

文章编号: 1007-5461(2006)03-0527-06

# 合肥地区卷云的激光雷达探测

薛新莲, 戚福弟, 范爱媛, 刘东, 谢晨波, 岳古明, 周军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 为了研究卷云的特征, 我们利用 L300 米散射激光雷达对安徽省合肥地区 (31.90°N, 117.16°E) 的高层卷云进行探测。这些卷云是在晴朗夜晚激光雷达进行对流层气溶胶常规测量的同时探测到的。分析讨论了卷云的结构、光学性质及其它们的时间变化特征。结果表明: 该地区卷云的云峰主要分布在 8~11 km 范围之内, 卷云的结构呈现一定的季节变化特征。

**关键词:** 遥感; 消光后向散射比; 米散射激光雷达; 卷云; 光学厚度

**中图分类号:** TN958.98; TP722.4

**文献标识码:** A

## 1 引言

大气中的卷云是由于天气系统的抬升或湿空气的深度对流而形成的, 其主要成分为冰晶粒子。卷云在地球表面的覆盖率约为 30%, 典型高度在 9 km, 厚度为 1.5 km<sup>[1,2]</sup>。卷云既反射太阳的短波辐射, 又吸收地面的长波辐射, 对地-气系统的辐射收支有着重要的影响。目前, 在理解与预测全球气候系统变化的研究中, 卷云的辐射强弱是一个尚不能精确确定的影响因子, 因此世界各国一直非常重视卷云的研究。人们利用微波雷达、激光雷达及卫星遥感等技术进行卷云的探测, 并开展了一系列探测卷云的大型综合实验, 如南部海域云观测实验 (SOCEX), 云雷达的空基观测 (PROBE), 卫星研究云气候学项目 (ISCCP) 等<sup>[3]</sup>。

激光雷达以它的高时间、空间分辨率和测量精度而成为一种重要的卷云探测工具, 它可以较为精确地确定卷云的高度、结构及其光学性质<sup>[4,5]</sup>。迄今为止, 亚洲中纬度地区卷云的激光雷达探测资料还比较缺乏。本文给出了 L300 米散射激光雷达在安徽省合肥地区 (31.90°N, 117.16°E) 的高层卷云探测结果。这些卷云都是在晴朗夜晚激光雷达进行对流层气溶胶常规测量的同时探测到的。虽然从 1997 年 4 月到 2004 年 4 月总共仅有 90 个夜晚的卷云探测资料, 但它仍然在一定程度上反映了该地区高层卷云的结构和光学性质及其时间变化特征。

本文简要地介绍了 L300 激光雷达的结构和测量方法, 分别叙述了确定卷云云底、云峰、云顶高度及卷云消光后向散射比的方法, 着重分析和讨论了合肥地区高层卷云的高度、厚度、光学厚度以及消光后向散射比的激光雷达探测结果。

## 2 L300 米散射激光雷达和测量方法

L300 米散射激光雷达主要由激光发射单元、接收光学单元、信号探测与采集单元及控制单元组成<sup>[6]</sup>。表 1 列出该激光雷达的主要技术参数。

测量在晴朗的夜晚进行。L300 激光雷达呈垂直指向, Nd:YAG 激光器向大气中发射 10000 发激光脉冲 (约持续 15 分钟), 各个高度上的大气后向散射光被接收望远镜收集后分别被导入到高低层大气探测的两个

**基金项目:** 国家 863 计划项目资助课题

**收稿日期:** 2005-06-03; **修改日期:** 2005-07-29

**E-mail:** xuexinlian@hotmail.com; xuexinlian2005@yahoo.com.cn

通道. 探测高层大气的光电倍增管采用了“门控”技术, “门控”一般设在 2 km 左右的高度“开门”, 它有效地截止了 2 km 以下很强的大气后向散射回波信号, 只探测 2 km 以上的高层大气后向散射回波信号. 在低层大气测量的光电倍增管前插有合适透过率的衰减片, 用以探测低层大气的后向散射光. 接收到的高低层大气后向散射回波信号经过平均、扣除背景信号、几何重叠因子订正和拼接后, 最终获得一条完整的大气后向散射回波信号廓线, 其垂直分辨率为 30 m<sup>[6]</sup>.

