

三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比

季承荔^{1,2,3,4} 陶宗明^{1,5} 胡顺星¹ 张学海^{1,2} 刘东¹

王珍珠¹ 钟志庆¹ 谢晨波¹ 苑克娥¹ 曹开法¹ 黄见¹ 王英俭¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学院大学, 北京 100049

³中国气象局气象探测中心, 北京 100081

⁴高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225

⁵陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031

摘要 根据米氏散射理论,对卷云消光特性、有效激光雷达比与波长之间的关系进行了模拟研究,并基于三波长激光雷达系统于 2011 年 1 月至 2012 年 10 月在合肥西郊的观测资料,计算了卷云不同波长的有效激光雷达比。理论和实验结果均表明,对三波长激光雷达系统所用的 355,532,1064 nm 三个波长而言,卷云的消光系数与波长无关,有效激光雷达比随着波长的增大而增大。合肥地区的卷云有效激光雷达比主要分布在 10~70 sr 之间,它们对应三个波长上的均值分别为(21.0±9.3) sr,(29.4±11.7) sr,(38.1±11.4) sr。355 nm 波长的卷云有效激光雷达比秋季最低,而 532 nm 和 1064 nm 波长则秋季最高。

关键词 大气光学;有效激光雷达比;激光雷达;卷云;消光特性

中图分类号 P426.5+1; TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0810003

Effective Lidar Ratio of Cirrus Cloud Measured by Three-Wavelength Lidar

Ji Chengli^{1,2,3,4} Tao Zongming^{1,5} Hu Shunxing¹ Zhang Xuehai^{1,2} Liu Dong¹ Wang Zhenzhu¹

Zhong Zhiqing¹ Xie Chenbo¹ Yuan Ke'e¹ Cao Kaifa¹ Huang Jian¹ Wang Yingjian¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³CMA Meteorological Observation Center, Beijing 100081, China

⁴Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610225, China

⁵Section of Physics T&R, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The simulation study is conducted based on Mie scattering theory as well as the relationship between the cirrus extinction characteristics, the effective lidar ratio and wavelengths. Data of observation is measured to calculate the effective lidar ratios of different wavelengths by three-wavelength lidar system in the western suburbs of Hefei from January 2011 to October 2012. Both the theoretical and experimental results show that in regard to the three wavelengths 355, 532, 1064 nm, the extinction coefficient of cirrus cloud is independent of the wavelengths, and the effective lidar ratio increases as the wavelength increases. The effective lidar ratio of cirrus cloud in Hefei ranges from 10~70 sr, and the mean value of three-wavelength is (21.0±9.3) sr, (29.4±11.7) sr

收稿日期: 2016-03-08; **收到修改稿日期:** 2016-04-15

资助项目: 国家自然科学基金(41305022,41590870)、国家 973 计划(2013CB955802)、高原大气与环境四川省重点实验室开放课题(PAEKL-2016-C6)

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: jcl0606@163.com

导师简介: 胡顺星(1966—),男,博士,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

and (38.1 ± 11.4) sr. The effective lidar ratio of cirrus cloud measured by 355 nm wavelength is the lowest in autumn, while that measured by 532 nm and 1064 nm are the highest in autumn.

Key words atmospheric optics; effective lidar ratio; lidar; cirrus cloud; extinction characteristics

OCIS codes 010.1615; 280.3640; 290.1090

1 引 言

卷云主要由各种形状的冰晶粒子组成,一般分布在对流层上部至平流层的下部,水平范围可达几百千米到上千千米,生命史为几小时到几天^[1-3],全球覆盖率约为 20%~30%^[4]。卷云既吸收来自地面的长波辐射,又反射来自太阳的短波辐射,对地-气系统的辐射收支有着重要影响^[5]。激光雷达以其高时空分辨率和高测量精度,成为探测卷云的一种重要遥感工具^[6-12]。

卷云的激光雷达比(即消光后向散射比)作为粒子散射的内部性质,是激光雷达方程中一个重要的未知参数^[13]。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需要假设^[14],但测量卷云时,它却可以从激光雷达的信号中反演出来^[15]。国内外不少学者对卷云的激光雷达比开展过相关研究,Chen 等^[16]采用 532 nm 波长激光雷达测得台湾地区的卷云激光雷达比均值为 (29 ± 12) sr,史博等^[17]利用美国汉普顿大学的激光雷达数据算出卷云在 532 nm 波长上的激光雷达比均值为 21.4 sr, Sakai 等^[18]测得日本地区的卷云在 532 nm 波长上激光雷达比均值为 (17 ± 14) sr。

