

## 卷云有效激光雷达比反演方法研究

张清泽<sup>1</sup> 张辉<sup>1</sup> 王平<sup>1</sup> 陶晨<sup>2</sup> 聂淼<sup>1</sup> 史博<sup>1</sup> 陶宗明<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031<sup>2</sup> 安徽省长江计量所, 安徽 合肥 230031

**摘要** 卷云对地球-大气系统的辐射收支平衡有着重要的影响,研究卷云的有效激光雷达比有助于了解卷云的光学特性。介绍卷云有效激光雷达比的多种反演方法,分析它们的特点和适用范围,为合理选用这些方法提供了依据。通过探测实例,对反演结果进行系统误差和随机误差分析,结果表明这些反演方法是相融的和有效的。

**关键词** 大气光学;有效激光雷达比;激光雷达;卷云

**中图分类号** P426.5<sup>+</sup>1; TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060102

## Retrieval Methods of Cirrus Cloud Effective Lidar Ratio

Zhang Qingze<sup>1</sup> Zhang Hui<sup>1</sup> Wang Ping<sup>1</sup> Tao Chen<sup>2</sup> Nie Miao<sup>1</sup>Shi Bo<sup>1</sup> Tao Zongming<sup>1</sup><sup>1</sup> Section of Physics Teaching and Research, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China<sup>2</sup> Anhui Changjiang Institute of Metrology and Measurement, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Cirrus cloud has an important influence on the radiative balance in earth-atmosphere system, and cirrus cloud lidar ratio is helpful to understand the optical property of cirrus cloud. The retrieval methods of cirrus cloud effective lidar ratio are introduced, the features and application range of these methods are analyzed, and the reasons of selecting these methods are provided. System errors and random errors of these methods are estimated by case study. The results indicate that these retrieval methods are consistent and effective.

**Key words** atmospheric optics; effective lidar ratio; lidar; cirrus cloud

**OCIS codes** 010.1615; 280.3640; 290.5850

## 1 引言

卷云一般分布在对流层上部到平流层下部,主要由各种大小和形状的冰晶粒子组成。卷云在全球的出现概率约为30%<sup>[1]</sup>,它既反射太阳的短波辐射,又吸收地面的长波辐射,因此,它对天气与气候有着重要的影响<sup>[2]</sup>。在理解和预测全球系统变化的研究中,卷云的辐射强迫是一个尚不能精确确定的因子,故卷云一直是大气科学领域中一个热点研究内容,其光学特性的研究在国际上受到广泛的关注。人们对卷云的探测从地面测量延伸到空间卫星遥感、从被动式测量发展到主动式测量<sup>[3~7]</sup>。

激光雷达具有探测距离远、时空分辨率高等特点,因而是探测卷云强有力的工具。激光雷达比(消光系数与后向散射系数之比)是卷云的重要光学特性之一。用米氏散射激光雷达(以下简称激光雷达)测量气溶胶时,气溶胶的激光雷达比是要假设的,但测量卷云时,它却可以从激光雷达的信号中反演出来。到目前为止,已有多种反演方法,但使用者对这些方法的适用条件、引起误差的大小等还存在一些模糊认识。本文针对这些问题进行理论分析和实例估算。先简要介绍激光雷达测量卷云的原理,然后介绍有效激光雷达比反

**收稿日期**: 2012-02-16; **收到修改稿日期**: 2012-03-19; **网络出版日期**: 2012-05-05

**基金项目**: 国家自然科学基金面上项目(40975010,41175021)资助课题。

**作者简介**: 张清泽(1960—),男,硕士,副教授,主要从事大学物理教学和激光雷达测云等方面的研究。

E-mail: zqz591@sohu.com

\* **通信联系人**。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

演方法,并分析这些方法的特点,最后给出有效激光雷达比的误差估算方法和实例结果。

## 2 测量原理

有卷云时的激光雷达方程可表示为<sup>[8]</sup>

$$P(z) = C \frac{\beta_a(z) + \beta_m(z) + \beta_c(z)}{z^2} \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz'\right\} \exp\left[-2 \int_{z_b}^z \eta \alpha_c(z') dz'\right], \quad (1)$$

