

谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 等. 土壤重金属污染评价方法研究: 以广州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1329-1337.

XIE Zhi-yi, ZHANG Ya-jing, CHEN Dan-qing, et al. Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1329-1337.

土壤重金属污染评价方法研究 ——以广州市为例

谢志宜^{1,2}, 张雅静^{1,2}, 陈丹青^{1,2}, 杨剑军^{1,2}, 梁耀杰^{1,2}

(1.广东省环境监测中心, 广州 510308; 2.广东省环境保护土壤环境监测和重金属溯源重点实验室, 广州 510308)

摘要:目前土壤环境质量评价方法按照评价对象可归纳为单因子指数法和综合评价法两类若干种。以广州市 208 个土壤样品 8 种重金属为研究对象, 创新性地采用分级统计、相关性分析、评价等级差值分析、综合排序分析等方法对目前主要的土壤环境质量评价方法进行定性和定量研究, 旨在推荐最适合的土壤环境质量评价方法。结果表明: 从评价结果的分级程度看, 单因子指数法中富集指数法最优, 综合评价法中内梅罗指数法和模糊数学法最优; 相关性分析结果表明, 物元分析法与其他 4 种综合评价法的平均相关性系数为 0.477, 大于其他综合评价法的平均相关性系数, 按照评价结果一致性原则, 物元分析法最优; 评价等级差值分析表明, 模糊数学法与其他 4 种综合评价法评价等级的平均差值最小, 为 0.71, 按照评价等级接近的原则, 模糊数学法最优; 通过综合排序比较各综合评价法的排序得出, 模糊数学法平均排名最优, 其次为物元分析法、内梅罗指数法、灰色聚类法、潜在生态危害指数法。综上所述, 富集指数法和模糊数学法是两种首选方法, 在土壤重金属污染评价中可以组合使用。

关键词:土壤; 重金属污染评价; 单因子指数法; 综合评价法

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)07-1329-09 doi:10.11654/jaes.2016.07.015

Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou

XIE Zhi-yi^{1,2}, ZHANG Ya-jing^{1,2}, CHEN Dan-qing^{1,2}, YANG Jian-jun^{1,2}, LIANG Yao-jie^{1,2}

(1.Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China; 2.Guangdong Environmental Protection Key Laboratory of Soil Monitoring and Heavy Metals Sourcing, Guangzhou 510308, China)

Abstract: Based on assessment objects, current methods for soil environmental quality assessment can be grouped two types: single factor index methods (Single factor index, Potential ecological risk assessment, Geoaccumulation index and Enrichment factor) and comprehensive assessment methods (Nemerow index, Fuzzy mathematics, Grey clustering method, and Matter element analysis). In this study, we qualitatively and quantitatively evaluated different assessment methods by applying graduation statistics, correlation analysis, grade difference analysis and complex sorting analysis to data of 8 heavy metals in 208 surface soil samples from Guangzhou, China. Results showed: Based on the grading degree, Enrichment index is the optimal single factor method for evaluating single heavy metal, while Nemerow index and Fuzzy mathematics methods were the best integrative assessment methods; Correlation analysis showed that the average correlation coefficient of Matter element analysis model with the other four integrative assessment methods was 0.477, which was the greatest for integrative assessment methods. This indicates that Matter element analysis model was the best; Grade difference analysis showed that the average difference value of assessment grades of Fuzzy mathematics method (0.71) is minimum, indicating that Fuzzy mathematics method was the best; Ranking integrative assessment methods indicated that Fuzzy mathematics method ranked the first, followed by Matter element analysis model, Nemerow index method, Grey clustering method and Potential ecological risk index. In conclusion, Enrichment index method and Fuzzy

收稿日期: 2016-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41201540); 广东省自然科学基金项目(S2011040001105); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ060115); 广东省环保专项(粤环[2015]62号); 广东省省长人才培养基金项目

作者简介:谢志宜(1978—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为土壤环境质量监测及污染物源解析。E-mail: 15011978456@163.com

mathematics method are the optimal methods. Both methods could be combined while assessing soil heavy metal contamination.

Keywords: soil; heavy metal pollution assessment; single factor index; integrative assessment method

目前国内外研究所使用的土壤环境质量评价方法已经有很多,按照评价对象可将现有的评价方法归纳为两类:评价单个污染因子污染程度的单因子指数法和评价多种污染因子共同污染的综合评价法。单因子指数法主要包括单项污染指数法^[1]、潜在生态危害指数法^[2]、富集因子法^[3]和地累积指数法^[4-5]等;综合评价法主要包括内梅罗综合污染指数法^[6]、灰色聚类法^[7-8]、物元分析法^[9-10]、模糊数学法^[11-13]等。

现有关于土壤环境质量评价的研究主要集中在三个方面:一是应用各种评价方法对研究区域污染状况进行评价,了解研究区域污染状况^[14-15];二是对现有的评价方法进行改进研究,寻求更科学合理的环境质量评价方法^[16-17];三是从定性角度对各评价方法的适用性和局限性进行比较^[18-22]。土壤环境质量评价方法的定性比较主要有两种方式:一种是综述性研究,即注重评价方法的原理,从评价方法本身出发进行各方法的优缺点比较^[18-20],这种方法的优点在于涵盖的评价方法种类较多,对评价方法的原理分析得较为透彻,不足之处在于未引证实例对评价结果进行比较,不能得到直观的对比结果;另一种形式是应用多种方法对某个研究区域的环境质量进行评价,然后对评价结果进行比较,得出较优的评价结果^[21-22]。目前此类研究的不足之处在于研究选取样点较少,未对评价结果进行统计分析,研究结果具有一定的偶然性。

