

不同土地利用类型下土壤-作物铅的积累特征及其健康风险分析

师荣光, 刘凤枝, 郑向群, 蔡彦明

(农业部环境保护科研监测所, 农业部产地环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191)

摘要:潜在有毒污染物对人体的暴露及其健康风险是当前环境研究中的一个主要问题,重金属 Pb 对人体具有较大毒性,为此通过对研究区菜地、稻田、果园、旱地、茶园等 5 种典型土地利用类型 402 个土壤和同步采集的作物样品的测试分析,探讨了不同土地利用方式对土壤及其种植作物 Pb 积累的影响。研究结果表明,不同土地利用方式下,土壤 Pb 积累的程度不同,菜地土壤 Pb 积累程度最高,果园土壤 Pb 积累程度最低。方差分析结果表明,菜地土壤与茶园、果园土壤之间,茶园土壤与菜地、稻田、旱地土壤之间 Pb 含量存在显著差异性。研究区不同土地利用方式对作物 Pb 积累的影响较大,水稻 Pb 平均含量最高,水果 Pb 平均含量最低。不同作物之间 Pb 含量也存在显著性差异,水稻 Pb 含量显著高于其他 4 种作物,水果和蔬菜 Pb 含量则远低于其他 3 种作物。利用定性风险分析技术,对不同土地利用类型下土壤 Pb 对人体健康的风险商值进行了计算。结果表明,不同土地类型土壤 Pb 对人体健康的风险商值为稻田>菜地>旱地>果园,尤其是稻田和菜地土壤 Pb 对人体健康的风险较大,均存在土壤 Pb 含量对人体健康造成危害、处于不可接受的样点,居民面临较大健康风险,应采取积极措施对这两种土地利用类型下土壤 Pb 污染进行治理和修复。

关键词:铅;土地利用类型;土壤;作物;健康风险分析

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0481-06

Lead Accumulation Characteristics in Soil-crop System Under Different Land Use Types and Health Risk Analysis

SHI Rong-guang, LIU Feng-zhi, ZHENG Xiang-qun, CAI Yan-ming

(Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Exposure of potential toxic pollutants to human body and the associated health risk is a key problem of current environmental studies. Lead is a toxic heavy metal that can cause heavy poisonous to human body. Based on a large scale survey of lead concentration in soils and crops under five different land use types in the study area, the accumulation characteristics and potential health risks of lead levels in soils and crops of vegetable field, paddy field, dry land, orchards and tea garden were analyzed. The results showed that the characteristics of soil lead accumulation under different land use types were different, with the vegetable field accumulation Pb to the maximum extent and the orchard soil to the least extent. Variance analysis showed that there was significant difference in tea garden and orchard soil, tea garden soil and paddy soil, dry land soil and vegetable soil. Land use greatly affected the accumulation of lead in the crops with the mean lead concentration in rice being the highest and in fruit being the lowest. There were significant differences among the variance. The concentration of lead in rice was significantly higher than those in other four crops. Based on qualitative risk assessment technology, hazard quotients of soil lead to human health in the four different land use types were analyzed. The hazard quotients of crops under different land use type were in an order: paddy>vegetable soil>dry land> orchard. The health risks caused by paddy soil and dry land soil were especially obvious. The health risks caused by the two land use were unacceptable and the people lived in the study area were faced with high health risks. Active measures should be taken to control the soil lead pollution in the study area and soil lead pollution should also be remediated.

