

杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价

谢正苗^{1,2}, 李静^{1,2}, 徐建明², 叶兰军², 王碧玲²

(1. 杭州电子科技大学环境科学与工程系, 杭州 310018; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

摘要: 对杭州市 4 个蔬菜基地土壤中 Pb、Zn、Cu 进行测定分析, 利用不同的评价方法和标准来评价土壤重金属的环境质量状况, 并在 GIS 软件平台下, 通过克里格插值法分析了江干区蔬菜基地土壤-蔬菜重金属含量空间分布特征。结果发现蔬菜基地土壤中重金属含量超过自然背景值, 未超过以国家土壤重金属环境质量标准, 是符合无公害蔬菜基地的要求的; 4 个调查区中拱墅区土壤中重金属含量大于其它 3 区; 江干区蔬菜基地土壤-蔬菜中重金属的空间变异很大; 小白菜/小青菜中 Zn 和 Cu 的含量未超标, Pb 则超标; 2 种蔬菜的富集系数均是 $Zn > Pb > Cu$, 小青菜 Pb、Zn、Cu 的富集系数和含量均大于小白菜, 更易受到土壤中重金属的影响。

关键词: 土壤; 蔬菜; 重金属; GIS; 评价; 富集系数

中图分类号: X53; X820.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)04-0742-06

Evaluation on Environmental Quality of Pb, Zn and Cu Contents in Vegetable Plantation Soils and Vegetables in Hangzhou Suburb

XIE Zheng-miao^{1,2}, LI Jing^{1,2}, XU Jian-ming², YE Lan-jun², WANG Bi-ling²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Hangzhou University of Electronics Science and Technology, Hangzhou 310018, China; 2. College of Environmental Science and Natural Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Contents of heavy metals (Pb, Zn, Cu) in soils from 4 main vegetable plantations in Hangzhou suburb were investigated to evaluate environmental quality of heavy metals of soils and vegetables. Different evaluation methods and evaluation standards of heavy metals were used for comparison. Kriging method was applied to study the spatial variability of heavy metals in soil-vegetable system. The distribution maps of the spatial variability of heavy metals in soil-vegetable system in Jianggan District were obtained based on GIS method. The results show that the soils were polluted with Pb, Zn, and Cu using natural background values as evaluation standard. While using National Standard as evaluation standard, the soils were not polluted. Contents of heavy metals in Gongshu District were the highest of four investigated districts. The concentration distribution of heavy metals had different spatial variability. The content of Pb in vegetables was higher than those of Zn and Cu and exceeded the national vegetable sanitation standard. The order for their enrichment coefficients was as follows: $Zn > Pb > Cu$. The accumulation coefficient for green vegetable was higher than that of Chinese cabbage, indicating green vegetable could easily accumulate heavy metals from soils than Chinese cabbage.

Key words: soil; vegetable; heavy metal; GIS; evaluation; accumulation coefficient

随着城市化进程的不断加快, 城市人口不断增加, 城市中人类经济活动的日益频繁和工业的迅速发展, 环境污染加剧, 工业“三废”的排放及垃圾等废弃物和含金属的农药、化肥的不合理使用, 导致蔬菜地土壤受重金属污染, 进而污染蔬菜, 再通过食物链进入人体, 使人产生慢性中毒, 而给人体健康带来潜在的危害^[1,2]。城市化对市区蔬菜基地土壤重金属的影响已有一些人做过研究, 但这些研究仅大多集中于离城市距离的远近不同, 从土壤重金属与其受城市化影响的关系出发来研究土壤重金属的分布情况和累积情况。但是随着城市发展, 城市功能区划分, 各个功能区的不同定位对土壤重金属分布的影响, 及城区小尺度蔬菜基地土壤-蔬菜重金属的空间

分布特征的研究, 国内外鲜见报道^[3,4]。

本文以杭州市为例, 研究在市区内不同功能分区蔬菜基地的土壤重金属水平空间变化, 同时对其环境质量进行了监测评价并讨论其成因, 并在 GIS 软件平台下, 通过克里格插值法分析了江干区蔬菜基地土壤-蔬菜重金属含量空间分布特征, 通过富集指数来说明蔬菜与土壤中重金属含量的关系, 对防止蔬菜重金属污染, 保障人体健康具有重要的意义。

收稿日期: 2005-06-15; 修订日期: 2005-08-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999011809); 浙江省科技厅资助项目

