

文章编号: 0253-2239(2009)11-2943-09

# 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究

赵一鸣 江月松 张绪国 路小梅

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘要** 应用 CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)卫星数据,对大气中的气溶胶等目标进行了去偏振度计算及分析。结果表明,目标后向散射去偏振度信息,能够很好表征大气气溶胶的构成种类、目标特征、垂直高度分布等特性。气溶胶的去偏振特性,为大气气溶胶的特性与分布情况等研究提供了新的方法与量化参考参数。CALIPSO 数据研究方法和结果,对全球气候变化原因、大气污染、沙尘暴等研究有重要的参考价值。

**关键词** 大气光学; CALIPSO; 去偏振度; 气溶胶

**中图分类号** TP79 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.2943

## Research on the Depolarization Ratio Characteristic of the Aerosol in the Atmosphere with the CALIPSO Satellite Data

Zhao Yiming Jiang Yuesong Zhang Xuguo Lu Xiaomei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** The depolarization ratio of the targets in the atmosphere was calculated from the CALIPSO satellite data. From the results it can be seen that the depolarization ratio can characterize the category, the characteristic and the vertical altitude of the aerosol in the atmosphere. The depolarization ratio of the aerosol applies the new method and believable parameter for the research of the aerosol. And the CALIPSO satellite data analyse result of this paper also gives new insight into the research about the reason of the global climate change, the pollution of the atmosphere, Saharan dust and other types of aerosol.

**Key words** atmospheric optics; CALIPSO; depolarization ratio; aerosol

### 1 引言

大气系统中的气溶胶作用是复杂的,目前还没有被完全认知。悬浮于大气中的微小粒子的直接相互作用,对太阳光反射或者吸收等过程,与入射波长和气溶胶的种类有关,并且可以间接地改变云的性质。因此气溶胶是影响地球辐射平衡以及气候变化的一个重要因素。联合国跨政府气候变化研究小组 IPCC(Intergovernmental Panel Climate Change)指

出,诸如硫酸盐、矿物燃料燃烧(黑炭,有机碳)、生物燃烧、矿物尘埃等气溶胶体系中的粒子种类的区分度是非常低的<sup>[1]</sup>。

气溶胶种类可以通过原位测量、卫星观测、地面观测等方法进行区分<sup>[2]</sup>。激光雷达探测(Lidar)可以提供长期实时的抗干扰、高空间、时间分辨率的气溶胶后向散射系数和消光系数<sup>[3]</sup>。其中偏振激光雷达可以有效地分辨气溶胶的形状特征、非球形气溶

**收稿日期**: 2008-12-03; **收到修改稿日期**: 2009-02-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(40571097)和国家留学基金委联合培养计划资助课题。

**作者简介**: 赵一鸣(1983—),女,博士研究生,主要从事激光雷达遥感及成像等方面的研究。

E-mail: zym\_bird@sohu.com

**导师简介**: 江月松(1959—),男,博士,教授,主要从事激光雷达遥感及成像等方面的研究。

E-mail: yuesongjiang@vip.sinacom.cn

胶等<sup>[4~7]</sup>。

第一个偏振激光雷达出现于 1971 年,其目的是用于分辨水汽凝结。球形特征的水云,对后向散射光的偏振度不发生改变。但是,水云中的多次散射将改变后向散射光中的偏振特性。冰云因其明显的不对称性,也会改变后向散射光的偏振度。因而,这一特性同样适用于分析气溶胶粒子,即单次散射球形粒子(水分子等)的后向散射光偏振度不改变,而多次散射会改变其偏振度;非球形粒子(沙尘粒子等)后向散射光偏振度会发生明显的变化<sup>[8,9]</sup>。

CALIPSO 卫星 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 的作用是:改进气候体系中气溶胶和云层对天气、气候和空气质量影响的研究与认知。CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 作为 CALIPSO 的一部分,提供的去偏振信息可用以区分冰云和水云,辨别非球形气溶胶粒子。CALIPSO 也可以提供全球范围内雷达遥感数据信息<sup>[10,11]</sup>。CALIPSO 卫星能够提高对大气和气候变化的监测能力,增强对天气事件的了解,改善天气预报能力及改进对气候变化的模拟。

目前,由于目标去偏振度特性非常重要,应用目标后向散射去偏振度信息,分析包括沙尘暴、云层在内的大气气溶胶目标,成为一个新的热点,引起了世界范围内广泛的关注。因此,有必要在雷达遥感探测中,对目标的去偏振度信息进行研究分析。但是国内业界关于应用 CALIPSO 卫星数据的报道还很少。鉴于 CALIPSO 卫星在偏振激光雷达遥感、大气气溶胶及云层研究等领域中的重要作用,以及对大气质量定量化监测的必要性,有必要对 CALIPSO 的卫星数据进行分析研究。

本文将对 CALIPSO 卫星数据的理论基础、数据构成和提取做较为全面的阐述。并应用 CALIPSO 信号,对大气目标的后向散射去偏振度进行理论计算。本工作利用目标去偏振度信息能够有效地对气溶胶的组成、性质及高度等信息进行分辨,为大气气溶胶研究提供了新的方法和可靠参数。本文还利用 CALIPSO 偏振通道信号,进行大气后向散射去偏振度研究,为全球气候变化、大气污染、沙尘暴成因及监控等研究提供新的思路。

## 2 激光雷达及偏振探测理论

在单次散射条件下,激光雷达方程可写为

$$P(z) = \frac{C}{z^2} [\beta_{\text{mol}}(\lambda_0, z) + \beta_a(\lambda_0, z)] \times \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_{\text{mol}}(\lambda_0, \xi) + \alpha_a(\lambda_0, \xi)] d\xi\right\}, \quad (1)$$

