

厦门泉州大气污染的模糊聚类与综合评判*

费 仁 霖

(土木工程系)

摘要 利用模糊综合评判方法,对厦门、泉州两市大气在多污染因子共同影响下,造成污染的整体环境进行全面评价.方法简便、结论直观,避免了以往评价方法丢失模糊信息的缺点.

关键词 大气污染,模糊聚类,综合评判

0 引言

排入大气的污染物对大气环境的污染程度,随污染浓度的累积而加重;不同的污染因子对污染程度有不同的贡献.这里“程度”“贡献”的定义本身是“逐步过渡”,没有明确“边界”的模糊集合,不像普通集合的任一元素,属于该集合或不属于该集合,两者必居其一.以往人们处理污染问题,通常按预先规定的一个临界指标作为判据,使一些本来模糊的信息,人为地清晰化和丢失了模糊信息,因而不能准确、宏观地认识污染的真象.为了反映污染的模糊性,通常通过隶属函数作为桥梁将模糊性数量化,再利用传统的数学方法进行分析计算.本文应用模糊聚类和模糊综合评判的方法,将厦门市、泉州市1985—1989年大气监测的四类主要污染数据,进行环境聚类分析和模糊综合评判,提供一种区别大气污染程度与大气环境受多种污染因子综合影响时,污染现状的评价方法.评价结果可作为环境规划、污染防治的一种依据.

1 模糊聚类分析

把欲进行分类的对象,如文中的监测点、污染因子等作为样本.这些样本之间存在多元模糊关系,通过模糊等价关系变换,定量地确定各样本之间的亲疏关系,从而对样本进行科学分类,称为模糊聚类分析法.

本文1992-06-05收到.

• 福建省自然科学基金资助项目.

1.1 聚类样本的选择

把要分类对象的全体作为模糊样本,用 $U=\{I, I, \cdots, N\}$ 表示. 样本的数量化性质作为样本指标. 设有 n 个环境单元(大气监测点)每个单元的污染状况由该单元内的 m 个污染因子的含量来描述. 据国家规定,厦、泉环保部门设置固定监测点,对大气环境进行监测,每个监测点对不同的污染因子进行分项和定时监测. 根据1985—1989年两地的监测数据,经过筛选,取厦门市7个监测点、泉州市5个监测点作为聚类样本. 二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、总悬浮微粒(TSP)、降尘(DF)四种污染物的平均浓度值作为样本指标(表1),分别对两市的大气环境进行综合聚类分析.

1.2 无量纲化处理

为了便于对不同量纲的污染因子的样本指标进行分析比较,把各污染因子的样本指标进行无量纲化处理. 设污染因子平均浓度无量纲化值为 C' , 则 $C'=C_i/C_{i0}$, 式中, C_i 为某种污染因子的平均浓度值, C_{i0} 为某种污染因子的允许浓度标准值. 据国家大气环境质量标准(GB3095—82)规定,各测点按二类区执行二级标准, SO_2 、 NO_x 、 TSP 的允许浓度标准值分别为 $0.15mg/m^3$ 、 $0.10mg/m^3$ 、 $0.30mg/m^3$. 据工业企业设计卫生标准(TJ36—79),规定 DF 的允许浓度标准值按当地清洁对照区实测值加 $3\sim 5t/km^2\cdot月$, 确定取 $4t/km^2\cdot月$. 厦门市降尘清洁对照区为气象台, 则 $C_{i0}=5.64+4=9.63t/km^2\cdot月$. 泉州市降尘以清源山为实测清洁对照区, 则 $C_{i0}=3.97+4=7.97t/km^2\cdot月$. 两市聚类样本和样本指标无量纲化处理值见表1.

表1 厦泉1985至1989年各聚类样本大气污染物平均浓度处理值

市 别	m	聚类样本(监测点) n						
		I. 环保楼	II. 鼓浪屿	III. 火车站	IV. 中山路	V. 农科所	VI. 气象台	VII. 湖里
厦 门 市	1. SO_2	0.253	0.180	0.940	0.613	0.133	17.220	0.200
	2. NO_x	0.200	0.100	0.180	0.450	0.100	0.100	0.150
	3. TSP	0.467	0.403	1.323	0.930	0.400	0.530	0.867
	4. DF	0.893	0.573	1.796	0.887	0.791	0.585	0.980
泉 州 市	1. SO_2	0.173	0	0.187	0.473	0.547		
	2. NO_2	0.110	0.120	0.310	0.170	0.170		
	3. TSP	0.603	0.260	2.037	0.800	0.923		
	4. DF	0.836	0.496	0.569	0.678	0.894		

* 对于泉州市各聚类样本, I 为平水庙, II 为清源山, III 为汽车站, IV 为聚宝街, V 为涂门街.

