

若干烟云抬升公式的对比分析^{*}

沈觉成 曹文俊 吴 曦

提 要

本文根据南京大厂地区大气污染源资料和现场实测气象资料,对国内外常用的一些烟云抬升公式计算了各种气象条件组合下的抬升高度。并与部分实测烟云资料进行对比分析。结果表明:近几年流行的布里格斯(Briggs, G. A.)公式有过高估计,霍兰德(Holland, J. Z.)公式、莫塞斯(Moses, H.)公式、康凯夫(CONCAWE)^{**}公式和卢卡斯(Lucass, D. H.)公式的计算值与实测值相比都存在着不同程度的偏离,致使应用时受到一定的限制。1984年由建环部给出的GB式除稳定度D类外,计算的烟云抬升高度比较符合实际。

应用大气扩散模式估算高架连续点源对地面大气污染浓度的影响时,烟气抬升高度的确定是必不可少的。但由于其影响因子比较复杂,野外试验、风洞模拟也有许多困难,故现行发表的数十个烟云抬升公式中还没有一个通用的式子。目前各国和我国使用的式子也不尽相同,且计算结果相差甚大。应该注意到,烟云抬升高度对大气扩散模式的重要性可与大气扩散参数相当^[1]。所以选取相对合理的烟云抬升计算式便成为模式计算可靠性的重要问题之一。

1984年,我们承担了扬子石化公司乙烯工程(位于南京市大厂区)的大气环境质量预评价工作,主要评价对象为乙烯工程的自备电厂。近几年有关电厂设计(包括电厂烟囱高度设计)中的烟云抬升高度计算,我国电力部建设总局明确规定采用布里格斯公式。1984年建环部又提出了另一组计算式作为国家标准^{***}。究竟采用哪式为好?我们根据南京热电厂等五个大气污染源资料,运用常见的几种烟云抬升公式进行了各种气象条件组合下的计算。同时与电厂烟云实测资料进行比较分析,得到了一些初步结果。从而为大气环境质量评价提供一定参考。现场实测气象资料有:低空测温、小球测风、过江铁塔塔层风和临时气象站地面气象观测记录。实测烟云抬升高度用照相法。

1985年6月7日收到,10月5日收到修改稿

^{*} 参加本文工作的还有1984届毕业生薛美莲、周工齐和扬子石化公司环境处庄秀棠、杨颖等

^{**} CONCAWE为Conservation of Clean Air and Water, Western Europe的缩写

^{***} 城乡建设环境保护部(GB3840—83),制定地方大气污染物排放标准的技术原则和方法,1984

一、常用的烟云抬升公式

目前国内外常用的烟云抬升公式有^{[2][3]}

1. 布里格斯公式

1) 稳定层结 ($\frac{\partial\theta}{\partial z} > 0$)

(1) 静风时

$$\Delta H = 5(F^2/S^3)^{1/8} \quad (1)$$

式中 ΔH 为烟云抬升高度(米); F 和 S 分别为浮力通量参数和大气稳定度参数, 表示式为

$$F = gV_e \frac{d^2}{4} \left(\frac{T_e - T_a}{T_a} \right) \quad (2)$$

$$S = \frac{g}{T_a} \frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (3)$$

上式中 g 为重力加速度(米/秒²); V_e 为排放口烟气升速(米/秒); d 为排放口内直径(米); T_e 、 T_a 分别为烟气温度和排放高度处的环境气温(K); $\partial\theta/\partial z$ 为气温随高度的变率(摄氏度/米)。

(2) 有风时

$$\Delta H = \begin{cases} 1.6 F^{1/3} X^{2/3} / \bar{u} & \text{当 } X < X_F \text{ 时} \\ 2.4 [F / (\bar{u} s)]^{1/3} & \text{当 } X \geq X_F \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $X_F = \pi \bar{u} / \sqrt{s}$; X 为离源下风距离(米); \bar{u} 为排放口处的平均风速(米/秒); 其它符号同前。

2) 中性和不稳定 ($\frac{\partial\theta}{\partial z} \leq 0$)

$$\Delta H = \begin{cases} 1.6 F^{1/3} X^{2/3} / \bar{u} & \text{当 } X < 3.5 X^* \text{ 时} \\ 1.6 F^{1/3} (3.5 X^*)^{2/3} / \bar{u} & \text{当 } X \geq 3.5 X^* \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中 } X^* = \begin{cases} 14 F^{5/8} & \text{当 } F < 55 \text{ 时} \\ 34 F^{2/5} & \text{当 } F \geq 55 \text{ 时} \end{cases}$$