### 3 卷云的数据处理方法

研究表明, 对于光学厚度小于 1.0 的卷云, 其多次散射的影响可以忽略<sup>[7]</sup>, 因此在

对高层卷云的激光雷达探测资料进行处理时没有考虑卷云的多次散射.

使用 Fernald 方法对大气后向散射回波信号进行处理可获得大气气溶胶和卷云消光系数垂直廓线<sup>[8]</sup>.

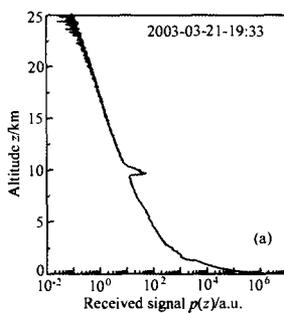


Fig.1(a) Profile of received signal

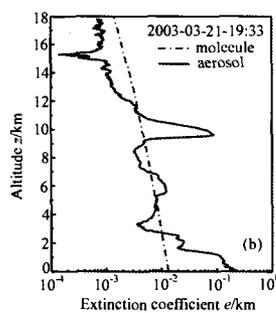


Fig.1(b) Profile of aerosol and cirrus extinction coefficient

表 1 L300 米散射激光雷达主要技术参数

发射单元:	激光器	Nd:YAG
	波长 (nm)	532
	单脉冲能量 (mJ)	70
	脉冲频率 (Hz)	10
	光束发散角 (mrad)	1
接收光学单元:	望远镜类型	卡塞格林型
	直径 (mm)	300
	视场 (mrad)	4
	滤光片带宽 (nm)	1
信号探测与采集单元:	光电倍增管	Hamamatsu R2257
	双通道放大器	612A/AM
	双通道瞬态记录仪	DSP 2210/516
	精度 / 采集速率	12bits/0.2μs
	控制单元	奔腾 586 计算机

由于气溶胶探测时遇到的高层卷云大多是肉眼很难看见 (subvisual) 或仅达到视阈 (threshold visible) 的卷云, 它们对激光的衰减作用较小, 激光可以穿透云层, 因此对云顶以上高度区域的大气气溶胶的探测无大的影响. 图 1(a)、(b) 分别给出了 2003 年 3 月 21 日夜 L300 激光雷达探测的大气后向散射回波信号垂直廓线和反演的大气气溶胶与卷云消光系数的垂直廓线. 图 1(b) 中的虚线是大气分子消光系数的垂直廓线. 从图中可以看出, 10 km 处的高层卷云对其上部的大气气溶胶消光系数的反演结果影响甚微.

#### 3.1 卷云云底、云峰和云顶高度的确定

将激光雷达接收的大气后向散射回波信号  $P(z)$  对高度  $z$  求导<sup>[9]</sup>. 显然, 无云大气的后向散射回波信号一般是随着高度的增加而逐渐减弱的, 即  $dP(z)/dz < 0$ , 但从卷云的底部开始, 云粒子强烈的后向散射光使得激光雷达接收的卷云信号随高度增加而急速增大, 即一阶导数  $dP(z)/dz$  在卷云底部发生由负值向正值的转变, 这一正值一直继续保持到卷云云峰处, 在那里,  $dP(z)/dz$  又会经历由正值向负值的反向突变. 这样, 第一次  $dP(z)/dz$  等于零所对应的高度即为卷云的云底高度  $z_b$ ; 第二次  $dP(z)/dz$  为零的高度即为云峰高度  $z_p$ ; 而符合条件  $P_t z_t^2 \leq P_b z_b^2$  时所对应的高度为卷云的云顶高度  $z_t$ . 作为一个例子, 图 2(a) 是 2003 年 3 月 21 日 16:24 L300 激光雷达接收的卷云后向散射回波信号  $P(z)$ , 图 2(b) 是相应的  $dP(z)/dz$ . 依据上面给出的方法, 得到该卷云的云底、云峰和云顶高度分别在 9.35 km、9.98 km 和 10.71 km.

