

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.

# 中国地区卷云消光后向散射比的星载激光雷达遥感

闵敏<sup>1, 2</sup> 王普才<sup>1</sup> 宗雪梅<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 利用两年的星载激光雷达数据对中国地区卷云的消光后向散射比[又称激光雷达比(简称 LR)]进行了研究分析。其中结合多次散射对光学厚度的依赖关系式和 LR 与透过率之间的关系式来求取 LR, 并提出五条质量控制标准来保证数据质量的可靠性。统计结果指出 LR 的月季变化并不是很明显, 均值在 24 左右。中国地区的 LR 在热带辐合带相对较高, 并随纬度的降低而增加(大约从 22 到 27)。同时, 从这个结论得出, 为了更好地求取卷云的光学厚度, 在中国地区为星载激光雷达选取的 LR 常数应该随纬度变化而改变。

**关键词** 卷云 消光后向散射比 星载激光雷达

**文章编号** 1006-9895(2010)03-0506-07

**中图分类号** P406

**文献标识码** A

## Extinction to Backscatter Ratio of Cirrus Clouds Retrieved by Spaceborne Lidar over China

MIN Min<sup>1, 2</sup>, WANG Pucai<sup>1</sup>, and ZONG Xuemei<sup>1</sup>

1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** The two-year spaceborne lidar data are used to study the extinction-to-backscatter ratio, i. e., lidar ratio (LR), of cirrus clouds over China. The LR's are retrieved by the combination of the equation between multiply scattering factor and optical depth and the equation between LR and transmittance. Additionally, five data quality control standards have been made to assure the high availability. The mean value of LR is 24 without prominent monthly and seasonal variations. The LR's are relatively high in the intertropical convergence zone over China, and increase with latitude decreasing (approximately from 22 to 27). This demonstrates that constant LR should be changed with latitude in order to enhance the quality of retrieval of cirrus cloud optical depth.

**Key words** cirrus, extinction-to-backscatter ratio, spaceborne lidar

## 1 引言

消光后向散射比作为粒子散射的内部性质[又

称激光雷达比(简称 LR)]是激光雷达方程中两个重要的未知参数之一(Klett, 1981; Fernald, 1984)。LR 等于  $\sigma/\beta$  ( $\pi$ ), 其中  $\sigma$  代表的是散射粒

子的消光系数,  $\beta(\pi)$  代表的是在方位角  $\pi$  处的散射系数(又称后向散射系数)。从定义上看, LR 的大小表征散射粒子的散射能力。激光雷达方程反演气溶胶和云的消光系数和光学厚度对 LR 的取值非常敏感(Klett, 1985; Sasano et al., 1985; Qiu, 1988; Kovalev, 1995)。尽管 LR 随高度具有明显的变化(Ansmann et al., 1992), 但是为了简化计算, 在通常的雷达方程求解中都采用柱平均值(Klett, 1981; Platt, 1973; 邱金桓等, 2003)。LR 不仅对激光雷达方程求解至关重要, 它对散射粒子外形的敏感性也可以用来鉴别气溶胶和云种(Ackermann, 1998; He et al., 2006)。

Ackermann (1998) 利用气溶胶和云光学性质计算程序 (Optical Properties of Aerosol and Clouds, 简称 OPAC) (Hess et al., 1998) 模拟了三种不同气溶胶的 LR。他的研究指出气溶胶种类和环境湿度对 LR 有明显的影响。Takano and Liou (1989, 1995) 在理论上研究了卷云的 LR, 并指出 LR 对冰晶粒子的外形和高宽比十分的敏感。

Macke (1993) 对不同形状的冰晶粒子的 LR 也做了理论性的探索。除理论研究之外, 卷云的 LR 也在世界范围内得到了广泛的观测和研究, 相似的研究在中国地区却几乎为零。表 1 列出了在世界各地观测的卷云 LR。从表 1 可以看出世界各地所测的 LR 都集中在 15~50 sr 之间, 最大值也不超过 150。

