 Comparison of Cd concentrations in vegetables grown in open fields with those grown in greenhouse

蔬菜来源 Sources	样本数 (n) No. of samples	蔬菜镉含量 Cd concentration in vegetables / ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)					原数据 Origin data		Box-Cox转换 Box-Cox transformation	
		范围 Range	算术		Box-Cox			p_{SW}	偏度 Skewness	p_{SW}
			平均值 Mean	标准差 S D.	平均值 Cox mean	标准差 Cox S D.				
裸露地 field-grown vegetables	215	0.1~61.6	13.8	10.4	11.2	4.5	1.44	0.00	-0.30	0.13
设施栽培 Greenhouse vegetables	148	0.3~101.4	11.4	12.3	8.5	4.8	3.50	0.00	0.56	0.09

3.4 不同蔬菜镉富集系数的差异

蔬菜镉的富集系数是指植物中镉含量与土壤中镉含量的比值,它可以大致反映植物在相同土壤镉含量条件下对镉的吸收能力(陈同斌等,2002)。镉富集系数越小,则表明其吸收镉的能力越差,抗土壤镉污染的能力则较强。北京市几种主要蔬菜镉富集系数原数据呈正偏度分布,而Box-Cox转换成功地使数据符合正态分布(表6)。为比较各品种的抗镉污染能力,采用蔬菜富集系数Box-Cox均值进行层级聚类分析(图3)。从结果来看,根据蔬菜镉富集系数含量高低可将蔬菜分为两类:小白菜、辣椒、茄子、萝卜和大白菜划为Ⅰ类,镉富集系数较高;而冬瓜、黄瓜、叶甜菜、大葱、云架豆、甘蓝、西红柿以及特菜划为Ⅱ类,镉富集系数较低,其可食部分对

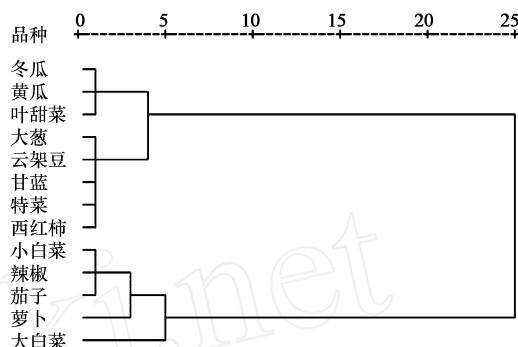


图3 基于蔬菜镉富集系数Box-Cox均值的层级聚类分析结果

Fig 3 Hierarchical cluster analysis based on Box-Cox means of bioconcentration factor (BCF) of cadmium in vegetables from Beijing

表6 北京市主要蔬菜镉的富集系数

Table 6 Bioconcentration factors (BCF) of Cd in major kinds of vegetables collected from farm fields of Beijing

蔬菜品种 Species of vegetables	样本数 (N) No. of samples	范围 V Range	中值 Median	算术			Box-Cox		
				平均值 Mean	标准差 S.D.	P _{SW}	平均值 Box-Cox mean	标准差 Box-Cox S.D.	P _{SW}
大白菜	22	0.023~0.246	0.098	0.107	0.060	0.11	0.098	0.015	0.79
大葱	20	0.000~0.132	0.044	0.054	0.034	0.40	0.047	0.013	0.28
甘蓝	3	0.025~0.058	0.033	0.038	0.017	0.44	0.037	0.005	0.53
小白菜	17	0.011~0.252	0.082	0.095	0.072	0.07	0.082	0.021	0.69
叶甜菜	2	0.003~0.073	0.038	0.038	0.049	—	0.026	0.033	—
叶菜类	64	0.000~0.252	0.068	0.082	0.060	0.00	0.074	0.018	0.59
根茎类(萝卜)	14	0.011~0.134	0.069	0.072	0.037	0.79	0.067	0.011	0.55
辣椒	20	0.009~0.201	0.080	0.090	0.057	0.17	0.081	0.016	0.80
云架豆	18	0.001~0.113	0.056	0.053	0.033	0.62	0.046	0.014	0.24
西红柿	8	0.004~0.086	0.044	0.044	0.028	0.85	0.039	0.011	0.75
冬瓜	4	0.010~0.037	0.019	0.021	0.011	0.50	0.020	0.005	0.71
黄瓜	13	0.001~0.053	0.021	0.025	0.019	0.22	0.020	0.011	0.10
茄子	16	0.027~0.285	0.083	0.094	0.068	0.01	0.084	0.017	0.33
瓜果类	79	0.001~0.285	0.053	0.064	0.053	0	0.055	0.018	0.76
特菜类 1)	12	0.004~0.202	0.026	0.048	0.058	0	0.035	0.021	0.24
全部蔬菜	169	0.000~0.285	0.060	0.070	0.056	0	0.059	0.018	0.28