#### 3.2 卷云光学厚度的确定

采用 Chen 提出的方法<sup>[7]</sup>, 使用下式计算卷云的透过率  $T(z_b, z_t)$

$$T(z_b, z_t) = (P_t z_t^2 / P_b z_b^2)^{1/2}. \quad (1)$$

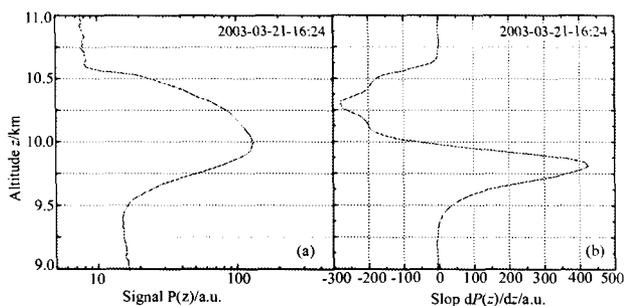


Fig.2(a) Backscatter signal of cirrus  $P(z)$

(b)  $dP(z)/dz$  for the backscatter signal of cirrus

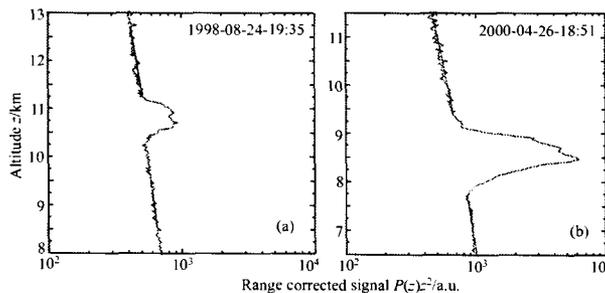


Fig.3 Range corrected backscatter signal

通过分别对卷云云顶上部和云底下部一段区域内的  $P(z)z^2$  进行最小二乘法的线性拟合, 从拟合直线的方程式中求出  $P_t z_t^2$  和  $P_b z_b^2$  并代入到方程 (1) 中, 得到卷云的透过率  $T(z_b, z_t)$ 。

卷云的光学厚度  $\tau(z_b, z_t)$  为

$$\tau(z_b, z_t) = -\ln[T(z_b, z_t)]. \tag{2}$$

图 3(a)、(b) 分别给出 1998 年 8 月 24 日和 2000 年 4 月 26 日两天夜晚 L300 激光雷达探测的  $P(z)z^2$ , 图中一并给出了卷云上部和下部一段区域内  $P(z)z^2$  的线性拟合直线。由上述方法得出这两天卷云的透过率  $T(z_b, z_t)$  分别为 0.989 和 0.885, 相应的光学厚度  $\tau(z_b, z_t)$  分别为 0.011 和 0.122。

### 3.3 卷云消光后向散射比的确定

卷云消光后向散射比  $S_1$  的确定依据上一小节得到的卷云光学厚度的大小而采用不同的方法。

对于光学厚度大于 0.03 的卷云, 使用 Fernald 方法反演气溶胶消光系数的垂直廓线<sup>[8]</sup>, 将得到的卷云云顶或云底处的气溶胶消光系数作为边界值并使用假设的卷云消光后向散射比的初值  $S_1$ , 再次使用 Fernald 方法反演出卷云消光系数的垂直廓线, 并由 (3) 式和 (4) 式分别计算出卷云的光学厚度和透过率

$$\tau(z_b, z_t) = \int_{z_b}^{z_t} \sigma(z) dz, \tag{3}$$

$$T(z_b, z_t) = \exp[-\tau(z_b, z_t)], \tag{4}$$

式中  $\sigma(z)$  是卷云的消光系数。

将 (4) 式的计算结果与 (1) 式得出的卷云透过率进行比较, 调整  $S_1$  的值, 重复进行上述步骤, 直到 (4) 式的计算值与 (1) 式的结果近似相等为止 (误差小于 0.001), 此时的  $S_1$  即为卷云的消光后向散射比。

