

张金婷, 谢贵德, 孙 华. 基于改进模糊综合评价法的地质异常区土壤重金属污染评价——以江苏灌南县为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2107-2115.

ZHANG Jin-ting, XIE Gui-de, SUN Hua. Evaluation of soil heavy metal pollution of geological anomaly area based on improved fuzzy comprehensive evaluation method - A case study of Guannan in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11):2107-2115.

基于改进模糊综合评价法的地质异常区土壤 重金属污染评价

——以江苏灌南县为例

张金婷, 谢贵德, 孙 华 *

(南京农业大学资源环境与城乡规划系, 南京 210095)

摘 要:以江苏灌南县农产品产地为研究区,运用层次分析法和熵权法的组合赋权法以改进传统模糊综合评价法,并应用于地质异常区的土壤重金属污染的综合评价。方法改进后的结果显示,在所采集的 30 个样点中没有出现严重污染情况,均处于 I 级与 II 级之间,其中有 9 个样点的评价结果偏向 II 级,其余采样点均偏向 I 级且各个样点的综合评价结果值波动明显。通过对这 9 个样点位置分布观察分析得出,这些样点呈现出在公路两侧附近分布的格局,对比分析发现这 9 个样点重金属 Cd 含量高于其他样点,研究区属于同一地质异常区,分析原因可能是以交通为主的人类活动使外源重金属进入土壤,在属于同一地质异常区的基础上加大了重金属含量,使污染评价结果相较于其样点偏高。

关键词:地质异常区;重金属;组合赋权法;模糊综合评价法

中图分类号:X820.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2107-09 doi:10.11654/jaes.2016-0505

Evaluation of soil heavy metal pollution of geological anomaly area based on improved fuzzy comprehensive evaluation method—A case study of Guannan in Jiangsu Province, China

ZHANG Jin-ting, XIE Gui-de, SUN Hua*

(Resource Environment & Urban-rural Planning Management, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract:In this paper, the agricultural production area of Guannan County in Jiangsu Province was taken as the research area. Analytic hierarchy process and entropy law method were used to improve the traditional fuzzy comprehensive evaluation method. The improved method was applied to the comprehensive evaluation of heavy metals in soil of this region. Results showed that there was no serious pollution in the collected 30 samples and the pollution level of these samples was between Class I and Class II. There had nine sample points at the level II and the other sampling points were closed to level I. Results of comprehensive evaluation values of each sample fluctuated significantly. Observing and analyzing the position distribution of these nine samples indicated that these samples were distributed in the vicinity of both sides of the highway. Comparative analysis found that the Cd content of these nine samples was higher than other samples with a possible contribution from traffic based human activities which made the exogenous heavy metals into the soil. Anthropogenic sources such as traffic further increased concentrations of heavy metals in this geological anomaly area as indicated by pollution assessment in this study.

Keywords:geological anomaly area; heavy metals; combined weights; fuzzy comprehensive evaluation method

收稿日期:2016-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41371484);江苏省“青蓝工程”项目

作者简介:张金婷(1990—),女,山东济宁人,硕士研究生,从事环境管理信息系统应用研究。E-mail:2013109013@njau.edu.cn

* 通信作者:孙 华 E-mail:sh@njau.edu.cn

土壤作为农作物生长的重要环境介质,不仅为土壤上的农作物提供养分,同时土壤中重金属也会被农作物吸收和累积^[1]。土壤中重金属含量除受工矿企业排放^[2-5]、交通与农业活动^[6-9]等人类活动影响外,土壤母质地异常也是影响耕层土壤重金属含量的重要因素^[10]。在我国地质异常区,土壤母质是影响地质异常的主要原因,土壤母质异常造成了耕层土壤重金属污染,地质异常区的重金属污染程度如何,需要对该地区的土壤重金属污染进行评价研究,对这类地区耕层土壤重金属进行科学准确的评价是保障当地农产品质量安全的前提和基础。根据江苏省地球化学调查的结果显示^[11],在江苏省北部,部分区域农田耕层土壤重金属含量较高可能是由于当地土壤母质地异常所引起。余云飞^[10]通过对耕层(0~20 cm)土壤和深层(120~200 cm)土壤中重金属含量进行差异比较分析,发现在苏北部分地区深层土壤中 As、Pb、Cr 和 Cu 含量均高于耕层土壤,分析得出耕层土壤重金属含量较高可能受母质地异常影响。江苏的土壤母质异常,存在地理空间变异性,廖启林等^[12]依据土壤中元素含量等差异和分布规律,对江苏土壤地球化学分区进行了研究,将连云港-灌南一带冲积-海积沉积划分为一个地球化学亚区,可知该地区带属于同一地质异常区,本文选取的研究区属于这一地带,并且不考虑本文研究区与研究区周围的地理空间异质性。

目前,评价土壤环境质量方法大多是利用各种数学方法,即根据量化的评价指标计算土壤环境质量综合得分,包括指数法^[13-15]、人工神经网络模型^[16-17]、模糊综合评价法^[18-20]。指数法包括单因子指数法和综合污染指数法,单因子指数法计算简单,但由于土壤环境本身所存在的复杂性,这种方法存在很大的局限性,更多的学者利用综合污染评价法,如内梅罗综合污染指数法来计算衡量土壤环境质量等级,这种方法在考虑土壤环境本身存在的综合性的同时却过分注重单因子指数大的指标因子,忽略了各参评因子之间的相互作用,评价结果也较为保守。人工神经网络方法在对土壤环境质量进行评价时通过对样本点的数据自学习、自适应等过程最终输出土壤环境质量等级,这种方法适用于非线性系统,但由于不同的人确立的模型之间差异较大,准确度不高,且需要的训练样本数量较多,耗费的人力、物力成本较高。模糊综合评价法以模糊数学理论为基础,利用参数间的不确定性代替数学假设基础上的解析关系,选定评价因子后对判断的事物进行综合评价。土壤重金属污染具有很