Keywords: lead; land use type; soil; crop; health risk analysis

收稿日期:2009-07-16

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目

作者简介:师荣光(1980—),男,河北临城人,博士,主要从事土壤污染评价技术研究。E-mail:winsomesky@163.com。

重金属铅是城市和工业发展过程中产生的典型“污染元素”之一^[1],可通过吞食、吸入和皮肤接触等途径进入人体,造成人体神经系统、骨髓造血机能、消化系统、生殖系统及人体其他功能损害,对人体健康极具毒副作用^[2-3]。重金属铅进入环境后不能被微生物降解,极易在土壤中残留、富集,被作物吸收而表现出毒害效应,并可通过土壤-作物系统进入食物链而危害人体健康^[4]。近年来,随着我国农田土壤重金属污染的日益恶化,农田土壤-作物系统铅的积累及其对人体健康的风险已引起广泛的关注和重视。如姬艳芳等^[5]研究了凤凰铅、锌矿区耕层土壤中 Pb、Cd、Hg、As 等重金属的质量状况及其在水稻不同部位的迁移富集情况;赵勇等^[6]以河南郑州 5 种叶菜类蔬菜为实验对象,对土壤及 5 类蔬菜铅污染的相关性进行了分析,并对土壤铅污染阈值进行了研究;马瑾等^[7]通过广东汕头市农业土壤和蔬菜铅含量的测试分析,对汕头市民通过食用蔬菜而导致的铅暴露进行了健康风险评估;丁爱芳等^[8]依据 UEPA 推荐的 RfD 值和我国居民平均食物消费结构对南京零散菜地的蔬菜重金属污染对食用者的健康风险进行了计算,其结果表明食用一些污染严重的蔬菜而摄入铅引起的健康风险高达 90.66%。此外,陈同斌等^[9]还对北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估进行了研究。

这些研究虽然也以铅的每日最大允许摄入量为标准,并利用风险评估模型对土壤铅的人体健康风险进行了估算,但是:一方面相关研究表明,土壤环境中铅的增加主要与人类活动有关^[10],采矿、冶金、化石燃料燃烧、农用化学品施用等均可造成土壤铅浓度的升高,因此由于受人为因素的干扰,不同土地利用类型下,土壤铅含量的积累具有明显的差异。如郑袁明^[11]对北京市不同土地利用类型土壤铅含量积累的研究表明,北京市 6 种土地利用类型土壤铅含量有明显差别,其中绿化地土壤铅含量最高,稻田和自然土壤中铅含量则较低。另一方面,不同作物对铅的积累不同,南忠仁等^[12]认为玉米对铅的吸收积累大于小麦,Mer-ry^[13]对三叶草、甜菜、萝卜 3 种植物铅吸收特性的差异性比较结果表明,地上部分铅的积累量依次为三叶草>甜菜>萝卜,但萝卜地下部分铅含量很高。此外,不同种类或不同基因型的植物吸收铅的能力也不同,不同种类的作物,生长期长的作物含量高于生长期短的作物的铅含量^[14],人们通过食物摄取的铅含量就随着不同食物种类的不同而有所差异,其和当地居民的膳食结构和饮食习惯有直接的关系。因此,研究土壤

重金属对人体的健康风险必须考虑不同的土地利用方式和作物种植,并结合当地居民的膳食结构和饮食习惯才能得出有实际意义的结论。

鉴于此,本文对研究区不同土地利用及其种植作物铅含量积累特征进行研究,以此为基础,结合当地居民的膳食结构,分析不同土地利用类型下铅通过土壤-作物系统进入食物链而对人体健康造成的风险。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

研究区属亚热带大陆性湿润气候,冬冷夏热,四季分明,雨量充沛,年均气温 15~19℃,主要土壤类型为棕红壤、石灰土、潮土和水稻土,种植作物以水稻、茶叶、蔬菜、油菜、水果等作物为主。研究区是我国著名的工矿企业区,人类活动历史悠久,经济社会相对发达,是国家重要的有色金属和建材工业基地。工矿企业的发展,造成研究区表层土壤不同程度的重金属污染,主要污染物为镉、砷、铅、铜及锌等。根据研究区土地利用方式、污染源分布和主要农作物分布状况,将样地分为菜地、水稻地、旱地、茶园、果园 5 种主要类型。在每种土地利用类型下,根据《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2000),确定监测单元,共布设监测点位 402 个,监测点位如图 1 所示。

