

激光探测沙暴过程中的气溶胶消光系数分布

邱金桓 赵燕曾 汪宏七*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文基于光波与气溶胶质点相互作用的弹性理论,根据激光雷达大气回波信息,讨论了1982年5月上旬北京地区接连两次出现的沙暴过程的气溶胶消光系数分布特征。

一、引 言

北京地区的春季几乎年年遭受沙暴的侵害,研究春季沙暴过程中的气溶胶光学特性对于了解沙暴期间大气气溶胶浓度变化及其对气候的影响都很有意义。周明煜等人曾用直接取样测量的方法,研究了1980年4月18日下午袭击北京的一次强沙尘暴过程^[1],分析了气溶胶的化学成分及其谱分布,讨论了气溶胶在大气中的长距离输送与气象条件之间的依赖关系。自从六十年代激光雷达问世以来,激光雷达已被广泛用于遥感大气气溶胶的光学特性^[2]。本文主要叙述了激光遥测沙尘暴过程中气溶胶光学特性的初步实验。在1982年5月上旬接连两次出现的沙暴过程中,我们应用激光雷达,连续观测沙暴过程中的激光大气回波,取得了气溶胶消光系数分布、水平能见度等信息,讨论了这些物理量在沙暴过程中的变化特点及其与天气条件的依赖关系。

二、实验与气象背景

实验采用了由大气所研制的染料调Q红宝石IV型激光雷达,激光波长为6943 Å,发射能量为0.9焦耳,雷达配有TRIS-80微型计算机自动数据处理系统,可把激光大气回波信息存入磁盘或直接计算水平能见度和消光系数分布等信息。

观测在北京北郊本所办公楼五楼平台上进行。

两次沙暴分别于1982年5月2日和5日袭击北京地区,并且都是由于蒙古低压的向南移动伴随着冷空气的南侵引起的。根据国家气象局的气象资料,5月1日,蒙古低压直接南移,偏北气流很强,2日上午,沙暴区域的外缘掠过北京。根据北京气象台的探空资

1982年11月13日收到修改稿。

* 伍少明、金惠淑、黄其荣、胡裕良等也参加了部分工作。

料, 2 日 2 时, 北京地区的边界层内, 形成了一个逆温层顶约为 900 米的逆温层, 8 时以后, 逆温消失。并于下午两点, 近地层 1 公里内, 温度的垂直递减率约为 $11.4^{\circ}\text{C}/\text{公里}$, 大气边界层变得很不稳定, 对流层内的风速变化则更加复杂而又激烈。2 日上午, 无论是地面风速, 还是高空风速都有加大的趋势, 但高空风速的加大更加激烈, 如在 7 公里高度, 从 2 时至 14 时, 水平风速已从每秒 18 米增加到每秒 37 米。下午, 正北方向下来的冷空气经过北京, 地面的风速急剧增大, 14 时以后, 高达每秒 11 米, 但是 3 公里以上的高空风速反而大大变小了, 如在 7 公里高空, 从 2 日 14 时至 20 时, 水平风速已从每秒 37 米减为每秒 4 米, 而且这种状况一直持续到 3 日上午。3 日上午, 沙暴越过南京、上海到达长沙、南昌一线, 并于下午袭击日本。地面和 500 毫巴的天气图表明, 5 月 3 日, 贝加尔湖一带再度形成了一个低压中心, 并于 5 月 4 日 20 时左右, 槽区移至内蒙锡林浩特一带, 此时, 宁夏、内蒙一带是大风区, 地面沙暴中心处于银川偏北, 此后, 沙暴先向东, 继而向南移动袭击北京地区, 5 月 5 日 4 时以后, 北京地区地面风速迅速增大, 整个天空渐呈黄色, 约于 16 时左右, 空中的尘土向下飘落, 地面水平能见度降至 2 公里左右, 太阳的直接光强很弱, 表明整个大气柱的光学厚度已经变得很大, 这次沙暴较之 5 月 2 日的对于北京地区的影响更为严重。

