

激光探测大气扩散参数*

孙景群 金惠淑 胡裕良

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

利用红宝石激光雷达,在烟粒形状任意(或晶轴取向任意)和烟粒成分和谱分布稳定,以及一次散射和独立散射条件下,探测了烟羽相对浓度的垂直剖面分布,从而获得不同天气条件下离烟源下风向一定距离范围内大气扩散参数 σ_y 和 σ_z 。

一、引 言

激光作为一种新颖光源,近年来在探测大气污染方面已取得不少进展^[1-4]。激光遥测人造烟羽和工业排放烟羽浓度,就是激光探测大气污染的一个重要方面^[5-6]。1975年5月至6月在某工业区,我们利用红宝石脉冲激光雷达探测了某发电厂稳定排放的烟羽相对浓度的垂直剖面分布,获得不同天气条件下离烟源下风向一定距离范围内的大气扩散参数 σ_y 和 σ_z ,从而为研究该地区大气污染扩散规律提供依据。本文将叙述激光探测大气扩散参数 σ_y 和 σ_z 的原理,以及实际观测的初步结果。

二、大气污染扩散模式

(一) 大气污染扩散模式

研究工业排放烟气对大气的污染时,通常采用连续点源扩散的统计理论模式。在均匀端流场在垂直于平均风向的平面上,烟粒可近似假设为高斯分布。于是在均匀下垫面、大气定常运动以及大气污染扩散物不因相互作用和沉降而消失等条件下,连续点源扩散公式为^[7]

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (1)$$

式中采用直角坐标系, x 轴与平均风向一致, z 轴垂直地面。 $C(x, y, z)$ 为污染物浓度,单位通常取克·米⁻³。 Q 为源强,单位克·秒⁻¹。 σ_y 和 σ_z 为高斯分布的标准差,与大气稳定度、离烟源下风向距离以及取样时间有关,单位米。 $\bar{u}$ 为平均风速,单位米·秒⁻¹。 $h = h_0 + \Delta h$ 为烟轴高度, h_0 为烟源高度(即烟囱口高度),而 Δh 为烟羽上升高度,单位均

* 参加本工作的还有山东大学工农兵学员宋军、李谦、裴俊英同志。

取米。

当烟羽尚未接地前,(1)式可略去像源项而化简为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (2)$$

当源强 Q 和平均风速 $\bar{u}$ 已知时,如能进一步获得不同大气稳定度条件下离烟源下风向不同距离处的标准差 σ_y 和 σ_z ,则由(1)或(2)式就能估计出大气污染物的空间分布。

(二) σ_y 和 σ_z 的测定

利用红宝石激光雷达,可以探测烟粒形状任意(或晶轴取向任意)和烟粒成分、谱分布稳定不变时,工业排放烟羽的体后向散射截面^[6]:

$$\beta_s(R) = \frac{R^2 V_s(R) e^{2\int_{R_1}^R \sigma_a(r) dr}}{C_A e^{-2\int_0^{R_1} \sigma_a(r) dr} - 2k_t \int_{R_1}^R r^2 V_s(r) e^{2\int_{R_1}^r \sigma_a(r') dr'} dr} \quad (3)$$

式中 $\beta_s(R)$ 为距离 R 处的烟羽体后向散射截面,单位 $\text{公里}^{-1} \cdot \text{立体角}^{-1}$ 。 $V_s(R)$ 为距离 R 处的烟羽激光回波电压,单位伏特。 R_1 为烟羽近边界斜距,单位公里。 r, r' 为距离变量。 $\sigma_a(r)$ 为距离 r 处的大气消光系数,单位 公里^{-1} ,由激光实测。 C_A 为雷达仪器常数,单位伏特 $\cdot \text{公里}^3 \cdot \text{立体角}$,可事先测定。 k_t 为烟羽参数,它是烟羽消光系数与体后向散射截面之比,单位立体角,由激光事先测定。