强的渐变性和模糊性,应用模糊综合评价法可以解决污染因子关系模糊和监测误差对评价结果带来的影响^[17]。影响模糊综合评价结果的因素包括指标的选取、隶属函数的确定、权重的赋值及综合评价原则的选取。应用模糊综合评价法对土壤重金属污染进行评价的关键在于对各污染因子权重进行准确赋值,传统的模糊综合评价法通常采用超标赋权法得到权重,这种方法得出的结果比较片面,容易受到最大污染指标的影响,还可能弱化某浓度低但毒性危害大的污染物的影响程度。因此本文提出改进的模糊综合评价法,在评价过程中对污染因子权重赋值时采用组合权重赋值法,利用层次分析法突出最大污染因子在评价中的地位,结合熵权法均衡考虑各评价因子传递给决策者信息量,对层次分析法得出的权重值进行修正,使最终的评价结果更加科学合理。

1 研究区概况和样品采集分析

1.1 研究区概况

本文选取江苏灌南县作为研究区,将灌南县耕层土壤中重金属含量和全省的平均值与背景值进行分析比较,见表1。从表1中可以看出,研究区耕层土壤中重金属 Cr、Pb、Cd 和 As 的含量均高出全省的平均值和背景值。灌南县土地利用类型为农地,且周边无工矿企业分布,其地处暖温带向亚热带过渡的湿润地区,属暖温湿性季风气候。灌南县土地为海水冲积平原,土壤中集海、陆多种微量元素于一体,主产优质粳米、小麦、玉米、大豆等作物。

1.2 土壤样品采集与加工检测

在收集灌南县工业企业分布特点和土地利用现

表1 耕层土壤中重金属含量比较(mg·kg⁻¹)

Table 1 Comparison of the content of heavy metal in the soil(mg·kg⁻¹)

重金属 Heavy metal	研究区平均值 Average value of study area	全省平均值 Average value of province	全省背景值 Background value of province
Cr	93.01	76	77.8
Pb	31.89	26.8	26.2
Cd	0.26	0.151	0.126
As	17.89	9.4	10
Hg	0.03	0.082	0.289

注:全省平均值来源于2005年江苏省国土地球化学调查资料;全省背景值来源于《中国土壤元素背景值》(1990)。

Note: The province's average value is derived from the land and the geochemical survey data of Jiangsu Province in 2005; The background value of the province comes from the background value of soil elements in China (1990).

状等资料基础上,通过现场勘查、资料分析后按照《农田土壤质量监测技术规范》(NY/T 395—2000)确定监测单元,对灌南县农地按照网格法共布设 30 个样点,分别编号 1~30,采样点的布设以能代表监测区土壤环境质量为原则,按照梅花形多点采集 0~20 cm 的耕层土壤混合,在采集过程中使用 GPS 仪器设备准确定位采样点的坐标信息,在灌南县农地的采样点属于同一地质异常区,并且不考虑采样点与周围其他地区之间的地理空间异质性。采样点分布如图 1。

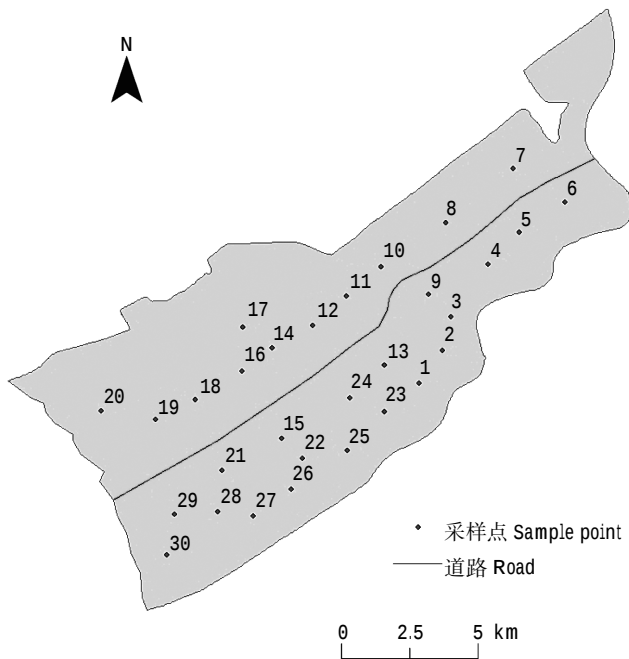


图 1 研究区采样点位分布图

Figure 1 Distribution of sampling points

对采集回来的土样进行混匀后缩分,并过 100 目筛备用。采用硝酸-氢氟酸-硫酸全消解的方法,利用原子吸收光谱仪测定重金属镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)

的含量;采用硝酸-盐酸混合试剂(王水)在沸水浴中加热消解土壤试样,利用原子荧光光谱仪测定重金属汞(Hg)和砷(As)的含量。为了保证现场调查与评价的准确性,所有的采样工作及实验室分析工作,包括样品采集容器的材质、采样工具的清洗、仪器设备的校准与使用、现场采样记录、样品的保存和运输、实验室分析质量控制(包括方法空白、仪器空白、质控样品、加标平行样和平行样)等均严格按照《环境监测分析方法》和《土壤环境监测技术规范》中规定的质量控制要求进行。

2 评价方法

模糊综合评价法以模糊数学理论为基础,利用参数间的不确定性代替数学假设基础上的解析关系,选定评价因子后对判断的事物进行综合评价。本文提出改进的模糊综合评价法,即运用层次分析法得出权重后再利用熵权法对其修正得到组合权重,代替传统的模糊综合评价法中的超标赋值法。

