

北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估

陈同斌¹, 宋 波^{1,2}, 郑袁明¹, 黄泽春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:【目的】研究北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险, 筛选出抗铅污染能力强的蔬菜品种, 为北京市蔬菜食用安全性评估和种植结构优化提供参考依据。【方法】根据各品种蔬菜消费量优先和兼顾品种多样性的原则采集蔬菜样品, 计算北京市居民蔬菜铅平均摄入量及其健康风险, 利用蔬菜铅富集系数筛选抗铅污染品种。【结果】北京市菜地土壤铅含量范围、算术均值和几何均值分别为 13.2~78.8、30.3 和 28.7 mg·kg⁻¹, 蔬菜铅含量范围、中值、算术均值和 Box-Cox 均值分别为 0.1~654.5、51.3、80.9 和 48.7 μg·kg⁻¹FW, 基于《食品中铅限量卫生标准》的综合超标率为 9.2%; 北京市本地生产和裸露地蔬菜铅浓度分别显著高于市售外地产蔬菜和设施栽培蔬菜; 叶甜菜抗铅污染能力最强, 其次是黄瓜、冬瓜、大白菜、茄子、大葱、西红柿和甘蓝, 而云架豆、萝卜、辣椒和小白菜抗铅污染能力最差; 北京市成人和儿童蔬菜铅人均每天的摄入量为 16.6 和 13.6 μg。【结论】北京市菜地土壤铅积累明显, 蔬菜铅对北京市居民(尤其是儿童)的健康存在较大威胁。

关键词: 北京; 生物富集; 重金属; 健康风险; 铅; 抗污染品种; 蔬菜; 土壤

A Survey of Lead Concentrations in Vegetables and Soils in Beijing and their Health Risks

CHEN Tong-bin¹, SONG Bo^{1,2}, ZHENG Yuan-ming¹, HUANG Ze-chun¹, LEI Mei¹, LIAO Xiao-yong¹

(¹Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ²Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: 【Objective】 To assess the human health risk posed by elevated concentrations of lead in vegetables and to identify lead pollution-tolerant vegetable varieties. The results could be used to guide vegetable safety evaluation and vegetable optimize planting patterns. 【Method】 A large scale survey of lead levels in soils and vegetables planted or sold in Beijing was conducted with giving priority to the consumption weight of vegetables and taking account of varieties. Lead health risk was accessed with lead intake from vegetable consumption, and lead pollution-tolerant vegetable varieties were identified with bioconcentration factors (BCFs). 【Result】 Lead concentrations in soils ranged from 13.2 to 78.8 mg·kg⁻¹, with arithmetic, median and geometric means of 30.3 and 28.7 mg·kg⁻¹, respectively. Lead concentrations in the edible plant portions ranged from 0.1 to 654.5 μg·kg⁻¹FW, with arithmetic, median and Box-Cox means of 80.9, 51.3 and 48.7 μg·kg⁻¹FW, respectively. In 9.2% of the samples, lead was higher than the Tolerance Limit of Lead in Foods (TLCF) of 0.8 mg·kg⁻¹ fresh weight for pulse and 0.2 mg·kg⁻¹ for other vegetables. The lead concentration in vegetables from Beijing was significantly higher than that of vegetables imported from other places in China, and the lead in the field-grown vegetables was significantly higher than that of vegetables planted in a greenhouse. Results of hierarchical cluster analysis on the BCF of lead in vegetables indicated that the plants sampled could be separated into three groups based on BCF. Round beans trellis (*Vigna unguiculata*), radish (*Raphanus*), chili (*Capsicum annuum*) and bakchoi (*Brassica chinensis*), which constituted the first group, had the highest BCFs. The second group, which includes cucumber (*Cucumis sativus*), wax gourd (*Beninacasa hispida*), Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*), eggplant (*Solanum* sp.), Chinese green onion, tomato (*Lycopersicon esculentum*) and cabbage (*Brassica oleracea*), had higher lead BCFs while leaf beet (*Beta vulgaris*) and some special varieties vegetables had lower lead BCFs. For adult and children in Beijing, the average ingestion rates of lead from vegetables were 16.6 and

收稿日期: 2006-01-17; 接受日期: 2006-04-12

基金项目: 国家杰出青年基金项目 (40325003)

作者简介: 陈同斌 (1963-) 男, 广西桂林人, 研究员, 研究方向为环境修复、区域土壤环境质量、废弃物资源化。E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

13.6 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. 【Conclusion】 Compared with the background lead concentrations of soil from Beijing, there appeared to be a significant accumulation of lead in soil collected from vegetables plot. Consuming vegetables with elevated lead concentrations may pose a health risk to local residents, particularly the children or ill.

Key words: Beijing; Bioaccumulation; Heavy metal; Human health risk; Lead; Pollutant-resistant plants; Vegetable; Soil

0 引言

【本研究的重要意义】以北京市为例,在省级行政单元上全面了解蔬菜铅含量状况,并对成人和儿童蔬菜铅的摄入健康风险进行评估,为北京市蔬菜食用安全和种植结构的优化提供依据。【前人研究进展】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^[1~4],而这种采样方式只能代表所选的一种或数种蔬菜的铅含量状况,对于区域内蔬菜铅含量总体状况的代表意义有限,更难以对蔬菜铅的健康风险进行有效评估。【本研究切入点】本研究组曾就北京市菜地和蔬菜中砷、锌、镉和镍含量状况及其健康风险^[5~8]、不同土地利用方式对北京市土壤重金属含量的影响^[9~11]和污水灌溉对土壤和粮食作物重金属积累的影响^[12,13]等问题进行过研究。其他学者也对北京市南部地区农业土壤重金属分布特征^[14]、东郊污灌土壤重金属污染评价^[15]和北京地区土壤铬的化学地理特征^[16]等问题进行过探讨。但对北京市菜地和蔬菜中铅含量总体状况及其健康风险至今仍不清楚。【拟解决的关键问题】全面了解蔬菜和菜地的铅含量,评估蔬菜铅的健康风险和筛选抗铅污染能力较强的蔬菜品种。