2. 霍兰德公式

$$\Delta H = 2(1.5 V_e d + 0.167 Q_h) / \bar{u} \quad (6)^{**}$$

式中 Q_h 为热释放率(千焦耳/秒)。由于该式估计偏低, 故在等式右边乘以2倍。

** 原公式中 Q_h 单位为千卡/秒, 现统一用法定计量单位, 故原式中的系数作了相应的改动, 下同

3. 莫塞斯公式

$$\Delta H = (C_1 V_s d + 2C_2 \sqrt{Q_h}) / \bar{u} \quad (7)$$

式中 C_1 、 C_2 为经验系数，其值如下

稳定度级*	A—B	C	D	E—F
C_1	3.5	2.0	0.4	-1.0
C_2	0.330	0.250	0.171	0.145

4. 康凯夫公式

$$\Delta H = 0.35 Q_h^{1/2} / \bar{u}^{3/4} \quad (8)$$

5. 卢卡斯公式

$$\Delta H = 34.33 Q_h^{1/4} / \bar{u} \quad (9)$$

(7)式至(9)式中 Q_h 的单位均为焦耳/秒。

6. 国家标准式(简称GB式)

1)当 $Q_h \geq 2093.4$ 千焦耳/秒， $\Delta T \geq 35^\circ\text{C}$ ，有

$$\Delta H = n_0 (1.19 Q_h)^{n_1} h_s^{n_2} / \bar{u} \quad (10)$$

$$Q_h = 353.8 \frac{\Delta T}{T_s} Q_v \quad (\text{千焦耳/秒}) \quad (11)$$

$$\Delta T = T_s - T_a$$

式中 Q_v 为实际排烟率(米³/秒)； n_0 、 n_1 、 n_2 为经验系数。根据南京大厂区的下垫面状况，参照国家标准，作如下取值：

Q_h (千焦耳/秒)	n_0	n_1	n_2
$Q_h \geq 20934$	2.2	1/3	2/3
$20934 > Q_h \geq 2093.4$	0.74	3/5	2/5

2)当 $Q_h < 2093.4$ 千焦耳/秒或 $\Delta T < 35^\circ\text{C}$ ，有

$$\Delta H = 2(1.5 V_s d + 0.167 Q_h) / \bar{u} \quad (12)$$

3)天气静稳时

$$\Delta H = 2.0 Q_h^{1/4} \left(\frac{d\theta}{dz} + 0.0098 \right)^{-3/8} \quad (13)$$

式中 $d\theta/dz$ 为排放高度以上的环境气温垂直变化率(摄氏度/米)。

二、计算结果与分析

表1和表2分别给出了计算抬升高度时的污染源有关参数和气象参数。源参数由南京市环科所提供，气象参数取自扬子乙烯环境影响报告书。

* 本文中的大气稳定度级别均用修改了的帕里斯—特纳方法(见文献[4] [5])，下面不再说明

表1 南京大厂区五个大气污染源的参数

源属单位	源序	h_s (米)	V_s (米/秒)	d (米)	T_s ($^{\circ}C$)	Q_h (千焦耳/秒)
南京热电厂	1	80	18.4	5.3	121	38498
	2	120	18.4	5.0	81	23693
南化公司	硫酸车间	3	67	12.7	70	2248
	动力车间	4	61	5.82	200	5681
	磷肥厂	5	62	10.0	70	1771

表2 不同稳定度的 ρ 值和温度垂直变化率

稳定度	A—B	C	D	E—F
ρ 值	0.15	0.19	0.26	0.38
γ ($^{\circ}C/100$ 米)	-1.8	-1.5	-1.0	1.5

根据上面两个表提供的数值,按前节给出的后五组烟云抬升公式,计算了四种风速等级(2、4、6、8米/秒)四类稳定度下的抬升高度,并分别与布里格斯公式的计算值比较。作为例子将结果列于表3。表3是当地面风速为4米/秒、地面气温为15.0 $^{\circ}C$ 时的

