

文章编号: 1001-1498(2009)02-0161-05

# 激光雷达沙尘参数提取技术研究

张怀清, 胡红玲, 鞠洪波, 陈永富

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

**摘要:**对激光雷达沙尘天气监测技术进行了研究,详细分析了 Mie 散射激光雷达气溶胶和沙尘参数计算方法。分析、设计并用 C# 语言开发了用于处理和分析激光雷达回波信号的大气和沙尘参数反演软件系统。利用后向散射激光雷达 (LB-D200) 对北京市 2006 年春季沙尘天气进行监测试验,通过软件计算气溶胶参数,计算结果与其他监测结果相符。结果表明:通过退偏振系数可以计算出大气气溶胶中沙尘含量,后向散射激光雷达在沙尘天气沙尘的垂直分布探测中具有优势。

**关键词:**激光雷达;沙尘;气溶胶;消光系数;气溶胶光学厚度

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

## Study on Monitoring Techniques of Sand and Dust Parameters Using Lidar System

ZHANG Huai-qing, HU Hong-ling, JU Hong-bo, CHEN Yong-fu

(Research Institute of Forest Resource Information Techniques, CAF, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In this paper, the Lidar dust events monitoring techniques were studied. The aerosol and dust parameters and calculating using Mie scattering Lidar were detailed analyzed. A software of aerosol and dust parameters calculating system was also analyzed, designed and developed using C# language which can dispose and analyze echo signal of Lidar. The backscattering Lidar (LB-D200) was used to monitor sand and dust weather at Beijing in spring of 2006. The authors calculated aerosol parameters using developed software, and the results were coordinated with other monitor method. The result showed that the dust contents could be calculated by the depolarization parameters and backscattering Lidar has the advantage of detecting vertical structure of the dust layer.

**Key words:** Lidar; sand and dust; aerosol; extinction coefficient; aerosol optics thickness

我国是沙尘天气多发的国家,沙尘天气对人类的生产生活带来重大的危害。沙尘天气监测的方法有很多,其中后向散射激光雷达 (Backscatter Lidar) 具有分辨率高、抗干扰能力强等优点,能够连续探测大气边界层中沙尘的光学特性和沙尘的时空分布,是探测大气气溶胶的有效并可靠的手段<sup>[1-2]</sup>,为我国风沙灾害沙尘气溶胶的物理、化学、光学特性以及沙尘输送的物理过程研究提供新的技术方法,有助

于人们深入了解风沙灾害的运动过程和原理<sup>[3]</sup>,分析沙尘的起源、路径和影响范围。国外从 20 世纪 30 年代就开始对沙尘暴的时空分布、成因、结构、监测和防治对策等方面开展了相关研究,并应用激光雷达对沙尘天气开展了监测和预报,如欧洲建立了激光雷达监测网络,用于实时监测和预报欧洲沙尘天气的活动情况。由于大气气溶胶成分的复杂性,在激光雷达沙尘监测方面,多为通过大气气溶胶浓度

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金课题“地基激光雷达沙尘参数反演技术研究 (RIFR IIZY2007007)”;国家“十一五”科技支撑课题“综合监测技术体系集成与应用示范 (2006BAD23B06)”

作者简介: 张怀清 (1973—),男,湖南宁乡人,副研究员,硕士生导师,主要从事林业可视化模拟技术与湿地资源监测技术研究

的探测进而分析其中沙尘气溶胶的含量<sup>[4-5]</sup>,从而得到沙尘参数反演的办法。本研究在对大气气溶胶参数提取的基础上,利用退偏振研究沙尘参数(沙尘光学厚度、沙尘空间结构、沙尘浓度等)的反演方法,分析沙尘天气的空间结构及其变化,并开发用于处理和解析激光雷达回波信号的大气和沙尘参数反演软件系统。