1 材料与方法

1.1 土壤和蔬菜样品的采集与分析

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消费量进行确定。其中 19 种主要蔬菜的消费量之和占全市蔬菜消费总量的 74.9%^[6,17]。此外,还根据蔬菜消费特点采集了其它常见蔬菜和特种蔬菜,并从北京市岳各庄、大钟寺、新发地三大批发市场和超市采集市售蔬菜。市售外地蔬菜主要来自山东、广东、内蒙古、天津和河北等地。采样时摘取新鲜的可食部分,装入塑料袋密封,用自来水和去离子水反复清洗,晾干,切碎,在 60℃ 下烘干,粉碎备用。采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 方法消煮,石墨炉-原子吸收光谱法测定铅^[18]。分析过程加入国家标准植物样品 (GSV-3) 进行分析质量控制。

在具有一定规模的蔬菜基地采集菜地土壤^[8,19]。

取 5 个点的表层 (0~20 cm) 混匀后组成混合样品,风干、粉碎、过 100 目尼龙筛后保存备用。采用美国国家环保局推荐的 USEPA 3050B 方法消煮^[20],石墨炉-原子吸收光谱法测定铅^[18]。分析过程加入国家标准土壤样品 (GSS-1) 进行分析质量控制。

蔬菜 and 土壤详细采集和处理方法以及样点分布图参见参考文献[5]。

1.2 统计分析与计算方法

用 Origin 检验数据频率分布状况 (P_{S-W}), 统计分析采用 SPSS 完成, 用 Minitab 进行数据的 Box-Cox 转换。蔬菜 Pb 浓度的 Box-Cox 平均值是采用 Box-Cox 转换的逆运算而得,

$$\text{即 } z = \sqrt[3]{y \cdot \lambda + 1}$$

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。

蔬菜铅摄入量为各种蔬菜铅含量的几何均值与其相应的消费量权重乘积的加和与蔬菜人均日消费量之积。蔬菜铅综合超标率为各种蔬菜的铅超标率与其相应消费量权重之积的加和。上述两个指标的具体计算方法详见参考文献[5]。

2 结果与分析

2.1 菜地土壤铅含量特征

北京市菜地土壤铅含量离异度较大并呈正偏态分布 (图 1), 经对数转换后符合正态分布 (图 2)。其含量范围、算术均值、几何均值和中值分别为 13.2~78.8、30.3、28.7 和 27.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与北京市土壤铅背景值 (算术均值 25.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中值 25.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均值 24.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21]) 相比, 北京市菜地土壤铅含量表现出极明显的铅积累效应 ($P=0.001$), 平均积累指数 (菜地土壤铅含量与土壤铅背景值的比值) 为 1.21, 但仍低于中国《土壤环境质量标准》(GB15618-95) 二级标准 ($\text{pH}>7.5$ 时为 350 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[22]。

2.2 蔬菜铅含量特征

从北京市 294 个蔬菜样品的铅浓度基本统计数据 (表 1) 来看, 各大类和各品种蔬菜间铅浓度变异很大, 基本呈偏态分布, 经过 Box-Cox 转换后呈正态分

布 ($\lambda=0.24$)。各品种蔬菜的铅平均浓度均低于《食品中铅限量卫生标准》所规定的限量值 (豆类 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其它蔬菜 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [23]), 但大白菜、甘蓝、大葱、大蒜、小白菜、马铃薯、辣椒、茄子、西红柿、小油菜和萝卜等品种中共有 26 个样本铅浓度超过该卫生标准, 考虑各蔬菜品种的消费权重, 北京市蔬菜铅浓度综合超标率为 9.2%。

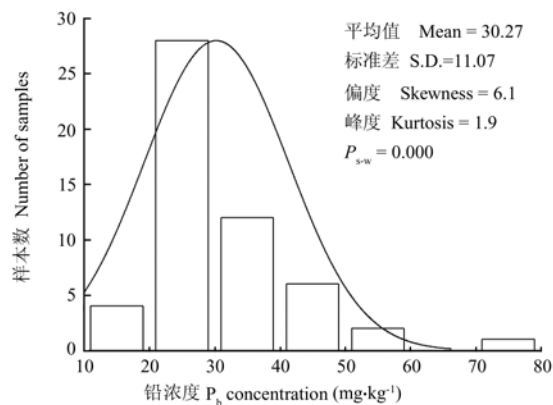


图 1 北京市菜地土壤铅含量频率分布图

Fig. 1 Frequency distribution of soil Pb in vegetable fields

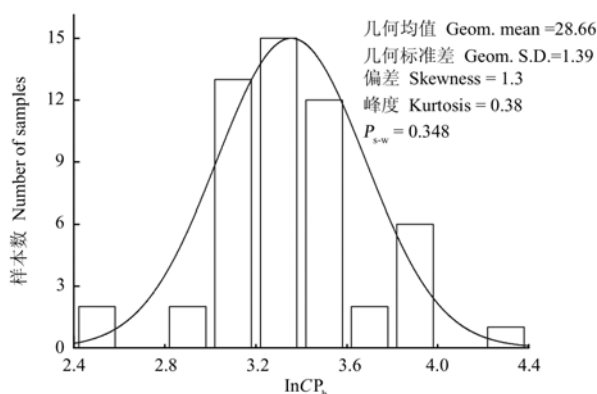


图 2 北京市菜地土壤铅含量对数频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of soil $\ln C_{Pb}$ in vegetable fields

各大类蔬菜中铅浓度存在很大差异, 具有根茎类 > 瓜果类 > 叶菜类 > 特菜类的趋势 (表 1)。采用 Box-Cox 均值的方差分析 (ANOVA) 表明: 特菜类蔬菜铅浓度最低, 均显著低于其它大类蔬菜, 而根茎类蔬菜铅浓度显著高于叶菜类和特菜类蔬菜, 其它各类之间则没有显著差异。根据对各主要品种的蔬菜铅浓度的 Box-Cox 均值 (表 1) 进行层级聚类分析 (图 3), 可

将蔬菜分为 4 类: 大蒜铅浓度最高, 可单独划为 I 类; II 类蔬菜铅浓度次之, 包括茄子、芥菜、马铃薯、大葱、萝卜、油 (麦) 菜、豆、辣椒、小白菜和云架豆; III 类蔬菜再次之, 包括菜心、冬瓜、洋葱、苗 (芽) 菜、白凤菜、苋菜、芹菜、西红柿、菠菜、菜花、黄瓜、蕃杏、大白菜和甘蓝; IV 类蔬菜的铅浓度最低, 包括紫贝天葵、圆白菜和蕹菜等。

