

北京地区对流层中上部云和气溶胶的 激光雷达探测 *

邱金桓 郑斯平 黄其荣 夏其林
杨理权 王文明 潘继东 孙金辉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 介绍了近年来研制的一台多波长激光雷达及其探测对流层高云和气溶胶的实验, 并依据探测结果重点分析了北京 2000 年 1 月至 4 月对流层上部云和气溶胶在 532 nm 波长的消光系数分布特征。结果表明: 从 6 km 至 11 km 的气溶胶光学厚度值在 0.0152 至 0.0284 之间变化, 均值为 0.0192。从 6 km 至 11 km 的云光学厚度值在 0.014 至 0.23 之间变化。观测到的单层高云的厚度最大为 6 km。4 月 6 日, 近年来最强的一次沙尘暴袭击北京。4 月 7 日北京地区无可见云, 激光雷达探测结果表明, 从 4 km 至 10 km 高度范围内, 存在一层厚度约为 6 km 的气溶胶粒子层, 消光系数峰值处于 8 km 附近, 比晴天无云时的消光系数值约大一个数量级。估计这是一层沙尘气溶胶, 系由远距离输送至北京形成的。

关键词 : 高云; 气溶胶; 激光雷达遥感

1 引言

在诸多影响气候变化的因子中, 云和气溶胶是两个非常重要、但又最不确定的影响因子。由于云和气溶胶在气候变化中的重要作用, 对它们的研究近年来一直受到高度重视, 云的作用被列为全球变化研究中最优先的项目。然而云和气溶胶的辐射气候强迫问题至今并未得到很好解决, 原因主要是两个方面。一是云和气溶胶辐射强迫机制的复杂性, 其物理过程远比 CO_2 等微量气体的温室效应复杂。由于不同的物理光学特性, 有的类型的气溶胶对地气系统起加热作用, 有的反而起冷却作用, 气溶胶既能直接散射和吸收太阳辐射, 产生直接的辐射强迫, 又可作为凝结核, 影响云的微物理特性和宏观云量, 影响地球—大气系统的水循环, 产生更加复杂和不确定的间接辐射强迫。不同的云也存在不同的辐射强迫, 低云起冷却作用, 高云通常起加热作用, 其特性密切依赖于云的微物理特征。另一原因在于缺乏云和气溶胶物理光学特性的系统资料, 难以估计其变化趋势, 导致目前对于气溶胶和云的辐射强迫估计千差万别。因此, 探测云和气溶胶物理—光学参数的时空分布对气候变化研究具有重要意义。

激光雷达是探测大气气溶胶和高云光学—物理参数时空分布的一个有效、可靠的

手段, 20世纪60年代以来始终是激光大气遥感的一个前沿研究课题^[1~4]。由于高云的时空分布变化很大, 它的消光系数值也往往较小, 它的微物理—光学特性的探测更加困难, 激光雷达几乎是目前探测薄高云分布的惟一手段。在激光探测高云研究方面, 国际上近年来十分活跃, 但在这一方面, 我国的研究工作还很少。本文将介绍我们近年来研制的一台综合探测臭氧、云和气溶胶的多波长激光雷达及其在探测高云和气溶胶的应用, 并依据探测结果重点分析北京2000年1月至4月对流层上部云和气溶胶的消光系数分布特征。

2 激光雷达系统

我们采用一台最近研制的多波长激光雷达探测高云和气溶胶, 其主要的性能指标列于表1。如表所示, 该激光雷达具有Nd:YAG激光器和XeCl(准分子)激光器。Nd:YAG激光器输出1064 nm、532 nm和355 nm三个波长的激光, 经发射望远镜扩束后, 发散角约为0.4 mrad, 重复频率为10 Hz, 单脉冲输出能量分别约为400、120和50 mJ。XeCl激光器输出308 nm波长的激光, 经扩束后发散角小于0.4 mrad, 最大的重复频率为100 Hz, 单脉冲输出能量约为110 mJ。接收望远镜为一个口径1 m的卡塞格林式望远镜。除1064 nm通道采用半导体器件(YAG-444A)接收外, 其余均采用光电倍增管接收光信号(308 nm和355 nm通道采用EMI9214, 532 nm采用RCA7265)。本激光雷达采用三个20M、8bit的A/D通道, 分别用于355 nm、532 nm和1064 nm波长大气回波信号的采集; 而两个光子计数通道, 分别用于308 nm和355 nm波长的大气回波信号的采集, 以差分吸收的方法探测对流层上部与平流层的臭氧浓度分布。本激光雷达还具有光电开关和机械光闸, 以压缩近距离的大气回波信号。