2006 年 6 月反射升空的云—气溶胶激光雷达和红外探险者观测卫星 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, 简称 CALIPSO) (Winker et al., 2003, 2007) 所搭载的云—气溶胶正交偏振激光雷达 (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, 简称 CALIOP) 为研究卷云的 LR 提供了大好契机。本文主要利用星载激光雷达 CALIOP 来研究中国地区 ( $17^{\circ}\text{N}\sim 54^{\circ}\text{N}$ ,  $72^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$ ) 的 LR (532 nm)。通过该项研究来总结出中国地区卷云的 LR 的特征。除此之外, 为获得较高价值的数据提出了额外的数据质量控制标准。

表 1 世界各地卷云激光雷达比的观测  
Table 1 Lidar ratios (LRs) of cirrus clouds observed at worldwide locations

| 观测仪器                                                                           | 地点 (时期)                                                       | LR/sr                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 激光雷达 (694 nm), 红外辐射计 (10~12 $\mu\text{m}$ )<br>(Platt, 1973)                   | Adelaide (1970 年 11 月)                                        | 50.2 $\pm$ 12.1                              |
| 激光雷达 (694 nm), 红外辐射计 (10~12 $\mu\text{m}$ )<br>(Platt and Dilley, 1981)        | Aspendale, Victoria (38°S, 144°E), (1978 年 8 月)               | 46.5 (−60℃), 23.3 (−40℃),<br>17.9 (−20℃)     |
| 激光雷达 (694 nm), 红外辐射计 (10~12 $\mu\text{m}$ )<br>(Platt et al., 1987)            | Darwin, northern Australia (1978, 1979, 1980)                 | 39.3~78.5                                    |
| 高光谱激光雷达 (510.6 nm) (Grund and Eloranta, 1990)                                  | University of Wisconsin (1986 年 10 月 27~28 日)                 | 15.4~50                                      |
| 四种不同的激光雷达 (Ansmann et al., 1993)                                               | German Bight (53.5°N~55°N, 7°E~9°E)<br>(1989 年 10 月 18 日)     | 6~16                                         |
| 激光雷达 (532 nm), 红外滤光辐射计 (10.84 $\mu\text{m}$ )<br>(Platt et al., 1998)          | Kavieng, New Ireland (2.5°S, 152°E)<br>(1993 年 1~2 月)         | 34.9 $\pm$ 9.7~150 $\pm$ 21.4<br>(−20~−70℃)  |
| 空间技术试验激光雷达 (Platt et al., 1999)                                                | 五个热带对流系统个例 (1994 年 9 月 9~19 日)                                | 29.1~69 (−40~−70℃)                           |
| 三种不同的激光雷达 (Beyerle et al., 2001)                                               | Table Mountain Facility (34.38°N, 117.68°W)<br>(1997)         | 15 $\pm$ 7.4 (532 nm)                        |
| 激光雷达 (694 nm), 中红外辐射计 (9.5~11.5 $\mu\text{m}$ )<br>(Sassen and Comstock, 2001) | Salt Lake City, Utah (40°49'N, 111°49'E)<br>(1986~1996 年)     | 20~25.6 (四种不同卷云产生机制的 LR)                     |
| 激光雷达 (532nm), 红外辐射计 (10.6 $\pm$ 0.25 $\mu\text{m}$ )<br>(Platt et al., 2002)   | Pirlangimpi Golf Club (11.40°S, 130.41°E)<br>(1995 年 11~12 月) | 35.9 $\pm$ 6.2~73.9 $\pm$ 13<br>(−40~−70℃)   |
| 星载激光雷达 (CALIOP, 532 nm) 和 云物理激光雷达 (532 nm) (Vaughan et al., 2008)              | −3°S 至 53°N 的若干卷云 (2006 年 6 月 15 日和 12 月 31 日)                | 23 $\pm$ 9 (CALIOP)<br>25 $\pm$ 10 (云物理激光雷达) |

## 2 数据和反演算法

本文采用两年(2006年6月~2008年5月)连续且高质量的 CALIOP Level 2 水平分辨率为 5 km 的云层产品(LID L2 05kmCLay-Prov-V2-01)。我们采用了该产品中的特征分类标志来确定云种(Liu et al., 2005)和云的双向透过率  $T^2$  产品来求取最终的卷云的 LR。除此之外,本文所使用产品中的云温、云高等辅助数据都是由 NASA 的全球模拟和同化实验室(Global Modeling and Assimilation Office, 简称 GMAO)所提供(Winker et al., 2003)。