2.3 不同来源的蔬菜铅浓度差异

从统计结果来看, 蔬菜铅浓度经 Box-Cox 转换后基本符合正态分布 (表 2)。采用 Box-Cox 均值进行方差分析的结果显示, 本地蔬菜 ($n=208$) 铅浓度极显著高于市售外地蔬菜 ($n=86$) ($P=0.000$)。本地产和市售外地蔬菜 ($n=152$) 的综合超标率分别为 9.5% 和 5.7% (表 2)。可见, 本地产蔬菜铅污染问题更为严重, 但外地入京蔬菜也同样存在铅超标问题。

从不同种植条件来看, 裸露地栽培和设施 (大棚) 栽培的蔬菜中铅浓度存在很大差别。正态检验 (表 2) 表明, 北京市裸露地和设施蔬菜铅浓度数据经 Box-Cox 转换 ($\lambda=0.34$) 后符合正态分布。采用 Box-Cox 均值进行的方差分析 (ANOVA) 表明, 裸露地蔬菜铅浓度极显著高于设施蔬菜 ($P=0.001$)。根据《食品中铅限量卫生标准》[23], 裸露地蔬菜和设施蔬菜的综合超标率分别为 10.0% 和 0.54% (表 2)。从不同栽培条件下蔬菜铅浓度差异比较来看, 裸露地蔬菜铅浓度超标现象高于设施蔬菜, 部分设施栽培蔬菜也存在铅超标现象。

2.4 不同蔬菜铅富集系数的差异

表 3 为各品种蔬菜铅的富集系数 (蔬菜中铅含量与土壤中铅含量的比值) 的结果。该结果经过 Box-Cox 转换 ($\lambda=0.29$) 后符合正态分布。利用 Box-Cox 均值进行层级聚类分析 (图 4) 可将蔬菜分成 3 类: 云架豆、萝卜、辣椒和小白菜铅富集系数最高, 为 I 类; 黄瓜、冬瓜、大白菜、茄子、大葱、西红柿和甘蓝的铅富集系数次之, 划为 II 类; 叶甜菜和特菜为 III 类, 其富集系数最低。一般来说, 铅富集系数越小, 则表明其吸收铅的能力越差, 抗土壤铅污染的能力则较强。可见, 对于铅含量较高的土壤中, 如果选择种植 II 和 III 类蔬菜, 则其受铅污染的风险较 I 类蔬菜要低。

2.5 北京市居民蔬菜铅摄入量及其健康风险评估

据报道, 2002 年中国人均蔬菜消费量为 $0.28 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ [24], 北京市 2002 年 50 岁以上中老年人蔬菜人均消费量为 $0.27 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ [25], 天津成人和儿童蔬菜人均消费量分别为 0.345 和 $0.23 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ [26]。可见, 成人的蔬

表 1 北京市各种蔬菜的铅浓度

Table 1 Concentrations of Pb in vegetables collected from farm fields and markets of Beijing

品种 Species of vegetables	n	蔬菜铅浓度				Box-Cox转换结果		
		Pb concentration in vegetables (μg·kg ⁻¹ FW)				Results of Box-Cox transformation		
		范围 Range	中值 Medium	均值 (标准差) Mean (S.D.)	P _{S-W}	均值 (标准差) Box-Cox mean (S.D.)		P _{S-W}
萝卜 ^A <i>Raphanus</i>	21	0.7~440.3	68.8	115.5 (129.3)	0.000	75.5 (1.7)		0.659
大葱 <i>Allium fistulosum</i>	17	2.0~261.0	66.0	92.2 (70.8)	0.090	70.3 (1.55)		0.168
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	7	3.0~286.4	135.2	141.8 (137.8)	0.022	72.3 (2.13)		0.023
洋葱 <i>Allium cepa</i>	5	0.1~68.0	43.6	38.1 (29.4)	0.251	23.3 (1.68)		0.330
大蒜 <i>Allium sativum</i>	4	130.7~654.5	179.1	285.9 (250)	0.043	239.8 (1.65)		0.125
莴苣 <i>Lactuca sativa</i>	1	99.6	99.6	99.6	-	99.6		-
根茎类 Rootstalk vegetables	55	0.1~654.5	68.8	116.7 (127.6)	0.000	71.2 (1.79)	a	0.711
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	19	2.3~122.9	51.3	50.6 (35.5)	0.048	41 (1.38)		0.485
云架豆 ^B <i>Vigna unguiculata</i>	18	0.1~323.5	156.2	154.8 (85.5)	0.972	124.8 (1.63)		0.001
辣椒 ^C <i>Capsicum annuum</i>	16	0.1~447.0	116.6	143.5 (141.4)	0.003	91.1 (1.86)		0.612
茄子 <i>Solanum</i>	14	11.9~367.0	55.1	91.3 (100.6)	0.002	62.1 (1.61)		0.252
西红柿 ^D <i>Lycopersicon esculentum</i>	13	1.1~231.4	34.6	48.7 (58.5)	0.000	32.4 (1.53)		0.170
冬瓜 <i>Beninacasa hispida</i>	10	2.2~68.0	13.8	23.7 (25.2)	0.031	13.9 (1.49)		0.025
豆 ^E Bean	4	21.5~218.1	100.0	109.9 (92.4)	0.046	85.7 (1.6)		0.508
西葫芦 <i>Cucurbita pepo</i>	1	2.2	2.2	2.2	-	2.2		-
丝瓜 Towel gourd	1	38.7	38.7	38.7	-	38.7		-
荷兰豆 Sweet broad pea	1	86.4	86.4	86.4	-	86.4		-
瓜果类 Gourd and fruit vegetables	97	0.1~447.0	56.6	90.3 (95.7)	0.000	57.3 (1.68)	ab	0.342
大白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	42	2.7~370.3	48.7	66.2 (72.8)	0.000	46.7 (1.51)		0.267
甘蓝 ^F <i>Brassica oleracea</i>	17	0.1~286.1	54.9	76.8 (85.2)	0.000	48.1 (1.68)		0.452
油 (麦) 菜 ^G <i>Brassica campestris</i>	10	7.6~219.9	74.2	96.6 (72.4)	0.439	76.3 (1.51)		0.839
小白菜 ^H <i>Brassica chinensis</i>	10	23.1~350.4	138.9	133.1 (109.5)	0.146	100.2 (1.62)		0.094
菠菜 <i>Spinacia oleracea</i>	7	8.1~0.6	44.1	35.2 (18.6)	0.528	31.4 (1.26)		0.314
菜花 <i>Brassica parachinensis</i>	6	1.2~138.8	63.0	59.6 (53.7)	0.593	34.5 (1.77)		0.169
芹菜 <i>Apium graveolens</i>	5	7.6~116.2	18.3	40.7 (45)	0.081	29.1 (1.47)		0.539
芥菜 ^I <i>Brassica juncea</i>	4	2.5~185.2	101.9	97.9 (78.6)	0.942	65.2 (1.84)		0.335
菜心 Chinese flowering cabbage	3	10.7~11.7	10.7	11.1 (0.6)	-	11.1 (1.01)		-
圆白菜 Wild cabbage	2	3.3~5.3	4.3	4.3 (1.4)	-	4.2 (1.07)		-
豆芽菜 ^J Bean sprous	2	10.7~33.9	22.3	22.3 (16.4)	-	20 (1.28)		-
蕹菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	2	0.1~42.5	21.3	21.3 (30)	-	6.7 (2.06)		-
叶甜菜 <i>Beta vulgaris</i>	1	5.7	5.7	5.7	-	5.7		-
蒜苗 Garlic sprouts	1	6.5	6.5	6.5	-	6.5		-
西兰花 Xilanhua	1	5.6	5.6	5.6	-	5.6		-
叶菜类 Leafy vegetables	113	0.1~370.3	47.1	68.4 (75.5)	0.000	42.1 (1.62)	b	0.744
圣女西红柿 Mini tomato	2	3.5~45.5	24.5	24.5 (29.7)	-	16 (1.62)		-
特种萝卜 ^K Mini radish	2	65.1~131.7	98.4	98.4 (47.1)	-	94.3 (1.27)		-
彩椒 ^L Chromatic chilli	2	30.7~154.4	92.6	92.6 (87.5)	-	75.6 (1.64)		-
特种黄瓜 Mini cucumber	2	4.5~10.4	7.4	7.4 (4.2)	-	7 (1.15)		-
白凤菜 Baifengcai	2	22.6~26.2	24.4	24.4 (2.5)	-	24.4 (1.04)		-
苋菜 <i>Amaranthus mangostanus</i>	2	23.9~28.2	26.1	26.1 (3)	-	26 (1.04)		-
紫贝天葵 Zibei tiangui	2	1.5~4.0	2.8	2.8 (1.7)	-	2.5 (1.12)		-
蕃杏 Fanxing	2	28.1~64.9	46.5	46.5 (26)	-	43.8 (1.26)		-
特种洋葱 Mini onion	1	2.4	2.4	2.4	-	2.4		-
莼菜 <i>Brasenia schreberi</i>	1	0.1	0.1	0.1	-	0.1		-
其它特菜 ^M Other special vegetables	11	0.1~84.9	5.8	20.1 (30.3)	0.001	8.1 (1.59)		0.424
特菜类 Special vegetables	29	0.1~154.4	13.6	30.0 (39.5)	0.000	14.7 (1.59)	c	0.424
全部蔬菜 All vegetables	294	0.1~654.5	51.3	80.9 (94.4)	0.000	48.7 (1.68)		0.048

