

## 山东省滨城区农田土壤重金属来源解析及评价

咏梅<sup>1</sup> 张漫<sup>1\*</sup> 王圣伟<sup>1,2</sup> 刘刚<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院/现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083;  
2. 西北师范大学 计算机科学与工程学院,兰州 730070)

**摘要** 以山东省滨城区为研究对象,对农田土壤重金属来源进行解析及评价。通过对表层土壤中7种重金属(Pb、Hg、Cu、Cd、Cr、As和Zn)及速效磷、速效钾进行主成分分析,探讨研究区内土壤重金属形成原因,并采用单因子指数和加权综合指数法对土壤环境质量进行评价。分析结果表明:研究区域内的土壤中7种重金属元素含量的平均值均未超过食用农产品产地环境质量标准,部分样点中Pb、Cd、Cu和As总量超过背景值,超出比例分别为38.3%、46.8%、42.6%和14.9%。主成分分析结果表明,土壤中7种重金属的富集原因存在差异,其中重金属Hg、Cd、Cr和As主要源于化肥、农药、有机肥的过量施用以及灌溉用水受污染;Pb、Cu和Zn主要源于粉尘及汽车轮胎磨损所产生有害气体中的重金属。单因子指数评价及加权综合指数评价结果表明,重金属元素Hg的单因子污染指数达到轻度污染水平,占总采样点个数的21.3%,其余6种重金属元素均属于土壤环境质量评价分级标准中的“安全”等级;加权综合污染指数平均值为0.54,表明研究区内土壤环境质量总体状况优良,大部分地区处于“安全”等级。

**关键词** 土壤;重金属;主成分分析;环境质量;评价

**中图分类号** S 24      **文章编号** 1007-4333(2014)06-0119-07      **文献标志码** A

## Farmland soil heavy metal source analysis and evaluation in Bincheng County of Shandong Province, China

YONG Mei<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>1\*</sup>, WANG Sheng-wei<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering/Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
2. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** An investigation on heavy metal content in agricultural producing area, i. e., Pb, Hg, Cu, Cd, Cr, As, and Zn in the Bincheng district, Shandong province, was conducted using principal component analysis (PCA) for the source investigation of soil heavy metal. Single factor index method and weighted pollutant index method were used to evaluate the soil environment quality. The results showed that, the average content of Pb, Hg, Cd, Cu, Cr, As and Zn in the farmland soil were lower than the environmental quality standard of edible agricultural products, but the total amount of Pb, Cd, Cu and As in some sampling area were higher than the background value of study area, and the ratio was 38.3%, 46.8%, 42.6% and 14.9% respectively. The coefficient of variation indicated that Hg, Cd and Cu have higher coefficient of variation, which mean these heavy metals in the soil were affected by human activity (e. g., overuse of chemical fertilizers and pesticides, industrial and municipal discharges, animal wastes, sewage irrigation, etc.). Other heavy metals' coefficients of variation were lower than 30%, defined as weak variation. The PCA performed on seven heavy metals, soil nutrient available P and available N identified three principal components, which controlled their variability in agricultural soils. Available P, Hg, Cd, Cr, as were in PC1, were caused by chemical fertilizer, organic

收稿日期: 2014-02-17

基金项目: 国家“863”计划项目(2011AA100704, 2011AA100703)

