

# 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性

季承荔<sup>1,2,3</sup> 陶宗明<sup>1,4</sup> 胡顺星<sup>1</sup> 刘东<sup>1</sup> 王珍珠<sup>1</sup> 钟志庆<sup>1</sup> 谢晨波<sup>1</sup>  
伯广宇<sup>1</sup> 王邦新<sup>1</sup> 周军<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 中国气象局气象探测中心, 北京 100081  
<sup>4</sup> 陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 卷云对地气辐射收支平衡有重要影响。根据三波长激光雷达系统于 2011 年 1 月~2012 年 10 月在合肥西郊的观测资料, 对比分析了不同波长对卷云的探测能力, 并研究了合肥地区卷云的云结构和光学厚度等特征。结果表明, 在所用的三波长(355、532、1064 nm)中, 激光雷达的波长越长, 其对卷云的探测能力就越强。合肥地区卷云的云峰平均高度在 8 km 左右, 冬季较低, 夏季较高; 卷云平均厚度在 1~2 km 之间。三个波长探测所得的卷云光学厚度基本一致, 从而验证了卷云的消光系数与波长无关的理论。合肥地区的卷云以光学厚度小于 0.3 的薄卷云为主, 平均光学厚度在 0.12 左右。

**关键词** 大气光学; 卷云; 激光雷达; 云结构特征; 光学厚度

中图分类号 P426.5+1; TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0401001

## Cirrus Measurement Using Three-Wavelength Lidar in Hefei

Ji Chengli<sup>1,2,3</sup> Tao Zongming<sup>1,4</sup> Hu Shunxing<sup>1</sup> Liu Dong<sup>1</sup> Wang Zhenzhu<sup>1</sup>  
Zhong Zhiqing<sup>1</sup> Xie Chenbo<sup>1</sup> Bo Guangyu<sup>1</sup> Wang Bangxin<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> CMA Meteorological Observation Center, Beijing, 100081, China  
<sup>4</sup> Section of Physics T & R, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Cirrus clouds have an important effect on the radiation balance between the earth's surface and the atmosphere. The properties such as cloud structure and optical depth of cirrus clouds are investigated and the detectivity of different wavelengths to cirrus clouds is analysed by using observations obtained from the three-wavelength lidar system in Hefei for the period from January 2011 to October 2012. The results show that the lidar with longer wavelength among 355, 532, 1064 nm has the better detectivity for cirrus. The peak height of cirrus clouds over Hefei is lower in winter and higher in summer with a mean value of about 8 km; and the average cloud thickness ranges from 1 km to 2 km. The cirrus optical thicknesses detected by the three different wavelengths are nearly the same, conforming that the extinction coefficient of cirrus cloud is independent of the wavelength. Most of the cirrus clouds over Hefei are thin cirrus clouds whose optical thicknesses are less than 0.3, and the mean values are about 0.12.

**Key words** atmospheric optics; cirrus cloud; lidar; cloud structural features; optical thickness

**OCIS codes** 010.1615; 280.3640; 290.5850

收稿日期: 2013-10-10; 收到修改稿日期: 2013-11-20

基金项目: 国家 973 计划(2013CB955802)、国家自然科学基金(40975010, 41075016, 41175021, 41205126)

作者简介: 季承荔(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: jichengli@139.com

导师简介: 胡顺星(1966—), 男, 研究员, 主要从事激光雷达大气探测方法和技术方面的研究。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引 言

卷云是高云的一种,主要由冰晶粒子组成,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<sup>[1-3]</sup>,全球覆盖率为 20%~30%<sup>[4]</sup>。卷云对地球辐射具有加热和冷却双重效应<sup>[5]</sup>,这种不确定性使其成为当前国际上的一个热点研究领域。

激光雷达具有高测量精度、精细的时间和空间分辨率等特点<sup>[6]</sup>,成为探测卷云的一种重要遥感工具<sup>[7-10]</sup>,近年来国内外很多学者进行了相关研究。Immler 等<sup>[11]</sup>发现热带卷云高度一般在 14~17 km,平均光学厚度约为 0.02,平均气温为 198 K。刘瑞金等<sup>[12]</sup>发现半干旱地区 72%的卷云出现在 7~9 km 高度范围内,卷云厚度为 0.3~2.8 km,平均光学厚度为 0.17±0.16,以光学厚度小于 0.3 的薄卷云为主。