样点采集时,尽量避开居民地、交通线、河渠沟塘等可能受人为污染影响、微域地形地貌代表性差的地段,根据地块形状采取“X”法、“S”法或棋盘法,以木铲或竹铲等非金属采样器采集 0~20 cm 的耕层土壤,使用 GPS 定位,记录样点经纬度坐标。每个土壤样点由 5 个取样点混合而成,经四分法缩分保留 1.5 kg,装入双层塑料袋内。采回的土壤样品在室内常温风

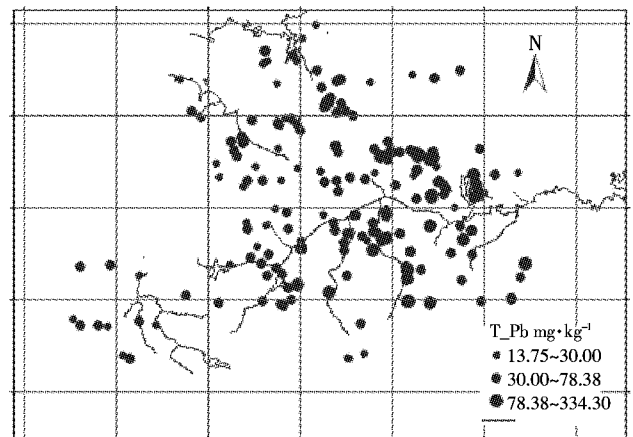


图 1 监测点位分布图

Figure 1 Sampling location

干,去除动植物残体、石块等杂物过 1 mm 尼龙筛,用四分法缩分,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、塑料或玛瑙等非金属工具。

农作物与土壤同步采集,共采集作物样品 402 个,其中包括各类蔬菜样品 125 个,茶叶样品 58 个,水稻样品 119 个,水果样品 42 个,旱地高粱、玉米、油菜等作物 58 个。作物样品采集时,取其成熟的可食部分,采集后装入塑料袋中,密封以防止水分蒸发。蔬菜、水果样品取回后,用自来水反复清洗,去除附表泥土后,用去离子水反复漂洗、晾干,四分法缩分,用不锈钢刀切成小块,匀浆待测。水稻、高粱等样品取回后,在实验室风干脱粒,用四分法缩分至 100 g,用玛瑙球磨机小心去壳,再粉碎磨细,过 0.5 mm 筛后成待测样品。

1.2 样品分析与测定

取干燥后的土壤样品,用王水($\text{HNO}_3\text{:HCl}=1\text{:}3$)消煮至灰白色,加 5 mL HClO_4 消化残渣,1:1HCl 溶解定溶后,以火焰原子吸收分光光度法测定 Pb 含量^[15]。测定过程中,加入国家标准土壤参比物质,进行数据质量控制和质量保证。蔬菜、水果样品经匀浆后,称取匀浆样品 2.0 g 于聚四氟乙烯高压罐内,加硝酸和过氧化氢(30%)浸泡过夜,放入恒温干燥箱 120~140 °C 保持 4 h,冷却至室温、过滤转移至容量瓶,用火焰原子吸收分光光度法测定。水稻、玉米、高粱等采用干灰法将样品制成待测液,用火焰原子吸收分光光度法测定^[16]。实验过程中所用试剂均为优级纯。

1.3 数据分析

原始数据处理、方差及聚类分析采用 SPSS 完成,采用 Shapiro-Wilk 法检验数据频率分布状态,利用单因素方差分析(ANOVA)方法进行不同土地利用下土壤和作物铅含量的显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型下土壤铅含量积累特征

共获取研究区内菜地、茶园、稻田、果园及旱地等 5 种土地利用类型的 402 个有效土壤监测数据,统计结果如表 1 所示。从表中可以看出,全部 402 个土壤样品 Pb 含量范围为 14.91~163.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,几何平均值为 37.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准限值。土壤 Pb 含量最大值为 163.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 出现在稻田中,经正态性检验,全部土壤样品呈偏态分布,以其中位数代表均值;经对

