文章编号:1002-2082(2011)05-1037-07

大气云层分布的偏振激光后向散射研究

赵继芝,江月松,路小梅,叶继海

(北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要:利用大气激光后向散射垂直剖面图与消偏振度相结合的方法,分析 CALIPSO 卫星偏振激光雷达的后向散射信号。以 2008 年 11 月 23 日和 24 日的 CALIPSO 卫星数据为例,研究了北京地区大气中云层在可见光和红外光波段的垂直和水平分布特征。利用交互式数据语言 IDL(interactive data language)得到大气后向散射强度的垂直分布及其消偏振度,根据垂直剖面图可以直观地观测大气中各成分(如气溶胶、低空云和卷云等)的空间分布情况,并且能清楚地显示大气边界层的高度,由消偏振度可准确获得云层的分布高度及厚度。观测数据的处理结果表明:在海拔高度 3 km~7 km 存在厚度为 2 km~2.5 km 的云,其消偏振度约为 0.2。

关键词:大气光学;CALIPSO;IDL;云

中图分类号:TN9249; TP79 **文献标志码**:A

Polarized laser backscattering of atmospheric clouds distribution

ZHAO Ji-zhi, JIANG Yue-song, LU Xiao-mei , YE Ji-hai

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper presented a method of using backscatter vertical cross-section and depolarization ratio to analyze the backscatter data of polarization LIDAR of cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) satellite. Taking the CALIPSO data on Nov. 23rd and 24th, 2008 for example, it studied the distribution of the cloud in atmosphere in the visible and infrared light in Beijing area. Backscatter vertical profiles and depolarization ratio were drawn by interactive data language (IDL). The vertical distribution directly described the distribution of each component in the atmosphere such as aerosols, low cloud and cirrus, and showed the height of atmospheric boundary layer. The depolarization ratio gave the height and thickness of cloud. Two observations showed that there existed clouds with the thickness of 2 km~2.5 km and the depolarization ratio of 0.2 at the altitude of 3 km~7 km, and the method could distinguish between cloud and aerosol and provide spatial distribution of them more conveniently.

Key words: atmospheric optics; CALIPSO; IDL; cloud

引言

激光雷达(LIDAR, light detection and ranging)是传统的雷达技术与现代激光技术相结合的产物。它以激光为光源,通过探测激光与大气相互作用的散射信号来探测大气。激光雷达所接收的大气对激光的后向散射信号,包含大气散射光的光强、频率、相位和偏振等多种信息,利用这些丰富的激光大气回波信息,能够探测多种大气物

收稿日期:2010-10-16; **修回日期**:2010-12-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助(2011CB707001)和博士创新基金资助课题

作者简介:赵继芝(1987—),女,山东日照人,硕士研究生,主要从事激光雷达遥感及成像等方面的研究工作。
E-mail:bhcd9@163.com

理要素。因此,激光雷达的各种优势是其他探测手段所不能比拟的。近几年来,星载激光雷达探测全球大气物理要素已成为引人瞩目的发展方向[1-5]。美国国家宇航局(NASA)于 2006 年 4 月 28 日发射的"云、气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测"(CALIPSO)卫星[6],用于观测全球的气溶胶和云的垂直分布情况,其携带的正交偏振云、气溶胶激光雷达(CALIOP)是一台双波长偏振激光雷达,它以垂直分辨率为 30 m,水平分辨率 333 m 提供气溶胶、云的分布和光学特性。在发射端,发射系统输出波长为 1 064 nm 和 532 nm 的激光。在接收端,有 3 个通道接收回波信号,一个测量 1 064 nm 的后向散射强度,另外 2 个通道测量偏振方向相互垂直的 532 nm 平行偏振光和 532 nm 垂直偏振光。2 种波长之间的后向散射信号差别可区分气溶胶的颗粒尺寸,而 532 nm 波段的正交偏振检测可以获取大气目标的消偏振度特性。CALIOP 是世界上最先应用型探测云和气溶胶的星载激光雷达,其提供的全球云和气溶胶观测数据,方便应用于研究云和气溶胶对气候的影响。

