

基于熵值多级模糊综合评判的空气质量综合评价

王 恒¹, 颜 斌¹, 崔 鑫², 刘小峰³

(1. 山东科技大学 电子通信与物理学院, 山东 青岛 266590; 2. 海南省气象信息中心, 海南 海口市 570203;
3. 河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022)

摘 要: 针对空气质量评价中多因素加权系数的确定问题, 提出了基于多级评价和熵值模糊综合评判的评价方法。将城市各区与整个城市空气质量评价作为一个多级模糊综合评判问题, 通过熵值法赋权值, 直接从模糊关系矩阵获得各级评价的加权系数。实验中, 以 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 作为评价因子, 对山东省某城市六区 2013 年空气质量状况进行多级综合评价。结果表明, 熵值模糊多级综合评判法平衡考虑了各种污染物的贡献, 改进了超标倍数法过于强调高浓度污染物的缺陷。

关键词: 空气质量评价; 多级模糊综合评判; 隶属度; 熵值; 评价因子

中图分类号: TP309.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)05-0102-07

Multilevel Air Quality Evaluation Based on Entropy Multilevel Fuzzy Comprehensive Evaluation

WANG Heng¹, YAN Bin¹, CUI Xin², LIU Xiaofeng³

(1. College of Electronics, Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. The Meteorological Information Center of Hainan Province, Haikou, Hainan 570203, China; 3. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract: Aiming at the determination of weighting coefficients for multiple factors in air quality evaluation, a method based on multi-level evaluation and entropy-based fuzzy comprehensive evaluation is proposed. In this method, the air quality evaluation of districts and the whole city is treated as a multi-level fuzzy comprehensive evaluation problem. An entropy-based weighting coefficients determination method is proposed, where the weighting coefficients used in various levels are determined directly from the fuzzy matrix. In the experiment, we use $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_2 as the evaluation factors and evaluate the air quality for a city and its districts from Shandong province in 2013. The evaluation result is compared with the multiple super-scale weighting method. The experimental results show that, entropy based multi-level fuzzy comprehensive evaluation balances the contribution from the major pollutants, and avoids the limitation of multiple super-scale weighting method.

Key words: air quality evaluation; multi-level fuzzy comprehensive evaluation; membership grade; entropy; evaluation factor

随着工业化、现代化社会的发展, 空气质量问题已经成为人们日益关心的重点问题。最近的研究表明,

收稿日期: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61272432); 山东省自然科学基金项目(ZR2014JL044); 全国统计科学重点研究项目(2015LZ59); 山东省统计科研重点课题(KT15104)

作者简介: 王 恒(1990—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事大气数据统计处理、统计信号处理方面研究。

E-mail: wangheng9010@163.com

颜 斌(1973—), 男, 山东青岛人, 副教授, 博士, 主要从事多媒体通信安全、大气和气象数据处理方面研究, 本文通信作者。E-mail: yanbinhit@hotmail.com

空气质量对呼吸系统疾病、免疫系统疾病、肿瘤疾病的患病率与死亡率密切相关^[1]。现阶段,城市经济的发展也与大气环境质量的影响密切相关,所以对空气质量状况进行综合全面的评价尤为重要。目前评价空气质量的方法有很多种,如马建华^[2]运用层次分析法对空气质量进行了评价,该方法把研究对象作为一个系统,对其逐层进行分析,在各层之间都设置权重,并对最终的评价结果起到影响。杨晓燕等^[3]运用模糊综合评判法中,引入了隶属度的概念,但该方法权重的确定依赖于样本值,具有较强的主观性。现有空气质量评价多侧重如何从单个污染物的评价结果,建立多个污染物的综合评价结果^[5],或者建立与人体健康相关联的评价指数^[6],而较少研究用于城市之间横向或者纵向(时间)空气质量对比的评价方法。与单个时间点和地点空气质量指数相比,对城市空气质量的横向、纵向综合评价和对比,有助于管理部门综合评价城市的经济发展与大气质量的协调性。

根据现有评价方法的不足,本文利用熵值赋权法直接从模糊关系矩阵来确定评价区域内评价因子所占权重,并在原有的单级评判方法的基础上进行拓展,建立多级模糊综合评判法,对城市空气质量状况进行评价。