这些研究以单一波长激光雷达为主,较少涉及多个波长,而多波长多通道激光雷达是目前国际上的一种主要发展趋势。使用多个波长对卷云同时进行探测,不但可以得到卷云结构参量、光学参量与波长之间的关系,还可以进一步研究卷云粒子形状、尺度谱等物理特征。本文基于一台三波长激光雷达系统于 2011 年 1 月至 2012 年 10 月期间在合肥西郊的探测数据,分析讨论各个波长卷云激光雷达比的反演结果。

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、三倍频波长 355 nm,脉冲能量分别为 280,260,160 mJ。接收装置选用卡赛格林望远镜,后继光路把回波信号分为六路(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,信号的空间分辨率是 7.5 m、时间分辨率是 100 s^[19]。

3 卷云有效激光雷达比反演方法

激光雷达方程为

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

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 为从激光雷达至高度 z 的大气透射率。

设云底高度为 z_b ,云顶高度为 z_t ,则可得

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

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

式中透射率项又可写成

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

(3)式除以(2)式可得

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

假设卷云所在高度上的气溶胶粒子较少,可以忽略,则云底和云顶处的后向散射系数只有大气分子的贡献,卷云中的后向散射系数则主要是卷云的贡献。因此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为^[16]

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

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

$$T^2(z_b, z_t) = C_2 / C_1, \quad (9)$$

(6)式和(9)式是计算卷云透射率的两种方法。由卷云透射率,可得卷云的光学厚度为

$$\tau(z_b, z_t) = -\ln[T(z_b, z_t)]. \quad (10)$$

卷云的激光雷达比定义为

$$S_c = \alpha_c / \beta_c, \quad (11)$$

式中 α_c 为卷云的消光系数, β_c 为卷云的后向散射系数。考虑卷云的多次散射效应,引入卷云有效激光雷达比 ηS_c , η 为卷云的多次散射因子,表达式为

$$\eta S_c = \eta(\alpha_c / \beta_c). \quad (12)$$

对于卷云有效激光雷达比的拟合,先根据 Fernald 式反演出卷云的消光系数^[20],然后用(10)式计算出的光学厚度作为约束条件进行拟合。令卷云的有效激光雷达比 ηS_c 在 0.1~100 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

$$\tau_c(\eta S_c) = \int_{z_b}^{z_t} \alpha_c(z, \eta S_c) dz. \quad (13)$$

将上述一系列($\alpha_c z, \eta S_c$)廓线代入(13)式,可得出一系列的卷云光学厚度 $\tau_c(z, \eta S_c)$ 。再把这一系列的光学厚度与由(10)式算出的光学厚度结果进行比较,找出与(10)式相等的光学厚度(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^[15]。

4 结果分析

4.1 卷云有效激光雷达比波长间关系的模拟分析

根据米氏散射理论对不同尺度粒子在 355, 550, 1064 nm 三个波长的消光效率因子进行模拟计算^[21],结果如表 1 所示。从模拟结果来看,粒子直径越大,三个波长的消光效率因子差异越小;对于相同直径的粒子来说,则是波长越长粒子的消光效率因子越大。当粒子直径大于 20 μm 时,三个波长的消光效率因子几乎可以视为相等。

表 1 不同尺度粒子的消光效率因子模拟结果

Table 1 Extinction efficiency factor simulation results of different size particles

Particle diameter / μm	Extinction efficiency factor (355 nm)	Extinction efficiency factor (550 nm)	Extinction efficiency factor (1064 nm)
2.78	2.04	2.15	2.28
6.17	2.03	2.09	2.17
14.40	2.03	2.05	2.08
20.87	2.03	2.04	2.05
26.67	2.02	2.03	2.04

卷云主要由冰晶粒子组成,而冰晶粒子的尺度从几微米至上千微米不等,Key 等^[22]指出卷云中不同形状冰晶粒子的尺度范围有所差异,并给出了中纬度地区卷云中几种常见冰晶粒子的尺度参数范围,平均粒子直径分布约为 30~90 μm。因此,由表 1 可知,在一定误差范围内,卷云在三波长激光雷达系统所用的 355, 532(与 550 nm 接近),1064 nm 三个波长上的消光效率因子是近似相等的。