第一作者: 咏梅, 硕士研究生, E-mail: wulinqiqige@126.com

通讯作者: 张漫, 副教授, 博士生导师, 主要从事精细农业及其支持技术研究, E-mail: cauzm@cau.edu.cn

fertilizer, the unreasonable use of pesticides and sewage irrigation. Heavy metal Pb, Cu, and Zn (PC2) were related to a large number of harmful gas and dust emitted from vehicle and automobile tire wear. Available K was in PC3 could be considered as a natural component, reflecting soil parent material and texture information. The effect of heavy metals in the soils was greatly affected by soil formation, atmospheric deposition, and human activities. These findings provided essential information on the possible sources of heavy metals, which would contribute to the monitoring and assessment process of agricultural soils in worldwide regions. In correlation analysis, anthropogenic metals were significantly correlated. While soil organic matter was comparatively loosely correlated with the soil heavy metals in the study area which confirmed results obtained from PCA. Furthermore, the evaluation of soil environmental quality was conducted and the results suggested that the single factor index of soil heavy metal Hg reached the light pollution levels. The pollutant area occupied 21.3% of whole study area. The other 6 soil heavy metals all in the safe level of soil environmental quality assessment classification standard; the average amount of weighted pollutant index was 0.54, which was lower than 1, means the total situation of the soil environmental quality was in a good condition, and most of the region was in safe level. Since the soil heavy metal Hg in study area present higher coefficient of variation and even higher single factor index, it is necessary to control the automobile tires and exhaust emissions that contains high amount of heavy metals to reduce the accumulation of soil heavy metals.

**Key words** soil; heavy metal; principal component analysis; environmental quality; evaluation

土壤作为种养农产品的重要环境要素,其质量的好坏直接决定了所获取农产品的品质与数量。随着工业化、城市化进程的快速推进,使得重金属、化学农药等污染物通过大气烟尘沉降、污水灌溉、垃圾填埋处理等多种途径进入土壤。重金属污染物进入土壤后不能被土壤微生物分解,逐渐在土壤中积累,进而被作物吸收<sup>[1-3]</sup>。因此,对农产品产地土壤中重金属的来源进行调查,并对土壤环境质量进行评价,是保障农产品产地环境安全的基础工作。

近年来,国内外对土壤中重金属来源解析研究逐渐增多,用于判定环境重金属来源的源解析方法也越来越受到关注。杨忠平等<sup>[4-5]</sup>对长春市土壤 Pb 污染进行了同位素示踪研究,发现长春市中心城区土壤 Pb 污染主要来源于汽车尾气残留污染以及工业燃煤排放,而与当前汽车尾气排放量关系不密切。同位素示踪研究法能够示踪长时间跨度、大空间范围的物质的运动,能够反演或预测元素演化过程的环境,成为研究生态和环境问题的有效手段,但较为精确、稳定同位素示踪技术仅仅适用于铅、锌、镉、铜和镉等 5 种重金属元素<sup>[6]</sup>。另外一种常用方法为统计分析法。研究者通常利用相关分析、主成分分析等方法来判断土壤重金属含量中受人为因素影响明显的元素<sup>[7-8]</sup>;但多数研究在运用主成分分析时,只针对研究目标元素,对反映自然和人为作用的土壤养分信息考虑较少。

本研究拟以黄河三角洲滨州市滨城区为研究区,将研究区域内表层土壤中 7 种重金属(Pb、Hg、

Cu、Cd、Cr、As 和 Zn)信息与速效磷、速效钾等养分信息结合进行主成分分析,探讨研究区土壤重金属富集原因,同时利用主成分分析的结果对产地环境质量进行综合评价,旨在为农产品产地认证和土地可持续利用提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

滨州市滨城区位于华北平原,黄河下游。地处东经 117.47'~118.09',北纬 37.13'~37.36',总面积 1 040.06 km<sup>2</sup>。境内有黄河和徒骇河,自西南向东北流经全境。土壤主要类型为潮土和盐土,土壤表层质地所占面积分别为:轻壤 56.7%、中壤 26.9%、重壤 8.2%、沙壤 7.9%、粘土 0.3%。黄河冲积物是唯一成土母质的基础物质,同时存在土质盐渍化。

### 1.2 采样处理与分析

根据研究区土壤肥力分等图班,在保证样品具有代表性的前提下,于 2011 年 4 月共采集了 47 个土壤样品。采样点分布见图 1。采样时,使用手持式 GPS 记录样点的位置坐标,每个样点在离地块边界 100 m 范围内采集 0~20 cm 的耕层土壤,采用四分法混合后作为该区域的混合样本。土样经过风干、磨碎及过筛后,按 GB/T 15337—2008 进行土壤重金属含量检测。检测参数包括 7 种重金属元素(As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu 和 Zn)以及速效磷、速效钾,其中 As 和 Hg 采用氢化物原子荧光法测定;Pb