表1 激光雷达指标

发射系统	激光器	Nd:YAG			XeCl
		工作波长 (nm)	脉冲能量 (mJ)	重复频率 (Hz)	
	工作波长 (nm)	1064	532	355	308
	脉冲能量 (mJ)	400	120	50	110
	重复频率 (Hz)	10	10	10	100
	发散角 (mrad)	0.4	0.4	0.4	<0.4
	脉冲宽度 (ns)	15	15	15	20
回波信号接收 与处理系统	望远镜	1 m 直径, 卡塞格林式			
	接收视场角	0.5, 1, 1.5, 2, 3 mrad			
	探测器	YAG-444A	RCA7265	EMI9214	EMI9214
	滤光片中心波长 (nm)	1064	532	355	307
	滤光片半宽度 (nm)	10.0	10.0	10.0	10.0
	A/D	20 MHz, 8bit, 三通道 (1064 nm, 532 nm, 355 nm)			
	光子计数	300 m 分辨率, 两通道 (308 nm, 355 nm)			
	计算机	686 和 586 的微机各一台			

激光发射系统安装在中国科学院大气物理研究所实验楼10层实验室, 激光接收部分安装在11层圆顶房内, 计算机部分安置在计算机房内。

3 反演方法

在一次散射的条件下，激光雷达方程可表示为

$$P(r) = \frac{C[\beta_R(r) + \beta_M(r)]}{r^2} e^{-2 \int_{r_0}^r [\sigma_R(r') + \sigma_M(r')] dr'}, \quad (1)$$

上式中， $P(r)$ 是来自距离 r 处大气的激光回波信号， C 是激光雷达仪器常数， $\beta_R(r)$ 和 $\sigma_R(r)$ 分别为 Rayleigh (分子) 后向散射系数和消光系数， $\beta_M(r)$ 和 $\sigma_M(r)$ 是 Mie (气溶胶和云) 后向散射系数和消光系数。

激光雷达方程的两个主要求解方法是 Fernald 方法^[5]和 Klett 方法^[6]。通常假设 Mie 消光后向散射比为常数以求解方程 (1)，记为 k_M ，则激光雷达方程前向积分和后向积分的解可分别表示为^[5-7]

$$\begin{aligned} \sigma_M(r) = & -\alpha \sigma_R(r) + \\ & \frac{S(r) \exp \left[-2(\alpha - 1) \int_{r_0}^r \sigma_R(r') dr' \right]}{S(r_0) \left[\sigma_M(r_0) + \alpha(r_0) \sigma_R(r_0) \right] - 2 \int_{r_0}^r S(r') \exp \left[-2(\alpha - 1) \int_{r_0}^{r'} \sigma_R(r'') dr'' \right] dr'}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_M(r) = & -\alpha \sigma_R(r) + \\ & \frac{S(r) \exp \left[2(\alpha - 1) \int_{r_1}^r \sigma_R(r') dr' \right]}{S(r_1) \left[\sigma_M(r_1) + \alpha(r_1) \sigma_R(r_1) \right] + 2 \int_{r_1}^r S(r') \exp \left[2(\alpha - 1) \int_{r'}^{r_1} \sigma_R(r'') dr'' \right] dr'}, \end{aligned} \quad (3)$$

上面两式中， $\alpha = k_M/k_R$ ， k_R 是分子消光后向散射比，其值为 $8\pi/3$ ， $S(r) = P(r)r^2$ ， $\sigma_M(r_1)$ 是待定的远端边界值，即远端边界距离 r_1 处的 Mie 消光系数值，而 $\sigma_M(r_0)$ 是近端边界值。

532 nm 波长的 k_M 值一般在 10 和 90 之间变化。依据国内外的一些研究结果^[8-11]，本文对于云，取 $k_M = 15$ ，而对气溶胶，取 $k_M = 40$ 。