设卷云粒子群的尺度谱分布函数为 $n(r)$,不同波长的消光效率因子为 $Q_{ext}(\lambda)$,在一次散射的近似条件下,卷云粒子群的消光系数可表示为

$$\sigma(\lambda) = \int_0^{\infty} Q_{ext}(\lambda) \pi r^2 n(r) dr。 \quad (14)$$

由(14)式可知,在相同粒径分布的情况下,三个波长的卷云消光效率因子基本相等,则三个波长的卷云消光系数也基本相等。

陶宗明等^[23]利用三波长激光雷达系统对强卷云后向散射系数的颜色比进行了研究,发现合肥地区 1064 nm 波长与 532 nm 波长上的强卷云后向散射系数颜色比分布范围为 0.4~1.4,峰值出现的位置为 0.9; 532 nm 波长与 355 nm 波长上的分布范围为 0.4~1.2,峰值出现的位置为 0.7;1064 nm 波长与 355 nm 波长上的分布范围为 0.2~1.2,峰值出现的位置为 0.6,这三个峰值是合肥上空卷云最有可能出现的后向散射系数颜色比。

通过上述分析可知,三个波长的卷云消光系数近似相等,即比值约为 $\alpha_{c355} : \alpha_{c532} : \alpha_{c1064} = 1 : 1 : 1$;而卷云后向散射系数波长间最有可能出现的比值是 $\beta_{c355} : \beta_{c532} : \beta_{c1064} = 1 : 0.7 : 0.6$ 。将上述比值代入卷云有效激光雷达比定义(12)式可得,三个波长间有效激光雷达比出现可能性最大的比值应为 $\eta S_{c355} : \eta S_{c532} : \eta S_{c1064} = 1 : 1.4 : 1.7$,即波长越长卷云的有效激光雷达比应该越大。

4.2 卷云有效激光雷达比个例分析

图 1 为 2011 年 4 月 11 日 12:23 三波长激光雷达系统观测到的大气后向散射回波信号垂直廓线,从图中可以看到,三个波长都探测到了卷云,通过云结构判断方法^[24],得到对应 355,532,1064 nm 波长的卷云云底高度分别为 8.48、8.39、8.57 km,卷云云峰高度分别为 9.90、9.89、9.91 km,卷云云顶高度分别为 10.22、10.22、10.24 km,三个波长探测到的卷云结构基本一致。计算得到卷云的光学厚度分别为 0.124、0.127、0.146,三个波长探测到的卷云光学厚度也相差不大。根据(13)式可知,卷云的光学厚度由消光系数积分而得,因此该反演结果与 4.1 节的模拟结果相一致。

根据第 3 节介绍的利用光学厚度迭代拟合出卷云有效激光雷达比的方法,反演得到三个波长的卷云有效激光雷达比分别为 14.8、17.0、24.5 sr,符合 4.1 节模拟分析的波长越长卷云有效激光雷达比越大的规律。计算三个波长之间的比值可知, $\eta S_{c355} : \eta S_{c532} : \eta S_{c1064} = 1 : 1.2 : 1.7$,与上文分析的理论最大可能值较为接近。

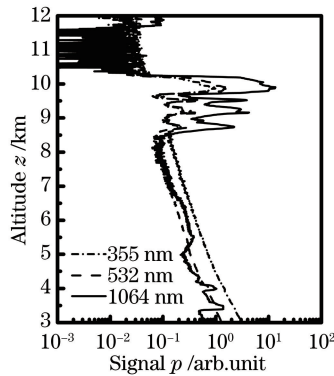


图 1 2011 年 4 月 11 日 12:23 三波长大气回波信号垂直廓线

Fig. 1 Lidar return signals of three wavelengths at 12:23 April 11th, 2011

4.3 卷云有效激光雷达比统计特征

三波长激光雷达系统于2011年1月至2012年10月期间,在合肥西郊进行了不连续观测实验,共获得123天的观测数据,探测到有云的天数为87天。为了具有可比性,选择三个波长同时探测到卷云的数据进行统计,共计57天,回波信号组数3953组。其中,春季22天,回波信号1758组;夏季16天,回波信号849组;秋季12天,回波信号735组;冬季7天,回波信号611组。