## 1 激光雷达沙尘监测方法

### 1.1 基本原理

大气探测激光雷达主要由 3 个部分组成:脉冲激光器、接收望远镜、光电探测器。脉冲激光器向空中发射激光脉冲,该激光脉冲在向上传播的过程中,不断地与大气中的气溶胶粒子相互作用。一旦向上传播的激光脉冲进入接收望远镜的视场,则激光与大气物质相互作用产生的回波将被接收望远镜接收,经信号检测和处理后即可得到大气探测激光雷达回波信号。激光光束与大气物质相互作用而产生回波信号是大气探测激光雷达进行大气探测的关键所在。

激光与大气物质的相互作用机制有许多种<sup>[6-7]</sup>。主要包括: Mie 散射、Rayleigh 散射、Raman 散射、共振荧光和吸收。其中 Mie 散射是大气中的各种固态或液态的气溶胶粒子,与激光的相互作用出现的散射情况。沙尘气溶胶与激光光束产生的相互作用主要为 Mie 散射,因此主要采用解 Mie 散射方程来进行沙尘气溶胶参数的计算。

### 1.2 气溶胶参数计算

#### 1.2.1 气溶胶消光系数

Mie 散射激光雷达方程为:

$$P(Z) = ECZ^{-2} \int_0^Z \beta_{\text{ext}}(Z) \exp[-2 \int_0^Z \beta_{\text{ext}}(Z) dZ] dZ \quad (1-1)$$

式中,  $P(Z)$  为激光雷达接收到的高度为  $Z$  处的大气后向散射回波信号的能量,  $E$  为激光雷达的发射能量,  $C$  为雷达常数,  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  为大气后向散射系数,  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  为大气消光系数。此方程有两个未知量为  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  和  $\beta_{\text{ext}}(Z)$ , 两者都随距离变化而变化<sup>[8]</sup>。求解 Mie 散射激光雷达方程的常用方法有 Collis 斜率法, Klett 方法和 Fernald 方法。Collis 斜率法的前提是假设大气均匀分布,但通常大气分布并不均匀。在这种情况下,消光系数  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  和后向散射系数  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  是高度  $Z$  的函数。因此,常采用 Klett 算法来进行求解。

Klett 方法:

首先假设:

$$\beta_{\text{ext}}(Z) = C_0 k \quad (1-2)$$

式中,  $C_0$  为常数,  $k$  取决于激光雷达的波长与气溶胶的性质,  $k$  的取值范围通常为 0.67 ~ 1。

将上式代入 (1-1) 式可得,再假设  $k$  为常数,并将方程优化得到:

$$\beta_{\text{ext}}(Z) = \frac{\exp[(S(Z) - S_m)/k]}{\int_{Z_m}^Z \left[ \beta_{\text{ext}}^{-1} + \frac{2}{k} \exp[(S(Z) - S_m)/k] dZ \right]} \quad (1-3)$$

式中,  $Z_m$  为选定的参考高度。  $\beta_{\text{ext}}(Z_m)$  为选定高度上的消光系数。这两个值确定后就能求得参考高度  $Z_m$  以下的各高度的消光系数。

确定  $\beta_{\text{ext}}(Z_m)$  的方法有两种:

方法 1:

当光学厚度较大时,相应的  $\beta_{\text{ext}}(Z_m)$  可以利用斜率法作出简单的近似估算,即:

$$\beta_{\text{ext}}(Z_m) = \frac{1}{2} \frac{(S_0 - S_m)}{(Z_m - Z_0)} \quad (1-4)$$

方法 2:

对于浑浊的大气,假定在距离范围  $(Z_0, Z_m)$  的某一个子区间  $(Z_b, Z_m)$  内消光系数  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  近似为一常数,则可以利用稳定解对  $\beta_{\text{ext}}(Z_m)$  作一个较为精确的估计,即:

$$\beta_{\text{ext}}(Z_m) = \frac{\exp[(S_b - S_m)/k] - 1}{\int_{Z_b}^{Z_m} \frac{2}{k} \exp[(S(Z) - S_m)/k] dz} \quad (1-5)$$

