

大气扩散参数估算方法的适用性研究

李 军

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

提 要

本文对 Pasquill 估算大气扩散参数的方法在城郊复杂地形条件下的适用性进行了研究. 采用近几年来, 大气边界层理论和观测研究的结果, 以 Pasquill 估算扩散参数方法对上海宝钢地区的大气扩散参数进行了计算, 并与 1984 年上海宝钢地区 SF_6 示踪大气扩散实验的结果及平衡球实验结果进行了比较, 具有较好的一致性.

关键词: 大气扩散参数; 估算方法; 适用性.

一、引 言

在大气污染扩散模式中, 最主要的是合理地描述湍流扩散过程. 高斯模式是被人们广泛采用的一种模式. 大气扩散参数是该模式的重要参数之一. P-G 曲线为人们获取扩散参数提供了方便, 但它是由若干次平坦地区野外实验总结出来的, 对复杂地形下不能简单使用. 要想得到复杂地形下的扩散参数, 最有效的方法是进行野外大气扩散实验, 但野外实验往往需要花费大量的经费和人力物力, 同时需要先进仪器和手段, 往往难以进行. 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, P 法在平坦地形下有较好的适用性, 得到美国气象学者的推荐. 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^[1]在泰勒公式的基础上提出了估算扩散参数的公式:

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

式(1)中的 σ_θ , σ_ψ 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 $f_r(x)$ 的函数形式:

$$\begin{aligned}f_y(x) &= 1/(1 + 0.0308x^{0.4548}), \quad x \leq 1 \text{ km}, \\ f_z(x) &= 0.333 \cdot (10000/x)^{0.5}, \quad x > 1 \text{ km}.\end{aligned}\quad (2)$$

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:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= 1/[1 + 0.9(x/1000u)^{0.5}], \\ f_2(x) &= 1/[1 + 0.9(x/500u)^{0.5}], \quad Z/L \leq 0, \\ f_3(x) &= 1/[1 + 0.945(x/100u)^{0.806}], \quad Z/L > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, x 为下风距离, 单位是 m , u 为平均风速, 单位是 m/s .

2. σ_θ 和 σ_ψ 的估算

水平风向脉动和垂直风向脉动的标准偏差 σ_θ 和 σ_ψ , 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 σ_w/u_* 存在下列关系:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= (\sigma_w/u_*) \cdot (u_*/u), \\ \sigma_\psi &= (\sigma_w/u_*) \cdot (u_*/u), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 (u_*/u) 为无因次平均风速. 由计算导出的 σ_θ 和 σ_ψ 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, 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, 用 Irwin^[3] 结合 Panofsky^[4] 等人早期研究工作给出的研究结果:

$$\begin{aligned} \sigma_w/u_* &= (12 - 0.5Z/h)^{1/3}, \quad (5) \\ \sigma_w/u_* &= \begin{cases} 0.96(2.5 - 7.5Z/h)^{1/3}, & Z/h \leq 0.03, \\ 0.763(Z/h)^{0.175} \cdot (-h/0.4L)^{1/3}, & 0.03 < Z/h < 0.4, \\ 0.722(1 - Z/h)^{0.207} \cdot (-h/0.4L)^{1/3}, & 0.4 < Z/h \leq 0.96, \\ 0.37(-h/0.4L)^{1/3}, & 0.96 < Z/h \leq 1. \end{cases} \end{aligned}$$

对于中性层结, 采用 Wyngard^[5] 等人给出的表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_w/u_* &= 1.3 \exp(-Z/h), \\ \sigma_\theta/u_* &= 1.3 \exp(-Z/h). \end{aligned} \quad (6)$$

对于稳定层结, Hanna^[6] 建议用下列表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_w/u_* &= 1.3(1 - Z/h), \\ \sigma_\theta/u_* &= 1.3(1 - Z/h). \end{aligned} \quad (7)$$

公式(5)、(6)、(7)中, u_* 为摩擦速度, h 为混合层高度.