式中  $P(z)$  为激光雷达接收距离  $z$  处的大气后向散射回波信号,  $C$  为激光雷达系统常数(包括能量),  $\beta_a(z)$ ,  $\beta_m(z)$ ,  $\beta_c(z)$  分别为距离  $z$  处气溶胶、大气分子和卷云的后向散射系数,  $\alpha_a(z)$ ,  $\alpha_m(z)$ ,  $\alpha_c(z)$  分别为距离  $z$  处气溶胶、大气分子和卷云的消光系数,  $z_b$  为卷云的云底距离,  $\eta$  为云多次散射的因子。  $z_t$  为卷云的云顶距离, 卷云的后向散射系数和消光系数在  $z_b \sim z_t$  距离范围之外的值为零。

为了计算的方便,常引入距离修正信号  $X(z)$ , 则上述方程又可改写为

$$X(z) = P(z)z^2 = C[\beta_a(z) + \beta_m(z) + \beta_c(z)]T_{a,m}^2(0, z)T_c^2(z_b, z), \quad (2)$$

式中  $T_{a,m}(0, z) = \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz'\right\}$  为大气分子和气溶胶从雷达处至  $z$  处的透射率,  $T_c(z_b, z) = \exp\left[-\int_{z_b}^z \eta \alpha_c(z') dz'\right]$  为卷云从云底至  $z$  处的透射率。

若无卷云存在, (2)式可简化为

$$X'(z) = C'[\beta_a(z) + \beta_m(z)]T_{a,m}^2(0, z). \quad (3)$$

比较(2), (3)式可知,在卷云云下方和卷云云上方,两个方程都成线性关系,只不过比例系数不同而已;在卷云存在的高度中, (2)式中有卷云信号而(3)式无卷云信号,故两者差别较大。为了帮助理解,图1给出了2006年6月21日两不同时刻探测到有卷云和无卷云的激光雷达距离修正信号。

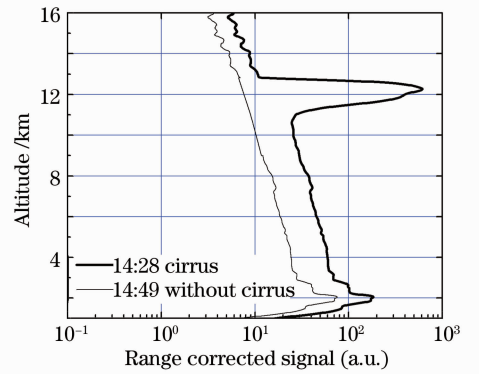


图1 有卷云和无卷云的激光雷达距离修正信号

Fig.1 Range corrected signals with and without cirrus cloud

## 3 反演方法

卷云粒子的激光雷达比  $S_c$  定义为

$$S_c = \frac{\alpha_c}{\beta_c}. \quad (4)$$

为了用大家熟悉的 Fernald<sup>[9]</sup>方法计算,常引入有效激光雷达比  $\eta S_c$ 。由测量数据,根据上述激光雷达方程,应用适当的方法就可以把卷云的有效激光雷达比反演出来。

### 3.1 光学厚度约束的反演方法

光学厚度约束的反演方法(以下称方法1)是 Young<sup>[8]</sup>于1995年提出的,具体的思路是两大步骤:先反演出卷云的光学厚度,后拟合出卷云的有效激光雷达比。

对于卷云的光学厚度的反演,在卷云的上方和下方各取一个合适的区域,假设这两个区域之间的(包括这两个区域)大气分子和气溶胶分布情况与卷云是否存在无关,也就是说,若卷云消失了,在上述区域内的大气分子和气溶胶的分布是不变的。若得到有卷云和无卷云两种情况下激光雷达的信号,就可算出有卷云与无卷云时激光雷达信号在卷云下方和上方的比值  $C_1$  和  $C_2$ <sup>[10]</sup>,利用下面的公式,可得出卷云的光学厚度:

$$\tau_c = -\ln T_c = -0.5 \ln \frac{C_2}{C_1}. \quad (5)$$

有卷云的激光雷达信号是必须要探测的,而无卷云的激光雷达信号的获得可分为下面两种情况:1)卷云出现在气溶胶的清洁区,即在卷云出现的高度上,几乎没有气溶胶。在这种情况下,无云的激光雷达回波信