基本的激光雷达回波能量  $P(r)$  方程(Platt, 1979; Young, 1995)如下:

$$P(r) = \frac{C}{r^2} [\beta_m(r) + \beta_c(r)] T_m^2(0, r) \cdot T_c^2(r_t, r) + P_0, \quad (1)$$

其中,  $C$  是激光雷达系统常数;  $r_t$  代表云顶的距离(因为 CALIOP 天顶朝下观测的);  $\beta_m$  和  $\beta_c$  分别代表分子和云的后向散射系数;  $T_m$  和  $T_c$  是分子和云的透过率;  $P_0$  是背景信号电压,由于  $P_0$  相对于其他项较小,所以在后面的计算中给省略了。由于卷云对激光能量产生的是消光和后向散射的作用,所以方程(1)两端同除以  $C/r^2$ , 得

$$\gamma(r) = \frac{P(r)r^2}{C} = [\beta_m(r) + \beta_c(r)] T_m^2(0, r) \cdot T_c^2(r_t, r) = \beta(r) T^2(r), \quad (2)$$

其中,  $\gamma$  是消光后向散射,并将分子和卷云的透过率和后向散射统一写成  $T$  和  $\beta$ 。而透过率  $T$  又满足等式:

$$T^2(r) = \exp[-2\eta\sigma(r)]. \quad (3)$$

同时,消光和后向散射系数之间也满足关系等式:

$$\sigma = \eta S_c \beta, \quad (4)$$

其中,  $\eta$  和  $\sigma$  分别是多次散射因子和消光系数,而  $S_c$  就是我们所要求的激光雷达比 LR。通过利用公式(3)和(4),可以将公式(2)从云底到云顶积分得到:

$$\int_{r_b}^{r_t} \gamma(r) dr = \int_{r_b}^{r_t} \beta(r) T^2(r) dr, \quad (5)$$

$$\gamma' = \int_{r_b}^{r_t} \frac{\sigma(r)}{\eta S_c} \exp[-2\eta\sigma(r)] dr. \quad (6)$$

在方程(6)中,我们用  $\gamma'$  代表积分的消光后向散射。由于光学厚度  $\tau$  是消光系数在路径上的积分,满足关系式  $\tau = \int_{r_b}^{r_t} \sigma(r) dr$ 。所以利用积分定理,将

方程(6)变形为

$$\gamma' = \frac{1}{2\eta S_c} [1 - \exp(-2\eta\tau)], \quad (7)$$

$$\eta S_c = \frac{1 - T^2}{2\gamma'}, \quad (8)$$

根据方程(8),我们可以首先求取有效的激光雷达比  $\eta S_c$ 。

为了获取  $S_c$ , 就要获得多次散射因子。但是  $\eta$  在观测中却并不是很容易获取。 $\eta$  主要是由仪器的扫描轨迹的尺度、离目标(卷云)的距离以及冰晶的外形和方向性所决定的(Platt, 1981)。Chepfer et al. (1999) 建议星载激光雷达的  $\eta$  应该小于 0.5。但是, Winker (2003) 利用蒙特卡罗模式模拟 CALIPSO 卫星 532 nm 通道的  $\eta$  在 0.6~0.75 之间。云的光学厚度以及消光系数的增加会导致云中发射多次散射的几率增加,从而加大了多次散射对激光雷达反演的影响(Winker, 2003)。所以,在本文中我们利用 Chen et al. (2002) 发展的方法求  $\eta$ , 具体的求解方程为

$$\eta = \tau / [\exp(\tau) - 1]. \quad (9)$$

图 1 给出了利用方程(9)计算的多次散射因子  $\eta$  随光学厚度  $\tau$  的变化关系,虚线代表 CALIOP 的云探测区间以外的部分( $\tau \leq 3$ ) (Vaughan et al., 2005)。