理论与实验表明,后向散射系数与粒子有效直径和入射光波长有关<sup>[13]</sup>。目前国内探测卷云主要使用单波长激光雷达,无法研究卷云光学参量与波长的关系,而多波长多通道激光雷达是当前国际上的主要发展趋势。因此,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了三波长激光雷达系统,具有 1064、532、355 nm 三个发射波长 6 个接收通道,集多种探测功能于一身。本文使用该激光雷达系统于 2011 年 1 月~2012 年 10 月期间在合肥西郊的探测数据(有云数据共计 82 d),分析讨论卷云的云结构参量、光学厚度等探测结果。

## 2 三波长激光雷达系统

三波长激光雷达系统由发射、接收、控制与数据采集子系统组成。发射子系统选用 Nd:YAG 激光器,发射基频波长 1064 nm、二倍频波长 532 nm 和三倍频波长 355 nm。接收装置选用卡塞格林望远镜,后继光路把回波信号分为 6 路(其中 1064、532 nm 平行、355 nm 为米氏散射通道,607、386 nm 为拉曼通道,532 nm 垂直为偏振通道),分别选用 5 个光电倍增管和一个雪崩二极管来探测。数据采集选用瞬态记录仪,可根据需要设置为模拟或光子计数模式。由于单次脉冲激光雷达信号一般较弱,取 1000 次测量信号的平均值作为一条信号廓线,信号的空间分辨率为 7.5 m、时间分辨率为 100 s<sup>[14]</sup>。

## 3 反演方法

### 3.1 卷云结构的判断方法

激光雷达接收到的高度  $z$  处回波信号为  $P(z)$ ,

定义  $P(z)$  第一次开始增大时所对应的高度为云底高度  $z_b$ ,为了排除随机噪声或浓厚的大气气溶胶层的干扰,要求回波信号在  $z_b$  以上  $m$  个高度间隔内连续增加或不减小,且强度是背景信号标准偏差的  $n$  倍,这里  $m$  和  $n$  的典型值分别为 5 和 2<sup>[15]</sup>。从激光雷达所能探测的最大高度往下搜索,当回波强度为背景信号标准偏差的 2 倍时所在的高度为云顶高度  $z_t$ 。在云底和云顶之间回波信号的最大值所对应的高度为云峰高度  $z_p$ 。也可用  $P(z)z^2$  代替  $P(z)$  来确定云底、云峰、云顶所在的高度<sup>[16]</sup>。

### 3.2 卷云光学厚度计算方法

米氏散射激光雷达方程为<sup>[17]</sup>

$$P(z)z^2 = C\beta(z)T^2(z), \quad (1)$$

式中  $C$  是激光雷达系统常数, $\beta(z)$  为高度  $z$  处的大气(或卷云)后向散射系数, $T$  为激光雷达至高度  $z$  的大气透射率。

假设云底以下和云顶以上仅有大气分子,则可得

$$P(z_b)z_b^2 = C\beta(z_b)T^2(z_b), \quad (2)$$

$$P(z_t)z_t^2 = C\beta(z_t)T^2(z_t). \quad (3)$$

在卷云中忽略气溶胶和大气分子的影响(一般情况下是成立的),透射率项可写成

$$T^2(z_t) = T^2(z_b)T^2(z_b, z_t), \quad (4)$$

(3)式除以(2)式可得

$$\frac{P(z_t)z_t^2}{P(z_b)z_b^2} = \frac{\beta(z_t)}{\beta(z_b)}T^2(z_b, z_t). \quad (5)$$