本文拟提出采用分级统计、相关性分析、等级差值比较和综合排序等相结合的方法开展典型区域土壤重金属污染评价方法研究,弥补上述土壤环境质量评价研究中的不足之处。分级统计法是统计分析的一种方法,其特点是将研究对象进行分级,然后按照每级研究对象出现的频次进行统计,目前已被应用于人口统计等方面^[23-24]。土壤环境质量评价一般将评价结果分为五级^[1-13],现有的研究通常采样点较少,研究结果具有一定偶然性^[21-22],在采样点较多的情况下,可对各评价方法的评价结果进行分级统计,能更好地对各评价方法进行比较。相关性分析在环境领域常用于研究几种物质含量之间的相关关系^[25-26],差值分析被广泛应用于气象研究中自动站与人工站监测结果的比较^[27-28],能有效评估不同方法的差异,李民升等^[29]将此两种方法应用于水环境质量评价方法的比较研究中,发现综合水质标识指数法和单因子评价法为最优水

环境质量评价方法。综合排序法主要是对多种指标的优劣级别进行综合排名^[30],确定评价方法的适宜性,胡祖光等^[31]将其用于全国工业企业综合经济效益排序,发现资金利税率作为快捷评价商业企业经济效益的“牛鼻子指标”最为合理。分级统计、相关性和等级差值分析等土壤综合评价方法与经济效益综合指标筛选的原理类似。

本文以广州 208 个土壤样品的 8 种重金属(Pb、Cd、Zn、Hg、As、Cu、Cr 和 Ni)为研究对象,采用分级统计、相关性分析、等级差值分析和综合排序分析等方法对土壤环境质量评价的主要方法进行定性和定量比较研究,旨在得到最优选的评价方法,使土壤环境质量评价结果更为客观、科学。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

广州(112.57°~114.3°E, 22.26°~23.56°N)地处中国南部、广东省中南部、珠江三角洲中北缘,属于丘陵地带,地势东北高、西南低,背山面海,北部是森林集中的丘陵山区,东北部为中低山地,中部是丘陵盆地,南部为沿海冲积平原。面积约为 7 434.4 km²,年平均温度 21.9℃,年降雨量约为 1 736 mm,平均相对湿度 77%,属于海洋性亚热带季风气候。

1.2 样品的采集与处理

1.2.1 样品采集

2011 年 10 月—2014 年 10 月,采用 4 km×4 km 的网格在广州布设 208 个采样点(图 1),同时采用 GPS 对每个采样点精确定位。每个样点垂直采集 0~20 cm 的表层土壤,混合后装入采样袋,样品原始质量大于 1 kg。

1.2.2 样品测定

将野外采集的混合土壤样品按四分法取 1 kg 左右,风干,利用玛瑙研钵在振动研磨仪中磨碎,过 100 目尼龙筛,放入编号的塑料自封袋备用。测定时准确称取样品 40 mg,置于容量为 10 mL 的聚四氟乙烯消解罐中,用 HNO₃-H₂O₂-HF 超声消解。采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, 安捷伦 7700)对 Pb、Cd、Zn、Hg、As、Cu、Cr 和 Ni 的含量进行分析测试,测试方法参考美国 EPA 的 SW-846 方法。

1.3 评价方法

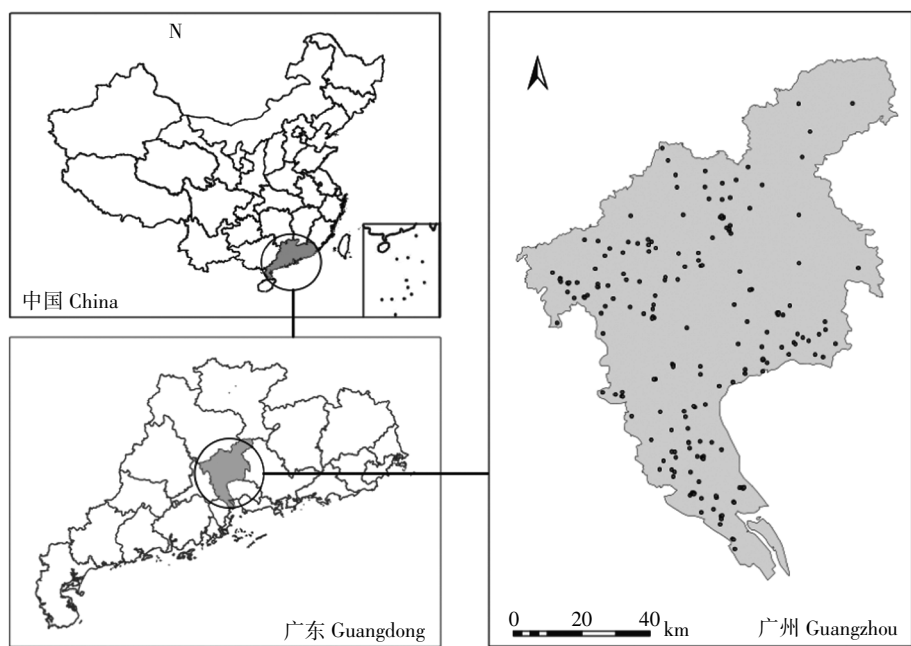


图 1 广州区位图及采样点分布
Figure 1 Location of Guangzhou and distribution of sampling points