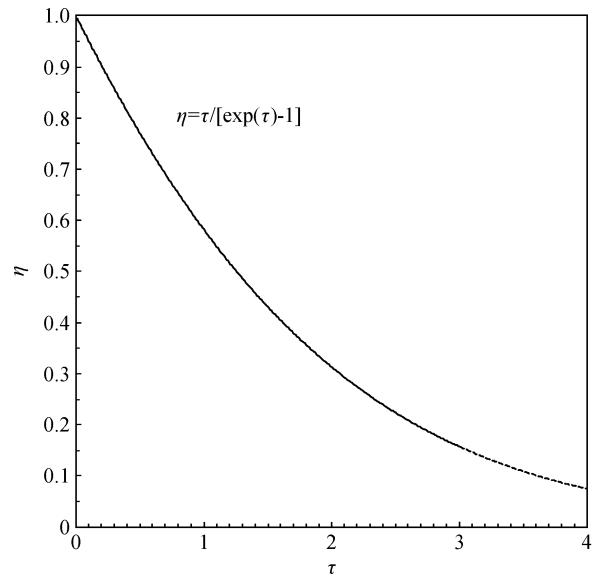


图 1 利用方程(9)计算的多次散射因子  $\eta$  随光学厚度  $\tau$  的变化关系。虚线: CALIOP 的云探测区间以外的部分( $\tau \leq 3$ )

Fig. 1 Relationship between multiply scattering factor  $\eta$  and cirrus cloud optical depth  $\tau$  by using formula (9). The dashed line represents the part out of the detection limit ( $\tau \leq 3$ ) of CALIOP for clouds

### 3 数据质量控制标准

虽然 CALIPSO 的情景判别算法能够较为准确地确定云种,但是抬升的气溶胶层、混合相态的云和白天太阳光产生的信号噪音都有可能引起卷云的误判 (Vaughan et al., 2005)。为了确保选取的卷云都是纯冰云,我们根据卷云气候态的结果 (Sassen and Campbell, 2001) 来制定控制数据质量的标准。第一和第二个标准分别是云顶温度要低于  $-40^{\circ}\text{C}$  和可见光学厚度  $\tau$  要小于 3 (Sassen and Campbell, 2001; Sassen et al., 2008)。其次,我们也利用卷云底的高度不小于 5 km 作为第三条控制标准 (Dowling and Radke, 1990)。以上的三条标准都能大量剔除错误的判断。除此之外,根据表 1 的结果看出合理的 LR 都在 200 以内,所以第四条质量控制标准是 LR 小于 200 sr。

CALIOP 的卷云光学厚度的反演算法是首先确定透过率,再利用方程 (6) 来计算最后的有效激光雷达比  $\eta S_c$  带入回波方程进行迭代计算。如果不能获取  $\eta S_c$ ,则采用 15 ( $\eta=0.6$ ,  $S_c=25$ ) 作为最后的  $\eta S_c$  带入方程计算 (Vaughan et al., 2005; Young et al., 2007)。CALIOP 产品中的双向透过率  $T^2$  的表达式为

$$T^2 = \frac{P_{\text{base}}}{P_{\text{top}}}, \quad (10)$$

其中,  $P_{\text{base}}$  和  $P_{\text{top}}$  分别代表拟合的云底和云顶的平均回波能量。忽略的云顶和云底气溶胶的消光作用和白天太阳光产生的信号噪音都会明显影响  $T^2$  的结果,从而影响  $\eta S_c$  和光学厚度  $\tau$  的求取。我们可以利用  $T$  和  $\tau$  近似地满足等式 (3) 的关系来判别  $T$  的数据质量。最后,采用通过等式 (3) 计算的和 CALIOP 观测的双向透过率  $T^2$  之间的相对误差来进行数据质量控制。光学厚度受  $\eta S_c$  的影响随  $\tau$  的增加而增加 (Qiu, 1988; Kovalev, 1995)。在这里,我们为了保证数据的质量,假设由于  $\eta S_c$  的不确定性引起的光学厚度  $\tau$  的误差在 5% 以内,通过误差传递公式计算  $T^2$  的相对误差在 9% 左右。所以,第五个数据质量控制标准就是  $T^2$  的相对误差要小于 9%。

### 4 结果

首先,我们统计了 LR 的概率密度分布,在图 2 中给出了经过质量控制和未经过质量控制的统计

结果 (实线和虚线表示)。可以看出未经过质量控制的数据中 LR 小于 10 的较多。这些不准确的数据大多数是由于透过率测量的不准确和对卷云的误判导致的。经过数据质量控制后的概率密度分布呈现明显的高斯正态分布特征,而且分布的形状与 Vaughan et al. (2008) 利用 CALIOP 观测的结果相似,不过,我们的结果在 LR 高值区的分布却相对