当卷云的厚度不大时,可假设  $\frac{\beta(z_t)}{\beta(z_b)} \approx 1$ ,从而得到计算卷云透射率的公式如下<sup>[18]</sup>:

$$T(z_b, z_t) = \sqrt{p_t z_t^2 / p_b z_b^2}. \quad (6)$$

为了减小误差,分别对卷云的云顶上部和云底下部一段区域内的  $P(z)z^2$  进行最小二乘法线性拟合,从拟合直线方程式中求出平均的  $P(z_b)z_b^2$  和  $P(z_t)z_t^2$  并代入到(6)式中计算出卷云透射率  $T(z_b, z_t)$ 。

若卷云的厚度比较大,则(6)式误差较大。需要虚构建一个纯分子的激光雷达距离修正信号,数据可使用探空资料或大气分子模式。在卷云的下方和上方一定范围内把探测信号与分子信号分别进行相除,得到两个常数  $C_1$  和  $C_2$ ,它们的表达式为

$$C_1 = \frac{P(z_b)z_b^2}{P_m(z_b)z_b^2} = C \frac{T^2(z_b)}{T_m^2(z_b)}, \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{P(z_t)z_t^2}{P_m(z_t)z_t^2} = C \frac{T^2(z_b)}{T_m^2(z_b)} T^2(z_b, z_t), \quad (8)$$

两式相除可得：

$$T^2(z_b, z_t) = C_2/C_1,$$

卷云的光学厚度  $\tau(z_b, z_t)$  定义为<sup>[19]</sup>

$$\tau(z_b, z_t) = -\ln[T(z_b, z_t)]. \quad (9)$$

#### 4 三波长对卷云探测能力的分析

对 2011 年 1 月~2012 年 10 月期间三波长激光雷达系统在合肥西郊的探测数据进行分析,探测到的有云天数分别为:57 d(355 nm),74 d(532 nm),82 d

(1064 nm)。由此可见,三个波长对卷云的探测能力并不完全相同,波长 355 nm 的探测能力明显弱于 532 nm 和 1064 nm。

由图 1(a)可以看出,三个波长在 8.3~8.7 km 高度之间都探测到了回波信号较强的卷云,且三者得到的云底、云峰、云顶高度基本一致。图 1(b)中 532 nm 与 1064 nm 都探测到了卷云,但 355 nm 的卷云回波信号较弱。同时,从图 1 中还可以看出,1064 nm 的探测距离要小于其他两个波长。

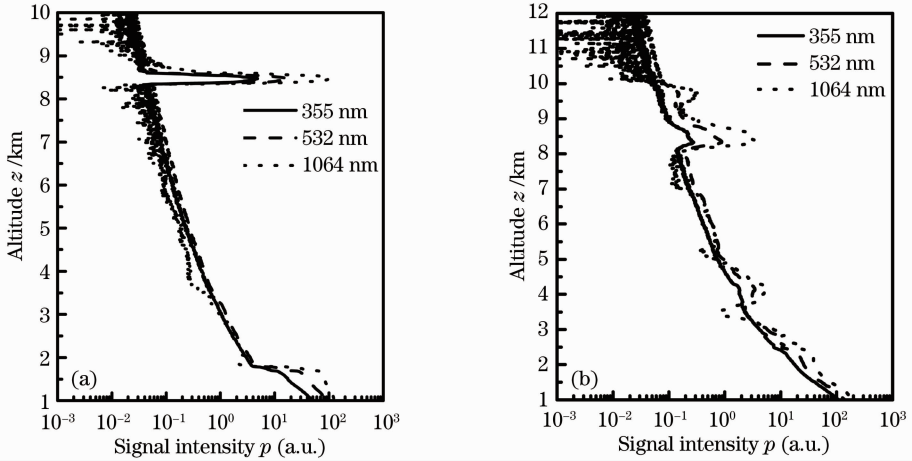


图 1 三波长大气回波信号。(a) 2012 年 10 月 8 日 18:52 分; (b) 2011 年 3 月 24 日 08:18 分

Fig. 1 Lidar return signals of three wavelengths. (a) 18:52 8th October, 2012; (b) 08:18 24th March, 2011

