经验交流

三维联合风频表的模式计算研究

易　海　涛

（冶金部建筑研究总院环保所）

摘要　污染物长期平均浓度计算公式中的重要参数之一三维联合风频表 F_{ijk} 一直是通过对大量原始的风向，风速和云量观测资料进行联合分类统计而得到的．本文在"风速，云量，太阳高度角相互独立"的基本假定下，设计了一个气候学模式，利用风向，风速，云量等的长期统计结果，来计算这个三维联合风频表．并结合实例对模式各部分的误差作了分析．

在污染气象的研究中，三维联合风频表系指风向，风速，大气稳定度的三维联合频率表．这个三维联合频率表在污染物的平均浓度计算中是必不可少的．

平均浓度公式的一般形式为：

$$\bar{x} = \sum_{ijk} F_{ijk} \cdot x_{ijk} \qquad (1)$$

式中 $\bar{x}$ 为平均浓度；x_{ijk} 为 j 风速，i 风向，k 稳定度时的浓度；F_{ijk} 为联合出现频率．

这里 F_{ijk} 即是所谓的三维联合风频表．实际工作中，一般将风向分为 16 个方位加静风，风速分 5 个区间，稳定度分为 6 类．

要使（1）式能用于实际计算，必须先得到 F_{ijk}．因为要求是长期平均（至少 3—5 年）的风向，风速、稳定度联合频率，故需收集大量的原始观测数据进行统计分类，所以数据量大，工作量大，费用高．

本文的目的就是试图寻求一种方法，通过对风向、风速、云量等整编气候资料的分析来求取 F_{ijk}，使得 F_{ijk} 既能代表实际统计得到的长期平均值又能大大节省工作量．

一、模式构想

为了叙述分析的方便，先将国家标准GB3840-83中有关大气稳定度划分的两个表略加修饰列于文中．

表 2 中 b^k_{ij} 表示稳定度 k，风速区间 i、辐射强度 j 时的频率．不失一般性，我们分析一下表 2 中稳定度 A 的分布：

$$P_A = P_{1A} + P_{2A} \qquad (2)$$

$$(P_{1A} = b^A_{11} + b^A_{12},\ P_{2A} = b^A_{21})$$

可知 A 稳定度落在两个风速区间 v_1 和 v_2 上．无疑每个风速区间都包含了所有风向的贡献．也就是说，P_{1A}、P_{2A} 是分布在所有风向上相应于风速区间 v_1 和 v_2 的区间内．假定稳定度同风向的关系主要表现在不同风向下风速不同从而稳定度不同，而与风向本身出现的频率无关；那么可以认为：在所

表 1　各级云量-太阳高度角时的辐射强度频率

云量级	太阳高度角	夜间	$15°\geqslant h$	$15°<h\leqslant 35°$	$35°<h\leqslant 65°$	$h>65°$
	频率	$\rho_1(h_1)$	$\rho_1(h_2)$	$\rho_1(h_3)$	$\rho_1(h_4)$	$\rho_1(h_5)$
≤4/≤4	$\rho_2(n_1)$	$a_{11}-2$	$a_{12}-1$	$a_{13}+1$	$a_{14}+2$	$a_{15}+3$
5—7/≤4	$\rho_2(n_2)$	$a_{21}-1$	$a_{22}0$	$a_{23}+1$	$a_{24}+2$	$a_{25}+3$
≥8/≤4	$\rho_2(n_3)$	$a_{31}-1$	$a_{32}0$	$a_{33}0$	$a_{34}+1$	$a_{35}+1$
≥5/5—7	$\rho_2(n_4)$	$a_{41}0$	$a_{42}0$	$a_{43}0$	$a_{44}0$	$a_{45}+1$
≥8/≥8	$\rho_2(n_5)$	$a_{51}0$	$a_{52}0$	$a_{53}0$	$a_{54}0$	$a_{55}0$