本文提出一种利用后向散射垂直剖面图和消偏振度相结合的方法来分析 CALIPSO 卫星偏振激光雷达的后向散射信号,并利用 IDL 软件对 2008 年 11 月 23 日和 24 日 CALIPSO 卫星搭载的正交偏振云、气溶胶激光雷达(CALIOP)L1 产品中的 532 nm 总衰减后向散射系数、532 nm 垂直衰减后向散射系数和 1 064 nm 衰减后向散射系数进行了分析,得出了北京地区(纬度 39.92° N,经度 116.43° E)大气中云的分布特征。

1 激光雷达原理

1.1 CALIOP 激光雷达原理

CALIOP 双波长偏振激光雷达,主要由激光发射子系统和接收子系统两部分构成[6]。激光发射子系统包括两套完全相同的激光发射器,均带有扩束装置,为确保发射机与接收机共轴,发射子系统还配有相应的光束控制系统。接收子系统包括望远镜、后继光学系统、探测器、前置放大器、线路驱动器等,所有器件均放置在一个稳定的光学平台上。图 1 为其发射和接收光路示意图[6-7]。

发射系统所用激光器为 Nd∶YAG 激光器,其发射基频为 1 064 nm,激光器的重复频率为 20.16 Hz。通过使用倍频技术发射系统可获得

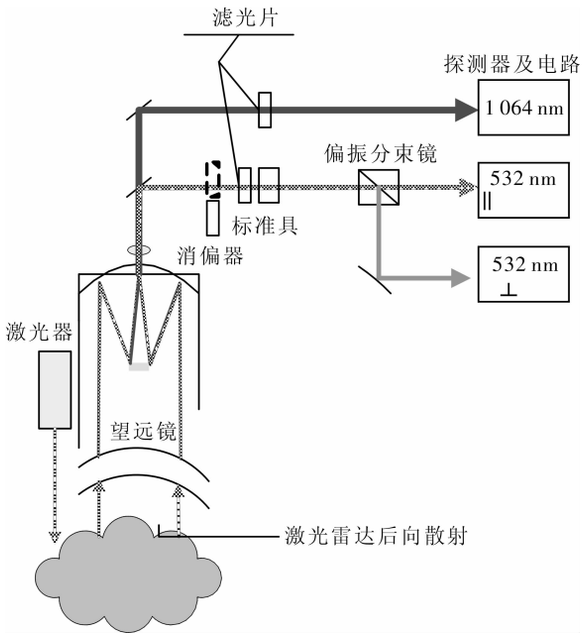

图 1 云、气溶胶激光雷达发射和接收光路示意图

Fig. 1 Optical path of the receiver and transmitter of CALIOP

532 nm 波长的激光脉冲输出,最终发射系统将输出单脉冲能量均为 110 mJ,脉冲宽度为 20 ns,波长为 1 064 nm 和532 nm的激光。激光通过光束准直系统之后,其发散角可达 100 μrad。根据激光脉冲重复频率以及光束发散角可得,云、气溶胶激光雷达探测的地面水平分辨率为 333 m,地面光斑大小为 70 m[8]。接收系统采用直径为 1 m 的望远镜,视场为 130 μrad。望远镜接收到的后向散射信号入射到分光镜上,反射光为 532 nm 的光脉冲,它经过干涉滤光片和窄带标准具来减小太阳背景光的影响。然后再经过偏振分光镜进入两偏振方向相互垂直的 532 nm 平行偏振光和 532 nm 垂直偏振光的通道,分别记录其垂直偏振与水平偏振信号强度,通过计算后向散射光的消偏振情况来反演大气中的云或气溶胶的相关信息。分光镜的透射光为 1 064 nm 的光脉冲回波,它经过干涉滤光片后由探测器直接探测,记录大气后向散射的强度信息,能够反演大气的消光系数。