数变换后,5 种土地利用方式下,土壤铅 Shapiro-Wilk 法检验结果 P_{s-w} 均大于 0.01,表明在 0.01 的置信度下,5 种土地利用方式土壤铅含量均表现为对数正态分布。全部土壤铅变异系数为 0.54,菜地、茶园、稻田、果园和旱地 5 种土地利用方式下土壤铅含量变异系数在 0.20~0.38 之间。可以看出,研究区全部土壤铅及 5 种土地利用方式下土壤铅变异系数较小,均为中等变异性,表明研究区土壤铅数据离散性程度较小,土壤铅含量分布均匀。

表 1 不同土地利用方式下土壤铅含量积累特征

Table 1 Characteristics of soil lead accumulation under different land use types

土地类型	样本数 <i>N</i>	分布类型	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		变异系数 <i>C_v</i>	P_{s-w}
			范围	平均值		
菜地	125	对数正态分布	20.00~143.56	42.69a	0.26	0.039
茶园	58	对数正态分布	14.91~69.20	29.43b	0.38	0.019
稻田	119	对数正态分布	17.06~163.8	37.37ac	0.30	0.118
果园	42	对数正态分布	19.2~39.10	27.77bc	0.20	0.072
旱地	58	对数正态分布	24.83~76.07	37.96ac	0.26	0.06
全部	402	偏态分布	14.9~163.8	37.54	0.54	0.00

注:凡有一个相同标记字母的即为差异不显著,凡具有不同标记字母的即为差异显著,并用 a、b 和 c 表示

从表 1 中也可以看出研究区不同土地利用方式对土壤铅积累的影响,菜地土壤铅积累程度最高,其平均值为 42.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,果园土壤铅累积程度最低,其平均值为 27.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。方差分析结果显示,菜地土壤铅含量显著高于茶园和果园土壤铅含量($P<0.05$),茶园土壤铅含量与菜地、稻田、旱地土壤均存在显著性差异($P<0.05$),稻田和旱地土壤铅含量仅与茶园土壤铅含量存在显著差异性($P<0.05$),果园土壤铅含量仅与菜地土壤铅含量存在显著差异性。

2.2 不同土地利用类型下作物铅含量特征

共获取了研究区蔬菜、水稻、茶叶、水果及玉米、油菜等 28 种作物 402 个样品的有效监测数据,研究区不同土地利用类型下各作物铅含量基本统计数据如表 2 所示。统计分析结果表明,在 0.01 的置信度下蔬菜、水果和旱地作物 Pb 含量服从对数正态分布,计算几何平均值代表其平均含量;茶叶、水稻及全部作物 Pb 含量为偏态分布($P_{s-w}=0.00$),以其中位数代表平均值。茶叶、水稻及水果 Pb 含量的变异系数均在 1.0 以下,为中等变异性,蔬菜、旱地作物 Pb 含量变异系数大于 1,为强变异性,表明蔬菜和旱地作物 Pb 含量分布较其他作物更为不均,样品间变化较大,这可

能与研究区蔬菜和旱地作物呈零星、分散种植,管理、施肥及污染方式不同有关。与我国食品卫生标准 GB 2762—2005 的食品中污染物 Pb 限值标准相比,除茶叶无 Pb 含量超标样品外,其他作物均存在 Pb 含量超标现象,其中水稻 Pb 含量超标率最高为 81.5%,研究区全部作物 Pb 含量超标率则达到了 45.02%,可以看出,研究区作物已存在相当程度的 Pb 污染现象。

从表 2 可以看出,不同土地利用方式下,作物 Pb 含量差异性较大,5 种作物中,水稻 Pb 含量最高,其平均值为 $1.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水果 Pb 含量最低,平均值为 $0.063 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。方差分析结果显示,水稻 Pb 含量显著高于其他 4 种作物 Pb 含量,存在显著性差异 ($P < 0.05$);水果和蔬菜 Pb 含量远低于其他 3 种作物 Pb 含量,存在显著性差异 ($P < 0.05$),而茶叶和旱地作物与水稻、水果和蔬菜存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3 不同土地利用类型下土壤 Pb 含量对人体健康的风险分析