3. 摩擦速度 u_* 的确定

根据相似理论, 在近地面边界层中摩擦速度 u_* 可由下式确定:

$$u_* = k \cdot u_r / f(Z_r), \quad (8)$$

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 10m 处的风速资料. $f(Z_r)$ 为大气稳定度、地面粗糙度有关的无因次函数, 并取下列形式:

$$\text{中性层结: } f(Z_r) = \ln(Z_r/Z_0)$$

稳定层结: $f(Z_r) = \ln(Z_r/Z_0) + 5.2(Z_r/L)$

不稳定层结: $f(Z_r) = \ln(Z_r/Z_0) - 2\ln[(1+x)/2]$
 $-\ln[(1+x^2)/2] + 2\arctan(x - \pi/2)$

其中 $x = (1 - 16Z_r/L)^{1/4}$; Z_0 为地面粗糙度, L 为 Monin-obukhov 长度.

4. Monin-obukhov 长度 L 的估算

1972 年 Golder^[7]作图给出了 P-G 稳定级对 L 的关系曲线, 此后 Liu 等人^[8]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:

$$1/L = a Z_0^b, \quad (9)$$

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 的值.

表 1 不同稳定度条件下的 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:

$$Z_0 = (H \cdot a)/2A, \quad (10)$$

式(10)中 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, A 是地区面积, 利用式(10)求得上海宝钢地区的地面粗糙度值为 0.5m.

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, 利用第二节中所述公式和上海宝钢地区 1980 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.

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_y, σ_z 和 $f(x)$ 函数进行讨论.

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/s)		0.66	0.53	0.40
地面粗糙度 Z_0 (m)		0.5		

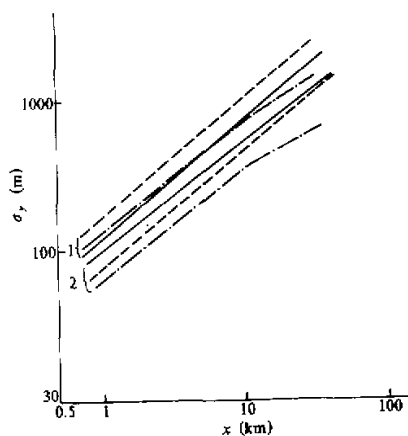
表 3 给出了 σ_y, σ_z 的计算值与实测值的比较结果, 结果表明: 在不稳定层结中, σ_y 的计算值比实验值稍偏大, 相对误差为 12.6%; σ_z 的计算值比实验值也偏大, 相对误差为 36%。这种计算产生的误差是和我们选取的大气湍流度计算公式有关的, 对于不稳定层结, 我们所采用的计算公式, 更适用于强对流不稳定层结, 而本文所用实验值的不稳定层结, 实际为弱不稳定层结。同时, 计算结果可能会出现比实测值偏大的现象。在中性层结中, σ_y 的计算值比实测值略小, 两者的相对误差为 5.7%; σ_z 的计算值比实测值稍大, 相对误差为 29%。

表 3 σ_y 和 σ_z 的计算值与实测值之间的相对误差

稳 定 度	数 值	标准 偏差	σ_y			σ_z		
			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	

图 1 和图 2 给出了根据实测的大气湍流度用 P 法计算的 σ 曲线与 SF₆ 实验得到的 σ 曲线的比较结果, 从而讨论 $f(x)$ 函数的可用性。图 1 给出了分别用 Draxler 的 $f(x)$ 函数和 pasquill 的 $f(x)$ 函数计算的 σ_y 曲线与 SF₆ 实验得到的 σ_y 曲线的比较结果, 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, 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_z 与 SF₆ 实验得到的 σ_z 的比较。结果表明: 用 Draxler 的 $f_z(x)$ 函数计算的 σ_z 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