本研究拟采用 4 种单因子指数法(单项污染指数法^[1]、潜在生态危害指数法^[2]、富集因子法^[3]、地累积指数法^[4-5])和 5 种综合评价法(潜在生态危害指数法、内梅罗指数法^[6]、灰色聚类法^[7]、物元分析法^[9-10]、模糊数学法^[32-33])对广州土壤重金属含量进行评价。

2 研究方法

2.1 分级统计法

本研究选取的各种评价方法的评价结果均可分为 I~V 级共 5 个级别,因此可分别对各评价方法的评价结果进行分级统计,即计算出各评价方法评价结果中各等级样点个数占采样点总数的比例,然后对分级统计结果进行比较。

2.2 相关性分析法

设有 n 个评价方法 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$, 各评价方法之间的相关性系数为 $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{nn}$ 。求出各综合评价法与除自身以外的其他方法的平均相关性系数,如 M_1 与 $M_2, M_3, \dots, M_n$ 的平均相关系数为:

$$\overline{m_1} = \frac{m_{12} + m_{13} + \dots + m_{1n}}{n-1} \quad (1)$$

M_n 与 $M_1, M_2, \dots, M_{n-1}$ 的平均相关系数为:

$$\overline{m_n} = \frac{m_{1n} + m_{2n} + \dots + m_{(n-1)n}}{n-1} \quad (2)$$

将 $\overline{m_1}, \overline{m_2}, \dots, \overline{m_n}$ 进行比较,若 $\overline{m_i}$ 最大,则方法 M_i

最优, $i \in (1, n)$ 。

2.3 等级差法

将各综合评价方法所得的各采样点评价等级分别进行平均,求出研究区域评价等级平均值 x_i (表 1),对比各方法平均等级的等级差(表 2),求出各综合评价法与除自身以外的其他方法的平均差值,按照评价等级接近的原则,选出较优的土壤重金属污染评价方法^[29]。

则 M_1 与 $M_2, M_3, \dots, M_n$ 的平均差值为:

$$\overline{x_1} = \frac{|x_2 - x_1| + |x_3 - x_1| + \dots + |x_n - x_1|}{n-1} \quad (3)$$

表 1 综合评价等级平均值

Table 1 Average value of comprehensive assessment methods					
	M_1	M_2	M_3	$\dots$	M_n
平均等级 Average grade	x_1	x_2	x_3	$\dots$	x_n

表 2 评价等级平均差值表

Table 2 Difference values of assessment degrees					
	M_1	M_2	M_3	$\dots$	M_n
M_1	0	$ x_2 - x_1 $	$ x_3 - x_1 $	$\dots$	$ x_n - x_1 $
M_2		0	$ x_3 - x_2 $	$\dots$	$ x_n - x_2 $
M_3			0	$\dots$	$ x_n - x_3 $
$\dots$				0	$\dots$
M_n					0

M_n 与 $M_1, M_2, \dots, M_{n-1}$ 的平均差值为:

$$\bar{x}_n = \frac{|x_n - x_1| + |x_n - x_2| + \dots + |x_n - x_{n-1}|}{n-1} \quad (4)$$

将 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ 进行比较, 若 $\bar{x}_i$ 最小, 则方法 M_i 最优, $i \in (1, n)$ 。

2.4 综合排序法

将分级统计法、相关性分析法和评价等级差值分析得出的方法从优到劣进行排序, 最优的排第1, 其次排第2, 依此类推, 然后将各种不同的评价方法下的排序相加, 得到序号总和, 序号总和排序的结果即为真正的序位^[31]。当序号总和相等而无法排序时, 可借助于众数理论来解决排序问题^[30]。

3 广州土壤重金属含量分布特征与统计结果

本研究选取广州208个采样点的土壤样品作为研究对象, Pb、Cd、Zn、Hg、As、Cu、Cr、Ni 8种重金属的浓度范围分别为 1.00~299.50、0.01~3.49、5.40~1 215.1、0~2.71、3.10~137.30、0.80~132.20、2.30~364.10、0.90~125.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数分别为 71.4%、109.7%、102.0%、148.0%、88.7%、83.0%、78.3%、80.4%。根据变异系数的大小可粗略估计变量的变异程度: 弱变异性, 变异系数<10%; 中等变异性, 10%<变异系数<100%; 强变异性, 变异系数>100%^[34]。可见研究区域 Cd、Zn 和 Hg 均属于强变异性, Pb、As、Cu、Cr 和 Ni 均达到中等变异性。与《土壤环境质量标准》(GB 15618—

1995)二级标准相比较, 除 Cd 超标 1.02 倍以外, 其余各重金属含量均值都低于该标准限值, 但部分样点的重金属浓度有超标现象存在, 这8种重金属超标率分别为 16.3%、33.2%、15.9%、20.2%、3.8%、9.1%、2.4% 和 10.6%, 其中 Cd 和 Hg 超标率较高。本研究采样点多, 各重金属含量范围较大, 8种重金属均达到中等或强变异, 可见土壤中重金属浓度分布广泛, 能较好地反映典型区域内不同土壤重金属因子的组合关系。208个土壤样品中重金属浓度数据统计结果见图2。