#### 1.2.2 气溶胶后向散射系数

$$\beta_{\text{ext}}(Z) = \text{LidarRatio} \times \beta_{\text{ext}}(Z) k \quad (1-6)$$

式中,  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  为后向散射系数。  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  为消光系数。LidarRatio 为激光雷达比,取值在 20 ~ 100 之间。  $k$  为后向散射比,取值在 0.67 ~ 1 之间。

1.2.3 气溶胶光学厚度 将消光系数  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  随高度进行积分,能得到高度  $Z_1$  至高度  $Z_2$  之间的气溶胶光学厚度 (AOT):

$$\text{AOT}(Z_1 - Z_2) = \int_{Z_1}^{Z_2} \beta_{\text{ext}}(Z) dZ \quad (1-7)$$

### 1.3 空气分子参数计算

1.3.1 空气分子消光系数 大气消光系数是由气溶胶分子的消光系数  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  和空气分子的消光系数  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  组成。空气分子的消光系数可由 1976 年美国标准

大气模式中的大气密度廓线及瑞利散射得出<sup>[9]</sup>。

计算方法如下:

$$\rho_2(z) = 3.96 \times 10^{-56} \times N \times \mu^{-4} \quad (1-8)$$

$$\rho_2(z) = 3.96 \times 10^{-56} \times \mu^{-4} \times \frac{N_A}{\mu} \times \quad (1-9)$$

$$\rho_2(z) = 3.96 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.532^4} \times \frac{6.022}{28.966} \times \quad (1-10)$$

式中,  $N$  为空气分子的数密度,  $N_A$  为 Avogadro 常数,  $\mu$  为空气分子的质量密度。

1.3.2 空气分子后向散射系数 分子的消光系数与后向散射系数的关系为:

$$\rho_2(z) = \frac{3}{8} \times \rho_2(z) \quad (1-11)$$

### 1.4 沙尘参数计算

粒子的退偏振率和粒子的浓度无关,只与形状和成分有关,激光雷达的退偏振率通常被用做粒子形态的分类参考,因此可以采用退偏振计算方法进行沙尘参数的计算。

在探测大气时,利用激光雷达接收大气后向散射回波信号的平行分量和垂直分量<sup>[10-12]</sup>:

$$P_p(z) = \frac{k_p P_t}{z^2} \rho_p(z) \exp[-2 \int_0^z \rho_p(z) dz] \quad (1-12)$$

$$P_s(z) = \frac{k_s P_t}{z^2} \rho_s(z) \exp[-2 \int_0^z (\rho_p(z) + \rho_s(z)) dz] \quad (1-13)$$

式中,  $P_t$  为激光发射功率,下标  $p$  和  $s$  分别表示与发射激光偏振方向平行和垂直的两个方向。 $P_p(z)$  和  $P_s(z)$  分别表示激光雷达接收到的后向散射光在高度  $z$  处回波功率的平行分量和垂直分量。 $k_p$  和  $k_s$  分别表示平行分量探测通道和垂直分量探测通道的系统常数。 $\rho_p(z)$  和  $\rho_s(z)$  分别表示高度  $z$  处的大气后向散射系数的平行分量和垂直分量。 $\rho_p(z)$  和  $\rho_s(z)$  分别表示高度  $z$  处大气消光系数的平行分量和垂直分量。

退偏振比  $(z)$  为:

$$(z) = \frac{P_s(z)/k_s}{P_p(z)/k_p} = \frac{\rho_s(z)}{\rho_p(z)} \exp[\int_0^z (\rho_p(z) - \rho_s(z)) dz] \quad (1-14)$$