1.3 标 定

把需要分类的样本在论域 U 上建立模糊等价关系 \tilde{R} 称为标定, 当 $U=\{I, I, \cdots, N\}$ 为有限集时, U 上的模糊子集 \tilde{R} 是一个模糊矩阵.

$$\tilde{R} = (r_{ij}), \quad i, j = 1, 2, \cdots, n, \tag{1}$$

式中, r_{ij} 为分类样本相似程度统计值, 表示论域内每个元素对模糊子集 \tilde{R} 的隶属度. r_{ij} 的计算公式很多, 可选择相似系数法中的算术平均最小公式计算, 得

$$r_{ij} = \frac{\sum \min(a_{ik}, a_{jk})}{\frac{1}{2} \sum (a_{ik}, a_{jk})}, \tag{2}$$

式中, a_{ik} 表示第 i 个样本(监测点)第 k 个污染指标的值, a_{jk} 表示第 j 个样本(监测点)第 k 个污染指标值.

由式(2)求出的 r_{ij} 值, 满足 $0 \leq r_{ij} \leq 1$. r_{ij} 值愈大表示 i, j 两个监测点的污染程度愈近似, 反之差异愈大. 当 $r_{ij} = 1$ 时表示 i, j 两测点污染程度相同, 为同一类. 对于厦门市, 有 $U = \{ I(0.253, 0.200, 0.467, 0.893), II(0.180, 0.100, 0.403, 0.573), III(0.940, 0.180, 1.323, 1.796), IV(0.613, 0.450, 0.930, 0.887), V(0.133, 0.100, 0.400, 0.791), VI(17.220, 0.100, 0.530, 0.585), VII(0.200, 0.150, 0.867, 0.980) \}$. $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, k = 1, 2, 3, 4$. 对于泉州市, 有 $U = \{ I(0.173, 0.110, 0.623, 0.836), II(0.000, 0.120, 0.260, 0.498), III(0.187, 0.310, 2.037, 0.569), IV(0.473, 0.170, 0.800, 0.678), V(0.547, 0.170, 0.923, 0.894) \}$. $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, k = 1, 2, 3, 4$.

将厦门、泉州论域 U 中的数据代入式(1)、式(2), 可分别求出厦、泉的模糊关系矩阵, 其中厦门市为

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.82 & 0.59 & 0.77 & 0.88 & 0.14 & 0.85 \\ 0.82 & 1 & 0.46 & 0.61 & 0.90 & 0.13 & 0.73 \\ 0.59 & 0.46 & 1 & 0.73 & 0.50 & 0.19 & 0.68 \\ 0.77 & 0.61 & 0.73 & 1 & 0.66 & 0.17 & 0.83 \\ 0.88 & 0.90 & 0.50 & 0.66 & 1 & 0.12 & 0.79 \\ 0.14 & 0.13 & 0.19 & 0.17 & 0.12 & 1 & 0.14 \\ 0.85 & 0.73 & 0.68 & 0.83 & 0.79 & 0.14 & 1 \end{bmatrix}$$

泉州市为

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.67 & 0.60 & 0.52 & 0.81 \\ 0.67 & 1 & 0.44 & 0.59 & 0.57 \\ 0.60 & 0.44 & 1 & 0.66 & 0.66 \\ 0.52 & 0.59 & 0.66 & 1 & 0.91 \\ 0.81 & 0.57 & 0.66 & 0.91 & 1 \end{bmatrix}$$

显然, 上述矩阵是实对称矩阵, 满足模糊等价关系的反身性($r_{ij} = 1$)、对称性($r_{ij} = r_{ji}$)要求, 但不满足传递性要求, 因此需用幂关系加以改造, 使之成为论域 U 上的模糊等价矩阵, 用 \tilde{R}^* 表示.