4 评价方法研究

4.1 单因子指数法

单项污染指数法、潜在生态危害指数法、地累积指数法和富集指数法均可对土壤中单个重金属元素进行评价。运用4种指数法对广州208个土壤样品中8种重金属浓度进行评价, 将各方法的评价结果进行分级统计, 结果见表3。

从评价结果看, 潜在生态风险指数法评价的所有样品的 Pb、Zn、As、Cu、Cr、Ni 污染程度均为 I 级, 仅有 Cd 和 Hg 的污染程度在 I~V 级均有分布; 而从广州土壤重金属含量分布特征(图2)可以看出, 各重金属浓度分布范围较广, 且各重金属含量在部分样点均有超标现象, 潜在生态风险指数法评价结果与此并不一致。因此可以看出潜在生态危害指数法对毒性系数较小的重金属元素评价分级效果较差, 仅对 Cd 和 Hg

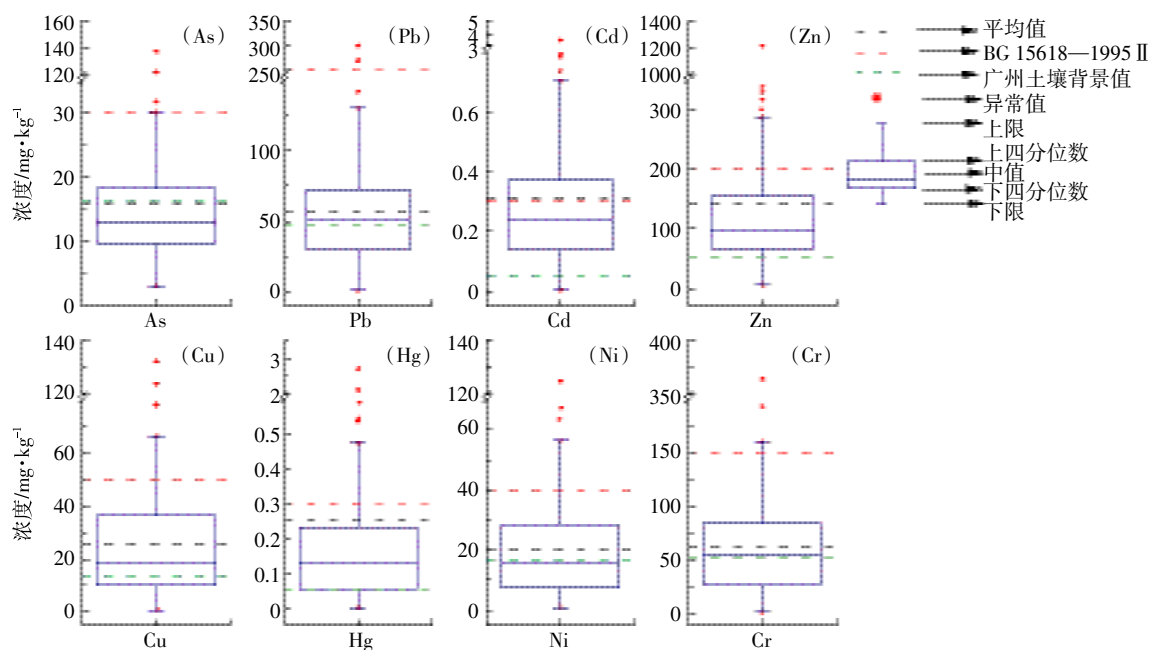


图2 广州市土壤重金属浓度箱线图

Figure 2 Box of heavy metal concentrations in Guangzhou soils

表3 单因子指数法评价结果分级统计(%)
Table 3 Graduation statistics of single factor index
evaluation results(%)

等级 Grade		I	II	III	IV	V
Pb	单项污染指数	98.6	1.4			
	潜在生态风险指数	100.0				
	地累积指数	100.0				
	富集指数	96.6	3.4			
Cd	单项污染指数	66.8	25.0	5.3	1.4	1.4
	潜在生态风险指数	78.9	18.3	1.4	1.0	0.5
	地累积指数	83.7	13.5	2.9		
	富集指数	24.0	47.6	26.9	1.0	0.5
Zn	单项污染指数	84.1	11.1	3.4	1.0	0.5
	潜在生态风险指数	100.0				
	地累积指数	91.8	6.7	1.4		
	富集指数	68.8	24.5	6.7		
Hg	单项污染指数	79.8	8.7	5.3	4.3	1.9
	潜在生态风险指数	79.8	8.7	8.2	2.9	0.5
	地累积指数	85.6	8.2	6.3		
	富集指数	53.4	27.9	15.9	2.9	
As	单项污染指数	97.6	1.4		1.0	
	潜在生态风险指数	100.0				
	地累积指数	100.0				
	富集指数	97.6	1.4	1.0		
Cu	单项污染指数	90.9	8.2	1.0		
	潜在生态风险指数	100.0				
	地累积指数	97.1	2.9			
	富集指数	71.6	26.0	2.4		
Cr	单项污染指数	97.6	1.4	1.0		
	潜在生态风险指数	100.0				
	地累积指数	98.6	1.4			
	富集指数	96.2	3.4	0.5		
Ni	单项污染指数	89.4	10.1		0.5	
	潜在生态风险指数	100.0				
	地累积指数	98.5	1.0	0.5		
	富集指数	90.4	9.1	0.5		

