



关于 Pasquill 估算大气扩散参数方法的适用性的研究

李 军

(中国科学院大气物理所)

一、前 言

在大气污染扩散模式中，最主要的是扩散参数的估算。Pasquill 在泰勒公式的基础上建立了一种实用的估算大气扩散参数的方法(以下简称 P 法)，并得到 Draxler 的进一步完善。实践证明，该法在平坦地形下有较好的适用性，得到美国气象学家的推荐。本文对 P 法在城郊复杂地形下的适用性进行了探讨，试图用估算大气扩散参数的方法来解决以上提出的问题。

二、扩散参数的估算

1. 基本公式

Pasquill 在泰勒公式的基础上提出了估算扩散参数的公式：

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_\theta \cdot x \cdot f_y(x) \\ \sigma_z &= \sigma_\varphi \cdot x \cdot f_z(x) \end{aligned} \quad (1)$$

公式(1)中的 σ_θ 、 σ_φ 分别为水平风向脉动和垂直风向脉动的标准偏差； x 为下风距离， $f(x)$ 是一个普适函数。对于高架源，Pasquill 在野外扩散实验的基础上总结出了 $f_y(x)$ 的函数形式：

$$\begin{aligned} f_y(x) &= \frac{1}{1 + 0.0308x^{0.4548}} & x \leq 1 \text{ 公里} \\ f_y(x) &= 0.333 \cdot \left(\frac{10000}{x}\right)^{0.5} & x > 1 \text{ 公里} \end{aligned} \quad (2)$$

Draxler^[2] 综合了若干次野外扩散实验资

料给出了更加完整的 $f(x)$ 函数形式：

$$\begin{aligned} f_y(x) &= \frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{x}{1000\bar{u}}\right)^{0.5}}, \\ f_z(x) &= \frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{x}{500\bar{u}}\right)^{0.5}}, \quad z/L \leq 0 \quad (3) \\ f_z(x) &= \frac{1}{1 + 0.945 \left(\frac{x}{100\bar{u}}\right)^{0.806}}, \quad z/L > 0 \end{aligned}$$

式中 x 为下风距离， \bar{u} 为平均风速。

2. σ_θ 和 σ_φ 的估算

σ_θ 和 σ_φ 除了可用双向风标测定外，还可用计算的方法获取。研究表明，它们与大气湍流度 $\frac{\sigma_{v,w}}{u_*}$ 存在下列关系：

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{\sigma_v}{u_*} \cdot \frac{u_*}{\bar{u}} \\ \sigma_\varphi &= \frac{\sigma_w}{u_*} \cdot \frac{u_*}{\bar{u}} \end{aligned}$$

式中 $\frac{u_*}{\bar{u}}$ 为无因次平均风速。由计算导出的 σ_θ 和 σ_φ 的好坏，取决于大气湍流度表达式对实际情况的逼近程度。对上海宝钢地区，我们综合分析了近年来边界层实验研究的结果，选取了下述表达式。

对于不稳定层结，取 Panofsky 等人^[3] 的研究结果：

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = \left(12 - 0.5 \frac{H}{L}\right)^{1/3}, \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 0.96 \left(2.5 - 7.5 \frac{z}{L}\right)^{1/3}, & \frac{z}{H} \leq 0.03 \\ 0.763 \left(\frac{z}{H}\right)^{0.175} \left(\frac{-H}{0.4L}\right)^{1/3}, & 0.03 < \frac{z}{H} < 0.4 \\ 0.722 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{0.207} \left(\frac{-H}{0.4L}\right)^{1/3}, & 0.4 < \frac{z}{H} \leq 0.96 \\ 0.37 \left(\frac{-H}{0.4L}\right)^{1/3}, & 0.96 < \frac{z}{H} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

对于中性层结,采用 Wyngaard^[4] 等人给出的表达式:

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 1.3 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

对于稳定层结, Hanna^[5] 建议用下列表达式:

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 1.3 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3 \left(1 - \frac{z}{H}\right)$$

3. 摩擦速度 u_* 的确定

根据相似理论,在地面边界层中摩擦速度 u_* 可由下式确定:

$$u_* = \frac{k \cdot u_r}{f(z_r)} \quad (8)$$

式中 u_r 表示参考高度 z_r 上的风速,这里用上海宝钢地面10米处的风速资料。 $f(z_r)$ 为一与大气稳定度,地面粗糙度有关的无因次函数,并取下列形式:

$$\text{中性层结: } f(z_r) = \ln \frac{z_r}{z_0}$$

稳定层结:

$$f(z_r) = \ln \frac{z_r}{z_0} + 5.2 \frac{z_r}{L}$$

不稳定层结:

$$f(z_r) = \ln \frac{z_r}{z_0} - 2 \ln \left(\frac{1+x}{2}\right) - \ln \left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2 \tan^{-1} x - \frac{\pi}{2}$$