当烟羽对激光的散射为一次散射和独立散射时,烟羽体后向散射截面 $\beta_s(R)$ 就进一步正比于烟羽浓度 $N_s(R)$,并有

$$\beta_s(R) = \xi N_s(R) \quad (4)$$

式中 ξ 为比例常数。

由烟羽激光回波波形,根据测烟方程(3)和(4),可获得激光穿透路径上烟羽相对浓度的分布。

若激光雷达置于所测烟道侧面,并使激光雷达的方位角固定不变,而以不同仰角对准烟羽不同部位发射一组激光光束,由此获得一组烟羽的激光回波波形,即获得烟羽相对浓度的垂直剖面分布。如在某段时间间隔内探测大量烟羽相对浓度的同一垂直剖面分布,则能获得该段取样时间内烟羽相对浓度垂直剖面分布的平均结果。在烟羽尚未接地的情况下,标准差 σ_y 和 σ_z 的计算公式为

$$\sigma_y^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y^2 \bar{\beta}_s(x, y, h) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{\beta}_s(x, y, h) dy} \quad (5)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (z-h)^2 \bar{\beta}_s(x, 0, z-h) dz}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{\beta}_s(x, 0, z-h) dz} \quad (6)$$

式中 $\bar{\beta}_s(x, y, h)$ 为取样时间内离烟源下风向距离 x 及烟轴高度处,烟羽平均体后向散射截面随 y 轴的分布。 $\bar{\beta}_s(x, 0, z-h)$ 为取样时间内离烟源下风向距离 x 及 $y=0$ 时,烟羽平均体后向散射截面随 z 的分布。

于是,利用激光探测工业排放烟羽相对浓度的垂直剖面分布,根据式(5)和(6),就能求得不同天气条件下,离烟源下风向不同距离处的标准差 σ_y 和 σ_z ,这就为研究大气污染扩散规律提供重要参数。

三、 σ_y 和 σ_z 的激光探测结果

(一) 观测条件

激光雷达架设在地形略有起伏的某工业区发电厂东南偏东方向的一幢楼的楼顶,离地23米高。观测点离该发电厂三个 120 米高烟囱的距离为 3.1 公里。

观测使用的红宝石激光雷达是略加改进的第 III 型激光雷达^[8] 其基本性能列于表 1。激光雷达的仪器常数 $C_A = 1.8 \times 10^4$ 伏特·公里³·立体角。

表 1 激光雷达基本性能

工 作 物 质	红宝石 (C 轴取向 72°)	重 复 频 率	10 次/分
激 光 波 长	6943 埃	发 射 角	1.7 毫弧度
发 射 能 量	0.4 焦耳	接 收 孔 径	6 厘 米
发 射 功 率	25 兆瓦	视 场 角	2 毫弧度
调 Q 方 式	隐花菁乙醇溶液	干 涉 滤 光 片	中心波长: 6943 埃,带宽: 30 埃
冷 却 方 式	红宝石和聚光器循环水冷	光 电 倍 增 管	EMI 9558 B

激光观测期间的气象资料,主要取自当地气象台一天 4 次的探空和测风记录,观测时间为 01 时、07 时、13 时和 19 时,气象台位于观测点东南方向相距 20 公里左右的开阔田野。若激光观测与气象台观测时间不一致时,则参考设在观测点东南方向相距 3 公里处,80 米高气象观测塔每逢正点观测的风和温度的梯度观测记录。

某发电厂由三个 120 米高的烟囱连续排放烟羽,烟囱间距约 100 米,呈西北—东南走向排列。所排放的烟羽基本满足烟粒形状任意,烟粒成分和谱分布稳定等条件。激光实测的烟羽参数 $k_t = 8.2$ 立体角,其或然误差为 19%。