和 Cd 采用石墨炉原子吸收光谱法测定;Cr、Cu 和 Zn 采用火焰原子吸收光谱法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提,分光光度法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提,火焰光度法测定。

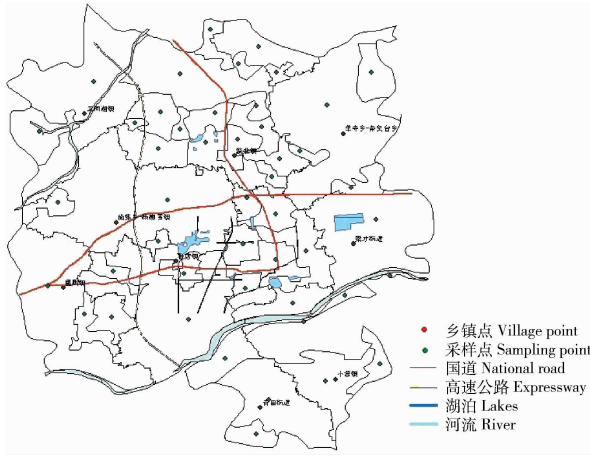


图1 采样点分布

Fig.1 Sampling point distribution map

### 1.3 主成分分析

主成分分析法以降维为目标,将多个变量转化为少数互不相关的几个变量,通过较少的变量得到最多的信息量。对土壤重金属进行主成分分析,再对浓度数据进行分类,以便从众多的影响因素中找出具有最大相关性的影响因子,为追溯土壤重金属来源提供依据<sup>[9]</sup>。本研究运用 SPSS 20.0 统计软件包进行主成分分析。为了消除变量之间在数量级和量纲上的差异,采用 Z 分数法(Z Score)对重金属数据进行标准化。采用 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)和 Bartlett(Bartlett test of Sphericity)法对标准化后的数据集进行主成分分析适宜性检验<sup>[10]</sup>,其中 KMO 统计量取值为 0~1。常用的 KMO 度量标准为: >0.9 表示非常适合;0.8 表示适合;0.7 表示一般;0.6 表示不太适合;<0.5 表示极不适合。Bartlett 用来进行显著性检验,当 SIG<0.05 时,则认为原变量间的相关性显著,适合于作因子分析。

### 1.4 农产品产地环境质量评价方法

#### 1.4.1 评价方法

1)单因子指数法。单因子指数法是对研究对象的某个单因子进行指数权重评定。借助于单因子指数,可以判断研究对象单因子的污染程度,并且可以作为多因子综合评价的基础指标使用。通常利用量

纲 1 进行污染物间对比,常采用实测值和标准值的比例来计算<sup>[11]</sup>。

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

式中: $P_i$  为  $i$  污染物的单因子指数, $C_i$  为对应的实测值, $S_i$  为该污染物的评价标准,下标  $i$  分别表示土壤重金属 Pb、Hg、Cu、Cd、Cr、As 和 Zn。当  $P_i \leq 1$  时,表示清洁,处于污染等级 1;  $1 < P_i \leq 2$ ,表示轻度污染,处于污染等级 2;  $2 < P_i \leq 3$ ,表示中度污染,处于污染等级 3;  $P_i > 3$ ,表示重度污染,处于污染等级 4。

2)加权综合污染指数法。加权综合得到的环境质量评价结果能够有效的揭示不同评价因子间的内在联系,其评价结果更接近环境质量的实际状况,计算公式为

$$P_{\text{综}} = \sum \omega_i \times p_i \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$  为检测样点的综合污染指数; $P_i$  为  $i$  污染物的单因子指数; $\omega_i$  为第  $i$  个污染物权重系数,本研究中通过主成分分析得到。当  $P_{\text{综}} \leq 0.7$  时,表示清洁,处于污染等级 1;  $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ ,表示尚清洁,处于污染等级 2;  $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ ,表示轻度污染,处于污染等级 3;  $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ ,表示中度污染,处于污染等级 4;  $P_{\text{综}} > 3$ ,表示重度污染处于污染等级 5<sup>[12]</sup>。