其中 $x = \left(1 - 16 \frac{z_r}{L}\right)^{1/4}$; z_0 为地面粗糙度; L 为 Monin-obukhov 长度,单位为米。

4. Monin-obukhov 长度 L 的估算

1972 年 Golder^[6] 作图给出了 P-G 稳定度级对 L 的关系曲线,此后 Liu 等人^[7] 给出了拟合该曲线的数学公式。我们采用 Liu 等人给出的数学公式来估算 L 。公式如下:

$$\frac{1}{L} = a z_0^b \quad (9)$$

公式(9)中常数 a 和 b 是和大气稳定度有关的参数。表 1 给出了不同稳定度类下的 a 、 b 值。

表 1 不同稳定度下的 a 、 b 值

P-G 稳定度级	a	b
A	-0.0875	-0.1029
B	-0.03849	-0.1714
C	-0.00807	-0.3049
D	0	0
E	0.00807	-0.3049
F	0.03849	-0.1714

5. 地面粗糙度 z_0 的确定

地面粗糙度 z_0 我们根据人们常用的公式:

$$z_0 = \frac{\bar{H} \cdot a}{2 \bar{A}} \quad (10)$$

公式(10)中 \bar{H} 是侧向宽度范围内下垫面的有效高度, a 是垂直于风向的侧向宽度, \bar{A} 是地区面积,利用公式(10)求得上海宝钢地区的地面粗糙度值为 0.5 米。

三、计算值与实测值的比较

为了检验在城郊地形下用 P 法估算大气扩散参数的适用性,我们利用第二节中所述公式,和上海宝钢地区 1980 年至 1981 年冬季的常规气象观测资料,首先计算得到了不稳定、中性和稳定层结下的混合层高度、Monin-obukhov 长度和摩擦速度等参数,表 2 给出了这三种稳定层结下的参数值。为了与 SF₆ 示踪实验以及平衡球实验得到的扩散参数进行比较,仅选择了与之对应的三种稳定层结进行计算。

表 2 三种稳定层结下的参数值

参数	稳定度		
	不稳定层结	中性层结	稳定层结
混合层高度 H(m)	900	600	450
Monin-obukhov 长度 L(m)	-100	∞	100
摩擦速度 u* (m/sec)	0.66	0.53	0.40
地面粗糙度 z ₀ (m)	0.5		

用 P 法估算的大气扩散参数能否代表上海宝钢地区的实际扩散规律,取决于大气湍流度计算公式的选取和 f(x) 函数的合理性。以下分别对公式(1)中的 σ_θ、σ_φ 以及 f(x) 函数进行讨论。

表 3 给出了 σ_θ、σ_φ 的计算值与实测值的比较结果。结果表明:在不稳定层结中,σ_θ 的计算值比实验值稍偏大,相对误差为 12.6%; σ_φ 的计算值比实验值也偏大,相对误差为 36%。这种计算产生的误差是和我们选取的大气湍流度计算公式有关的,对于不稳定层结,我们所采用的计算公式,更适合于强对流不稳定层结,而本文所定的不稳定层结,实际为弱不稳定层结。因此,计算结果可能会比实测值偏大。在中性层结中,σ_θ 的计算值比实测值略小,两者的相对误差为 5.7%; σ_φ 的