1):指金珠、黑果、京舟一号、长琪、白凤、香葱、豆瓣菜、软化菊苣、蕃杏、金珠、珍珠菜、紫三地。

镉的积累能力较弱。在相同镉含量的土壤条件下,镉在这些蔬菜可食部分中的积累较少,即便是种植在镉含量相对较高一些的土壤中,其可食部分吸收的镉也不容易超标。因此,在种植蔬菜时,应根据土壤镉含量状况选择对镉富集能力较差的蔬菜品种(Ⅱ类)。

从表6看来,叶菜类、根茎类、瓜果类和特菜等4类蔬菜富集系数有如下趋势:叶菜类>根茎类>瓜果类>特菜;而其Box-Cox均值的差异分析(ANOVA)结果表明,叶菜类富集系数显著高于瓜果类和特菜类蔬菜,而其它各类蔬菜之间的富集系数差异并不显著。这说明叶菜类蔬菜对镉的富集能力

较强,而抗镉污染的能力较弱,这与前人研究结果相似(沈彤等,2005).

3.5 北京市居民蔬菜镉摄入量的健康风险分析

据2002年的统计资料,北京市总人口为1366万人(北京市统计局,2002),蔬菜生产量达 522.8×10^4 t,而北京市蔬菜自给率约为65%(刘明池,2002).照此推算,北京市人均蔬菜消费量约为每人 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$.结合各品种蔬菜占北京市蔬菜总量的百分比所确定的蔬菜样本数和各品种蔬菜镉含量的Box-Cox均值(表2)等参数,按照方程(2)所示的方法计算,北京市居民从蔬菜中摄入镉的量为 $12.2 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,略高于西班牙($10 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)(Alam et al.,2003),低于南宁($20 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)(Cui et al.,2005)、埃及($20 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)和美国($18 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)(Alam et al.,2003),与英国($14 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)和加拿大($13 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)(Alam et al.,2003)大致相当.低于世界卫生组织(WHO)(FAO/WHO,2003)和美国环保局(USEPA)(EPA,1994)所规定成年人Cd的最大允许摄入量(ADI值) $60 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ (成人,以60kg计),约为WHO所规定的ADI值的20.3%.以每天消耗蔬菜 1.6 kg 计,只要蔬菜镉含量达到 $37.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,镉的摄入量即与WHO和USEPA制订的ADI值相当.按照方程(3)所示的方法计算,北京市蔬菜镉含量高于 $37.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占总样本的26%,贡献率较大的蔬菜包括大白菜、油麦菜、大葱、辣椒和茄子等大宗蔬菜.上述计算未考虑其它食品以及大气吸入、饮用水等途径的贡献率.据报道,贝壳类、谷物类食品镉含量较高,在以谷物类为主食的亚洲人饮食镉摄入中贡献较大(Zhang et al.,1998; Shimbo et al.,2001; Munoz et al.,2005).如将通过蔬菜摄入镉的贡献率设为50%,那么蔬菜镉含量只要高于 $18.7 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,北京市居民镉摄入量即可达到ADI值.而在本研究中,采用方程(3)所示的方法计算,北京市蔬菜镉含量高于 $18.7 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的蔬菜样本占总样本的26.7%,其贡献率较大的几种蔬菜包括大白菜、辣椒、萝卜、茄子、小白菜、油(麦)菜、大葱、菜花、菠菜等大宗蔬菜,而北京市消费量最大的大白菜贡献率约为14.0%.

因此,尽管北京市蔬菜镉的平均含量虽远低于《食品中镉限量卫生标准》(GB 15201-94),但对部分人群而言,镉的健康风险仍值得关注.

4 结论(Conclusions)

1) 与土壤背景值相比,研究样点蔬菜基地的土

壤镉含量明显偏高,积累现象明显.