若在某一步有 $\tilde{R}^* = \tilde{R}^k \cdot \tilde{R}^k = \tilde{R}^k$, 则 \tilde{R}^* 便是模糊等价关系阵. $\tilde{R} \cdot \tilde{R} = \bigvee_{j=1}^n [r_{ik} \wedge r_{jk}]$, 式中 $i, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$. 厦门、泉州分别为下列上、下式

$$\tilde{R}^* = \tilde{R}^2 \cdot \tilde{R}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.82 & 0.73 & 0.83 & 0.88 & 0.19 & 0.85 \\ & 1 & 0.73 & 0.83 & 0.90 & 0.19 & 0.85 \\ & & 1 & 0.73 & 0.73 & 0.19 & 0.73 \\ & & & 1 & 0.83 & 0.19 & 0.83 \\ & & & & 1 & 0.19 & 0.85 \\ & & & & & 1 & 0.19 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}^* = \tilde{R}^2 \cdot \tilde{R}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.67 & 0.66 & 0.81 & 0.81 \\ & 1 & 0.66 & 0.67 & 0.67 \\ & & 1 & 0.66 & 0.66 \\ & & & 1 & 0.91 \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

1.4 决定置信水平 λ

由于模糊集 \tilde{R} 本身没有明确的范围,是通过隶属函数来定义并建立起相互联系的.因此,必须通过不同的置信水平 λ_i 将论域上的模糊集,分解为由水平截集 R_{λ_i} 组成的若干普通集合且任意 R_{λ_i} 与 \tilde{R} 都是普通等价关系.根据这种关系,便可把模糊集中各元素进行动态分类,即 $\tilde{R} = \bigcup_{\lambda_i \in [0,1]} R_{\lambda_i}$. 将求出的模糊等价矩阵 \tilde{R}^* 中各行最大矩阵元(主对角元除外)作为置信水平,可直接从 \tilde{R}^* 中求得 λ_i . 其中,厦门为 $\lambda_i = (0.90, 0.88, 0.85, 0.83, 0.73, 0.19)$,泉州为 $\lambda_i = (0.91, 0.81, 0.67, 0.66)$.

1.5 作聚类图

水平截集 R_{λ_i} 的特征函数,为 $r_{ij} = 1, r_{ij} \geq \lambda_i$, 或 $r_{ij} = 0, r_{ij} < \lambda_i$. 将不同的 λ_i 值代入 \tilde{R}^* 得出系列新矩阵, R_{λ_i} 将新矩阵中相同的列合并为一类,就得到在置信水平 λ_i 上的分类.由于 $\lambda_i \in [0, 1]$, 当 λ_i 由1下降到0时,所分的类就由细变粗(相应的截集由窄变宽),形成一个动态分类样本的聚类图(图1.2).

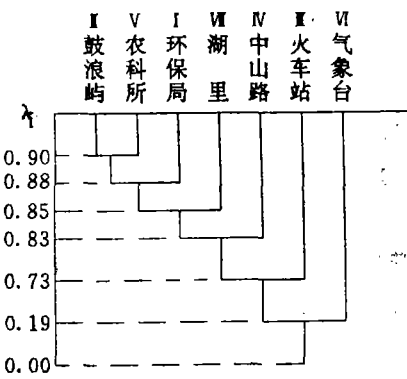


图1 厦门市大气污染监测点聚类图

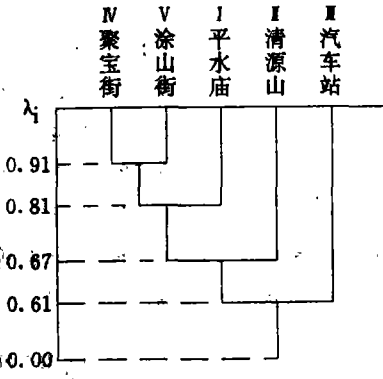


图2 泉州市大气污染监测点聚类图

据图1,2,按照分级标准,可得出厦门市、泉州市的大气污染区划图(图3,4).