对于随机取向的卷云和大气气溶胶粒子,  $\rho_p(z) = \rho_s(z)$ , 若令  $K = k_p/k_s$ , 则上式可写为:

$$(z) = K \frac{P_s(z)}{P_p(z)} = \frac{\rho_s(z)}{\rho_p(z)} \quad (1-15)$$

假定沙尘的退偏振为  $\rho_1$ , 大气污染物气溶胶的

退偏振为  $\rho_2$ 。如果测得的退偏振为  $\rho$ , 那么散射强度中沙尘比例  $R$  可由下式求得<sup>[12]</sup>:

$$R = [(1 - \rho_2) - \rho] / [(1 - \rho_2)(1 + \rho)] \quad (1-16)$$

式中  $\rho_1 = \rho_1 / (1 + \rho_1)$ ,  $\rho_2 = \rho_2 / (1 + \rho_2)$ ,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  为长期观测的经验数据求得,  $\rho_1 = 0.35$ ,  $\rho_2 = 0.05$ 。

### 1.5 能见度计算

大气能见度与消光系数的基本关系为<sup>[12-13]</sup>:

$$V = - \ln / \quad (1-17)$$

式中,  $V$  为能见距离,  $k$  为大气消光系数,  $L$  为入眼的亮度对比感阈。通常情况下正常人眼的平均亮度对比感阈  $L = 0.02$ 。将  $L$  值代入 (1-17) 式, 即得能见度方程:

$$k = - 3.912 / \quad (1-18)$$

根据上式能够求得大气能见度, 可判断沙尘天气的种类。

## 2 激光雷达沙尘参数反演系统开发

系统采用 C# 语言开发激光雷达沙尘参数反演系统软件, 该系统主要分为 3 个部分: 数据管理、数据分析、结果显示输出 (图 1)。

(1) 数据管理: 后向散射激光雷达获取的回波信号都是以 RMyMddhh mm s 为文件名存储的特殊文件格式。数据管理包括回波信号的获取、数据存储、数据读取、数据导入导出等功能。

(2) 数据分析: 首先是要对读取出来的基本信息进行计算, 得到模拟信号和光子计数信号。然后分别演算激光雷达回波信号的范围修正信号、消光系数、后向散射系数以及气溶胶的光学厚度等。根据退偏振比计算沙尘占大气气溶胶的比例, 得到沙尘参数的消光系数、后向散射系数等。

(3) 结果显示输出: 对数据读取、分析的结果以不同形式显示或输出。包括图表、表格、图形等。

## 3 激光雷达监测系统试验

### 3.1 观测仪器

该研究采用的是由希腊 Raymetrics S.A. 生产的后向散射激光雷达 (LB-D200: 532 nm 波段)。该仪器能够垂直监测大气中的沙尘情况, 包括 0.1 ~ 20 km 高空大气气溶胶光学参数、气溶胶分层、沙尘分层、沙层边界、沙层高度、大气结构等指标。本研究利用该仪器在北京市对 2006 年春季的典型沙尘天气进行了连续观测。