“-”表示无数据 Data unavailable

^A: 包括萝卜、白萝卜、水萝卜和胡萝卜; ^B: 包括云架豆、豇豆和四季豆; ^C: 包括辣椒、尖椒、大椒和青椒; ^D: 包括西红柿、樱桃西红柿和香蕉西红柿; ^E: 包括豌豆、甜豌豆、毛豆和蚕豆; ^F: 包括羽衣甘蓝、紫甘蓝、圆白菜和抱子甘蓝; ^G: 包括油菜菜、油菜和小油菜; ^H: 包括小白菜、奶油白菜和小白菜苔; ^I: 包括芥蓝、芥菜和野生芥菜; ^J: 包括萝卜苗、豆瓣菜、豌豆苗、黑豆苗、黑豆芽、黄豆芽和绿豆芽; ^K: 包括樱桃萝卜和钢笔萝卜; ^L: 包括黄彩椒和红彩椒; ^M: 包括乌塌菜、香杏、香菇 (猴头菇)、茺、水晶菜、紫三地、马兰菜、球莴苣香、黑果、京舟1号和长琪

^A: Includes radish, white radish, summer radish and carrot; ^B: Includes *Vigna unguiculata*, cowpea and kidney bean; ^C: Includes hot pepper, mini capsicum, big capsicum and green capsicum; ^D: Includes tomato, mini tomato and banana-tomato; ^E: Includes pea (*Pisum sativum*), sweet pea, green soy bean and broad bean (*Vicia faba*); ^F: Includes collard, violet cabbage, wild cabbage and brussels sprouts; ^G: Includes Youmaicai, rape and mini rape; ^H: Includes a variety of Chinese cabbage, creamy cabbage and rape bolt; ^I: Includes Chinese kale, mustard leaf and wild mustard; ^J: Includes radish seedling, watercress, pea seedling, black soyabean seedling, black soyabean sprout, soybean sprout and mungbean sprout; ^K: Includes mini radish and pen-radish; ^L: Includes yellow capsicum and red capsicum; ^M: Includes black cabbage (*Brassica campestris*), sweet apricot, shiitake fungus (*Lentinus edodes*), Qiangcai, Shuijingcai, Zisandi, Malancai, corm fennel, Heiguo, Jingzhou1 and Changqi

