

利用测温声雷达回波图估算大气 扩散的一种参数化方法*

许吟隆 陈长和

(兰州大学大气科学系, 730000)

提 要

本文提出了一种基于湍流扩散统计理论的利用声雷达回波图估算大气扩散参数的新方法。这种新方法,仅需要从声雷达回波图上读出边界层结构的信息并取得常规地面测风资料,即可利用参数化公式进行计算,不需进行 Pasquill 稳定度分类。

所应用的参数化公式用外场观测资料进行了检验,表明公式计算结果与观测值比较符合。这种方法计算得到的扩散参数也与 P-G 扩散曲线进行了比较。

关键词: 声雷达, 扩散参数, 参数化, 对流热羽高度。

1 引 言

目前测温声雷达在大气污染问题中的应用主要集中在两个方面:一是用声雷达回波图像为空气质量模式提供与污染物扩散范围有关的参数,例如 Russell 和 Uthe^[1] 在美国旧金山地区用 13 部声雷达同时探测,得到该地区不同时刻混合层深度的等值线分布,为空气质量模式提供稳定度性质和混合层深度等输入参数;二是把声雷达回波特征与 Pasquill 稳定度分类联系起来,以期能用声雷达回波特征给出表征大气扩散能力的参数 σ_y 、 σ_z , 其中最具代表意义的是印度国立物理实验室的 Single 等^[2] 所作的工作。Single 等在新德里进行了连续 5 年(1977 年 5 月—1982 年 4 月)的观测,试图寻求声雷达回波结构特征与 Pasquill 稳定度的关系,对空气污染作出预报。

由湍流扩散的统计理论可知:对某一特定的扩散时间,扩散参数决定于湍流的强度和尺度。边界层湍流结构研究表明, σ_w/u_* 、 σ_w/u_* 和湍流尺度等特征量可由稳定度和边界层高度确定(见公式(5)—(10)),声雷达回波图像则正好能够提供稳定度和边界层高度的信息,因而可从扩散的统计理论出发,利用边界层结构的研究成果由回波图像确定扩散参数。若把回波图像仅经验地联系于 P-T 稳定度级别,显然没有充分利用回波图上边界层特征的信息于计算扩散。例如晴天的上午某时刻和下午另一时刻,当太阳高度角和风速相同时,P-T 分类方法表示这两时刻大气的扩散能力是相同的;但从声雷达回波图上可以看出,即使这两时刻的稳定度相同,边界层高度却会有很大的差别,大气的扩散能力当然也很不相同^[3],因而 Single 等所作的尝试并不是理想的途径。

本文旨在充分利用单点测温声雷达回波图像提供的有关边界层特征的信息,用参数化的方法计算扩散参数,并用实验资料和已有方法进行验证和对比。

* 1991 年 9 月 23 日收到原稿,1992 年 1 月 28 日收到修改稿,该文属国家自然科学基金资助项目。

2 扩散参数的估算方案

2.1 基本公式

扩散参数的计算基于 Taylor 公式:

$$\sigma_y^2 = \overline{V'^2} \int_0^T \int_0^t R_L(\xi) d\xi dt \quad (1)$$

这里 $R_L(\xi)$ 是风速脉动场的拉格朗日相关系数, $\overline{V'^2}$ 是风速脉动量方差, T 是扩散时间, σ_y 为扩散参数。Pasquill^[4] 将 Taylor 公式改写为:

$$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_v T f_x(T/\tau_L) \\ \sigma_z = \sigma_w T f_z(T/\tau_L) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $f(T/\tau_L)$ 为普适函数, τ_L 为拉格朗日时间积分尺度。Draxler^[5] 综合了若干次大气扩散实验资料, 给出了完整的 $f(T/\tau_L)$ 的函数形式:

$$f_y(T/\tau_L) = \frac{1}{1 + 0.9(T/1000)^{0.5}} \quad (3)$$

$$f_z(T/\tau_L) \begin{cases} = \frac{1}{1 + 0.9(T/500)^{0.5}} & Z/L \leq 0 \\ = \frac{1}{1 + 0.9(T/50)^{0.5}} & Z/L > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 f_z 的表达式在稳定情况下 ($Z/L > 0$) 采用的是地面源释放的形式, 但其他作者把它应用于高架源, 且独立于高度^[6]。