号可以由大气分子参数来构建<sup>[9]</sup>,不需要探测。2)卷云高度附近有气溶胶层且卷云是间歇出现的,这种情况下的无卷云激光雷达信号不仅由大气分子决定,还与气溶胶有关。当卷云时而存在时而消失时,在连续的激光雷达探测中,就包含了无卷云的激光雷达信号。

对于卷云有效激光雷达比的拟合,先根据 Fernald<sup>[9]</sup>公式反演出卷云的消光系数,然后用上面算出的光学厚度作为条件进行拟合。令卷云的有效激光雷达比  $\eta S_c$  在 0.1~200 Sr 范围内变化,步长为 0.1 Sr,这样可以得到一系列的消光系数  $\alpha_c(z, \eta S_c)$  廓线。卷云的光学厚度与消光系数的关系为

$$\tau_c(\eta S_c) = \int_{z_b}^{z_t} \alpha_c(z, \eta S_c) dz. \quad (6)$$

将上述一系列  $\alpha_c(z, \eta S_c)$  廓线代入(6)式,可得出一系列的卷云光学厚度  $\tau_c(\eta S_c)$ 。把这一系列的光学厚度与(5)式算出的结果进行拟合,找出相等的光学厚度(在误差允许范围内),则这个光学厚度对应的假设有效激光雷达比即为卷云的有效激光雷达比。

### 3.2 积分带衰减后向散射系数的反演方法

在有卷云区域中,大气分子和气溶胶的影响一般是很小的,作为近似,可以忽略不计。以卷云的云底  $z_b$  为参考点,忽略大气分子和气溶胶后,从激光雷达方程可得出卷云带衰减后向散射系数为

$$\beta' = (\beta_c + \beta_m) \exp\left\{-2 \int_{z_b}^z [\eta \alpha_c(z') + \alpha_m(z')] dz'\right\} \approx \beta_c(z) \exp\left[-2 \int_{z_b}^z \eta \alpha_c(z') dz'\right]. \quad (7)$$

将  $\beta'$  在卷云出现的高度范围积分,可得<sup>[11,12]</sup>

$$\gamma' = \int_{z_b}^{z_t} \beta'(z') dz' = \frac{1 - \exp(-2\tau_c)}{2\eta S_c}. \quad (8)$$

对(8)式进行变换可得

$$\eta S_c = \frac{1 - \exp(-2\tau_c)}{2\gamma'}. \quad (9)$$

该式就是利用积分带衰减后向散射系数反演卷云有效激光雷达比的公式(以下称方法 2)。

### 3.3 其他反演方法

拉曼激光雷达和米氏散射激光雷达结合在一起称为拉曼-米氏激光雷达。利用拉曼-米氏激光雷达,可以独立反演卷云的消光系数和后向散射系数,从而算出卷云的有效激光雷达比<sup>[13]</sup>。这一方法的优点是消光系数独立计算;不足之处是拉曼激光雷达的信号一般要比米氏散射激光雷达小 3 个数量级,因而在卷云出现的高度上其信噪比不高,且白天难以工作。

高分辨光谱激光雷达也可以反演出卷云的有效激光雷达比<sup>[14]</sup>。高分辨光谱激光雷达是利用高分辨光谱技术和多普勒效应把卷云和大气分子的激光雷达信号分开,分别得到卷云和大气分子的激光雷达信号,从而反演出卷云的消光系数和后向散射系数,进而得到卷云的有效激光雷达比。这一方法的优点是反演卷云有效激光雷达比的精度较高;不足之处是激光雷达系统复杂、价格昂贵。该方法目前还没有得到广泛应用。

Wang 等<sup>[15]</sup>发展了光学厚度约束反演有效激光雷达比的方法,他们提出在获得卷云的光学厚度后,把卷云的影响从激光雷达方程中剔除,然后用卷云云底的气溶胶消光系数作为约束条件来拟合卷云的有效激光雷达比。从报道的结果来看,这一方法也是可行的。

