

刘瑞金, 张镭, 王宏斌, 等. 2011. 半干旱地区卷云特征的激光雷达探测 [J]. 大气科学, 35 (5): 863-870. Liu Ruijin, Zhang Lei, Wang Hongbin, et al. 2011. Cirrus cloud measurement using lidar over semi-arid areas [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 863-870.

半干旱地区卷云特征的激光雷达探测

刘瑞金 张镭 王宏斌 曹贤洁 黄建平 闭建荣

半干旱气候变化教育部重点实验室 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘要 利用兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 2007 年 4~11 月微脉冲激光雷达 (MPL-4B) 观测资料, 统计分析了卷云的高度、厚度及其变化特征。采用透过率方法计算了卷云光学厚度, 得到了卷云光学厚度与卷云厚度和云底高度的相关关系。结果表明, SACOL 卷云出现的平均海拔高度为 $10\ 16 \pm 1\ 32$ km; 卷云厚度分布范围为 0.30~2.80 km, 平均值为 $1\ 10 \pm 0\ 49$ km; 光学厚度分布范围为 0.003~1.057, 平均值为 $0\ 17 \pm 0\ 16$, SACOL 卷云以光学厚度小于 0.3 的薄卷云为主; 6、7、8 月卷云出现高度较其他月大, 厚度和光学厚度较小; 卷云光学厚度与卷云厚度呈正的线性相关关系。

关键词 激光雷达 透过率方法 卷云高度 卷云厚度 光学厚度

文章编号 1006-9895 (2011) 05-0863-08

中图分类号 P415.2

文献标识码 A

Cirrus Cloud Measurement Using Lidar over Semi-Arid Areas

LIU Ruijin, ZHANG Lei, WANG Hongbin, CAO Xianjie, HUANG Jianping, and BI Jianrong

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract By using cirrus measurements with a Micro Pulse Lidar (MPL-4B) at the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) from April to November in 2007, the statistical analysis is made for both cirrus height and thickness. The optical depth of cirrus is derived through transmittance method, and the relationship of the cirrus optical depth depending on the cirrus thickness and cloud base height is got. The results show that the mean value of the cirrus height at the SACOL is $10\ 16 \pm 1\ 32$ km above sea level. The cirrus thickness varies between 0.3 and 2.8 km, and the mean value is $1\ 10 \pm 0\ 49$ km. The cirrus optical depth varies between 0.003 and 1.057, and the mean value is $0\ 17 \pm 0\ 16$. Most cirrus observed at the SACOL is thin cirrus whose optical depth is less than 0.3. From June to August, the cirrus height is higher and the optical depth and thickness are less than those in other months. The results show that the cirrus optical depth and thickness follow a positive linear relation.

Key words lidar, transmittance method, cirrus height, cirrus thickness, optical depth

1 引言

卫星观测数据表明卷云约覆盖了地球 30% 的

面积 (Nazaryan et al., 2008)。卷云主要或全部由冰晶组成, 水平范围可达几百公里到上千公里, 生命史为几小时到几天 (Heymsfield and Platt,

收稿日期 2010-10-02, 2011-04-01 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428604, 国家自然科学基金资助项目 41075104, 兰州大学“中央高校基本科研业务费专项资金” lzujbky-2011-5

作者简介 刘瑞金, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事激光雷达观测和气溶胶研究。E-mail: liurj04@st.lzu.edu.cn

通讯作者 张镭, E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

1984; Jensen et al., 1996; Sassen et al., 1998)。卷云对地球辐射具有双重影响, 一是对太阳短波辐射的散射作用, 减少到达地表的太阳辐射进而对地表产生冷却作用; 二是卷云具有温室效应, 吸收长波辐射而起到加热作用 (Zerefos et al., 2003)。Fu and Liou (1993) 研究表明薄卷云在大气层顶造成正的辐射强迫, 而较厚的卷云则表现为冷却效应。IPCC 第四次评估报告中指出卷云在辐射强迫和气候变化中的作用还存在很大的不确定性 (IPCC, 2007)。卷云在地球—大气辐射平衡中具有重要的作用, 其辐射强迫效应是当前全球气候变化研究中一个亟需解决的问题。

光学厚度是表征卷云辐射强迫的重要参数。激光雷达作为一种高分辨率的地基遥感仪器, 可以较精确观测大气中云和气溶胶的垂直分布, 是当前观测卷云光学特性的重要手段。国内外已有相关研究并取得了重要的进展。研究表明热带地区卷云出现的频率为 44%, 副热带夏季卷云的频率远大于冬季 (Comstock et al., 2002)。中纬度地区的卷云的光学厚度小于 0.03 的频率为 20% (Goldfarb et al., 2001)。而 Sassen and Campbell (2001) 的研究指出中纬度地区约 50% 的卷云光学厚度小于 0.3。邱金桓等 (2003) 对北京地区对流层中上部云进行了研究。薛新莲等 (2006) 利用激光雷达统计分析了合肥地区卷云的基本特征。由于热带地区出现卷云频率高, 对地气系统的影响比较明显, 已有的研究主要集中在热带地区 (Wang et al., 1998; Comstock et al., 2002)。