观测多选择以西北风为主的天气条件下进行,此时发电厂位于工业区上风方向,因此能见度较好,发电厂所排放烟羽的边界比较清晰,有利于激光观测。同时由于发电厂三个烟囱的排列走向与烟羽扩散方向基本一致,而所测烟羽相对浓度的垂直剖面离烟源下风向的距离均在 1 公里以上,因此可近似作连续点源处理。每观测一次烟羽相对浓度垂直剖面平均分布需时 30 分钟,共观测大约 7 个烟羽相对浓度垂直剖面,每个烟羽相对浓度垂直剖面由 5—7 个烟羽激光回波波形组成,并在 1 分多钟时间内观测完,由此获得烟羽相对浓度垂直剖面的 30 分钟平均分布。

(二) 观测实例

我们以 1975 年 6 月 8 日 6 时 17 分至 47 分的观测为例,说明如何由激光观测烟羽相对浓度垂直剖面分布来求取标准差 σ_y 和 σ_z 。

图 1 为这次观测烟羽相对浓度垂直剖面时,激光发射方位和烟羽扩散方向的平面示意图。6 时 46 分左右所测烟羽激光回波波形示于图 2a,所对应的烟羽相对浓度垂直剖

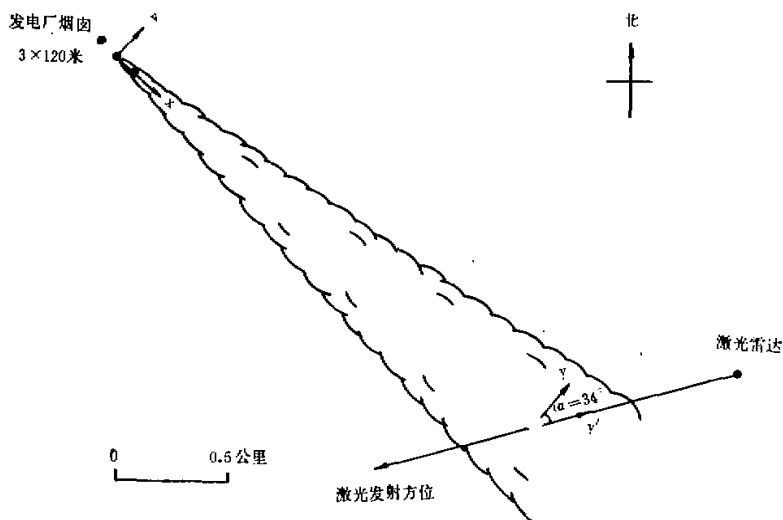


图1 6月8日6时17分至47分,激光发射方位和烟羽扩散的平面示意图

面分布则示于图2b。由7次烟羽相对浓度垂直剖面分布求得沿激光发射方位 y' 轴和沿 z 轴的相对浓度的30分钟平均结果,以及对应的标准差 $\sigma_{y'}$ 和 σ_z 则示于图3。由于激光发射方位与 y 轴具有夹角 $\alpha = 34^\circ$, 因此由 $\sigma_{y'}$ 可近似获得 $\sigma_y \approx \sigma_{y'} \cos \alpha = 120$ 米。