1 信息熵基本理论

本文基于熵值法确定评价因子的权重。在信息论中,信息熵是衡量信源不确定性程度的度量,如果一个离散无记忆信源表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_q \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_q \end{bmatrix}; \quad (1)$$

即随机变量 X 取值(符号) x_t 时的概率为 p_t , 其中 $t = 1, 2, 3, \dots, q$ 。那么信源的信息熵即为

$$H = - \sum_{t=1}^q p_t \ln p_t. \quad (2)$$

信息熵越小,信息的效用值越大,指标的权重也越大;反之,信息熵越大,信息的效用值越小,指标的权重也越小。通过分析指标间的联系程度以及指标所提供的信息量能够客观地决定指标的权重,从而在一定程度上避免专家主观因素带来的偏差。

2 基于熵值的多级模糊综合评判

在本节中,我们首先简述本文模糊评价系统的总体结构,然后详细描述隶属度函数、熵值赋权法以及综合评价的步骤。

2.1 评价因素集与评价标准集

大气环境是一个多因素耦合的复杂系统,需要同时考虑多个监测点多个污染物^[7]。首先建立评价因素集和评价标准集,通过对影响城市空气质量各指标的综合分析,城市环境大气中常见污染物为二氧化硫(SO₂)、可吸入颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})和二氧化氮(NO₂),所以将以上四种污染物作为评价的因素集。

从污染物浓度到所属空气质量等级之间的映射具有模糊性,为此我们建立隶属度函数,用隶属度刻画分级界限^[10],并赋予污染因子权重值,再根据模糊矩阵复合运算求出综合评价结果,利用多级模糊综合评判法综合评价大气环境质量。

根据实时空气质量监测状况以及监测污染物分类,选取大气中的常见污染因子作为评价的因素集,设污染物因子有 n 个,那么污染物组成的因素集合为:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$$

其中 $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ 为参与评价的 n 个评价因素。参考国家空气质量标准,把评价标准集合设为 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$, 其中 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_m$ 为与每个 u_i 相对应的 m 个评价等级的浓度阈值。

根据目前城市污染的常见因素和数据的可获取性,令 $U = \{PM_{2.5}, PM_{10}, SO_2, NO_2\}$ 。根据《环境空气质量标准》(GB3095—1996)^[8]可知,该标准未对细颗粒物(PM_{2.5})浓度限值作出规定,我国于2012年2月新

修订了《环境空气质量标准》(GB3095—2012)^[9], 增设了对细颗粒物的浓度限值, 并将原有的污染因子指标三个等级改为两个等级标准, 但选取的评价区域内二氧化硫因子样本浓度值比文献[9]中规定的二级标准浓度限值还要高很多, 因此参照以上两个标准可将环境空气质量分为四级: I 级、II 级、III 级和 IV 级, 即为优、良好、轻度污染和重度污染。

2.2 隶属度函数的建立

当评价因素集 U 和评价标准集 V 确定后, 根据各污染因子对各评价标准的隶属度, 可以建立相应的映射关系 $U \rightarrow V$ 。一个评价因素 u_i 的浓度 x_i 对评价标准 v_j 的隶属度体现了对 u_i 评价的模糊性。大气质量评测中, 这种模糊性往往只涉及相邻的两个评价等级标准, 例如仅涉及 v_j 和 v_{j+1} , 或者仅涉及 v_{j-1} 和 v_j 。为此, 评价标准 v_j 的隶属度函数 r_{ij} 在浓度 $x_i = v_j$ 时应达到最大值, 随着 x_i 偏离 v_j 的增加, 隶属度应逐渐下降, 在 $x_i = v_{j-1}$ 或者 $x_i = v_{j+1}$ 时, 达到最小值 0。与非线性下降函数相比, 选择 r_{ij} 随 $|x_i - v_j|$ 线性下降更便于计算。综上所述, 本文运用美国控制论领域扎得教授提出的三角形隶属度函数。对于最小评价标准 v_1 和最大评价标准 v_m , 隶属度函数呈现降半梯形函数形式(图 1)^[10]。