三、观测结果和讨论

(1) 基本公式 光雷达方程为

$$V(R) = \frac{C_A \beta_{\pi}(R)}{R^2} e^{-2 \int_0^R \sigma(R') dR'}, \quad (1)$$

式中, $V(R)$ 为距离 R 处的大气激光回波强度, C_A 为仪器常数, $\beta_{\pi}(R)$ 和 $\sigma(R)$ 分别为体积后向散射系数和消光系数。

在大气水平均一、消光系数与体积后向散射系数之比不随高度改变的条件下, 从方程 (1) 可以求得消光系数分布以及积分光学厚度 $\tau(R)$ 如下^[3]:

$$\sigma(R) = V(R) R^2 / \left[C_A \beta_{\pi 0} / \sigma_0 - 2 \int_0^R V(R') R' dR' \right], \quad (2)$$

$$\tau(R) = \int_0^R \sigma(R') dR', \quad (3)$$

(2) 式中, $\beta_{\pi 0}$ 和 σ_0 分别为地面的体积后向散射系数和消光系数, 两者以及水平能见度 V_L 均可通过激光水平探测求得^[3]。

(2) 消光系数的垂直分布 根据大气激光回波, 由方程 (1) 我们所计算的 5 月 2 日和 5 日的消光系数垂直分布见图 1 和图 2。

从图 1 看, 约从 5 日 10 时开始, 近地层 1 公里以内, 消光系数逐渐增大, 约在 15 时以后, 增大得更加激烈, 并在 16 时左右达到极大, 此时消光系数要比 7 时 54 分消光系数增大一个数量级左右。再从图 3 看, 从 6 时至 14 时, 地面至 1.03 公里高度的积分光学厚度变化虽然较小, 但趋于增大, 从 14 时以后, 增大很快, 并于 16 时左右具有一个较尖锐的极大峰, 其极值要比 6 时时增大 7 倍多; 相反, 水平能见度在 16 时时存在一个极小值。这

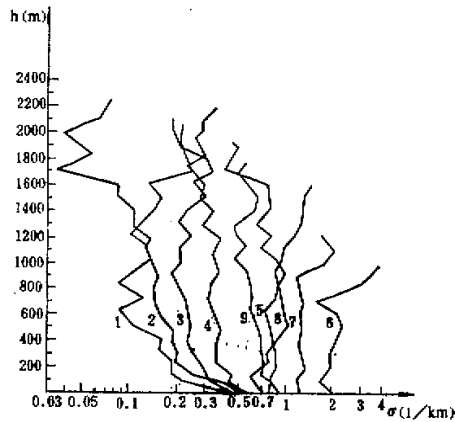


图1 5月5日消光系数垂直分布

1, 5:24; 2, 7:54; 3, 10:07; 4, 10:56; 5, 15:00; 6, 16:00; 7, 17:20;
8, 19:56; 9, 21:36

都充分说明了14时以后近地层气溶胶粒子的大量增多,这个结果与我们观察到的天空现象是相吻合的。5日14时以后,整个天空渐渐变黄,16时左右,尘土向下飘落,导致近地层气溶胶粒子的大量增多。17时以后,消光系数开始变小,至晚上10点,地面至1.03公里高度的积分光学厚度已从17时的1.2减为0.68,次日8时,减为0.19,近地层内气溶胶粒子浓度大大减少了。

再看图2,在2日上午从9时至11时,地面至2公里高度范围内,消光系数也具有一个不断增大的变化过程,在1.2公里以上,平均增大5倍以上。

根据周明煜等人的工作^[3],当沙尘暴于1980年4月18日下午袭击北京地区时,地面风速很小,高空气流很强,由于逆温的存在阻止了高空尘沙的向下输送,使得天顶变黄,而地面比较平静。在5月2日和5日的沙尘暴过程中,对流层的风场具有类似的情况,即在2日上午和5日下午,地面风速并不很大,(见图4),但是高空风速很大,如在5公里高度,5日2时,风速为21米/秒,14时增为46米/秒,这都说明了很强的高空气流能够携带尘土进行远距离的输送。大气的温度层结又与1980年4月18日下午的情况明显不同,根据北京气象台8时和14时以及5日14时和20时的探空资料,从地面至4公里高空,并无逆温层存在,因此高空的尘沙能够向下输送。