其中  $C$  为雷达系统的校准参数,  $z$  为空间散射目标距雷达接收系统的距离,  $\beta_{\text{mol}}(\lambda_0, z)$  为大气瑞利 (Rayleigh) 分子散射的后向散射系数,  $\beta_a(\lambda_0, z)$  为大气中气溶胶粒子散射的后向散射系数,  $\alpha_{\text{mol}}(\lambda_0, \xi)$ ,  $\alpha_a(\lambda_0, \xi)$  分别为分子和粒子散射的消光系数。  $\beta(\lambda_0, z)$  定义为总后向散射系数

$$\beta(\lambda_0, z) = \beta_{\text{mol}}(\lambda_0, z) + \beta_a(\lambda_0, z), \quad (2)$$

总衰减系数表示为

$$\alpha(\lambda_0, \xi) = \alpha_{\text{mol}}(\lambda_0, \xi) + \alpha_a(\lambda_0, \xi), \quad (3)$$

$\beta(\lambda_0, z)$  是激光雷达遥感探测中用于分析目标组成的重要参数。对于激光雷达偏振遥感探测,总后向散射系数同样可以表示为垂直与平行后向散射系数的和

$$\beta = \beta_{\parallel} + \beta_{\perp}, \quad (4)$$

其中  $\beta_{\parallel}$ ,  $\beta_{\perp}$  分别为平行和垂直的后向散射系数。

文中应用衰减后向 (Attenuated backscattering, ABS) 散射系数进行数据分析,衰减后向散射系数定义为

$$\beta_{\text{ABS}\parallel\lambda_0} = (\beta_{\parallel\lambda_0} + \beta_{\perp\lambda_0}) T_{\lambda_0}^2(z), \quad (5)$$

$$\beta_{\text{ABS}\perp\lambda_0} = \beta_{\perp\lambda_0} T_{\lambda_0}^2(z), \quad (6)$$

$$\beta_{\text{ABS}\parallel\lambda_0} = \beta_{\parallel\lambda_0} T_{\lambda_0}^2(z), \quad (7)$$

其中

$$T_{\lambda_0}^2(z) = \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(\lambda_0, \xi) d\xi\right], \quad (8)$$

激光雷达偏振遥感中,目标后向散射去偏振度定义为:垂直与平行的后向散射系数的比值

$$\delta = \frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}}, \quad (9)$$

由(6)式,(7)式进一步可由衰减后向散射系数表征去偏振度的表达方式

$$\delta = \frac{\beta_{\text{ABS}\perp\lambda_0}}{\beta_{\text{ABS}\parallel\lambda_0}}. \quad (10)$$

## 3 CALIPSO 数据结构

CALIPSO 卫星由装备垂直偏振通道的云层-气溶胶激光雷达 (CALIOP)、宽视角相机 (WFC) 和红外辐射成像 (IIR) 三部分组成。CALIPSO 数据是由美国航天局 (NASA) 兰利研究中心 (Langley Research Center, LaRC) 大气科学数据中心

(ASDC) 处理、存储及发布的。这些数据通过分级数据格式(HDF)输出。CALIPSO 数据主要由两级数据组成, 本文仅研究第一级数据, 该数据提供了卫星激光雷达测量的基本数据和系统的校准信息等, 具有很高的准确度和可信度。其中包括 3 个雷达通道(532 nm 的垂直和平行通道, 以及 1064 nm 的红外通道)的衰减后向散射系数 ABS 序列 (Attenuated backscattering coefficient profile) 以及其不确定度。命名方式为: CAL\_LID\_L1-Prov-V2-01.2008-07-17T01-08-00ZN.hdf。其意义分别为: CALIPSO\_激光雷达\_第一级数据. 年-月-日-代号. hdf<sup>[10,11]</sup>。其中 ABS 是一个二维矩阵, 其横坐标为垂直高度, 纵坐标为地理坐标。通过确定 CALIPSO 数据中距离目标地点最近的经纬度坐标, 就可以把所需的相对应参数导出。第一级数据的垂直和水平的空间分辨率如表 1 所示。可见对于 532 nm 的 CALIPSO 信号, 根据垂直分辨率, 在海拔 -2 ~ 40.1 km 的高度范围内一共有 583 个高度坐标对应应有 583 个样本。由于陆地海拔最低的死海海拔为海平面下 392 m, 因此全分辨率区域扩展至 -0.5 km, 而垂直分辨率为 300 m 的 -2.0 ~ -0.5 km 区域是为了回复监视表面返回的潜在延迟<sup>[11]</sup>。在海拔 -2 ~ 40.1 km 的高度范围内, 可以根据研究需要选择适当的垂直高度范围进行目标的研究分析。

表 1 CALIPSO 数据的空间分辨率

Table 1 The space resolution of the CALIPSO data profile

Altitude /km	Horizontal	Vertical	Vertical
	resolution	resolution	resolution
	/km	(532 nm)/m	(1064 nm)/m
30.1/40.1	5.0	300	---
20.2/30.1	1.67	180	180
8.2/20.2	1.0	60	60
-0.5/8.2	0.33	30	60
-2.0/-0.5	0.33	300	300