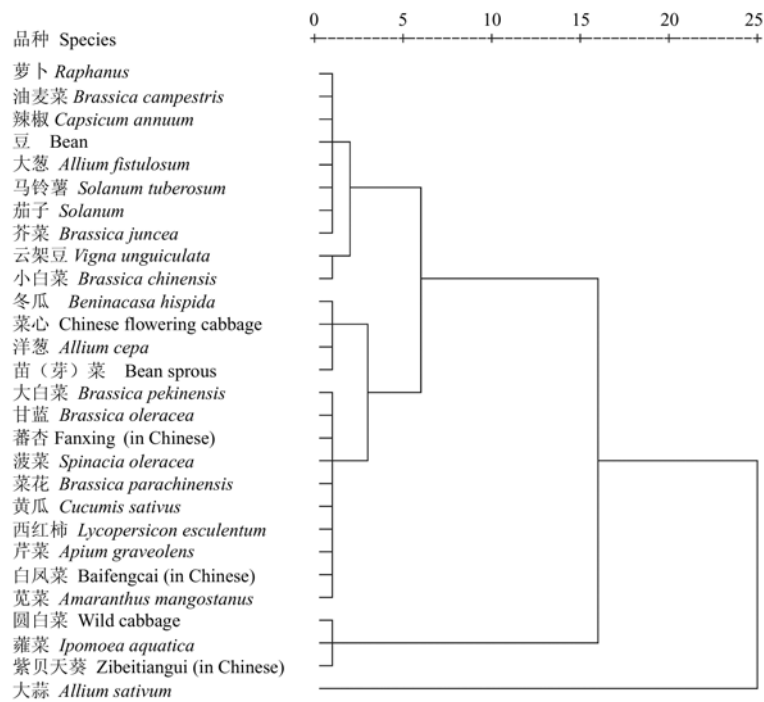


图 3 基于蔬菜铅 Box-Cox 均值的层级聚类分析结果

Fig. 3 Hierarchical cluster analysis based on Box-Cox means of Pb in vegetables from Beijing

表 2 北京市不同来源蔬菜铅浓度比较

Table2 Comparison of lead concentrations in vegetables from different source

蔬菜来源			蔬菜铅浓度					Box-Cox 转换		P*
Sources of vegetables		n	Pb concentration in vegetables (μg·kg ⁻¹ FW)				Results of Box-Cox transformation			
			范围	中值	平均值 (标准差)	P _{S-W}	均值 (标准差)	P _{S-W}		
			Range	Medium	Arithmetic mean (S.D.)		Box-Cox mean (S.D.)			
蔬菜产地	本地	208	0.1~654.5	61.0	95.0 (102.0)	0.000	62.0 (1.656)	0.067	9.5	
Vegetable of origin	Produced in Beijing									
	外地	86	0.1~286.1	24.0	48.0 (62.0)	0.000	26.0 (1.632)	0.025	5.7	
Produced outside Beijing										
种植方式	裸露地	222	0.1~447.0	57.0	88.0 (93.0)	0.000	41.0 (1.66)	0.15	10.0	
Planting Patterns	Field grown vegetables									
	设施栽培	72	0.1~654.5	33.0	60.0 (98.0)	0.000	21.0 (1.68)	0.047	0.54	
Greenhouse vegetables										

* 为基于《食品中铅限量卫生标准》的蔬菜铅综合超标率 (%)
Percentage of Pb in vegetables higher than Tolerance Limit of Lead in Foods

菜消费量略高于儿童。在此设定北京市成人和儿童人均蔬菜的消费量分别为 0.28 和 0.23 kg·d⁻¹，并假设烹调不影响蔬菜中的铅含量，即蔬菜中的铅含量与人体摄入蔬菜铅的量相等。考虑到各品种蔬菜权重的影响，经计算，北京市蔬菜铅综合 Box-Cox 均值为 59.3 μg·kg⁻¹FW，成人和儿童人均从蔬菜中摄入铅的量分别为 16.6 和 13.6 μg·d⁻¹。其中 17 种主要蔬菜的累积贡献率约为 98.7%（表 4），而大白菜、萝卜、云架豆、辣椒 4 种蔬菜的总贡献率就达 65.2%。一般来讲，各

品种蔬菜铅摄入贡献率与其消费量有密切的关系，但二者之间并不完全对应。从表 4 中的 R（某品种蔬菜铅摄入量贡献率与其占蔬菜消费量比例的比值）来看，小白菜、辣椒、云架豆、甘蓝、大蒜、大葱和萝卜等蔬菜的 R 均大于 2。这说明这些蔬菜的铅污染风险较其它蔬菜要高；而芹菜、冬瓜、菠菜、西红柿、菜花等蔬菜的 R 小于 0.5，其铅污染风险较小；其它蔬菜的 R 介于 0.5~2。

表 3 北京市主要蔬菜对土壤铅的富集系数

Table 3 Bioconcentration factors (BCF) of Pb in major vegetables collected from farms of Beijing

蔬菜品种 Species of vegetables	n	蔬菜铅的富集系数			Box-Cox 转换结果	
		BCF of vegetables			Results of Box-Cox transformation	
		均值 (标准差)	范围	P_{S-W}	均值 (标准差)	P_{S-W}
		Mean (S.D.) $\times 10^{-3}$	Range ($\times 10^{-3}$)		Box-Cox mean (S.D.) ($\times 10^{-3}$)	
大白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	22	3.62 (3.96)	0.16~16.31	0.000	2.54 (3.26)	0.632
小白菜 <i>Brassica chinensis</i>	17	3.62 (2.8)	0.76~12.17	0.002	3.04 (2.43)	0.483
甘蓝 <i>Brassica oleracea</i>	3	2.22 (1.17)	1.29~3.53	0.436	2.08 (1.8)	0.592
叶甜菜 <i>Beta vulgaris</i>	2	0.82 (0.99)	0.12~1.52	-	0.54 (3.3)	-
叶菜类 Leafy vegetables	44	3.40 (3.33)	0.12~16.31	0.000	2.54 (2.91)	0.732
大葱 <i>Allium fistulosum</i>	17	3.04 (2.01)	0.07~6.49	0.425	2.38 (2.9)	0.043
萝卜 <i>Raphanus</i>	12	5.04 (6.01)	0.58~21.67	0.001	3.49 (3.68)	0.466
根茎类 Rootstalk vegetables	29	3.87 (4.18)	0.07~21.67	0.000	2.80 (3.22)	0.598
辣椒 <i>Capsicum annuum</i>	17	5.46 (5.59)	0.22~17.74	0.002	3.69 (4.03)	0.442
云架豆 <i>Vigna unguiculata</i>	17	5.74 (3.36)	0.72~11.83	0.081	5.05 (2.47)	0.451
西红柿 <i>Lycopersicon esculentum</i>	7	2.77 (3.16)	0.52~9.76	0.001	2.09 (2.78)	0.152
冬瓜 <i>Beninacasa hispida</i>	4	1.76 (0.86)	1.02~2.99	0.278	1.67 (1.64)	0.531
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	10	2.33 (2.01)	0.03~5.67	0.305	1.53 (3.5)	0.407
茄子 <i>Solanum</i>	13	3.43 (4.09)	0.33~14.86	0.001	2.25 (3.52)	0.441
瓜果类 Gourd and Fruit vegetables	68	4.19 (4.1)	0.03~17.74	0.000	2.95 (3.42)	0.753
特菜 ¹⁾ special vegetables	11	1.89 (2.45)	0.07~7.62	0.006	0.97 (3.73)	0.346
总计 In sum	152	3.73 (3.83)	0.03~21.67	0.000	2.61 (3.32)	0.318