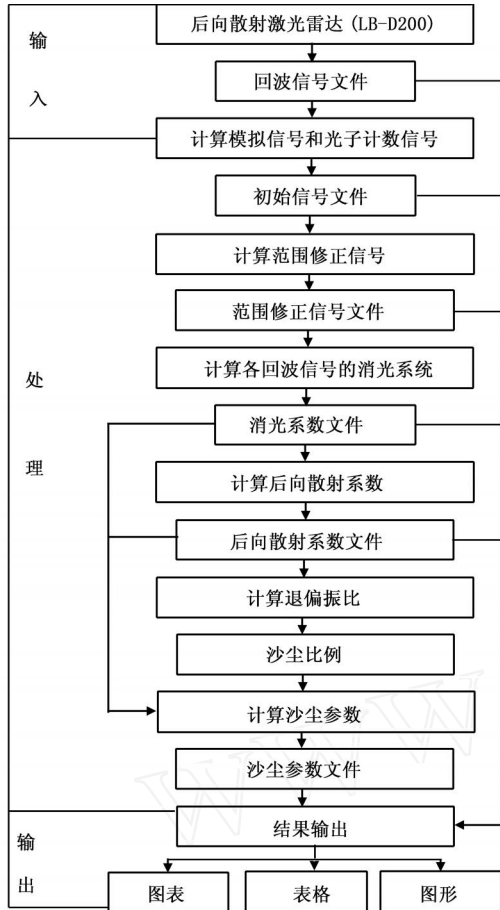


图 1 激光雷达参数反演系统数据流程图

### 3.2 结果分析

以 2006 年 4 月观测的结果为例:从 2006 年 4 月 10 日到 4 月 11 日,气溶胶的消光系数集中在 500 ~ 1 000 m 范围内。到 10 日的 20: 00 时,气溶胶逐渐上升至 2 500 ~ 3 000 m 范围。4 月 11 日凌晨在 8 000 ~ 9 000 m 高空出现过气溶胶层。2006 年 4 月 10 日 AOT 逐渐增大到 2.5,然后 2006 年 4 月 11 日开始下降。气溶胶光学厚度 4 月 10 日开始逐渐增大到 2.5,持续一段时间后到 4 月 11 日开始逐渐下降,到 4 月 12 日凌晨最低降至 0.3 左右。2006 年 4 月 10 日至 11 日,Angstrom 波长指数 在 0.4 ~ 0.55 之间。到

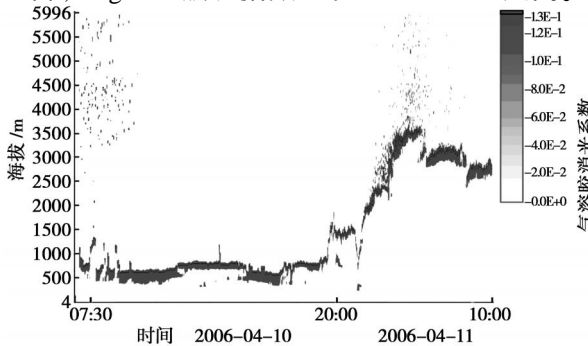


图 2 2006-04-10 至 2006-04-11 的消光系数

2006 年 4 月 12 日下降到 0.4 以下,最低达到 0.03 左右 (见图 2 和图 3)。激光雷达监测结果与中国科学院大气物理所的太阳光度计分析结果相符 (见图 4),同时,后向激光雷达在实现沙尘天气沙尘的垂直分布结构的观测中表现出明显的优势。

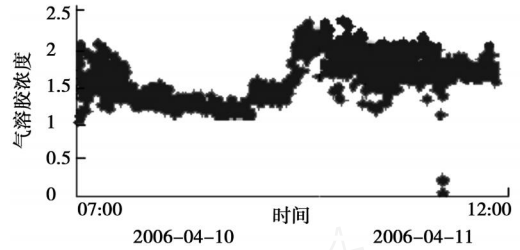


图 3 2006-04-10 至 2006-04-11 的 AOT

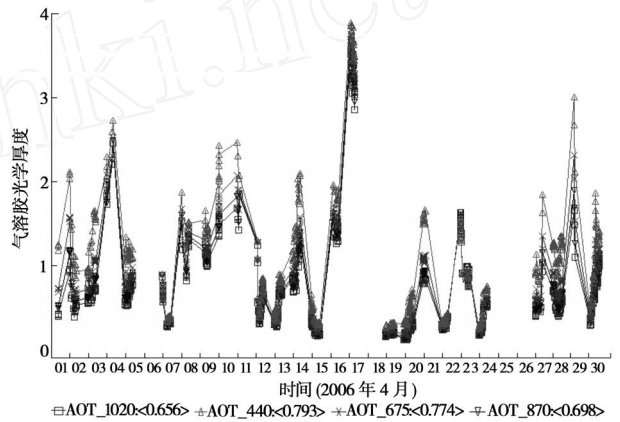


图 4 2006 年 4 月 AOT (数据来源:中国科学院大气物理所)