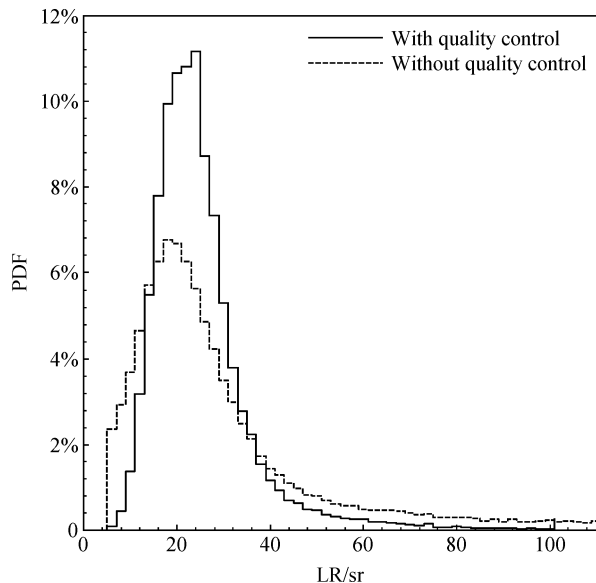


图 2 间隔为 2 sr 的 LR 的概率密度分布。实、虚线: 经过、未经过质量控制的数据结果

Fig. 2 Probability density function (PDF) of LR with 2-sr interval. The solid and dashed lines represent the results with and without quality control, respectively

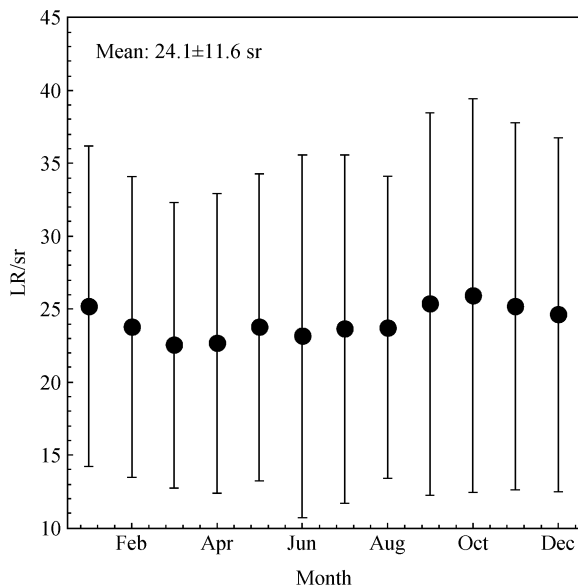


图 3 LR 的月平均值和标准偏差

Fig. 3 Monthly mean values and standard deviations of LR

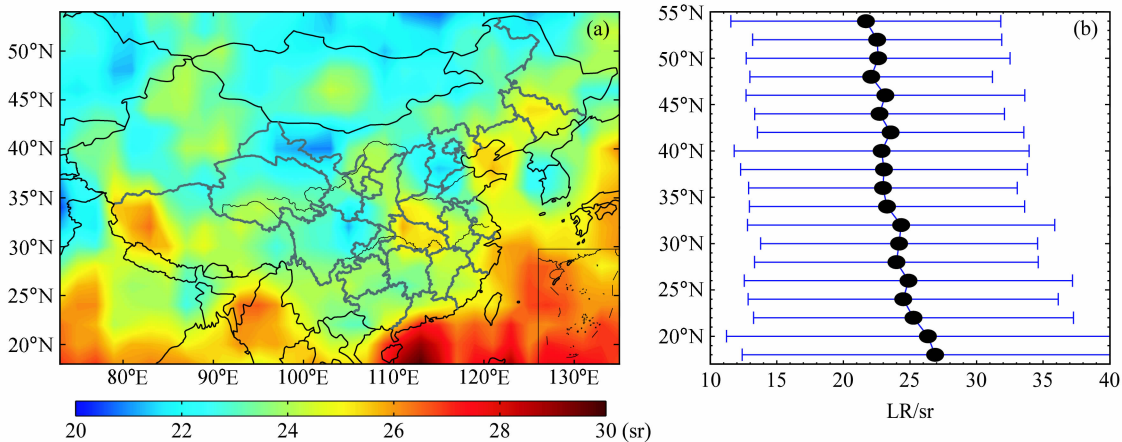


图 4 (a) 中国地区 LR 平均值  $2^\circ \times 2^\circ$  的水平分布; (b) LR 的纬度平均值和标准偏差

Fig. 4 (a) Horizontal distribution of LR within  $2^\circ$  latitude by  $2^\circ$  longitude grid boxes over China; (b) zonal mean values and standard deviations of LR over China