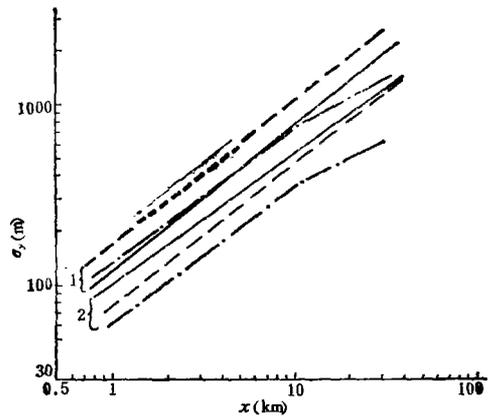


图 1 计算值与 SF₆ 实验值的比较

— SF₆ 实验曲线
 --- 用 Draxler 函数计算曲线
 - · - 用 Pasquill 函数计算曲线
 1. 不稳定层结 2. 中性层结

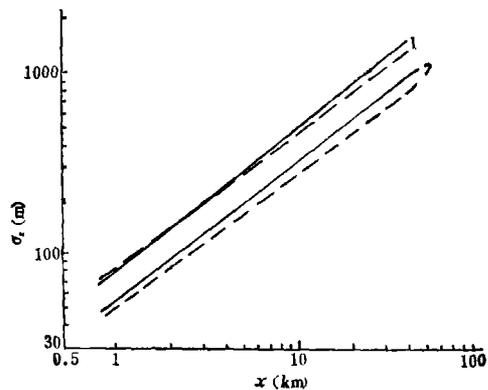


图 2 计算值与 SF₆ 实验值的比较

— SF₆ 实验曲线
 --- 用 Draxler 函数计算曲线
 1. 不稳定层结 2. 中性层结

计算值比实测值稍大,相对误差为 29%。

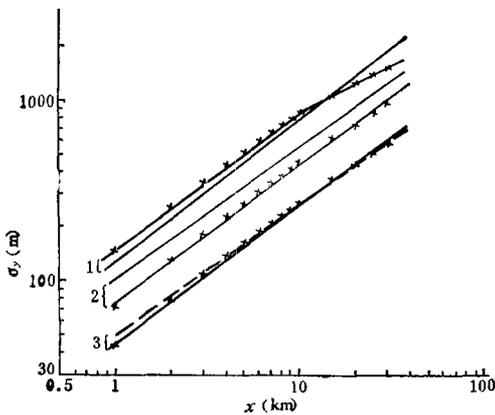
图 1 给出了分别用 Draxler 和 Pasquill 的 f(x) 函数计算的 σ_y 曲线与 SF₆ 实验得到的 σ_y 曲线。可以看出:对于不稳定层结,用 Pasquill 的 f_y(x) 函数计算的 σ_y 曲线与 SF₆ 实验的 σ_y 曲线非常接近,而用 Draxler 的 f_y(x) 函数计算的 σ_y 曲线比 SF₆ 实验结果偏大。说明在不稳定层结中, Pasquill 的 f_y(x) 函数比 Draxler 的 f_y(x) 函数有较好的使用性。对于中性层结,用 Draxler 的 f_y(x) 函数较理想。

表 3 σ_θ 和 σ_φ 的计算值与实测值比较

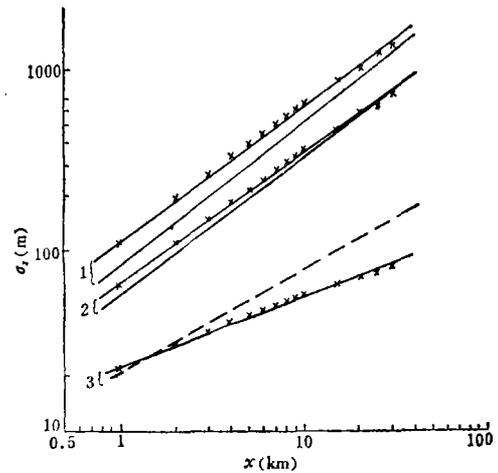
标准偏差 数值 稳定度	σ_θ			σ_φ		
	实测值	计算值	相对误差	实测值	计算值	相对误差
不稳定层结	0.223	0.251	-0.126	0.12	0.163	-0.36
中性层结	0.105	0.099	0.057	0.077	0.099	-0.29
稳定层结		0.06			0.06	

而 Pasquill 的 $f_y(x)$ 函数计算结果偏小。图 2 给出了用 P 法计算的 σ_x 与 SF₆ 实验得到的 σ_x 。结果表明：用 Draxler 的 $f_x(x)$ 函数计算的 σ_x 曲线，在不稳定层结和中性层结中都有较好的使用性。通过以上结果分析，本文在不稳定层结中，使用 Pasquill 的 $f_y(x)$ 函数，其它条件下采用 Draxler 给出的 $f(x)$ 函数较好。

图 3 和图 4 给出了三种大气状态下的 σ 随距离 x 的关系曲线。在不稳定层结和中性层结中，用计算结果与 SF₆ 实验结果进行比较。在稳定层结中，由于没有 SF₆ 实验资料，只好将计算结果与上海宝钢地区平衡球实验结果进行比较。结果表明：对于不稳定层结和中性层结，用 P 法估算的 σ_y 和 σ_x 与 SF₆ 实