2.1 评价标准

土壤重金属污染评价标准是土壤重金属污染综合评价的前提和基础,在确定土壤重金属污染评价标准时应当综合考虑灌南县母地质异常的特性和作为农产品产地的功能用途。本文选用研究区所处省份土壤重金属背景值、《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006)和《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准,从重金属的角度将土壤环境质量分为 3 类,即评价等级集 $V=\{I, II, III\}$,各污染因子对应各级评价标准如表 2。

2.2 传统模糊综合评价法

(1)建立评价因子集合:

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (1)$$

选择《重金属污染综合防治“十二五”规划》提出

表 2 土壤重金属分级标准

Table 2 Grading standard of heavy metals in the soil

重金属 Heavy metal	I 级(背景值) Grade I (Background value)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	II 级(食用农产品产地环境质量评价标准) Grade II (Environmental quality evaluation standards for farmland of edible agricultural products)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	III 级(GB 15618—1995 中二级标准) Grade III (The standard of level two in GB 15618—1995)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
镉(Cd)	0.126	0.4	0.6
汞(Hg)	0.289	0.35	1
砷(As)	10	20	25
铅(Pb)	26.2	50	350
铬(Cr)	77.8	250	350

注:样本点 pH 值均处于 7.52~8.55 之间,选用 pH>7.5 对应的各类重金属标准。

Note: pH values of sample points are between 7.52 to 8.55, selection of various types of heavy metal standard that pH>7.5.

需严防严控的五类重金属镉、汞、砷(类金属)、铅、铬作为评价因子,即 $n=5$ 。

(2)确定评价等级集合^[18]:

$$V=\{V_1, V_2, \dots, V_m\} \quad (2)$$

将土壤重金属污染评价等级分为 3 个级别,即 $m=3$ 。

(3)构建评价因子集合与评价标准集合的模糊矩阵 $R_{n \times m}$ 。采用降半梯型分布函数计算隶属度建立模糊关系矩阵,隶属度值越大说明重金属对这一等级隶属度越高^[24]。传统模糊综合评价法中的权重确定方法为超标赋值法,通过计算各个污染评价因子的实测值与其相对应分级标准的比值来确定权重。由权重系数矩阵 $w_{1 \times n}$ 和隶属度值矩阵 $R_{n \times m}$ 经过相乘相加模型运算,得到模糊综合评价矩阵 B ^[19-20]。

(4)在进行模糊综合评价时多采用最大隶属度原则,这种方法在某些情况下存在一些缺点,易造成信息丢失。本文基于此点考虑,选用加权平均综合评价的方法,该方法对通过模糊算子运算得出的综合评价矩阵进行加权运算,进而确定土壤重金属污染的级别,并且将重金属污染级别进行量化处理。表示为:

$$B' = \left(\sum_{j=1}^m b_{ij}^k \right) / \left(\sum_{j=1}^m b_{ij}^k \right) \quad (3)$$

式中: b_{ij} 表示评价因子对第 j 级的隶属度; k 为待定系数,本文中 k 值取 2,目的是较大地控制 b_{ij} 所起的作用; B' 即为各采样点重金属污染等级。

传统模糊综合评价法的评价结果如表 3。由表 3 可知,在所普查的 30 个样点中没有出现严重污染情况,均处于 I 级(全省背景值)与 II 级[《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006)]之间,未出现土壤重金属严重污染现象。

2.3 改进模糊综合评价法

传统的模糊综合评价法中权重向量的确定方法具有片面性,忽略了各参评因子之间的相互内在联系^[22]。本文在传统的模糊综合评价方法基础上对方法进行改进,提出组合权重赋值法,将熵权法和层次分析法组合应用,在考虑最大污染因子对土壤环境质量影响的同时综合考虑各参评因子之间的内在联系和因子之间的相互影响,使得出的权重值可以客观准确地反映各重金属对土壤环境质量的影响。

(1)层次分析法

层次分析法通过构建判断矩阵对评价指标进行定性和定量分析,通过专家的多轮打分构建判断矩阵,可以很好地反映各指标的相对重要程度,具有很

表 3 传统模糊综合评价结果

Table 3 Traditional modified fuzzy comprehensive evaluation results

序号 Number	I 级 Level I	II 级 Level II	III 级 Level III	B'	评价结果 Evaluation result
1	0.541 8	0.458 2	0.000 0	1.417 0	偏向 I 级
2	0.569 7	0.430 3	0.000 0	1.363 3	偏向 I 级
3	0.471 4	0.528 6	0.000 0	1.556 9	偏向 II 级
4	0.533 1	0.466 9	0.000 0	1.434 1	偏向 I 级
5	0.658 8	0.341 2	0.000 0	1.211 5	偏向 I 级
6	0.545 6	0.454 4	0.000 0	1.409 6	偏向 I 级
7	0.536 2	0.463 8	0.000 0	1.428 0	偏向 I 级
8	0.464 4	0.535 6	0.000 0	1.570 8	偏向 II 级
9	0.421 1	0.578 9	0.000 0	1.654 0	偏向 II 级
10	0.264 7	0.735 3	0.000 0	1.885 2	偏向 II 级
11	0.551 8	0.448 2	0.000 0	1.397 5	偏向 I 级
12	0.395 1	0.604 9	0.000 0	1.700 9	偏向 II 级
13	0.482 1	0.517 9	0.000 0	1.535 8	偏向 II 级
14	0.476 8	0.523 2	0.000 0	1.546 4	偏向 II 级
15	0.327 1	0.672 9	0.000 0	1.808 9	偏向 II 级
16	0.347 5	0.652 5	0.000 0	1.779 0	偏向 II 级
17	0.461 7	0.538 3	0.000 0	1.576 1	偏向 II 级
18	0.410 7	0.589 3	0.000 0	1.673 1	偏向 II 级
19	0.342 3	0.657 7	0.000 0	1.786 8	偏向 II 级
20	0.483 7	0.516 3	0.000 0	1.532 5	偏向 II 级
21	0.348 3	0.651 7	0.000 0	1.777 8	偏向 II 级
22	0.452 8	0.547 2	0.000 0	1.593 6	偏向 II 级
23	0.551 3	0.448 7	0.000 0	1.398 5	偏向 I 级
24	0.670 7	0.329 3	0.000 0	1.194 3	偏向 I 级
25	0.465 3	0.534 7	0.000 0	1.569 0	偏向 II 级
26	0.469 2	0.530 8	0.000 0	1.561 3	偏向 II 级
27	0.597 3	0.402 7	0.000 0	1.312 4	偏向 I 级
28	0.532 1	0.467 9	0.000 0	1.436 1	偏向 I 级
29	0.410 4	0.589 6	0.000 0	1.673 7	偏向 II 级
30	0.495 4	0.504 6	0.000 0	1.509 2	偏向 II 级