作者简介: 谢正苗(1956~), 男, 博士, 教授, 主要从事环境污染化学和环境污染修复的研究。

* 通讯联系人, E-mail: zhmxie@zju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杭州市属亚热带季风性气候,四季分明,温暖湿润,光照充足,雨量充沛.杭州市区年平均气温为16.4℃,年光照时数为1752h,无霜期235d左右,年平均降雨量1439mm,年相对湿度为77%,全年各季水、热差异大.杭州市地处钱塘江水系入海口,位于水网平原与滨海平原之间,地势平坦,海拔3~5m,境内地貌类别多样,江河纵横,湖泊密布,成土母质主要为河(湖)相或浅海相沉积物^[5].本研究主要涉及杭州市的江干、下城、拱墅、西湖4个区,是杭州市的主要蔬菜基地.

1.2 土壤样品的采集及分析

杭州市蔬菜生产主要集中在江干区,该区蔬菜生产量约占杭州市80%的蔬菜供应.此外西湖区的转塘镇、下城区的石桥镇、拱墅区的半山镇也有一定规模的菜地,其他区也有较为零星的菜地.根据蔬菜基地面积的大小、区域的地质、土壤分布情况布设了83采样点.利用GIS技术将土壤主坡面点位图数字化,并根据相应土壤表层0~20cm的数据资料,绘成地统计分析的土壤样点分布图,其中以江干区(不包括下沙经济开发区)采样点分布居多(图1).

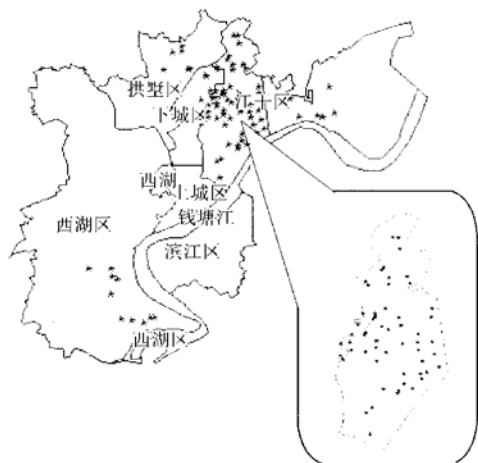


图1 杭州市蔬菜基地调查样点分布图

Fig. 1 Distribution pattern of collected soil samples in Hangzhou suburb

测定项目包括土壤和蔬菜 Pb、Zn、Cu, 及土壤水溶性铅 (WSPb)、水溶性锌 (WSZn)、水溶性铜 (WSCu). Pb、Zn、Cu 的测定用 HF-HClO₄-HNO₃ 消化, 原子吸收分光光度法. WSPb、WSZn 和 WSCu 用 15 mL 去离子水在室温下振荡 2h 后, 离心 30min, 分离定容后上清液, 用原子吸收分光光度计测定^[6].

1.3 土壤-蔬菜专题图的产生

克里格插值法是对区域变量进行无偏最佳估值的一种可靠方法^[7].采用 GIS 软件平台 ArcGIS8.1 中普通克里格法,在约束条件下可根据采样点的含量分布对土壤和蔬菜属性进行最优、无偏估值,产生土壤-蔬菜环境质量分布图.

2 评价方法及标准

本文采用中国绿色食品发展中心推荐的单项因子污染指数法和综合污染指数法进行现状评价^[8].选用杭州市土壤自然背景值和结合评价点的土壤 pH 值的国家土壤环境质量二级标准 (GB15618-1995) 作为评价标准^[8,9]对比说明杭州市蔬菜基地土壤重金属的环境质量状况,见表1.

表1 土壤重金属污染评价标准/(mg·kg⁻¹)

Table 1 The evaluated standards of heavy metal concentrations in soil environment/(mg·kg⁻¹)

重金属	国标二级			杭州土壤背景值 ¹⁾
	pH < 6.5	6.5 < pH < 7.5	pH > 7.5	
Pb	250	300	350	21.75 ± 14.34
Zn	200	250	300	76.51 ± 31.94
Cu	50	100	100	18.63 ± 9.23

1) 源自 1985~1986 年浙江省土壤重金属背景值调查统计值

(1) 单因子指数法^[8] 单因子指数法是目前国内普遍采用的方法之一,其计算公式为式(1):

$$P_i = c_i / S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; c_i 为污染物 i 的实测浓度 (mg/kg); S_i 为污染物 i 的评价标准 (mg/kg); $P_i > 1$, 表示污染; $P_i \leq 1$, 表示未污染;且 P_i 值越大,则污染越严重.