1.2 激光雷达偏振探测原理

在单次散射条件下,激光雷达方程可表示为[6]

$$P(z)=\frac{C}{z^2}[\beta_R(\lambda_0,z)+\beta_M(\lambda_0,z)]\exp\{-2\cdot\int_0^z[\alpha_R(\lambda_0,\xi)+\alpha_M(\lambda_0,\xi)]\mathrm{d}\xi\} \quad (1)$$

式中:$P(z)$是来自距离 z 处大气的激光回波信号;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;$\beta_R(\lambda_0,z)$和$\alpha_R(\lambda_0,z)$分别为瑞利(分子)后向散射系数和消光系数;$\beta_M(\lambda_0,z)$和$\alpha_M(\lambda_0,z)$是颗粒的米散射(气溶胶和云)后向散射系数和消光系数。

总后向散射系数$\beta(\lambda_0,z)$定义为

$$\beta(\lambda_0,z)=\beta_R(\lambda_0,z)+\beta_M(\lambda_0,z) \tag{2}$$

总消光系数:

$$\alpha(\lambda_0,z)=\alpha_R(\lambda_0,z)+\alpha_M(\lambda_0,z) \tag{3}$$

式中$\beta(\lambda_0,z)$是激光雷达遥感探测中用于分析目标组成的重要参数。在激光雷达偏振遥感探测中,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之和:

$$\beta(z)=\beta_{/\!/}(z)+\beta_{\perp}(z) \tag{4}$$

式中$\beta_{/\!/}(z)$和$\beta_{\perp}(z)$分别为平行和垂直的后向散射系数。

目标后向散射消偏振度信息能够很好地对大气气溶胶的构成种类、目标特征、垂直高度分布等特性进行表征,通常激光雷达偏振遥感的目标后向散射的消偏振度$\delta(z)$定义为垂直与平行后向散射系数的比值,亦即[6-9]:

$$\delta(z)=\frac{\beta_{\perp}(z)}{\beta_{/\!/}(z)} \tag{5}$$

2　CALIPSO 数据及 IDL 处理数据方法

2.1　CALIPSO 数据结构

CALIPSO 数据主要由 2 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,包括 3 个雷达通道(532 nm 的垂直和平行通道,以及 1 064 nm 的红外通道)的衰减后向散射系数 ABS 序列及其误差。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,就可以把对应的参量导出。

本文中应用的是 CALIPSO 第一级数据提供的 532 nm 和 1 064 nm 总衰减后向散射系数序列X_{total532},$X_{1\,064}$,以及 532 nm 垂直衰减后向散射系数序列$X_{\perp 532}$,分别定义如下[6-9]:

$$X_{\text{total532}}(z)=[\beta_{/\!/}(z)+\beta_{\perp}(z)]\times T_{532}^2(z) \tag{6}$$

$$X_{\perp 532}(z)=\beta_{\perp}(z)\times T_{532}^2(z) \tag{7}$$

$$X_{1\,064}(z)=\beta_{1\,064}(z)\times T_{1\,064}^2(z) \tag{8}$$

$$T_{532}(z)=\exp\left[-\int_{z}^{z_{sat}}\alpha(\xi)\mathrm{d}\xi\right] \tag{9}$$

式中:$\alpha(\xi)$表示消光系数;$T_{532}(z)$和$T_{1\,064}(z)$分别表示 532 nm 波段和 1 064 nm 波段的透过率;积分上下限是从某一信号点的高度 z 到星载激光雷达校准高度z_{sat}[2]。

平行通道的后向散射系数$X_{/\!/532}$可以由(6)式和(7)式得到:

$$X_{/\!/532}=X_{\text{total532}}-X_{\perp 532} \tag{10}$$

2.2　基于 IDL 软件对 CALIPSO 数据提取及处理

本文采用 IDL 软件处理 CALIPSO 数据得到后向散射信号的垂直剖面图,较之以往利用 MATLAB 进行数据处理[10-15]更方便快捷。

IDL 交互式数据语言是由美国 Kodak 公司的全资公司 RSI(research system inc)开发并投向市场、面向矩阵且用于数据可视化研究与应用的第四代计算机语言。其内部函数可以方便地读取及处理 HDF 格式文件,具体的 HDF 数据读取的方法参见文献[16-18]。通过读取所需数据并用等值线作图方法作出垂直轮廓图。考虑用颜色表的方法来直接给灰度图添加一个调色板来处理数据的颜色,所以需要对数据进行密度分割。由于数据量很大且数据范围较集中,所以此法不会造成失真。