好的实用性^[23]。在土壤重金属环境质量评价中通过专家打分构建判断矩阵具有不确定性,通常采用各评价指标的贡献率进行构建,使各指标间具有可比性^[22]。层次分析法的步骤如下:

①确定评价因子:

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (4)$$

对评价指标采用单因子污染指数法进行处理,使各指标之间具有可比性,具体如下式:

$$d_{ij}=c_{ij}/s_i \quad (5)$$

式中: d_{ij} 表示第 j 个样点中第 i 项重金属评价因子的标度值; c_{ij} 表示第 i 项重金属评价因子的实测值,参

考相关文献; s_i 表示第*i*项重金属各级标准值的算术平均值^[22],本文重金属各级标准值如表 2 所示,各评价指标的标度值如表 4 所示。

②构造判断矩阵 D_j ,即为第 $j(1 \leq j \leq 30)$ 个样点中各重金属因子之间的相对重要程度,两两判断矩阵如表 5。

③计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量。

表 4 评价指标标度值
Table 4 The scale values of evaluation index

序号 Number	Cr	Pb	Cd	As	Hg
1	0.460 3	0.225 2	0.586 1	0.954 5	0.047 6
2	0.451 5	0.209 8	0.612 8	0.921 8	0.043 9
3	0.531 1	0.247 8	0.799 3	0.910 9	0.049 4
4	0.406 3	0.218 9	0.639 4	0.954 5	0.051 3
5	0.312 5	0.157 7	0.479 6	0.883 6	0.049 4
6	0.491 3	0.235 8	0.692 7	0.894 5	0.058 6
7	0.531 1	0.225 2	0.612 8	0.938 2	0.049 4
8	0.535 6	0.261 8	0.825 9	0.889 1	0.045 8
9	0.504 6	0.256 9	0.879 2	0.921 8	0.042 1
10	0.451 5	0.243 5	1.065 7	1.009 1	0.049 4
11	0.397 9	0.225 2	0.666 1	0.916 4	0.042 1
12	0.430 7	0.237 9	0.799 3	1.025 5	0.043 9
13	0.409 0	0.216 8	0.692 7	0.987 3	0.040 3
14	0.390 8	0.209 1	0.639 4	1.020 0	0.049 4
15	0.399 7	0.222 4	0.879 2	1.069 1	0.045 8
16	0.389 1	0.229 5	0.799 3	1.085 5	0.051 3
17	0.393 9	0.211 9	0.692 7	1.014 5	0.049 4
18	0.393 0	0.215 4	0.746 0	1.047 3	0.054 9
19	0.396 1	0.218 2	0.932 5	1.020 0	0.049 4
20	0.386 4	0.204 8	0.612 8	1.025 5	0.058 6
21	0.408 1	0.227 4	0.799 3	1.085 5	0.049 4
22	0.403 2	0.226 0	0.825 9	0.938 2	0.069 6
23	0.325 3	0.226 0	0.506 2	0.970 9	0.047 6
24	0.339 5	0.212 6	0.373 0	0.889 1	0.053 1
25	0.406 8	0.222 4	0.825 9	0.938 2	0.064 1
26	0.342 1	0.216 1	0.426 3	1.069 1	0.056 7
27	0.308 9	0.213 3	0.261 1	0.960 0	0.106 2
28	0.310 3	0.199 2	0.319 7	1.014 5	0.058 6
29	0.455 9	0.274 5	0.905 9	0.910 9	0.051 3
30	0.387 3	0.242 8	0.586 1	1.003 6	0.060 4

表 6 平均随机的一致性指标
Table 6 Average random consistency index

n(阶数 Order)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

表 5 两两判断矩阵
Table 5 Mutual comparison judgment matrix

	Cr	Pb	Cd	As	Hg
Cr	1	d_{Cr}/d_{Pb}	d_{Cr}/d_{Cd}	d_{Cr}/d_{As}	d_{Cr}/d_{Hg}
Pb	d_{Pb}/d_{Cr}	1	d_{Pb}/d_{Cd}	d_{Pb}/d_{As}	d_{Pb}/d_{Hg}
Cd	d_{Cd}/d_{Cr}	d_{Cd}/d_{Pb}	1	d_{Cd}/d_{As}	d_{Cd}/d_{Hg}
As	d_{As}/d_{Cr}	d_{As}/d_{Pb}	d_{As}/d_{Cd}	1	d_{As}/d_{Hg}
Hg	d_{Hg}/d_{Cr}	d_{Hg}/d_{Pb}	d_{Hg}/d_{Cd}	d_{Hg}/d_{As}	1