(2) 内梅罗综合污染指数法^[9] 为全面反映各污染物对土壤的不同作用,突出高浓度污染物对环境质量的影响,采用目前国内普通采用的方法之一内梅罗综合污染指数法,计算公式为式(2):

$$P_{\text{综}} = \{[(c_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (c_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2\}^{1/2} \quad (2)$$

式中, $(c_i/S_i)_{\text{max}}$ 为土壤污染中污染指数最大值; $(c_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤污染中污染指数的平均值.土壤分级标准见表2.

3 结果与讨论

3.1 土壤中重金属含量的环境质量评价

3.1.1 对采样点进行单因子指数法评价

以杭州土壤背景值(图2)和国家二级标准 (GB15618-1995) 为评价标准的土壤重金属的单项污染指数在各区的分布见图3.

表 2 土壤分级标准^[10]

Table 2 Soil quality grading based on pollution indices

等级划分 ¹⁾	$P_{\text{综}}$	污染等级	污染水平
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级	尚清洁
3	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻污染	土壤轻污染作物开始受到污染
4	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中污染	土壤作物均受中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3$	重污染	土壤作物均受污染已相当严重

1) 1、2 级适宜发展无公害食品生产

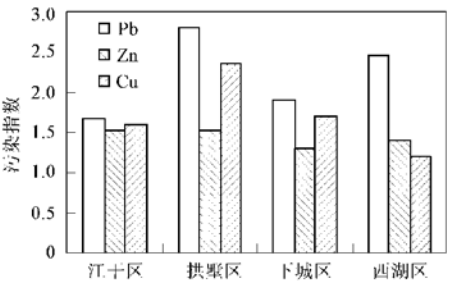


图 2 土壤重金属污染指数在各区的分布
(以土壤背景值为评价标准)

Fig. 2 Index of soil pollution by heavy metals
(using natural background values as evaluation standard)

从图 2 可以看出以土壤背景值为评价标准, 3 种重金属的污染指数值都大于 1, 表示被污染, 从污染指数看 $Pb > Cu > Zn$, 从区域分布看拱墅区 Pb 、 Cu 污染指数高于其他 3 区, 而 Zn 的污染指数变化不大; 以国家二级标准为评价标准 (图 3), 3 种重金属的污染指数值都小于 0.5, 表示未被污染. 从污染指数看 $Zn > Cu > Pb$, 从区域分布看拱墅区 Cu 污染指数高于其他 3 区, Pb 、 Zn 污染指数在各区没有多大的变化趋势. 从上可以说明杭州市蔬菜基地的重金属含量受人为影响而在土壤中有所积累, 超过背景值但还没有超过国家的二级标准.

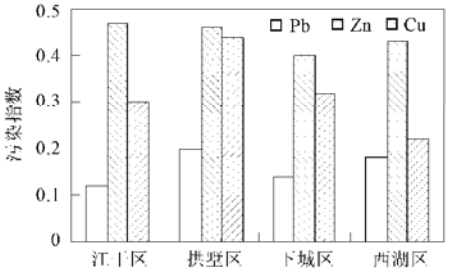


图 3 土壤重金属污染指数在各区的分布
(以国家二级标准为评价标准)

Fig. 3 Index of soil pollution by heavy metals
(using national standard as evaluation standard)

3.1.2 内梅罗综合污染指数法评价

对采样点进行内梅罗综合污染指数法评价, 以土壤背景值和国家二级标准为评价标准的土壤重金属的综合污染指数在各区的分布见图 4. 以土壤背景值为评价标准, 土壤重金属的综合污染指数值全都大于 1.5, 污染水平从轻污染到中污染, 从区域分布看综合污染指数拱墅区 $>$ 西湖区 $>$ 下城区 $>$ 江干区; 以国家二级标准为评价标准, 土壤重金属的综合污染指数值全都小于 0.5, 未被污染, 从区域分布看各区综合污染指数相差不大.