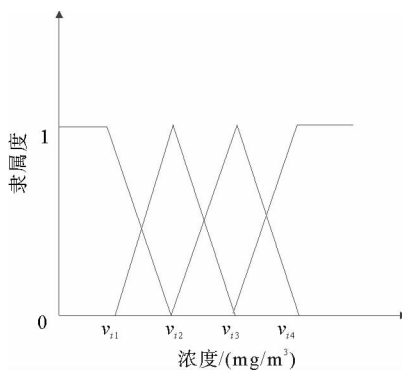


图 1 隶属度函数

Fig. 1 Membership functions

各评价因子对第 1 级($j=1$)的隶属度为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i \leq v_{ij}; \\ \frac{(v_{i(j+1)} - x_i)}{(v_{i(j+1)} - v_{ij})}, & v_{ij} < x_i < v_{i(j+1)}; \\ 0, & x_i \geq v_{i(j+1)}. \end{cases} \quad (3)$$

评价因子对第 2, 3 级($j=2, 3$)的隶属度函数为:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_i - v_{i(j-1)}}{v_{ij} - v_{i(j-1)}}, & v_{i(j-1)} \leq x_i \leq v_{ij}; \\ \frac{v_{i(j+1)} - x_i}{v_{i(j+1)} - v_{ij}}, & v_{ij} < x_i < v_{i(j+1)}; \\ 0, & x_i \geq v_{i(j+1)}. \end{cases} \quad (4)$$

评价因子对第 4 级($j=4$)的隶属度函数为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_i \leq v_{i(j-1)}; \\ \frac{x_i - v_{i(j-1)}}{v_{ij} - v_{i(j-1)}}, & v_{i(j-1)} < x_i < v_{ij}; \\ 1, & x_i \geq v_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

式中 x_i 表示评价区域内第 i 种污染因子的年平均浓度, v_{ij} 表示第 i 个评价因子的第 j 级标准浓度限值。隶属度 $r_{ij} \in [0, 1]$ 。当 $r_{ij} = 0$ 时, 表示评价因子 u_i 不属于模糊集合, 当 $r_{ij} = 1$ 时, 表示评价因子 u_i 完全属于模糊集合, r_{ij} 越接近 1, 则 u_i 隶属于模糊集合的程度就越大。

对于所有的 $u_i \in U$, 则可得到模糊关系矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{ij} & \cdots & r_{im} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

其中, r_{ij} 表示第 i 个评价因素对第 j 级评价标准的隶属度。那么 R 中的第 i 行 r_i 就表示第 i 个评价因素对

环境空气质量标准相邻两级的隶属度。

2.3 熵值法确定各评价因子权重

空气质量评价是一个多因素影响的复杂系统,各因素对整个评价体系起到的作用不同,因此要根据其作用大小对各单因子评价因素赋予一定的权重。

确定权重系数的方法有多种,如层次分析法^[2],主因素突出赋权法和熵值法。层次分析法与主因素突出赋权法反映了决策者的意向,决策或评价结果都有很大主观性。本文将信息论中的熵值引入到权重确定中,利用评价指标确定的关系矩阵来确定权重值,避免了各因子主观性影响,能够客观地对空气质量状况进行评价。

根据模糊矩阵(6)式以及熵的定义可以求得第 i 个因子在第 j 级标准下的权重。为此,首先对隶属度归一化:

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}}; \tag{7}$$

其中: $i=1,2,3,\dots,n$; $j=1,2,3,\dots,m$ 。 r_{ij} 为模糊关系矩阵 \mathbf{R} 中的元素。各评价因素的熵值为:

$$H_i = -k \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}。 \tag{8}$$

式中, $k = \frac{1}{\ln m}$, 规定,当 $P_{ij} = 0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

进一步,定义 $g_i = 1 - H_i$ 为差异性系数, g_i 越大,则该评价因子在总的评价系统中起的作用越大,权重越大。那么各评价因子的权重值为:

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^n (1 - H_i)}; \tag{9}$$

由此得到权重矢量:

$$\mathbf{w} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]。$$

2.4 多级模糊综合评价矩阵的确定

以上为了表述方便,仅考虑了单级模糊评判。在本文中,需要根据各区的评价结果来进一步获得一个城市的评价,所以需要进行模糊多级综合评判。假定使用 K 级模糊综合评判,则在第 $k < K$ 级评判中,当模糊关系矩阵 \mathbf{R}_k 与权重矩阵 \mathbf{w}_k 确定后,就可进行模糊复合运算