较多。经过质量控制后的结果中小于 10 的 LR 明显减少, 峰值也集中在 23 左右。

图 3 给出了 LR 的月平均值和标准偏差。总的均值是  $24.1 \pm 11.6$  sr, 这个结果和 Sassen and Comstock (2001) 对局地单点的中纬度卷云的研究结果  $24.4 \pm 15.5$  sr 相近。从图 3 看出 LR 的月季特征并不是很明显, 都集中在 23 左右。不过冬季的 LR 还是略微地高于其他季节的。

图 4 给出了中国地区 LR 平均值  $2^\circ \times 2^\circ$  的水平分布和纬度平均值。从图 4a 中看出靠近赤道的热带辐合带 LR 要明显大于高纬度的 LR, 同时, 图 4b 也显示出 LR 随纬度的降低而增加的趋势。

图 5 是 LR 与云中温度的关系图。子图是我们利用 CALIOP 观测结果的放大图, 而其他的数据都来自 Platt and Dilley (1981) 和 Platt et al. (1987, 1998, 2002) 的地基观测结果。Platt 的地基结果显示 LR 对温度的依赖性很明显, 随云中温度的降低而明显地升高。从子图看我们的结果虽然也是和温度有负相关关系, 但是增加幅度明显小于地基遥感的结果。

## 5 讨论

五条质量控制标准将大量不合理的数据剔除, 特别是由于双向透过率观测不准确所导致的。除此之外, 较厚而不透明的卷云并不是本次研究的内容, 因为 CALIOP 信号到云底的衰减会导致透过率的计算失败。当然, 卷云对 CALIOP 信号的衰

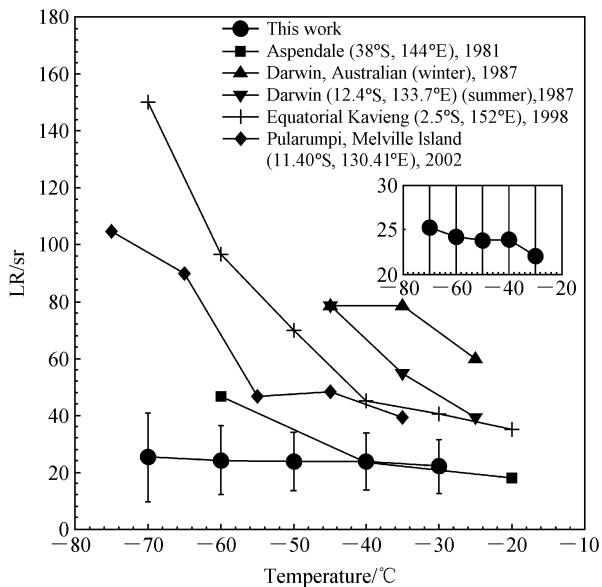


图 5 LR 和云中温度之间的关系。子图: 本文结果的放大图; 其他数据取自 Platt and Dilley (1981) 和 Platt et al. (1987, 1998, 2002)

Fig. 5 Relationship between LR and temperature in the cloud. The subfigure is the enlarged figure for the results from this work; the other data are taken from Platt and Dilley (1981) and Platt et al. (1987, 1998, 2002)

减作用是引起透过率计算不准确的主要原因。我们所采用的控制标准将 CALIOP 算法不能识别的不准确结果都尽量剔除, 从而获得更好的可信的 LR。与 Vaughan et al. (2008) 的 LR 概率密度分布的差异, 主要是由于 Vaughan et al. (2008) 采用统一的  $\eta=0.6$ , 而我们是利用等式 (7) 求取变化的  $\eta$  所导