激光雷达的探测距离大小是由激光的发射能量、探测器的灵敏度、大气能见度等因素所决定的。在实验中,1064 nm 的探测距离最近,这是由于该通道的探测器为雪崩二极管,其他两个通道为光电倍增管,相比而言,光电倍增管的增益要比雪崩二极管大很多,故 1064 nm 的探测距离最近。

把大气分子和颗粒物(包括气溶胶和卷云)的后向散射系数分开,则激光雷达方程(1)式可改写为

$$P(z)z^2 = C[\beta_m(z) + \beta_p(z)]T^2(z), \quad (10)$$

式中  $\beta_m(z)$  和  $\beta_p(z)$  分别为高度  $z$  处大气分子和颗粒物后向散射系数。

由(10)式可知,对于较弱的卷云信号,三个波长的探测能力并不相同,造成这一现象主要是大气分子后向散射系数与波长的四次方成反比引起的<sup>[20]</sup>。卷云的粒子尺度一般较大,它的后向散射系数与波长的依赖关系不明显<sup>[21]</sup>,即认为三个波长上的卷云后向散射系数近似相等(这一假设不会引起太大的误差)。而卷云的消光系数是与波长无关的。在卷云出现的区域,(10)式中,只有大气分子的后向散射系数随波长在变化。对于实验所用的三个波长而言,波长 355 nm 的分子后向散射系数约是波长

532 nm 的 5 倍,是波长 1064 nm 的 81 倍。由此可知,当较弱的卷云出现时,在波长 355 nm 的激光雷达信号中,弱卷云后向散射系数占大气分子后向散射系数的比例较小,对整个信号贡献不大,淹没在大气分子信号中,故探测不到;在波长 1064 nm 的激光雷达信号中,弱卷云后向散射系数占大气分子后向散射系数的比例较大,对整个信号贡献较大,故较容易被探测到。

#### 5 卷云的探测结果分析

##### 5.1 卷云的结构参量

图 2 为 2012 年 9 月 4 日 18:48~20:36 期间卷云结构随时间的变化,图中不同的颜色表示激光雷达回波信号强度  $p$  大小,蓝色最小,红色最大。可以看出,在此期间卷云的高度变化不大,主要出现在 7.5~10 km,云峰高度位于 7.5~8 km 之间。从回波信号的强度可以看出,卷云的云粒子浓度随时间一直在变化。

图 3 为三波长激光雷达系统于 2011 年 1 月~2012 年 10 月期间探测的卷云结构分布图。可以看出,三个波长的探测结果基本一致,卷云主要出现在

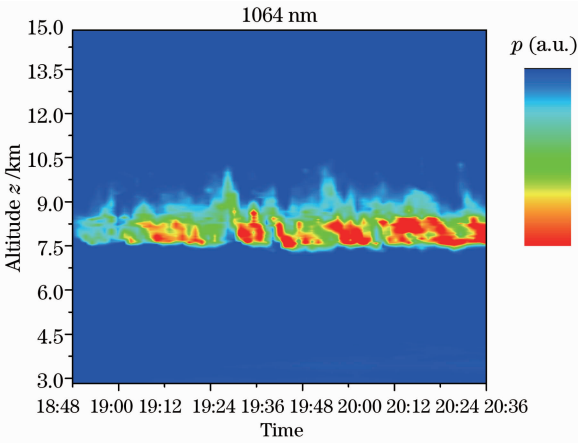


图2 2012年9月4日1064 nm波长大气后向散射回波信号时空特征

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of atmospheric backscatter signal at 1064 nm on September 4, 2012