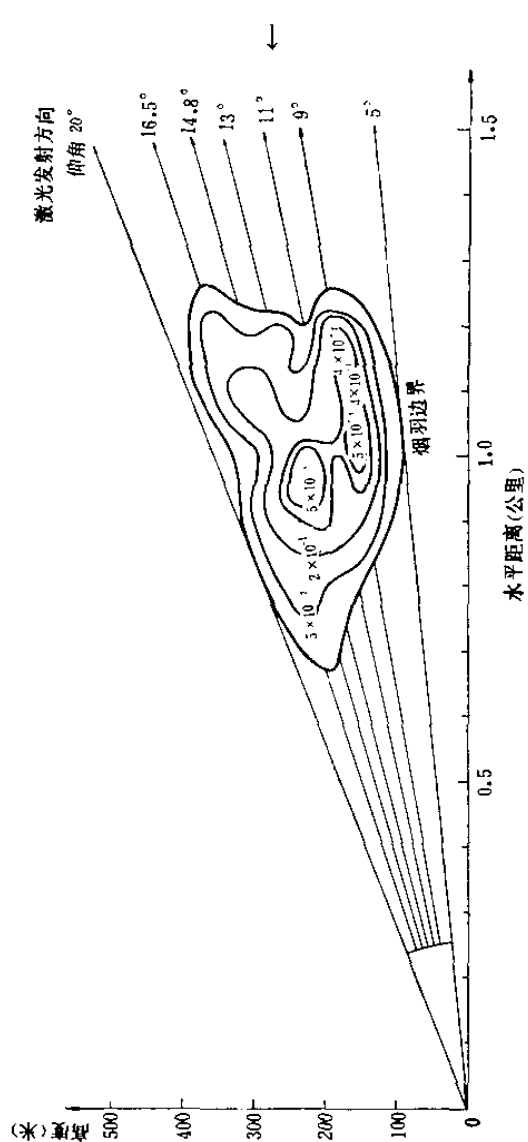
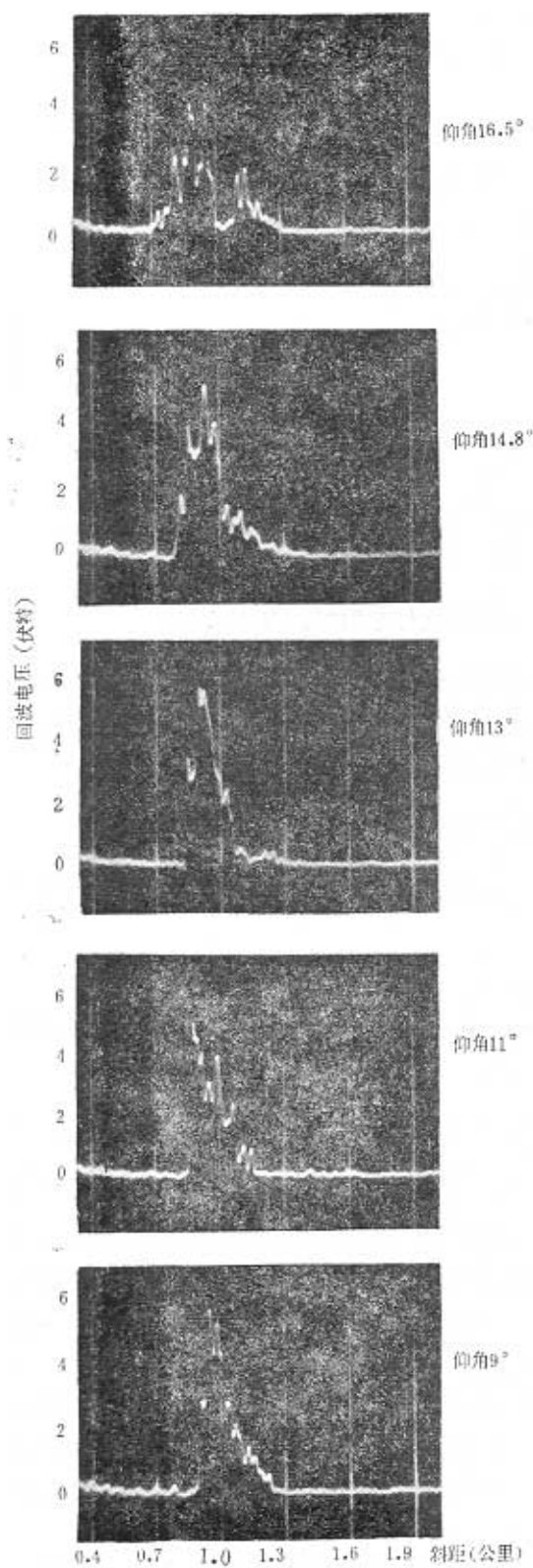
(三) 激光探测初步结果