表 2　各风速段-辐射强度时的频率

风速	辐射强度	+3	+2	+1	0	−1	−2
	频率	$\rho_4(s_1)$	$\rho_4(s_2)$	$\rho_4(s_3)$	$\rho_4(s_4)$	$\rho_4(s_5)$	$\rho_4(s_6)$
$v_1 \leqslant 1.9$	$\rho_3(v_1)$	b_{11} A	b_{12} A	b_{13} B	b_{14} D	b_{15} E	b_{16} F
$1.9 < v_2 \leqslant 3$	$\rho_3(v_2)$	b_{21} A	b_{22} B	b_{23} C	b_{24} D	b_{25} E	b_{26} F
$3 < v_3 \leqslant 5$	$\rho_3(v_3)$	b_{31} B	b_{32} B	b_{33} C	b_{34} D	b_{35} D	b_{36} E
$5 < v_4 < 6$	$\rho_3(v_4)$	b_{41} C	b_{42} C	b_{43} D	b_{44} D	b_{45} D	b_{46} D
$v_5 \geqslant 6$	$\rho_3(v_5)$	b_{51} C	b_{52} D	b_{53} D	b_{54} D	b_{55} D	b_{56} D

有的区间 v_i 内，各风向下 P_{ik} 出现的频率是按各风向出现的频率来分布的.

令 U_{ij} 为按 j (列)归一的风向 i 风速段 j 的联合频率，则

$$P_{jA} = P_{jA} \sum_i U_{ij} = \sum_i P_{jA} U_{ij}$$

这里 P_{jA} U_{ij} 即是稳定度 A 时，风向 i、风速在区间 j 的三维联合频率 F_{ijA}. 同理可推得所有的 F_{ijk}，即

$$F_{ijk} = P_{jk} U_{ij} \qquad (3)$$

剩下的问题是如何得到表 2 和 U_{ij}.

二、模　式

按国标 GB3840-83，大气稳定度的划分用到三个变量、太阳高度角、云量和风速. 这实际上是以这三个变量将所考虑的时刻进行条件分类，然后统计出条件频率分布.

以 P 表示稳定度概率密度函数. P 是三事件之积.

$$P = P(h, n, v) \qquad (4)$$

式中 h 为太阳高度角；n 为云量；v 为风速.

作列联表独立性检验，不难发现，在很高的置信水平上 ($\alpha = 0.05$)，太阳高度与云量，云量与风速可以认为是相互独立的. 由于风速往往有日变化，太阳高度与风速有弱相关. 故可作基本假定：太阳高度、风速、云量相互独立. 则

$$P = P(h, n, v) = \rho_1(h)\rho_2(n)\rho_3(v) \qquad (5)$$

这样就可以分别统计处理云量，太阳高度和风速来得到大气稳定度频率，即得到表 2. 这比用这三个要素作条件分类划分要省事得多.

对于 U_{ij} 则用韦伯 (Weibull) 分布来估计. 对此已有许多研究和应用. 各风向之风速也可用该分布来估计.

据此，可列出模式计算的程序框图(见图 1).

对图 1 中各子模式分述详介如下：

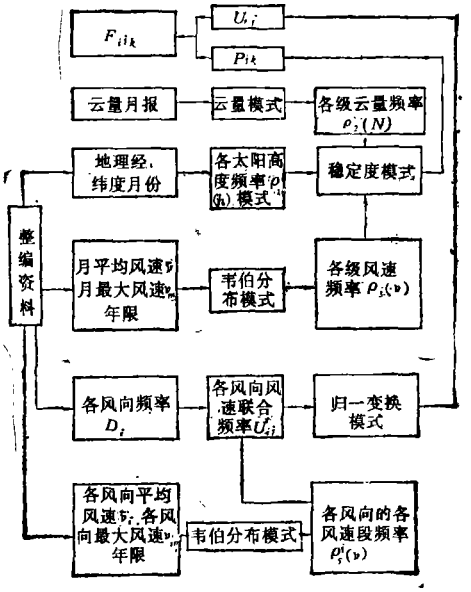

图 1　P_{ijk} 的模式计算程序框图

1. 太阳高度角模式

$$\sin h = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos(15t - 300 + \lambda) \qquad (6)$$

式中 h 为太阳高度角；λ 为地理经度；ϕ 为地理纬度；t 为北京时；δ 为太阳赤纬.

每日的太阳赤纬都可查表，但为了模式计算的方便不查表更好.

$$\sin\delta = \sin\varepsilon \sin\gamma \qquad (7)$$

这里 ε 为黄赤交角，为 23°27′；γ 为太阳黄经，一年中从 0—360° 均匀变化，0 度在春分点上. 这样某日的太阳赤纬为：

$$\delta = \sin^{-1}(0.398 \sin(0.9863m)) \qquad (8)$$

式中 m 为该日距春分日的天数. 从这里就可得到表 1 中各太阳高度角的频率 $\rho_1(h)$.