2) 北京市蔬菜镉含量平均值低于《食品中镉限量卫生标准》(GB 15201-94),但有个别样品镉含量较高,超过中国、WHO/FAO以及欧盟(EC)制订的食品卫生标准的限量值.叶菜类和根茎类蔬菜镉含量较高,而瓜果类蔬菜镉含量较低.蔬菜镉对北京市的部分人群存在一定的潜在健康风险.

3) 北京市本地产蔬菜与市售外地产蔬菜的镉含量没有显著差异,裸露地蔬菜中镉含量的显著高于设施蔬菜.总的说来,北京市朝阳区和昌平区蔬菜镉含量较低,海淀区较高.

4) 小白菜、辣椒、茄子、萝卜和大白菜镉富集系数较高,其抗镉污染能力较弱,而冬瓜、黄瓜、叶甜菜、大葱、云架豆、甘蓝、西红柿等镉富集系数较低,其抗镉污染能力较强.

致谢:许多人员曾先后参与或协助本研究的取样调查工作:中国科学院地理科学与资源研究所冯建波、吴洪涛、周建利、陈煌、陈宝华等,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.文中土地利用类型图的底图由中国科学院地理科学与资源研究所信息室提供.在此表示谢意!

通讯作者简介:陈同斌,博士生导师、研究员,中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究中心主任、地表环境化学过程与健康实验室主任.主要从事植物修复、固体废弃物堆肥、区域土壤环境质量与风险评估研究.主持“863”课题、“973”课题、国家自然科学基金重点项目等40多项,发表论文近200篇,获得发明专利18项.

References:

- Alam M G M, Snow E T, Tanaka A. 2003. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Santa village, Bangladesh [J]. The Science of the Total Environment, 308(1-3): 83—96
- Beijing Municipal Bureau of Statistical. 2002. Beijing Statistical Year Book of 2002 [M]. Beijing: China Statistics Press, 72, 173 (in Chinese)
- Beijing Municipal Bureau of Statistical. 2004. Beijing Statistical Year Book of 2004 [M]. Beijing: China Statistics Press, 219 (in Chinese)
- Cai Y X, Jue S C, Hua Y Y. 2004. The backgrounds and distributing analysis of lead arsenic and cadmium of vegetables from Fujian Province [J]. Hygiene Research, 33 (4): 500—501 (in Chinese)
- Chen H M, Zheng C R, Chen Y X, et al. 1996. Research on pollution of heavy metals in soil-plant system [M]. Beijing: Sciences Press, 71—81 (in Chinese)

