

- [10] Shimizu, Y. et al., *Ibid.*, 103, 605(1981).
- [11] Evans, M. H., *Marine Pollution Bull.*, 1, 184 (1970).
- [12] Ghazarossian, V. E., et al., *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 59, 1219(1974).
- [13] Buckley, L. J., et al., In: LoCicero, V. R., ed., *Proc. 1st Int. Conf. on Toxic Dinoflagellate Blooms.*, Mass. Sci. Tech. Found., Wakefield, Mass, p. 423, 1975.
- [14] Buckley, L. J., et al., *J. Agri. Food. Chem.*, 24, 107(1976).
- [15] Shimizu, Y., et al., See also Ref 13, p. 275 (1975).
- [16] Shimizu, Y., et al., *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 66, 731(1975).
- [17] Shimizu, Y., et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 98, 5414 (1976).
- [18] Schantz, E. J., et al., *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 889(1978).
- [19] Wichman, C. E., Schantz, E. J., et al., *Tetrahedron. Lett.*, 22, 1941 (1981).
- [20] Noguchi, T., et al., *Nippon Kagaku Kaishi* 652 (1981).
- [21] Shimizu, Y., et al., *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 314 (1981).
- [22] Shimizu, Y., et al., *Tetrahedron. Lett.*, 23, 321 (1981).
- [23] Oshima, Y., Shimizu, Y., et al., *Comp. Biochem. Physiol.*, 57c, 31(1977).
- [24] Shimizu, Y., et al., *J. Agri. Food Chem.*, 26, 878 (1978).
- [25] Bates HA, et al., *J. Agri. Food Chem.*, 27, 217 (1975).
- [26] Noguchi, T., et al., *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, 47, 1277 (1981).
- [27] Onoue, Y., et al., *Ibid.*, 46, 1031 (1980).
- [28] Nishio, S., et al., *Ibid.*, 48, 959 (1982).
- [29] Harada, T., et al., *Agri. Biol. Chem.*, 46, 1861 (1982).
- [30] Harada, T., et al., *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, 48, 821(1982).
- [31] Alam, A. I., et al., *J. Phycol.*, 15, 106 (1979).
- [32] Kobayashi, M., Shimizu, Y., *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 827(1981).
- [33] Shimizu, Y., et al., *Ibid.*, 100, 6971(1978).
- [34] Hsu, C. P., Shimizu, Y., et al., *J. fish. Res. Board Can.*, 36, 32(1979).