激光雷达观测卷云光学厚度的方法已有很多研究, 其中大部分是通过求解雷达方程得到光学厚度 (Klett, 1981; Fernald, 1984; Ansmann et al., 1992)。由于雷达方程中存在两个未知量, 在求解雷达方程时需要假定雷达系数 (Fernald, 1984)。雷达系数大小表征散射粒子的散射能力, 卷云的光散射性质因为卷云不同的形成过程和冰晶形状的多样性而充满不确定性。一般认为卷云的雷达系数与冰晶形状有关, 且变化范围较大 (Ansmann et al., 1992; Platt et al., 1999)。但是, 除了拉曼激光雷达外, 卷云雷达系数目前没有其他方法可以做准确测量 (Behrendt and Reichardt, 2000)。而目前拉曼激光雷达观测还很少, 很难准确得到卷云雷达系数基本特征。闵敏等 (2010) 利用星载激光雷达数

据对中国地区卷云的雷达系数进行了研究分析, 得到了较好的雷达系数的季节平均值以及随纬度的变化特征。但对于单点卷云的激光雷达探测, 利用星载雷达得到的雷达系数变化范围依然较大。激光雷达方程反演气溶胶和云的消光系数和光学厚度时, 反演结果对雷达系数的取值非常敏感, 所以在利用激光雷达方程求解卷云光学厚度时会因雷达系数假设造成较大误差。另一种反演卷云光学厚度的方法是通过比较云底和云顶处的回波能量, 求解卷云对激光雷达回波信号的透过率来计算光学厚度 (Platt, 1973; Young, 1995; Chen et al., 2002)。该方法反演的光学厚度与拉曼激光雷达观测的光学厚度的比较表明, 该方法可以较准确地得到卷云光学厚度 (Giannakaki et al., 2007)。本文以此方法为基础, 反演分析卷云光学厚度。

近年来, 利用激光雷达探测分析了半干旱区兰州上空的卷云和气溶胶光学参数, 结合 LOWTRAN7 (Low resolution transmission) 定量计算了卷云对气溶胶辐射特性的影响 (邓涛等, 2010a), 利用数值模式模拟了卷云和气溶胶辐射效应对城市边界层气象场的影响 (邓涛等, 2010b)。这些工作通过个例分析了气溶胶和卷云的辐射效应及其影响, 然而该地区卷云分布和变化的基本特征有待进一步研究, 以便更为深入地认识卷云的辐射特性及其对局地气候的影响。本文利用兰州大学半干旱气候与环境观测站 (简称 SACOL) 微脉冲激光雷达 (MPL-4B) 观测数据 (Huang, 2008a, 2008b), 统计分析了卷云的云底高度、厚度和光学厚度等基本特征, 促进对卷云基本性质的深入认识, 为进一步数值模拟半干旱地区卷云辐射效应提供了重要基础。

2 观测仪器

2.1 微脉冲激光雷达

微脉冲激光雷达 (MPL-4B) 是一种弹性散射激光雷达, 由激光发射系统、信号接收系统和数据采集控制系统构成, 各项主要指标见表 1。激光发射系统发射波长为 527 nm 的脉冲信号, 信号通过同一个望远镜头发射、接收, 利用雪崩光电二极管光子计数器将望远镜收集到的散射光信号转换为电信号。微脉冲激光雷达安装在 SACOL 激光雷达实

表 1 激光雷达主要参数

Table 1 Specifications of the lidar system

系统	主要参数
发射系统	发射波长 527 nm Nd: YLF
	脉冲能量 8 μJ
	重复频率 2500 Hz
接收系统	接收望远镜 Cassegrain 型
	望远镜直径 178 mm
	接收视场角 100 μrad
数据采集系统	探测器 APD
	垂直分辨率 75 m
	最大探测距离 60 km

2.2 微波辐射计

微波辐射计 (TP/WVP-3000) 是地基被动式大气遥感光谱辐射仪, 可连续自动监测 10 km 内 47 个高层 (1 km 以下分辨率 100 m, 1 km 以上分辨率 250 m) 的温度、水汽、云液态水廓线以及积分水汽和云液态水含量。通过 12 个微波光谱遥感辐射强度或亮温, 其中 5 个 K 波段 (20~30 GHz) 为水汽吸收带, 7 个 V 波段 (51~59 GHz) 为氧分子吸收带, 同时利用对准天顶的红外温度计探测云底温度。