- Chen H, Zheng Y M, Chen T B. 2003. Development of soil heavy metals information system: a case study on Beijing [J]. *Geographical Research*, 22(3): 272—280 (in Chinese)
- Chen T B, Chen Z J. 2002a. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(2): 183—186 (in Chinese)
- Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. 2002b. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(3): 207—210 (in Chinese)
- Chen T B, Zheng Y M, Chen H, et al. 2004. Background concentrations of soils heavy metal in Beijing [J]. *Environmental Science*, 25(1): 117—122 (in Chinese)
- Chen T B, Zheng Y M, Chen H, et al. 2005. Arsenic accumulation in soils for different land use types in Beijing [J]. *Geographical Research*, 24(2): 229—235 (in Chinese)
- Chen T B, Song B, Zheng Y M, et al. 2006. A survey of arsenic concentrations in vegetables and vegetable lands of Beijing and their health risk [J]. *Acta Geographica Sinica*, 61(3): 297—310 (in Chinese)
- Cui Y, Zhu Y G, Zhai R, et al. 2005. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China [J]. *Environment International*, 31(6): 784—790
- EC. 2001. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs (Text with EEA relevance.) [J]. *Official Journal of European Communities*: 1—13
- EPA. 1994. Integrated Risk Information System, Cadmium (CASRN 7440-43-9) [OL] <http://www.epa.gov/iris/subst/0141.htm>
- EPA. 1996. Acid digestion of sediments sludge and soils EPA 3050B [OL]. <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/3050b.pdf> 1—12
- FAO/WHO. 2001. Report on the 32nd session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants, AL NORM 01/12, Beijing, People's Republic of China, 20—24 March 2000. Joint FAO/WHO Food Standard Programme, Codex Alimentarius Commission, 24th Session, 2—7 July, Switzerland: Geneva
- FAO/WHO. 2003. Joint FAO/WHO expert committee on food additives Sixty-first Meeting, Rome, June 10—19, 2003 [OL], <ftp://ftp.fao.org/esn/jecfa/jecfa61sc.pdf>
- GUO D F. 1994. Environmental sources of Pb and Cd and their toxicity to man and animal [J]. *Advances in Environmental Science*, 2(3): 71—76 (in Chinese)
- Huang R J, Zhang H Y. 1996. Characteristics and genealogical classification of soils from the piedmont of North China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 27(5): 200—204 (in Chinese)
- Kaiser J. 1998. Toxicologists shed new light on old poisons [J]. *Science*, 279: 1850—1851
- Kelly J, Thornton I, Simpson P R. 1996. Urban Geochemistry: A study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain [J]. *Applied Geochemistry*, 11(1-2): 363—370
- Lin Y P, Teng T P, Chang T K. 2002. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua County in Taiwan [J]. *Landscape and Urban Planning*, 62(1): 19—35
- Lin Z H, Chen T B. 2000. Effects of associated toxic constituents of phosphate fertilizers on the soil eco-environment [J]. *Eco-agriculture Research*, 8(3): 47—50 (in Chinese)
- Lindstrom M. 2001. Urban land use influences on heavy metal fluxes and surface sediment concentrations of small lakes [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 126: 363—383
- Liu M C. 2002. The present state and perspectives on the vegetables planting of Beijing [J]. *Journal of Beijing Agriculture Science*, 1: 1—4 (in Chinese)
- Luo X M, Zhang Y R, Yang D Q. 2003. Pollution analysis and assessment of heavy metal in vegetable from Chengdu [J]. *Journal of Sichuan Environment*, 22(2): 49—51 (in Chinese)
- McBride M B. 2003. Cadmium Concentration Limits in Agricultural Soils: Weaknesses in USEPA's Risk Assessment and the 503 Rule [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 9(3): 661—674
- McGrath D, Zhang C, Carton O T. 2004. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. *Environmental Pollution*, 127(2): 239—248
- Ministry of Health, PRC. 1994. GB15201-94 Tolerance limit of cadmium in foods [S]. Beijing: Standards Press of China
- Munoz O M, Bastias M J, Araya M, et al. 2005. Estimation of the dietary intake of cadmium, lead, mercury, and arsenic by the population of Santiago (Chile) using a Total Diet Study [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 43(11): 1647—1655
- Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *The Science of the Total Environment*, 311(1-3): 205—219
- Nriagu J O, Pacyna J M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals [J]. *Nature*, 333: 134—139
- Shen T, Liu M Y, Jia L, et al. 2005. On the heavy pollution of vegetables in Changsha Region *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 31(1): 87—90. (in Chinese)
- Shimbo S, Zhang Z W, Watanabe T, et al. 2001. Cadmium and lead contents in rice and other cereal products in Japan in 1998—2000 [J]. *The Science of the Total Environment*, 281(1-3): 165—175
- State Environmental Protection Administration of China. 1995. GB15618—95 Environmental Quality Standard for Soils [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)
- Wang M Q, Wang Z T, Ran L, et al. 2003. Study on food contaminants monitoring in China during 2000—2001 [J]. *Journal of Hygiene Research*, 32(4): 322—326. (in Chinese)
- Williams C H, David J D. 1973. The effect of super phosphate on the cadmium content of soils and plants [J]. *Australia Journal of Soil Resources*, 11: 43—56
- Williams C H, David J D. 1976. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants [J]. *Soil Science*, 121: 86—93
- Xia Z L, Li S Z, Li T F, et al. 1987. Background of soil elements and their research techniques [M]. Beijing: China Meteorological Press,

