



激光探测在大气污染扩散研究中的应用

孙 景 群*

(中国科学院大气物理研究所)

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^[1-3],这就为监视大气污染和研究大气污染的扩散规律,提供了一种可靠、简便而有生命力的遥测新手段。

自1970年以来,我们就积极开展了激光遥测大气污染方面的研究,并在大气污染扩散研究中得到逐步应用。目前,利用红宝石脉冲激光雷达,可以遥测人造烟羽浓度,特定工业排放烟羽的相对浓度,大气扩散参数,大气尘埃,烟、尘郁积层以及烟羽上升轨迹。

本文将综述激光探测的基本原理和观测实例,扼要介绍红宝石激光雷达的工作原理和进行激光回波定量分析所满足的光雷达方程。

二、激光雷达和光雷达方程

1. 激光雷达

观测所用的红宝石激光雷达是我所研制的第III型。图1为其原理方框图。

红宝石激光雷达主要由发射系统和接收系统两大部分组成。发射系统包括激光器和发射望远镜。激光光束在大气中传播时,遇大气分子、气溶胶粒子、烟羽等目标物,将产生散射,其中部分能量返回激光雷达,被接收系统所接收。接收系统主要由接收望远镜、光电倍增管及显示器三部分组成。接收望远镜以一定的视场角接收目标物的后向散射光信号,并通过与中心波长相同的干涉滤光片,滤去背景光,提高信噪比。然后由光电倍增管把光信号转变为电信号,再经放大在示波器荧光屏上以振幅-时间描述显示出来,供分析使用。表1列出激光雷达的主要性能。

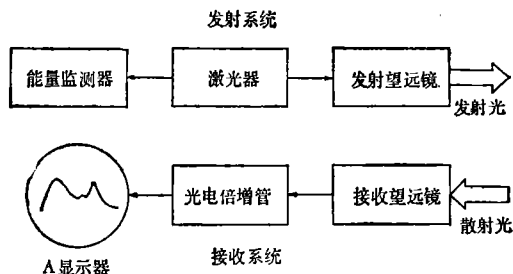


图1 激光雷达原理方框图

2. 光雷达方程

激光雷达发射的激光光束,在传播路径上遇到观测目标物时,发生散射、吸收等过程。在

* 参加本工作的有周诗健、陶丽君、杨明和黄其荣等同志。

表 1 激光雷达基本性能

发 射 系 统		接 收 系 统	
工作物质	红宝石	接 收 孔 径	6 厘米
激光波长	6943 埃	视 场 角	2 毫弧度
发射能量	1 焦耳	干 涉 滤 光 片	中心波长: 6943 埃, 带宽: 30 埃
发射功率	25 兆瓦	光 电 倍 增 管	EMI 9558B
调Q方式	隐花菁乙醇溶液	显示器灵敏度	1 毫伏特/厘米
冷却方式	红宝石和聚光器循环水冷	显示器动态范围	0—1 伏特
重复频率	10 次/分	显示器扫描速度	0.1、0.3、0.5、1.0、2.0 公厘/厘米
发 射 角	1.7 毫弧度	显示器扫描时延	共 10 档, 每档步进 0.5 公厘

这些物理过程中发出的子波又反向返回, 被激光雷达所接收, 并在显示器上显示出回波波形来。对于发射系统和接收系统非同轴的脉冲激光雷达, 激光回波信号满足普遍的光雷达方程:

$$\begin{cases} V(R) = \frac{C_A \beta(R)}{R^2} e^{-2} \int_0^R \sigma(r) dr \\ C_A = \frac{A E_0 C \chi \eta(R) k r_0}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$V(R)$ 为距离 R 处的激光回波电压(伏特);

C_A 为光雷达仪器常数(伏特·公里³·立体角), 它由激光雷达的发射系统和接收系统的技术指标而确定;

$\beta(R)$ 为距离 R 处的被测目标物的体后向散射截面(公里⁻¹·立体角⁻¹);

R 为离观测点的距离(公里);

r 为距离变量;

$\sigma(r)$ 为距离 r 处的传输介质的消光系数(公里⁻¹)。

在仪器常数 C_A 的表式中:

A 为接收望远镜的有效截面(公里²);

E_0 为激光发射总能量(焦耳);

C 为光速(公里·秒⁻¹);

$\eta(R)$ 为距离 R 处的充满系数, 它是接收视场角与发射光束相交截面的激光能量与激光发射总能量之比, $\eta(R) \leq 1$, 无因次量, 随距离改变;

χ 为接收望远镜的光学透过率, $\chi < 1$, 无因次量;

k 为光电倍增管的灵敏度(安培·瓦⁻¹);

r_0 为光电倍增管的负载电阻(欧姆)。

光雷达方程表明, 仪器常数愈大, 探测距离愈近, 被测目标物的体后向散射截面愈大, 而传输介质的消光系数愈小(即传输介质对激光的衰减愈小), 则回波信号愈强。反之亦然。

三、激光遥测人造烟羽浓度

利用人造烟羽作为示踪物质, 观测它的扩散规律, 是研究大气污染扩散的常用实验手段。探测人造烟羽浓度的分布, 可以确定在不同天气条件下模拟大气污染物的稀释程度和安全区