本文综合应用前向积分法和后向积分法求解激光雷达方程，其分界点的高度距离 (后面称为标定高度) 记为 Z_c 。对 $r > Z_c$ ，采用前向积分法，并有 $r_0 = Z_c$ ；而对 $r < r_1$ ，采用后向积分法， $r_1 = Z_c$ 。标定高度 Z_c 是通过选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定。本文在 8 km 至 14 km 高度范围内寻求 Z_c 。在这个高度上， $S(r)/\beta_R(r)$ 的值应最小。我们采用 532 nm 激光通道探测云和气溶胶。本文依据后向散射比 $1 + \beta_M(Z_c)/\beta_R(Z_c) = 1.05$ 来确定 532 nm 波长的气溶胶消光系数边界值 $\sigma_M(Z_c)$ ，而分子消光系数垂直分布引用 LOWTRAN^[12]的结果。

在应用实际探测的激光大气回波反演气溶胶分布时，我们对回波信号不作平滑处理，但要扣除背景信号，并取 40 km 附近的信号平均值作为背景信号。

4 探测结果分析

本节主要分析 2000 年 1 月至 4 月 532 nm 波长激光探测高云和对流层上部气溶胶的

实验结果。实验在 19:00 (北京时间) 至 24:00 之间进行, 我们同时采用双 A/D 接收 532 nm 波长的激光回波信号, 每次发射 600 至 1000 个的激光脉冲。表 2 给出每月观测的天数以及其中有云的天数。观测通常是在晴天或存在薄高云的天气条件下进行的。在 4 月 6 日近年来最强的一次沙暴袭击北京地区, 并在以后的日子里, 多次出现沙尘天气, 我们从 4 月 7 日至 19 日, 进行了 6 天的激光观测。遗憾的是, 由于激光雷达上方的房子顶盖在强风下打开不安全, 4 月 6 日以及以后强风天气条件下我们没有进行激光探测实验。如表 2 所示, 1 月至 4 月期间, 我们共进行了 21 天的观测, 其中有云的天气 8 天, 在 6 km 至 11 km 高度范围内存在高云的天数为 7 天。下面从图 1 至图 6 分析由激光雷达探测的云和气溶胶消光系数分布特征。

表 2 2000 年 1 月至 4 月每月观测天数及其云天占有率统计

月 份	1 月	2 月	3 月	4 月	总 计
观 测 天 数	5	3	7	6	21
有 云 天 数	2	1	2	3	8

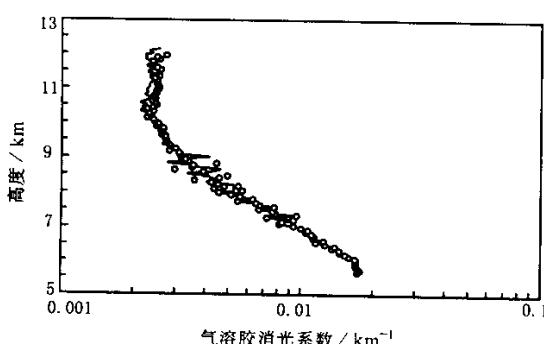


图 1 2000 年 1 月 17 日探测的气溶胶消光系数垂直分布

的峰值, 分别处于 7 km 和 9.8 km 附近, 从 20:37 至 20:52 的 15 min 内, 云消光系数呈快速的增大态势, 6 km 至 10 km 的光学厚度从 0.173 迅速增大为 0.425。这是一层很活跃的降雪云, 从 21:00 开始, 天就降雪了。

从图 3 所示的 2 月 21 日的探测结果看, 从 5 km 至 7.5 km 范围内, 存在三层不可见的很薄的云, 厚度都小于 1 km, 消光系数的峰值高度分别在 5.4 km、5.9 km 和 6.9 km, 它们的

图 1 表示 1 月 17 日探测的气溶胶消光系数分布, 从 5 km 至 10 km 高度, 消光系数从 0.018 km^{-1} 降至 0.002 km^{-1} , 随高度的增加很快变小, 光学厚度为 0.019。

图 2 表示 1 月 10 日 20:37、20:45 和 20:52 三个时刻探测的云 (或气溶胶) 的消光系数分布。如图 2 所示, 从 6 km 至 10.2 km 高度范围内, 存在一层厚度约为 4 km 的云。这层云有两个消光系数