综上所述,气溶胶的远距离输送与天气条件具有密切的关系,2日上午和5日下午北

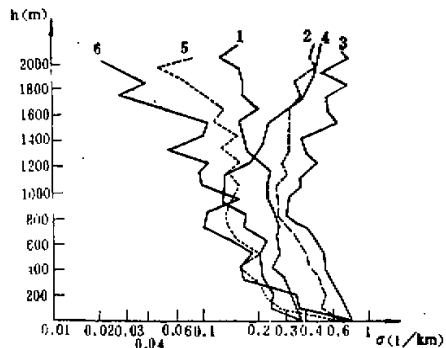


图2 5月2日消光系数垂直分布

1, 9:00; 2, 10:07; 3, 11:00; 4, 11:55;
5, 16:55; 6, 17:43



图3 能见度和光学厚度的日变化

—: $\tau(\lambda = 1030\text{m})$, ---: V_L .

京地区边界层内消光系数的迅速增大主要是由高空气流携带的沙土向下输送引起的。

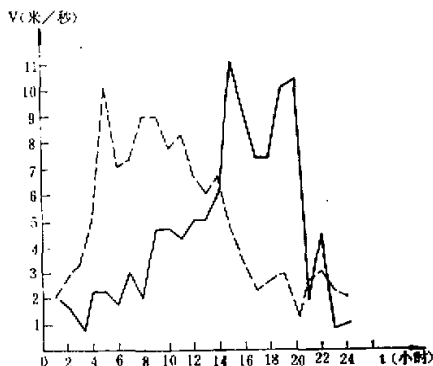
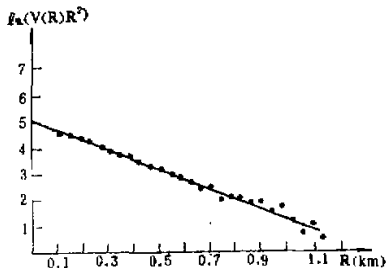
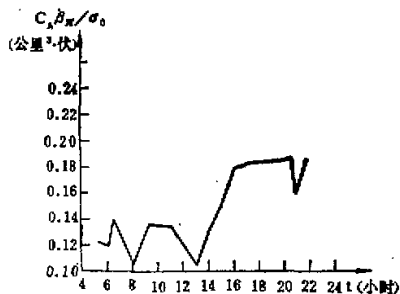


图4 水平风速日变化,

—: 5月2日, ---: 5月5日.

图5 水平探测求取 $C_A \beta_{\pi} / \sigma_0$ 例子, 5月5日
16:00, $C_A \beta_{\pi} / \sigma_0 = 0.176$ (公里³·伏).图6 K_L 的日变化, 5月5日.

较11时小一个数量级左右。但在近地面100米以内,消光系数比起11时55分时,明显增大,系由地面大风扬起的地表尘土所致。5日清晨,具有一个类似的过程,大约5时以

从图1、图2和图4,我们还可以看到消光系数分布的另一变化特点是,当地面风速很大时,除了近地面层外,边界层内的消光系数反而变小了。村井浩三在Tateno应用光度计观测太阳的直射光强^[4],连续几天都发现,当冷锋到达时,大气柱的光学厚度忽然变小了,他认为这是由于新鲜的气团取代了原来的气团引起的。从图4看,2日下午2点,地面风速急剧增大,高达每秒11米,扬起尘土,水平能见度变坏,但是整个天顶反而变蓝了,在200米以上,消光系数变小了,在1公里以上,17:43时的消光系数

后,地面风速迅速增大,但从5时24分至7时54分,边界层内消光系数反而变小了,表明此时并无高空尘土的向下输送,新鲜的气团取代了城市上空原有的浑浊气团,导致了消光系数的减小。可见,消光系数以及气溶胶粒子浓度的变化跟大气风场具有密切的关系,高空气流携带的尘土的向下输送能够引起边界层内气溶胶粒子的大量增多。当比较干净的冷锋过境时,又能引起气溶胶粒子的减少,但当地面风速很大时,又会扬起地面的尘土,引起近地面层的气溶胶粒子的增多。