④计算随机一致性比率进行一致性检验:

$$CR=CI/RI, CI=\frac{(\lambda_{\max}-n)}{n-1}$$
 (6)

式中:CI表示一致性检验指标;RI表示平均一致性检验指标;n表示阶数; $\lambda_{\max}$ 表示最大特征值。 $CR \leq 0.1$ 表示一致性效果较好,否则表示一致性效果不好,需要修正判断矩阵直到 ≤ 0.1 。

本文对于阶数在 1~11 之间的 RI 取值如表 6。在对矩阵进行运算借助 Matlab R2010a 软件对上述步骤进行计算,计算各样点不同重金属因子的权重,并通过一致性检验。最终由层次分析法获得权重矩阵如表 7。

从层次分析获得的权重矩阵可以看出,在灌南县所布设的 30 个样点中主要污染物为重金属 As 和重金属 Cd,这与江苏国土生态化学调查结果一致,灌南县土壤母质地质异常,母质土壤 As 含量高于其他地区,耕层土壤重金属 As 含量较高可能受母质地质异常影响。层次分析法能够对各重金属评价因子进行科学合理地定量处理,重点突出最大污染因子对综合评价的影响。

(2)熵权法

熵权法通过综合考虑各重金属评价因子传递给决策者信息量的大小来确定权重,可以有效地削弱异常值对结果产生的影响,但是熵权法的均值特性忽略了最大污染因子对综合评价的影响,使得评价结果较为保守^[24]。熵权法的计算步骤如下:

①构建原始指标数据矩阵:

$$X=(x_{ij})_{m \times n}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$$
 (7)

式中: x_{ij} 表示第*i*个样点的第*j*项重金属因子的实测数据。

表7 层次分析法权重值

Table 7 Weighting coefficient by the analytic hierarchy process

序号 Number	W _{Cr}	W _{Pb}	W _{Cd}	W _{As}	W _{Hg}
1	0.202 4	0.099 1	0.257 8	0.419 8	0.020 9
2	0.201 6	0.093 7	0.273 6	0.411 6	0.019 6
3	0.209 2	0.097 6	0.314 9	0.358 8	0.019 5
4	0.179 0	0.096 4	0.281 6	0.420 4	0.022 6
5	0.166 0	0.083 7	0.254 7	0.469 3	0.026 2
6	0.207 0	0.099 4	0.291 9	0.377 0	0.024 7
7	0.225 4	0.095 6	0.260 0	0.398 1	0.021 0
8	0.209 4	0.102 4	0.322 9	0.347 5	0.017 9
9	0.193 7	0.098 6	0.337 6	0.353 9	0.016 2
10	0.160 1	0.086 4	0.378 0	0.357 9	0.017 5
11	0.177 0	0.100 2	0.296 3	0.407 7	0.018 7
12	0.169 7	0.093 8	0.315 0	0.404 2	0.017 3
13	0.174 3	0.092 4	0.295 3	0.420 8	0.017 2
14	0.169 3	0.090 6	0.277 0	0.441 8	0.021 4
15	0.152 8	0.085 0	0.336 1	0.408 6	0.017 5
16	0.152 3	0.089 8	0.312 9	0.424 9	0.020 1
17	0.166 7	0.089 7	0.293 2	0.429 4	0.020 9
18	0.160 0	0.087 7	0.303 7	0.426 3	0.022 3
19	0.151 4	0.083 4	0.356 4	0.389 9	0.018 9
20	0.168 9	0.089 5	0.267 8	0.448 2	0.025 6
21	0.158 8	0.088 5	0.311 1	0.422 4	0.019 2
22	0.163 7	0.091 7	0.335 4	0.380 9	0.028 2
23	0.156 7	0.108 8	0.243 8	0.467 7	0.022 9
24	0.181 8	0.113 8	0.199 8	0.476 2	0.028 4
25	0.165 5	0.090 5	0.336 1	0.381 8	0.026 1
26	0.162 1	0.102 4	0.202 0	0.506 6	0.026 9
27	0.167 0	0.115 3	0.141 2	0.519 1	0.057 4
28	0.163 1	0.104 7	0.168 1	0.533 3	0.030 8
29	0.175 4	0.105 6	0.348 6	0.350 6	0.019 7
30	0.169 8	0.106 5	0.257 0	0.440 1	0.026 5

②对原始矩阵 X 进行标准化处理并进行归一化运算:

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (8)$$

考虑到熵值计算中 $p_{ij}=0$ 时 $\ln(p_{ij})$ 没有意义,需要对 p_{ij} 进行修正:

$$p_{ij}' = p_{ij} + 1 \quad (9)$$

③计算各指标的熵值和权重:

$$e_j = (- \sum_{i=1}^m p_{ij}' \ln p_{ij}') / \ln m \quad (10)$$

$$w_j = (1 - e_j) / (n - \sum_{j=1}^n e_j) \quad (11)$$

式中: e_j 表示第 j 个重金属因子的熵; m 表示样点个数; w_j 表示第 j 个重金属因子的权重。

按照上述步骤应用熵权法得到权重系数 $w = (0.266\ 8, 0.126\ 6, 0.194\ 9, 0.321\ 5, 0.090\ 1)$ 。

(3)组合权重赋值法

组合权重赋值得到的结果比较全面,更加符合真实情况,它可以综合考虑并权衡各种权重赋值法的利弊,将多种权重法得到的结果进行重新组合。组合权重赋值法的组合方式有乘积归一法和加权均值法,两种方法适用的情况有所不同,乘积归一法适用于权重值相差不大、指标数量较多的情况^[22]。