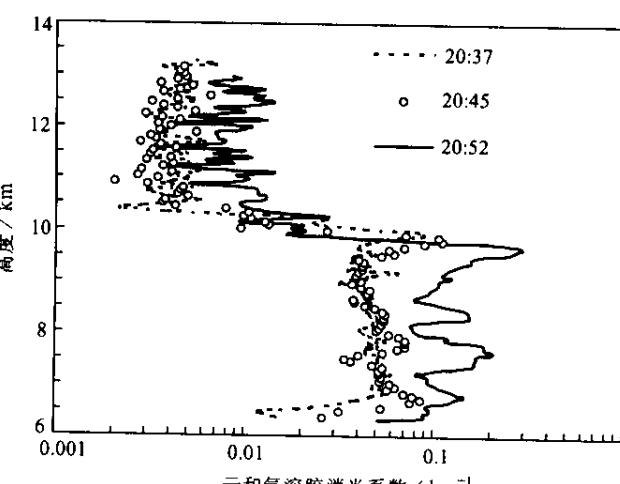


图 2 2000 年 1 月 10 日探测的云/气溶胶消光系数垂直分布

值都小于 0.03 km^{-1} ，每层的光学厚度都小于 0.02。

图 4 表示 4 月 7 日 20:07、20:22 和 20:36 三个时刻探测的气溶胶的消光系数分布。如图所示，从 4 km 至 10 km 高度范围内，存在一层厚度约为 6 km 的气溶胶粒子层，其消光系数呈很典型的正态分布，处于 8 km 附近的峰值比晴天无云时的气溶胶消光系数值（见图 1）约大一个数量级，光学厚度值在 0.039 至 0.055 之间变化。如上所述，4 月 6 日近年来最强的一次沙暴袭击北京，4 月 7 日北京地区无可见云。这极可能是—层沙尘气溶胶，由远距离输送

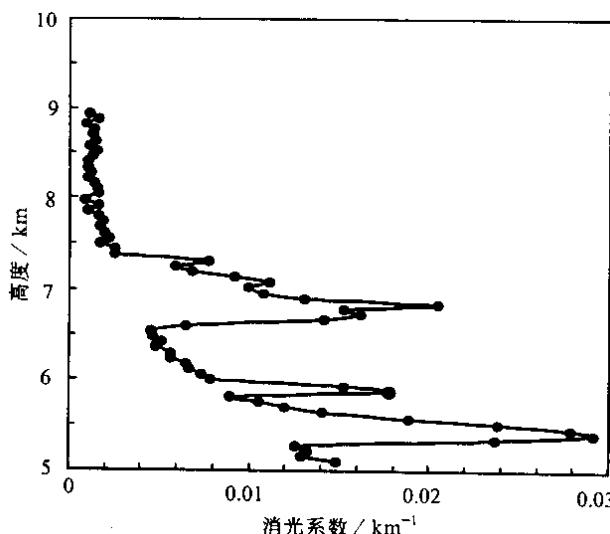


图 3 2000 年 2 月 21 日探测的云/气溶胶消光系数垂直分布

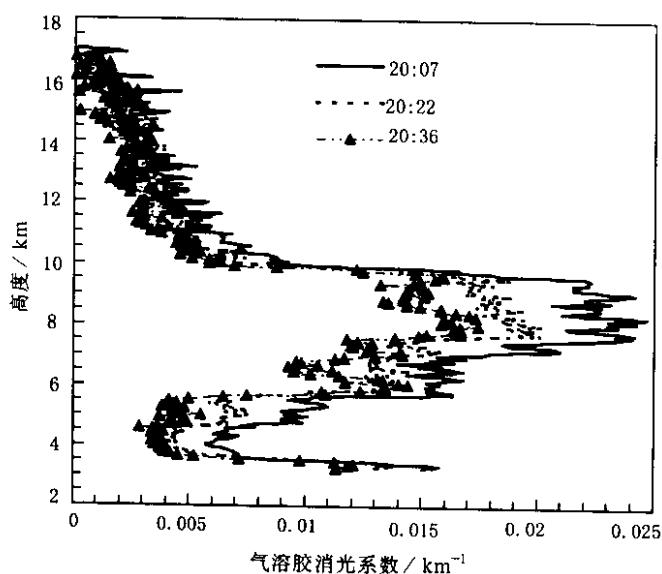


图 4 2000 年 4 月 7 日探测的沙尘气溶胶的消光系数垂直分布

至北京。根据邱金桓和孙金辉^[13]以及 Iwasaka 等^[14]的激光雷达探测结果，沙尘暴粒子远距离输送带的高度在 6.5 km 以下。现在的探测结果表面，沙尘气溶胶粒子有可能在更高的高度远距离输送。