6~15 km之间,冬季卷云高度相对较低,夏季更易出现较高的卷云,这与对流层顶高度的季节变化是相一致的<sup>[22]</sup>。

为了具有可比性,选取三波长都探测到卷云的数

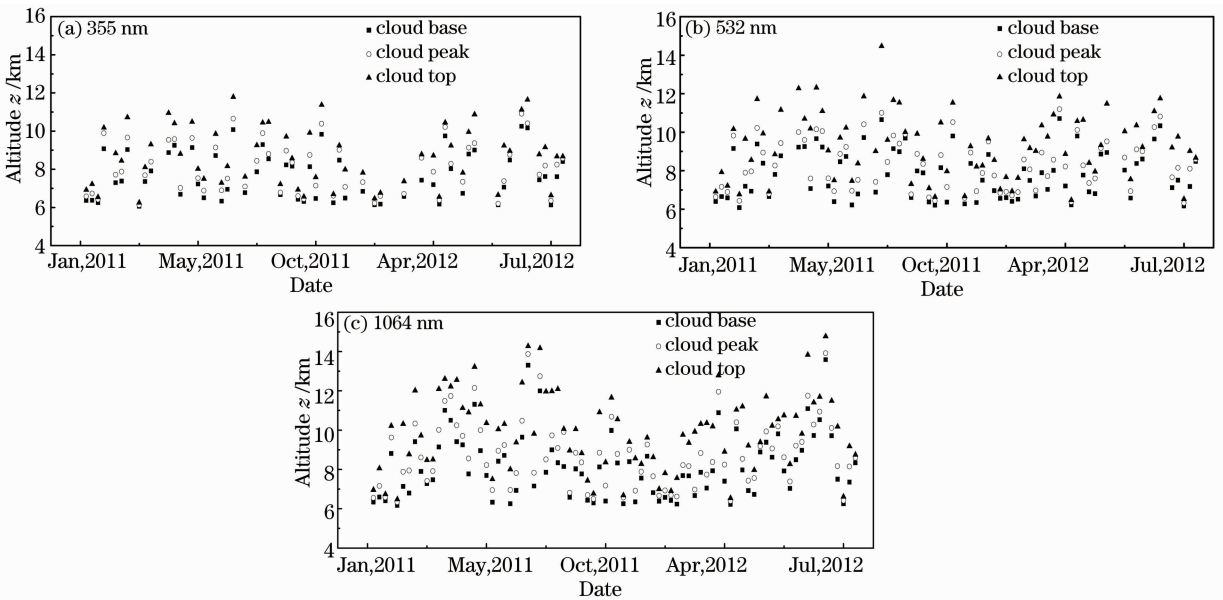


图3 不同波长处卷云云底高度、云峰高度、云顶高度分布图

Fig. 3 Base height, peak height, top height of cirrus with different wavelengths

### 5.2 卷云的光学厚度

根据3.2节介绍的计算方法,得到2011年1月~2012年10月期间卷云各个波长的光学厚度,其中,355 nm波长测得的卷云平均光学厚度为 $0.13 \pm 0.10$ ,532 nm为 $0.12 \pm 0.09$ ,1064 nm为 $0.13 \pm 0.05$ (见图4)。三波长得到的结果相差很小,由此可见卷云冰晶大粒子的消光系数与波长关系不大。

根据光学厚度可将卷云分为三类:小于0.03为

据(共计57 d),计算其云底高度、云峰高度、云顶高度和卷云厚度的日均值。波长355 nm探测所得卷云云底平均高度为 $7.63 \text{ km} \pm 1.2 \text{ km}$ ,云峰平均高度为 $8.05 \text{ km} \pm 1.3 \text{ km}$ ,云顶平均高度为 $8.69 \text{ km} \pm 1.5 \text{ km}$ ,卷云平均厚度为 $1.07 \text{ km} \pm 0.5 \text{ km}$ 。波长532 nm探测所得卷云云底平均高度为 $7.70 \text{ km} \pm 1.2 \text{ km}$ ,云峰平均高度为 $8.23 \text{ km} \pm 1.3 \text{ km}$ ,云顶平均高度为 $9.21 \text{ km} \pm 1.7 \text{ km}$ ,卷云平均厚度为 $1.51 \text{ km} \pm 0.8 \text{ km}$ 。1064 nm波长探测所得卷云云底平均高度为 $7.79 \text{ km} \pm 1.2 \text{ km}$ ,云峰平均高度为 $8.36 \text{ km} \pm 1.3 \text{ km}$ ,云顶平均高度为 $9.61 \text{ km} \pm 1.8 \text{ km}$ ,卷云的平均厚度为 $1.82 \text{ km} \pm 1.0 \text{ km}$ 。