自5月14日至6月8日,共获得23个 σ_y 的观测数据和21个 σ_z 的观测数据。观测时的大气稳定度判据采用里查逊数

$$R_i = \frac{g \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_d \right)}{T \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (7)$$

式中 $g = 9.8 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2}$ (重力加速度), T 为平均温度,单位 $^\circ\text{K}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$ 为气温递减率,单位 $^\circ\text{K 公里}^{-1}$, $\gamma_d = 10^\circ\text{K 公里}^{-1}$ 为干绝热递减率, $\frac{\partial u}{\partial z}$ 为风速递减率,单位 $\text{米} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{公里}^{-1}$ 。由于所测烟羽轴线高度一般在200—450米附近,而80米高气象观测塔所测风和温度的梯度观测,因受地面影响强烈,通常无法代表烟羽扩散高度的大气状况。因此,激光观测所对应烟羽扩散高度附近的大气稳定度参数里查逊数 R_i ,主要由当地气象台一天4次的探空和测风记录求取。当激光观测与气象台的探空和测风观测时间不一致时,由内插法来获得观测时所对应烟羽扩散高度的里查逊数 R_i ,为可靠起见,有时则以80米气象观测塔每正点观测的风和温度的梯度观测记录作为内插的依据。由于5、6月份该地区大气稳定度的日变化一般不显著,因此所得对应激光观测时,烟羽扩散高度附近的大气稳定度参数里查逊数 R_i 基本可靠。

各次观测时烟羽扩散高度附近的大气稳定度参数里查逊数可分成两类: $1 < R_i < 5$,



← b. 烟羽相对浓度垂直剖面分布
(单位公里 $^{-1}$ ·立体角 $^{-1}$)