(3) K_1 值的变化 记 $K_1 = C_A \beta_x / \sigma$, K_1 的变化反映了 β_x 和 σ 比值 K 的变化,后者取决于气溶胶的谱分布及其折射率。本文通过水平观测求取 K_1 值,从图5看 $R - \ln V(R)R^2$ 曲线比较符合直线,表明在沙尘发生的过程中,水平平均一的假设基本上是合理的。

从图6可以看出,在5日的沙尘过程中 K_1 值变化的特点,从上午5点至下午2点, K_1 值在0.1至0.14 公里³·伏之间变化,均值约为0.12 公里³·伏,变化幅度处于20%以内,下午3点, K_1 值开始增大,从下午4点至晚上10点, K_1 值约为0.18 公里³·伏,稍有变化,表明在上述谈及的两个阶段内,地面上气溶胶谱形和折射率变化较小,但在后一阶段, K_1 值较上午平均增大50%。如上所述,5日下午4点左右,由沙尘中心输送过来的高空尘土向下飘落,使得地面的气溶胶谱形和折射率都会有所变化,从而导致了 K_1 值的变化。若在激光雷达探测的同时,遥感或实测气溶胶谱形,则由 K 值可以确定气溶胶的折射率^[2]。

在方程(1)里,具有 $\sigma(R)$ 和 $\beta_x(R)$ 两个未知数,如没有附加的信息,要由同一方程确定两个未知数,是不可能的。根据 Spinhirne 等人的研究^[3],除了存在局地污染或由于很高的湿度引起粒子吸湿增长的情形外,气溶胶谱形在低空混合层内变化不大,气溶胶的消光系数与后向散射系数比可认为不随高度改变。在这种情况下,可以根据(2)式计算边界层的消光系数分布。在沙尘过境时,边界层的气溶胶谱形发生很大的变化, K 值是否还能近似地认为不随高度改变,是一个有待今后进一步研究的问题。但是考虑到5日下午和2日上午8点以后,边界层内并无逆温层存在,由于垂直的湍流混合, K_1 值随高度的变化也可望较小。

四、结 束 语

从1982年5月上旬两次沙尘的激光探测结果,可以初步得到如下的结论:

在沙尘发生过程中,大气边界层的特性发生复杂而又激烈的变化,消光系数(或气溶胶粒子浓度)的变化可达一个数量级。激光雷达探测沙尘过程中的气溶胶特性,具有灵便、快速等优点,能够实时地通过激光大气回波求得水平能见度,消光系数分布等有关气溶胶光学特性的信息,这对于研究沙尘过程中尘沙的输送机制以及气溶胶光学特性的变化规律都是有帮助的。从实验结果看,激光探测得到的沙尘过程中的消光系数分布,以及水平能见度等有关气溶胶的信息,与当时的气象背景基本吻合,说明激光探测沙尘过程中的气溶胶特性也是可行的。激光沙尘探测的主要缺点在于穿透能力的限制,为此,我们今后考虑采用更大发射功率、更大接收孔径的激光雷达来进行沙尘观测。至于 K 值在沙尘过程中随高度的变化特性,以及在 K 值随高度变化较大的情况下如何根据激光回波反演

消光系数也有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 周明煜等,环境科学学报, 207—218 (1981).
- [2] Reagan, J., A., et al., *J. Appl. Meteor.*, 911—928 (1977).
- [3] 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,科学出版社, 1973.
- [4] Murai, K., *Pap. Meteor. Geophys.*, 447—480 (1968).
- [5] Spinhirne, J., D., et al., *J. Appl. Meteor.*, 426—438 (1980).

DETECTION OF AEROSOL EXTINCTION COEFFICIENT PROFILES DURING DUST STORMS BY LIDAR

Qiu Jinhuan Zhao Yanzeng Wang Hongqi

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, preliminary results of lidar measurement of aerosol extinction coefficient profiles during two dust storms in March, 1982 are described and analysed.