的污染程度进行了较好的分级。这可能是由于潜在生态危害指数法引入了毒性响应系数,从而使评价结果主观性较强^[35]。此方法对毒性响应系数较小的重金属的评价效果还有待进一步研究。

从评价结果的一致性和对各重金属元素的污染程度分级结果看,单项污染指数法和富集指数法的评价结果较其他两种方法更优。首先,从评价结果的一致性看,这两种方法评价的Pb的污染程度均分布在Ⅰ级和Ⅱ级;其次,从各污染程度上样品数所占比例来看,这两种方法的分析结果也较为相似,例如Pb单项污染指数法评价的Ⅰ级和Ⅱ级样品所占比例分别

为98.6%和1.4%,富集指数法的这一比例分别为96.6%和3.4%。其他7种元素的评价结果也有类似规律,在此不再一一列举。而单项污染指数法和富集指数法这两种方法相比,富集指数法评价结果更优,因为从评价原理来分析,富集指数的计算引入了参比元素进行标准化,这样就减小了环境介质以及采样制样过程中对元素浓度的影响^[4]。因此,富集指数法评价土壤重金属污染程度比单项污染指数法更为科学。

从表3可以看出,地累积指数法评价Pb和As所有样品均分布在Ⅰ级(无污染),而从广州土壤重金属含量分布特征可以看出,Pb和As的超标率分别为16.3%和3.8%,即Pb和As有一定程度的污染,说明地累积指数法对有些重金属元素评价结果分级程度较差。从Cu的评价结果看,潜在生态危害指数法评价结果为Ⅰ级占100%;地累积指数法评价结果为Ⅰ级占97.1%,Ⅱ级占2.9%;而单项污染指数法和富集指数法将评价结果分为了三级,Zn和Cr的评价结果也有相似的规律。由此可以看出,地累积指数法评价效果介于潜在生态风险指数法与单项污染指数法之间,从评价结果看,地累积指数法对污染程度的分级结果较潜在生态危害指数法好,但相比于单项污染指数法又过于保护。

综上所述,从对单个重金属的评价结果看,富集指数法最优,单项污染指数法次之,其次是地累积指数法,最后是潜在生态风险指数法;潜在生态风险指数法对毒性响应系数较大的元素评价结果较好,而对其他毒性响应系数较小的元素过于保护,忽略了有些样品的超标现象。

4.2 综合评价法

4.2.1 分级统计分析

内梅罗指数法、潜在生态危害指数法、模糊数学法、灰色聚类法和物元分析法评价结果的分级统计见图3。可以看出,5种综合评价法评价结果差异较大:潜在生态危害指数法评价结果分布在Ⅰ~Ⅲ级,灰色聚类法评价结果分布在Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ级,而内梅罗指数法、模糊数学法和物元分析法评价结果则是在Ⅰ~Ⅴ级均有分布。前面已经讨论过,潜在生态危害指数法对毒性响应系数较小的重金属的污染程度的评价过于保护,同理,由各元素潜在生态风险系数相加得到的潜在生态危害指数的结果也过于保护,对毒性系数较小的重金属元素评价分级效果较差。内梅罗指数法、模糊数学法、灰色聚类法和物元法评价结果前3级所占比例之和分别为89.4%、91.8%、99.5%和

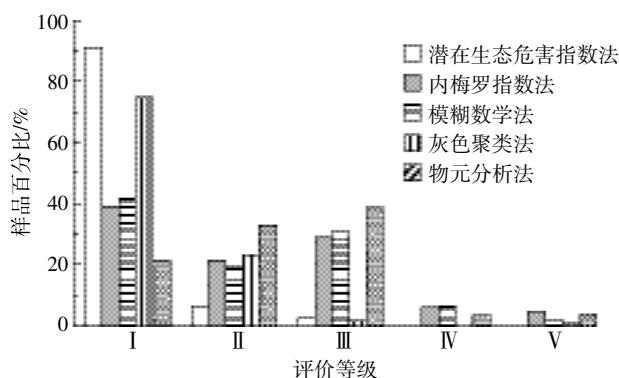


图3 综合评价法评价结果分级统计

Figure 3 Graduation statistics of evaluation results by comprehensive assessment methods

92.8%。灰色聚类法评价结果几乎均分布于前三级,其中一级所占比例最大,为75.0%,内梅罗指数法和模糊数学法评价结果中也是Ⅰ级占比例最大,分别为38.9%和41.8%,物元法评价结果中Ⅲ级占比例最大,为38.5%。从分级程度看,内梅罗指数法、模糊数学法和物元分析法较优,灰色聚类法次之,潜在生态危害指数法最差;从评价结果的一致性看,内梅罗指数法和模糊数学法较优,其次是物元分析法,再次是灰色聚类法,最后是潜在生态危害指数法。