#### 1.4.2 评价标准

土壤环境质量标准是国家为了防止土壤污染、维护人体健康、保护生态系统所制订的土壤中污染物在一定空间和时间范围内的容许含量值<sup>[13]</sup>,因此本研究选择食用农产品产地环境质量标准(HJ/T 332—2006,  $6.5 < \text{pH} < 7.5$ )作为评价标准<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属的描述性统计分析

对研究区域的 47 个样品测试结果进行统计分析,结果见表 1。研究区农田土壤中 Pb、Hg、Cd、Cu、Cr、As 和 Zn 含量的范围分别为 14.3~31.4、0.038~0.383、0.006~0.112、5.4~36.7、14.7~28.5、7.1~8.6 和 32.8~79.3 mg/kg。参照食用农产品产地环境质量标准( $6.5 < \text{pH} < 7.5$ ),表明 7 种重金属的含量均没有超过标准值。进一步将 7 种重金属总量与研究区土壤重金属含量背景值相比可知,部分样点中 Pb、Cd、Cu 和 As 总量超过背景值,超出比例分别为 38.3%、46.8%、42.6%和 14.9%。

由此可知,研究区农田土壤中 Pb、Cd、Cu 和 As 含量存在一定程度的累积趋势。从变异系数看,Hg、Cd 和 Cu 元素的变异系数较高,达到中等变异,其中 Hg 元素变异程度最大,表明其受外界因子干扰

尤其是人为活动影响最大。其余各元素的变异系数均在 30% 以下,属于弱变异。不同元素在土壤中的变异系数大小顺序为  $Hg > Cd > Cu > Pb > Zn > Cr > As$ 。

表 1 土壤重金属含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics for the heavy metal content in soil

元素 Elements	样本数 Sampling number	重金属质量分数/(mg/kg) Heavy metal content						变异系数/% Variable coefficient	超过背景值 比例/% Proportion
		最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均 Average	标准差 Standard deviation	背景值 Background value	环境标准 Standard value		
Pb		31.4	14.3	22.28	4.89	22.4	80	21.9	38.3
Hg		0.383	0.038	0.195	0.099	0.049	0.5	50.8	0
Cd		0.112	0.006	0.057	0.028	0.041	0.3	49.1	46.8
Cu	47	36.7	5.4	23.51	7.87	21.4	100	33.5	42.6
Cr		28.5	14.7	19.94	3.28	52.7	200	16.4	0
As		8.6	7.1	7.85	0.41	8.22	30	5.2	14.9
Zn		79.3	32.8	54.35	11.83	42	250	21.8	0

## 2.2 土壤重金属污染来源分析

采用主成分分析法对研究区表层土壤中重金属污染物的主要来源进行分析。数据分析前,首先进行主成分分析适宜性检验,对标准化后的原始数据进行 KMO 和 Bartlett 检验,得到的 KMO 值为 0.745,表明适宜进行主成分分析;Bartlett 检验的显著水平小于 0,因此,可认为相关系数矩阵与单位

矩阵有显著差异,以上检验结果均表明原始数据集适合进行主成分分析。

主成分分析结果见表 2 和表 3。由表 2 可知,前 3 个主成分的累积贡献量达到了 82.782%,表明前 3 个主成分能够较好地代表原数据所蕴涵的信息。由表 3 的主成分载荷系数可以看出,重金属 Hg、Cd、Cr、As 以及速效磷在主成分 1 上具有较高