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{w}_k \cdot \mathbf{R}_k = [b_{k1}, b_{k2}, b_{k3}, b_{k4}];$$

其中, \cdot 表示模糊复合运算^[10]。本文只考虑两级评价,即 $K = 2$, 设第二级共有 S 个评价因素,这样经过第一级评价后就获得如下的模糊评价向量集合:

$$\{\mathbf{b}_2^1, \dots, \mathbf{b}_2^S\};$$

其中, \mathbf{b}_k^s 表示用于第 k 级评价的第 s 个模糊评价向量。特别地,在第一级评价中 $\mathbf{b}_1^s = \mathbf{r}_s$ 。在第二级评价中,构建如下的模糊关系矩阵:

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_2^1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_2^S \end{pmatrix}。 \tag{10}$$

使用模糊矩阵 \mathbf{R}_3 , 根据熵值赋权法求得权重 \mathbf{w}_3 , 则整个城市的模糊综合评价矩阵 $\mathbf{b}_3 = \mathbf{w}_3 \cdot \mathbf{R}_3$ 。其中, b_{3j} 表示该区域大气环境质量对大气质量标准第 j 级的隶属度。

最后根据最大隶属度原则,取隶属度最大的等级即为该评价区域空气质量等级。

3 大气环境质量案例分析

根据以上建立的评价系统,以山东省某城市为例,将各评价因子的数据代入到评价系统中,系统框图见

图 2。最终求出评价结果,并对结果进行分析。

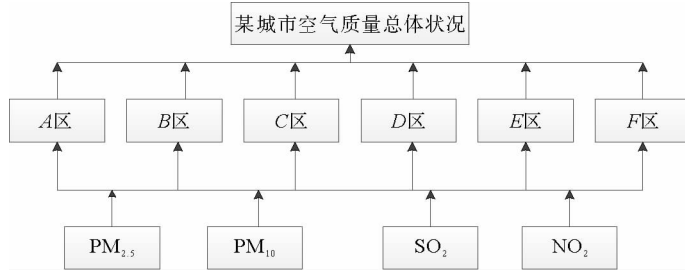


图 2 城市空气质量多级模糊综合评判框图

Fig. 2 The overall diagram of multilevel fuzzy comprehensive evaluation

3.1 数据来源

根据国家空气质量监测标准以及该城市 2013 年环境质量公报公布的统计数据(表 1),利用建立的模糊综合评判系统,建立影响大气环境质量的评价因子与评价等级之间的模糊关系,求得模糊关系矩阵,并利用模糊矩阵复合运算综合求得各区县空气质量等级隶属度,根据最大隶属度原则,对评价区域进行综合评价。

表 1 2013 年山东某城市各区县大气污染物浓度值

Tab. 1 The atmospheric pollutant density in each district of a city in Shandong for the year 2013 mg/m³

评价区域	污染物浓度值(年均值)			
	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
A 区	0.127	0.196	0.172	0.059
B 区	0.106	0.160	0.129	0.068
C 区	0.103	0.156	0.130	0.058
D 区	0.103	0.162	0.098	0.063
E 区	0.118	0.166	0.133	0.067
F 区	0.120	0.193	0.144	0.068

注:数据来源于该城市 2013 年环境状况公报。

将各区县四种污染物年平均浓度代入式(3)(4)(5)中,即可得到 PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ 相对于空气质量级别 I 级、II 级、III 级、IV 级的隶属度,进而求得模糊关系矩阵,经计算,各区县模糊关系矩阵如下:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_2^1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.35 & 0.65 \\ 0 & 0 & 0.54 & 0.46 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0.525 & 0.475 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_2^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.6125 & 0.3875 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.275 & 0.725 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_2^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.65 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0.94 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.75 \\ 0 & 0.55 & 0.45 & 0 \end{pmatrix}, \\
 \mathbf{R}_2^4 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.65 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0.88 & 0.12 \\ 0 & 0.05 & 0.95 & 0 \\ 0 & 0.425 & 0.575 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_2^5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.4625 & 0.5375 \\ 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0.175 & 0.825 \\ 0 & 0.325 & 0.675 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_2^6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.4375 & 0.5625 \\ 0 & 0 & 0.57 & 0.43 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