CALIPSO 数据提供有 532 nm 和 1064 nm 双波长总衰减后向散射系数序列  $\beta_{\text{ABStot}532}$ ,  $\beta_{\text{ABStot}1064}$ , 以及 532 nm 的垂直衰减后向散射系数序列  $\beta_{\text{ABS}_\perp 532}$ 。本文主要应用的是  $\beta_{\text{ABStot}532}$  和  $\beta_{\text{ABS}_\perp 532}$ , 其表达式为<sup>[10,11]</sup>

$$\beta_{\text{ABStot}532} = (\beta_{//532} + \beta_{\perp 532}) T_{532}^2(z), \quad (11)$$

$$\beta_{\text{ABS}_\perp 532} = \beta_{\perp 532} T_{532}^2(z), \quad (12)$$

平行通道的衰减后向散射系数可以由(11)式, (12)式得到

$$\beta_{\text{ABS}_//532} = \beta_{\text{ABStot}532} - \beta_{\text{ABS}_\perp 532}. \quad (13)$$

## 4 运用 MatLab 软件提取 CALIPSO 数据

MatLab 为 HDF 格式数据提供了很好的兼容性, 并为 HDF 格式数据读取应用提供了很方便的接口。此外, 由于 MatLab 的矩阵计算特性, 可简化 CALIPSO 的数据计算与分析。本文对 CAL\_LID\_L1-Prov-V2-01.2008-07-17T01-08-00ZN.hdf 这组 CALIPSO 数据进行提取, 并对测量结果做分析研究。该数据是 CALIPSO 于 2008 年 7 月 17 日获得的一组第一级数据。其中经纬度均为 [56310, 1] 的列矩阵, 总衰减后向散射系数和垂直衰减后向散射系数序列 (Total\_Attenuated\_Backscatter\_532, Perpendicular\_Attenuated\_Backscatter\_532) 均为 [56310, 583] 的二维矩阵。其中的 56310 维列向量与经纬度坐标相对应, 583 维横坐标与垂直高度相对应。根据经纬度坐标确定目标坐标点, 进而可以读取与目标经纬度坐标相对应的衰减后向散射系数数据序列。由于本工作研究所在地的地面激光雷达站, 也有与 CALIPSO 卫星偏振通道相同波长的偏振通道, 其地理坐标为 (14.11°E, 40.50°N)。选择 CALIPSO 数据中经纬度坐标与地面激光雷达站坐标最接近的数据, 可以进行卫星数据和地面数据的对比研究。因此, 本文主要研究的是 CALIPSO 偏振通道的后向散射序列数据。本组 CALIPSO 数据选择经纬度坐标为: (15.18209°E, 40.62936°N) 的数据, 对应的序列号为 5857, 读取的衰减后向散射系数数据序列为第 5857 行的数据。具体方法如下所述。

我们使用图 1 所示的 MatLab 提供的 HDF Import tool 对 CALIPSO 数据进行读取, 选中所需要的参数, 如图中画线的举例参数然后点击右下角的“import”即可实现对数据的导入。该工具可视化性能较好, 并可以同时打开多个 HDF 文件, 使用方便。由于需要对多个参数进行读取, 为了增强可读性, 把读取的参数写入 EXCEL 文档。需要注意的是: 应对衰减后向散射数据序列进行转置, 才能在 EXCEL 作为列向量输出。例如将总后向散射系数 ABStotal 读出并写入名为“CALIPSO”的 EXCEL 文档中的命令语句如下。

```
tot = Total_Attenuated_Backscatter_532(num,:);
successtot = xlswrite('calipso.xls',tot,'sheet1','d')
当“successtot”返回的结果为“1”时, 结果已被成功输入到名为“calipso”的 EXCEL 文件中 sheet1 的 d
```

列。其他所需参数的读取与写入同上。在完成所有目标参数的读取写入后,基本完成了 CALIPSO 的数据读取工作。本文中,首先对本组 CALIPSO 数据的经纬度序列进行读取,其命令语句为

```
Longitude = xlswrite('jingwei2. xls',
                    Longitude,'sheet1', 'a')
Latitude = xlswrite('jingweidu. xls',
                    Latitude,'sheet1', 'b')
```