2. 韦伯分布模式

风速 v 的韦伯分布概率密度函数为：

$$q(v)=\frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1}\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (9)$$

与(9)式等价的累积概率函数为：

$$Q(v)=\int_0^{v}q(v)\mathrm{d}v=1-\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (10)$$

有多种方法可以估计参数 k, c. 其中最简单实用的是用最大风速和平均风速来估计. 最大风速和平均风速是国家气象部门整编资料中的规定项目.

$$k=\ln(\ln T)/\ln\frac{0.9v_{\max}}{\bar{v}} \quad (11)$$

$$c=\bar{v}/0.9 \quad (12)$$

式中 k 为形状参数，是无因次量；c 为尺度参数，以速度为量纲，T 为观测时期总长度；$v_{\max}$ 为 T 时期内观测到的最大风速；$\bar{v}$ 为 T 时期内平均风速，视 $v_{\max}$ 取自记或定时观测，T 取值不同. 如取 10 年一月份自记的 $v_{\max}$，则

$$T=10\times31\times24\times60/10$$

若取同期定时观测的 $v_{\max}$，则

$$T=10\times31\times4\times2/2$$

对各风向来说，以上两式的右边需再乘上相应风向的频率 D_i；$v_{\max}$, $\bar{v}$, 改为各风向的最大风速和平均风速 $v^i_{\max}$, $\bar{v}^i$.

顺便指出，$v_{\max}$, $\bar{v}$, $\bar{v}^i_{\max}$, $\bar{v}^i$ 取自的平均代越长越好，这可提高模式计算的准确性，但并不增加工作量.

参数 k、c 确定后，

$$\rho_3(v_j)=Q(v_B)-Q(v_A) \quad (13)$$

v_B, v_A 为 j 风速段的上下界风速，

还可以计算各风速段的平均风速.

$$\bar{v}_j=\left[\int_{v_A}^{v_B}vq(v)\mathrm{d}v\right]\Big/\rho_3(v_j) \quad (14)$$

3.云量估计模式

气象月报上有较具体的云量统计资料，范围是：

云量分级　0—2　3—7　8—10

总云量频率　Z_1　Z_2　Z_3

低云量频率　L_1　L_2　L_3

这里所要求的云量分级是(总/低)

≤4/≤4　5—7/≤4　≥8/≤4　≥5/5—7　≥8/≥8

$\rho_1(n_1)$　$\rho_2(n_2)$　$\rho_2(n_3)$　$\rho_2(n_4)$　$\rho_2(n_5)$

如果总云量大于等于低云量，这个分级可稍作简化：

总≤4　5—7/≤4　≥8/≤4　低：5—7　低≥8

因而得出：

$$\rho_2(n_5)=L_3 \quad (15)$$

再假定云量在 3—7 中均匀分布，即 3—7 中≥4的占 $\frac{2}{5}$，5—7 的占 $\frac{3}{5}$，则：

$$\rho_2(n_1)=Z_1-\frac{2}{5}Z_2 \quad (16)$$

$$\rho_2(n_4)=\frac{3}{5}L_2 \quad (17)$$

由于 $\rho_2(n_4)$ 的另一个必要条件是：总云量≥5，可假定，5—7，8—10 的云量各占其一半，则：

$$\rho_2(n_2)=\frac{3}{5}Z_2-\frac{1}{2}\rho_2(n_4) \quad (18)$$

$$\rho_2(n_3)=100-\rho_2(n_1)-\rho_2(n_2)-\rho_2(n_4)-\rho_2(n_5) \quad (19)$$

4.稳定度模式

从上面三个子模式中已经求得了 $\rho_1(h)$、$\rho_2(n)$、$\rho_3(v)$，据(5)式即可求得稳定度频率.