表 2 主成分特征值及其贡献量

Table 2 Eigenvalue and contribution rate of each principal component

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献量/% Contribution amount	累积贡献量/% Cumulative contribution amount
1	3.694	41.046	41.046
2	2.738	30.421	71.466
3	1.018	11.316	82.782
4	0.585	6.496	89.278
5	0.330	3.666	92.943
6	0.247	2.741	95.684
7	0.152	1.693	97.377
8	0.123	1.363	98.740
9	0.113	1.260	100.000

表 3 主成分载荷系数

Table 3 Principal component loading coefficient

元素 Elements	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
Pb	0.192	0.905	-0.227
Hg	0.690	0.405	-0.139
Cd	0.948	-0.084	0.007
Cu	-0.039	0.893	-0.120
Cr	0.922	-0.026	-0.217
As	0.838	-0.028	0.025
Zn	-0.091	0.844	-0.267
速效磷 Olsen-P	0.884	-0.317	0.082
速效钾 Olsen-K	-0.302	-0.200	0.867

载荷,重金属 Pb、Cu 和 Zn 在主成分 2 上具有较高载荷,而速效钾在主成分 3 上具有很高的载荷。主成分分析的目的不仅在于找出主成分,更重要的是明确各主成分的意义,明确每个主成分所代表的污染源。

根据土壤学和地统计学研究结果<sup>[15-17]</sup>,土壤速效钾含量具有强烈的空间相关性,空间变异主要受结构性因子(土壤母质、土壤类型、地形等)的影响;土壤速效磷含量具有中等空间相关性,空间变异受结构性因子和随机性因子(施肥、耕作、点源污染等)共同影响。因此,速效钾含量在很大程度上反映了土壤母质信息,而速效磷含量在一定程度上可以表征农用施肥对土壤影响的程度。

速效磷在主成分 1 上具有较高载荷(表 3),说明主成分 1 反映了农用施肥作用对土壤影响的结果。由此可推断出,同样受主成分 2 决定的重金属 Hg、Cd、Cr 和 As 主要源于化肥、农药、有机肥的过度施用以及污水灌溉<sup>[18-19]</sup>。速效钾在主成分 3 上具有较高载荷,说明主成分 3 反映了与土壤母质相关的自然因素。而 Pb、Cu 和 Zn 共同受主成分 2 决

定,该主成分与土壤母质相关的自然因素和影响土壤磷累积的农田施肥作用无关。大量研究表明,汽车尾气及汽车轮胎磨损产生的有害气体成为土壤中 Pb 累计的主要来源<sup>[20-21]</sup>。

### 2.3 农产品产地环境质量评价

对滨州地区 47 个采样图斑的重金属含量分别进行单因子指数评价和加权综合评价,评价结果见表 4。研究区土壤中重金属 Pb、Hg、Cd、Cu、Cr、As 和 Zn 单因子污染指数的平均值分别为 0.45、0.65、0.19、0.24、0.10、0.01 和 0.22,按照土壤环境质量评价分级标准均处于安全等级。重金属元素 Hg 的单因子污染指数达到轻度污染水平,占总采样点个数的 21.3%。

主成分分析确定污染指标权重方法见参考文献<sup>[22]</sup>。7 种重金属污染元素的权重分别是  $\omega_i = (0.006, 0.155, 0.246, 0.065, 0.238, 0.215, 0.074)$ ,  $i$  分别代表重金属 Pb、Hg、Cu、Cd、Cr、As 和 Zn。根据式(2)计算可知,研究区土壤环境加权综合污染指数平均值为 0.54,表明研究区大部分地区属于土壤环境质量评价安全等级。47 份土壤样品中,加权

表 4 研究区土壤重金属单因子指数与加权综合指数

Table 4 Single factor index and weighted pollutant index of heavy metals in soil of study area

项目 Project	单因子指数 Single factor index							加权污染指数 Weighted pollution index
	Pb	Hg	Cd	Cu	Cr	As	Zn	
平均 Average	0.45	0.65	0.19	0.24	0.10	0.01	0.22	0.54
最大值 Maximum	0.63	1.28	0.37	0.37	0.14	0.01	0.32	0.85
最小值 Minimum	0.29	0.13	0.02	0.05	0.07	0.01	0.13	0.32