3 处理方法

中纬度地区卷云存在的环境温度大约在 -20 °C 以下 (Sassen and Benson, 2001)。根据 SACOL 微波辐射计观测的大气温度垂直分布 (见图 1), 6 km 高度大气平均温度为 -28.3 ± 7.3 °C。为了去除水云对观测结果的影响, 利用激光雷达观测时, 定义高度在 6 km 以上的云层为卷云。同时, 分析微波辐射计的水汽资料表明, 大气中水汽的垂直分布与雷达观测的卷云出现高度是一致的。由图 2 可知, 在 7.5~9.6 km 处卷云造成雷达回波信号明显增强, 大气的相对湿度也在这一高度有明显增加。

为了准确得到卷云的高度, 采用 Platt et al. (1994) 方法计算云底和云顶高度。利用初步判断的无卷云存在高度处回波信号计算背景标准差, 当回波信号的增加值大于已知背景标准差的两倍, 且在三个连续高度间隔内持续增加, 回波信号突然增加的第一个高度判定为云底高度。同理, 也可得到云顶高度。卷云高度定义为云底和云顶高度的平均值。

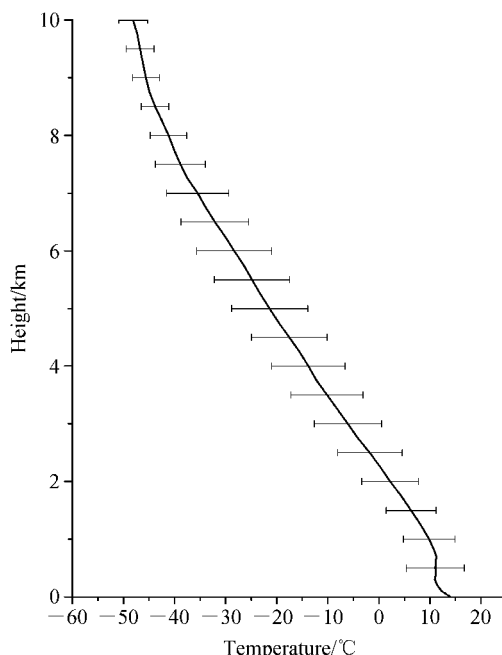


图 1 SACOL 年平均温度垂直分布

Fig. 1 Vertical profile of annual average temperature at Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University

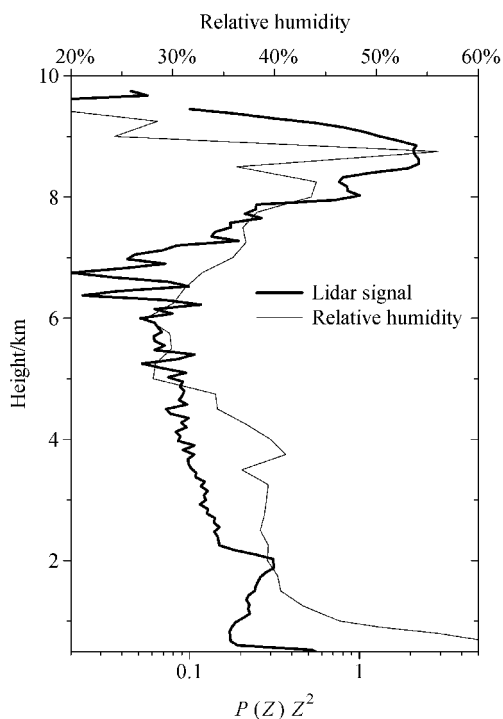


图 2 2007 年 9 月 8 日 11: 26 (北京时, 下同) 雷达回波信号及水汽垂直分布

Fig. 2 Vertical profiles of lidar return signal and relative humidity of atmosphere at 1126 BJT (Beijing Time) 8 Sept 2007

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 (Chen et al., 2002)。本文在利用激光雷达反演卷云光学厚度时只考虑单次散射的影响, 激光雷达方程如下 (Fernald, 1984):

$$P(Z)Z^2 = EC[\beta_1(Z) + \beta_2(Z)] T_1^2(Z) T_2^2(Z), \tag{1}$$

其中, $P(Z)Z^2$ 为 Z 高度处后向散射回波信号, E 为激光脉冲能量, C 为激光雷达常数。 β_1 和 β_2 分别为气溶胶和大气分子的后向散射系数。

$$T_1 = \exp\left[-\int_0^z \sigma_1(z) dz\right]$$

和

$$T_2 = \exp\left[-\int_0^z \sigma_2(z) dz\right]$$

是气溶胶和大气分子的透过率, 其中 z 是雷达到观测目标的距离, σ_1 和 σ_2 分别为气溶胶和大气分子的消光系数。

高空大气分子比较稀薄, 卷云云底到云顶激光雷达回波信号的衰减可认为主要是由卷云引起的。根据 Chen et al. (2002) 提出的方法, 卷云光学厚度可以通过卷云对激光雷达回波信号的透过率计算得到。利用最小二乘法对云顶部和云底部的一定高度范围内的回波信号线性拟合, 通过线性拟合方程得到云顶和云底的回波信号 $P(Z_t)Z_t^2$ 和 $P(Z_b)Z_b^2$, 由方程 (2)、(3) 即可得到卷云的光学厚度,