2. σ_v, σ_w 的计算

风速脉动标准差 σ_v, σ_w 应由双向风标测定。近年来已有不少学者对 σ_v, σ_w 在大气边界层的变化规律进行了研究, 使 σ_v, σ_w 的参数化估算成为可能。对不稳定层结, σ_v 采用 Panofsky 等^[7] 给出的表达式, σ_w 采用 Moravek 和 Panofsky 等^[8] 给出的表达式:

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = \left(12 - 0.5 \frac{h}{L} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} \begin{cases} = 0.96(2.5 - 7.5 Z/L)^{1/3} & Z/h \leq 0.03 \\ = 0.763(Z/L)^{0.175}(-h/0.4 L)^{1/3} & 0.03 < Z/h \leq 0.4 \\ = 0.722(1 - Z/L)^{0.207}(-h/0.4 L)^{1/3} & 0.4 < Z/h \leq 0.96 \\ = 0.37(1 - h/0.4 L)^{1/3} & 0.96 < Z/h \leq 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

对于稳定层结, σ_v, σ_w 分别采用 Caughey 等^[9] 和 Gryning 等^[10] 给出的表达式:

$$\left(\frac{\sigma_v}{u_*} \right)^2 \begin{cases} = 6 \left[1 - 3 \frac{Z}{h} + 2 \left(\frac{Z}{h} \right)^2 \right] & Z \leq 0.2 h \\ = 3.75 \left(1 - \frac{Z}{h} \right) & 0.2 h < Z \leq h \end{cases} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\sigma_w}{u_*} \right)^2 = 1.7 \left(1 - \frac{Z}{h} \right)^{3/2} \quad (8)$$

中性层结情况下, σ_v, σ_w 的表达式则采用陈家宜^[3] 讨论的形式:

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 2 \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.3 \exp(-0.5 Z/h) \quad (10)$$

以上各表达式中, u_* 为地面摩擦速度, L 为 Monin-Obukhov 长度, h 为大气边界层高度, Z 为离地高度。

2.3 有关参数的获取

u_* 的计算由 Monin-Obukhov 相似理论得出的风廓线对数律确定:

$$u_* = \frac{\mathcal{K} \bar{u}_1}{\ln \frac{Z_1}{Z_0} - \Psi_m \left(\frac{Z_1}{L} \right)} \quad (11)$$

其中 \mathcal{K} 为卡曼常数, 本文取 $\mathcal{K} = 0.4$; Z_0 为地面粗糙度, 取 $Z_0 = 0.15$ m, Z_1 为参考高度, \bar{u}_1 为该高度的平均风速。本文 $Z_1 = 10$ m, 而 \bar{u}_1 为常规气象观测资料 10 m 高度的风速。对不稳定层结, Ψ_m 取以下形式^[11]:

$$\Psi_m(Z/L) = 2 \ln \frac{1+x}{2} + \ln \frac{1+x^2}{2} - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

其中:

$$x = (1 - 16 Z/L)^{1/4} \quad L < 0 \quad (13)$$

对稳定层结有:

$$\Psi_m(Z/L) = -5 Z/L \quad L > 0 \quad (14)$$

用迭代法求取 u_* 时, 先置 Ψ_m 为中性时的值 $\Psi_m = 0$, 然后代入式(11)求出 u_* , 再利用后面我们提出的经验公式去求出 L , 然后再用式(12)或(14)求出 Ψ_m 的值, 再代入式(11)求出 u_* 。一般迭代二、三步就可以达到所需要的精度。

在实际应用中, 将风廓线对数律式(11)改写为以下形式:

$$\bar{u}(Z) = \bar{u}(Z_1) \frac{\ln \frac{Z}{Z_0} - \Psi_m \left(\frac{Z}{L} \right)}{\ln \frac{Z_1}{Z_0} - \Psi_m \left(\frac{Z_1}{L} \right)} \quad (15)$$