综合污染指数处于1级水平的占总采样点个数的83%，处于2级水平的占17%。将各采样点加权综合污染指数计算结果与位置数据相关联，利用地理信息系统软件 ArcGIS 进行渲染显示，得到农产品产地质量综合污染指数空间分布图(图2)。可知，加权污染指数较大( $P_{综} > 0.7$ )的点主要分布于研究区中西部及东部，北部和南部大部分地区其加权污染指数一般较低( $P_{综} \leq 0.7$ )。

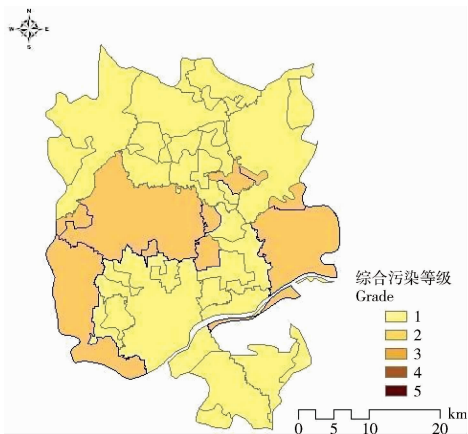


图2 研究区土壤环境质量评价空间分布

Fig.2 Spatial variation of soil environmental quality in study area

滨城区的化工厂和农药厂主要集中在中部地区，农用地则主要集中在周边地区，东区是滨城区新的行政中心，已新建城市道路21条、道路总长100 km，车辆通行量较多。综合以上分析及污染源解析结果可知，研究区中西部及东部部分地区受工业、农业和交通等来源引起的土壤重金属污染达到了环境质量警戒线，应当引起有关部门的重视。

## 2.4 讨论

研究区 Hg 元素变异程度最大，表明在整个研究区域受人为干扰影响最为明显。同样，通过对研究区域进行单因子指数评价得出重金属元素 Hg 的单因子污染指数达到轻度污染水平，占总采样点个数的21.3%。虽然我国施用的磷肥中重金属含量远低于世界主要国家，但长期施用也将会造成土壤重金属 Hg 的污染。此外，以畜禽排泄物、固体废弃物及生活垃圾为原料的有机肥对土壤重金属的累积有着重要的影响，尤其对土壤中 Hg 含量的提高幅度相对较大，同时将导致作物籽粒中重金属的富集<sup>[23]</sup>。

因此，应严格控制人为因素对土壤的污染，特别

是 Hg 元素。在农业生产过程中应尽量施用重金属含量低的农用物资，以减少重金属在土壤中的累积，最大限度地延长土地健康使用年限<sup>[24]</sup>。

## 3 结论

本研究以黄河三角洲滨州市滨城区为研究区，通过对其表层土壤中7种重金属(Pb、Hg、Cu、Cd、Cr、As、Zn)、速效磷和速效钾进行主成分分析，探讨了研究区土壤重金属形成原因，同时对产地环境质量进行了评价，研究得到以下结论：

1) 研究区农田土壤中 Pb、Hg、Cd、Cu、Cr、As 和 Zn 含量的平均值均未超过食用农产品产地环境质量标准( $6.5 < \text{pH} < 7.5$ )。进一步将7种重金属总量与研究区土壤重金属含量背景值相比可以看出，部分样点土壤中 Pb、Cd、Cu 和 As 总量超过背景值。可见，研究区农田土壤中 Pb、Cd、Cu、As 含量存在一定程度的累积趋势。

2) 将土壤重金属含量和土壤养分所反映的信息综合起来进行主成分分析。结果表明：研究区表层土壤中的重金属来源存在差异，其中重金属 Hg、Cd、Cr 和 As 主要源于化肥、农药、有机肥的过度施用以及污水灌溉；Pb、Cu 和 Zn 主要源于粉尘及汽车轮胎磨损所产生的大量含重金属的有害气体。