综上所述,各综合评价法评价结果的优劣顺序为:内梅罗指数法和模糊数学法较优,其次是物元分析法,再次是灰色聚类法,最后是潜在生态危害指数法。

4.2.2 相关性分析

5种综合评价法的评价等级相关性分析见表4。可以看出,5种综合评价法评价等级均呈极显著正相关关系,其中内梅罗指数法与物元分析法相关性系数最大,为0.662,内梅罗指数法与灰色聚类法相关性系数最小,为0.300;潜在生态危害指数法、内梅罗指数法、模糊数学法、灰色聚类法和物元分析法与本身以外的其他4种方法的平均相关系数(式1、式2)分别

为0.426、0.473、0.457、0.323和0.477。按照评价结果一致性的原则,5种综合评价法的优选顺序依次为:物元分析法、内梅罗指数法、模糊数学法、潜在生态危害指数法、灰色聚类法。

4.2.3 等级差值分析

5种综合评价法评价的208个采样点平均等级为:潜在生态危害指数法1.11,内梅罗指数法2.88,模糊数学法2.07,灰色聚类法1.28,物元分析法2.35。从评价结果可以看出,5种综合评价法中内梅罗指数法所得评价等级最大,其原因可能是该方法过于强调最高分指数的影响;潜在生态危害指数法评价等级最小,可能是引入毒性响应系数导致毒性响应系数较小的重金属元素的污染被忽略;模糊数学法、灰色聚类法和物元分析法的平均评价等级介于内梅罗指数法和潜在生态危害指数法之间。

将各采样点5种综合评价法评价结果的平均等级两两之间进行比较求出等级差,结果见表5。内梅罗指数法与潜在生态危害指数法评价等级平均差值最大,为1.77;此外,潜在生态危害指数法-物元分析法、内梅罗指数法-灰色聚类法、灰色聚类法-物元分析法评价等级平均差值大于1级,其他各方法两两之间平均等级差均小于1个级别。潜在生态危害指数法、内梅罗指数法、模糊数学法、灰色聚类法和物元分析法与本身以外的其他4种方法评价等级的平均差值(式1、式2)分别为1.04、1.18、0.71、0.91和0.78。因此如果按照评价等级接近的原则,5种综合评价法的优选顺序依次是:模糊数学法、物元分析法、灰色聚类法、潜在生态危害指数法和内梅罗指数法。

4.2.4 综合排序分析

将分级统计法、相关性分析和等级差值分析法得出的方法从优到劣进行排名,然后将各种不同的评价方法下的排序相加,得到序号总和(表6)。可以看出

表4 综合评价法评价等级相关性分析

Table 4 Correlation analysis of evaluation grades of comprehensive assessment methods

	潜在生态危害指数法 PERI	内梅罗指数法 NI	模糊数学法 FMM	灰色聚类法 GCM	物元分析法 MEAM
潜在生态危害指数法 PERI	1	0.407**	0.499**	0.300**	0.499**
内梅罗指数法 NI		1	0.510**	0.312**	0.662**
模糊数学法 FMM			1.0	0.377**	0.441**
灰色聚类法 GCM				1	0.304**
物元分析法 MEAM					1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。PERI:潜在生态危害指数法;NI:内梅罗指数法;FMM:模糊数学法;GCM:灰色聚类法;MEAM:物元分析法。下同。

Note:**Indicates significant correlation (Bilateral) ($P<0.01$). PERI: Potential ecological risk index; NI: Nemerow index; FMM: Fuzzy mathematics method; GCM: Grey clustering method; MEAM: Matter element analysis model. The same below.

表5 各综合评价法评价等级平均差值表

Table 5 Difference values of comprehensive assessment methods

	潜在生态危害指数法 PERI	内梅罗指数法 NI	模糊数学法 FMM	灰色聚类法 GCM	物元分析法 MEAM
潜在生态危害指数法 PERI	0	1.77	0.96	0.17	1.24
内梅罗指数法 NI		0	0.81	1.60	0.53
模糊数学法 FMM			0	0.79	0.28
灰色聚类法 GCM				0	1.07
物元分析法 MEAM					0

表6 各综合评价法排序

Table 6 Ranking of comprehensive assessment methods

	潜在生态危害指数法 PERI	内梅罗指数法 NI	模糊数学法 FMM	灰色聚类法 GCM	物元分析法 MEAM
分级统计法 GS	4	1	1	3	2
相关性分析 CA	4	2	3	5	1
等级差值分析 GDA	4	5	1	3	2
综合排序 CSAs	12	8	5	11	5

注:GS:分级统计法;CA:相关性分析;GDA:等级差值分析;CSA:综合排序。

Note: GS: graduation statistics; CA: correlation analysis; GDA: grade difference analysis; CSA: complex sorting analysis.