¹⁾ 包括芥菜、黑果、软化菊苣、长琪、香葱、京舟 1 号、白凤菜、金珠和蕃杏等

Includes mustard leaf (*Brassica juncea*), Heiguo, Intenerate chicory, Changqi, sweet shallot, Jingzhou1, Baifengcai, Jinzhu and Fanxing

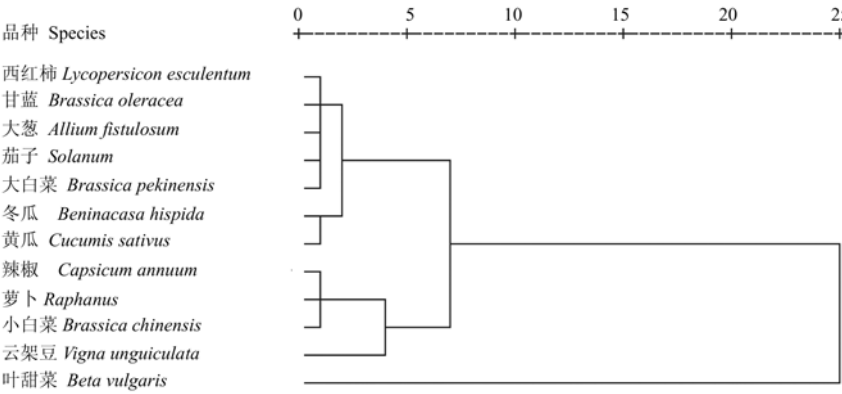


图 4 基于蔬菜铅富集系数 Box-Cox 均值的层级聚类分析结果

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

1993 年,FAO/WHO 建议,每周允许铅摄入量(暂定)为 25 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}^{[27]}$ 。中国成年人和儿童平均体重以 56 和 33 kg 计^[26],则铅的 ADI 值人均分别为 200 和 117.9 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。通常来讲,饮用水和食品是普通人群铅暴露的主要途径。若考虑其它铅摄入途径,将蔬菜铅摄入量占人群铅 ADI 值的贡献率设为 30%,则对北京市成年人和儿童而言,蔬菜铅浓度分别超过 214.3 和 153.7 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 即为超标,此时分别有 30 和 46 个蔬菜样本超标。按照前述方法计算,北京市蔬菜铅浓度

基于 ADI 的综合超标率为 10.5%和 15.1%。从绝对超标率(表 4)来看,铅超标问题比较突出的蔬菜主要有大白菜、云架豆、萝卜、辣椒、大葱、小白菜和甘蓝等。而从表 4 中蔬菜铅的相对超标率(绝对超标率与总超标率之比)来看,小白菜、辣椒、云架豆、大葱、萝卜和甘蓝中铅超标率均达到其相应蔬菜品种消费量权重的 2 倍以上,因而风险较高;而黄瓜、冬瓜、芹菜、韭菜、莲藕和菠菜对成人和儿童而言的超标率均为 0,食用较为安全。

表 4 北京市主要蔬菜消费量权重、蔬菜铅摄入量权重及超标率权重

Table 4 Weight coefficient of vegetable consumption, lead intake from vegetable

蔬菜种类 Species of vegetable	A (%)	B (%)	R=B/A	P _{adult} (%)		P _{children} (%)	
				绝对值 Absolute value	相对超标率 Relative value to total P _{adult}	绝对值 Absolute value	相对超标率 Relative value to total P _{children}
大白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	24.9	27.9	1.12	2.53	24.1	2.53	16.8
黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	7.2	5.36	0.74	0.00	0.0	0.00	0.0
西红柿 <i>Lycopersicon esculentum</i>	6.9	2.27	0.33	0.30	2.9	0.30	2.0
萝卜 <i>Raphanus</i>	5.7	13.8	2.42	1.85	17.6	2.31	15.3
茄子 <i>Solanum</i>	4.4	4.12	0.94	0.28	2.7	1.12	7.4
云架豆 <i>Vigna unguiculata</i>	3.8	13.7	3.60	1.81	17.2	3.25	21.5
芹菜 <i>Apium graveolens</i>	3.3	0.25	0.08	0.00	0.0	0.00	0.0
大葱 <i>Allium fistulosum</i>	2.8	6.9	2.46	0.34	3.2	1.02	6.8
冬瓜 <i>Beninacasa hispida</i>	2.4	0.47	0.20	0.00	0.0	0.00	0.0
菠菜 <i>Spinacia oleracea</i>	2.0	0.52	0.26	0.00	0.0	0.00	0.0
油菜 <i>Brassica campestris</i>	2.0	2.6	1.29	0.20	1.9	0.40	2.7
辣椒 <i>Capsicum annuum</i>	1.9	9.8	5.16	1.45	13.8	1.81	12.0
韭菜 <i>Allium tuberosum</i>	1.9	-	-	0.00	0.0	0.00	0.0
甘蓝 <i>Brassica oleracea</i>	1.8	4.7	2.62	0.68	6.5	0.68	4.5
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	1.5	1.20	0.80	0.42	4.0	0.42	2.8
菜花 <i>Brassica parachinensis</i>	0.9	0.42	0.47	0.00	0.0	0.00	0.0
莲藕 <i>Nelumbo adans</i>	0.6	-	-	0.00	0.0	0.00	0.0
大蒜 <i>Allium sativum</i>	0.5	1.30	2.60	0.16	1.5	0.16	1.1
小白菜 <i>Brassica chinensis</i>	0.4	3.39	8.49	0.40	3.8	0.80	5.3
其它蔬菜 Other vegetables	25.1	1.3	-	0.08	0.8	0.3	1.8
总计 In sum	100.0	98.7	-	10.5	100	15.1	100