域的范围。这对山区厂矿建设的合理布局、烟气排放高度等提供十分有价值的依据。此外,人造烟羽浓度的探测还能进一步推算出大气扩散参数,这对研究点源和多源扩散的规律,估计地面大气污染浓度的分布,都是极为重要的。

当烟粒形状任意(或晶轴取向任意),光学折射率和烟羽粒度分布确定不变,在烟羽不太浓的情况下,即满足一次散射和独立散射条件下,则有:

$$\begin{cases} \beta_{sa}(R) = C_1 N_{sa}(R) \\ \sigma_{sa}(r) = C_2 N_{sa}(r) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$\beta_{sa}(R)$ 、 $\sigma_{sa}(r)$ 分别为人造烟羽的体后向散射截面和消光系数;

$N_{sa}(R)$ 为人造烟羽浓度(个·米⁻³);

C_1 、 C_2 为比例常数。

将(2)式代入光雷达方程(1),可得人造烟羽激光回波电压 $V_{sa}(R)$ 与烟羽浓度的关系式:

$$V_{sa}(R) = \frac{C_A C_1 N_{sa}(R)}{R^2} e^{-2 \int_0^R [\sigma_a(r) + C_2 N_{sa}(r)] dr} \quad (3)$$

式中 $\sigma_a(r)$ 为大气消光系数,可用激光实测^[4]。若事先测定仪器常数 C_A ^[5,6],并由实验确定常数 C_1 和 C_2 ,于是由人造烟羽激光回波电压,就可获得激光穿透路径上的烟羽浓度分布^[7]。

所采用的人造烟剂由三种物质混合组成:生烟剂氯化铵 NH_4Cl ,按重量比占30%,折射率为1.642,比重为1.53;燃烧剂蒽 $\text{C}_{10}\text{H}_{14}$,占40%,比重为1.25;助燃剂氯酸钾 KClO_3 ,占30%。燃烧时产生大量取向任意的单晶状氯化铵烟羽,同时掺杂了部分未燃烧的蒽和其他物质,所以烟羽呈乳黄色。大量实验表明,烟粒直径集中在1—2微米之间,

并且不随时间、距离和烟羽浓度而变。因此基本满足折射率和粒度分布稳定的条件。实验测定 $C_1 = 2.5 \times 10^{-19}$ 公里²·立体角⁻¹; $C_2 = 6 \times 10^{-18}$ 公里², $C_A = 2.0 \times 10^1$ 伏特·公里³·立体角。

图2为人造烟羽浓度分布的观测实例。

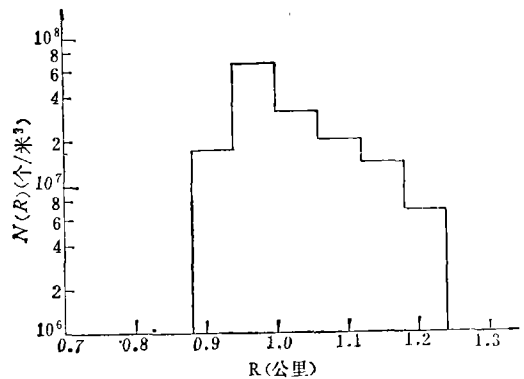


图2 人造烟羽浓度观测实例

四、激光遥测工业烟羽浓度

工业烟羽排放稳定、持续,有利于进行激光探测。激光探测工业烟羽浓度,可以获得工业排放烟羽的动态分布。这不仅有利于实际监视烟羽的稀释情况,而且还能进一步获得大气扩散参数,定量研究不同天气条件下大气污染的扩散规律。

探测工业排放烟羽的浓度,同样要求烟粒形状任意,光学折射率和粒度分布比较稳定,以及一次散射,独立散射等条件。但因无法类似于探测人造烟羽浓度那样用实验方法确定烟羽的光学系数,因此给实际探测带来一定的困难。但在上述条件下,可引入关系式:

$$\sigma_s(r) = k_s \beta_s(r) \quad (4)$$

式中 k_s 为常数, $\sigma_s(r)$ 和 $\beta_s(r)$ 分别为工业烟羽的消光系数和体后向散射截面. 将上式代入光雷达方程 (1), 可得 $\beta_s(R)$ 的解析表式^[8].

$$\beta_s(R) = \frac{R^2 V_s(R) e^{2 \int_{R_1}^R \sigma_a(r) dr}}{C_A e^{-2 \int_0^{R_1} \sigma_a(r) dr} - 2 k_s \int_{R_1}^R r^2 V_s(r) e^{2 \int_{R_1}^r \sigma_a(r') dr'} dr} \quad (5)$$

式中 $\sigma_a(r)$ 为大气消光系数, $V_s(R)$ 为工业烟羽激光回波电压, R_1 为烟羽近边界斜距. 若能利用激光遥测方法, 获得系数 k_s , 则由烟羽激光回波波形, 利用 (5) 式求取激光穿透路径上烟羽体后向散射截面 $\beta_s(R)$.

对于较为稀薄的烟羽, 一次散射和独立散射条件成立, 于是工业烟羽浓度 $N_s(R)$ 正比于烟羽体后向散射截面 $\beta_s(R)$, 即

$$N_s(R) = \xi \beta_s(R) \quad (6)$$

式中 ξ 为比例常数. 这样, 通过激光探测烟羽的体后向散射截面 $\beta_s(R)$, 就能获得烟羽的相对浓度. 如果与其他测烟浓度的方法事先作对比观测实验, 就能进一步获得烟羽绝对浓度的分布.