密度分割就是将一幅灰度范围为 0～1 的黑白图像$f(x,y)$的灰度按等间隔或不等间隔分割成 k 层,得到 $k-1$ 个密度分割层面,其密度值为l_i($i=1,2,3,\cdots,k$),用c_i表示赋予每一层的颜色,则有:

$$f(x,y)=\begin{cases}c_1, & \text{当 } f(x,y)\geqslant l_1\\ c_i, & \text{当 } l_i-1<f(x,y)\leqslant l_i,\ i=1,2,3,\cdots,k\\ c_k, & \text{当 } f(x,y)>l_k\end{cases} \tag{11}$$

最后,用 CONTOUR 命令显示等值线图,并填充颜色。同时,为图像添加文字标注等,进行整饰输出,得到 532 nm 总衰减后向散射强度垂直剖面图。

3　利用 IDL 分析北京地区大气中云的分布情况

利用后向散射垂直剖面图和消偏振度相结合来分析 CALIPSO 卫星偏振激光雷达的后向散射信号,通过 IDL 软件处理 CALIPSO 数据并作出总后向散射垂直剖面图和消偏振度曲线。根据垂直剖面图观测大气中各成分(如气溶胶、低空云和卷云等)的空间分布情况和大气边界层的高度,由消偏振度曲线分析云层的分布高度及厚度,以此分

析大气中云的分布情况。

为分析研究北京地区大气情况,选取 2008 年 11 月 23 日和 24 日 CALIPSO 探测的数据,利用 IDL 对其进行提取并对测量结果作研究分析。2 组数据的经度和纬度均为[55 920,1]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为[55 920,583]的二维矩阵。其中的 55 920 维列向量与经纬度坐标相对应,583 维横坐标与海拔高度相对应。根据经纬度坐标确定北京地区的坐标范围,进而可以获取北京地区大气后向散射情况。

图 2 是 2008 年 11 月 23 日北京时间 18:24～18:37 时,CALIPSO 探测得到的 5° N,108.3° E 至 50° N,120.8° E 的 532 nm 总衰减后向散射系数垂直剖面图。图中直线所标之处是距离北京地区(纬度 39.92° N,经度 116.43° E)最近的坐标点,两侧虚线表示卫星扫过 10 s 的范围。