← a. 烟羽激光回波波形

图2 6月8日6时46分左右,所测烟羽激光回波波形和烟羽相对浓度垂直剖面分布

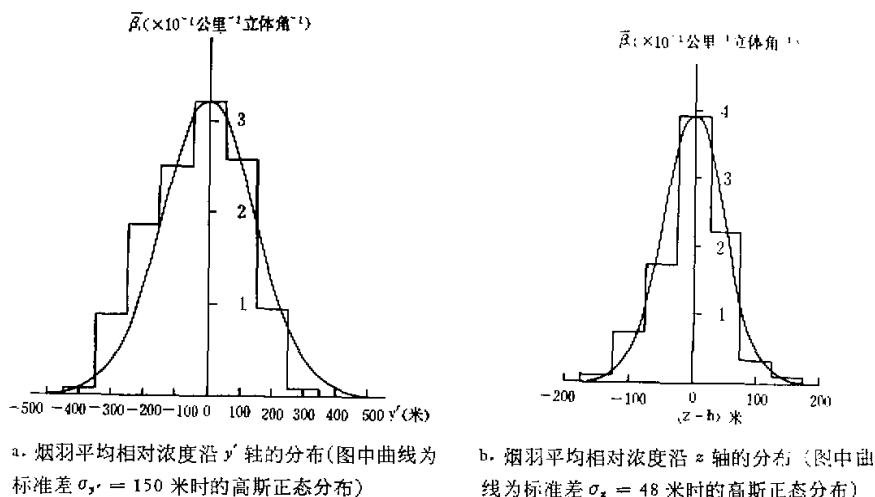


图3 6月8日6时17分至47分,烟羽相对浓度分布的30分钟平均结果及标准差 $\sigma_{y'}$ 和 σ_z

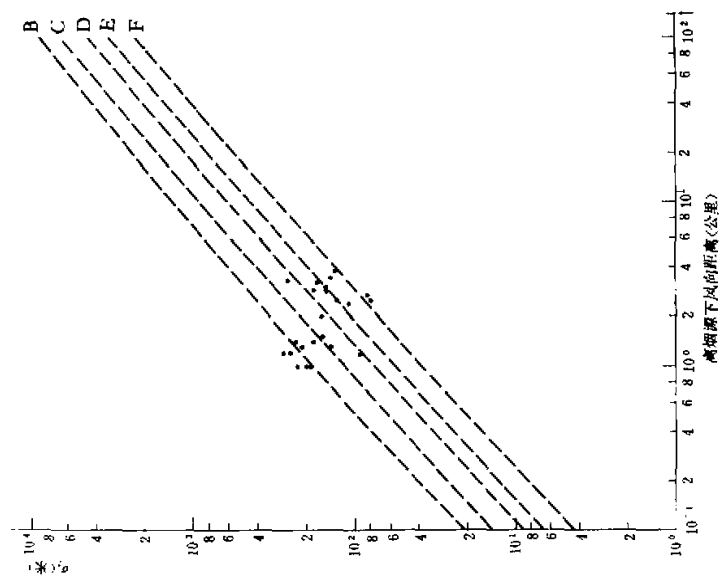
代表大气稳定条件; $-0.5 < R_i < 0.5$, 代表大气稳定度处于近中性条件. 而所测 σ_y 和 σ_z 离烟源下风向的距离则为1公里至4公里左右. 图4为两类大气稳定度条件下, 取样时间为30分时标准差 σ_y 和 σ_z 随距离的变化.

图4还绘出了开阔平原地区 σ_y 和 σ_z 随距离的变化曲线^[9], 取样时间则由原来10分钟订正到30分钟^[10], 曲线按 Pasquill 的大气稳定度分类^[11-12], 其中B代表大气不稳定情况, C代表大气弱不稳定情况, D代表中性稳定度情况, E代表大气弱稳定情况, F代表大气稳定情况.

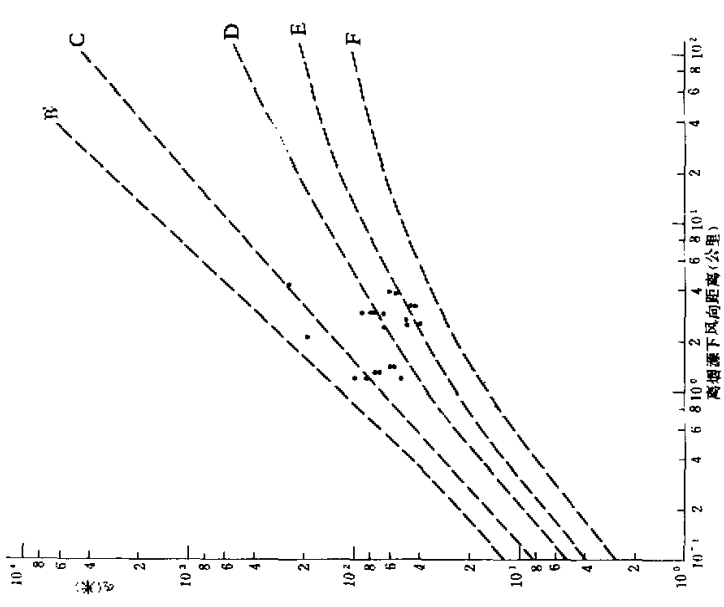
由于观测误差及各次观测时大气稳定度的不同, 使激光实测的 σ_y 和 σ_z 离散较大, 况且所测离烟源下风向距离仅在1至4公里左右的小范围内变化, 因此无法确定 σ_y 和 σ_z 随距离变化的曲线形状, 而仅给出了1—4公里范围内 σ_y 和 σ_z 的平均值.

图4a表明, 大气稳定时激光所测 σ_y 值介于曲线E和F之间并偏于曲线E; 大气为近中性稳定度条件时, 激光所测 σ_y 值则介于曲线B和C之间. 图4b表明, 大气稳定时激光所测 σ_z 值介于曲线D和E之间; 而大气为近中性稳定度条件时, 激光所测 σ_z 值与曲线C相近. 由此可见, 激光所测 σ_y 和 σ_z 一般比开阔地区相应值偏高, 大气稳定时这种差别较小, 当大气为近中性稳定度条件时, 这种差别将增大. 因为大气稳定度参数里查逊数 R_i 是根据位于开阔田野气象台的观测资料求得, 而激光所测某发电厂排放的烟羽, 则在地形略有起伏、工厂林立的工业区上空扩散, 因此不仅地面粗糙度与开阔平原地区不同, 而且由于工厂通过烟气排放, 不断向大气输送热量, 因而大气热力状况也与开阔平原地区有所差异, 这可能是激光所测 σ_y 和 σ_z 比开阔平原地区数值偏高的原因^[13].