测烟方程 (5) 式中的常数 k_s , 可用烟羽和大气的激光回波波形求取. 这时可得到烟羽近边界 R_1 处和远边界 R_2 处的大气激光回波电压值 $V_a(R_1)$ 和 $V_a(R_2)$ 所满足的光雷达方程 (见图 3)

$$V_a(R_1) = \frac{C_A \beta_a(R_1)}{R_1^2} e^{-2 \int_0^{R_1} \sigma_a(r) dr} \quad (7)$$

$$V_a(R_2) = \frac{C_A \beta_a(R_2)}{R_2^2} e^{-2 \int_0^{R_2} [\sigma_a(r) + \sigma_s(r)] dr} \quad (8)$$

若激光水平发射, 则在大气水平平均一假设下, 有等式

$$\beta_a(R_1) = \beta_a(R_2) \quad (9)$$

于是由方程 (7) — (9) 求得烟羽消光系数的积分值

$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_s(r) dr = \frac{1}{2} \ln \frac{R_1^2 V_a(R_1)}{R_2^2 V_a(R_2)} - \int_{R_1}^{R_2} \sigma_a(r) dr \quad (10)$$

再将方程 (4) 和 (5) 代入上式, 化简后得方程组

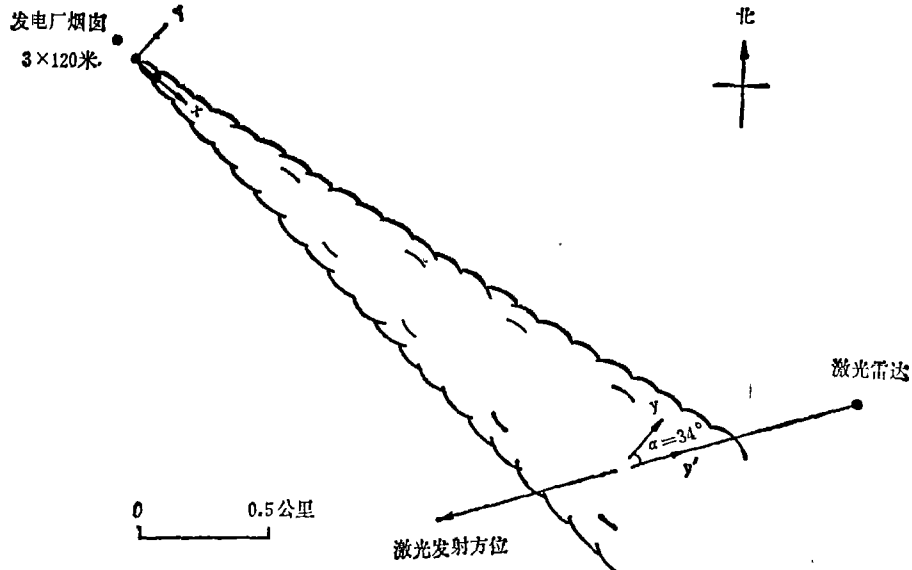
$$F_1(k_s) = F_2(k_s) \quad (11)$$

$$F_1(k_s) = \frac{1}{k_s} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{R_1^2 V_a(R_1)}{R_2^2 V_a(R_2)} - \int_{R_1}^{R_2} \sigma_a(r) dr \right] \quad (12)$$

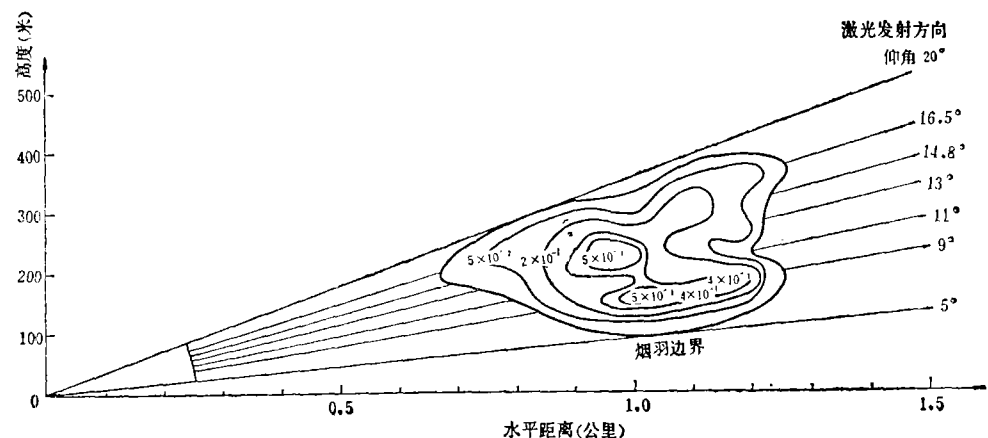
$$F_2(k_s) = \int_{R_1}^{R_2} \frac{r^2 V_s(r) e^{2 \int_{R_1}^r \sigma_a(r') dr'}}{C_A e^{-2 \int_0^{R_1} \sigma_a(r) dr} - 2 k_s \int_{R_1}^r r'^2 V_s(r') e^{2 \int_{R_1}^{r'} \sigma_a(r'') dr''} dr'} dr \quad (13)$$

式中 r 、 r' 和 r'' 均为距离变量. 于是由大气和烟羽的激光回波波形, 分别利用 (12) 和 (13) 式, 求得以 k_s 为变量的函数 $F_1(k_s)$ 和 $F_2(k_s)$, 用图解法求得满足 (11) 式的系数 k_s .