据表 1

$$a^s_{ij}=\rho_1(h_j)\rho_2(n_i) \quad (20)$$

$$\rho_4(s_s)=\sum_{ij}a^s_{ij} \quad (21)$$

据表 2

$$b^k_{ji}=\rho_3(v_j)\rho_4(s_i) \quad (22)$$

$$P_{jk}=\sum_i b^k_{ji} \quad (23)$$

$$P_k=\sum_{ij}b^k_{ji} \quad (24)$$

从表 2 还可求得各稳定度时平均风速

$$\bar{u}_k=\sum_j\bar{v}_jP_{jk}\Big/\sum_j P_{jk} \quad (25)$$

5.归一变换模式

以 D_i 表示 i 风向的频率，$\rho^i_5(v)$ 表示 i 风向下的风速分布. $\rho^i_5(v)$ 可从韦伯分布中求出：

令　　$u'_{ij}=D_i\rho^i_5(v_j)$ (26)

按 j (列)作归一化，

$$u_{ij}=u'_{ij}\Big/\sum_i u'_{ij} \quad (27)$$

6.误差分析

由前面的分析可知，计算 F_{ijk} 的模式是由 5 个子模式构成的. 那么模式计算的 F_{ijk} 与实际统计得到的 F_{ijk} 误差如何，无疑根源于这些子模式对各项数据进行处理分析时产生的误差. 理论上很难对这些误差进行分析描述，这里用实例来说明误差情况.

(1) 在太阳高度角计算时做了几个合理的规定：①一天中太阳赤纬不变；②一年有 365 整天；③每年 2 月都是 28 天；④每年春分日都是 3 月 21 日等，这些规定产生的误差微乎其微.

(2) 云量估计产生的误差情况见表 3.

表 3　云量估计误差(百分频率)

城市	迁安 1 月(10年)	迁安 7 月(10年)	合肥 1 月(5 年)	合肥 7 月(5 年)
最大误差	1.2	2.5	0.6	2.0
平均误差	0.7	1.3	0.4	1.1

表 4　三地计算与统计的各风速段频率(%)比较

站　名	月份	1		4		7		10	
	分级 (m/s)	统计值	计算值	统计值	计算值	统计值	计算值	统计值	计算值
包头	$v\leqslant 1.9$	40.8	50.9	28.4	34.5	45.4	56.4	49.3	56.7
	$1.9<v\leqslant 3$	19.2	18.1	17.5	16.7	23.4	17.4	21.6	14.6
	$3<v\leqslant 5$	22.8	19.8	25.6	24.1	22.9	17.6	17.5	16.0
	$5<v<6$	5.9	4.7	8.4	7.7	4.6	3.8	4.4	4.3
	$v\geqslant 6$	8.3	6.5	19.6	17.0	4.0	4.8	6.3	8.5
西宁	$v\leqslant 1.9$	79.5	81.4	52.8	53.9	57.0	68.2	69.7	71.7
	$1.9<v\leqslant 3$	12.4	11.0	26.9	18.9	27.6	15.7	20.5	15.5
	$3<v\leqslant 5$	8.1	6.4	14.4	19.0	14.3	14.4	9.2	10.9
	$5<v<6$	0.5	0.7	2.5	4.0	0.8	0.2	0.5	1.5
	$v\geqslant 6$		0.5	3.3	4.3	0.8	1.7	0.5	1.0
承德	$v<0.3$	47.3	31.0			45.9	26.3		
	$v<1.5$	79.0	80			79.0	81.0		
	$v\geqslant 5.0$	1.7	1.0			0.3	0.2		
承钢电二站	$v<0.3$	1.5	6.0	2.3	1.9	7.9	10.8	4.5	8.5
	$v<1.5$	45.0	47.0	35.0	36.0	69.6	70.0	66.0	64.0
	$v\geqslant 5.0$	4.2	4.6	10.0	7.2	1.1	1.2	1.9	2.0
承钢环保所	$v<0.3$	9.6	7.6	9.8	5.0	16.5	16.6	21.5	13.3
	$v<1.5$	60.0	58.0	38.0	41.0	71.0	76.0	74.0	73.3
	$v\geqslant 5.0$	6.0	3.8	12.0	12.1	1.2	0.6	1.8	1.7

注：包头的结果为 5 年平均，西宁为 6 年平均，承德三站为 1984 年 10 月及 1985 年 1.4.7 月.

表 3 中最大误差指 5 个云量分级中估计频率与实际频率的最大误差. 可见云量估计的误差很小，而且各级云量估计的误差对稳定度估计所产生的误差不是累积的，因为从表 1 中看到，一个云量级内包含有几个辐射等级.