图 5 表示 4 月 11 日、12 日和 15 日探测的云和气溶胶消光系数分布。在 11 日，从 6 km 至 9 km 范围内，存在一层峰值消光系数为 0.62 km^{-1} 的云，高度约为 7.6 km，光学厚度为 0.32，并在 6.8 km 和 8.7 km 高度附近，存在消光系数的次峰，其分布特征好象是几层云连成一片所致。在 12 日，存在两层

云，云消光系数峰值高度分别在 5.3 km 和 6.7 km 附近。在上面一层云，消光系数峰值高达 0.97 km^{-1} 。4 月 15 日为一晴天，在 3 km 以上，气溶胶消光系数值都小于 0.05 km^{-1} 。

图 6 表示 1 月至 4 月激光雷达探测北京上空 6 km 至 11 km 高度范围内大气气溶胶/云的光学厚度值。我们在晴天无云的条件下，进行了 14 天的观测，不计 2000 年 4 月 7 日探测厚度为 6 km 的沙尘气溶胶层的光学厚度，从 6 km 至 11 km 的光学厚度值在

0.0152 至 0.0284 之间变化，13 天探测结果的均值为 0.0192。扣除 0.0192 晴天气溶胶光学厚度均值，从 6 km 至 11 km 的云光学厚度值在 0.014 至 0.23 之间变化。观测到的单层高云的厚度可大至 5.6 km。

5 结 论

2000 年 1 月至 4 月期间，我们使用一台多波长激光雷达探测了北京的高云和气溶胶，并依据探测结果重点分析了对流层上部云和气溶胶的消光系数分布特征。

观测结果表明：从 6 km 至 11 km 的气溶胶光学厚度值在 0.0152

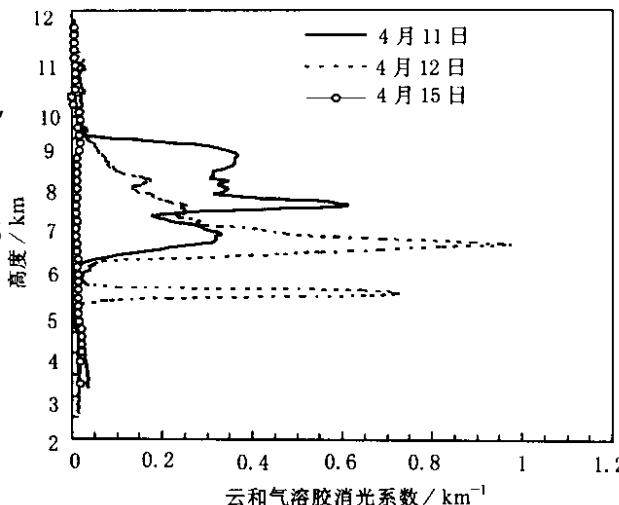


图 5 2000 年 4 月 11 日、12 日和 15 日探测的气溶胶/云的消光系数垂直分布

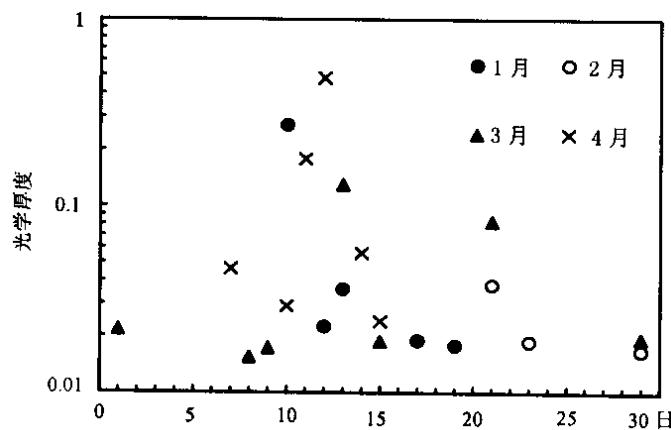


图 6 从 6 km 至 11 km 高度范围内气溶胶/云的光学厚度

至 0.0284 之间变化，均值为 0.0192。从 6 km 至 11 km 的云光学厚度值在 0.014 至 0.23 之间变化。观测到的单层高云的厚度最大为 6 km。在 4 月 6 日，近年来最强的一次沙尘暴袭击北京地区，在 4 月 7 日北京地区无可见云。激光雷达探测结果表明：在这一天，从 4 km 至 10 km 高度范围内，存在一层厚度约为 6 km 的气溶胶粒子层，峰值处于 8 km 附近，峰值比晴天时的消光系数值约大一数量级。