$$T_{fit} = \sqrt{P(Z_t)Z_t^2 / P(Z_b)Z_b^2}, \tag{2}$$

$$\tau = -\ln(T_{fit}), \tag{3}$$

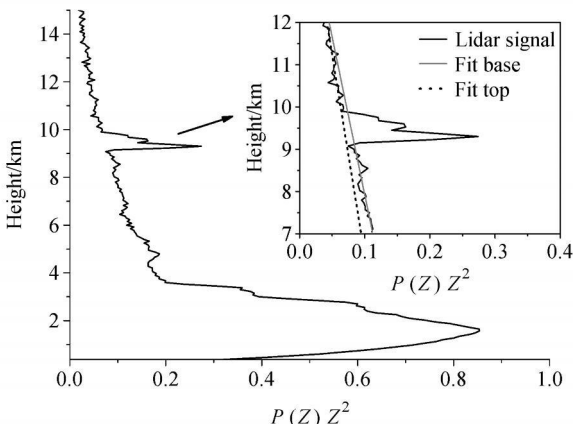


图3 透过率法求解卷云光学厚度示意图

Fig. 3 Schematic representation of transmittance method for cirrus cloud optical depth

其中, T_{fit} 和 τ 分别表示卷云透过率和光学厚度。

图 3 为 2007 年 6 月 27 日 21:36 激光雷达回波信号的垂直分布特征。可确定卷云出现高度为 9.07~9.90 km。图 3 中小图的灰色线和虚线分别表示云底和云顶激光雷达回波信号的线性拟合, 由线性拟合方程求出云底、云顶的回波信号, 根据透过率方法计算得到卷云的透过率为 0.83, 光学厚度为 0.14。

4 结果分析

根据 2007 年 4 月至 11 月 SACOL 激光雷达 (MPL-4B) 观测数据, 当观测到卷云出现的时间间隔大于 30 min 时, 定义为两次不同的卷云过程。对每次观测求出卷云的平均高度、光学厚度等, 统计分析了卷云云底高度、厚度和光学厚度的变化特征。表 2 为 2007 年 4 月至 11 月每月出现卷云的天数和次数的统计。值得注意的是, 微脉冲激光雷达的发射能量较小, 在雷达上空有较厚的中低云存在时, 激光雷达往往不能穿透中低云而观测到高层的卷云, 因此, 表 2 给出的卷云出现日数和次数与真实情况会存在差异。

表 2 2007 年 4 月至 11 月每月出现卷云天数及次数

Table 2 The days and numbers of cirrus occurrences from Apr to Nov in 2007

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	总计
有云天数	5	16	16	11	10	8	10	8	84
卷云次数	23	49	58	47	49	33	47	33	339

4.1 个例分析

图 4 为 2007 年 6 月 1 日 10:00~20:00 激光雷达上空卷云回波信号的时空变化, 在 8~9 km 高度有卷云存在。卷云高度和光学厚度随时间变化 (图 5), 11:30 卷云云底和云顶高度分别为 8.55 km 和 9.30 km, 卷云光学厚度为 0.04。随着卷云的移动发展, 云底高度逐渐减小, 云厚度不断增加, 同时随着卷云厚度增加, 卷云光学厚度不断增大。15:40 卷云厚度和光学厚度均达到最大值, 分别为 1.95 km 和 1.17, 此时云底高度和云顶高度分别为 7.42 km 和 9.37 km。之后, 云底高度不断升高, 云厚度和光学厚度不断减小。观测期间云顶高度变化不大, 平均高度为 9.37 km。

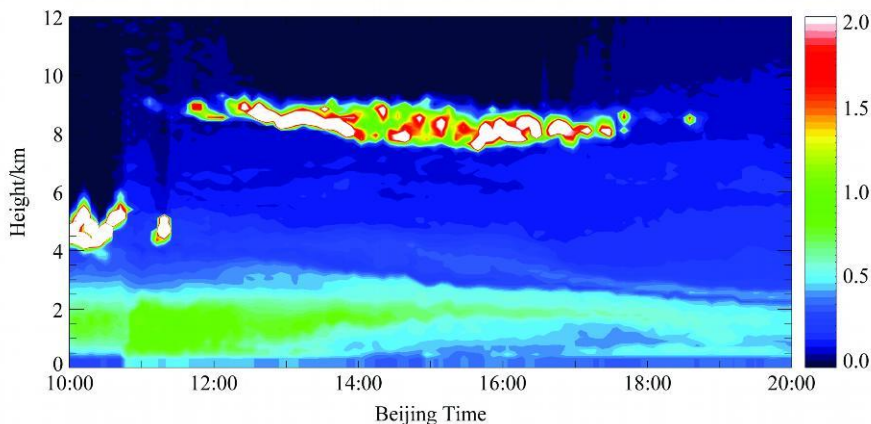


图 4 2007 年 6 月 1 日 10:00~20:00 卷云雷达信号强度时空分布特征

Fig 4 Spatial and temporal distribution of cirrus cloud backscatter signal intensity from 1000 BJT to 2000 BJT 1 Jun 2007