图 3 σ_y-x 的关系曲线

- SF₆ 曲线
- x-x- 本文计算曲线
- 平衡球曲线
- 1. 不稳定层结
- 2. 中性层结
- 3. 稳定层结

图 4 σ_x-x 的关系曲线

- SF₆ 曲线
- x-x- 本文计算曲线
- 平衡球曲线
- 1. 不稳定层结
- 2. 中性层结
- 3. 稳定层结

验结果基本接近。对于稳定层结，P 法估算的 σ_y 与平衡球的结果非常一致，但计算的 σ_x 比平衡球值偏小。一般认为用平衡球这种手段测得的垂直扩散参数比实际情况要偏小。本文用 P 法估算的稳定层结下的 σ_x 值比平衡球值还小，这显然是不合理的。造成估算值偏小的主要原因是 Draxler 的 $f_x(x)$ 函数下降太快。Draxler 给出的 $f(x)$ 函数是在综合了大量野外扩散实验资料的基础上总结出来的。对于高架源来说，除稳定层结下的垂直扩散外，其它条件下的 $f(x)$ 函数都是由实验资料总结出来的。Draxler 认为在稳定层

结下的垂直扩散应迅速下降,他根据其它条件下的垂直扩散的 $f_z(x)$ 函数形式,推导出了稳定层结下的垂直扩散的 $f_z(x)$ 函数形式.本文的结果表明,Draxler 给出的稳定层结下的 $f_z(x)$ 函数形式下降太快,在城郊复杂地形下可能不适用.这还有待于用更多的实验资料去验证.

四、初步结论

通过以上结果分析,本文可得出如下初步结论.

一、本文所选取的大气边界层中计算湍流度的公式,基本上适合于上海宝钢地区的实际情况.公式计算中产生的微小误差,对估算大气扩散参数影响不大.

二、Draxler 和 Pasquill 通过若干次野外实验总结出来的平坦地形下的 $f(x)$ 函数,在类似上海宝钢这样的复杂地形下推广使用,除 Draxler 在稳定层结下的 $f_z(x)$ 函数形式下降太快外,其它条件下的 $f(x)$ 函数均有较好的结果.建议在不稳定层结下,水平扩散用 Pasquill 给出的 $f_y(x)$ 函数,垂直扩散用 Draxler 的 $f_z(x)$ 函数.在中性和稳定层

结下,均用 Draxler 的 $f(x)$ 函数形式.稳定层结下的垂直扩散,用 Draxler 的 $f_z(x)$ 函数下降太快,在上海宝钢这样的复杂地形下使用不太理想,有待于进一步探讨.

三、用 P 法估算大气扩散参数是一种行之有效的办法.它不仅在平坦地形下有很好的使用性,而且对于地面粗糙度较大、地形较复杂的上海宝钢地区也有较好的适用性.

参 考 文 献

- [1] Pasquill, F., EPA. Pub. No. EPA-600/4-76-0306, (1976).
- [2] Draxler, R. R., *Atmos. Env.*, 10, 99(1976).
- [3] Panofsky, H. A., H. Tennekes, D. H. Lenschow and J. C. Wyngaard. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 11, 355—361 (1977).
- [4] Wyngaard, J. C., O. R. Cote and K. S. Rao, *Adv. in Geophys.*, 18A, pp. 193—211, Academic Press. N. Y. 1974.
- [5] Hanna, S. R., *Fifth symposium on turbulence, diffusion, and air pollution.* March 9—13, pp. 61—62, 1981.
- [6] Golder, D., *Bound.-Lay. Meteor.*, 3, 47—58 (1972).
- [7] Liu, M., D. Durran, P. Mundkur, M. Yocke, and J. Ames, Final Report to the Air Resources Board, Contract No. ARB-4-258, p. 387, Sacramento, Calif. 1976.

土壤环境容量在总量控制上的应用

夏 增 禄

(中国科学院地理研究所)

目前,土壤环境容量的研究正日益引起人们的兴趣,但土壤环境容量如何应用于总量控制却还未见报道.而土壤环境容量提出的主要原因之一是考虑到总量控制,因此,探讨土壤环境容量在总量控制上的应用,既可检验它的实用价值,也可促进它进一步改进和发展,是具有相当意义的.

本文不是着重总量控制的讨论,而是通

过对总量控制一般性粗略的程序和方法的介绍,着重于土壤环境容量与总量控制的结合部分以具体数值进行探讨.

一、土壤环境容量和总量控制基本解析程序

土壤环境容量和总量控制的基本解析程序如图 1 所示.

二、污染源调查和污染物排放的预测