目前,大部分有毒污染物的人类参照接触剂量标准均已经建立^[17],以此为依据可以进行按土壤-作物-人类特定污染物迁移积累途径的数学关系建模,并用来评估土壤环境污染物积累的人类健康风险^[18]。1993 年 WHO/FAO 规定了人体每周 Pb 允许摄入量为 $25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$,以体重 60 kg 的成人计,则人体 Pb 的日允许摄入量(ADI)为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。一般情形下重金属污染通过土壤-植物-人体途径的摄取约为人体实际总摄入量的 50%,即取 0.5ADI 作为该摄取途径的极限值^[18-20]。以此为依据,对研究区不同土地利用类型下 Pb 通过土壤-作物饮食途径对人体健康造成的风险进行计算,计算公式为:

$$CDI = \frac{C_s \times A_{lw} \times PIR_z \times FI_z \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

式中:CDI 为通过食物链途径摄入的 Pb 的人体单位体重的日均暴露量, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_s 为研究区农产品产地土壤 Pb 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,由实际监测数据获得; A_{lw} 为 Pb 从土壤到农作物中的转换系数,即富集系数; PIR_z 为作物 z 的每日膳食量,即人体对某种作物的日平均暴露量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$,由研究区膳食结构调查数据获得; FI_z 表示作物 z 每日膳食量中来自调查区的取食分数,缺省为 1; ABS 为胃肠吸收系数,不同的污染物不同,成年人铅一般取值为 0.1; EF 为暴露频率(日/年),缺省值为 360; ED (exposure duration) 为暴露持续时间(年),缺省值为 30; BW 为人体体重, kg,缺省值为 60.1 kg; $AT = ED \times 365$ 。

土壤 Pb 风险表征采用商值法,计算公式为:

$$\text{风险商值}(HQ) = \frac{CDI}{0.5 \times ADI}$$

式中:ADI 值为 WHO/FAO 等制定的重金属 Pb 的参考剂量值,取值为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$,一般取 0.5ADI 作为该摄取途径的极限值。 $HQ < 1$,表明土壤 Pb 含量不会对人体健康造成危害; $HQ > 1$,表明土壤 Pb 含量已对人体健康造成危害,处于不可接受的水平。

据研究区居民膳食结构调查,每人每日平均消耗稻米 0.30 kg,各种蔬菜约 0.36 kg,水果约 0.014 4 kg,其他谷物、甘薯等旱地作物约 0.058 kg。运用上述公式,计算研究区不同土地利用类型土壤 Pb 对人体健康的风险,结果见表 3 所示。

从表 3 可以看出,研究区人群水果和旱地作物的日均食用量较低,因食用水果和旱地作物而导致的每人每日的 Pb 摄入量也比较低,由此计算出的果园和旱地利用土地利用类型下土壤 Pb 对人体健康的风险商值也比较小,果园土壤 Pb 对人体健康的平均风险商值为 1.67×10^{-5} ,旱地土壤 Pb 对人体健康的平均风险商值 7.44×10^{-5} ,而蔬菜地和稻田土壤 Pb 对人体的

表 2 不同土地利用方式下作物 Pb 含量积累特征

Table 2 Characteristics of crop lead accumulation under different land use types

作物类型	样本数 N	分布类型	含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		变异系数 C_v	P_{s-w}	超标率/%
			范围	平均值			
蔬菜	125	对数正态分布	0.012~1.39	0.12bc	1.26	0.011	37.9
茶叶	58	偏态分布	0.025~2.27	0.78b	0.56	0.00	0
水稻	119	偏态分布	0.072~8.15	1.22a	0.74	0.00	81.5
水果	42	对数正态分布	0.023~0.31	0.063bc	0.66	0.49	21.4
旱地作物	58	对数正态分布	0.007~9.59	0.20b	1.91	0.04	50.9
全部	402	偏态分布	0.007~9.59	0.34	1.37	0.00	45.02