我们选取某发电厂排放的烟羽作为遥测对象,该厂用直径大都小于 88 微米的煤粉悬浮燃烧,燃烧后的烟气经过两级消烟除尘处理,这时约有 85% 的烟粒沉降下来。最后由烟囱口排放到大气中的烟羽大多由颗粒较小、不易沉降的烟粒所组成,呈灰白色。估计烟羽在离烟源一公里以外,烟粒的光学折射率和粒度分布应较为稳定。这样,烟羽的消光系数 $\sigma_s(r)$ 和烟羽体后向散射截面 $\beta_s(r)$ 的比值 k_s 应为一稳定常数。激光实测结果表明 $k_s = 8.2$ 立体角,其或然误差为 19%。于是,由激光遥测烟羽的回波波形,根据式 (5) 就能推算出激光穿透路径上烟羽的体后向散射截面,即烟羽的相对浓度。图 4 为激光实测烟羽相对浓度的垂直剖面分布。



a. 激光发射方位和烟羽扩散平面示意图



b. 烟羽相对浓度的垂直剖面分布

图 4 特定工业烟羽相对浓度的观测

五、激光探测大气扩散参数

大气扩散参数是估算大气污染空间分布的一个重要参数。

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。于均匀湍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:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (14)$$

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(克·米⁻³); Q 为源强(克·秒⁻¹); σ_y 和 σ_z 为高斯分布的标准差,与大气稳定性、离烟源下风向距离以及取样时间有关,(公里); $\bar{u}$ 为平均风速(米·秒⁻¹); $h = h_0 + \Delta h$ 为烟轴高度, h_0 为烟源高度(即烟囷口高度),而 Δh 为烟羽上升高度,单位均取公里。

当烟羽尚未接地前,(14)式可略去像源项而简化为

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (15)$$

当源强 Q 和平均风速 $\bar{u}$ 已知时,如能进一步获得标准差 σ_y 和 σ_z ,则由(14)或(15)式就能估算出大气污染物的空间分布。

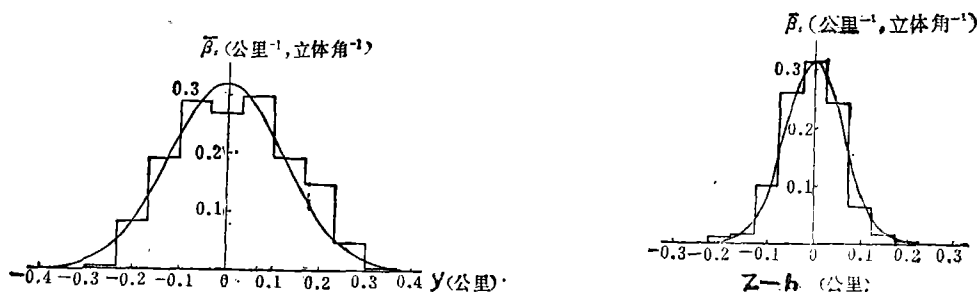
利用激光探测工业排放烟羽相对浓度垂直剖面分布,在烟羽尚未接地前,可由下式计算标准差^[9]。

$$\sigma_y^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y^2 \bar{\beta}_i(x, y, h) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{\beta}_i(x, y, h) dy} \quad (16)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (z-h)^2 \bar{\beta}_i(x, 0, z-h) dz}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{\beta}_i(x, 0, z-h) dz} \quad (17)$$

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

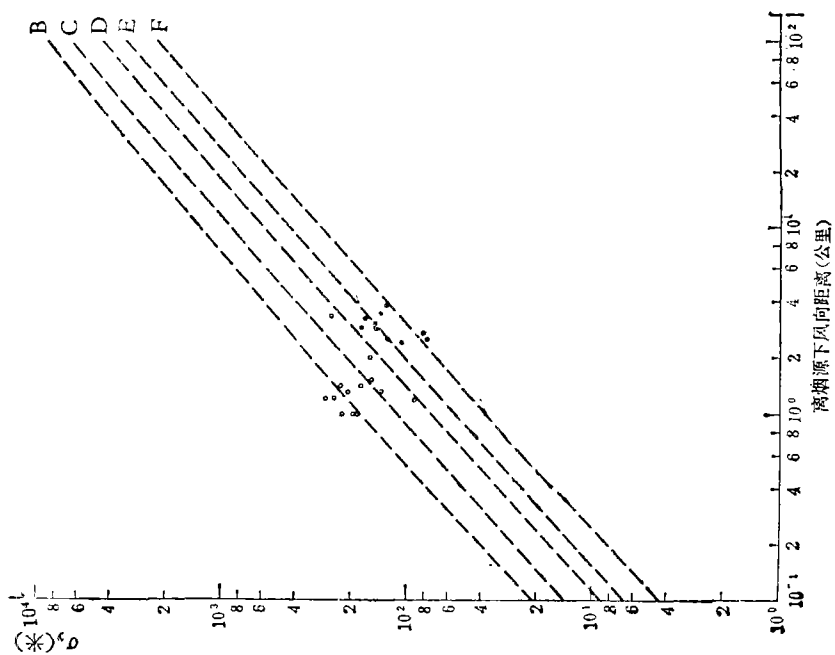
图5为大气稳定条件下,离烟源下风向距离为3.9公里处,由烟羽相对浓度垂直剖面分布的30分钟平均结果求取 σ_y 和 σ_z 的观测实例。