模糊数学法与物元分析法的序号总和相等,此时结合众数理论,得出潜在生态危害指数法、内梅罗指数法、模糊数学法、灰色聚类法和物元分析法的序号总和排序为5、3、1、4、2。即5种综合评价法中模糊数学法最优,其次为物元分析法、内梅罗指数法、灰色聚类法、潜在生态危害指数法。潜在生态危害指数法由于毒性响应系数的引用,导致评价结果客观性较差;灰色聚类法由于白化函数包含的污染范围太窄,会出现不合理现象^[36];内梅罗指数法过分强调了最高分指数的影响;物元可拓法的缺点在于构造物元矩阵具有一定的不确定性;模糊数学法能比较客观地表达评判中的模糊性^[18]。

5 结论

(1)对单个重金属元素的污染状况评价方法研究表明,富集指数法最优,单项污染指数法次之,其次是地累积指数法,最后是潜在生态风险指数法。

(2)对多种重金属的综合污染状况评价方法研究表明,分级统计法、相关性分析和等级差值法研究评选出的最优土壤环境质量评价方法分别为内梅罗指数法和模糊数学法、物元分析法和模糊数学法。最后通过综合排序法得出模糊数学法最优,其次为物元分析法、内梅罗指数法、灰色聚类法、潜在生态危害指数法。

(3)富集指数法和模糊数学法是两种首选方法,在土壤重金属污染评价中可以组合使用。

参考文献:

- [1] 孔凡彬, 刘 阳. 单因子指数法和内梅罗指数法在土壤环境质量评价中的比较[J]. 甘肃科技, 2014, 3(3): 21-22.
KONG Fan-bin, LIU Yang. Comparison of single factor index and Nemmerow index method in soil environmental quality evaluation[J]. *Gansu Science and Technology*, 2014, 3(3): 21-22.
- [2] 李军辉, 卢 瑛, 张 朝, 等. 广州石化工业区周边农业土壤重金属污染现状与潜在生态风险评价[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1242-1246.
LI Jun-hui, LU Ying, ZHANG Chao, et al. The status quo and potential ecological risks' assesment of heavy metals in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1242-1246.
- [3] 郭海全, 郝俊杰, 李天刚, 等. 河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 786-791.
GUO Hai-quan, HAO Jun-jie, LI Tian-gang, et al. Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in topsoil in Hebei plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 786-791.
- [4] 刘敬勇, 常向阳, 涂湘林, 等. 广东某硫酸废渣堆渣场周围土壤铊污染的地累积指数评价[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1231-1236.
LIU Jing-yong, CHANG Xiang-yang, TU Xiang-lin, et al. Applying the index Geoaccumulation to assessment of soil thallium pollution in soil around a thallium-containing slag pile site near a sulphuric acid plant in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1231-1236.
- [5] Wei Z, Wang D, Zhou H, et al. Assessment of soil heavy metal pollution with principal component analysis and Geoaccumulation index[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10(1): 1946-1952.

- [6] 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3099-3105.
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHANG Jun, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 3099-3105.
- [7] 王金生. 灰色聚类法在土壤污染综合评价中的应用[J]. 农业环境保护, 1991, 10(4): 169-172.
WANG Jin-sheng. Application of grey clustering method in comprehensive evaluation of soil pollution[J]. *Agro-environmental Protection*, 1991, 10(4): 169-172.
- [8] Fan L Q, Chen F H, Fan Y L. Comprehensive assessment of soil environmental quality with improved grey clustering method: A case study of soil heavy metals pollution[J]. *Journal of Agricultural Science & Applications*, 2012, 1(3): 67-73.
- [9] 徐笠, 常江, 杜艳, 等. 应用物元分析法评价安徽省土壤重金属污染现状[J]. 土壤, 2009, 41(6): 875-879.
XU Li, CHANG Jiang, DU Yan, et al. Assessment on heavy metal pollution in soils of Anhui Province by matter element analysis model[J]. *Soil*, 2009, 41(6): 875-879.
- [10] 门宝辉, 梁川. 农业土壤环境综合评价物元模型的建立及其应用[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 37-39.
MEN Bao-hui, LIANG Chuan. Establishment and application of matter element-based agriculture soil environment synthesis evaluation model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(4): 37-39.
- [11] Onkal-Engin G, Demir I, Hiz H. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(23): 3809-3815.
- [12] 翟航, 卢文喜, 杨威, 等. 模糊数学和污染指数法在土壤重金属污染中的应用[J]. 土壤, 2008, 40(2): 212-215.
ZHAI Hang, LU Wen-xi, YANG Wei, et al. Application of fuzzy mathematics and contamination index method to evaluation of soil heavy metals pollution[J]. *Soils*, 2008, 40(2): 212-215.
- [13] 梁镇海, 陈翠翠, 韩玉兰, 等. 基于模糊数学的太原市敦化灌区灌溉土壤重金属污染评价[J]. 环境化学, 2010, 9(6): 1152-1157.
LIANG Zhen-hai, CHEN Cui-cui, HAN Yu-lan, et al. Soil heavy metal pollution evaluation of Dunhua sewage irrigation area by fuzzy mathematics model[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 9(6): 1152-1157.
- [14] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, et al. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 96(1): 61-68.
- [15] 翟航. 长春市土壤重金属分布规律及土壤环境质量评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 41-58.
ZHAI Hang. Research on distribution characteristic of the soil heavy metals and assessment of the soil environmental quality Changchun[D]. Changchun: Jilin University, 2007: 41-58.
- [16] Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(6): 1470-1477.
- [17] 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 改进 AHP 模型在黄土高原沟壑区土壤质量评价中的应用: 以陕西省长武县耕地为例[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(2): 238-242.
YUE Xi-jie, GE Xi-zu, WANG Xu-dong. Application in soil quality evaluation on improved AHP(analytic hierarchy process) model of loessial gully region: A case of Changwu county in Shaanxi Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(2): 238-242.
- [18] 杜艳, 常江, 徐笠. 土壤环境质量评价方法研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 3(3): 749-756.
DU Yan, CHANG Jiang, XU Li. Progress on assessing methods of soil environmental quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 3(3): 749-756.
- [19] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310-315.
FAN Shuan-xi, GAN Zhuo-ting, LI Mei-juan, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 310-315.
- [20] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
GUO Xiao-xiao, LIU Cong-qiang, ZHU Zhao-zhou, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 889-896.
- [21] 刘崇洪. 几种土壤质量评价方法的比较[J]. 广州环境科学, 1996, 11(2): 42-46.
LIU Chong-hong. Comparison of several assessment method on soil quality[J]. *Guangzhou Huanjing Kexue*, 1996, 11(2): 42-46.
- [22] 张国印. 河北平原土壤质量评价指标和方法初探[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 30-40.
ZHANG Guo-yin. Primary study on assessing indicators and methods of soil quality for Hebei Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005: 30-40.
- [23] 党安荣. 人口密度分级的一般原则与定量标准的探讨[J]. 地理科学, 1990(3): 264-270.
DANG An-rong. An approach to the general principle and quantitative standard of population density classification[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1990(3): 264-270.
- [24] 李小明, 周新郢, 尚雪. 黄土炭屑分级统计方法及其在火演化研究中的意义[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 540-544.
LI Xiao-qiang, ZHOU Xin-ying, SHANG Xue. Different-(kPa/°C) size method of charcoal analysis in loess and its significance in the study of fire variation[J]. *Lake Science*, 2006, 18(5): 540-544.
- [25] 陈学民, 韩冰, 王莉莉, 等. 青海湖总磷、水温及矿化度与叶绿素 a 相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 333-337.
CHEN Xue-min, HAN Bing, WANG Li-li, et al. Analysis on the correlation between total phosphorus, water temperature, mineralization and chlorophylla in Qinghai Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 333-337.
- [26] 张璐璐, 刘静玲, James P. Lassoie, 等. 白洋淀底栖动物群落特征与重金属潜在生态风险的相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 612-621.
ZHANG Lu-lu, LIU Jing-ling, James-phillip LASSOIE, et al. The cor-