- 126—128, (in Chinese)
- Yang H F, Li M Y, Shen W. 1998. Handbook of physicochemical test standards on food hygiene [M]. Beijing: Standards Press of China, 130—132, (in Chinese)
- Yang J, Zheng Y M, Chen T B, et al. 2005a. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(9): 1175—1181 (in Chinese)
- Yang J, Chen T B, Zheng Y M, et al. 2005b. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(12): 1661—1668 (in Chinese)
- Zheng Y M, Chen T B, Zheng G D, et al. 2005a. Copper accumulation in soils under differential land use in Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 20(5): 690—696. (in Chinese)
- Zheng Y M, Chen T B, Zheng G D, et al. 2005b. Chromium and nickel accumulations in soils under different land use [J]. *Resources Science*, 27(6): 162—166. (in Chinese)
- Zheng Y M, Luo J F, Chen T B, et al. 2005c. Cadmium accumulation in soils under differential land use in Beijing [J]. *Geographical Research*, 24(4): 542—548 (in Chinese)
- Zheng Y M, Chen T B, Chen H, et al. 2005d. Lead accumulation in soils under different land use in Beijing City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 60(5): 791—797 (in Chinese)
- Zheng Y M, Song B, Chen T B, et al. 2006. Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use in Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 21(1): 64—72 (in Chinese)
- Zhang Z, Watanabe T, Shimbo S, et al. 1998. Lead and cadmium contents in cereals and pulses in North-eastern China [J]. *The Science of the Total Environment*, 220(2—3): 137—145
- 中文参考文献:**
- 北京市统计局. 2002. 2002北京统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 72, 173
- 北京市统计局. 2004. 2004北京统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 219
- 蔡一新, 阙少聪, 华永有. 2004. 福建省蔬菜中铅、砷、镉含量背景值与分布分析 [J]. *卫生研究*, 33(4): 500—501
- 陈怀满, 郑春荣, 陈英旭, 等. 1996. 土壤植物系统中的重金属污染 [M]. 北京: 科学出版社, 71—81
- 陈煌, 郑袁明, 陈同斌. 2003. 面向应用的土壤重金属信息系统 (SHM IS) ——以北京市为例 [J]. *地理研究*, 22(3): 272—280
- 陈同斌, 陈志军. 2002a. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响 [J]. *应用生态学报*, 13(2): 183—186
- 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 2002b. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. *科学通报*, 47(3): 207—210
- 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 2004. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. *环境科学*, 25(1): 117—122
- 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 2005. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征 [J]. *地理研究*, 24(2): 229—235
- 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 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.
- 郭笃发. 1994. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害 [J]. *环境科学进展*, 2(3): 71—76
- 国家环境保护局. 1995. 土壤环境质量标准 (GB15618—95) [S]. 北京: 中国标准出版社
- 黄荣金, 张洪业. 1996. 华北山前地带土壤的特性与系统分类 [J]. *土壤通报*, 27(5): 200—204
- 林忠辉, 陈同斌. 2000. 磷肥杂质对土壤生态环境的影响 [J]. *生态农业研究*, 8(2): 47—50
- 刘明池. 2002. 关于首都蔬菜生产现状和发展的思考 [J]. *北京农业科学*, 1: 1—4
- 罗晓梅, 张义蓉, 杨定清. 2003. 成都地区蔬菜中重金属污染分析与评价 [J]. *四川环境*, 22(2): 49—51
- 沈彤, 刘明月, 贾来, 等. 2005. 长沙地区蔬菜重金属污染初探 [J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 31(1): 87—90
- 王茂起, 王竹天, 冉陆, 等. 2003. 2000—2001年中国食品污染物监测研究 [J]. *卫生研究*, 32(4): 322—326
- 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 1987. 土壤元素背景值及其研究方法 [M]. 北京: 气象出版社, 126—128
- 杨惠芬, 李明元, 沈文. 1998. 食品卫生理化检验标准手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 130—132
- 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 2005a. 北京市凉凤灌区土壤重金属的积累及其变化趋势. *环境科学学报*, 25(9): 1175—1181
- 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 2005b. 北京市凉凤灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析 ——兼论土壤重金属有效性测定指标的可靠性 [J]. *环境科学学报*, 25(12): 1661—1668
- 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 2005a. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响 ——以北京市为例 [J]. *自然资源学报*, 20(5): 690—696
- 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 2005b. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累 [J]. *资源科学*, 27(6): 162—166
- 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 等. 2005c. 不同土地利用方式对土壤镉积累的影响 [J]. *地理研究*, 24(4): 542—548
- 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 2005d. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累 [J]. *地理学报*, 60(5): 791—797
- 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 2006. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险 [J]. *自然资源学报*, 21(1): 64—72
- 中华人民共和国卫生部. 1994. 食品中镉限量卫生标准 (GB15201—1994) [S]. 北京: 中国标准出版社