这里 $\bar{u}(Z_1)$ 为参考点的风速观测值, 本文取 $Z_1 = 10$ m, Z 和 $\bar{u}(Z)$ 为计算点的高度和风速值。对很稳定情况 ($Z > |L|$), 可以采用:

$$\Psi_m(Z/L) = -17[1 - \exp(-0.29 Z/L)] \quad (16)$$

来代替式(14)^[11]。

2.4 Monin-Obukhov 长度 L

根据 Monin-Obukhov 相似理论, 近地面的湍流特征量可以由无量纲高度 Z/L 描述。 L 的定义式为:

$$L = -\frac{u_*^3}{\mathcal{K} g / T w' \theta'} \quad (17)$$

其中 g/T 为浮力常数, $w' \theta'$ 为地面湍流热通量。一般说来, 地面热通量、边界层高度及声雷达回波图像上对流热羽高度、贴地逆温层厚度的日变化如图 1 所示。

边界层高度 h 决定于边界层的发展过程, 而与某一时刻地面的热力作用没有对应关系。从声雷达回波图像上可以看出: 白天对流热羽高度的日变化与地面热通量的日变化

曲线有着较好的对应关系。当地面加热开始时,对流热羽开始出现;加热愈强,对流热羽高度愈高,傍晚加热停止,对流热羽消失。夜间通常有较小的向下热通量,对应于厚度不大的贴地逆温层。因此,我们假设声雷达回波图像上对流热羽高度或贴地逆温层厚度与地面感热通量有一定对应关系,因而我们提出以下计算 L 的经验公式:

$$L = -B \frac{u_*^3}{h'^2} \quad (18)$$

式中 B 为比例常数,本文计算时不稳定情况

取 $B = 5.0 \times 10^7 \text{s}^3$, 稳定情况下取 $B = -5.0 \times 10^7 \text{s}^3$ 。 h' 在不稳定情况下为对流热羽高度 ($h' = a$), 稳定情况下为贴地逆温层厚度 ($h' = b$), 中性时 $h' \approx 0$ 。

用式(2)、(3)、(4)计算 σ_y, σ_z 的方法,是由 Pasquill 首先提出,其后由 Draxler 等人完善的,本文利用声雷达资料进行计算,称之为声雷达的 Pasquill-Draxler 方法,简称 PD 方法。

3 估算 σ_y, σ_w 的方法的验证

Draxler^[4]给出的 f_y, f_z 表达式已经过大量实测资料的验证,因此,PD 方法是否可行,关键在于利用声雷达资料计算的 σ_y, σ_w 与实测值的接近程度。我们用在皋兰县获得的双向风标资料进行验证。

本文观测所用单点测温声雷达是 M-300 型,双向风标是 Gill 双向风标风速仪,配备 Apple II 微机以采集数据,10 m 高度风速资料取自皋兰气象站的常规气象观测。

试验在 1989 年 12 月 1 日—15 日进行,历时半个月。声雷达安放在皋兰县气象站空旷的平地上,昼夜开机,取得了 15 天完整的资料;双向风标安装高度为 10 m,每两小时观测一次,每次采样时间为 1 h,采样时间间隔为 5 s;10 m 高度风每小时读取 1 次,其平均风速用内插法求得,即将每两个时刻的风速平均取为该小时内的 10 m 平均风速。

在读声雷达回波图时认为:有对流热羽出现时层结为不稳定,无回波时层结为中性,有贴地逆温时层结为稳定。当对流出现时,夜晚形成的贴地逆温被抬升,我们取 h' 为对流热羽的高度,边界层高度 h 为抬升逆温层底部所在高度,在回波图像上看不到顶盖逆温时,取 h 为声雷达探测的最大高度(1000 m)。夜晚取 h' 为贴地逆温层厚度;有时在贴地逆温层之上有一低层逆温,如两者分离,则 h 与 h' 取同一数值;如两者迭加在一起,则取 h 为两者迭加之厚度。