注:凡有一个相同标记字母的即为差异不显著,凡具有不同标记字母的即为差异显著,并用 a、b 和 c 表示。

表 3 不同土地类型下土壤 Pb 对人体健康的风险分析

Table 3 Risk analysis of soil lead under different land use types

土地类型	Pb 摄入量/ $\mu\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$			Pb 风险商值		
	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差
菜地	0.007 02~1.24	0.16	0.24	6.68×10^{-5} ~1.012	0.001 5	0.002 3
稻田	0.035~4.58	0.85	0.69	0.000 34~2.044	0.008 1	0.006 6
果园	0.000 53~0.007 3	0.001 8	0.001 2	5.08×10^{-6} ~ 6.99×10^{-5}	1.67×10^{-5}	1.1×10^{-5}
旱地	6.28×10^{-5} ~0.091	0.007 8	0.015	5.98×10^{-7} ~0.000 87	7.44×10^{-5}	0.000 14

健康风险较高,其中蔬菜地土壤 Pb 对人体健康的最高风险商值达到了 1.012,风险商值均值为 0.001 5,稻田土壤 Pb 对人体健康的最高风险商值达到了 2.044,风险商值均值为 0.008 1,表明在这两类土地利用下,均有土壤 Pb 含量对人体健康造成危害的样点存在,处于不可接受水平。尤其是稻田,由于研究区居民以稻米为主食,人群稻米食用量较高为 $0.30\text{ kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,而因水稻食用导致的居民 Pb 摄入量均值高达 $0.85\mu\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

3 结论

(1)研究区不同土地利用类型下,土壤 Pb 累积的程度不同,菜地土壤 Pb 累积程度最高,果园土壤 Pb 累积程度最低。研究区 5 种土地利用类型土壤 Pb 含量存在一定的差异性,方差分析结果表明,菜地土壤与茶园、果园土壤之间,稻田、旱地与茶园土壤之间, Pb 含量存在显著差异性。

(2)研究区不同土地利用方式对作物 Pb 积累的影响较大,5 种作物中,水稻 Pb 平均含量最高,水果 Pb 平均含量最低,方差分析结果表明,水稻 Pb 含量显著高于其他 4 种作物,水果和蔬菜 Pb 含量远低于其他 3 种作物。

(3)风险分析结果表明,果园和旱地利用土地利用类型下土壤 Pb 对人体健康的风险较小,稻田和菜地土壤 Pb 含量对人体健康的风险较大,均存在土壤 Pb 含量对人体健康造成危害、处于不可接受的样点,应采取积极措施进行区域作物的种植结构调整,或对土壤 Pb 污染的区域进行治理和修复。

参考文献:

- [1] 邢光熹,朱建国.土壤微量元素和稀土元素化学[M].北京:科学出版社,2003:1-50.
XING Guang-xi, ZHU Jian-guo. Soil microelement and rare earth element chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-50.
- [2] Markus J, McBratney A B. A review of the contamination of soil with lead(II): Spatial distribution and risk assessment of soil lead[J]. *Envi-*

ronment International, 2001, 27: 399-411.