在对层次分析法和熵权法优缺点分析的基础上,本文将二者进行组合:

$$W = aw_1 + bw_2 \quad (12)$$

式中: $a+b=1$; w_1 为层次分析法得出的权重; w_2 为熵权法得出的权重。

层次分析法强调最大污染因子在评价中的地位,熵权法均衡考虑各评价因子的作用,两种方法相互补充修正,且没有偏好性,因此可以采用算术平均法组合权重^[22],即 a 和 b 的取值为 0.5 。组合权重得到权重值如表 8。

对比层次分析法权重平均值、熵权法权重值和组合权重法平均值,如表 9。从表 9 可以看出,三种方法得出的结果均显示研究区范围内重金属 As 均为主要的污染因子,层次分析法中重金属 As 的权重系数为 $0.419\ 8$,熵权法得出重金属 As 的权重系数为 $0.321\ 5$,组合权重法得出的权重系数为 $0.370\ 7$ 。对比三组数据可以发现,组合赋值权重法在考虑最大污染因子对土壤环境质量影响的同时,也均衡考虑了各评价因子,结果更加全面准确。

应用改进后的模糊综合评价法得到的结果如表 10 和图 2。从重金属的角度,灌南县土壤环境质量较好,在所普查的 30 个样点中没有出现严重污染情况,均处于 I 级(全省背景值)与 II 级[《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006)]之间,说明灌南县虽然是土壤母质地质异常地区,但是该地区未出现土壤重金属严重污染现象;其中 9、10、12、15、16、18、19、21、29 这 9 个样本点的评价结果偏向二级,其余采样点均偏向一级。从量化结果和图 2 还可以看出,各个采样点的评价结果量化数值差异较大,波动现象较为明显,最小的为 24 号点,数值为 $1.133\ 2$,最大的为 10 号点,数值为 $1.764\ 1$ 。在灌南县内,各个样点的综合评价结果值波动明显,分析可能的原因是外源

表 8 组合权重赋值法得到权重系数
Table 8 The weight coefficients by combination weighting method

序号 Number	W _{Cr}	W _{Pb}	W _{Cd}	W _{As}	W _{Hg}
1	0.234 6	0.112 9	0.226 4	0.370 7	0.055 5
2	0.234 2	0.110 2	0.234 3	0.366 6	0.054 9
3	0.238 0	0.112 1	0.254 9	0.340 2	0.054 8
4	0.222 9	0.111 5	0.238 3	0.371 0	0.056 4
5	0.216 4	0.105 2	0.224 8	0.395 4	0.058 2
6	0.236 9	0.113 0	0.243 4	0.349 3	0.057 4
7	0.246 1	0.111 1	0.227 5	0.359 8	0.055 6
8	0.238 1	0.114 5	0.258 9	0.334 5	0.054 0
9	0.230 3	0.112 6	0.266 3	0.337 7	0.053 2
10	0.213 5	0.106 5	0.286 5	0.339 7	0.053 8
11	0.221 9	0.113 4	0.245 6	0.364 6	0.054 4
12	0.218 3	0.110 2	0.255 0	0.362 9	0.053 7
13	0.220 6	0.109 5	0.245 1	0.371 2	0.053 7
14	0.218 1	0.108 6	0.236 0	0.381 7	0.055 8
15	0.209 8	0.105 8	0.265 5	0.365 1	0.053 8
16	0.209 6	0.108 2	0.253 9	0.373 2	0.055 1
17	0.216 8	0.108 2	0.244 1	0.375 5	0.055 5
18	0.213 4	0.107 2	0.249 3	0.373 9	0.056 2
19	0.209 1	0.105 0	0.275 7	0.355 7	0.054 5
20	0.217 9	0.108 1	0.231 4	0.384 9	0.057 9
21	0.212 8	0.107 6	0.253 0	0.372 0	0.054 7
22	0.215 3	0.109 2	0.265 2	0.351 2	0.059 2
23	0.211 8	0.117 7	0.219 4	0.394 6	0.056 5
24	0.224 3	0.120 2	0.197 4	0.398 9	0.059 3
25	0.216 2	0.108 6	0.265 5	0.351 7	0.058 1
26	0.214 5	0.114 5	0.198 5	0.414 1	0.058 5
27	0.216 9	0.121 0	0.168 1	0.420 3	0.073 8
28	0.215 0	0.115 7	0.181 5	0.427 4	0.060 5
29	0.221 1	0.116 1	0.271 8	0.336 1	0.054 9
30	0.218 3	0.116 6	0.226 0	0.380 8	0.058 3

的重金属进入土壤,使区域范围的样点间评价结果差异较大。通过对这 9 个样点位置分布观察分析得出,这些样点呈现出在公路两侧附近分布的格局,而且 Cd 含量高于其他样点,分析可能的原因是以交通为主的人类活动使外源重金属进入土壤,在同属地质异常区的基础上,加大了这 9 个点的重金属含量,使其评价结果偏向二级。综合评价结果显示灌南县土壤环境质量