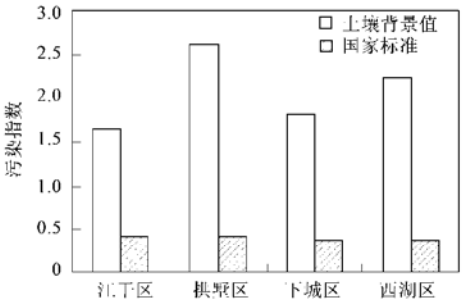


图 4 土壤重金属污染指数在各区的分布
(内梅罗综合污染指数法评价)

Fig. 4 Index of soil pollution by heavy metals
(using Nemoro integrative index as evaluation method)

3.1.3 讨论

蔬菜基地土壤中 Pb 、 Zn 、 Cu 含量基于自然背景值和国家二级标准得出截然不同的 2 种评价结果. 可能是因为近几年来, 杭州市不断加大城市建设力度, 加上城区东扩、旅游西进战略的实施, 及创建国家环保模范城市和生态园林城市活动的开展, 都加快了城郊土壤的演化. 特别是随着工业区的扩大、商业和旅游区的发展及人口 (包括活动人口) 的增加, 工业“三废”、车辆排放的尾气及生活垃圾、生活污水的增加都给杭州市区和近郊的土壤理化性质带来了很大的影响, 致使土壤中重金属元素如铅等的增加. 另外由于部分蔬菜基地长年大量施用垃圾肥、污水灌溉、污泥农用及冶炼厂大气和灰尘沉降等, 使得杭州市蔬菜基地的这 3 种重金属含量在土壤中有所积累. 从污染指数结果表明, 拱墅区污染程度大于其它 3 区, 因为杭州市区交通流量大, 各项经济贸易、文体、商业等活动较为频繁. 商业中心主要在上城区; 而风景旅游点几乎都在西湖区; 农业土壤主要分布在江干区, 江干区历来是杭州市区的蔬菜、畜禽等副食品基地; 拱墅区分布有大型工业企业以及乡镇企业等. 因此, 由于功能分区定位的不同, 蔬菜基地土

壤重金属含量拱墅区> 西湖区> 下城区> 江干区.

3.2 江干区土壤-蔬菜的空间分布特征及评价

3.2.1 蔬菜中重金属统计分析及污染评价

杭州市蔬菜基地小白菜、小青菜可食部位重金属监测统计及基于食品卫生标准限值^[11]评价结果见表 3,土壤-蔬菜重金属含量的空间变异分布见图 5.

表 3 蔬菜中重金属含量的描述统计及评价结果¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Descriptive statistics and the evaluated results of heavy metal concentrations in vegetables/mg·kg⁻¹

项目	小白菜			小青菜		
	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
含量范围	0.48~ 3.24	2.00~ 3.15	0.13~ 0.52	0.36~ 1.70	1.76~ 3.88	0.33~ 0.77
平均值	0.72	2.52	0.33	0.73	2.93	0.5
标准偏差	0.44	0.27	0.07	0.27	0.6	0.1
变异系数/%	61.16	10.86	22.99	36.45	20.44	20.94
污染指数	3.59	0.13	0.03	3.65	0.15	0.05

1) 食品卫生标准限值: Pb ≤0.2; Zn ≤20.0; Cu ≤10.0

从表 3 结果看杭州市小白菜与小青菜可食部位 Zn、Cu 的含量未超过无公害蔬菜卫生标准, Pb 则远超过无公害蔬菜卫生标准,说明这 2 种蔬菜受到 Pb 的污染;从变异系数看,均是 Pb> Cu> Zn,其中小白菜 Pb 的变异系数高达 61.16%,远大于 Zn、Cu,具有强变异性,说明受到外来污染的影响大.从图 5 可以直观地判断出:土壤中 Pb、Zn、Cu 含量低于土壤背景值的区域很少,大部分介于背景值与国家二级标准之间,未受到污染,而且这 3 种元素相互间的空间分布相似,与土壤水溶性含量及 2 种蔬菜可食部位的重金属含量的空间分布则存在较大的区别;土壤中 Pb、Zn、Cu 水溶性含量的空间分布相似,与小青菜重金属含量的空间分布相似,与小白菜有较大区别;小白菜和小青菜可食部位 Zn、Cu 在整个区域含量分布都远低于无公害蔬菜卫生标准, Pb 反之;小白菜 Pb、Zn、Cu 含量相互间的空间分布相似;小青菜 Pb、Zn、Cu 的含量分别大于小白菜的,且相互间空间分布存在差异.