图 2、图 3 分别绘出了用式(5)—(8)计算的不稳定和稳定情况下 σ_y, σ_w 与实测值的比较。

不论是不稳定情况还是稳定情况, σ_y, σ_w 的计算值与实测值的比例误差(其定义如式(20))平均值均不超过 $\pm 10\%$,其分布标准差也都在 30% 以内,其中不稳定情况 σ_y 的离散最小,分布标准差只有 17%。鉴于湍流统计量本身并非是精确的物理量,因而上述计

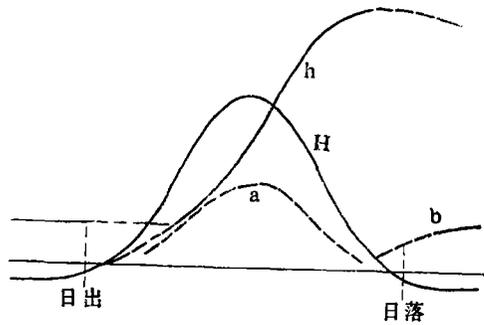


图 1 对流热羽高度 a 、地面热通量 H 、混合层高度 h 、贴地逆温层厚度 b 的日变化

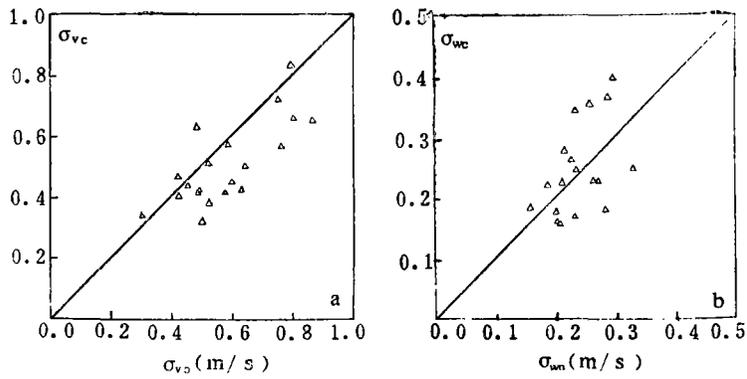


图 2 不稳定条件下计算值 σ_{vc} , σ_{wc} 与观测值 σ_{vo} , σ_{wo} 的比较

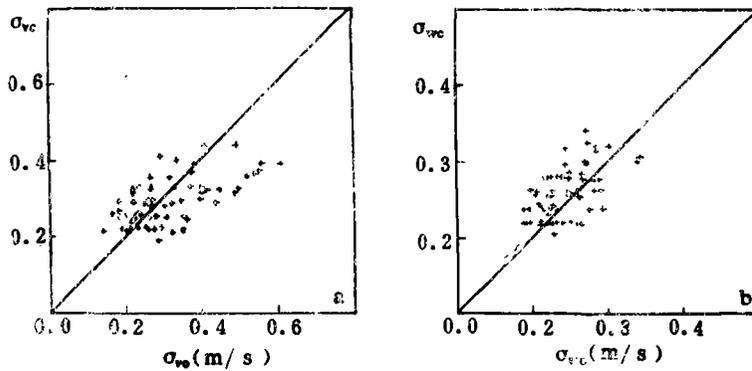


图 3 稳定条件下计算值 σ_{vc} , σ_{wc} 与观测值 σ_{vo} , σ_{wo} 的比较

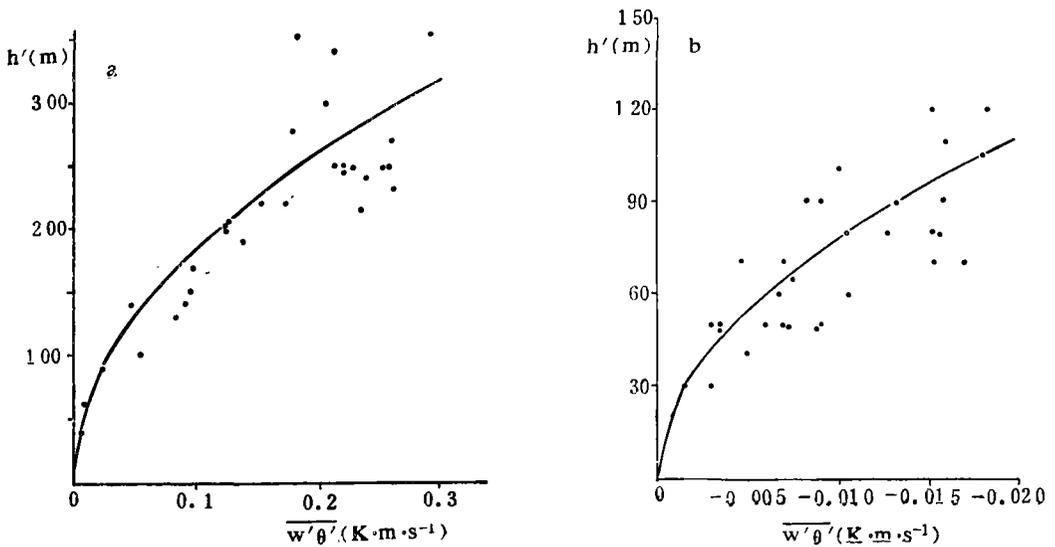


图 4 地面热通量 $\overline{w'\theta'}$ 与 h' 的关系
(a. 不稳定; b. 稳定)

算值与实测值的符合还是比较理想的。

我们再用实测资料对式(18)进行验证。假定式(18)成立,并与 L 的定义式联立,可将 B 表示成:

$$B = \frac{h'^2}{\mathcal{H} g / T \overline{w'\theta'}} \quad (19)$$

所用验证资料为黑河地区 1990 年 8 月 8 日—23 日的观测资料。黑河地区试验在戈壁沙漠上进行,用超声风速仪测风、温脉动,并用相关涡动法计算感热通量,同时用 M-300 测温声雷达取得声回波图像,共获得同时的地面热通量、位温和声回波图像 81 组,剔除噪声干扰严重、回波图像不清的资料后,得资料 61 组(其中不稳定情况 31 组、稳定情况 30 组)。图 4 中的点给出了实测的 $\overline{w'\theta'}$ 与 h' 的关系。按式(19)计算结果为:不稳定情况 B 平均值为 $2.6 \times 10^7 \text{s}^3$, $\sigma_B/\bar{B} = 0.31$;稳定情况 B 平均值为 $-4.5 \times 10^7 \text{s}^3$, $\sigma_B/\bar{B} = 0.40$ 。图 4 中曲线为式(19),取 B 值如上述, T 取实测温度平均值。与式(18)所取 B 值相比,在不稳定情况下有一定差别,这可能表示,对流热羽高度还与地表特征等因子有关。图 4 可以看出: $\overline{w'\theta'}$ 与 h' 的平方成正比是近似成立的。

4 扩散曲线的比较和讨论

将 PD 方法计算的 25 m 高度上的扩散参数与 P-G 扩散曲线作了比较。其中稳定度分类采用 P-T 方法,比较时,用比例误差(差值)作为指标(当与实测值比较时为误差,与其它参考值比较时为差值),其定义为:

$$e = 2(P - O)/(P + O) \quad (20)$$

其中 P 为计算值, O 为观测值(或参考值)。

图 5 绘出了 PD 方法扩散参数计算结果与 P-G 扩散曲线的比较。与 P-G 曲线相

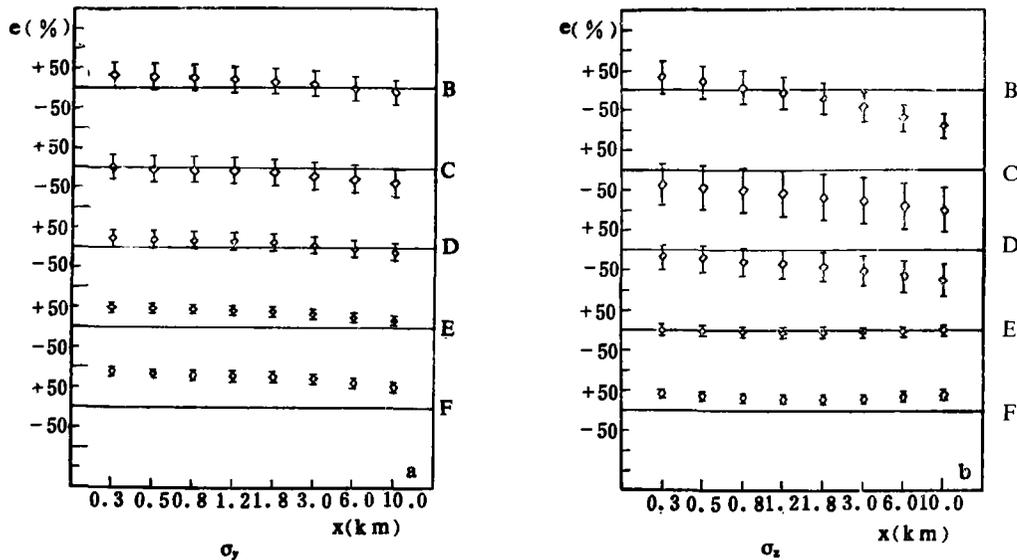


图 5 PD 方法计算结果与 P-G 扩散曲线的比较
(e 是平均比例误差, 图中符号上下的横线表示分布标准差)

比,在不稳定条件下, σ_y 计算值偏离不大, σ_z 计算值在远距离显著偏小;稳定条件下(E 类 σ_z 除外),计算值略有偏大,其中以 F 类 σ_y 偏大最为明显(0.3 km 处平均比例差值为 89%)。中性情况则是 σ_y 计算值偏大, σ_z 计算值偏小。在各类稳定度条件的计算结果中, C 类 σ_z 偏离最大,10 km 处平均比例差值为 -101%; E 类 σ_z 符合最好,平均比例差值始终不超过 -9%。

Irwin^[6]曾对 Draxler 以及其他作者给出的 f_y, f_z 表达式进行过比较研究,发现:用 Draxler 给出的表达式计算的扩散参数与实测资料符合较好;在将扩散参数计算值用于浓度计算时,与实测浓度有最小的比例误差(在 -36%—38% 之内)。而用 P-G 曲线计算浓度时,则有明显的偏大与偏小现象(比例误差大至 120%,小至 -171%),与实测浓度符合很差。由此可见,以 P-G 曲线作为比较对象,只能显示出 PD 方法计算结果的变化范围与趋势,并不是两者越符合越好,总的说来,二者相差不算大。

我们还将 60 m 和 100 m 高度上扩散参数的计算结果与 Briggs 内插公式、BNL 扩散参数体系作了比较。结果表明:声雷达的 PD 方法计算结果与这两种扩散参数体系也都有较好的符合,其中与 BNL 体系符合最佳,平均比值差值最大不超过 $\pm 35\%$ 。

以下对个例计算结果进行讨论。表 1 中列出了 1989 年 12 月 10 日四个时次的各参数。按 P-T 分类方法,09 时、17 时稳定度为 C 类,10 时、14 时为 B 类。在声雷达回波图上,09 时贴地逆温依然存在,至 10 时对流回波开始出现,抬升逆温层底部高度 120 m,14 时抬升逆温消失,对流热羽高度 160 m,17 时无回波,为典型的中性情况。从表 1 所提供的边界层参数和计算结果看到,计算的速度标准差和扩散参数(用计算值在 P-G 扩散曲线图上的位置表示)较好地反映了边界层特征,而 P-T 稳定度分类则反映边界层特征的能力较差。例如 09 时,贴地逆温尚存在,但 P-T 稳定度已属于 C 类,而 PD 方法计算得到的扩散参数则显示出弱稳定,显然 PD 方法的结果较为合理,能较好反映层间特征。