## 试用模糊综合评判作 SO<sub>2</sub> 浓度预报

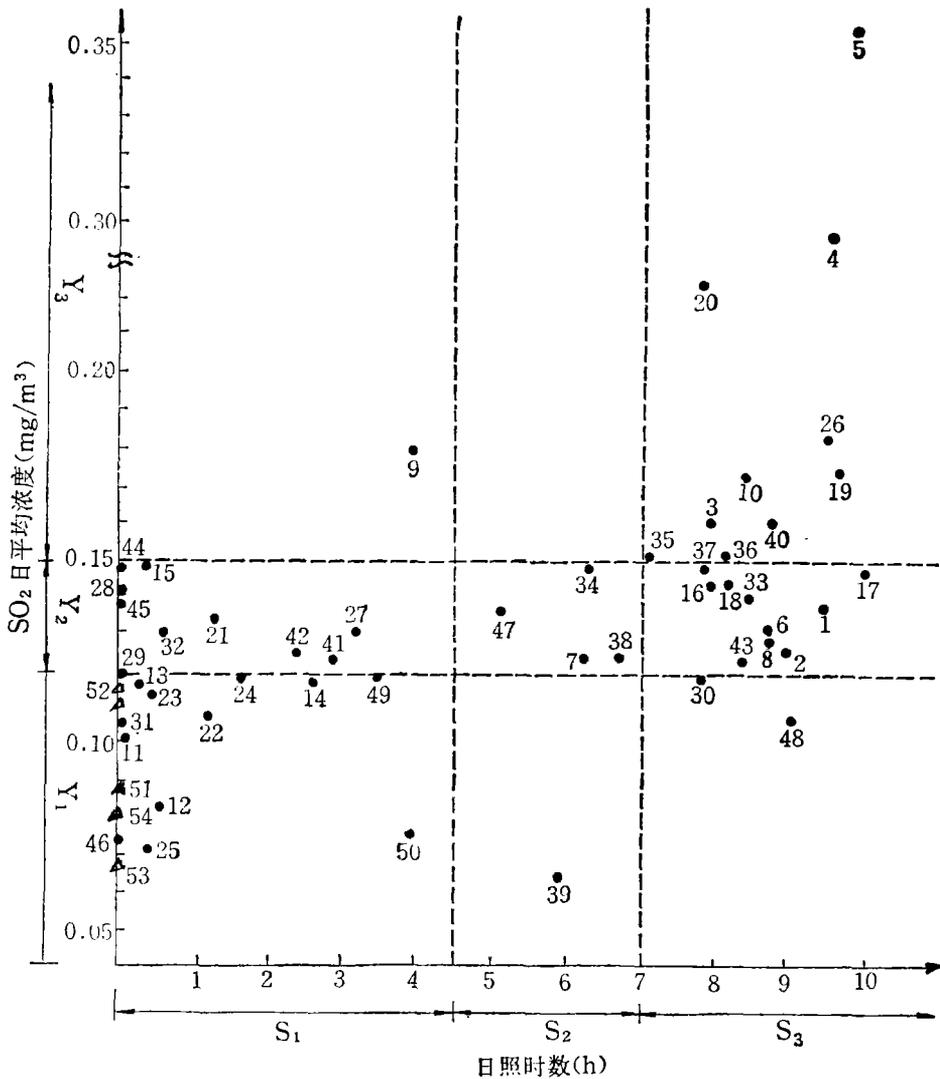
谢 垂 民

(广东省热带海洋气象研究所)

近年来,国内一些城市已先后开始大气污染预报的研究。而预报污染物浓度的高低及气象因子等级的划分,其界线是模糊的,即没有一个客观的严格的等级边界。如何寻求适当的数学语言来描述这种区间过渡的“不分明性”呢?精确性是经典数学的一大特点,但是对于模糊现象来说,过分地追求精确,反而会走向其反面。而一定程度的模糊,却容易得到接近客观的结论。本文借助模糊数学构造的综合评判模型,描述气象因子的模糊性及污染程度的模糊性两者之间的关系,对 SO<sub>2</sub> 日平均浓度作预报探讨,以期对开展城市污染预报有所帮助。

### 一、预报对象与预报因子的分级

大气中 SO<sub>2</sub> 浓度的扩散受气象条件制约。选择预报因子时,要求其物理意义清楚,有一定的相关性。经统计分析发现:广州市天河气象站的日照时数  $t$  (单位 h); 日最高温度与 20:00 干球温度之差  $\theta$  (单位 °C); 20:00 气压  $p$  (为简便起见,  $p$  取观测值减去 1000 mb 后之余值,单位 mb) 与第二天 SO<sub>2</sub> 日平均浓度的变化有较好的关系。图 1 为 SO<sub>2</sub> 日平均浓度与日照时数的相关图(其他图略),两者存在一定的正比关系。日照时数表征了一天中下垫面接收太阳辐射时间的长短,它对

图 1 日照时数  $t$  与  $SO_2$  日平均浓度  $Y$  相关图

边界层气象要素场的建立及其结构的变化起着重要的作用。一般来说，白天下垫面增温比低层空气快，夜间前者冷却也比后者快，往往容易形成辐射逆温。而日照时数长，所形成的逆温厚度及强度一般也大，因此不利  $SO_2$  浓度的扩散。日最高温度与 20:00 干球温度差反映了低层空气冷却或增暖的程度、冷却幅度大，也有利于形成辐射逆温。而 20:00 气压可以反映出冷空气过境前后气压波动的情况，一般当冷高压出海后，本地处于变性高

压脊控制时，气压开始下降，风速变小，大气层结较稳定，水平和垂直扩散受到抑制，有利于  $SO_2$  浓度积累。本文选择上述三个气象要素作为预报因子，根据模糊变换运算的要求，划分预报因子的级别数应等于所选择的因子个数，因而将三个因子按经验分别划分为三级。一般每级内的点数不能太多也不能太少，以便所算的权重具有代表性。表 1 给出预报对象与预报因子的分级。