致的, 所以我们的 LR 结果在高值区分布得更多。

与 Sassen and Comstock (2001) 的比较结果说明, 虽然我们统计的是大范围的卷云, 但是性质上的差异并不能明显地影响 LR 总的平均结果, 所以 CALIOP 采用 LR 的常数计算卷云光学厚度的方法是可靠的。图 4 中 LR 随纬度的降低而增加 (高纬度在 22 左右, 低纬度在 27 左右) 都说明处于热带辐合带的较高 (较冷) 的卷云的盛行会导致求取的 LR 偏大。由于 LR 的大小是由冰晶粒子的外形和高宽比决定的 (Takano and Liou, 1995), 所以随着温度的降低更多不规则的冰晶粒子的出现会导致散射能力的减弱从而使 LR 增大 (Platt et al., 1999; Sassen and Comstock, 2001)。同时, 图 5 中求取的 LR 与云中温度的关系也可以说明 LR 的这种随纬度的变化关系。Platt et al. (1998, 2002) 的观测地点大都集中在热带, 所以由于探测卷云性质的差异导致 LR 的结果对温度依赖性较强。不过, 1981 年在南半球中纬度地区观测的 LR 的结果对温度的依赖关系却不是很强, 与 CALIOP 的观测更加接近。除此之外, 探测波段和反演方法的不一致也是导致 CALIOP 的 LR 对温度的依赖性相对较低的主要原因。所以, 试图利用 LR 对云中温度的依赖关系来选取适合 CALIOP 遥感的 LR 的方法并不是很可行 (Liu et al., 2005)。根据 LR 随纬度的变化关系看出, 随纬度稍微变化 LR 的常数值能够更好地约束卷云的光学厚度的求取。

## 6 小结

本文利用两年的 CALIOP 数据对中国地区卷云的消光后向散射比 LR 进行了研究。结合多次散射对光学厚度的依赖关系式和 LR 与透过率的关系式来求取卷云的 LR。为了保证选取数据的可靠性, 本文还提出了五条额外的数据质量控制标准。

通过对 LR 的月季统计得出 LR 的月季变化并不是很明显, 均值在 24 左右。这个均值结果与前人 (Sassen and Comstock, 2001; Vaughan et al., 2008) 对中纬度卷云观测的结果近似, 同时也证实了采用常数 LR 可以很好地求取卷云的光学厚度。对中国地区 LR 水平分布的统计得出 LR 在靠近热带辐合带的地区偏大, 而且随纬度的降低而增加 (大约从 22 到 27)。通过与 Platt and Dille (1981) 和 Platt et al. (1987, 1998, 2002) 地基遥感结果的

比较发现 CALIOP 获取的 LR 对温度的依赖性较弱, 同时也说明利用这种对温度的依赖关系来获取 CALIOP 的卷云的 LR 方法是不可行的, 利用 LR 随纬度变化的性质适当调整 LR 常数值能够更好地约束卷云光学厚度的求取。

**致谢** 感谢 NASA Langley 研究中心大气科学数据中心 (Langley Research Center Atmospheric Science Data Center) 和 CALIPSO 科学小组提供的高质量 CALIPSO 数据。

## 参考文献 (References)

- Ackermann J. 1998. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: A numerical study [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15 (4): 1043–1050.
- 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 (33): 7113–7131.
- Ansmann A, Bösenberg J, Brogniez G. 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.
- Beyerle G, Gross M R, Haner D A, et al. 2001. A lidar and backscatter sonde measurement campaign at table mountain during February–March 1997; Observations of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 1275–1287.
- Chen W N, Chiang C W, Nee J B. 2002. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. *Appl. Opt.*, 41 (30): 6470–6476.
- Chepfer H, Pelon J, Brogniez G, et al. 1999. Impact of cirrus cloud ice crystal shape and size on multiple scattering effects; Application to spaceborne and airborne backscatter lidar measurements during LITE mission and E-LITE campaign [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (14): 2203–2206.
- Dowling D R, Radke L F. 1990. A summary of the physical properties of cirrus clouds [J]. *J. Appl. Meteor.*, 29: 970–978.
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations; Some comments [J]. *Appl. Opt.*, 23 (5): 652–653.
- Grund C J, Eloranta E W. 1990. The 27–28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: Cloud optical properties determined by high spectral resolution lidar [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118: 2344–2355.
- He Q S, Li C C, Mao J T, et al. 2006. A study on aerosol extinction-to-backscatter ratio with combination of micro-pulse lidar and MODIS over Hong Kong [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6: 3243–3256.
- Hess M, Koepke P, Schult I. 1998. Optical properties of aerosols and clouds; The software package OPAC [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (5): 831–844.