Chen 在文中指出, 对于光学厚度小于 0.03 的卷云, 用上述方法求解将会有明显的误差。因此, 当卷云的光学厚度小于 0.03 时, 本文直接采用了他给出的卷云的统计平均值  $29.0 \text{ sr}^{[7]}$ 。

## 4 结果与讨论

### 4.1 卷云高度

图 4 为卷云云峰高度 (空心五角星点) 随月份的变化特征。它是按 L300 激光雷达于 7 年期间在相应月份探测卷云的结果给出的。图中一并给出了同一期间里对流层顶的高度 (实倒三角形点) 和温度在  $-25^\circ\text{C}$  的高度 (实圆点)。它们是由安徽省阜阳气象台的无线电气象探空仪测量得到的 (合肥西北约 300 km 处)。

从图中首先可以看出, 激光雷达探测的卷云云峰高度在 6~17 km 的范围分布, 平均高度为  $11.14 \pm 2.69 \text{ km}$ 。这个结果与 SAGE 卫星探测的  $25^\circ\text{N}$  地区卷云平均云峰高度 10.9 km 比较一致<sup>[2]</sup>。其次, 云峰高度呈现一定的季节变化特征。7、8、9 三个月, 云峰高度明显增高, 大多在 12~17 km, 但是起伏比较大; 其它季节

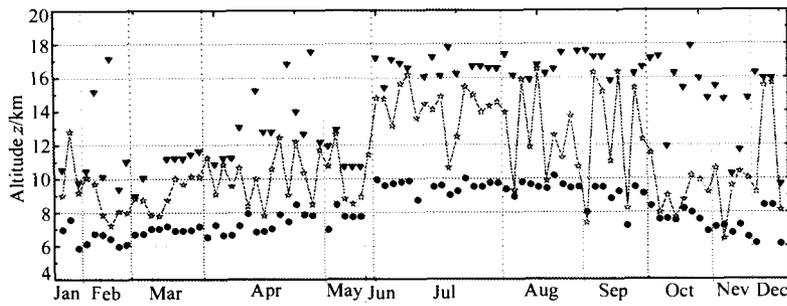


Fig.4 Cirrus peak height as a function as month

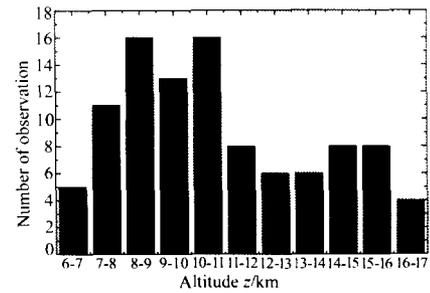


Fig.5 The probability of cirrus peak height distribution

大多在 10 km 上下变化, 起伏相对比较小时。其次, 卷云的云峰高度和对流层顶高度存在一定的正相关性, 卷云的高度受到对流层顶高度的制约。一般认为, 典型的卷云峰值高度约为当地对流层顶高度的  $4/3$ <sup>[2]</sup>; 最后, 还可以看出, 激光雷达探测的卷云基本上都位于  $-25^{\circ}\text{C}$  高度上部的更冷的区域。

图 5 为卷云云峰高度的分布几率。可以看出, 在激光雷达探测的卷云中, 云高分布在 8~11 km 范围内的几率较大, 而分布在 6~7 km 和 16~17 km 范围的卷云的几率都比较小。

#### 4.2 卷云厚度

图 6 为卷云厚度随月份的变化特征。可以看出, 激光雷达探测的大多数卷云的厚度在几百米到 2 km 之间变化, 平均厚度为  $1.35 \pm 0.66$  km。这个结果也与卷云的典型厚度 1.5 km 相近<sup>[2]</sup>。比较图 6 和图 4 不难发现卷云厚度与其高度具有一定的相关性。高度较高的卷云, 其云层相应较薄。如 7、8、9 三个月卷云的平均厚度在 1.08 km, 而其它月份云层相应较厚, 平均值在 1.62 km。