3.2.2 成因分析

(1) 土壤与蔬菜中重金属的关系 为了说明土壤重金属的含量对蔬菜重金属含量的直接影响,以及蔬菜对重金属的吸收和累积特性的差异,本文在此引用富集系数^[12],即蔬菜可食部分的重金属的含量与土壤中重金属含量的分数比值,以此来衡量蔬菜中重金属质量分数与土壤中重金属质量分数的相关性.

富集系数 = 蔬菜含量/土壤含量 × 100%

小白菜及小青菜重金属的富集系数见表 4.从表 4 看土壤与蔬菜中重金属含量存在着一定的相关性;小白菜与小青菜富集系数均是 Zn> Pb> Cu;小青菜的各项重金属富集系数均大于小白菜的,说明小青菜要比小白菜更易受到土壤中重金属的影响.

(2) 土壤与蔬菜重金属含量的相关分析 为了探求土壤-蔬菜重金属的化学行为和其空间分布的差异性,对土壤-小白菜、土壤-小青菜中 Pb、Zn、Cu 的含量进行相关分析(表 5 与表 6).结果表明土壤中 Pb、Zn、Cu 的全量与水溶性含量及小白菜中含量相互间都显著相关,其中土壤 Zn 全量与小白菜 Pb、Cu 之间都存在显著正相关($p < 0.05$),土壤 Pb、Cu 全量与小青菜存在显著正相关($p < 0.01$);土壤中 Pb、Zn、Cu 的水溶性含量与小青菜存在显著的正相关($p < 0.01$),与小白菜的相关性不显著.

3.2.3 讨论

小白菜与小青菜可食部位 Zn、Cu 的含量未超标, Pb 则超标,而江干区蔬菜基地的土壤 Pb、Zn、Cu 的环境质量是符合无公害蔬菜基地要求的,可以认为蔬菜重金属含量超标的成因较为复杂,可能与来源不明的污染源有关,说明土壤的重金属只是影响蔬菜重金属含量的一个因子,蔬菜重金属污染还受到大气、水质环境等多种环境因子的影响.这 2 种蔬菜中 Pb 含量的超标,可能与选取的 2 种蔬菜同属叶菜类,而以大气污染为主要来源的气态或生态 Pb 在叶菜类的表面吸附能力较强有关^[12, 13].

表 4 蔬菜中各元素富集系数

Table 4 Enrichment coefficients of heavy metals in the vegetables

项目	小白菜			小青菜		
	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
蔬菜测定值/mg·kg ⁻¹	0.72 ± 0.44	2.52 ± 0.27	0.33 ± 0.07	0.73 ± 0.27	2.93 ± 0.60	0.50 ± 0.10
土壤测定值/mg·kg ⁻¹	38 ± 14	120 ± 37	31 ± 10	38 ± 14	120 ± 37	31 ± 10
富集系数	1.99	2.23	1.12	2.15	2.69	1.81



图 5 土壤-蔬菜重金属空间分布

Fig. 5 Spatial variation of heavy metals in soils and vegetables produced by ordinary Kriging

表 5 土壤与小白菜重金属含量的相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation coefficients among Pb, Zn and Cu contents in soil and Chinese cabbage

相关因子	土壤 Pb	Zn	Cu	水溶性 Pb	Zn	Cu	小白菜 Pb	Zn	Cu
土壤 Pb	1								
Zn	0.31*	1							
Cu	0.76**	0.27*	1						
水溶性 Pb	-0.14	-0.11	-0.1	1					
Zn	0.13	-0.02	0.21	0.37**	1				
Cu	-0.22	-0.02	-0.09	0.57**	0.50**	1			
小白菜 Pb	0.1	0.31*	0.12	-0.07	0.02	-0.06	1		
Zn	0.07	0.17	-0.01	0.12	0.04	0.09	0.37**	1	
Cu	0.12	0.30*	0.19	0.05	0.04	-0.01	0.50**	0.68**	1

1) $p < 0.05$; ** $p < 0.01$, 下同

表 6 土壤与小青菜重金属含量的相关性分析

Table 6 Correlation coefficients among Pb, Zn and Cu contents in soil and green vegetable