3) 根据食用农产品产地环境质量标准，研究区域的表层土壤单项污染指数平均值均小于1，处于安全等级；重金属元素 Hg 的单因子污染指数达到轻度污染水平，占总采样点个数的21.3%，表明 Hg 在该地区表现出明显的污染特征；加权综合污染指数平均值 $< 0.7$ ，说明绝大多数地区处于安全等级，部分地区处于警戒线水平。

## 参 考 文 献

- [1] 梁尧,李刚,仇建飞,等.土壤重金属污染对农产品质量安全的影响及其防治措施[J].农产品质量与安全,2013(3):9-14
- [2] 李润林,姚艳敏,唐鹏钦.农产品产地土壤环境质量评价研究进展[J].中国农学通报,2011,27(6):296-300
- [3] 王元胜,赵春江,王纪华,等.基于 WebGIS 的重金属污染决策支持系统设计与应用[J].农业工程学报,2005,21(12):137-140
- [4] 杨忠平,卢文喜,辛欣,等.长春市城市土壤铅同位素组成特征及其来源解析[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,28(4):663-669
- [5] 杨忠平.长春市城市重金属污染的生态地球化学特征及其来源解析[D].长春:吉林大学,2008

- [6] 王琳,齐孟文. 环境同位素示踪在环境学研究中的应用[J]. 环境与可持续发展,2006(1):29-30
- [7] Dragović S, Mihailović N, Gajić B. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radio nuclides and multivariate assessment of contamination sources [J]. Chemosphere,2008,2(3):91-495
- [8] Li Jinling, He Ming, Han Wei, et al. Analysis and assessment on heavy metal sources in the coastal soils developed from alluvial deposits using multivariate statistical methods [J]. Journal of Hazardous Materials 2009, (164):976-981
- [9] 陈佳佳. 基于 GIS 的贵屿地区农田土壤重金属的空间分布以及生态风险评价[D]. 广州:暨南大学,2011
- [10] 余建英,何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003
- [11] 刘晓文. 干旱区典型土壤-植物系统中主要重金属行为过程及风险性研究[D]. 兰州:兰州大学,2009
- [12] 叶嗣宗,罗海林. 土壤环境质量分级评价[J]. 上海环境科学, 1992,11(6):39-40
- [13] 夏家淇,骆永明. 关于土壤污染的概念和 3 类评价指标的探讨 [J]. 生态与农村环境学报,2006,22 (1):87-90
- [14] 国家环境保护总局. HJ/T332—2006 食用农产品产地环境质量评价标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2006
- [15] 赵彦锋,郭恒亮,孙志英,等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. 地理科学,2008,28(1):45-50
- [16] 庞凤,李廷轩,王永东,等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料科学,2009,15(1):114-120
- [17] 赵军,孟凯,隋跃宇,等. 海伦黑土有机碳和速效养分空间异质性分析[J]. 土壤通报,2005,36(4):487-492
- [18] 刘庆,杜志勇,史衍玺,等. 基于 GIS 的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(10):258-263
- [19] 邵学新,吴明,蒋科毅. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J]. 广东微量元素科学,2007,14(4):1-6
- [20] 杨忠平,卢文喜,刘新荣,等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. 城市环境与城市生态,2009,12(5):29-33
- [21] Al-Rajhi M A, Seaward M R D, Al-Aamer A S, et al. Metal Levels in in-door and outdoor dust in Riyadh, Saudi Arabia [J]. Environment International ,1996,22(3):315-324
- [22] 张文霖. 主成分分析在满意度权重确定中的应用[J]. 市场研究,2006(6):18-22
- [23] 康少杰,刘善江,邹国元,等. 污泥肥和生活垃圾肥对小麦-玉米重金属积累及产量的影响[J]. 土壤通报,2011,42(3):752-757
- [24] 韩平,王纪华,陆安祥,等. 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):106-112

责任编辑:刘迎春