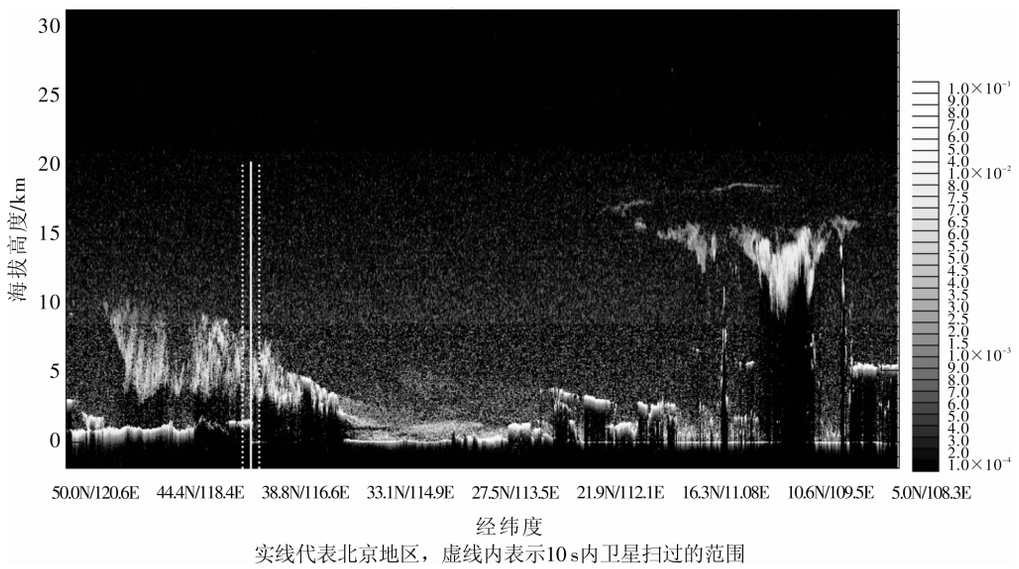

图 2 2008 年 11 月 23 日 18:24～18:37,532 nm 总衰减后向散射垂直剖面图

Fig. 2 Altitude-orbit cross-section of total 532 nm attenuated backscattering intensity at 18:24 ～18:37 on Nov. 23rd, 2008

通过后向散射强度图,可以知道在 16.3° N,110.8° E 至 7° N,109° E 有卷云存在[4],分布在高度为 10 km～15 km 的范围,大气后向散射值为 0.07 $km^{-1}sr^{-1}$～0.1 $km^{-1}sr^{-1}$;在 48° N,120° E 至 38° N,116° E,高度在 5 km～10 km 范围内,大气后向散射值为 0.01 $km^{-1}sr^{-1}$～0.05 $km^{-1}sr^{-1}$,是一层稀薄的云[15]。大气边界层通常是指大气的最低部分受地面的直接影响,并与地面有直接作用的气层,是地球表面与自由大气间进行物质、能量、热量和水汽交换必经的气层。从图中可以直观地观测大气边界层的高度约为 1 km～2 km。

为了更好地研究北京地区大气中云的分布情况,可提取北京地区的大气后向散射系数数据,进一步分析大气中的云及气溶胶分布特征。由于单个激光脉冲对应的 CALIPSO 回波信号的信噪比很低,为了提高回波信号的信噪比,需要对信号水平范围内取平均,通过降低水平分辨率来提高回波信号的信噪比。

从图 2 可知北京地区海拔 0～10 km 高度范围内存在气溶胶和云,所以提取虚线范围内的数据,即高度在 0～10 km 内的 532 nm 总衰减后向散射系数 $X_{total532}$,532 nm 垂直衰减后向散射系数 $X_{\perp 532}$ 和 1 064 nm 衰减后向散射系数 $X_{total1\ 064}$,分别取平均后得到 532 nm 平均总衰减后向散射系数 $\overline{X}_{total532}$,532 nm 平均垂直衰减后向散射系数 $\overline{X}_{\perp 532}$ 和 1 064 nm 平均衰减后向散射系数 $\overline{X}_{total1\ 064}$。532 nm 平均平行衰减后向散射系数 由(10)式得到,然后通过(5)式得到消偏振度。

图 3(a)为 2008 年 11 月 23 日 18:26:59,0～10 km 内北京地区 532 nm 和 1 064 nm 总衰减后向散射轮廓图,图 3(b)是消偏振度随高度变化的曲线图。

从图 3 可以看到,在海拔 0～2 km 区域,后向散射系数有一个峰值,强度值大小为 3.826 61×10^{-2} $km^{-1}sr^{-1}$,平均消偏振度为 0.3,这是由于此处大气边界层存在大量人为气溶胶引起的。大气

边界层的高度可用气溶胶后向散射系数的最大突变(即最大递减率)的高度来确定,由此可以确定大气边界层高度为 1.5 km。在海拔 3 km～6 km 范围,红外和可见光波段内的后向散射强度约为 5.02×10^{-3} $km^{-1}sr^{-1}$,平均消偏振度为0.2,说明此处存在一层厚度为 2.5 km 的云。由图3(a)可以看出后向散射强度没有波长依赖性,说明云的颗粒比较大[15],由图 3(b)可以看出云层内的偏振度值大于云的边界高度上的消偏振度值,说明云层内的多次散射比较严重。