#### 4.3 卷云的光学厚度

图 7 为卷云的光学厚度  $\tau$  随月份的变化特征。可以看出, 卷云的光学厚度  $\tau$  的变化从 0.001 到 0.4。按照光学厚度对卷云的分类, 0.3 的卷云为薄卷云<sup>[10]</sup>, 可知 L300 激光雷达探测的高层卷云基本上都是薄卷云。光学厚度大于 0.1 的卷云多发生在 3、4 月份, 由前面的分析可知该季节的云层相应也很厚, 其它月份中, 光学厚度相对较小。

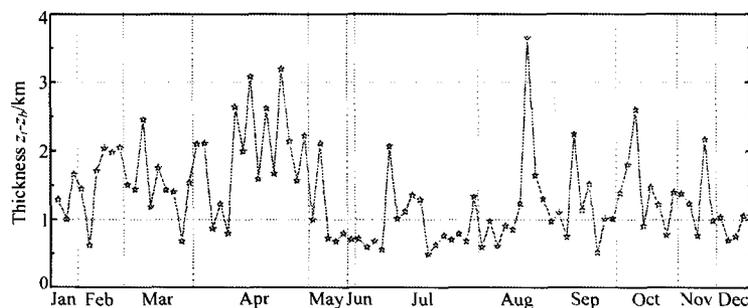


Fig.6 Thickness of cirrus cloud as a function as month

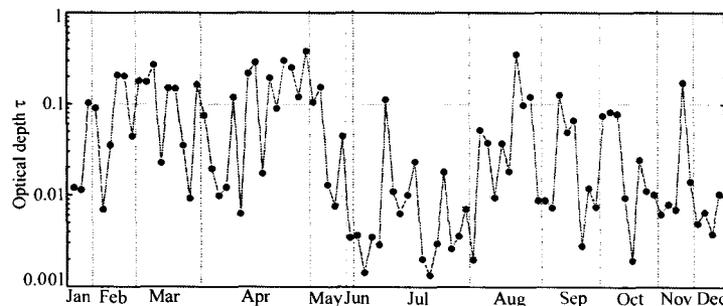


Fig.7 Optical depth of cirrus as a function as month

#### 4.4 卷云的消光后向散射比

图 8 为卷云的消光后向散射比随月份的变化特征。图中的  $S_1=29$  sr 是光学厚度小于 0.03 的卷云的消光后向散射比, 这里是直接引用了 Chen 的统计结果的平均值<sup>[7]</sup>, 其余为 L300 激光雷达的探测结果。对 90 天夜晚的卷云消光后向散射比 (包括 Chen 给出的平均值) 进行统计计算, 平均值为  $30.6 \pm 9.4$  sr。

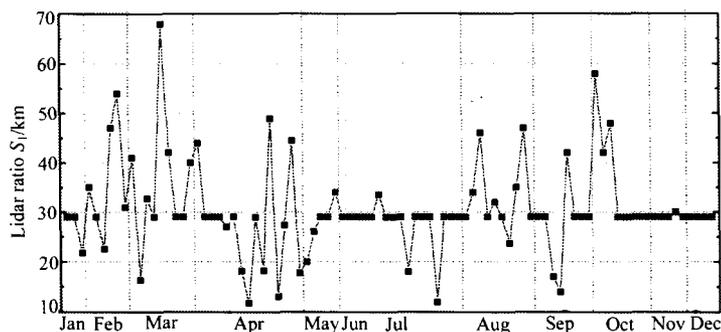


Fig.8 Lidar ratio as a function as month

为了进一步分析合肥上空激光雷达测量的卷云的来源, 从安徽省阜阳气象站傍晚 19:00 时的测风资料中, 将 1997 年到 2001 年期间激光雷达测量卷云的日子及卷云所在的高度的风向风速共 70 组数据摘取出来, 并按月份顺序排列如图 9 所示。图中箭头的方向表示风向, 箭头的长短表示风速的相对大小。