(3) 在风荷载的研究中，很早就应用韦伯分布了. 韦伯分布的参数容易估计，且参数随高和平均风速都有较规律的变化. 随形状参数 k 取值不同，分布函数有不同的形状，k 越大，分布的偏度系数越低. $k=1$ 时为指数分布；k 取 3.5 时，韦伯分布实际已很接近正态分布. 所以韦伯分布能描述各种类型的风速分布，近年来得到了更为广泛的应用.

表 4 列出用韦伯分布拟合的包头，西宁，承德等地的风速分布. 从表中看到，拟合的风速频率与实际频率很接近.

同云量一样各级风速估计的误差对稳定度估计所产生的误差也不是累积的. 因为表 2 中各风速段包含有几个稳定度类.

(4) 综合上述各项误差分析以及由式(4)过渡到式(5)所产生的误差，估计用模式计算得到的稳定度与实际统计结果相比，误差不会太大，是能满足环保工作要求的，表 5 充分说明了这一点.

(5) 归一变换会改变风向频率 D_i. 这种改变可从对 F_{ijk} 的分析中看到.

对实际统计的 F_{ijk} 有：$\sum_{jk} F_{ijk} = D_i$

而对计算的 F_{ijk} 有：$\sum_{jk} F_{ijk} = D'_i$

令 $\varepsilon = \frac{1}{17}\sum_{i}^{17} \max\left(\frac{D'_i}{D_i}, \frac{D_i}{D'_i}\right)$

表 5　计算与统计的稳定度频率及平均风速的误差比较

稳定度类	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
包头稳定度估计均方差(%)	1.3	2.5	3.2	3.6	1.8	2.1
贵溪稳定度估计均方差(%)	0.7	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4
西宁稳定度估计均方差(%)	0.8	0.7	0.7	1.4	3.5	3.8
包头平均风速估计均方差 (m/s)	0.14	0.48	0.27	0.31	0.14	0.07

表 6　西宁计算值与统计值的比较

风向 \ 风速 (m/s)	$v\leqslant 1.9$		2—2.9		3—4.9		5—5.9		$\geqslant 6$	
N	20	30	13	12	8	14	2	2	3	2
NNE	13	12	3	6	4	5	2	0	1	0
NE	8	10	0	2	1	2	0	0	0	0
ENE	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0
E	5	5	1	2	0	1	1	0	0	0
ESE	5	4	4	2	2	4	0	1	2	1
SE	13	10	6	6	16	10	1	3	3	4
SSE	13	8	4	7	13	10	3	1	1	0
S	20	18	21	15	20	21	0	3	1	1
SSW	9	15	21	12	29	23	2	5	1	5
SW	13	14	10	9	7	9	1	0	0	0
WSW	8	7	2	2	1	1	0	0	0	0
W	12	7	0	3	0	4	1	1	2	1
WNW	5	6	1	2	3	2	0	0	0	0
NW	9	16	1	3	0	1	1	0	0	0
NNW	12	15	5	8	9	9	2	2	3	1
C	78	63	0	0	0	0	0	0	0	0

注：表中左为计算值右为统计值以千分频率表示.

我们计算过承德、本溪、迁安三地一月份的 ε，分别为 1.15，1.04，1.16 其他月份和年的 ε 均不超过 1.20.

综上所述，用本模式计算稳定度频率及其平均风速，误差不大，其结果是可以接受的. 限于真正多年平均统计的 F_{ijk} 不易得到，还没有足够的例子说明所有统计与计算得到的 F_{ijk} 的误差情况. 表 6 是西宁莫家泉湾 6 年平均统计与计算得到的年平均 D 类稳定度时的 F_{ijD}. 从表中看到计算结果与统计结果符合很好.

三、小　结

上述详细的误差比较分析表明. F_{ijk} 的计算模式的设计和使用是成功的. 使用本模式我们计算过承德、迁安、合钢、鞍钢等地的三维联合风频表. 实践证明：用模式计算 F_{ijk} 比用统计方法大大减少了工作量，节省了机时，降低了费用. 以计算全年12个月的 F_{ijk} 论，用普通 IBM 微机，十分钟即可完成.

另外由于使用整编气候资料，计算得到的 F_{ijk} 能代表长期平均值，稳定性好，而且整编资料系统可靠，容易获得. 1990 年开始，国家气象系统将开始 40 年资料整编，这将更有利于我们这方面的工作.

（收稿日期：1989 年 9 月 19 日）