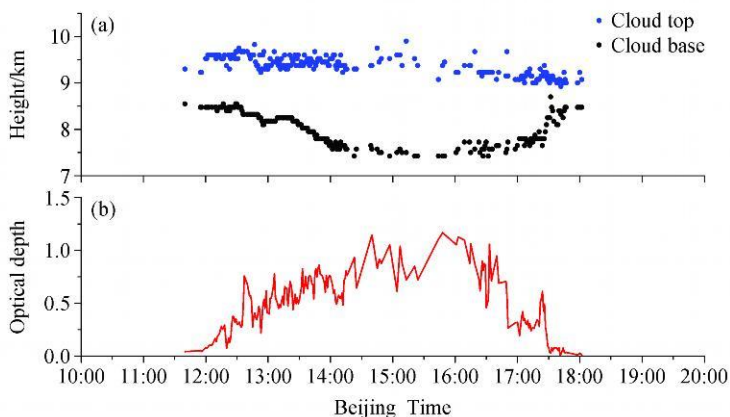


图 5 2007 年 6 月 1 日 10:00~20:00 (a) 卷云高度和 (b) 光学厚度随时间变化

Fig 5 Temporal profile of cirrus cloud height and optical depth from 1000 BJT to 2000 BJT on 1 Jun 2007

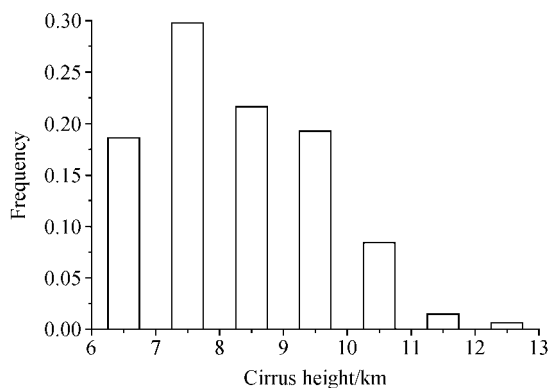


图 6 卷云高度频数分布

Fig 6 Histogram of frequency of cirrus cloud height

4.2 卷云高度和厚度分布特征

2007 年 4 月至 11 月卷云高度主要分布范围在 6~13 km, 平均高度为 8.20 ± 1.32 km, 72% 的卷

云出现在 7~9 km 高度范围内 (见图 6)。SACOL 海拔高度为 1 965 km, 则 SACOL 卷云出现的平均海拔高度为 10.16 ± 1.32 km, 这个结果与 Sassen and Campbell (2001) 统计 10 年观测数据得到的中纬度地区卷云平均高度 9.90 km 相近, 而与薛新莲等 (2006) 得到的合肥地区平均卷云高度 11.14 km 相比, SACOL 卷云高度略偏低。随高度的增加, 卷云出现的频率逐渐减小。11 km 以上高度出现卷云的频率不到 5%。图 7 为 2007 年 4 月至 11 月卷云厚度的频数分布, 由图可知卷云厚度分布范围为 0.3~2.8 km, 平均厚度为 1.10 ± 0.49 km。68.7% 的卷云厚度在 0.5~1.5 km 范围内, 厚度大于 2.5 km 的卷云出现频率很小, 仅为 4.8%。

卷云厚度和云底高度随季节发生变化, 在 6、7、8 月卷云厚度较小, 平均值为 0.97 km, 其它月份

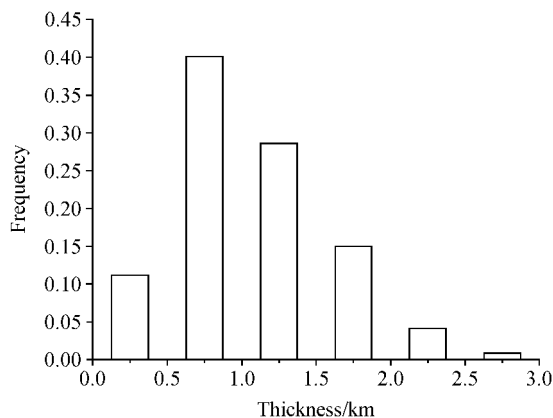


图7 卷云厚度频数分布

Fig 7 Histogram of frequency of cirrus cloud thickness

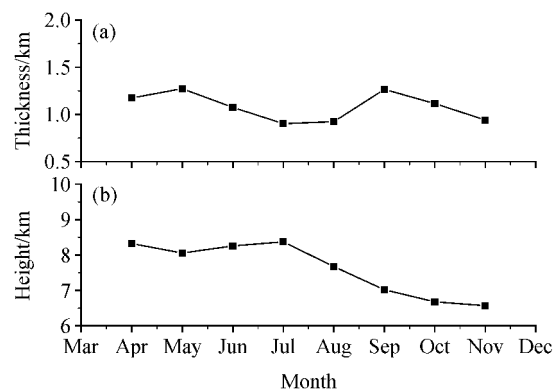


图8 (a) 卷云厚度和 (b) 云底高度月变化特征

Fig. 8 (a) Thickness and (b) cloud base height of cirrus cloud as a function of month