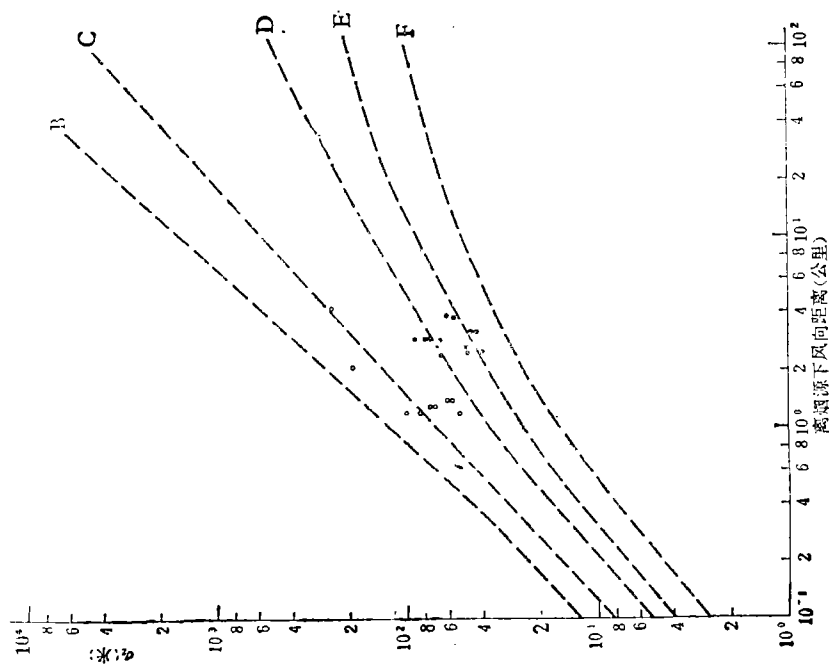
a. 实例烟羽相对浓度沿 y 轴的分布(图中曲线为 $\sigma_y = 1.2 \times 10^{-1}$ 公里时的高斯分布)

b. 烟羽相对浓度沿 z 轴的分布(图中曲线为 $\sigma_z = 6.2 \times 10^{-2}$ 公里时的高斯分布)

图5 烟羽相对浓度沿 y 和 z 轴变化的30分钟平均结果



a. σ_y 随距离的变化



b. σ_z 随距离的变化

图 6 不同大气稳定度条件下 σ_y 和 σ_z 随距离的变化曲线

图 6 则绘出了地形略有起伏的某工业区,在两类稳定度条件下,取样时间为 30 分时 σ_y 和 σ_z 随距离变化的激光观测结果。由于观测误差和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,并且由于条件限制,所测离烟源下风向距离仅在 1—4 公里的小范围内变化,因此无法确定 σ_y 和 σ_z 随距离变化的曲线形状,而仅绘出 1—4 公里范围内 σ_y 和 σ_z 的平均值。

图 6 还绘出了开阔平原地区 σ_y 和 σ_z 随距离的变化曲线^[10],图中曲线 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。

图 6a 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 6b 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。

六、激光遥测大气尘埃

大气尘埃来自自然尘埃、工业排放的烟灰和工业生产中的粉尘。其成份除二氧化硅外,还含有对人体有害的重金属和致癌物质等。特别是一些直径小于 10 微米的飘尘,容易随呼吸进入人体,危害人体健康。因此,大气尘埃亦成为监视大气污染的常规观测项目。

激光探测大气尘埃与激光探测工业烟羽相类似,由激光雷达所接收的大气尘埃回波波形,获得激光穿透路径上大气尘埃消光系数 $\sigma_d(R)$ 的分布^[11]。

在低层大气,激光回波波形主要是大气尘埃对激光后向散射光的贡献,而大气分子的作用可以忽略不计。因此,大气尘埃消光系数 $\sigma_d(r)$ 就直接与大气透明度有关,距离为 R 的大气透明度 T 可表示为

$$T = e^{-\int_0^R \sigma_d(r) dr} \quad (18)$$

于是激光探测大气尘埃消光系数的分布,就能得到大气混浊状况的空间动态分布。

大气尘埃的激光回波波形,遵循含有大气尘埃消光系数 $\sigma_d(R)$ 和大气尘埃体后向散射截面 $\beta_d(R)$ 的光雷达方程(1)。若引入关系式

$$\sigma_d(R) = k_d \beta_d(R) \quad (19)$$

代入光雷达方程,即可解得大气尘埃消光系数的解析表式

$$\sigma_d(R) = \frac{k_d V_d(R) R^2}{C_A - 2k_d \int_0^R V_d(r) r^2 dr} \quad (20)$$