各类卷云通常在 6 km 以上，而卷云以外的云一般在 6 km 以下。4 月 7 日的气溶胶粒子层从 4 km 扩展到 10 km，而且相对云而言，消光系数较小。因此，这极可能是一层沙尘气溶胶，远距离输送至北京。国内外的一些激光雷达探测结果表明：沙尘暴粒子远距离输送带的高度通常在 6.5 km 以下。现在的探测结果表明，沙尘气溶胶粒子有可能在更高的高度远距离输送。

参 考 文 献

- 1 Winker, D. M., Couch, R. H., McCormick, M. P., An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment, *IEEE*, 1996, 84, 164~180.

- 2 Sassen , K. , Lidar cloud research , *Rev. Laser Engineering* , 1995 , **23** , 62 ~ 67.
- 3 Sun Jinhui , Qiu Jinhuan , Xia Qiling , and Zhang Jinding , Lidar observations of volcanic clouds after Mt. Pinatupo volcanic eruption , *Chinese Science Bulletin* , 1993 , **38** , 631 ~ 633.
- 4 Qiu Jinhuan , and Lu Daren , On lidar application for remote sensing of the atmosphere , *Adv. Atmos. Sci.* , 1991 , **8** , 369 ~ 378.
- 5 Fernald , F. G. , Analysis of atmospheric lidar observation: some comments , *Appl. Opt.* , 1984 , **23** , 652 ~ 655.
- 6 Klett , J. D. , Stable analytical inversion solutions for processing lidar returns , *Appl. Opt.* , 1981 , **20** , 211 ~ 220.
- 7 Qiu Jinhuan , Two – wavelength lidar measurement of cloud – aerosol optical properties , *Adv. Atmos. Sci.* , 1995 , **12** , 176 ~ 177.
- 8 Sasano , Y. , and H. Nakene , Significance of the extinction/ backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two – component lidar equation , *Appl. Opt.* , 1984 , **23** , 11 ~ 13.
- 9 Spinharne , J. D. , J. A. Reagan , and B. M. Herman , Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar technique , *J. Appl. Meteor.* 1980 , **19** , 426 ~ 438.
- 10 Takamura , T. , Y. Sasano , and T. Hayasaka , Tropospheric aerosol optical properties , derived from lidar , sunphotometer and optical particle counter measurements , *Appl. Opt.* , 1994 , **33** , 7132 ~ 7140.
- 11 邱金桓、孙金辉、夏其林、张金定，北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析，*气象学报*，1988，**46**，235 ~ 241。
- 12 Kneizys , F. X. , E. P. Shettle , L. W. Abreu , G. P. Anderson , J. H. Chetwynd , W. O. Gallery , J. E. A. Selby , and S. A. Clough , Atmospheric transmittance/ radiance: Computer code LOWTRAN7 , AD – A137796. 1989.
- 13 邱金桓、孙金辉，沙尘暴的光学遥感与分析，*大气科学*，1994，**18**，1 ~ 10。
- 14 Iwasaka , Y. et al. , The transport and special scale of Asian dust – storm clouds: a case study of the dust – storm event of April 1979 , *Tellus* , 1983 , **36** , 189 ~ 196.

Lidar Measurements of Cloud and Aerosol in the Upper Troposphere in Beijing

Qiu Jinhuan , Zheng Siping , Huang Qirong , Xia Qilin , Yang Liqian ,
Wang Wenming , Pan Jidong , and Sun Jinhui

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

Abstract A new multi – wavelength lidar is introduced. The characteristics of 532 nm extinction coefficient profiles of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing from January to April , 2000 are emphatically analyzed. Results show that the aerosol optical depth between 6 km and 11 km changes from 0.0152 to 0.0284 with a mean value of 0.0192。 The cloud optical depth between 6 km and 11 km ranges from 0.014 to 0.23. The largest cloud thickness is about 6 km. On April 6 , a very strong dust storm appeared over Beijing area. On April 7 , there was no visible cloud ; while as shown in lidar measurements , there was an aerosol layer spread from 4 km to 10 km. This aerosol layer , estimated as the sand – dust layer transported from remote desert areas , has the largest extinction coefficient at the height of about 8 km ,which is about one order of magnitude larger than that in the clear(no cloud) day .

Key words : high cloud ; aerosol ; lidar remote sensing