1.6 以污染因子作聚类样本的模糊聚类

若以污染因子作为聚类样本,各监测点对应污染物平均浓度值作为指标,按上述1.1—1.5步骤计算即得以污染物为聚类样本的模糊等价矩阵,进而得出大气污染因子聚类图(图5,6). 厦门和泉州的模糊等价矩阵,分别于下列左右边

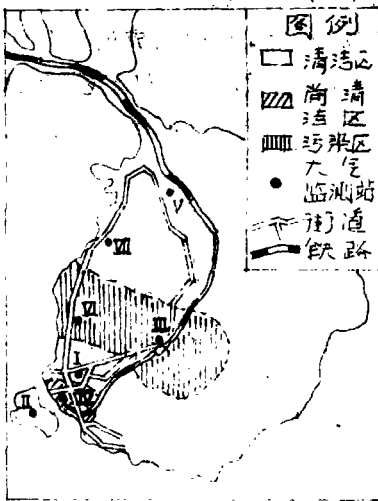


图3 厦门市大气污染区划图

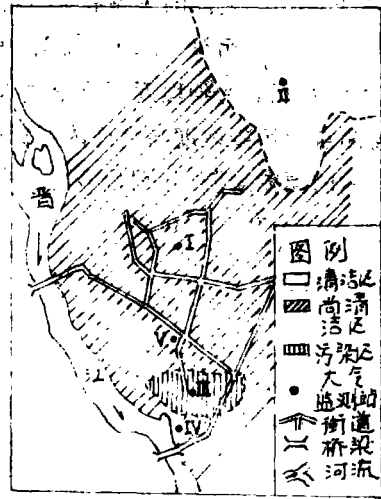


图4 泉州市大气污染区划图

$$\tilde{R}^* = \tilde{R} \cdot \tilde{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.23 & 0.23 & 0.23 \\ 0.23 & 1 & 0.41 & 0.41 \\ 0.23 & 0.41 & 1 & 0.85 \\ 0.23 & 0.41 & 0.85 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}^* = \tilde{R}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.56 & 0.57 & 0.57 \\ 0.56 & 1 & 0.56 & 0.56 \\ 0.57 & 0.56 & 1 & 0.74 \\ 0.57 & 0.56 & 0.74 & 1 \end{bmatrix}$$

上列左式的置信水平为 $\lambda_i = (0.85, 0.41, 0.23)$, 右式的置信水平为 $\lambda_i = (0.74, 0.57, 0.56)$

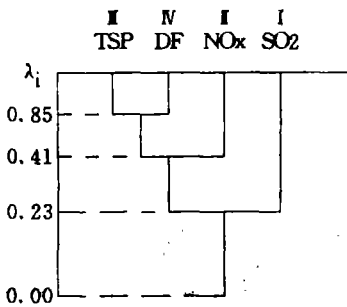


图5 厦门市污染因子聚类图

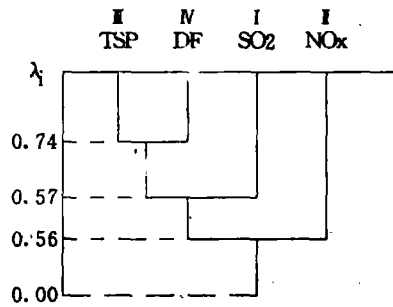


图6 泉州市污染因子聚类图

2 模糊综合评判

据对研究对象评判的需要,给定有限集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 导出从 U 到 V 的模糊关系 $\tilde{R} = (r_{ij})_{n \times m}$. V 上的模糊子集可表达成一个 n 维向量, $\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\sum a_i = 1$. 按模糊矩阵的复合运算进行模糊变换, $\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 式中 b_i 按 $M(\wedge, V)$ 模型运算, 即 $b_i = \bigvee_{j=1}^n (a_j \wedge r_{ij})$, 求出 \tilde{B} 并归一化后即可进行模糊综合评判.

选择 SO_2 、 NO_x 、 TSP 、 DF 四种污染物作为评判大气环境质量的因子, 按各因子的平均浓

度 C 与允许浓度 C_0 之间的关系将大气环境质量分成以下四等级, 即清洁 $0 \leq C < 0.5C_0$, 尚清洁 $0.5C_0 \leq C < C_0$, 污染 $C_0 \leq C < 2C_0$, 重污染 $C \geq 2C_0$. 这样, 污染因子构成论域 $U = \{SO_2, NO_x, TSP, DF\}$, 污染程度评价论域 $V = \{\text{清洁, 尚清洁, 污染, 重污染}\}$. 将上述等级标准和两市各监测点的污染浓度与允许浓度标准比较, 可求出厦门、泉州两市的四类污染物对大气污染程度评判的模糊矩阵, 分别为下列左式和右式

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.29 & 0 & 0.14 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0.43 & 0.43 & 0.14 & 0 \\ 0 & 0.86 & 0.41 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.20 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0.20 & 0.60 & 0 & 0.20 \\ 0.20 & 0.80 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