式中 k_d 为常数,可在每次观测时,由激光实测大气尘埃的平均消光系数和平均体后向散射截面之比而求得^[4]。于是,由大气尘埃的回波波形,以及激光实测的平均常数值 k_d ,根据式(20)经数值计算,就能获得激光穿透路径上大气尘埃消光系数的分布。若激光雷达保持水平方向

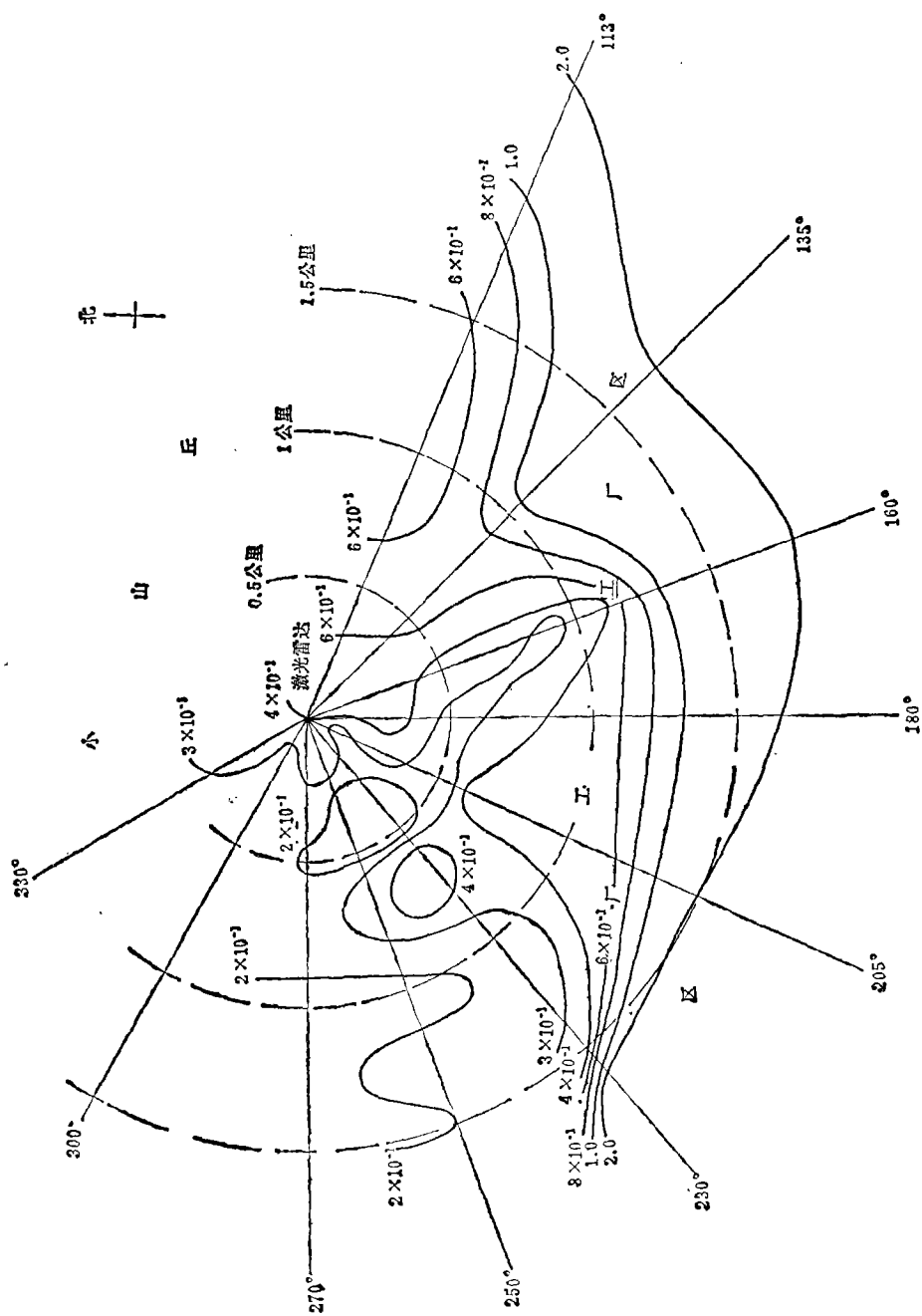
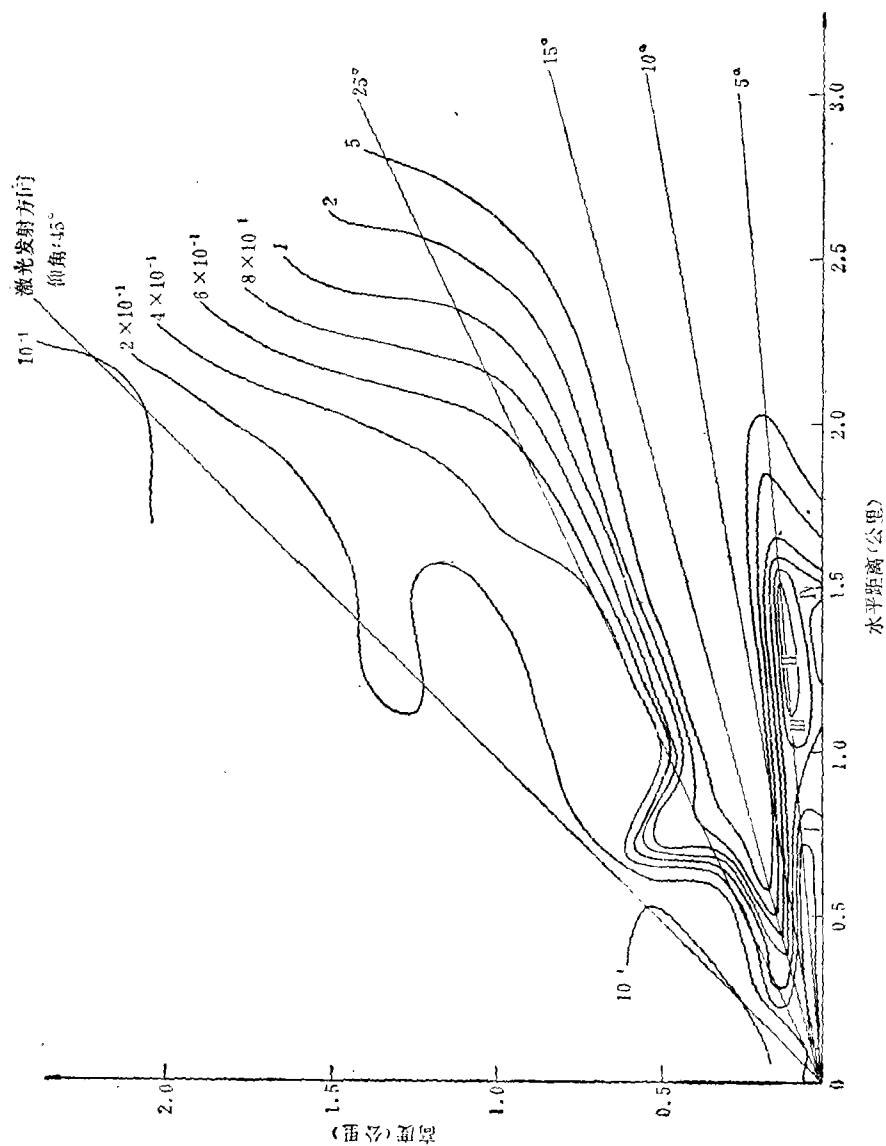