可以看出,三波长测得的云底高度和云峰高度差异较小,云顶高度则相差略大,且波长越长得到的卷云高度越高,厚度也越厚。造成这种差异的原因有两点:1)如第4节中所述,波长355 nm对云顶弱信号探测能力较差,使得云顶高度偏低;2)3.1节中卷云结构的判断方法对于不同波长没有区分,会导致云结构的判断有一定误差。

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<sup>[12]</sup>。三类卷云出现的概率如表1所示,合肥地区的卷云光学厚度主要分布在0.03~0.3之间,以薄卷云为主,厚卷云出现的几率很小。

对三波长得到的卷云光学厚度进行更细致的分段统计,结果如图5所示。合肥地区卷云的光学厚度主要集中在0.05~0.2之间,三个波长之间略有

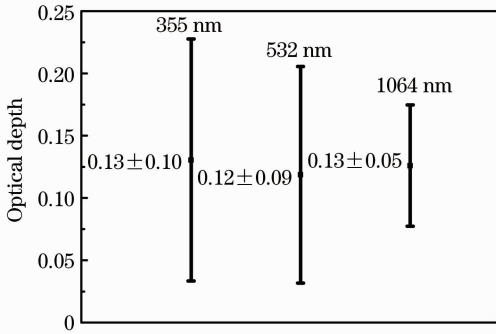


图4 卷云光学厚度均值

Fig. 4 Mean value of cirrus optical thickness

差异。355 nm 和 532 nm 出现频率最高的卷云光学厚度在 0.05~0.1 之间,而 1064 nm 出现频率最多的卷云光学厚度在 0.1~0.15 之间。

表1 三类卷云光学厚度频率分布

Table 1 Frequency distributions of three types of cirrus optical thicknesses

	355 nm	532 nm	1064 nm
<0.03	11.32%	1.89%	3.77%
0.03~0.3	83.02%	94.34%	96.23%
>0.3	5.66%	3.77%	0%

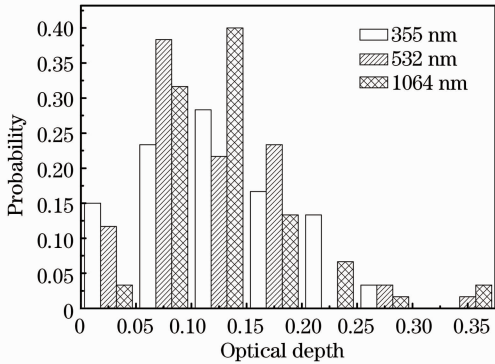


图5 卷云光学厚度出现频率分布

Fig. 5 Probability distribution of cirrus optical thickness

## 6 结 论

对 2011 年 1 月~2012 年 10 月期间三波长激光雷达系统在合肥西郊探测的卷云结构特征、光学厚度、偏振特性进行了统计对比分析,得到以下结论:

1) 三个波长对卷云的探测能力并不完全相同,波长越长对卷云的探测能力越强,这为激光雷达探测卷云时如何选择波长提供了指导;

2) 三个波长测得的云底高度和云峰高度差异较小,云顶高度则相差略大,且波长越长得到的卷云

高度越高,厚度也越厚。合肥地区的卷云主要出现在 6~15 km 之间,云峰平均高度在 8 km 左右,卷云平均厚度约为 1~2 km。冬季卷云高度相对较低,夏季则更易出现较高的卷云,与对流层顶高度的季节变化相一致;

3) 三波长计算得到的卷云光学厚度基本一致(在误差范围内),从实验验证了卷云冰晶大粒子的消光系数与波长无关的理论。在探测期间,所测得合肥地区的卷云平均光学厚度为 0.13 左右,且卷云光学厚度主要分布在 0.03~0.3 之间,以薄卷云为主,厚卷云出现的几率很小。