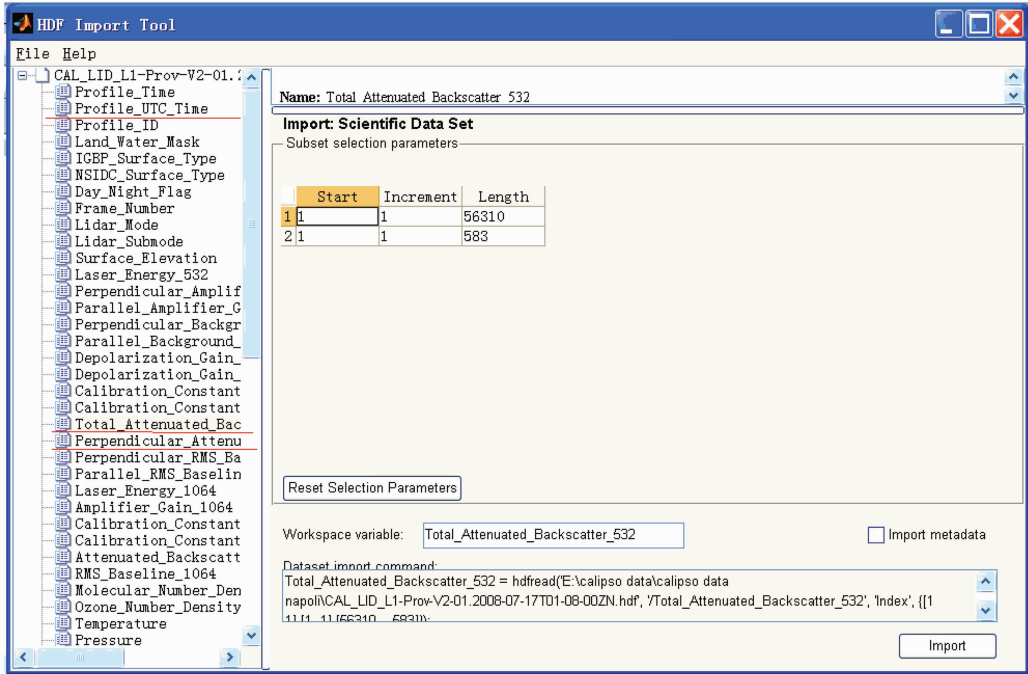


图 1 MatLab 的 HDF 格式 CALIPSO 数据读取工具图

Fig. 1 HDF import tool of MatLab for CALIPSO data profile

根据读取的 56310 组经纬度坐标选择与目标点坐标 (14. 11° E, 40. 50° N) 最近的一组经纬度坐标 (15. 18209°E,40. 62936°N),其序号为 5857,则命令语句“tot = Total\_Attenuated\_Backscatter\_532(num,:)'”中的“num”即为 5857,继而读取得到与该经纬度坐标相对应的后向散射序列。

因此读取 CALIPSO 的数据过程为:CALIPSO 数据下载、目的地经纬度坐标确定、目标参数提取、数据载入、数据分析。

## 5 基于 CALIPSO 数据分析大气气溶胶和沙尘暴的实例研究

### 5.1 单经纬度 CALIPSO 衰减后向散射系数序列结果及分析

本文根据第 4 节所述的方法将 CALIPSO 序列号为 CAL\_LID\_L1-Prov-V2-01. 2008-07-17T01-08-00ZN. hdf 中,经纬度坐标为 (15. 18209° E, 40. 62936°N)的 CALIPSO 数据进行了读取,得到了这组 CALIPSO 数据对应于经纬度坐标(15. 18209°E, 40. 62936°N)的数据时间(UTC time)、总衰减后向散射系数序列  $\beta_{ABS\text{tot}532}$  和垂直衰减后向散射系数序列

$\beta_{ABS\perp 532}$ ,并写入 EXCEL 文档。这样读取的是一个经纬度坐标点激光雷达信号,这里称之为单经纬度 CALIPSO 激光雷达信号。

平行衰减后向散射系数  $\beta_{ABS//532}$  序列由(13)式得到。图 2,图 3 分别为海拔 0~15 km 以及 15~30 km 的  $\beta_{ABS\text{tot}532}$ ,  $\beta_{ABS//532}$  和  $\beta_{ABS\perp 532}$ 。由图 3 中的  $\beta_{ABS\text{tot}532}$  和  $\beta_{ABS//532}$  的数据结果明显看到,在圆形 total perpendicular parallel

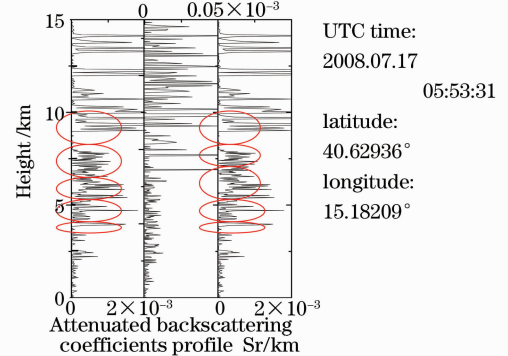


图 2 距海平面垂直高度 0~15 km 的垂直、平行以及总衰减后向散射序列

Fig. 2 Perpendicular, parallel and total attenuated backscattering coefficients profile for the altitude 0~15 km from the sea level

选定区域有目标信息。将这 5 个区域分别细化作图,如图 4~6 所示。

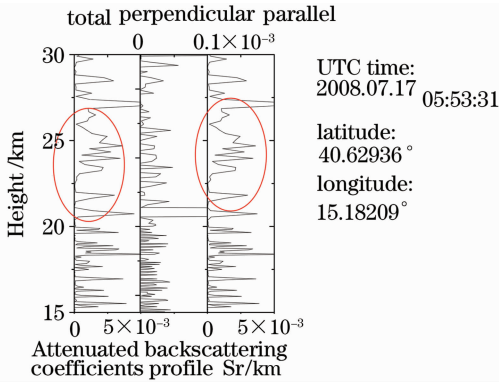


图 3 海拔 15~30 km 的垂直、平行以及总衰减后向散射序列

Fig. 3 Perpendicular, parallel and total attenuated backscattering coefficients profile for the altitude 15~30 km from the sea level

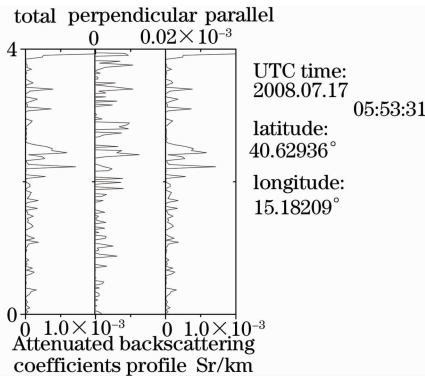


图 4 海拔 0~4 km 的垂直、平行以及总衰减后向散射序列

Fig. 4 Perpendicular, parallel and total attenuated backscattering coefficients profile for the altitude 0~4 km from the sea level

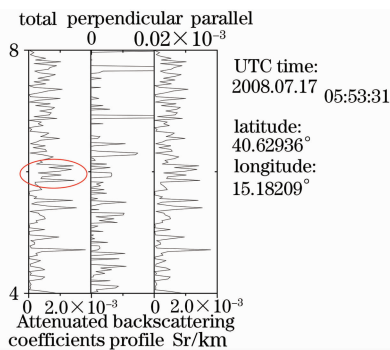


图 5 海拔 4~8 km 的垂直、平行以及总衰减后向散射序列

Fig. 5 Perpendicular, parallel and total attenuated backscattering coefficients profile for the altitude 4~8 km from the sea level