表 1 预报因子与预报对象分级表

级 别	要 素	预 报 因 子 ( 前 一 天 )		
	区 间	SO <sub>2</sub> 日平均浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	日照时数 (h)	$\theta_{最高} - \theta_{10}^{\circ}\text{C}$
高	$Y \geq 0.15$	$t \geq 7.0$	$\theta \geq 6.0$	$20.3 \leq p < 23$
中	$0.12 < Y < 0.15$	$4.5 < t < 7.0$	$4.0 < \theta < 6.0$	$16 < p < 20.3$
低	$Y \leq 0.12$	$t \leq 4.5$	$\theta \leq 4.0$	$p \leq 16, t \geq 23$

## 二、模糊综合评判的数学模型

隶属函数是描述模糊性的关键。在污染浓度预报中，各因子之间的相互关系的变化是模糊的，没有严格界限的，可以通过设计因子的隶属函数，以建立它们间的模糊关系  $X$ 。同样也可以建立预报因子与预报对象间的一种模糊关系  $R$ 。对于所选取的预报因子  $t, \theta, P$ ，预报对象  $Y$ ，而  $Y$  又分为  $Y_1, Y_2, Y_3$  三个等级，则诸因子间的模糊关系  $X$  是

$$t \times \theta \times p = B$$

空间中的一个模糊子集。因子与对象间的模糊关系  $R$  是  $B \times Y$  空间中的一个模糊子集。而预报对象各等级间的模糊关系  $A$  是  $Y_1 \times Y_2 \times Y_3$  空间中的一个模糊子集。因此  $X$  的隶属函数  $u_X$  可由模糊向量  $(u_{t_i}, u_{\theta_j}, u_{p_k})$  表示(其中  $i, j, k = 1, 2, 3$ )， $R$  的隶属函数  $u_R$  可由模糊矩阵表示：

$$\begin{matrix}
 & Y_1 & Y_2 & Y_3 \\
 t_i & (u_{t_i}(Y_1) & u_{t_i}(Y_2) & u_{t_i}(Y_3)) \\
 \theta_j & (u_{\theta_j}(Y_1) & u_{\theta_j}(Y_2) & u_{\theta_j}(Y_3)) \\
 p_k & (u_{p_k}(Y_1) & u_{p_k}(Y_2) & u_{p_k}(Y_3))
 \end{matrix}$$

显然，模糊向量的元素是因子集上三个因子对总体污染作用的权重；模糊矩阵中的行元素是因子集上单因素对不同浓度级别的模糊评判；而列元素则是因子集上三个因子对同一浓度级别的模糊评判。

如果把模糊向量  $X$  看成是输入，模糊矩阵  $R$  作为变换器，则  $A$  就是输出。 $R$  和  $X$  的合成关系  $A$ ： $X \circ R = A$ ，式中“ $\circ$ ”表示合成

运算，这种合成运算与线性代数中普通矩阵的乘法相似，所不同的是并非先两项相乘后相加，而是相乘取其小值，相加取大值。相乘、相加分别用交并算子“ $\wedge$ ”、“ $\vee$ ”来表示，即满足： $a \wedge b = \min(a, b)$ ， $a \vee b = \max(a, b)$ 。故  $A$  的隶属函数可写成：

$$\begin{aligned}
 u_A &= (u_{Y_1}, u_{Y_2}, u_{Y_3}) = u_X \circ u_R \\
 &= \vee (u_X \wedge u_R).
 \end{aligned}$$

例如对于模糊向量  $u_X$  和模糊矩阵  $u_R$ ，当  $i = 1, j = 1, k = 1$ ， $u_X$  和  $u_R$  的合成成为：