表3 布里格式抬升高度计算值与其它抬升高度之比值

源序	$K_1(\Delta HB/\Delta HH)$		$K_2(\Delta HB/\Delta HM)$				$K_3(\Delta HB/\Delta HC)$				$K_4(\Delta HB/\Delta HL)$				$K_5(\Delta HB/\Delta HG)$					
	A	C	E	A	C	D	E	A	C	D	E	A	C	D	E	A	C	D	E	
1	1.24	1.24	1.24	0.87	0.95	1.59	2.29	2.62	1.59	1.54	1.47	0.97	0.98	0.97	0.94	0.69	1.43	1.43	1.43	1.85
2	1.30	1.30	1.30	1.16	0.86	1.45	2.15	3.37	1.50	1.45	1.35	1.30	0.83	0.82	0.82	0.83	0.96	0.96	0.96	1.61
3	1.70	1.70	1.69	2.78	0.61	1.02	1.49	1.13	1.01	1.02	1.00	0.79	0.31	0.31	0.31	0.26	1.70	1.70	1.69	1.49
4	2.50	2.50	2.50	2.74	0.90	1.50	1.95	2.91	1.31	1.26	1.24	1.26	0.45	0.45	0.45	0.54	1.31	1.31	1.31	1.63
5	1.80	1.80	1.80	3.20	0.59	0.99	1.44	1.06	0.98	0.97	0.95	0.72	0.27	0.28	0.28	0.22	1.80	1.80	1.80	1.48

情况。对于其它风速等级,情况类似,故略。表中 ΔHB 、 ΔHH 、 ΔHM 、 ΔHC 、 ΔHL 和 ΔHG 依次为用布里格斯、霍兰德、莫塞斯、康凯夫、卢卡斯和国家标准GB式计算的烟云抬升高度; K_i 为抬升高度之比值; m 为稳定度级别。从表3可见,除卢卡斯公式以及个别稳定度和5号源(热释放率最小)外,按布里格斯式计算的烟云抬升高度几乎都大于其它公式的计算值。需指出的是在用霍兰德公式与布里格斯公式比较时,是以2倍的 ΔHH 求 K_1 值。但 K_1 值一般都大于1(仅1号源的E—F级例外)。这说明 ΔHB 比 ΔHH 明显偏高。 ΔHB 与GB式计算的 ΔHG 相比(见 K_5 一栏),大部分污染源的 ΔHB 也偏高31%至85%,仅2号源在非稳定条件下的 ΔHB 稍低于 ΔHG 值。可是在稳定(E—F级)时,各源的 ΔHB 值比 ΔHG 高48%至85%。

三、计算值与实测值的对比分析

利用1983年11月对南京热电厂的烟云照相资料与布里格斯的计算值点绘相关图(图1)。图1中 ΔHR 为实测烟云抬升高度。图中给出了9组样本,其中稳定性为C级的6组,A—B级、B—C级和E级各1组。由图可见,不稳定和稳定时大部分比实测值偏高。至于中性稳定度(D级)的情况可见图2。由图可见,在下风距离大约500米以远的距离, ΔHB 仍比实测值略大一些。表4给出了各种稳定度时 $\Delta HB/\Delta HR$ 的值随下风距离的变化。表中稳定度C、D级的比值分别取其样本数的平均值。从表4中可以看出,除中性(D级)在近源处(500米内)比值小于1外,各稳定度下的 ΔHB 值都高于实测值。

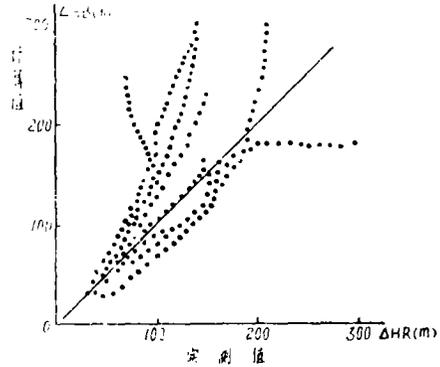


图1 烟云抬升高度计算值(ΔHB)与实测值(ΔHR)的相关
(实线为斜率等于1)