按相对污染浓度的大小, 赋予四类污染物以不同的权函数, $A_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} / \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n C_{ij})$, 则厦门为 $\tilde{A} = (0.61, 0.04, 0.15, 0.20)$, 泉州为 $\tilde{A} = (0.13, 0.08, 0.45, 0.34)$. 进行模糊变换

厦门为

$$\begin{aligned} \tilde{B} &= \tilde{A} \cdot \tilde{R} = (0.61, 0.04, 0.15, 0.20) \cdot \begin{bmatrix} 0.57 & 0.29 & 0 & 0.14 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0.43 & 0.43 & 0.14 & 0 \\ 0 & 0.86 & 0.41 & 0 \end{bmatrix} \\ &= (0.57, 0.29, 0.14, 0.14), \end{aligned}$$

泉州为

$$\begin{aligned} \tilde{B} &= \tilde{A} \cdot \tilde{R} = (0.13, 0.08, 0.45, 0.34) \cdot \begin{bmatrix} 0.80 & 0.20 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0.20 & 0.60 & 0 & 0.20 \\ 0.20 & 0.80 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= (0.20, 0.45, 0, 0.20). \end{aligned}$$

归一化后, 厦门为 $\tilde{B} = (0.50, 0.25, 0.125, 0.125)$, 泉州为 $\tilde{B} = (0.24, 0.52, 0, 0.24)$.

可以看出, 同时考虑四种污染因子对大气环境综合影响时, 厦门市清洁占比重最大 (0.50), 大气环境基本清洁; 泉州市尚清洁占的比重最大 (0.52), 大气环境尚清洁 (图3, 4).

3 比较与分析

现再分别用郡树声提出的“污染活度指数式”法 (下称指数法), 和全国环境评价专业委员会推荐的“大气监测评价方法” (下称评分法), 对厦门、泉州两市的大气环境质量进行评价, 以资对模糊综合评价方法进行比较分析.

3.1 指数法

公式为,

$$QI_j = q / \sum_{i=1}^m A_i p'_{ij} (j=1, 2, \dots, n). \quad \text{式中, } q \text{ 表示环境系数, 取常数 } q=1; A_i \text{ 表示污染因子分}$$

担率, $A_i = \frac{\sum_{j=1}^m p'_{ij}}{\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^m p'_{ij})}$; p'_{ij} 表示污染因子的分指数, $p'_{ij} = C'_{ij}/C_0$. 则 $C'_{ij} = C_{ij} - C_{\alpha}$, 表示污染因子校正浓度; C_{ij} 表示污染浓度实测值, C_0 表示污染因子允许浓度标准, C_{α} 表示污染因子大气背景值, 取 $C_{\alpha} = 0$.

分别将厦门泉州两市的数据代入上述公式, 计算结果如表2—4所示.

表2 厦门和泉州大气污染因子分担率 A_i (%)

市别	SO ₂	NO _x	TSP	DF	市别	SO ₂	NO _x	TSP	DF
厦 门	0.606	0.040	0.153	0.201	泉 州	0.133	0.085	0.446	0.336

表3 厦门大气环境质量指数(QI)

监测站名称	Ⅳ气象台	Ⅲ火车站	Ⅳ中山路	Ⅴ湖 里	Ⅰ环保局	Ⅴ农科所	Ⅰ鼓浪屿
大气质量指数 QI	0.802	0.877	1.408	2.189	2.426	3.283	3.449
污 染 类 别	重 污 染		污 染	尚 清 洁		清	洁

表4 泉州大气环境质量指数 QI

监测站名称	Ⅲ汽车站	Ⅴ涂山街	Ⅰ平水庙	Ⅳ聚宝街	Ⅰ清源山
大气质量指数 QI	0.863	1.251	1.303	1.512	3.413
污 染 类 别	重 污 染		污	染	清 洁

3.2 评分法

大气质量分级和评分标准如表5. 根据表5的分级和评分标准及厦门、泉州各污染因子平均浓度分别得出各测站的大气环境质量的评分如表6—8

表5 大气环境质量分级和评分表

污染因子	一级(清洁)		二级(尚清洁)		三级(污染)		四级(重污染)		五级(严重污染)	
	范围	评分	范围	评分	范围	评分	范围	评分	范围	评分
SO ₂	≤0.05	25	≤0.15	20	≤0.25	15	≤0.50	10	>0.50	5
NO _x	≤0.05	25	≤0.10	20	≤0.20	15	≤0.40	10	>0.40	5
TSP	≤0.20	25	≤0.30	20	≤0.50	15	≤1.00	10	>1.00	5
DF	≤7.68	25	≤11.46	20	≤18.64	15	≤38.16	10	>38.16	5