## 参 考 文 献

- 1 L Goldfarb, P Keckhut, M L Chanim, *et al.*. Cirrus climatological results from lidar measurements at OHP (44°N, 6°E) [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(9): 1687-1690.
- 2 A J Heymsfield, C M R Platt. 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*, 1984, 41(5): 846-855.
- 3 E J Jensen, O B Toon, H B Selkirk, *et al.*. On the formation and persistence of subvisible cirrus clouds near the tropical tropopause [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(16): 21361-21375.
- 4 H Nazaryan, M P McCormick, W P Menzel. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(D16): D16211.
- 5 T Chen, W B Rossow, Y C Zhang. Radiative effects of cloud-type variations [J]. *J Climate*, 2000, 13(1): 264-286.
- 6 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong, *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0514001.  
陈涛,赵玉洁,刘东,等.微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J].*中国激光*, 2012, 39(5): 0514001.
- 7 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.  
伯广宇,刘东,王邦新,等.探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J].*中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- 8 Ji Chengli, Zhou Jun. New calibration method for Fernald forward inversion of airborne lidar signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2051-2058.  
季承荔,周军.机载激光雷达信号 Fernald 前向反演的一种新定标方法[J].*光学学报*, 2009, 29(8): 2051-2058.
- 9 Liu Houtong, Ge Zhanqi, Wang Zhenzhu, *et al.*. Extinction coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by Fernald iterative backward integration method (FIBIM) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1837-1843.  
刘厚通,葛战旗,王珍珠,等.利用 Fernald 迭代后向积分法反演低空探测机载激光雷达消光系数[J].*光学学报*, 2008, 28(10): 1837-1843.
- 10 Zhang Qingze, Zhang Hui, Wang Ping, *et al.*. Retrieval methods of cirrus cloud effective lidar ratio [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060102.  
张清泽,张辉,王平,等.卷云有效激光雷达比反演方法研究[J].*激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060102.
- 11 Franz Immler, Otto Schrems. Determination of tropical cirrus properties by simultaneous lidar and radiosonde measurements [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(23): 2090-2094.
- 12 Liu Ruijin, Zhang Lei, Wang Hongbin, *et al.*. Cirrus cloud

- measurement using lidar over semi-arid areas [J]. Chinese J Atmospheric Sciences, 2011, 35(5): 863–870.
- 刘瑞金, 张 镭, 王宏斌, 等. 半干旱地区卷云特征的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2011, 35(5): 863–870.
- 13 Tao Zongming, Liu Dong, Wei Heli, *et al.*. The estimation of cirrus cloud particulate shape using combined simulation and a three-wavelength lidar measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1739–1743.
- 陶宗明, 刘 东, 魏合理, 等. 三波长激光雷达拟合卷云的粒子形状[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1739–1743.
- 14 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228001.
- 刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001.
- 15 Stuart A Yong. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin cloud [J]. Appl Opt, 1995, 34(30): 7019–7031.
- 16 C M Platt, S A Young, A I Carswell, *et al.*. The experimental cloud lidar pilot study (ECLIPS) for cloud-radiation research [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1994, 75(9): 1635–1654.
- 17 F G Fernald. Analysis of atmosphere lidar observation: some comments [J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652–653.
- 18 Wei-Nai Chen, Chih-Wei Chiang, Jan-Bai Nee. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. Appl Opt, 2002, 41(30): 6470–6476.
- 19 Tao Zongming, Liu Dong, Zhong Zhiqing, *et al.*. Measurements of cirrus clouds with a three-wavelength lidar [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(5): 050101.
- 20 A Ansmann, M Riebesel, C Weitkamp. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. Opt Lett, 1990, 15(13): 746–748.
- 21 Z Tao, M P McCormick, D Wu, *et al.*. Measurements of cirrus cloud backscatter color ratio with a two-wavelength lidar [J]. Appl Opt, 2008, 47(10): 478–485.
- 22 Xue Xinlian, Qi Fudi, Fan Aiyuan, *et al.*. Lidar observations of cirrus clouds over Hefei [J]. Chinese J Quantum Electronics, 2006, 23(4): 527–532.
- 薛新莲, 戚福弟, 范爱媛, 等. 合肥地区卷云的激光雷达探测[J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 527–532.

栏目编辑: 王晓球