- [3] Kaiser J. Toxicologists shed new light on old poisons[J]. *Science*, 1998, 279: 1850-1851.
- [4] 王 灵,朱建雯,钱 翌,等.乌鲁木齐市菜地土壤和蔬菜铅含量及风险评价[J].新疆农业大学学报,2008,31(1):46-50.
WANG Ling, ZHU Jian-wen, QIAN Yi, et al. Lead content in vegetable and soil of vegetable plot in Urumqi City and its risk evaluation[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2008, 31(1): 46-50.
- [5] 姬艳芳,李永华,孙宏飞,等.凤凰铅锌矿区土壤-水稻系统中重金属的行为特征分析[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2143-2150.
JI Yan-fang, LI Yong-hua, SUN Hong-fei, et al. Translocation and accumulation of heavy metals in soil-paddy system at Fenghuang Lead-Zinc Deposit Area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2143-2150.
- [6] 赵 勇,李宏娟,魏婷婷,等.土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈值研究[J].中国生态农业学报,2008,16(4):843-847.
ZHAO Yong, LI Hong-juan, WEI Ting-ting, et al. Relationship between soil Pb pollution and Pb contents in vegetables and pollution threshold of soil Pb[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 843-847.
- [7] 马 瑾,周永章,窦 磊,等.广东汕头市农业土壤和蔬菜铅含量及健康风险评估[J].安全与环境学报,2007,7(6):77-79.
MA Jin, ZHOU Yong-zhang, DOU Lei, et al. Investigation in Shanton City, Guangdong, over the lead content in the soil and vegetables[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(6): 77-79.
- [8] 丁爱芳,潘根兴.南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析[J].生态环境,2003,12(4):409-411.
DING Ai-fang, PAN Gen-xing. Contents of heavy metals on soils and Chinese Cabbages(*Brassica chinensis*) from some urban vegetable fields around Nanjing and the human health risks[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 409-411.
- [9] 陈同斌,宋 波,郑袁明,等.北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J].中国农业科学,2006,39(8):1589-1597.
CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(8): 1589-1597.
- [10] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114: 313-324.
- [11] 郑袁明,陈同斌,陈 煌,等.北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累[J].地理学报,2005,60(5):791-797.
ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, CHEN Huang, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City[J]. *Acta*

- Geographica Sinica*, 2005, 60(5):791-797.
- [12] 南忠仁, 程国栋. 干旱区污灌农田作物系统重金属 Cd Pb 生态行为研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):210-223.
NAN Zhong-ren, CHENG Guo-dong. Behaviors of heavy metals (Cd and Pb) in crops grown in land of arid regions irrigated by wastewater [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(4):210-223.
- [13] Merry R H, Tiller K G, Alston A M. The effects of contamination of soil with copper, lead and arsenic on the growth and composition of plants [J]. *Plant and Soil*, 1986, 91(1):115-128.
- [14] 李丽光, 何兴元, 曹志强, 等. 土壤-作物系统中铅的研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1):78-82.
LI Li-guang, HE Xing-yuan, CAO Zhi-qiang, et al. Advances in studies on lead in soil-crop system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1):78-82.
- [15] 刘凤枝, 刘潇威. 土壤和固体废物监测分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:260-262.
LIU Feng-zhi, LIU Xiao-wei. The monitoring technology of soil and solid waste[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:260-262.
- [16] 杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998:101-104.
YANG Hui-fen, LI Ming-yuan, SHEN Wen. Handbook of physico-chemical test standards on food hygiene[M]. Beijing: Standards Press of China, 1998:101-104.
- [17] Mielke H W, Reagan P L. Soil is an important pathway of human lead exposure[J]. *Environ Health Persp*, 1998, 106:217-229.
- [18] 潘根兴, Andrew C Chang, Albert L Page. 土壤-作物污染物迁移分配与食物安全的评价模型及其应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7):854-858.
PAN Gen-xing, Andrew C Chang, Albert L Page. Modeling transfer and partitioning of potentially toxic pollutants in soil-crop system for human food security[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7):854-858.
- [19] Munoz O M, Bastias M J, Araya M, et al. 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*, 2005, 43(11):1647-1655.
- [20] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评估[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5):60-63.
LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Tai-hu lake region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5):60-63.
- [21] 杨晓光, 李艳平. 中国 2002 年居民身高和体重水平近 10 年变化趋势分析[J]. 中华流行病学杂志, 2005, 26(7):489-493.
YANG Xiao-guang, LI Yan-ping. Study on weight and height of the Chinese people and the differences between 1992 and 2002 [J]. *Chin J Epidemiol July*, 2005, 26(7):489-493.