通过图 2 和图 3 可以得出:利用 532 nm 总衰减后向散射垂直剖面图,不仅可以清晰直观地分辨云的空间分布,还可以直观观测大气边界层的高度。通过对北京地区后向散射信号强度和消偏振度的分析,可以确定在 2008 年 11 月 23 日海拔 3 km～6 km 存在大量云。

图 4 为 2008 年 11 月 24 日早 05:23～05:33 时 CALIPSO 探测得到的经纬度范围在 10.4° N,124.3° E 到 44.0° N,115.5° E 区间内的 532 nm 总衰减后向散射垂直剖面图。

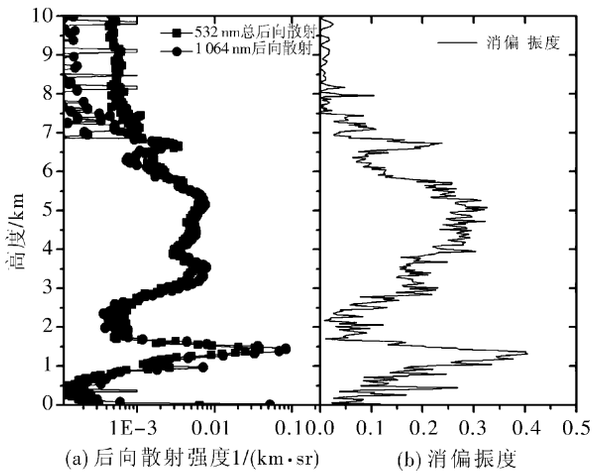

图 3　2008 年 11 月 23 日 18 时 26 分 59 秒北京地区后向散射强度(a)和消偏振度(b)

Fig. 3　Total attenuated backscattering intensity (a) and depolarization ratio (b) in the Beijing area at 18:26:59 on Nov. 23rd, 2008

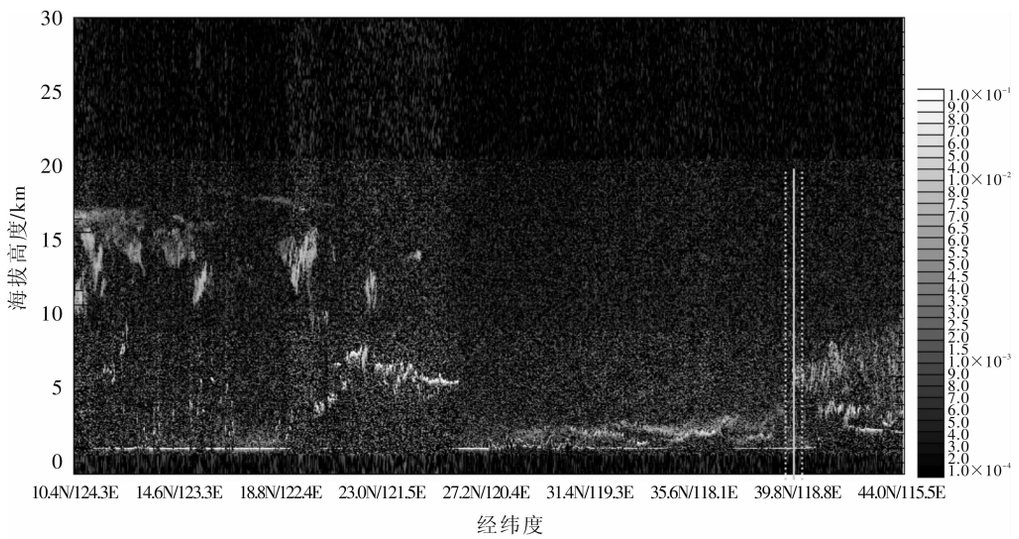

图 4　2008 年 11 月 24 日早 05:23～05:33,532 nm 总后向散射垂直剖面图

Fig. 4　Altitude-orbit cross-section of total 532 nm attenuated backscattering intensity at 05:23 ～ 05:33 on Nov. 24th, 2008