平均值为 1.20 km (见图 8a)。图 8b 为卷云云底高度的季节变化, 6、7、8 月平均云底高度为 8.10 km, 其它月卷云云底高度较低, 平均为 7.33 km。从季节分布来看, 夏季卷云的高度较高, 但卷云厚度相对较小。考虑 SACOL 海拔高度为 1.965 km, 6、7、8 月卷云平均海拔高度为 10.06 km。薛新莲等 (2006) 也得到合肥地区夏季卷云高度明显增高, 大多分布在 12~17 km, 这个结果比 SACOL 地区明显要大。

4.3 卷云光学厚度统计特征

2007 年 4~11 月卷云光学厚度分布范围为 0.003~1.057, 平均光学厚度为 0.17 ± 0.16 。随着卷云光学厚度的增加卷云出现的频率减小 (见图 9)。根据光学厚度对卷云的分类标准, 可将卷云分为三类: 小于 0.03 为肉眼无法识别的薄卷云, 0.03~0.3 为可以识别的卷云, 大于 0.3 为厚卷云。

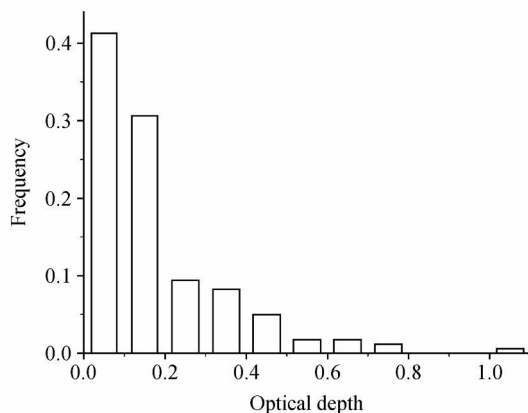


图9 卷云光学厚度频数分布

Fig 9 Histogram of frequency of cirrus cloud optical depth

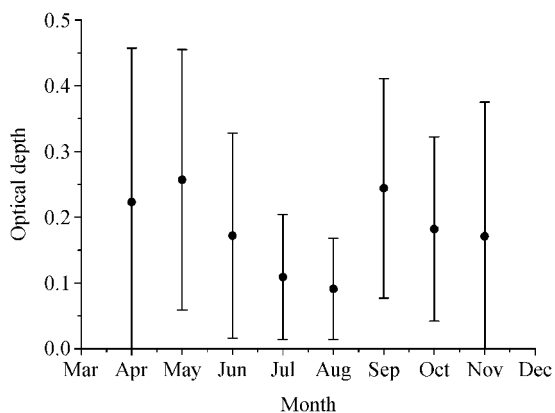


图10 卷云光学厚度月变化特征

Fig 10 Optical depth of cirrus cloud as a function of month

三类卷云出现的频率分别为 9.7%、71.6% 和 18.7%。SACOL 81.3% 的卷云光学厚度小于 0.3, 表明 SACOL 卷云以薄卷云为主, 这与中纬度地区的其他研究是一致的。Sassen and Campbell (2001) 统计中纬度地区约 50% 的卷云光学厚度小于 0.3; Reichardt (1999) 研究得到中纬度地区卷云光学厚度小于 0.3 的频率为 70%。与以上的观测结果相比, SACOL 出现薄卷云的频率更高。

分析 2007 年 4~11 月卷云光学厚度的月变化。卷云光学厚度在 6、7、8 月比较小, 平均值为 0.12。其它月份的光学厚度较大, 平均值为 0.22。6、7、8 月的变化幅度较其它月的小 (图 10)。

4.4 卷云光学厚度与高度和厚度的关系

图 11 为卷云光学厚度与云厚度的相关关系, 每间隔 0.5 km 分别求取卷云在不同厚度的光学厚度平均值, 误差线表示在该厚度范围内光学厚度的

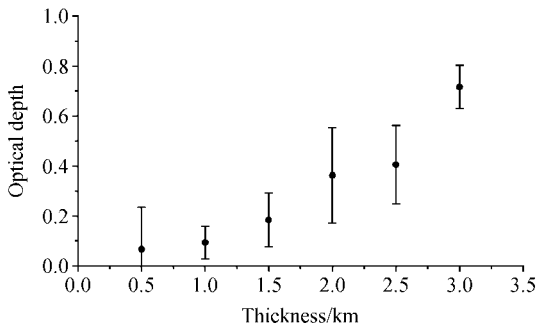


图 11 卷云光学厚度与卷云厚度相关关系
Fig. 11 Cirrus cloud optical depth as a function of cirrus cloud thickness