$$\begin{aligned}
 u_X \circ u_R &= (u_{t_1}, u_{\theta_1}, u_{p_1}) \\
 &\circ \begin{pmatrix} u_{t_1}(Y_1) & u_{t_1}(Y_2) & u_{t_1}(Y_3) \\ u_{\theta_1}(Y_1) & u_{\theta_1}(Y_2) & u_{\theta_1}(Y_3) \\ u_{p_1}(Y_1) & u_{p_1}(Y_2) & u_{p_1}(Y_3) \end{pmatrix} \\
 &= ((u_{t_1} \wedge u_{t_1}(Y_1)) \vee (u_{\theta_1} \wedge u_{\theta_1}(Y_1)) \\
 &\vee (u_{p_1} \wedge u_{p_1}(Y_1)), (u_{t_1} \wedge u_{t_1}(Y_2)) \\
 &\vee (u_{\theta_1} \wedge u_{\theta_1}(Y_2)) \vee (u_{p_1} \wedge u_{p_1}(Y_2)), \\
 &(u_{t_1} \wedge u_{t_1}(Y_3)) \vee (u_{\theta_1} \wedge u_{\theta_1}(Y_3)) \\
 &\vee (u_{p_1} \wedge u_{p_1}(Y_3)))
 \end{aligned}$$

这种综合评判的模糊数学模型在理论上已得到证明。

## 三、计算模糊向量 $u_X$ 与模糊矩阵 $u_R$ 的权重

上面叙述了  $u_X$  和  $u_R$  的模糊关系， $u_X$  中的元素是各因子区间所含样本数与总样本数的比值，它们分别表示各因子在  $u_X$  中的权重。而  $u_R$  中的元素则表示某一因子区间里某级预报对象所含样本数与该区间全部样本数的比值，即各级预报对象占某因子区间

表 2  $u_x$  与  $u_R$  的元素值

因 子	因子区间	$u_x$ 中 的 元 素		$u_R$ 中 的 元 素	
$t$	$t_1$	$ut_1$	0.46	$Y_1$	0.57
				$Y_2$	0.39
				$Y_3$	0.043
$t$	$t_2$	$ut_2$	0.10	$Y_1$	0.20
				$Y_2$	0.80
				$Y_3$	0
$t$	$t_3$	$ut_3$	0.44	$Y_1$	0.09
				$Y_2$	0.45
				$Y_3$	0.45
$\theta$	$\theta_1$	$u\theta_1$	0.46	$Y_1$	0.61
				$Y_2$	0.30
				$Y_3$	0.087
$\theta$	$\theta_2$	$u\theta_2$	0.32	$Y_1$	0.06
				$Y_2$	0.69
				$Y_3$	0.25
$\theta$	$\theta_3$	$u\theta_3$	0.22	$Y_1$	0.09
				$Y_2$	0.45
				$Y_3$	0.45
$p$	$p_1$	$up_1$	0.32	$Y_1$	0.69
				$Y_2$	0.13
				$Y_3$	0.19
$p$	$p_2$	$up_2$	0.48	$Y_1$	0.08
				$Y_2$	0.79
				$Y_3$	0.13
$p$	$p_3$	$up_3$	0.20	$Y_1$	0.30
				$Y_2$	0.20
				$Y_3$	0.50

的权重。显然所有的权重都在 0—1 之间任意取值。例如  $t_1$  区间所含样本为 23 (见图 1), 它与总样本数的比值:

$$ut_1 = 23/50 = 0.46,$$

即在  $t_1$  区间内样本对总样本的权重为 0.46, 其他类推。而在  $t_1$  区间里,  $Y_1$  所含的样本数为 13, 它与  $t_1$  的全部样本数之比

$$u_{t_1}(Y_1) = 13/23 = 0.57,$$

也即  $Y_1$  区间内样本对  $t_1$  全部样本之权重为 0.57, 其余亦然。这样就可以计算出所有的元素, 并列于表 2。

#### 四、使用方法及效果检验

模糊综合评判借助模糊变换原理, 考虑与被评判对象有关的诸因子在不同区间的权重, 然后对被评对象作出全面的评价。显然某个因子在区间的权重大些, 而另一个因子在区间的权重小些, 最终的评判则是个模糊择优的问题。例如 1983 年 1 月 19 日各因子的观测值分别为  $t = \infty h$ ,  $\theta = 4.0^\circ C$ ,  $p = 29.4mb$ , 查表 1 它们分别落在  $t_1$ 、 $\theta_1$ 、 $p_1$  区间里, 从表 2 可找到它们的权重分别是:

$u_{t_1} = 0.46, u_{\theta_1} = 0.46, u_{p_1} = 0.32,$

所构成的模糊子集  $X$  的隶属度为

$u_X = (u_{t_1}, u_{\theta_1}, u_{p_1}) = (0.46, 0.46, 0.32).$

同样从表 2 中也可对应找到模糊矩阵  $u_R$  的元素:

$(u_{t_1}(Y_1) \ u_{t_1}(Y_2) \ u_{t_1}(Y_3))$   
 $= (0.57 \ 0.39 \ 0.043)$   
 $(u_{\theta_1}(Y_1) \ u_{\theta_1}(Y_2) \ u_{\theta_1}(Y_3))$

$= (0.61 \ 0.30 \ 0.087)$

$(u_{p_1}(Y_1) \ u_{p_1}(Y_2) \ u_{p_1}(Y_3))$

$= (0.69 \ 0.13 \ 0.19)$

因此组成模糊子集  $R$  的隶属度为:

$u_R = \begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.69 & 0.13 & 0.19 \end{pmatrix}$

则

表 3 样本资料及回报检验

样本 编号	年月日	因 子			年月日	对 象			样本 编号	年月日	因 子			年月日	对 象		
		$t$	$\theta$	$p$		$Y$	隶 属 度	拟 合			$t$	$\theta$	$p$		$Y$	隶 属 度	拟 合
1	76.12 6	9.6	4.7	17.7	76.12 7	0.136	0.48	✓	26	79.11 19	9.5	1.2	21.4	79.11 20	0.183	0.46	×
2	7	8.9	4.8	20.2	8	0.125	0.48	✓	27	20	3.2	5.3	17.9	21	0.131	0.48	✓
3	8	7.9	4.2	25.2	9	0.160	0.44	✓	28	21	0.0	5.0	18.5	22	0.139	0.48	✓
4	9	9.5	5.4	21.6	10	0.298	0.44	✓	29	22	0.0	2.6	24.4	23	0.120	0.46	✓
5	10	9.8	8.0	20.4	11	0.355	0.44	✓	30	23	7.8	2.8	23.3	24	0.118	0.46	✓
6	77.11 21	8.7	6.7	17.3	77.11 22	0.132	0.48	✓	31	80.1 21	0.0	3.8	22.8	80.1 22	0.108	0.46	✓
7	22	6.2	7.9	19.5	23	0.123	0.48	✓	32	22	0.6	1.8	20.0	23	0.131	0.48	✓
8	23	8.7	8.4	18.5	24	0.128	0.48	✓	33	23	8.2	5.2	18.0	24	0.140	0.48	✓
9	24	3.9	7.0	17.1	25	0.180	0.48	×	34	24	6.3	6.4	16.9	25	0.148	0.48	✓
10	25	8.4	8.5	15.1	26	0.173	0.44	✓	35	25	7.0	4.8	13.7	26	0.150	0.44	✓
11	78.2 20	0.0	1.8	23.0	78.2 21	0.104	0.46	✓	36	80.12 30	8.1	6.7	21.1	80.12 31	0.152	0.44	✓
12	21	0.5	3.6	22.2	22	0.083	0.46	✓	37	31	7.8	7.6	17.8	81.1 1	0.148	0.48	✓
13	22	0.0	3.9	24.3	23	0.113	0.46	✓	38	81.1 1	6.7	4.1	16.7	2	0.124	0.48	✓
14	23	2.6	2.6	23.6	24	0.117	0.46	✓	39	2	5.9	4.0	21.4	3	0.064	0.46	✓
15	24	0.3	3.1	23.1	25	0.149	0.46	×	40	3	8.7	6.0	20.9	4	0.160	0.44	✓
16	78.11 20	7.9	4.4	18.5	78.11 21	0.143	0.48	✓	41	82.1 3	2.9	3.3	16.9	82.1 4	0.122	0.48	✓
17	21	10.0	5.3	17.5	22	0.146	0.48	✓	42	4	2.4	4.5	20.2	5	0.125	0.48	✓
18	22	8.4	4.2	17.3	23	0.143	0.48	✓	43	5	8.4	5.7	19.0	6	0.122	0.48	✓
19	23	9.6	3.9	18.4	24	0.174	0.48	×	44	6	0.0	3.1	21.6	7	0.142	0.46	×
20	24	7.8	5.4	17.7	25	0.225	0.48	×	45	7	0.0	3.4	22.8	8	0.143	0.46	×
21	79.2 19	1.4	3.4	10.0	79.2 20	0.135	0.46	×	46	82.11 16	0.0	3.1	18.8	82.11 17	0.075	0.48	×
22	20	1.2	1.9	5.4	21	0.108	0.46	✓	47	19	5.1	3.8	18.7	20	0.137	0.48	✓
23	21	0.0	1.2	2.9	22	0.114	0.46	✓	48	20	9.0	6.5	16.2	21	0.107	0.48	×
24	22	1.6	3.8	3.5	23	0.119	0.46	✓	49	21	3.5	3.3	15.5	22	0.120	0.46	✓
25	23	0.0	3.1	5.8	24	0.072	0.46	✓	50	22	3.9	5.8	15.8	23	0.076	0.46	✓