表6 厦门泉州大气污染因子评分

厦	SO ₂	NO _x	TSP	DF	泉	SO ₂	NO _x	TSP	DF
门	130	175	155	150	州	115	125	100	125

表7 厦门大气环境质量评分

项 目	Ⅳ 气象台	Ⅲ 火车站	Ⅱ 中山路	Ⅰ 湖 里	Ⅰ 环保局	Ⅴ 农科所	Ⅰ 鼓浪屿	
评 分	80	80	85	90	95	100	100	
污染类别	污	染		尚	清	洁	清	洁

表8 泉州大气环境质量评分

项 目	Ⅲ 汽车站	Ⅳ 聚宝街	Ⅴ 涂山街	Ⅰ 平水庙	Ⅱ 清源山
评 分	85	90	90	100	100
污染类别		尚 清	洁	清	洁

3.3 比较分析

(1) 厦门市. 在聚类分析中, 显见(图3), 首先是气象台单独聚为一类, 其次是火车站又单独成为一类, 说明这两个监测点与其他监测点的污染水平差距较大. 在指数法中, 由表3可见其QI值分别为最小值(0.802)和次小值, 评分法中两测点的评分均为最小值(0.80). 三种方法均说明, 其污染程度相对于其他地区为大, 由厦门市大气污染因子聚类图(图5)可见, TSP 、 DF 对该市大气污染所作的贡献最类似, 而 SO_2 、 NO_x 所作贡献的差异最大, 其中 SO_2 的贡献最大, NO_x 的贡献最轻: 这与指数法和评分法的结论完全一致.

(2) 泉州市. 由图2可见, 首先单独聚类的测点是汽车站, 其次是清源山又单独成一类, 说明这两个测点与其他测点污染水平差距较大. 在表4中这两个测点的QI值为0.863和3.413, 分别为最小值和最大值, 在评分法中也分别为最小值(0.85)和最大值(100), 说明汽车站相对污染最重, 清源山相对污染最轻. 由图6可见, TSP 、 DF 对泉州市污染所作的贡献最相似, SO_2 、 NO_x 所作的贡献差异较大, 结合各污染因子的权系数可知各因子对污染的贡献以 TSP 最大, DF 其次, SO_2 较轻, NO_x 最小. 这与指数法的结论完全一致, 而与评分法不太一致, 这与评分法分类标准与聚类分析标准不尽一致和评分法丢失模糊信息所造成的影响有关.

由表2—8显见, A_i 、QI 和评分值是渐变的, 它们按数值大小的排列顺序基本一致, 说明这两类评判方法在反映大气污染程度和各污染因子对大气污染程度的贡献上是正确的, 可靠的. 但是这两类方法中分类的判据指标均是一个确定值. 同时, 往往出现以下情况, 评分值或指数值相差较大的测点, 即污染程度悬殊的测点被分在同一级别, 而指数值或评分值相差不大, 即污染程度相似的测点却属于不同污染级别. 本文所用的模糊聚类和模糊综合评判法, 上述情况在隶属度中得到了明确的定量反映.

杨伟同志帮助资料收集工作, 特此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 中国环境科学研究院主编, 大气环境质量标准, GB3095-82.
- [2] 黄光中、毛善培编著, 随机方法与模糊学应用, 同济大学出版社, (1987).
- [3] 卫生部等颁发, 工业企业设计卫生标准, TJ36-79.
- [4] 郑树声, 环境科学丛书, 9, 2 (1981).
- [5] 王华东等编, 环境质量评价, 北京师范大学环境研究所, (1981).

Fuzzy Cluster and Fuzzy Synthetic Evaluation of Atmospheric Pollution in Xiamen and Quanzhou

Fei Renlin

(Department of Civil Engineering)

Abstract By applying the method of fuzzy cluster and fuzzy synthetic evaluation, the atmospheric pollution of the whole surroundings of Xiamen and Quanzhou caused by multiple factors is evaluated comprehensively. As a handy method with directly perceived conclusion, this method avoids the drop-out of some fuzzy information is frequently occurs in traditional method.

Key words atmospheric pollution, fuzzy cluster, synthetic evaluation