统计卷云各个波长的光学厚度和有效激光雷达比均值,结果如表2所示。可以看出,三个波长得到的卷云光学厚度均值比较接近,再次说明了卷云的消光系数与波长近似无关;而有效激光雷达比均值则差异较大,呈现出波长越长卷云有效激光雷达比越大的特征,与4.1节的模拟分析以及4.2节的个例分析结论相一致。对三个波长之间的比值进行计算可得 $\eta S_{c355} : \eta S_{c532} : \eta S_{c1064} = 1 : 1.4 : 1.8$,与4.1节得到的理论可能性最大值也比较一致。

表2 卷云有效激光雷达比和光学厚度均值

Table 2 Effective lidar ratio and mean value of cirrus optical depth

Wavelength /nm	355	532	1064
Optical depth	0.13±0.1	0.12±0.09	0.13±0.05
Effective lidar ratio /sr	21.0±9.3	29.4±11.7	38.1±11.4

为了了解合肥地区卷云有效激光雷达比的分布范围和出现频率特征,对其进行分段统计,结果如图2所示。从图中可以看出,合肥地区的卷云有效激光雷达比主要分布在10~70 sr范围内,不同波长之间的分布特征有所差异。355 nm波长反演得到的卷云有效激光雷达比主要分布在10~50 sr,其中10~20 sr出现频率最高,占355 nm波长探测到卷云的50%以上;532 nm波长的卷云有效激光雷达比主要分布在10~60 sr,出现频率较高的三部分为10~20 sr、20~30 sr和30~40 sr,所占比例都在20%~30%之间,其中30~40 sr出现的几率略高于前两个部分;1064 nm波长的卷云有效激光雷达比分布较广,10~70 sr范围内皆有存在,且大体呈现出正态分布的特征,其中30~40 sr出现频率最高,接近40%。

由于生成条件和凝结核来源不同,卷云在不同季节的结构特性有较大差异^[24],有可能其光学特性也存在季节差异。因此以3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12月和次年的1、2月为冬季,对卷云有效激光雷达比按季节进行统计,得到结果如图3所示。从图中可以看出,三个波长的季节分布特征有所差异,532 nm波长和1064 nm波长的变化规律较为一致,都是秋季的卷云有效激光雷达比最高,夏季次之,春季再次之,冬季最低;355 nm波长则有所不同,秋季反而最低,春、夏、冬三个季节的卷云有效激光雷达比相差不大。就每个季节的三波长间差异而言,四个季节都符合波长越长,卷云的有效激光雷达比越大的规律,其中春季355 nm波长和532 nm波长的卷云有效激光雷达比差距较小,1064 nm波长远大于另外两个波长;夏季三个波长之间的差值比较均匀,都较大;秋季355 nm波长的卷云有效激光雷达比远远小于另外两个波长,是四个季节中波长间差异最大的一个;冬季1064 nm波长的卷云有效激光雷达比大于另外两个波长,而355 nm波长和532 nm波长的值则比较接近。

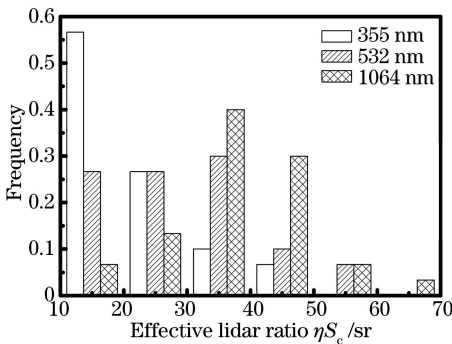


图2 卷云有效激光雷达比频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of cirrus effective lidar ratio

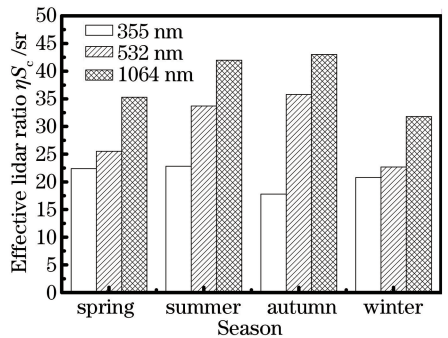


图3 卷云有效激光雷达比季节分布

Fig. 3 Seasonal distribution of cirrus effective lidar ratio

5 结 论

对卷云有效激光雷达比的波长关系进行了模拟分析,并对 2011 年 1 月至 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有效激光雷达比进行了统计分析,得到以下结论:

1) 通过对粒子消光特性的模拟分析,得出卷云消光系数与 355,532,1064 nm 波长的依赖关系不明显,而卷云有效激光雷达比则随着波长的增大而增大。

2) 三个波长计算得到的合肥地区卷云有效激光雷达比均值分别为 (21.0 ± 9.3) sr, (29.4 ± 11.7) sr, (38.1 ± 11.4) sr,呈现出波长越长,有效激光雷达比均值越大的特征,与模拟结果一致。有效激光雷达比在三个波长间的比值也与模拟结果较为接近。

3) 合肥地区的卷云有效激光雷达比主要分布在 10~70 sr 之间,三个波长的分布特征有所差异,355 nm 波长分布频率最高的区域为 10~20 sr,532 nm 和 1064 nm 波长分布最多的区域均为 30~40 sr。

4) 三个波长得到的合肥地区卷云有效激光雷达比季节分布有所差异,355 nm 波长秋季最低,其他三个季节相差不大;而 532 nm 和 1064 nm 波长则是秋季最高,夏季次之,春季再次之,冬季最低。

由于激光雷达系统的发射能量有限,对于一些厚度较大的卷云激光无法穿透,导致判断的云顶高度可能比实际偏低,从而引起光学厚度和有效激光雷达比反演结果的误差,需要特别注意。

参 考 文 献

- 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, 28(9): 1687-1690.
- Heymsfield A J, Platt C M R. 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.
- Jensen E J, Toon O B, Selkirk H B, *et al.* On the formation and persistence of subvisible cirrus clouds near the tropical tropopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D16): 21361-21375.
- Nazaryan H, Mc Cormick M P, Menzel W P. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D16): D16211.
- Chen T, Rossow W B, Zhang Y. Radiative effects of cloud-type variations[J]. *J Climate*, 2000, 13(1): 264-286.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Wang Xiaopeng, Song Xiaoquan, Chen Yubao, *et al.* Observation and validation of cloud layer structures from the mobile doppler Lidar and radiosonde during spring in Beijing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s201001.
王箫鹏, 宋小全, 陈玉宝, 等. 激光雷达观测北京春季云垂直结构及探空对比研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s201001.
- Wang Dongxiang, Song Xiaoquan, Feng Changzhong, *et al.* Coherent doppler lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and Yellow Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s101001.
王东祥, 宋小全, 冯长中, 等. 相干多普勒激光雷达观测渤海海洋大气边界层高度研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s101001.
- Shi Bo, Tao Zongming, Ma Xiaomin, *et al.* Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501006.

- 史 博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501006.
- 13 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.
- 14 Bao Qing, He Junliang, Zha Yong. Retrieval of aerosol extinction coefficient and optical thickness using varied lidar ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0301002.
包 青, 贺军亮, 查 勇. 基于动态雷达比的气溶胶消光系数及光学厚度反演[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301002.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Shi Bo, Nie Miao, Ma Xiaomin, *et al.* Lidar measurements of cirrus clouds lidar ratio[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(1): 1-5.
史 博, 聂 淼, 麻晓敏, 等. 卷云消光后向散射比的激光雷达测量[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(1): 1-5.
- 18 Sakai T, Nagai T, Nakazato M, *et al.* Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba[J]. Appl Opt, 2003, 42(36): 7103-7116.
- 19 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.
- 20 Fernald F G, Analysis of atmosphere lidar observation: Some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-653.
- 21 Zhang Xuehai, Wei Heli. Forward scattering properties of spherical particles based on the geometrical optics method and Mie scattering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1485-1490.
张学海, 魏合理. 基于用几何光学和米散射法的球形粒子前向散射特性计算研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1485-1490.
- 22 Key J R, Yang P, Baum B A. *et al.* Parameterization of shortwave ice cloud optical properties for various particle habits[J]. Journal of Geophysical Research(Atmospheres), 2002, 107(D13): AAC 7.
- 23 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.
- 24 Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0401001.