通过图 4 可以知道,在 10.4° N,124.3° E 至 23° N,121.5° E,高度为 10 km～15 km 范围内存在卷云。在 18.8° N,122.4° E 至 26° N,120.7° E 和 39.8° N,116.8° E 至 44° N,115.5° E 范围内,在 5 km 高度存在稀薄的云层。图中实线代表北京地区坐标点,从图中可以看到北京地区海拔高度 5 km 左右存在一层薄云。以北京地区为中心左右各取 5 s 的信号,即虚线范围内的点,读取范围内的后向散射系数并取平均,得到 532 nm 平均总衰减后向散射系数和平均垂直后向散射系数以及 1 064 nm 平均衰减后向散射系数。

图 5(a)表示 2008 年 11 月 24 日 05:31:45 时 0～8 km 内北京地区 532 nm 和 1 064 nm 总衰减后向散射轮廓图,图 5(b)表示消偏振度随高度变化的曲线图。

从图 5 可以看到,从海拔 4 km 到 6 km,后向散射强度很大,数值在左右,平均消偏振度为 0.27,说明此处存在厚度为 2 km 的云层。

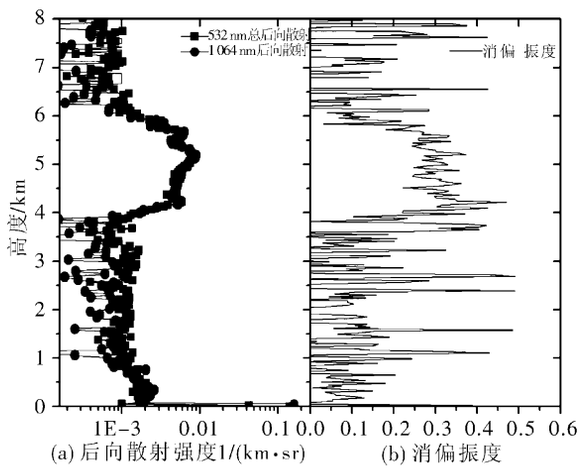

图 5 2008 年 11 月 24 日 05 时 31 分 45 秒北京地区后向散射强度(a)和消偏振度(b)

Fig. 5 Total attenuated backscattering intensity (a) and depolarization ratio (b) in the Beijing area at 05:31:45 on Nov. 24th, 2008

通过以上 2 例可以得出:利用 532 nm 总衰减后向散射垂直剖面图,可以直观地观测大气中各成分(如气溶胶、低空云和卷云等)的空间分布情况和大气边界层的高度。利用后向散射强度和消偏振度曲线图,可知北京地区 2008 年 11 月 23 日和 24 日在海拔高度 3 km～7 km 存在一层厚度在 2 km～2.5 km 之间的云,平均消偏振度约为 0.2。

4 结论

本文利用后向散射垂直剖面图和消偏振度相结合处理 CALIPSO 数据的方法,并通过实例分析北京地区大气中云的分布特征。通过对 2008 年 11 月 23 日和 24 日的 CALIPSO 数据进行处理及作图,得出以下结论:1) 通过后向散射垂直剖面图,可以清晰直观地分辨云、气溶胶等的空间分布情况,还可以观测大气边界层的高度;2) 通过分析研究北京地区回波信号的后向散射强度和消偏振度可知在海拔高度 3 km～7 km 存在厚度为 2 km～2.5 km 的云,其消偏振度约为 0.2;3) 利用 IDL 处理卫星数据,周期短,效率高,表示清晰,充分体现了 IDL 语言灵活的输入输出,便捷的交互式处理的优势。

参考文献:

[1] 尹青,何金海,张华. 激光雷达在气象和大气环境监测中的应用[J]. 气象与环境学报,2009, 25(5): 48-56.
YIN Qing, HE Jin-hai, ZHANG Hua. Application of laser radar in monitoring meteorological and atmospheric environment[J]. Weather and Environment, 2009, 25(5): 48-56. (in Chinese with an English abstract)

[2] LU X, JIANG Y, ZHANG X, et al. An algorithm to retrieve aerosol properties from analysis of multiple scattering influences on both ground-based and space-borne lidar returns[J]. Optics Express, 2009, 17(11): 8719-8728.