- Klett J D. 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 20 (2): 211–220.
- Klett J D. 1985. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios [J]. *Appl. Opt.*, 24 (11): 1638–1643.
- Kovalev V A. 1995. Sensitivity of the lidar solution to errors of the aerosol backscatter-to-extinction ratio: Influence of a monotonic change in the aerosol extinction coefficient [J]. *Appl. Opt.*, 34 (18): 3457–3462.
- Liu Z, Omar A H, Hu Y, et al. 2005. CALIOP algorithm theoretical basis document. Part 3: Scene classification algorithms [R]. NASA CALIPSO ATBD.
- Macke A. 1993. Scattering of light by polyhedral ice crystals [J]. *Appl. Opt.*, 32 (15): 2780–2788.
- Platt C M R. 1973. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30: 1191–1204.
- Platt C M R. 1979. Remote sounding of high clouds: I. Calculation of visible and infrared optical properties from lidar and radiometer measurements [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18: 1130–1143.
- Platt C M R. 1981. Remote sounding of high clouds. III: Monte Carlo calculations of multiple-scattered lidar returns [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38: 156–167.
- Platt C M R, Dille A C. 1981. Remote sounding of high clouds. IV: Observed temperature variations in cirrus optical properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38: 1069–1082.
- Platt C M R, Scott S C, Dille A C. 1987. Remote sounding of high clouds. Part VI: Optical properties of midlatitude and tropical cirrus [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44 (4): 729–747.
- Platt C M R, Young S A, Manson P J, et al. 1998. The optical properties of equatorial cirrus from observations in the ARM Pilot radiation observation experiment [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 1977–1996.
- Platt C M R, Winker D M, Vaughan M A, et al. 1999. Backscatter-to-extinction ratios in the top layers of tropical mesoscale convective systems and in isolated cirrus from LITE observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38: 1330–1345.
- Platt C M R, Young S A, Austin R T, et al. 2002. LIRAD observations of tropical cirrus clouds in MCTEX. Part I: Optical properties and detection of small particles in cold cirrus [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (22): 3145–3162.
- Qiu J. 1988. Sensitivity of lidar equation solution to boundary values and determination of the values [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 5 (2): 229–241.
- 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 Jin-huang, 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.
- Sasano Y, Browell E V, Ismail S. 1985. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution [J]. *Appl. Opt.*, 24 (22): 3929–3932.
- Sassen K, Campbell J R. 2001. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part I: Macrophysical and Synoptic Properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 481–496.
- Sassen K, Comstock J M. 2001. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part III: Radiative properties [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 2113–2127.
- Sassen K, Wang Z, Liu D. 2008. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D00A12, doi: 10.1029/2008JD009972.
- Takano Y, Liou K-N. 1989. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part II: Theory and computation of multiple scattering in an anisotropic medium [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (1): 20–36.
- Takano Y, Liou K N. 1995. Radiative transfer in cirrus clouds. Part III. Light scattering by irregular ice crystals [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 818–837.
- Vaughan M, Kuehn R, Young S, et al. 2008. Validating cirrus cloud optical properties retrieved by CALIPSO. In 24th International Laser Radar Conference (ILRC). Boulder, CO, USA.
- Vaughan M A, Winker D M, Powell K A. 2005. CALIOP algorithm theoretical basis document. Part 2: Feature detection and layer properties algorithms [R]. NASA CALIPSO ATBD.
- Winker D M. 2003. Accounting for multiple scattering in retrievals from space lidar [J]. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 5059: 128–139.
- Winker D M, Pelon J, McCormick M P. 2003. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds [J]. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 4893: 1–11.
- Winker D M, Hunt W H, McGill M J. 2007. Initial performance assessment of CALIOP [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19803, doi: 10.1029/2007GL030135.
- Young S A. 1995. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds [J]. *Appl. Opt.*, 34 (30): 7019–7031.
- Young S A, Vaughan M A, Hu Y, et al. 2007. CALIOP algorithm theoretical basis document. Part 4: Extinction retrieval and particle property algorithms [R]. NASA CALIPSO ATBD.