图7 大气尘埃消光系数空间分布的观测实例



b. 正南方向垂直剖面分布

I. 2×10^{-1} II. 4×10^{-1} III. 6×10^{-1} IV. 8×10^{-1}

图7 大气尘埃消光系数空间分布的观测实例(单位: 公里)

不变,而以不同方位发射一组激光,即可得到大气尘埃消光系数的平面分布图。若激光雷达方位不变,而以不同仰角发射一组激光,则能获得大气尘埃消光系数的垂直剖面图。若不同时刻进行大气尘埃消光系数的观测,则能得到大气混浊状况的空间动态分布。

图 7 为激光遥测某工业区,能见度较好时大气消光系数的水平分布和正南方向的垂直剖面分布。

如果大气尘埃的密度、光学折射率和粒子粒度分布都稳定不变,则大气尘埃的消光系数正比于大气尘埃的浓度。若能通过与其他探测大气尘埃浓度的方法作对比观测,就能确定大气尘埃消光系数与大气尘埃浓度之间的比例系数,从而可以由激光直接遥测大气尘埃浓度的时、空分布。然而这种理想条件实际上是不能经常满足的,因此,直接定量探测大气尘埃的浓度,在原理上还有一定局限性。

七、激光遥测烟、尘郁积层

在烟、尘丰富的工业区,当地层大气较稳定时,工业区大量排放的烟、尘往往郁积在大气近地层不散,而形成烟、尘郁积层。利用激光可以获得烟、尘的后向散射回波波形,激光回波幅度与烟尘浓度密切相关。在一般情况下,激光回波幅度随高度迅速衰减,如果近地层大气中形成烟、尘郁积层时,则此处的烟、尘浓度可以大大超过其低层浓度,这时激光回波在此高度就往往出现峰值,而在烟、尘郁积层的上界,则出现激光回波幅度急剧减小。由此可定性探测在稳定天气条件下,烟、尘郁积层的实际分布和郁积层的高度。这对了解烟、尘的扩散实况和演变,提供了一种快速、简便的遥测手段^[12]。

图 8 即为烟、尘郁积层的观测实例。图中表明,观测时近地面大气形成一厚约 210 米的逆温层,该层的温度梯度为 $15^{\circ}\text{C}/\text{公里}$,稳定度参数里查逊数 $R_i \approx 4$,大气稳定。而激光所测回波幅度在低层很大,这说明低层烟、尘大量郁积,而激光回波幅度第一次急剧减小的高度则与此逆温层高度基本一致。从 210 米左右到 1 公里高,气温虽随高度缓慢递减,但大气稳定度参数里查逊数 $R_i > 10$,大气仍然处于稳定状态。此时激光回波幅度在 270 米左右出现峰值,这说明烟、尘在此高度附近出现第二郁积层,而激光回波幅度在 400 米左右急剧减小,这说明烟、尘主要郁积在此高度以下,很难扩散到高层去。