表 10 改进模糊综合评价结果
Table 10 The modified fuzzy comprehensive evaluation results

序号 Number	I 级 Level I	II 级 Level II	III 级 Level III	B'	评价结果 Evaluation result
1	0.581 1	0.418 8	0.000 0	1.341 9	偏向 I 级
2	0.608 6	0.391 4	0.000 0	1.292 6	偏向 I 级
3	0.509 5	0.490 5	0.000 0	1.481 0	偏向 I 级
4	0.581 5	0.418 4	0.000 0	1.341 1	偏向 I 级
5	0.710 4	0.289 5	0.000 0	1.142 4	偏向 I 级
6	0.577 1	0.422 9	0.000 0	1.349 4	偏向 I 级
7	0.567 2	0.432 8	0.000 0	1.367 9	偏向 I 级
8	0.502 8	0.497 2	0.000 0	1.494 5	偏向 I 级
9	0.471 6	0.528 4	0.000 0	1.556 6	偏向 II 级
10	0.357 1	0.642 8	0.000 0	1.764 1	偏向 II 级
11	0.597 6	0.402 3	0.000 0	1.311 9	偏向 I 级
12	0.458 8	0.541 1	0.000 0	1.581 7	偏向 II 级
13	0.539 6	0.460 4	0.000 0	1.421 3	偏向 I 级
14	0.540 5	0.459 5	0.000 0	1.419 5	偏向 I 级
15	0.412 6	0.587 4	0.000 0	1.669 6	偏向 II 级
16	0.427 9	0.572 1	0.000 0	1.641 3	偏向 II 级
17	0.525 8	0.474 1	0.000 0	1.448 4	偏向 I 级
18	0.482 4	0.517 5	0.000 0	1.535 1	偏向 II 级
19	0.429 8	0.570 2	0.000 0	1.637 7	偏向 II 级
20	0.548 3	0.451 7	0.000 0	1.404 3	偏向 I 级
21	0.425 7	0.574 3	0.000 0	1.645 4	偏向 II 级
22	0.519 2	0.480 8	0.000 0	1.461 7	偏向 I 级
23	0.611 7	0.388 2	0.000 0	1.287 1	偏向 I 级
24	0.718 4	0.281 6	0.000 0	1.133 2	偏向 I 级
25	0.526 1	0.473 8	0.000 0	1.447 8	偏向 I 级
26	0.556 2	0.443 8	0.000 0	1.389 0	偏向 I 级
27	0.665 5	0.334 4	0.000 0	1.201 6	偏向 I 级
28	0.622 2	0.377 8	0.000 0	1.269 4	偏向 I 级
29	0.467 7	0.532 2	0.000 0	1.564 2	偏向 II 级
30	0.549 6	0.450 3	0.000 0	1.401 7	偏向 I 级

(从重金属角度)较好,但综合评价结果的明显波动现象应当引起关注,应进一步探究引起这一现象的原因,加强土壤环境质量保护。

3 讨论

本文对传统模糊综合评价法的权重确定方面进

表 9 三种方法权重系数对比表
Table 9 Weight coefficient comparison table by three methods

项目 Item	Cr	Pb	Cd	As	Hg
层次分析法 Analytic hierarchy process	0.175 3	0.096 1	0.285 7	0.419 8	0.023 1
熵权法 Entropy weight method	0.266 8	0.126 6	0.194 9	0.321 5	0.090 1
组合权重法 Combined weight method	0.221 1	0.111 3	0.240 3	0.370 7	0.056 6

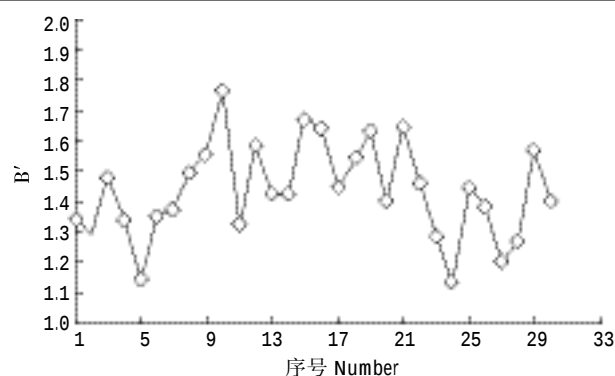


图2 各采样点 B' 值的折线图

Figure 2 The line graph for the value of each point

行改进,并应用到实例研究中,本文是在地质异常区基础上开展的研究,方法适用于地质异常区的土壤重金属污染评价,以后也可考虑选择非地质异常区补充开展相关工作,不过本方法的改进也主要是为了在解决地质异常区的土壤重金属污染评价的特殊问题方面进行一些尝试和探索,对于非地质异常区进行相关改进工作的必要性尚有待商榷。另外,本文的研究已在前期工作中开展了大量的数据资料调研和实地采样调查研究,包括参与所在研究区域相关土壤重金属污染普查项目工作,研究方法的改进符合大数据支撑的基本要求。

4 结论

本文对传统模糊综合评价法的权重确定方法进行改进,在突出最大污染因子对评价结果影响的同时保留其他评价提供的信息,得出的权重值更客观科学。

(1)通过组合赋权法得出权重值结果可知,研究区中对土壤重金属污染贡献度较大的有 As 和 Cd。

(2)传统的模糊综合评价法的评价等级偏高,改进后的模糊综合评价方法的结果准确性有所提高。

参考文献:

- [1] 常学秀,施晓东.土壤重金属污染与食品安全[J].云南环境科学,2001,20(增刊1):21-24,77.
CHANG Xue-xiu, SHI Xiao-dong. Heavy metal pollution and food security[J]. Yunnan Environmental Science, 2001, 20(Suppl 1):21-24, 77.
- [2] 孙贤斌,李玉成.淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J].地理科学,2013,33(10):1238-1244.
SUN Xian-bin, LI Yu-cheng. The spatial distribution of soil heavy metals and variation characteristics of Datong abandoned coal mine area in Huainan City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(10):1238-1244.
- [3] 郑海龙,陈杰,邓文靖,等.南京城市边缘带化工园区土壤重金属污染评价[J].环境科学学报,2005,25(9):1182-1188.
ZHENG Hai-long, CHEN Jie, DENG Wen-jing, et al. Assessment of soil heavy metals pollution in the chemical industrial areas of Nanjing peri-urban zone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(9):1182-1188.
- [4] 石占飞,王力.神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(6):1150-1158.
SHI Zhan-fei, WANG Li. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(6):1150-1158.
- [5] Lee C S, Li X D, Shi W Z, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics[J]. Science of the Total Environment, 2006, 356(1):45-61.
- [6] Fakoyade S O, Olu-Owolabi B I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osagbo, Nigeria: Its relationship to traffic density and proximity to highways[J]. Environmental Geology, 2003, 44(2):150-157.
- [7] 李波,林玉锁,张孝飞,等.宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究[J].农业环境科学学报,2005,24(2):266-269.
LI Bo, LIN Yu-suo, ZHANG Xiao-fei, et al. Pollution of heavy metals in soil and agricultural products on sides of Ning-Lian superhighway[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2):266-269.
- [8] 林健,杜恣闲,陈建安,等.公路交通污染土壤和稻谷中镉铅分布特征[J].环境与健康杂志,2002,19(2):119-121.
LIN Jian, DU Zi-xian, CHEN Jian-an, et al. Distribution of cadmium and lead in soil and rice along road polluted by traffic exhaust[J]. Journal of Environment and Health, 2002, 19(2):119-121.
- [9] 郭广慧,雷梅,陈同斌,等.交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J].环境科学学报,2008,28(10):1937-1945.
GUO Guang-hui, LEI Mei, CHEN Tong-bin, et al. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(10):1937-1945.
- [10] 余云飞.苏北地质异常区土壤和作物重金属富集特征及产地环境安全风险评价[D].南京:南京农业大学,2011.
YU Yun-fei. Accumulation characteristics of heavy metals in soil and crops and environmental evaluation of edible crop production for food security in geological anomaly area in northern part of Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [11] 廖启林,范迪富,金洋,等.江苏农田土壤生态环境调查与评价[J].江苏地质,2006,30(1):32-40.
LIAO Qi-lin, FAN Di-fu, JIN Yang, et al. On investigation and appraisal of ecological environment of farmland soil in Jiangsu[J]. Jiangsu Geology, 2006, 30(1):32-40.
- [12] 廖启林,刘聪,金洋,等.江苏土壤地球化学分区[J].地质学刊,2011,35(3):225-235.
LIAO Qi-lin, LIU Cong, JIN Yang, et al. On geochemical regionalization of soils in Jiangsu[J]. Journal of Geology, 2011, 35(3):225-235.
- [13] Chen T B, Liu X, Zhu M, et al. Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural

- transitional area of Hangzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 151(1): 67-78.
- [14] Brus D J, Gruijter J D, Romkens P F A M. Probabilistic quality standards for heavy metals in soil derived from quality standards in crops [J]. *Geoderma*, 2005, 128(3/4): 301-311.
- [15] 夏 敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GIS 的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 684-692.
- XIA Min, ZHAO Bing-zi, ZHANG Jia-bao. GIS-based research on soil heavy metal accumulation in a fluvo-aquic soil area typical of the Huang-Huai-Hai plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 684-692.
- [16] 胡大伟, 卞新民, 王书玉, 等. 基于 BP 模型的南通市农田土壤重金属空间分布研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(1): 91-95.
- HU Da-wei, BIAN Xin-min, WANG Shu-yu, et al. Study on spatial distribution of farmland soil heavy metals in Nantong City based on BPANN modeling[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(1): 91-95.
- [17] 李 向, 管 涛, 徐 清. 基于 BP 神经网络的土壤重金属污染评价方法: 以包头土壤环境质量评价为例[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 250-256.
- LI Xiang, GUAN Tao, XU Qing. The evaluation of soil heavy metal pollution based on the BP Neural Network: Taking soil environmental quality assessment in Baotou as an example[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(2): 250-256.
- [18] 李 磊, 平仙隐, 王云龙, 等. 春、夏季长江口海域表层沉积物中重金属污染的模糊综合评价及来源分析[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(1): 46-52.
- LI Lei, PING Xian-yin, WANG Yun-long, et al. Fuzzy comprehensive evaluation and analysis of source of heavy metals pollution in surface sediments from Changjiang estuary in spring and summer[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(1): 46-52.
- [19] 付善明, 肖 方, 宿文姬, 等. 基于模糊数学的广东大宝山矿横石河下游土壤重金属元素污染评价[J]. *地质通报*, 2014, 33(8): 1140-1146.
- FU Shan-ming, XIAO Fang, SU Wen-ji, et al. The evaluation of heavy metals pollution in soils of the lower reaches of the Hengshi River within the Dabaoshan mining area based on fuzzy mathematics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1140-1146.
- [20] 王艳艳, 张瑞斌, 赵言文, 等. 模糊综合评价法在湖泊水质评价中的应用研究[J]. *江苏农业科学*, 2010, 37(1): 326-328.
- WANG Yan-yan, ZHANG Rui-bin, ZHAO Yan-wen, et al. Applications of fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation of lake water quality[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, 37(1): 326-328.
- [21] 孙清展, 臧淑英. 水体重金属污染评价方法对比研究: 以扎龙湿地湖水为例[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2242-2248.
- SUN Qing-zhan, ZANG Shu-ying. Pollution evaluation and forecast of heavy metal in lake of Zhalong wetland, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2242-2248.
- [22] 杨 静. 改进的模糊综合评价法在水质评价中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- YANG Jing. Application of the improved fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [23] 邓 雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100.
- [24] 林济铿, 李童飞, 赵子明, 等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估[J]. *电网技术*, 2012, 36(2): 115-120.
- LIN Ji-keng, LI Tong-fei, ZHAO Zi-ming, et al. Assessment on power system black-start schemes based on entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation mode[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(2): 115-120.