## 4 误差分析

上面介绍的前两种方法是反演卷云激光雷达比的常用方法。其共同点是反演的数据都来源于米氏散射激光雷达,不同之处是具体的过程不一样:方法 1 把光学厚度作为约束条件进行拟合,没有用到近似计算,反演结果只有随机误差;方法 2 的公式推导中忽略了大气分子的影响,用到了近似计算,反演结果不仅有随机误差,还有系统误差。

### 4.1 系统误差分析

对于方法 2,若考虑大气分子的影响,就要对(9)式的系统误差进行修正<sup>[16]</sup>。令

$$\beta'' = \beta' / \int_{z_b}^z [\alpha_m(z')] dz' = (\beta_c + \beta_m) T_c^2(z_b, z), \quad (10)$$

则有

$$\eta S_c = \frac{1 - \exp(-2\tau_c)}{2 \left\{ \int_{z_b}^{z_t} \beta''(z') dz' - \int_{z_b}^{z_t} [\beta_m(z') T_c^2(z_b, z')] dz' \right\}}. \quad (11)$$

因为变量  $T_c(z_b, z)$  是未知的, 故(11)式分母中的第二项不能精确算出, 只能估算。令

$$\int_{z_b}^{z_t} [\beta_m(z') T_c^2(z_b, z')] dz' \approx \frac{1}{2} (z_t - z_b) [\beta''(z_b) + \beta''(z_t)], \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式可得

$$\eta S_c = \frac{1 - \exp(-2\tau_c)}{2 \left\{ \int_{z_b}^{z_t} \beta''(z') dz' - (z_t - z_b) [\beta''(z_b) + \beta''(z_t)] / 2 \right\}}, \quad (13)$$

(13)式就是修正系统误差后的有效激光雷达比公式。

中国科学院大气成分与光学重点实验室近期建立了一台三波长测卷云的激光雷达系统<sup>[17]</sup>, 并用于常规测量。这台激光雷达于2011年4月20日在合肥上空探测到了透明卷云, 用上述两种方法反演该次卷云的有效激光雷达比, 结果如表1所示(数据为532 nm波长激光雷达信号, 反演中的无云激光雷达信号由中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心12年大气探空的平均分子参数构建)。

表1 两种方法反演卷云的有效激光雷达比

Table 1 Retrieved effective lidar ratios of cirrus cloud by two methods

Measuring time	Cirrus cloud optical depth	Effective lidar ratio (method 1)/Sr	Effective lidar ratio (method 2)			
			Before correction /Sr	Relative deviation /%	After correction /Sr	Relative deviation /%
18:01	0.31	39.4	33.6	14.7	41.3	4.8
18:15	0.45	35.4	32.4	8.5	36.6	3.4
18:30	0.49	36.6	33.2	9.3	38.0	3.8
18:45	0.72	33.1	30.9	6.6	33.9	2.4
19:00	0.92	28.4	27.4	3.5	28.8	1.4

从表1中可以看出:方法1和修正前的方法2反演出的卷云有效激光雷达比之间存在一定的偏差, 且偏差随着光学厚度的增加而减小。很显然, 这是由于方法2忽略了大气分子影响而引起的, 因为卷云光学厚度越大, 大气分子的影响就越小。方法2修正后的结果与方法1的结果之间的偏差明显降低。方法1没有系统误差, 以方法1反演的结果为标准, 光学厚度为0.31时, 修正前的相对偏差约为15%, 修正后的相对偏差仅为5%; 光学厚度为0.92时, 修正前后的相对偏差分别约为3.5%和1.4%, 都较小, 但修正后仍有改善, 这是因为光学厚度大, 方法2的近似条件可以较好地满足, 但仍存在近似性。从表1中还可以看出:修正前方法2的反演结果小于方法1的, 修正后的方法2结果略大于方法1的。这用(9)式和(13)式可以很好地进行解释:修正前方法2的结果由(9)式算出, 这时公式中分母值偏大, 导致反演结果偏小; 修正后方法2的结果由(13)式算出, 这时公式分母中第二项(被减项)的值估算偏大, 使得整个分母项略偏小, 导致反演结果略偏大。换句话说, 实验结果与系统误差的估算是一致的。