[3] 王珍珠,李炬,钟志庆,等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. 应用光学,2008,29(1):96-100.
WANG Zhen-zhu, LI Ju2, ZHONG Zhi-qing1, et al. LIDAR exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 96-100. (in Chinese with an English abstract)

[4] 闫顺生,胡顺星,胡欢陵,等. Raman 激光雷达探测气溶胶消光系数求解新方法[J]. 应用光学,2008,29(3):433-435.
YAN Shun-sheng, HU Shun-xing, HU Huan-ling, et al. A new derivation method for aerosol extinction coefficient detected by Raman lidar[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 433-435. (in Chinese with an English abstract)

[5] 刘厚通,李超,王珍珠,等. 大气消光特性与机载激光雷达眼睛安全关系的研究[J]. 应用光学,2007,28(2):195-200.
LIU Hou-tong, LI Chao, WANG Zhen-zhu, et al. Relationship between atmosphere extinction feature and eye safety of airborne atmosphere detection lidar[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 195-200. (in Chinese with an English abstract)

[6] POWELL K A, HOSTETLER C A, LIU Zhao-yan, et al. CALIPSO lidar calibration algorithms. Part I: Nighttime 532-nm parallel channel and 532-nm perpendicular channel[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2009, 26(10): 2015-2033.

[7] 刘刚,史伟哲,尤睿. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述[J]. 航天器工程,2008,17(1): 78-84.
LIU Gang, SHI Wei-zhe, YOU Rui. Cloud-aerosol lidar of America[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(1): 78-84. (in Chinese with an English abstract)

[8] 卜令兵,单坤玲,吕晶晶,等. 云和气溶胶探测星载激光雷达及其应用[J]. 光学与光电技术,2009, 7(4): 62-64.
BU Ling-bing, SHAN Kui-ling, LU Jing-jing, et al.

Spaceborne lidar for aerosol and cloud detection and its application[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(4): 62-64. (in Chinese with an English abstract)

[9] WINKER D M, ALI O. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2009, 26(11): 2310-2323.

[10] 赵一鸣,江月松,张绪国,等. 利用CALIPSO卫星数据对大气气溶胶的去偏振特性分析研究[J]. 光学学报,2009, 29(11): 2943-2951.
ZHAO Yi-ming, JIANG Yue-song, Zhang Xu-guo, et al. Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 2943-2951. (in Chinese with an English abstract)

[11] CHEN W N, CHIANG C W, NEE J B. The lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds[J]. Applied Optics, 2002, 41(30): 6470-6497.

[12] CHO H M, YANG P, KATTAWAR G W, et al. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements[J]. Optics Express, 2008, 16(6): 3931-3947.

[13] HUANG J P, MINNIS P, YI Y H, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2007,34(18):L18805-1-5.

[14] 马盈盈, 龚威, 朱忠敏. 中国东南部地区气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. 遥感学报,2009, 13(4): 715-722.
MA Ying-ying, GONG Wei, ZHU Zhong-min. Aerosol optical characteristics in South east China determined using spaceborne lidar[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 715-722. (in Chinese with an English abstract)

[15] LU Xiao-mei, JIANG Yue-song, ZHANG Xu-guo, et al. Seasonal variability of cirrus depolarization properties derived from CALIPSO lidar measurements over Beijing in China[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(2): 127-129.

[16] 闫殿武. IDL可视化工具入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
YAN Dian-wu. An introduction to programming with IDL[M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)

[17] 韩培友. IDL可视化分析与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.
HAN Pei-you. Visual analysis and application of IDL[M]. Xi'an: Northwest Universty Press, 2006. (in Chinese)

[18] 路文海. IDL语言处理HDF格式遥感数据的研究[J]. 海洋信息, 2006(3): 6-7.
LU Wen-hai. Research on processing remote sensing data of HDF format using IDL language[J]. Marine Information, 2006(3): 6-7. (in Chinese with an English abstract)