在大气扩散模式计算中,烟云最大抬升高度对地面浓度影响甚大。为此,我们又用各公式计

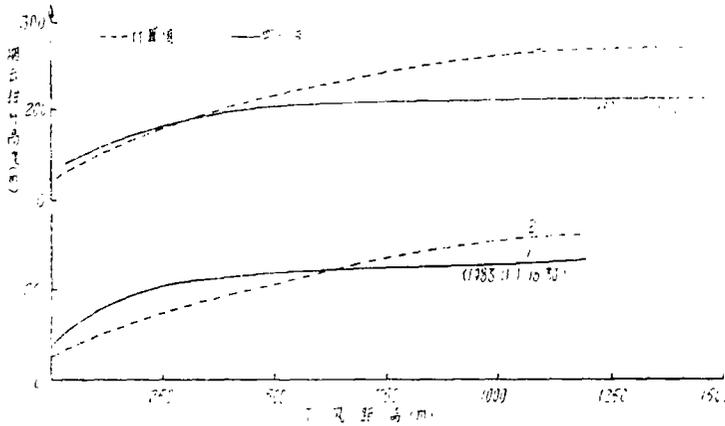


图2 D类稳定度时抬升高度随下风距离的变化(图中带撇号的为另一组气)

表4 各类稳定度时 $\Delta HB/\Delta HR$ 值随下风距离(X)的变化

X (百米)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	样本组数	
稳定度	A—B	1.31	1.60	1.76	1.86	1.98	2.02	1.70	—	—	—	—	1	
	B—C	1.39	1.46	1.43	1.26	1.28	1.36	1.31	—	—	—	—	1	
	C	0.94	1.02	1.09	1.16	1.24	1.35	1.50	1.60	1.73	2.20	—	—	6
	D	0.62	0.70	0.77	0.87	0.96	1.07	1.13	1.09	1.25	1.29	1.27	1.25	2
	E	1.15	1.30	1.27	1.31	1.34	1.36	1.42	1.46	1.51	1.59	—	—	1

注:表中 ΔHR 为热电厂烟云抬升高度实测值

算的最大抬升高度与实测值进行比较,结果列于表5。表中 K_B 为 ΔHB 与 ΔHR 之比。

表5 不同稳定度时,各式最大抬升高度与实测值之比

比 值	K_B	K_G	K_H	K_M	K_C	K_L	样本组数	
稳 定 度	A—B	2.29	1.18	0.91	1.65	0.45	1.40	1
	C	2.21	1.16	0.89	1.08	0.44	1.37	4
	D	1.21	0.65	0.50	0.61	0.25	0.53	2
	E	1.71	0.92	0.71	0.21	0.35	1.09	1

故 K_B 、 K_G 、 K_H 、 K_M 、 K_C 、 K_L 分别表示用布里格斯式、GB式、霍兰德式、莫塞斯式、康凯夫式和卢卡斯式计算的最大抬升高度与实测最大抬升高度之比值。另外,表中各式计算时气象参数均由同步实测气象参数提供。从表5可见,就最大抬升高度而言,布里格斯式的计算值比实测值大21%至129%。各稳定度相比,A—B级偏高最大,D级偏高最小。国家标准GB式在不稳定(A—B级和C级)时的计算值比实测值分别大18%和16%,中性时偏小35%,稳定(E级)时接近实测值。霍兰德公式和康凯夫公式的计算值在各类稳定度下均比实测值要小。莫塞斯公式在C级时接近实测值,但A—B级时计算值偏高65%,D级和E级分别偏低39%和79%。卢卡斯公式的计算值除中性时偏低外,其它稳定度时的计算值都有不同程度的偏高。

四、各抬升高度公式的评述

对布里格斯公式,除在中性条件下计算值略高于实测值外,其它稳定度时均有较大的偏高估计。这与文献[1]的结果一致。该文献通过对大量烟云资料的分析,认为 ΔHB 必须乘以0.8后与实测值的平均相对误差才能降到14%。布里格斯公式的一大优点是考虑了抬升高度随下风距离的变化。但是当按(4)式计算有风稳定大气的烟云抬升高度时,发现在 $X = X_F$ 处, ΔHB 存在明显的不连续,即抬升高度随下风距离不是增加而是有所下降。以扬子石化公司自备电厂的源参数为例,该源的浮力通量为 $286.9 \text{米}^4/\text{秒}^3$,该地稳定大气时的地面平均风速为3.1米/秒,位温梯度为 $1.04^\circ\text{C}/100\text{m}$,排放口气温为286.1 K。以上述数值代入(4)式进行计算,结果表明,在离源下风距离500米内, ΔHB 随 X 的增加逐渐增大, X 等于500米时, ΔHB 值为214米;但当 X 增加到516米时, ΔHB 值反而降为153米。显然,这种现象是不符合有风稳定大气中烟云的实际情况。当然布里格斯公式的这一不足是次要的,主要问题还是该式的计算值偏高甚多。因此,用它来预测高架源的地面浓度或电厂排放高度的设计,对保护大气环境是不利的。