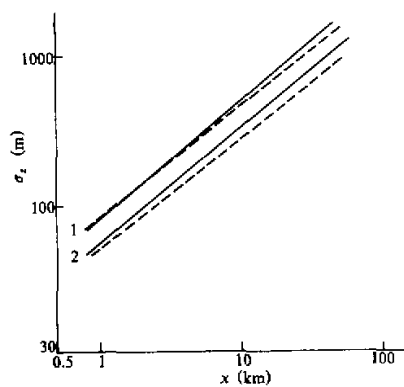
图1 计算值与SF₆实验值的比较—— SF₆实验曲线,

--- 用 Draxler 函数计算曲线,

- · - 用 Pasquill 函数计算曲线,

1. 不稳定层结, σ_z

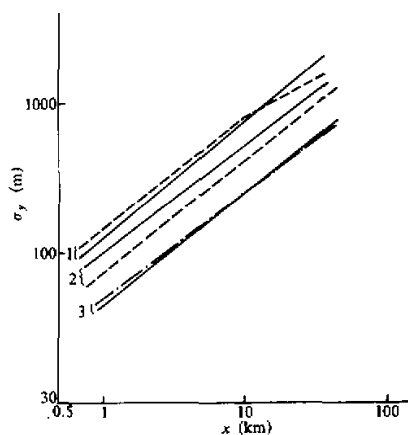
2. 中性层结

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

图3 $\sigma_y - x$ 的关系曲线—— SF₆曲线,

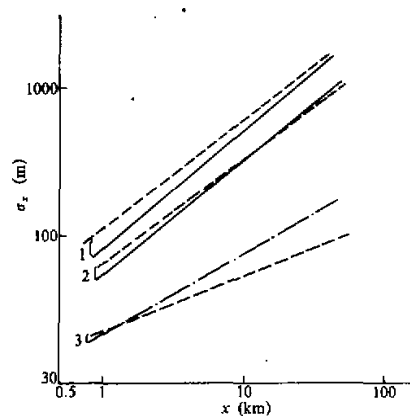
--- 计算曲线,

- · - 平衡球曲线,

1. 不稳定层结,

2. 中性层结,

3. 稳定层结

图4 $\sigma_z - x$ 的关系曲线—— SF₆曲线,

--- 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

中性层结, 用 P 法估算的 σ_y 和 σ_z 与 SF₆ 实验结果基本接近. 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_z 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_z 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 $f(x)$ 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. 从本文的结果表明, 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

1. 本文所选取的大气边界层中计算湍流度的公式, 基本上能满足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.

2. Draxler 和 Pasquill 通过若干次野外实验总结出来的平坦地形下推广使用, 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.

3. 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., 1976, Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modeling, Part II. Possible requirements to Change in the Turner Workbook Values. Contract no EPA-600/4-76-0306.
- [2] Draxler, R.R., 1976, Determination of atmospheric diffusion parameters, *Atmos. Env.*, **10**, 99—105.
- [3] Irwin, J. S., 1979, Estimating plume dispersion — A recommended generalized scheme. In *preprints of fourth symposium on turbulence, diffusion, and air pollution*, January 15—18, 62—69, AMS.
- [4] Panošky, H. A., H. Tennekes, D. H. Lenschow and J. C. Wyngarrd, 1977, The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary Layer Meteor.*, **11**, 355—361.
- [5] Wyngarrd, J. C., O. R. Cote and K. S. Rao., 1974, Modeling the Atmospheric Boundary Layer, *Adv. in Geophys.*, **18A**, Academic Press, N. Y. 193—211.
- [6] Hanna, S. R., 1981, Turbulent energy and Lagrangian time scales in the PBL. In *preprints of fifth symposium on turbulence, diffusion, and air pollution*, March 9—13, 61—62, AMS.
- [7] Golder, D., 1972, Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary Layer Meteor.*, **3**, 47—58.
- [8] Liu, M., D. Durran, P. Mundkur, M. Yocke and J. Ames, 1976, The chemistry, dispersion and transport of air pollutants emitted from fossil fuel plants in california: Data analysis and emission impact

model, final report to the air resources board Contract no. ARB-4-258, Sacramento, Calif. P387.

Applicability of Calculating Method for Atmospheric Dispersion Parameters

Li Jun

(LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

In this paper it describes the atmospheric dispersion parameters over urban complex terrain calculated by Pasquill's method and compare with the curves of sulfur hexafluoride (SF_6) tracer experiments. The results agree well. In addition, the applicability of Pasquill's method for calculating atmospheric dispersion parameters and errors of function $f(x)$ in equation $\sigma_{y,z} = \sigma_{\theta,\psi} \times f(x)$ are also discussed. Some initial results are obtained.

Key words: Atmospheric dispersion parameter; Calculating method; Applicability.

勘 误

本刊 17 卷 1 期有如下差错, 需进行勘误:

页	行	误	正
52	20	$40 \times 10^{12} \text{g}$	$35 \times 10^{12} \text{g}$
52	21	$45 \times 10^{12} \text{g}$	$40 \times 10^{12} \text{g}$
71	公式(37)	$\psi z \ln \frac{z}{z_0}$	$\psi z^2 \ln \frac{z}{z_0}$

另, 由于排版环节失误, 69 页的图 2 与 72 页的图 4 位置应互换 (图题图注不变)。