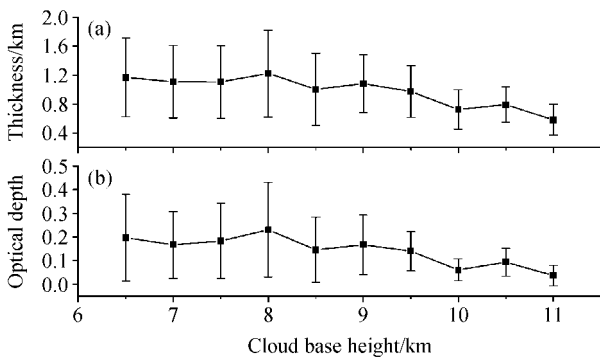


图 12 卷云 (a) 厚度和 (b) 光学厚度随云底高度的变化特征
Fig. 12 (a) Thickness and (b) optical depth of cirrus cloud as a function of cloud base height

标准差。由图 11 可知, 卷云光学厚度与云的厚度呈正的线性相关关系, 这与以往研究得到的结果是一致的 (Ansmann et al., 1993; Sassen and Campbell, 2001)。另外, 2.0~2.5 km 厚度范围内卷云的光学厚度变化幅度较大。

卷云厚度和卷云光学厚度随云底高度的变化趋势一致。随着云底高度的增加, 云的厚度和光学厚度整体呈减小的趋势, 8 km 以上云的厚度和光学厚度随云底高度有明显的下降趋势。随着高度的增加, 厚度和光学厚度的变化范围也逐渐减小 (见图 12)。

5 结论

利用 2007 年 4~11 月兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 微脉冲激光雷达观测资料, 统计分析了该地区上空卷云高度、厚度及其变化特征。利用透过率法计算分析了卷云光学厚度的基本特征, 并得到了光学厚度与云厚度和云底高度的相关关系。

卷云高度主要分布范围在 6~13 km, 72% 的卷云出现在 7~9 km 高度范围内。卷云出现的平均海拔高度为 10.16 ± 1.32 km, 这个结果与 Sassen and Campbell (2001) 统计 10 年观测数据得到的中纬度地区卷云的平均高度为 9.90 km 相近; 卷云厚度分布范围为 0.3~2.8 km, 平均厚度为 1.10 ± 0.49 km; 从季节分布来看, 夏季卷云的高度较高, 但卷云厚度相对较小。卷云光学厚度分布范围为 0.003~1.057, 平均光学厚度为 0.17 ± 0.16 , 且随着卷云光学厚度的增加卷云出现的频率减小; SACOL 卷云主要以薄卷云为主; 卷云光学厚度在 6、7、8 月比较小, 平均值为 0.12, 其它月份的光学厚度较大, 平均值为 0.22。卷云光学厚度与云的厚度有明显的正相关关系; 随着云底高度的增加, 云的厚度和光学厚度呈减小的趋势。

分析 2007 年 6 月 1 日 11:30~18:00 的一次卷云过程, 云底高度先降低后抬升, 云顶高度变化不大, 平均高度为 9.37 km; 云厚度和光学厚度的变化趋势一致。卷云厚度和光学厚度最大值分别为 1.95 km 和 1.17。

微脉冲激光雷达的发射能量较小, 在雷达上空有较厚的中低云存在时, 激光雷达往往不能穿透中低云而观测到高层的卷云, 因此表 2 给出的卷云出现日数和次数与真实情况会存在差异; 激光雷达垂直分辨率可能造成判断云高和云厚度的误差, 特别是对于卷云较薄的情形; 采用透过率方法求解卷云光学厚度时, 忽略大气分子的影响和多次散射的作用会造成计算结果有一定误差, 但仍可较好地反映出卷云光学厚度分布特征。本文仅做了初步分析, 卷云分布特征和辐射效应问题研究还存在很多不确定性, 有待于进一步深入工作。

致谢 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 提供激光雷达、微波辐射计等观测资料。

参考文献 (References)

Ansmann A, Wandinger U, Riebesell M, et al. 1992. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar [J]. *Appl. Opt.*, 31: 7113-7131.