对于城乡建设环境保护部颁发的GB式,其计算值(ΔHG)比布里格斯式的计算值要小。从最大抬升高度来看(见表5),与实测值偏离的程度也比布式要小。为了进一步比较这两个式子计算值与实测值的偏离程度,我们又用 $X = 1000$ 米处的实测烟云抬升高度与相同距离处的计算值进行比较,结果列于表6。表中的8组样本中,稳定度为C级的有6组,稳定度为D级的2组。由表6可见,布式计算的烟云抬升高度与实测值比值均大于1,

平均比值为1.57。GB式的比值虽有一定波动，但平均比值接近于1。这再次表明GB式比较接近实况。其次GB式根据不同热释放率以及烟气温度与环境气温之差来选取抬升

表6 两种计算值与实测值之比值

样本序号	1	2	3	4	5	6	7	8	平均	
比	$\Delta HG/\Delta HR$	0.96	0.84	1.48	1.48	0.74	0.72	0.65	1.58	1.06
值	$\Delta HB/\Delta HR$	1.66	1.57	1.23	1.20	1.36	1.56	1.50	2.50	1.57

高度计算式。我们认为这种设想是合理的。但是，GB式对中性层结(D级)时的抬升高度计算有某些偏低。因此，GB式还需对此作进一步的修正。

从表3和表5可以看出，卢卡斯公式的 ΔHL 计算值一般都大于其它五种抬升公式的计算值。与实测值相比，除D级外其它稳定度条件下的抬升高度均偏高。而霍兰德公式无论与其它各式相比，还是与实测值相比，其计算值都偏低。康凯夫公式计算值也明显偏低。莫塞斯公式在弱不稳定(C级)时与实测值比较符合(见表5)。这与文献[7]的结果相同。但在强不稳定(A—B级)时有过高估计，而在中性(D级)和稳定(E级)时又估计过低。

综上所述，各式相比，国家标准中的GB式考虑比较全面，与实测结果也较接近。在现有条件下作为高架点源的烟云抬升高度计算式是可取的。

五、几点初步看法

通过以上分析得到如下几点看法：

1. 与其它五种烟云抬升高度公式相比，国家标准中的GB式设计比较合理，与实测结果比较符合，但还需进一步完善。
2. 布里格斯公式在各类稳定度条件下的计算值都明显偏大，仅在D级时稍接近实测值。因此用它来作电厂的设计依据不利于保护大气环境。其次从抬升高度随下风距离变化的不连续性来看也失去了该式本身的特色。
3. 霍兰德公式和康凯夫公式的计算值普遍偏低，至少说用它们来估计电厂的抬升高度是不适宜的。
4. 莫塞斯公式和卢卡斯公式分别在稳定度C级和E级时接近实测值，但在其它稳定度条件下偏离实测值较大，因此使用中应慎重。

参 考 文 献

- [1] Merae, G., and Tilden, T.W., Plume Rise Modeling, American Meteorological Society, 677—382, 1980.
- [2] 王润鹿等, 实用污染气象学, 109—110, 气象出版社, 1982.
- [3] D.H. 斯莱德著, 张永兴等译, 气象学与原子能, 175页, 原子能出版社, 1979.
- [4] 祖铁林等, P值法及其有关因子, 大气湍流扩散及污染气象论文集, 15页, 气象出版社, 1982.
- [5] 沈觉成等, 大气稳定度分类的初步探讨, 气象科学, 1984, 2: 6—10.
- [6] Seinfeld, J.H., Air Pollution, 513, McGraw-Hill Book Company, 1975.
- [7] 沈觉成, 南京大厂地区二氧化硫浓度的常年分布, 南京气象学院学报, 1983, 2: 231—238.