- relational study between the community characteristics of benthic macroinvertebrates and the potential ecological risk of heavy metal in Baiyangdian[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 612-621.
- [27] 连志鸾. 自动站与人工站观测记录的差异分析[J]. 气象, 2005, 31(3): 48-52.
- LIAN Zhi-luan. Analysis and correction of observation difference between two kinds of AWS and Man-observed station in Shijiazhuang[J]. *Meteorological*, 2005, 31(3): 48-52.
- [28] 张久山, 苗凤梅, 张殿芳. 自动与人工测温仪器观测地温极值差值分析[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 731-737.
- ZHANG Jiu-shan, MIAO Feng-mei, ZHANG Dian-fang. Difference analysis of two types of the rometers for measuring extreme ground temperature[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(5): 731-737.
- [29] 李名升, 张建辉, 梁 念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 617-624.
- LI Ming-sheng, ZHANG Jian-hui, LIANG Nian, et al. Comparisons of some common methods for water environmental quality assessment[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 617-624.
- [30] 白雪梅, 赵松山. 多种综合评价方法的优劣判断研究[J]. 统计研究, 2000(7): 45-48.
- BAI Xue-mei, ZHAO Song-shan. The judge research of merit and defect of some comprehensive evaluation method[J]. *Statistical Research*, 2000(7): 45-48.
- [31] 胡祖光, 吕筱萍, 戚满军. 序号总和理论及其在综合经济效益排序中的应用[J]. 数量经济技术经济研究, 1996(1): 59-62.
- HU Zu-guang, LÜ Xiao-ping, QI Man-jun. Total number theory and its application in the sort of overall economic efficiency[J]. *Quantitative & Technical Economics Research*, 1996(1): 59-62.
- [32] 石晓翠, 钱 翌, 熊建新. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 334-336.
- SHI Xiao-cui, QIAN Yi, XIONG Jian-xin, et al. Application of fuzzy mathematics models in the evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 334-336.
- [33] 窦 磊, 周永章, 王旭日, 等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 101-105.
- DOU Lei, ZHOU Yong-zhang, WANG Xu-ri, et al. Improvement and application of Fuzzy mathematical model for assessment of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 101-105.
- [34] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 土壤厚度的空间插值方法比较: 以青海三江源地区为例[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1793-1805.
- YI Xiang-sheng, LI Guo-sheng, YIN Yan-yu, et al. Comparison on soil depths predication among different spatial interpolation methods: A case study in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1793-1805.
- [35] 吴文星, 李开明, 汪 光, 等. 沉积物重金属污染评价方法比较: 以潭江为例[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9): 143-149.
- WU Wen-xing, LI Kai-ming, WANG Guang, et al. Evaluation of heavy metal pollution in river sediment: A comparative case study in Tanjiang River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(9): 143-149.
- [36] 张松滨. 共斜率灰色聚类法与土壤环境质量评价[J]. 农业环境保护, 1991, 10(2): 80-83.
- ZHANG Song-bin. Total slope grey clustering method and soil environmental quality assessment[J]. *Agro-environmental Protection*, 1991, 10(2): 80-83.