Ansmann A, Bösenberg J, Brogniez G, et al. 1993. Lidar network observations of cirrus morphological and scattering properties during the international cirrus experiment 1989: The 18 October 1989 case study and statistical analysis [J]. *J. Appl. Meteor.*

- 32; 1608-1622.
- Behrendt A, Reichardt J. 2000. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator [J]. *Appl. Opt.*, 39: 1372-1378.
- Chen W N, Chiang C W, Nee J B. 2002. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. *Appl. Opt.*, 41: 6470-6476.
- Comstock J M, Ackerman T P, Mace G G. 2002. Ground-based lidar and radar remote sensing of tropical cirrus clouds at Nauru island; Cloud statistics and radiative impacts [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D23), 4714, doi: 10.1029/2002JD002203.
- 邓涛, 张镭, 吴兑, 等. 2010a. 兰州地区高云和气溶胶光学特性及其辐射效应 [J]. *高原气象*, 29 (1): 230-235. Deng Tao, Zhang Lei, Wu Dui, et al. 2010. High cloud and aerosol optical property and its influence on heating rate over Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (1): 230-235.
- 邓涛, 张镭, 陈敏, 等. 2010b. 高云和气溶胶辐射效应对边界层的影响 [J]. *大气科学*, 34 (5): 979-987. Deng Tao, Zhang Lei, Chen Min, et al. 2010b. The influence of high cloud and aerosol radiative effect on boundary layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (5): 979-987.
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations; Some comments [J]. *Appl. Opt.*, 23: 652-653
- Fu Q, Liou K N. 1993. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50: 2008-2025.
- Giannakaki E, Balis D S, Amiridis V, et al. 2007. Optical and geometrical characteristics of cirrus clouds over a Southern European lidar station [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 5519-5530.
- Goldfarb L, Keckhut P, Chamin M L, et al. 2001. Cirrus climatological results from lidar measurements at OHP (44°N, 6°E) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 1687-1690.
- Heymansfield A J, Platt C M R. 1984. A parameterization of the particle size spectrum of ice clouds in terms of the ambient temperature and the ice water content [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41: 846-855.
- Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. 2008a. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (6): 906-921.
- Huang J P, Huang Z W, Bi J R, et al. 2008b. Micro-pulse lidar measurements of aerosol vertical structure over the Loess Plateau [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 1: 8-11.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Contribution of Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; Cambridge University Press, 996.
- Jensen E J, Toon O B, Selkirk H B, et al. 1996. On the formation and persistence of subvisible cirrus clouds near the tropical tropopause [J]. *J. Geophys. Res.*, 101: 21361-21375.
- Klett J D. 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 20: 211-220.
- 闵敏, 王普才, 宗雪梅. 2010. 中国地区卷云消光后向散射比的星载激光雷达遥感 [J]. *大气科学*, 34 (3): 506-512. Min Min, Wang Pucai, Zong Xuemei. 2010. Extinction to backscatter ratio of cirrus clouds retrieved by spaceborne lidar over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 506-512.
- Nazaryan H, McCormick M P, Menzel W P. 2008. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D16211, doi: 10.1029/2007JD009481.
- Platt C M R. 1973. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30: 1191-1204.
- Platt C M, Young S A, Carswell A I, et al. 1994. The experimental cloud lidar pilot study (ECLIPS) for cloud-Radiation research [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75: 1635-1654.
- Platt C M R, Winker D M, Vaughan M A, et al. 1999. Backscatter-to-extinction ratio in the top layers of tropical mesoscale convective systems and in isolated cirrus from LITE observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38: 1330-1345.
- 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 2003. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测 [J]. *大气科学*, 27 (1): 1-7. Qiu Jinhuan, Zheng Siping, Huang Qirong, et al. 2003. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (1): 1-7.
- Reichardt J. 1999. Optical and geometrical properties of northern midlatitude cirrus clouds observed with a UV Raman lidar [J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 24: 255-260
- Sassen K, Mace G G, Hallett J, et al. 1998. Corona-producing ice clouds: A case study of a cold mid-latitude cirrus layer [J]. *Appl. Opt.*, 37: 1477-1485.
- Sassen K, Campbell J R. 2001. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part I: Macro-physical and synoptic properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 481-496
- Sassen K, Benson S. 2001. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part II: Micro-physical properties derived from lidar depolarization [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 2103-2112.
- 薛新莲, 戚福第, 范爱媛, 等. 2006. 合肥地区卷云的激光雷达探测 [J]. *量子电子学报*, 23 (4): 527-532. Xue Xinlian, Qi Fudi, Fan Aiyuan, et al. 2006. Lidar observations of cirrus clouds over Hefei [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese)*, 23 (4): 527-532.
- Wang P, Minnis P, McCormick M P, et al. 1998. A study of the vertical structure of tropical (20°S-20°N) optically thin clouds from SAGE II observations [J]. *Atmos. Res.*, 47-48: 599-614.
- Young S A. 1995. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds [J]. *Appl. Opt.*, 34: 7019-7031.
- Zerefos C S, Eleftheratos K, Balis D S, et al. 2003. Evidence of impact of aviation on cirrus cloud formation [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 3: 1633-1644.