表 4 试报检验

1983年 1月	因子值			$u_{\Sigma}$ 值	$u_R$ 值	$u_A$ 值	试报	实况	评定
	$t$	$\theta$	$p$						
18日	0.0	2.7	18.7	(0.46, 0.46, 0.48)	$\begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.08 & 0.79 & 0.13 \end{pmatrix}$	(0.46, 0.48, 0.13)	中	0.086	×
20日	0.0	4.0	29.4	(0.46, 0.46, 0.32)	$\begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.69 & 0.13 & 0.19 \end{pmatrix}$	(0.46, 0.39, 0.19)	低	0.112	✓
21日	0.0	1.1	28.1	(0.46, 0.46, 0.32)	$\begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.69 & 0.13 & 0.19 \end{pmatrix}$	(0.46, 0.39, 0.19)	低	0.07	✓
22日	0.0	3.7	32.8	(0.46, 0.46, 0.32)	$\begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.69 & 0.13 & 0.19 \end{pmatrix}$	(0.46, 0.39, 0.19)	低	0.08	✓
23日	0.0	2.8	30.8	(0.46, 0.46, 0.32)	$\begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.69 & 0.13 & 0.19 \end{pmatrix}$	(0.46, 0.39, 0.19)	低	0.109	✓

$$\begin{aligned}
 u_A &= u_{\Sigma} \circ u_R = (0.46, 0.46, 0.32) \circ \begin{pmatrix} 0.57 & 0.39 & 0.043 \\ 0.61 & 0.30 & 0.087 \\ 0.69 & 0.13 & 0.19 \end{pmatrix} \\
 &= ((0.46 \wedge 0.57) \vee (0.46 \wedge 0.61) \vee (0.32 \wedge 0.69), \\
 &\quad (0.46 \wedge 0.39) \vee (0.46 \wedge 0.30) \vee (0.32 \wedge 0.13), \\
 &\quad (0.46 \wedge 0.043) \vee (0.46 \wedge 0.087) \vee (0.32 \wedge 0.19)) \\
 &= ((0.46 \vee 0.46 \vee 0.32), (0.39 \vee 0.30 \vee 0.13), (0.043 \vee 0.087 \vee 0.19)) \\
 &= (0.46, 0.39, 0.19)
 \end{aligned}$$

即“低”浓度的权重为 0.46，“中”浓度的权重为 0.39，“高”浓度的权重为 0.19，由于 0.49 比 0.39 与 0.19 都大，因此报 1983 年 1 月 20 日  $\text{SO}_2$  日平均浓度落在  $Y_1$  区间，亦即浓度为“低”，这与实况相符。用 1976—1982 年共 50 个样本进行回报检验，拟合率达到  $40/50 = 80\%$  (见表 3)。

本方法对 1983 年广州市第一季度大气监测期 (1 月 18 日、20 日、21 日、22 日、23 日) 连续进行效果检验，除 18 日报浓度为“中”，而实测为“低”以外，其余 4 天预报浓度为“低”均与实测一致 (见表 4)。准确率为  $4/5$ 。

## 五、结 语

本文以模糊集合论为基础，用隶属度来描述  $\text{SO}_2$  污染程度的模糊性以及影响浓度变化的气象条件的模糊性，通过模糊变换，综合了诸因子及因子区间的模糊信息，最后的评判是诸因子共同影响而作出的较为全面的结论。因此历史拟合率及试报准确率较高。它比其他统计模型更具有使用方便、结论直观的优点。但本方法试报年限还短，另外要开展整个城市的污染预报并提高准确率，还有待于进一步深入研究。