### 4 结论与讨论

(1) 本文通过运用 Klett 方法进行解算,分析、设计、开发了激光雷达参数反演系统。通过软件对后向散射激光雷达 LB - D200 获取的回波信号进行分析。利用 Klett 方法能够计算得到原始信号、消光系数和后向散射系数,通过对消光系数在一段距离内进行积分能够得到当时的气溶胶光学厚度。而气溶胶光学厚度是反应沙尘天气程度的重要指标,后向散射激光雷达能实现沙尘天气大气气溶胶的垂直分布探测。

(2) 退偏振系数是由大气回波信号的平行分量和垂直分量计算得到,根据退偏振系数比能够判断气溶胶中沙尘粒子的比例。本研究在数据获取的程序中设置了偏振模式为平行和垂直进行测量,分别得到了回波信号的平行分量和垂直分量。如果平行分量和垂直分量值的曲线相同,则表现为无沙尘。通过退偏振系数的计算可以分析大气气溶胶中沙尘气溶胶的含量。

(3)通过激光雷达监测结果与太阳光度计的监测结果进行对比分析,AOT越大,表示大气污染越严重。气溶胶的光学厚度是由不同成分的气溶胶粒子决定的,仅通过 AOT数据不能判断出是否为沙尘气溶胶。因此,还需要用到 Angstrom 波长指数。取值在 0~2之间,值越小,气溶胶的粒径越大,沙尘粒子所占的比例越大。通过  $\lambda$  值与后向散射激光雷达监测结果进行对比,两者具有很好的一致性。

(4)使用激光雷达进行沙尘监测是单点进行的,测量的数据仅反映该测量点的沙尘气溶胶状态。虽然测量的精度很高,而且反映该点大气结构随时间的变化状况,但是却不能监测大范围的沙尘天气,因此需要建立覆盖沙尘起源、传播和影响地区的激光雷达沙尘监测网络,从整体上了解沙尘的起源、运动变化和传播影响,进而开展沙尘天气预报和预警。

#### 参考文献:

- [1] Papayannis A, ZHANG H Q, Amiridis V, *et al* Extra-ordinary dust event over Beijing, China, during April 2006: lidar, sun photometric, satellite observations and model validation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: 1 - 5
- [2] 张怀清,鞠洪波,陈永富. 沙尘天气激光雷达监测技术研究[J]. *林业科学*, 2007, 43(12): 28 - 32
- [3] 郑新江,杨文义,李云. 北京地区沙尘天气的某些特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(1): 14 - 23
- [4] 夏俊荣,张 镭. Mie散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. *干旱气象*, 2006, 24(4): 68 - 72, 81
- [5] 贺千山,毛节泰. 微脉冲激光雷达及其应用研究进展[J]. *气象科技*, 2004, 32(4): 219 - 224
- [6] 丁红星,戴丽莉,薛国刚,等. 对流层气溶胶消光特性的 Mie 散射激光雷达探测研究[J]. *广西物理*, 2006, 27(2): 25 - 28
- [7] 白宇波,石广玉,田村耕一,等. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2000, 24(4): 559 - 567
- [8] 董旭辉,杉本伸夫,白雪椿,等. 激光雷达在沙尘观测中的应用——2004年春季北京和呼和浩特沙尘天气的解析[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(6): 942 - 927
- [9] 贺应红,郑玉臣,程 娟,等. Mie散射大气激光雷达回波信号消光系数边界值估算[J]. *光散射学报*, 2004, 16(2): 149 - 152
- [10] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *J Appl Opt*, 1981, 20(2): 211 - 220
- [11] 王治华,贺应红,李振声,等. 气溶胶后向散射消光对数比消光系数反演的影响研究[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3): 335 - 340
- [12] 刘 东,戚福弟,金传佳. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2003, 27(6): 1 093 - 1 100
- [13] Dubovik O, Smimov A, Holben B N, *et al* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(8): 9 791 - 9 806