表 1 个例计算中的参数*

日期	时	P-T 稳定度分类	h	h'	\bar{u}_{10}	\bar{u}_{50}	u_*	L	σ_v	σ_w	σ_y	σ_z
12月10日	09	C	180	-130	1.0	1.6	0.10	3.3	0.17	0.11	D-E	~E
	10	B	120	80	1.2	1.4	0.15	-25.4	0.36	0.22	B-C	~C
	14	B	1 000	160	1.2	1.4	0.17	-9.8	0.68	0.49	高于B	B
	17	C	1 000	0	1.5	2.1	0.16	∞	0.32	0.20	C-D	C-D

* 表中长度单位为 m,速度单位为 m/s; h' 的负值表示贴地逆温层厚度; σ_y, σ_z 是指计算值在 P-G 扩散曲线中的位置。

5 结 论

1. 本文提出了一种基于湍流扩散统计理论的用声雷达回波图像上边界层结构的参数计算大气扩散参数的方法,PD 方法。

2. 用参数化公式计算 σ_v, σ_w 的结果与实测值进行了比较,发现二者有着较好的符合;实测资料表示,地面感热通量与对流热羽高度(或贴地逆温层厚度)的平方近似地成正比关系。

3. 本文将 25 m 高度上的扩散参数计算结果与 P-G 扩散曲线进行了比较, 显示二者相差不大。个例计算显示 PD 方法计算结果能较好地反映边界层特征。

本文估算扩散参数的方法仅需从声雷达回波图上读出有关边界层参数, 并利用地面常规测风资料; 不需划分稳定度级别; 可将边界层参数输入计算机, 便于在空气质量模式中应用。

本文提出的计算 L 的经验公式有待进一步验证。

致谢: 本文内观测资料取自课题组的野外实验, 特此向课题组的黄建国、袁九毅等老师们表示深切谢意。兰州高原大气物理所王介民副研究员为本文提供了部分实验资料, 在此谨表谢意!

参考文献

- [1] Russell P B, et al. Acoustic and direct measurements of atmospheric mixing at three during an air pollution incident. *Atmos Environ*, 1978, 12(4):1061—1074.
- [2] Single S P, et al. Stability studies with the help of acoustic sounding. *Atmos Environ*, 1985, 19(2): 221—228.
- [3] 陈家宜. 低层大气湍流度的参数化估算. *环境科学学报*, 1985, 5(1):85—95.
- [4] Pasquill F. Atmospheric dispersion of pollution. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1971, 97(2):369—395.
- [5] Draxler R R. Determination of atmospheric diffusion parameter. *Atmos Environ*, 1976, 10(1):99—105.
- [6] Irwin J S. Estimating plume dispersion—A comparison of several sigma schemes. *J Climate & Appl Meteor*, 1983, 22(1):92—114.
- [7] Panofsky H A, Tennekes H, Lenschow D H, Wyngaard J C. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-layer Meteor*, 1977, 11(2):355—361.
- [8] Moravek D, Panofsky H A, Weber A H. Determination of surface stress from vertical-velocity spectra. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1976, 102(1):260—263.
- [9] Caughey S J, Wyngaard J C, Kaimal J C. Turbulence in the evolving stable boundary layer. *J Atmos Sci*, 1979, 6(4):1041—1052.
- [10] Gryng S E, et al. Applied dispersion modelling based on meteorological scaling parameters. *Atmos Environ*, 1987, 21(1):78—89.
- [11] VAn Ulden A P, et al. Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion application. *J Climate & Appl Meteor*, 1985, 24(4):1196—1207.

A NEW APPROACH TO ESTIMATE ATMOSPHERIC DIFFUSION COEFFICIENTS BY USING ACOUSTIC RADAR

Xu Yinlong Chen Changhe

(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 730000)

Abstract

In this paper a parameterized method based on turbulent statistical theory is proposed to estimate atmospheric diffusion coefficients from sounder facsimile chart. Using this method, only atmospheric boundary layer structure information is needed which can be obtained from acoustic radar facsimile and routine observed wind data at 10m. Pasquill atmospheric stability categories are not necessary.

The parameterized formula in this method is examed by use of field observed data, it is showed that the computed results of this formula are correspondent with observations. The calculated results of this new method are also compared with P-G diffusion curves.

Key words: Acoustic radar, Diffusion coefficient, Parameterization, Convective thermal plume height.