A 为占蔬菜总消费量的百分比；B 为占蔬菜铅总摄入量的百分比；P_{adult} and P_{children} 分别对于成人和儿童的基于 ADI 的综合超标率
A. Percentage to the total consumption of vegetables in Beijing; B. Percentage to the total lead intake from vegetables; P_{adult} and P_{children}. Percentage of vegetable samples with Pb higher than ADI for adult and children, respectively

3 讨论

北京市菜地土壤铅含量偏高，与人类活动可能有很大关系。据 Nicholson 等对英格兰及威尔士农业土壤的研究发现，大气沉降对农业土壤中铅输入的贡献率最大^[28]。尽管无铅汽油在北京市已经得到广泛使用，但土壤环境中的铅浓度并未呈现立即下降的趋势，含铅汽油的不良影响仍将在未来相当一段时间内持续下去^[9, 29]。土壤中铅积累可能还与含铅农药^[30]、垃圾填埋^[9]以及污水灌溉^[31]有关。

北京市土壤铅含量虽存在显著积累效应，但铅含量远低于《土壤环境质量标准》^[22]，仍然适合蔬菜栽培，而北京市蔬菜却存在比较明显的超标问题。这可能是由于土壤铅标准偏高或者蔬菜铅限量标准以及铅最大允许摄入量（ADI）偏低有关。但也有可能是由于蔬菜中铅除来源土壤之外，还受其它因素（如大气中输入的铅）影响的结果。从本文的大规模调查研究可以看出，蔬菜的铅含量存在较严重的铅超标问题，但所对应的菜地土壤却不存在铅超标问题，显然两个

标准之间并不匹配。至少其中有一个标准应加以修订。从裸露地蔬菜铅浓度超标现象要高于设施蔬菜来看，其原因可能与裸露地蔬菜受大气降尘影响较大有关，但这种推测仍需进一步证实。

近年来，蔬菜中重金属含量状况及其健康风险已受到普遍关注，但研究大都较为零散，很少在省级行政单元内对蔬菜重金属含量状况进行系统调查，并对其健康风险进行评估。本研究已对北京市蔬菜中铅含量总体状况及其健康风险已有初步了解，为北京市居民蔬菜食用安全提供参考依据。

4 结论

与北京市土壤铅背景值相比，北京市蔬菜基地的土壤铅平均积累指数为 1.21。

北京市各大类和各品种蔬菜铅浓度的平均值均低于中国《食品中铅限量卫生标准》，但与该卫生标准相比，北京市蔬菜铅的综合超标率为 9.2%；对北京市成人和儿童而言，蔬菜铅对北京居民（尤其是儿童）的健康存在较大威胁，其基于 ADI 的综合超标率分别为

10.5%和 15.1%。

北京市本地产和裸露地蔬菜的铅浓度分别显著高于市售外地产蔬菜和设施栽培蔬菜。特菜类蔬菜铅浓度最低,均显著低于其它大类蔬菜,而根茎类蔬菜铅浓度显著高于叶菜类和特菜类蔬菜;云架豆、萝卜、辣椒和小白菜铅富集系数最高,因而其抗污染能力较差;黄瓜、冬瓜、大白菜、茄子、大葱、西红柿和甘蓝铅富集系数次之,而叶甜菜和特菜铅富集系数最低,其抗铅污染能力最强。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所罗金发研究员、吴洪涛博士等,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等人曾参与或协助部分取样工作。文中土地利用类型图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!

References

- [1] 卢桂兰, 韩 梅, 李发生. 北京市通州污灌区土壤环境监测和蔬菜重金属污染状况研究. 中国环境监测, 2005, 21 (5) : 54-57.
Lu G L, Han M, Li F S. Monitoring of soil environment pollution and vegetable contamination by heavy metals in Tongzhou irrigation area of Beijing city. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21 (5) : 54-57. (in Chinese)
- [2] 王茂起, 王竹天, 冉 陆, 韩宏伟, 王永芳, 杨大进. 2000~2001 年中国食品污染物监测研究. 卫生研究, 2003, 32: 322-326.
Wang M Q, Wang Z T, Ran L, Han H W, Wang Y F, Yang D J. Study on food contaminants monitoring in China during 2000-2001. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32: 322-326. (in Chinese)
- [3] 沈 彤, 刘明月, 贾 来, 沈 丹. 长沙地区蔬菜重金属污染初探. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2005, 31 (1) : 87-90.
Shen T, Liu M Y, Jia L, Shen D. On the heavy metal pollution of vegetables in Changsha region. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2005, 31 (1) : 87-90. (in Chinese)
- [4] 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: 191-195.
Wang Y L, Liu B, Liu Q. The present situation of chemical pollutant on vegetables in the summer and the preventing measures. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2004, 35: 191-195. (in Chinese)
- [5] 宋 波, 陈同斌, 郑袁明, 黄泽春, 郑国砥, 罗金发. 北京市菜地土壤和蔬菜铜含量及其健康风险分析. 环境科学学报, 2006, 26(4): 1343-1353.
Song B, Chen T B, Zheng Y M, Huang Z C, Zheng G D, Luo J F. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and their healthy risk. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(4): 1343-1353. (in Chinese)
- [6] 陈同斌, 宋 波, 郑袁明, 黄泽春, 郑国砥, 李艳霞, 雷 梅, 廖晓勇. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析. 地理学报, 2006, 61: 297-310.
Chen T B, Song B, Zheng Y M, Huang Z C, Zheng G D, Li Y X, Lei M, Liao X Y. A survey of arsenic concentrations in vegetables and vegetable lands of Beijing and their healthy risk. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61: 297-310. (in Chinese)
- [7] 陈同斌, 宋 波, 郑袁明, 黄泽春, 郑国砥, 雷 梅, 陈 煌. 北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险. 自然资源学报, 2006, 21(3): 349-361.
Chen T B, Song B, Zheng Y M, Huang Z C, Zheng G D, Lei M, Chen H. A survey of Ni concentrations in vegetables and vegetable lands of Beijing and their healthy risk. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 349-361. (in Chinese)
- [8] 黄泽春, 宋 波, 陈同斌, 郑袁明, 杨 军. 北京市菜地土壤和蔬菜锌含量及其健康风险分析. 地理研究, 2006, 25(3): 439-448.
Huang Z C, Song B, Chen T B, Zheng Y M, Yang J. A survey of Zn concentrations in vegetables and vegetable lands of Beijing and their healthy risk. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 439-448. (in Chinese)
- [9] 郑袁明, 陈同斌, 陈 煌, 郑国砥, 罗金发. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累. 地理学报, 2005, 60: 791-797.
Zheng Y M, Chen T B, Chen H, Zheng G D, Luo J F. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60: 791-797. (in Chinese)
- [10] 郑袁明, 宋 波, 陈同斌, 郑国砥, 黄泽春. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险. 自然资源学报, 2006, 21 (1) : 64-72.
Zheng Y M, Song B, Chen T B, Zheng G D, Huang Z C. Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use in Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (1) : 64-72 (in Chinese)
- [11] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 吴泓涛, 周建利, 罗金发, 郑国砥. 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: 229-235.
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, Wu H T, Zhou J L, Luo J F, Zheng G D. Arsenic accumulation in soils for different land use types in Beijing. *Geographical Research*, 2005, 24: 229-235. (in Chinese)
- [12] 杨 军, 郑袁明, 陈同斌, 黄泽春, 罗金发, 刘洪禄, 吴文勇, 陈玉成. 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, 2005, 25: 1175-1181.
Yang J, Zheng Y M, Chen T B, Huang Z C, Luo J F, Liu H L, Wu W Y, Chen Y C. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25: 1175-1181. (in Chinese)
- [13] 杨 军, 陈同斌, 郑袁明, 罗金发, 刘洪禄, 吴文勇, 陈玉成. 北