#### 4.2 随机误差分析

方法1反演卷云有效激光雷达比的随机误差(以下简称误差)主要来自于卷云光学厚度计算的误差、参考点(清洁点)卷云后向散射系数比假设的误差、大气分子参数的误差等。由这些误差源引起的总误差用传统误差传递公式来估算是方便的, 需要用到文献[18]中所介绍的方法来估算, 即

$$\sigma(\eta S_c) = \sqrt{\sigma^2(\tau) + \sigma^2(R) + \sigma^2(\beta_m)}, \quad (14)$$

式中  $\sigma(\eta S_c)$  为有效激光雷达比的总误差,  $\sigma(\tau)$  为光学厚度误差传递给有效激光雷达比的误差,  $\sigma(R)$  为参考点卷云后向散射系数比假设的误差传递给有效激光雷达比的误差,  $\sigma(\beta_m)$  为大气分子后向散射系数的误差传递给有效激光雷达比的误差。

卷云光学厚度计算误差由有云激光雷达信噪比、无云激光雷达信号误差来决定。一般情况下,对于透明卷云,其光学厚度的相对误差在 5% 以下;参考点卷云后向散射系数比假设为 1.01,其相对误差在 2% 以下;大气分子参数的误差在 2% 以下。由这 3 个误差的大小,利用(14)式,就可以得出卷云有效激光雷达比的总误差。

方法 2 反演卷云有效激光雷达比的误差主要来自于卷云光学厚度计算的误差、带衰减的后向散射系数定标的误差、大气分子参数的误差等。仿照上面的做法,对于透明卷云,其光学厚度的相对误差在 5% 以下;带衰减的后向散射系数定标引起的相对误差在 2% 以下;大气分子参数的误差在 2% 以下。由这 3 个误差的大小,利用(14)式,就可以得出卷云有效激光雷达比的总误差。表 2 给出了表 1 中实例分别用两种方法反演卷云有效激光雷达比的总误差,其中各种误差源导致的随机误差均取上限。

表 2 两种方法反演卷云有效激光雷达比的误差

Table 2 Errors from retrieved effective lidar ratios of cirrus cloud by two methods

Measuring time	Cirrus cloud optical depth	Method 1		Method 2	
		Absolute error /Sr	Relative error /%	Absolute error /Sr	Relative error /%
18:01	0.31	39.4±2.6	6.4	41.3±2.7	6.5
18:15	0.45	35.4±1.5	4.2	36.6±1.6	4.4
18:30	0.49	36.6±1.5	4.0	38.0±1.6	4.1
18:45	0.72	33.1±1.1	3.2	33.9±1.1	3.2
19:00	0.92	28.4±0.8	2.9	28.8±0.8	2.9

从表 2 可知:随机误差与卷云的光学厚度有关、与计算中应用的假设等因素有关,方法 1 和修正的方法 2 反演结果的相对误差几乎相等;在假设条件不变的情况下,误差随卷云的光学厚度增加而减小。

理论上,多次散射因子  $\eta < 1$ ,其大小与云的光学厚度、望远镜的视场角和云的高度等因素有关,且随光学厚度的增加而变小<sup>[5]</sup>。卷云的激光雷达比与卷云的成分、尺度谱、温度、形状等因素有关。有效激光雷达散射比是多次散射因子与激光雷达比的乘积。假设在一次探测中,卷云的激光雷达比大小相近,则表 1 中反演出的卷云有效激光雷达比随光学厚度增加而减小是合理的,主要原因是多次散射因子在变小。从表 2 中还可得知:在误差范围内,方法 1 和方法 2 反演出的结果可以认为是一致的,并且这一结果与 Wang 等<sup>[15]</sup>在合肥反演卷云的结果是相融洽的。

所谓不透明卷云是指光学厚度较大,激光不能穿过整层卷云。对于不透明卷云,由于其透射率为零,云顶上方无有效信号,因而无法算出卷云的光学厚度。在这种情况下,方法 1 就不能反演卷云的有效激光雷达比,但利用

$$\eta S_c = \frac{1}{2 \left\{ \int_{z_b}^{z_t} \beta''(z') dz' - (z_t - z_b) [\beta''(z_b) + \beta''(z_t)] / 2 \right\}}, \quad (15)$$