3.2 结果分析

根据表 1 中的数据以及上述建立的评价系统,利用 MATLAB 编程实现对城市空气质量模糊综合评判,确定了 2013 年该市各区县污染物因子的权重值(表 2)和综合评价结果(表 3)。

表 2 各区域污染因素的权重

Tab. 2 The weights for all pollutants in each district

评价区域	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
A 区	0.210 145	0.198 058	0.394 294	0.197 503
B 区	0.214 310	0.316 454	0.238 002	0.231 234
C 区	0.216 019	0.338 956	0.240 903	0.204 122
D 区	0.202 400	0.279 246	0.325 380	0.192 974
E 区	0.209 572	0.285 053	0.277 809	0.227 565
F 区	0.196 591	0.197 151	0.388 788	0.217 470

表 3 按区域划分综合评价结果

Tab. 3 The evaluation result for all districts

评价区域	评价等级				所属级别
	I 级	II 级	III 级	IV 级	
A 区	0	0.103 689	0.274 316	0.621 995	IV 级
B 区	0	0.069 370	0.643 388	0.287 242	III 级
C 区	0	0.112 267	0.611 111	0.276 622	III 级
D 区	0	0.098 283	0.797 368	0.104 349	III 级
E 区	0	0.073 959	0.538 595	0.387 446	III 级
F 区	0	0.065 241	0.350 614	0.584 145	IV 级

根据以上得到的各评价区域的模糊关系矩阵和各区域每种污染物因子权重矩阵,同样利用熵值赋权方法,将表 3 中的数据作为评价整个城市大气环境状况的关系矩阵 R_2 ,最后利用复合运算得到该城市的综合评价矩阵 b_3 ,即 $b_3 = w_2 \cdot R_2 = [0, 0.087 3, 0.546 9, 0.365 8]$,按照最大隶属度原则,该城市大气环境总体状况属于 III 级,即轻度污染。从表中权重结果可以看出,2013 年该城市的主要污染物为 SO₂,其次为 PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂,并且 A 区 SO₂ 污染最为严重,其次为 F 区, D 区,而 C 区, B 区, E 区主要污染物为 PM₁₀,且 PM₁₀ 污染最严重的是 C 区。

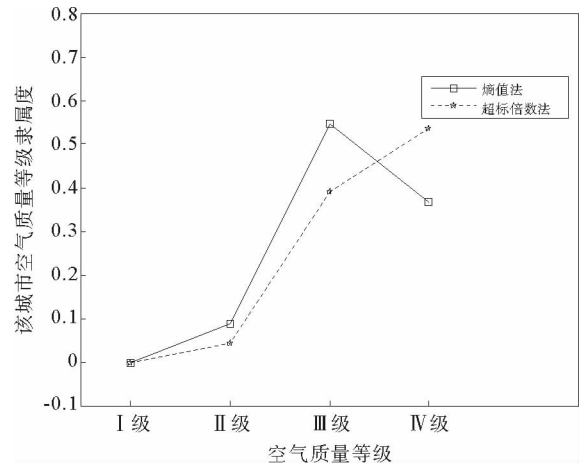
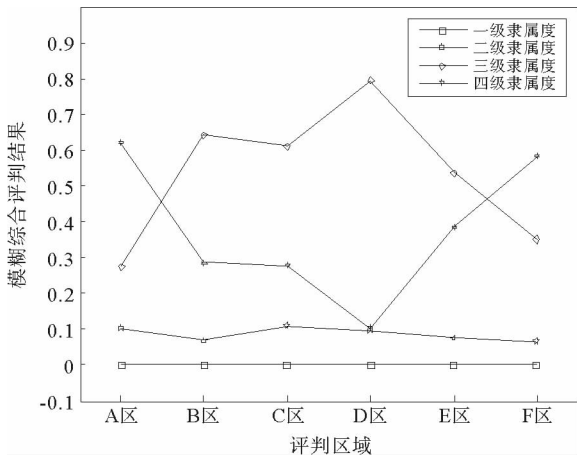