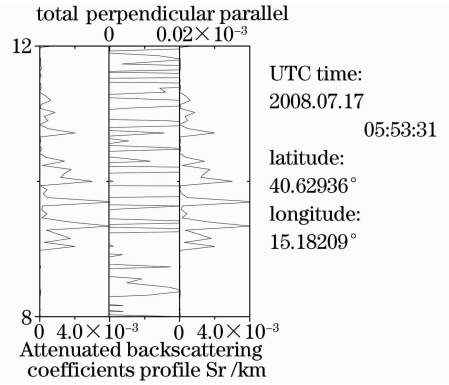


图 6 海拔 8~12 km 的垂直、平行以及总衰减后向散射序列

Fig. 6 Perpendicular, parallel and total attenuated backscattering coefficients profile for the altitude 8~12 km from the sea level

对流层位是大气层的最底层,靠近地面,其厚度约为 10~20 km。对流层为大气活动最活跃的一层,云、雾、雨等自然现象均发生在对流层,研究的沙尘暴、气溶胶、卷云等现象均发生于该层。因此,重点分析对流层中的目标特征。臭氧层位于 20 km 以上的区域,如表 1 所示,该区域中 CALIPSO 的垂直分辨率为 180~300 m,对这一区域的分辨率较低。

单个经纬度坐标点对应的 CALIPSO 信号信噪比很低。然而仍可以通过后向散射信号分辨出具体高度层的目标信息,如图 2,图 3,图 5 的圆圈所示。根据图 2 和图 6 仅仅能判断出,海拔 8~10 km 处为卷云,但是依据 CALIPSO 提供的衰减后向散射系数序列,8 km 以下的目标信息很难判断。必须引入其他的参量加以辅助,应用(9)式,(10)式提供的去偏振度参数定义目标信息。但是单经纬度信号的低信噪比是无法实现偏振度分辨的,因此本工作提出对信号进行水平范围内取平均的方法。通过牺牲水平分辨率以提高信号的信噪比,也就是通过下面将要研究的 CALIPSO 数据去偏振度分析研究。

### 5.2 CALIPSO 数据去偏振度分析研究

目标后向散射的去偏振度信息是一个重要的激光雷达遥感参数,能够对大气的组成做出准确的分辨。图 7 所示为根据(10)式得到的位于(15.18209°E, 40.62936°N)的单经纬度去偏振度图。由于信号的信噪比很低,使得目标的去偏振度信息无法分辨。因此,通过牺牲水平分辨率来提高信噪比。

假设大气在一定水平范围内是稳定的,即所含有的成分、组成、高度等信息相同。因此对 CALIPSO 信号在一定的范围内取平均,尽管降低了其水平分辨率,然而获得了质量较好的去偏振度

结果。对以(15.18209°E, 40.62936°N)为中心的, 180个和1000个经纬度坐标点的  $\beta_{\text{ABStot}532}$  和  $\beta_{\text{ABS}_{\perp 532}}$  分别取平均

$$\beta'_{\text{ABStot}532} = \sum_{i=k-l}^{k+l} \beta_{\text{ABStot}532}(i) / (2l), \quad (14)$$

$$\beta'_{\text{ABS}_{\perp 532}} = \sum_{i=k-l}^{k+l} \beta_{\text{ABS}_{\perp 532}}(i) / (2l), \quad (15)$$

$$\beta'_{\text{ABS}_{//532}} = \beta'_{\text{ABStot}532} - \beta'_{\text{ABS}_{\perp 532}}, \quad (16)$$

$$\delta = \frac{\beta'_{\text{ABS}_{\perp 532}}}{\beta'_{\text{ABS}_{//532}}}, \quad (17)$$

其中  $i$  为经纬度所对应的坐标;  $k$  为目标点对应的经纬度坐标, 本文  $k = 5857$ ;  $2l$  为所选取的平均经纬度坐标点数, 本文选取两个平均长度分别为  $2l_1 = 1000, 2l_2 = 180$ 。因此, 本文所选择的平均区间的序号坐标分别为:  $(a_1, b_1)$  为(5357, 6357),  $(a_2, b_2)$  为(5767, 5947), 两区间的中心坐标为 5857。其对应的经纬度坐标为:  $a_1(15.66688, 42.10971), b_1(14.71366, 39.14697)$ ;  $a_2(15.09667, 40.36295), b_2(15.2678, 40.89552)$ 。 $a_1, b_1$  之间的地面水平距离为 331.7328 km,  $a_2, b_2$  之间的地面水平距离为 62.00629 km。

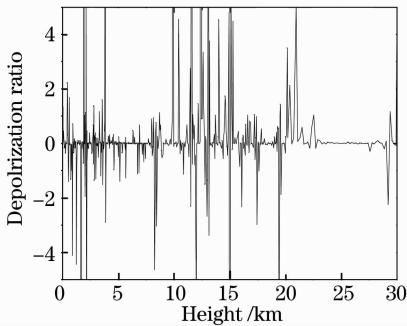


图7 海拔0~30 km 位于(15.18209°E, 40.62936°N) 单经纬度的去偏振度

Fig. 7 depolarization ratio of single latitude and longitude coordinate point (15.18209°E, 40.62936°) for the altitude 0~30 km from the sea level

如图8~10所示, 在区间  $(a_1, b_1)$  水平范围内的去偏振度结果。图8为海拔0~40 km的去偏振度图。可以明显分辨出海拔5~16 km处有不同类型的目标, 图10将这一区域的目标进行细化。图11, 图12为在区间范围  $(a_2, b_2)$  内的去偏振度结果。图12是对海拔0~15 km区域的细化。应用积分去偏振度(Integrate Depolarization Ratio, IDR)对每层目标的去偏振度进行计算分析