相关因子	土壤 Pb	Zn	Cu	水溶性 Pb	Zn	Cu	小青菜 Pb	Zn	Cu
土壤 Pb	1								
Zn	0.31*	1							
Cu	0.76**	0.27*	1						
水溶性 Pb	- 0.14	- 0.11	- 0.1	1					
Zn	0.13	- 0.02	0.21	0.37**	1				
Cu	- 0.22	- 0.02	- 0.09	0.57**	0.50**	1			
小青菜 Pb	- 0.49**	- 0.2	- 0.43**	0.38**	0	0.13	1		
Zn	0.18	- 0.09	0.18	0.46**	0.76**	0.40**	- 0.01	1	
Cu	- 0.39**	- 0.1	- 0.39**	0.19	0.2	0.47**	0.26	0.23	1

2 种蔬菜中重金属对土壤中重金属富集系数均是 Zn> Pb> Cu, 这可能是 Zn 和 Cu 都是蔬菜的营养元素, 蔬菜对其有一定的需求量, 理应有较高的吸收量, 但土壤 Cu 的有效性较低, 故富集系数不高, 在土壤-蔬菜系统中, Pb 不是蔬菜的必需营养元素, 所以 2 种蔬菜对 Pb 的富集系数低于 Zn. 而与 Cu 接近^[14, 15]. 小青菜富集系数均大于小白菜的, 说明 2 种蔬菜中小青菜要比小白菜更易受到土壤中重金属含量的影响, 这可能与蔬菜自身的生理特征差异有关.

通过相关性分析可解释土壤-蔬菜重金属空间分布的差异性. 土壤 Pb、Zn、Cu 的全量及水溶性含量之间存在显著的正相关, 这可能是因为土壤重金属元素之间存在多种形式的相互作用, 即交互作用的关系. 小青菜重金属含量与土壤水溶性含量之间显著的正相关, 说明土壤中的重金属易向小青菜转移; 小白菜 Pb、Zn、Cu 含量之间显著的正相关, 而小青菜不显著, 且小青菜富集系数均大于小白菜的, 主要原因可能与它们各自的遗传特性有关. 对于 Pb、Zn、Cu 含量在江干区土壤中呈现出失衡的空间分布现象, 具体原因还有待进一步的研究与探讨.

4 结论

(1) 通过调查研究及测定结果的分析和评价表明, 杭州市蔬菜基地的 Pb、Zn、Cu 含量由于受到人为的影响而在土壤中有所积累, 远超过本地的背景值, 但未超过无公害蔬菜生产基地土壤环境质量指标, 杭州市郊这 4 个主要蔬菜基地的土壤重金属环境质量还是符合无公害蔬菜基地的要求的.

(2) 小白菜与小青菜 2 种蔬菜中重金属 Zn、Cu 未超过无公害蔬菜卫生标准, Pb 则远超过无公害蔬

菜卫生标准, 说明这 2 种蔬菜已经受到 Pb 元素的污染, 因此必须采取相应的措施对蔬菜中 Pb 含量超标情况进行控制.

参考文献:

[1] 李静, 谢正苗, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 277~ 280.

[2] 周建利, 陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与展望[J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(5): 476~ 480.

[3] 胡克林, 张凤荣, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 463~ 468.

[4] 房世波, 潘剑君, 等. 南京市郊蔬菜地土壤中重金属含量的时空变化规律[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 339~ 342.

[5] 章明奎, 魏孝孚, 厉仁安编. 浙江省土系概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[6] 南京农业大学主编. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 226~ 228.

[7] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557~ 563.

[8] 黄国锋, 吴启堂, 容天雨, 等. 无公害蔬菜生产基地环境质量评价[J]. 环境科学研究, 1999, 12(4): 53~ 56.

[9] 黄国锋, 吴启堂. 绿色食品产地土壤环境质量现状评价标准的修正[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2): 123~ 125.

[10] 中国绿色食品发展中心编. 绿色食品产地环境质量评价纲要(试行)[M]. 1994.

[11] 中国预防医学科学院标准处编. 食品卫生国家标准汇编及汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988. 1995.

[12] 王丽凤, 白俊贵. 沈阳市蔬菜污染调查及防治途径研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(2): 84~ 88.

[13] 赵锁劳, 段敏, 马往校, 等. 西安市蔬菜中重金属污染调查研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 112~ 116.

[14] 段敏, 马往校, 李岚. 陕西省部分城市蔬菜中重金属污染研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, (4): 89~ 94.

[15] 于磊, 张柏, 朱颜明, 等. GIS 支持下的黑土区环境地球化学空间特征研究——以黑龙江黑土区为例[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 124~ 126.