图 3 该城市 2013 年各区县空气质量综合评判结果

Fig. 3 The evaluation results for all districts in 2013

图 4 总体评判结果对比

Fig. 4 Comparison of results of two methods

为了能直观地看出各评价区域所属大气环境质量级别,根据表 3 绘制出了利用模糊综合评判法求得的评价结果(图 3),从图中可以看出,在评价期间,该市总体空气质量属于轻度污染,但 A 区, F 区空气污染较严重,而两地区的主要污染物为 SO_2 ,说明这两地区的燃煤污染较严重,这正与该地区的多处燃煤电厂的运转有较大关系,工业生产脱硫措施还需加强。该城市以重工业为主,钢铁、焦化、水泥以及建陶行业产生的粉尘等使得大气中 PM_{10} 浓度较高,对于 $PM_{2.5}$ 浓度较低,说明了强化机动车污染防治可起到很大作用。 NO_2 相对于 SO_2 , PM_{10} 权重较小,说明了若要改善该市大气环境质量,还需从转换工业能源结构,转变经济增长方式方面做出更加切实可行的工作。

利用超标倍数赋权法对该城市空气质量进行模糊综合评判,将实验结果与基于熵值法的模糊综合评判法进行对比,如表 4 所示。从结果可以看出,两种方法对各区县的评判结果基本是吻合的,但使用超标倍数法得到的 D 区和 E 区评价等级偏高,导致该城市总体评价结果偏高,如图 4。

表 4 两种方法的实验结果对比

Tab. 4 The results of assessment by two methods

评价区域	评价结果						该城市
	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区	
熵值赋权法	IV	III	III	III	III	IV	III
超标倍数赋权法	IV	III	III	IV	IV	IV	IV

这是由于超标倍数赋权法确定权重值与污染物浓度有关,污染物浓度超标时会导致权重过高,而在熵值法中这一现象得到了显著缓解,能够全面的考虑所有评价因子的影响,使实验结果能对环境的预测提供准确的信息。

4 结论

本文出于对大气环境评价分级模糊性与不确定性的考虑,建立隶属度函数,将熵值运用到模糊综合评判法求权重中,由于权重的求得并非直接与污染物浓度有关,避免了主观因素的影响,并建立多级模糊综合评判系统,从而能够客观综合的评价城市总体大气环境质量状况。

基于熵值的多级模糊综合评判法不仅可以运用于评价空气质量状况,也可用在具有评价等级的如水质、噪声质量的评价中。

参考文献:

[1]CHIT M W, HAK K L, HILDA T, et al. Satellite-Based Estimates of Long-Term Exposure to Fine Particles and Association with Mortality in Elderly Hong Kong Residents[J]. Environ Health Perspect, 2015, 123: 1167-1172.

[2]马建华. 层次分析法在大气环境质量综合评价中的应用[J]. 干旱环境监测, 1998, 12(3): 169-174.

MA Jianhua. Analytic hierarchy process (ahp) in the application of atmospheric environmental quality comprehensive evaluation[J]. Arid Environmental Monitoring, 1998, 12(3): 169-174.

[3]杨晓艳, 鲁红英. 基于模糊综合评判的城市环境空气质量评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(5): 143-146.

YANG Xiaoyan, LU Hongying. Evaluating ambient Air quality of Beijing by fuzzy comprehensive assessment method[J]. China Population and Environment, 2014(5): 143-146.

[4]ONKALENGIN G, IBRAHIM D, HALIL H. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(2): 3809-3815.

[5]GORAI A K, KANCHANB A, UPADHYA Y. An innovative approach for determination of air quality health index[J]. Science of the Total Environment, 2015, 533(6): 495-505.

[6]DIMITRIOU K, PASCHALIDOU A K, KASSOMENOS P A. Assessing air quality with regards to its effect on human health in the European Union through air quality indices. Ecological Indicators, 2013, 27(9): 108-115.

[7]PLAIA A, DI S F, RUGGIERI M, AGRO G. A Multisite-Multipollutant Air Quality Index[J]. Atmospheric Environment, 2013, 70(4): 387-391.

[8]中华人民共和国国家标准. GB3095—1996. 中华人民共和国环境空气质量标准[S].

[9]中华人民共和国国家标准. GB3095—2012. 中华人民共和国环境空气质量标准[S].

[10]宋晓秋. 模糊数学原理与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999: 20-51.