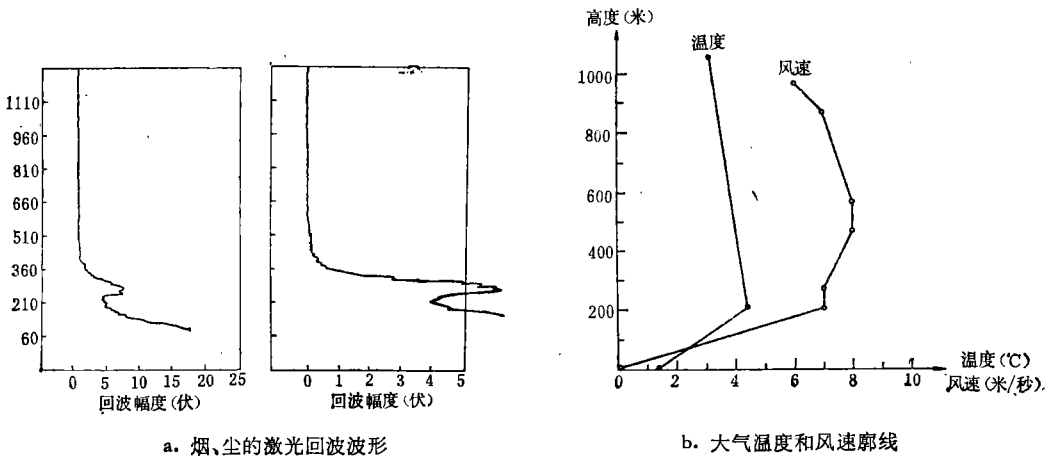


图 8 烟、尘郁积层的激光观测

八、激光遥测烟羽上升轨迹

根据激光探测工业烟羽烟轴处的回波波形,可以得到激光穿透路径上烟羽的宽度和烟道轴心离观测点的斜距,再利用激光雷达的方位角和仰角,就能求得所测烟羽在三维空间中的位置。若探测烟羽不同部位,就能获得烟羽上升轨迹。

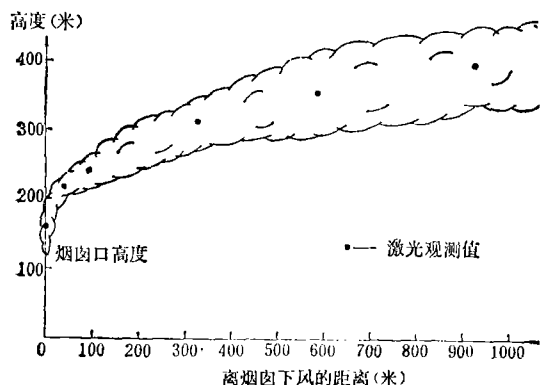


图9 烟羽上升轨迹和烟道宽度的观测实例

激光探测烟羽上升轨迹,可以提供不同天气条件下烟羽的上升高度。探测烟羽上升高度,配合其它气象资料,可以验证烟羽上升高度的理论公式^[13],这对合理设计烟囱高度是很重要的。此外,烟羽上升高度又是正确估计地面大气污染浓度的重要参数,这对大气污染分布实况的估计,或预报大气污染的扩散都十分有用。

图9为激光实测某工厂120米高烟囱所排放烟羽的上升轨迹及烟道宽度。

九、结 束 语

利用红宝石脉冲激光雷达,可以遥测人造烟羽浓度,特定工业排放烟羽的相对浓度,大气扩散参数,大气尘埃的消光系数,烟、尘郁积层以及烟羽上升轨迹等。这就为研究大气污染扩散规律,提供一种可靠、简便的遥测新手段。如能进一步提高激光雷达重复频率,方位、仰角自动控制,并采用模数转换及配置专用计算机,则可快速获取观测结果,而更适合于实际应用。

应用激光探测大气污染及其扩散,探测灵敏度高,可进行单点遥测,能可靠、简便地获得所需的结果,具有多方面的实用价值。激光不仅可以遥测烟、尘等,根据大气污染物对光的吸收、拉曼散射以及共振吸收、共振散射等光学效应,还能进一步利用激光鉴别大气污染物的成分,遥测大气污染物浓度的时、空分布。因此,激光在遥测大气污染方面具有很大潜力。

参 考 资 料

- [1] R. L. Byer, Opt. Quan. Electronics, 7, 147 (1975).
- [2] V. E. Derr, Remote Sensing of Troposphere, Chap. 24, 1972.
- [3] P. L. Hanst, Appl. Spectroscopy, 24, 161 (1970).
- [4] 中国科学院大气物理研究所, 激光测定消光系数及其在能见度探测上的可能应用, 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, 第一号, 1973.
- [5] F. F. Hall, H. Y. Ageno, Appl. Opt. 9, 1820 (1970).
- [6] 孙景群, 激光气象雷达, 气象, 第三期, 1975.
- [7] 中国科学院大气物理研究所, 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, 第一号 1973.
- [8] 孙景群等, 激光遥测烟羽浓度, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第五号(待发表).
- [9] 孙景群等, 激光探测大气扩散参数, 大气科学, 第一期, 1977.
- [10] F. A. Gifford, Nuclear Safety, 2, 47 (1961).
- [11] 孙景群等, 激光遥测大气尘埃, 激光(待发表).
- [12] 孙景群、杨明, 烟、尘郁积层的激光探测, 《大气科学》, 第二期, 1977.
- [13] P. M. Hamilton, Atmos. Environment, 1, 379 (1967).