由于条件的局限, 未能获得各种大气稳定度条件离烟源下风向距离的变动范围更大时, σ_y 和 σ_z 随距离变化的完整资料, 但激光实测 σ_y 和 σ_z 的初步结果, 对于研究该工业区大气污染的扩散规律, 仍能提供有价值的依据.



a. σ_y 随距离的变化



b. σ_z 随距离的变化

图 4 不同大气稳定度条件下 σ_y 和 σ_z 随距离的变化曲线
(圈、点为激光实测结果, ○ 为中性条件, ● 为稳定条件; 虚线为文献[9]所给结果)

四、结 论

1. 利用激光可以遥测烟粒形状任意、烟粒成分和谱分布稳定不变的工业排放烟羽的相对浓度,从而由烟羽相对浓度垂直剖面分布的激光观测,进一步求取不同天气条件下离烟源下风向一定距离范围内的标准差 σ_y 和 σ_z 这就为研究大气污染扩散规律提供重要依据。

2. 用车载激光雷达或多台激光雷达布点观测,可获得较大范围内 σ_y 和 σ_z 随距离的变化曲线。若激光雷达采用距离平方补偿电路、激光输出能量监测、激光回波波形模数转换和数据自动处理等措施,则能提高探测精度,达到快速、简便而更适用于大气扩散的研究。

参 考 资 料

- [1] E. W. Barrett, O. Ben-Dov, Applications of the lidar to air pollution measurement, *J. Appl. Meteorol.*, 1967, 6(3), pp. 500—515.
- [2] 稻场六男, 小林乔郎, レーザレーダによる 大气汚染の計測, 电子科学, 1971, 第21卷, 第2号, 41—47.
- [3] H. Kildal, R. L. Byer, Comparison of laser methods for the remote detection of atmospheric pollutants, *Proc. IEEE.*, 1971, 59(12), pp. 1644—1663.
- [4] H. Inaba, T. Kobayasi, Laser Raman Radar—Laser Raman scattering methods for remote detection and analysis of atmospheric pollution, *Opto-electronics*, 1972, 4(2), pp. 101—123.
- [5] 激光测烟, 激光在气象探测中的应用, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第1号, 科学出版社, 1973.
- [6] 孙景群, 激光遥测烟、尘, 物理, 1975, 第4卷, 第4期, 204—211.
- [7] D. B. Turner, Workbook of atmospheric dispersion estimates, Chap. 3, Public Health Service, 1969.
- [8] 激光气象探测仪, 激光在气象探测中的应用, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第1号, 科学出版社, 1973.
- [9] F. A. Gifford, Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion, *Nuclear Safety*, 1961, 2(4), pp. 47—51.
- [10] N. G. Stewar, H. J. Gale, R. N. Crooks, The atmospheric diffusion of gases discharged from the chimney of the Harwell reactor BEPO, *Int. J. Air. Poll.*, 1958, 1(1/2), pp. 87—102.
- [11] F. Pasquill, The estimation of the dispersion of windborne material, *Meteorol. Mag.*, 1961, 90(1963), pp. 33—49.
- [12] F. Pasquill, Atmospheric diffusion, London, Van Nostrand, 1962.
- [13] F. Pasquill, Prediction of diffusion over an urban Area—Current practice and future prospects, 3-1—3-26, Proceedings of symposium on multiple-source urban diffusion models (Editor: A. C. Stern), U. S. Environmental Protection Agency, 1970.