仍可估算不透明卷云的有效激光雷达比。

## 5 结 论

有效激光雷达比是卷云的一个重要光学参数。由米氏散射激光雷达探测到的卷云信号,可用光学厚度约束反演方法、积分带衰减后向散射系数反演方法等来反演。不同方法反演有效激光雷达比的系统误差和随机误差是可以估算的,由误差分析可知:光学厚度约束反演方法适用于薄透明卷云的情况,这时仅有随机误差,没有系统误差;积分带衰减后向散射系数反演方法适用于各种光学厚度的卷云,但要进行系统误差修正,修正后除随机误差外,仍有一些系统误差残留。通过具体的实例反演,说明这些反演方法都是相融、有效、可行的。由激光雷达信号反演有效激光雷达比时,要根据卷云的光学厚度和误差要求来选择合适的反演

方法,以提高反演结果的精度。

### 参 考 文 献

- 1 D. P. Wylie, W. P. Menzel. Eight years of high cloud statistics using HIRS[J]. *J. Climate*, 1999, **12**(1): 170~184
- 2 M. B. Baker. Cloud microphysics and climate[J]. *Science*, 1997, **276**(5315): 1072~1078
- 3 G. S. Kent, K. H. Sage, C. R. Trepte *et al.*. Stratospheric aerosol and gas experiment III cloud data product[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(8): 1261~1278
- 4 G. Hong, P. Yang, B. C. Gao *et al.*. High cloud properties from three years of MODIS Terra and Aqua Collection-4 data over the tropics[J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2007, **46**(11): 1840~1856
- 5 W. N. Chen, C. W. Chiang, J. B. Nee. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(30): 6470~6476
- 6 Mao Feiyue, Gong Wei, Li Jun *et al.*. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3097~3102  
毛飞跃, 龚威, 李俊等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3097~3102
- 7 Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1321~1324  
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1321~1324
- 8 S. Young. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30): 7019~7031
- 9 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 10 Nie Miao, Tao Zongming. Measurement of lidar ratio of high cirrus cloud[J]. *J. Artillery Academy*, 2011, **31**(6): 84~86  
聂淼, 陶宗明. 高层卷云激光雷达比的探测[J]. *炮兵学院学报*, 2011, **31**(6): 84~86
- 11 C. M. R. Platt, D. M. Winker, M. A. Vaughan *et al.*. Backscatter-to-extinction ratios in the top layers of tropical mesoscale convective systems and in isolated cirrus from LITE observations[J]. *J. Appl. Meteor.*, 1999, **38**(9): 1330~1345
- 12 Min Min, Wang Pucui, Zong Xuemei *et al.*. Extinction to backscatter ratio of cirrus clouds retrieved by spaceborne lidar over China[J]. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2010, **34**(3): 506~512  
闵敏, 王普才, 宗雪梅等. 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*, 2010, **34**(3): 506~512
- 13 A. Ansmann, U. Wandinger, M. Riebesell *et al.*. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus cloud using a combined Raman elastic-backscatter lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(33): 7113~7131
- 14 C. J. Grund, E. W. Eloranta. The 27~28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: cloud optical properties determined by high spectral resolution lidar[J]. *Monthly Weather Rev.*, 1990, **118**(11): 2344~2355
- 15 Wang Zhenzhu, Liu Dong, Xie Chenbo *et al.*. An iterative algorithm to estimate lidar ratio for thin cirrus cloud over aerosol layer[J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2011, **15**(3): 209~215
- 16 M. A. Vaughan, Z. Y. Liu, M. J. McGill *et al.*. On the spectral dependence of backscatter from cirrus clouds; assessing CALIOP's 1064 nm calibration assumptions using cloud physics lidar measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: D14206
- 17 Zongming Tao, Dong Liu, Zhiqing Zhong *et al.*. Measurements of cirrus cloud with a three-wavelength lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(5): 050101
- 18 Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1214001  
陶宗明, 吴德成, 刘东等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1214001