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=z_1}^{z_2} \delta_i}{N}, \quad (18)$$

其中  $z_1, z_2$  分别为目标层的最低高度和最高高度,  $N$  为  $(z_1, z_2)$  高度范围内的样本数。根据图8~12所示的结果, 应用(18)式分别得到水平平均区间  $(a_1, b_1), (a_2, b_2)$  的不同的垂直目标层的平均去偏振度, 如表2所示。可以得到后向散射系数的平均值(Integrate backscattering coefficient, IBC)

$$\overline{\beta_{\text{ABStot}532}} = \sum_{i=z_1}^{z_2} \beta'_{\text{ABStot}532} / N, \quad (19)$$

$$\overline{\beta_{\text{ABS}_{//532}}} = \sum_{i=z_1}^{z_2} \beta'_{\text{ABS}_{//532}} / N, \quad (20)$$

$$\overline{\beta_{\text{ABS}_{\perp 532}}} = \sum_{i=z_1}^{z_2} \beta'_{\text{ABS}_{\perp 532}} / N, \quad (21)$$

表2 水平平均  $(a_1, b_1), (a_2, b_2)$  区间内, 不同海拔高度层的平均偏振度

Table 2 The integrate depolarization ratio for different vertical layers in the horizon average range  $(a_1, b_1), (a_2, b_2)$

Altitude Range /km	IDR $(a_1, b_1)$	IDR $(a_2, b_2)$	IBC $(a_1, b_1)$	IBC $(a_2, b_2)$
0.67~0.82	0.032461	0.068676	$3.58642 \times 10^5$	$4.1077 \times 10^5$
3.76~3.94	0.019103	0.047429	0.000219463	0.000206289
6~7	0.189908	0.169008	0.0011150	0.0012440
7.87~8.44	0.060278	0.063140	0.000678	0.000677
8.44~9.76	0.053919	0.058141	0.000720	0.000691
9.76~10.6	0.067587	0.047386	0.000767	0.000784
10.6~13.24	0.041337	0.026641	0.000732	0.000674
13.18~15.14	0.03196	0.010351	0.000767	0.000722
26.5~34	0.331973	0.311896	0.036705	0.037125

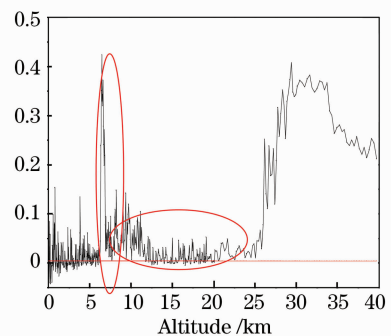


图8 海拔0~40 km, 以(15.18209°E, 40.62936°N)为中心的180个经纬度坐标点的平均去偏振度  
Fig. 8 180 latitude and longitude coordinate points depolarization ratio for the altitude 0~40 km from the sea level

由图8~12的不同垂直高度、不同水平平均区域的去偏振度图, 可以明显的看出在图2~6中衰减后向散射系数较难分辨出来的海拔0~1 km, 4 km左右, 6~8 km, 8~10 km等目标信息。在这些高度层, 存在有除  $O_2, N_2$  等分子组成的纯净大气之外的

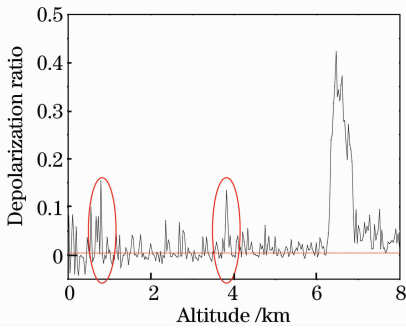


图 9 海拔 0~8 km,以(15.18209°E,40.62936°N)为中心的 180 个经纬度坐标点的平均去偏振度

Fig. 9 180 latitude and longitude coordinate points average depolarization ratio for the altitude 0~8 km from the sea level

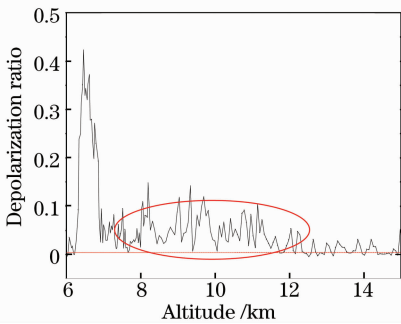


图 10 海拔 6~15 km,以(15.18209°E,40.62936°N)为中心的 180 个经纬度坐标点的平均去偏振度

Fig. 10 180 latitude and longitude coordinate points average depolarization ratio for the altitude 6~15 km from the sea level

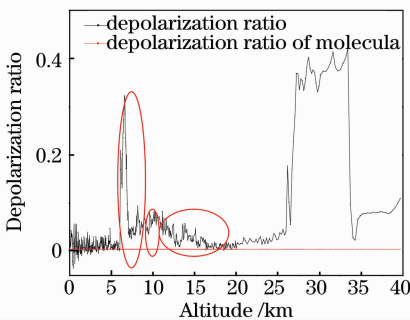


图 11 海拔 0~40 km,以(15.18209°E,40.62936°N)为中心的 1000 个经纬度坐标点的平均去偏振度

Fig. 11 1000 latitude and longitude coordinate points average depolarization ratio for the altitude 0~40 km from the sea level

其他目标信息。光通过  $O_2$ ,  $N_2$  等分子气体发生瑞利散射,其去偏振度为 0.00376<sup>[4]</sup>,图 8~12 中的虚线表示大气中分子气体的去偏振度。当大气中有其他目标出现时,例如沙尘暴、气溶胶、卷云等,目标的