- 京市凉风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. 环境科学学报, 2005, 25: 1661-1668.
- Yang J, Chen T B, Zheng Y M, Luo J F, Liu H L, Wu W Y, Chen Y C. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25: 1661-1668. (in Chinese)
- [14] 付 华, 吴雁华, 魏立华. 北京南部地区农业土壤重金属分布特征与评价. 农业环境科学学报, 2006, 25: 182-185.
- Fu H, Wu Y H, Wei L H. Distribution and evaluation of heavy metals in agricultural soil in southern area of Beijing. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25: 182-185. (in Chinese)
- [15] 王学军, 席 爽. 北京东郊污灌土壤重金属含量的克里格插值及重金属污染评价. 中国环境科学, 1997, 17: 225-228.
- Wang X J, Xi S. Kriging analysis and heavy metal pollution assessment for soil from eastern suburb of Beijing City. *China Environmental Science*, 1997, 17: 225-228. (in Chinese)
- [16] 夏增禄. 北京地区铬的土壤化学地理. 地理学报, 1989, 44: 449-458.
- Xia Z L. Soil chemical geography of chromium in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44: 449-458 (in Chinese)
- [17] 北京市统计局. 北京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2002: 72, 173.
- Beijing Municipal Bureau of Statistical. *Beijing Statistical Year Book*. Beijing: China Statistics Press, 2002: 72, 173. (in Chinese)
- [18] 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, 1998: 101-104.
- Yang H F, Li M Y, Shen W. *Handbook of Physicochemical Test Standards on Food Hygiene*. Beijing: Standards Press of China, 1998: 101-104. (in Chinese)
- [19] 陈 煌, 郑袁明, 陈同斌. 面向应用的土壤重金属信息系统 (SHMIS) ——以北京市为例. 地理研究, 2003, 22: 272-280.
- Chen H, Zheng Y M, Chen T B. Development of soil heavy metals information system: a case study on Beijing. *Geographical Research*, 2003, 22: 272-280. (in Chinese)
- [20] USEPA. Acid digestion of sediments sludge and soils. EPA 3050B. <http://www.epa.gov/SW-846/pdfs/3050b.pdf>. 1996; 1-12.
- [21] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 郑国砥. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究. 环境科学, 2004, 25: 117-122.
- Chen T B, Zheng Y M, Chen H, Zheng G D. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing. *Environmental Science*, 2004, 25: 117-122. (in Chinese)
- [22] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准 GB15618—95. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- State Environmental Protection Administration of China. *Environmental Quality Standard for Soils* (GB15618—95). Beijing: Standards Press of China, 1995. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国卫生部. 食品中铅的限量卫生标准 (GB 14935—94). 北京: 中国标准出版社, 1994.
- Ministry of Health PRC. *Tolerance Limit of Lead in Foods* (GB 14935—94). Beijing: China Standards Press, 1994. (in Chinese)
- [24] 翟凤英, 何宇纳, 马冠生, 李艳平, 王志宏, 胡以松, 赵丽云, 崔朝辉, 李 园, 杨晓光. 中国城乡居民食物消费现状及变化趋势. 中国流行病学杂志, 2005, 26: 485-488.
- Zhai F Y, He Y N, Ma G S, Li Y P, Wang Z H, Hu Y S, Zhao L Y, Cui Z H, Li Y, Yang X G. Study on the current status and trends of food consumption among Chinese population. *China Journal of Epidemiology*, 2005, 26: 485-488. (in Chinese)
- [25] 董 忠, 黄 磊, 沙怡梅, 赵 耀, 徐 筠, 张 正. 北京市50岁以上中老年人膳食营养状况调查. 中国公共卫生, 2005, 21: 727-728.
- Dong Z, Huang L, Sha Y M, Zhao Y, Xu J, Zhang Z. Investigation of dietary structure and nutritional status of people aged 50 and over in Beijing. *China Journal of Public Health*, 2005, 21: 727-728. (in Chinese)
- [26] Wang X L, Sato T, Xing B S, Tao S. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish. *Science of the Total Environment*, 2005, 350 (1-3) : 28-37.
- [27] WHO. *Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants* (41st Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). WHO Technical Report Series, No 837. World Health Organization, Geneva. 1993.
- [28] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, Carlton-Smith C, Chambers B J. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment*, 2003, 311 (1-3) : 205-219.
- [29] Lindström M L. Urban land use influences on heavy metal fluxes and surface sediment concentrations of small lakes. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 126: 363-383.
- [30] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, Wong M H. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soil of Hong Kong. *Environmental Pollution*, 1997, 96: 61-68.
- [31] Muchuweti M, Birkett J W, Chinyanga E, Zvauya R, Scrimshaw M D, Lester J N. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112: 41-48.

(责任编辑 李云霞)