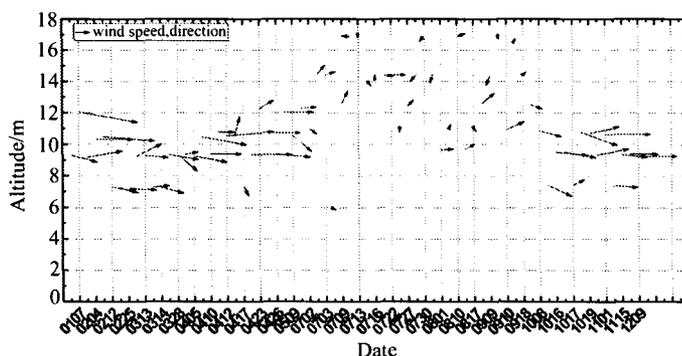


Fig.9 Wind direction and relative speed

从图中可以看出, 除夏季空气的垂直对流比较强, 风向规律性较差外, 其余季节的风向以向西方向的风为主。可推知激光雷达测量的高层卷云主要是随西风漂移而来的。

## 5 结 论

本文对 1997 年 4 月到 2004 年 4 月 90 天夜晚 L300 激光雷达探测的合肥地区的高层卷云进行了统计分析, 得出如下结论:

1) 卷云的云峰高度在 6~17 km 范围分布, 其中在 8~11 km 范围内的分布几率比较大, 总体平均高度为  $11.14 \pm 2.69$  km, 平均厚度为  $1.35 \pm 0.66$  km。

2) 卷云的结构呈现一定的季节变化特征。7、8、9 三个月云高多分布在 13~17 km, 云层较薄, 平均厚度为 1.08 km; 其他月份在 10 km 上下变化, 云层相应较厚, 平均厚度 1.62 km。卷云的高度受到对流层顶高度的制约。

3) 激光雷达探测到的高层卷云基本上都属于光学厚度小于 0.3 的薄卷云, 这些薄卷云的消光后向散射比的平均值为  $30.6 \pm 9.4$  sr。

4) 气象资料分析表明, 卷云高度受到对流层顶高度的制约, 它基本上都位于  $-25^\circ\text{C}$  所在高度上部的更冷的区域。合肥上空的高层卷云主要通过西风带来。

**致谢:** 安徽省气象台提供了阜阳气象台的探空资料, 在此表示衷心的感谢。

**参考文献:**

- [1] Goldfarb L, Keckhut P, Chanim M L, *et al.* Cirrus climatological results from lidar measurements at OHP (44°N, 6°E) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 9(28): 1687-1690.
- [2] David R D, Lawrence F R. A summary of the physical properties of cirrus cloud [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29: 970-978.
- [3] Young S A. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin cloud [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(30): 7019-7030.
- [4] Spinhirne J D. Micropluse lidar [J]. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, 1993, 31(1): 48-54.
- [5] Sassen K, Cho B S. Subvisible-thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31: 1275-1285.
- [6] Zhou Jun, *et al.* Two wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, 20(10): 1412-1417.
- [7] Chen W N, Chiang C W, Nee J B. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(30): 6470-6476.
- [8] Fernald F G. Analysis of atmosphere lidar observation: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(5): 652-653.
- [9] Shiv R P, Steinbrecht W, Carswell A I. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(10): 1488-1494.
- [10] Guasta A D, Mqrandi M, Stefanutti L. One year of cloud lidar data from Dumont d'Urville (antarctica) [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(D10): 18575-18587.

## Lidar observations of cirrus clouds over Hefei

XUE Xin-lian, QI Fu-di, FAN Ai-yuan, LIU Dong,  
XIE Chen-bo, YUE Gu-ming, ZHOU Jun

( Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China )

**Abstract:** In order to study the characteristics of cirrus, high-altitude cirrus clouds over Hefei, Anhui (31.90°N, 117.16°E) were observed by L300 Mie lidar. These cirrus clouds were simultaneously detected when the lidar took regular nighttime measurements of tropospheric aerosol. The structures and optical properties of the cirrus clouds as well as their time variation are discussed and analysed. Our results show that the peak of cirrus over this area range mainly from 8 km to 11 km, and their structures change with season as well.

**Key words:** remote sensing; lidar ratio; Mie scattering lidar; cirrus; optical depth

**作者简介:** 薛新莲 (1975 - ), 女, 中国科学院安徽光机所在读硕士研究生, 主要从事激光雷达探测卷云的研究。