去偏振度会与大气分子的去偏振度不同。因此去偏振度提供了一个有效的参数对大气中的目标进行研究。

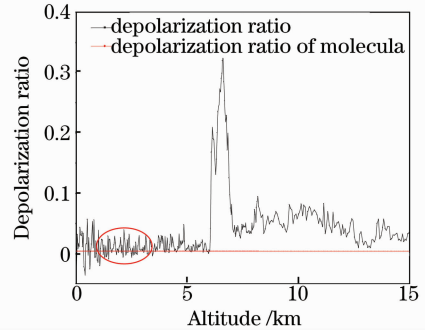


图 12 海拔 0~15 km,以(15.18209°E,40.62936°N)为中心的 1000 个经纬度坐标点的平均去偏振度

Fig. 12 1000 latitude and longitude coordinate points average depolarization ratio for the altitude 0~15 km from the sea level

根据大量文献内容表明的大气气溶胶、卷云等目标的参数特征<sup>[8~22]</sup>,对本文的数据分析计算结果进行分析判断,得到下面的结果。

根据表 2 所示的结果,在海拔 6~7 km 处,有一层去偏振度约为 0.169~0.189,平均衰减后向散射系数为 0.00115 的目标层。由于沙尘暴的去偏振度范围为 0.1~0.4,其大小与含水量、光学厚度等因素有关。沙尘暴的含水量是影响其去偏振度的一个重要因素,水分子的球形特征使得其去偏振度很小,因此水分越多的沙尘暴其去偏振度越小。这样我们基本可以判定海拔 6~7 km 这一层为含水量较大的沙尘暴。我们进一步利用 NILU 提供的沙尘暴轨迹逆推,找到与本文目标坐标(15.18209°E, 40.62936°N)最接近的地点那不勒斯(14.18°E, 40.84°N),在同一日期最接近的两个时刻的沙尘暴轨道逆推路径图,如图 13(a),(b)所示。图中显示到达那不勒斯的沙尘暴是由西方经过海洋到达的。在途经海洋时,会携带有一定的水分,则到达那不勒斯的沙尘暴的去偏振度会减小。由图 13 所示的沙尘暴高度显示,到达那不勒斯的沙尘暴高度大约在 4~6.5 km,与所得的分析结果一致。因此,可以断定在 6 km 左右的高度,有一层较强的沙尘暴。由于这层沙尘暴经过海洋到达观测地点,因此其去偏振度相对较小,接近 0.2。这一沙尘暴层对于两个水平平均区间  $(a_1, b_1)$ ,  $(a_2, b_2)$  基本是一致的,说明这一高度层的沙尘暴较为稳定、影响范围较广,这一平均去偏振度计算结果的可信度很高。

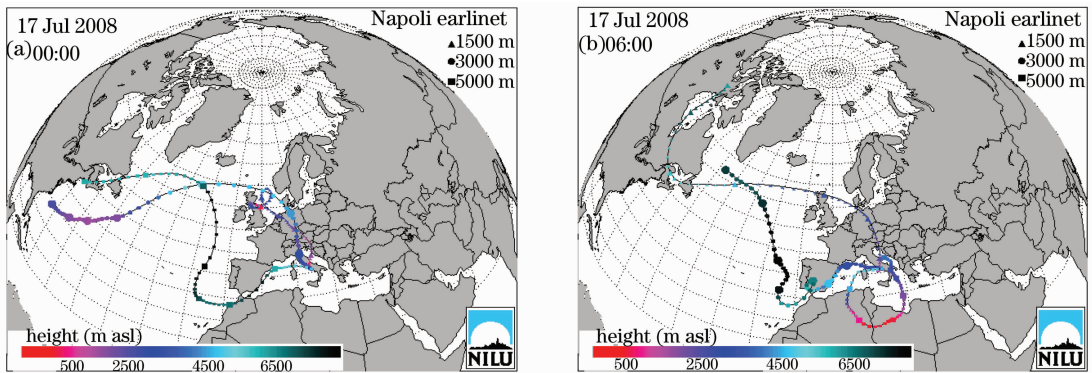


图 13 2008 年 7 月 17 日两时段的 NILU 沙尘暴轨迹路径逆推图

Fig. 13 Flexural trajectory plots of two times on 2008, July 17th

图 9 中,可发现在 4 km 左右的高度,有一个较薄的沙尘暴层。由于这一层沙尘暴的光学厚度较小以及含水量等原因,其去偏振度较小。表 2 所示的是在 180 个经纬度坐标点的水平平均区域内,其去偏振度为 0.047,但是在 1000 个经纬度坐标点的水平平均区域内,这个目标层已经基本消失,因此这一目标层为小范围区域内的厚度较薄的沙尘暴。这一结果与 NILU 所提供的沙尘暴轨迹也符合。

在图 9 中 1 km 以下的区域,有个去偏振度略大于 4km 的沙尘暴层的目标层。但是其平均衰减后向散射系数却远小于沙尘暴,因此这一目标层为气溶胶。在 180 个经纬度坐标点水平平均的范围内,这一层气溶胶目标层较 1000 个经纬度坐标点水平平均的范围明显。其平均去偏振度如表 2 所示。由于受地面的气体排放、污染物等众多因素影响,气溶胶是一个区域性变化很强的参数,小范围内就有可能发生很大的变化,需要水平分辨率较高的探测方式。本文所示的结果已经明显看出,去偏振度这一参数可以有效地分辨及表征气溶胶。并且平均去偏振度的结果说明,在这个气溶胶层中,非球形粒子的存在是使得其去偏振度发生变化的根本原因。

根据图 8~12 以及表 2 所示,在 8~15 km 是一层性质基本一样的目标层,这一层应为高空卷云层。由于卷云在高空分布范围不大,不会像沙尘暴一样形成连续的分布,对于本文降低水平分辨率以提高信噪比的情况,会使卷云的平均去偏振度的计算结果减小。卷云的去偏振度应为 0.2~0.6,本文的计算结果偏小。但是,图 8,图 10,图 11,图 12 平均去偏振度已经明显的将这个卷云层表征出来,因此去偏振度可以有效地表征大气中的卷云信息,并在空间水平分辨率较高的情况下,提供准确的去偏振度信息。

结果表明,在衰减后向散射系数等参数对目标不能进行明确表征时,去偏振度信息可以很好地对目标进行分辨,提供目标的准确信息,是一个极其重要的雷达参数。

## 6 结 论

本文结合 CALIPSO 激光雷达偏振数据,对大气气溶胶等目标的去偏振度信息作了深入的研究。研究结果显示,气溶胶的去偏振度可以有效地分辨出气溶胶的组成、特征、垂直高度等信息。通过目标的去偏振度信息判定海拔 6~7 km 是一层相对含水量较大的沙尘暴目标。结合 NILU 提供的沙尘暴逆推轨迹,可以进一步验证这一研究结果的准确性。并且根据目标去偏振度信息也同样分辨出了位于海拔 4 km 左右一层很薄的沙尘暴目标,以及汽车尾气、有机污染物燃烧等构成的海拔 1 km 处的气溶胶目标,而这两层目标在衰减后向散射系数中较难分辨。位于海拔 8 km 以上的卷云目标也可由去偏振度信息分辨出来。本工作研究结果充分说明了应用目标去偏振度信息进行雷达遥感探测的必要性。目标的去偏振特性在大气气溶胶组成、特性、分布的研究中有更为突出的作用,将为研究全球大气环境变化、空气污染、沙尘暴成因等问题提供有效的参数和依据。

## 参 考 文 献

- Intergovernmental panel on climate change (IPCC) report, climate change 2001, 2007
- Yang Hui, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Urban planetary boundary layer aerosol monitoring by lidar at Beijing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1255~1259  
杨 辉, 刘文清, 刘建国 等. 激光雷达监测北京城区夏季边界层气溶胶[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1255~1259
- Yang Ruike, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm



- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **10**(34): 1393~1397  
 杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, **10**(34): 1393~1397
- 4 Andreas Behrendt, Takuji Nakamura. Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(16): 805~817
- 5 Zhang Xuguo, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Adjustment of optical elements and error analysis for laser remote sensing polarization imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1191~1196  
 张绪国, 江月松, 路小梅. 激光遥感偏振成像系统光学元件调整及误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1191~1196
- 6 Cheng Tianhai, Chen Liangfu, Gu Xingfa *et al.*. Cloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1849~1855  
 程天海, 陈良富, 顾行发等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1849~1855
- 7 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. The numerical analysis on the concentration of the scattering medium and the ratio of the impurity with the method of polarization degree[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2110~2116  
 赵一鸣, 江月松, 路小梅. 利用偏振度研究散射介质浓度及杂质比的数值分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2110~2116
- 8 W. N. Chen, C. W. Chiang, J. B. Nee. The lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. *Appl. Opt.*, **41**(30): 6470~6497
- 9 Kenneth Sassen. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment[J]. *The American Meteorologic Society*, 1991, **72**(12): 1847~1866
- 10 David M. Winker, C. Hosteler, M. Vaughn *et al.*. CALIOP algorithm theoretical basis document, part1: CALIOP instrument, and algorithms overview, September 9, 2006: 4~26
- 11 Chris A. Hostetler, Z. Liu, J. Reagan *et al.*. CALIOP algorithm theoretical basis document, calibration and level 1 data products, 7 April 2006: 5~64
- 12 Franz Immler. A new lidar system for the detection of cloud and aerosol backscatter, depolarization, extinction, and fluorescence [C]. *23rd International Laser Radar Conference*, 2006 Nara Japan
- 13 Zhenzhu Wang, Ruli Chi, Bo Liu *et al.*. Depolarization properties of cirrus clouds from polarization lidar measurements over Hefei in spring[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 235~237
- 14 N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu *et al.*. Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the northwest pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel mirai[J]. *Geophysica Research Letters*, 2002, **29**(19): 7-1~7-4
- 15 A. Hodzic, H. Chefer, R. Vauard *et al.*. Comparison of pollution aerosol chemistry-transport model simulations with lidar and sun-photometer observations at SARTA site[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D23201
- 16 Gian Paolo Gobbi. Polarization lidar returns from aerosols and thin clouds; a framework for the analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5505~5508
- 17 T. Sakai, T. Nagai, M. Nakazato *et al.*. Ice clouds and asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(36): 7103~7116
- 18 Gian Paolo Gobbi, F. Barnaba, R. Giorgi *et al.*. Altitude-resolved properties of a saharan dust event over the mediterranean [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 5119~5127
- 19 A. M. Tafuro, F. Barnaba, F. De Tomasi *et al.*. Saharan dust particle properties central mediterranean [J]. *Atmospheric Research*, 2006, **81**: 67~93
- 20 Jorg Ackermann. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study[J]. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, **15**: 1043~1050
- 21 G. P. Gobbi, F. Barnaba, L. Ammannato. The vertical distribution of aerosols, saharan dust and cirrus clouds in rome (Italy) in the year 2001 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2004, **4**: 351~359
- 22 Yu You, G. W. Kattawar, P. Yang *et al.*. Sensitivity of depolarized lidar signals to cloud and aerosol particle properties [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2006, **100**: 470~482