

## 激光与光电子学进展

基于星载激光雷达双通道信息的气溶胶消光系数  
廓线反演算法研究秦荣荣<sup>1,2</sup>, 姚微源<sup>1\*</sup>, 王宁<sup>1</sup>, 张贝贝<sup>1</sup>, 马灵玲<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;<sup>2</sup>中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

**摘要** 星载 Mie 散射激光雷达是当前应用最为广泛的获取全球尺度气溶胶剖面信息的探测设备。然而, 大气气溶胶类型多样, 通常假定气溶胶遵循特定模式并以此为先验, 从而实现从激光雷达信号反演气溶胶消光系数廓线, 但这一程度上会影响反演精度的进一步提升。鉴于此, 提出了一种基于星载激光雷达双通道信息的气溶胶消光系数廓线的迭代反演优化算法。该方法首先在给定的先验气溶胶模式下获得初始消光-后向散射比(即激光雷达比), 并基于此分别反演两个通道的气溶胶消光系数和光学厚度。同时借助构建的气溶胶光学厚度与气溶胶质量柱总量之间的关系, 得到两通道独立估计的大气气溶胶质量柱总量。最后以两通道大气气溶胶质量柱总量相同为约束, 实现仅依赖激光雷达数据的激光雷达比及气溶胶相关光学参数的迭代优化。由于双通道激光雷达观测的限制, 该方法适用于两种类型气溶胶混合下的反演, 利用内蒙古包头地区的多年气溶胶背景场, 对反演模型的精度和适用性进行了评估。与采用经验估算激光雷达比的 Fernald 方法反演结果相比, 所提算法反演的气溶胶消光系数廓线在 532 nm 和 1064 nm 通道的平均精度分别提高了 21.16% 和 3.00%。此外, 还将该方法应用在 CALIOP 数据中, 进一步验证了该反演模型的应用潜力。

**关键词** Mie 散射激光雷达; 双通道信息; 气溶胶消光系数; 激光雷达比; 迭代反演

中图分类号 P412.25

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231265

An Algorithm of Aerosol Extinction Coefficient Retrieval from  
Dual-Wavelength Mie Lidar ObservationsQin Rongrong<sup>1,2</sup>, Yao Weiyan<sup>1\*</sup>, Wang Ning<sup>1</sup>, Zhang Beibei<sup>1</sup>, Ma Lingling<sup>1</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;<sup>2</sup>School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Space-borne Mie lidar is the most widely used instrument to profile aerosols in the global scale. However, due to the variation of atmospheric aerosol types, the retrieval model for aerosol extinction coefficients from lidar signals assumes *a priori* aerosol model, which impedes the further improvement of retrieval accuracy. As such, an iteration algorithm for aerosol extinction coefficient profiling from space-board dual-wavelength lidar observation is proposed. First, the initial extinction-to-backscatter ratio (i. e., lidar ratio) is obtained based on *a priori* aerosol mode and the aerosol extinction coefficient and optical depth at two channels are then retrieved. Moreover, with the relationship built between aerosol optical depth and aerosol mass column, the total aerosol mass columns at two channels are estimated. Finally, by applying the constraints that the two-channel observations correspond to the same aerosol mass column, the lidar ratio and the optical parameters are optimized iteratively based on lidar observation extensively. Due to the limitation of the channel number of the dual-wavelength lidar, the method is only applicable to the two-type mixed aerosol model. The accuracy and the applicability of the method are evaluated based on the background information of aerosol profiles in Baotou, Inner Mongolia, China. The retrieval results from the empirically estimated lidar ratio are taken as the control group. The results show that the proposed method yields mean accuracy improvement of extinction coefficient at 532 nm and 1064 nm

收稿日期: 2023-05-09; 修回日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-05-16; 网络首发日期: 2023-05-26

基金项目: 国家民用空间基础设施项目

通信作者: \*yaowy@aircas.ac.cn

channels by 21.16% and 3.00%, respectively. The method is also applied to CALIOP data to further validate the application potential of the proposed retrieval model.

**Key words** Mie lidar; dual-wavelength; aerosol extinction coefficient; lidar ratio; iterative retrieval

## 1 引言

大气中悬浮的气溶胶来源广泛,成分组成复杂且随时空变化强烈,影响着地球气候和人类生存环境。一方面,气溶胶对太阳辐射和地面长波辐射的吸收和散射作用干扰了辐射平衡;另一方面,酸雨形成、雾霾天气出现、臭氧层破坏都与气溶胶自身的污染有害特征密切相关。大气中气溶胶含量的增加会导致大气能见度降低、环境污染问题加剧、人类身体健康受到侵害等问题。因此,对气溶胶的类型、光学特性和成分廓线等信息的监测对于评估气溶胶对地球辐射收支、气候变化等影响的研究至关重要<sup>[1-3]</sup>。

Mie 散射激光雷达的激光器发射激光脉冲后,可以与大气中的气溶胶及各种成分发生作用产生后向散射信号,该信号包含了气溶胶的类型及剖面信息。基于多学科对全球气溶胶成分、光学特性廓线等信息的迫切需求,近年来科研人员对 Mie 散射激光雷达的开发和在轨应用做了大量的工作。2003 年,全球首颗激光测高卫星 ICESat 升空,其搭载的地球科学激光测高系统 (GLAS) 可获取 532 nm 和 1064 nm 两个波长的回波信号,其中 532 nm 通道被用于云和气溶胶的垂直分布研究<sup>[4-5]</sup>,为星载对地气溶胶廓线探测技术的发展提供了许多可借鉴的经验。2006 年,美国航天局发射了云-气溶胶激光雷达与红外探路者卫星 (CALIPSO),其搭载的正交偏振云-气溶胶激光雷达 (CALIOP) 可实现 1064 nm 及 532 nm 垂直和平行偏振信息的探测,被用于气溶胶的后向散射系数、消光系数、粒子去偏振比和色比等参数信息的获取<sup>[6-7]</sup>。鉴于星载激光雷达在气溶胶探测中的优势和发展前景,我国于 2022 年先后发射了大气环境监测卫星<sup>[8]</sup>和陆地碳监测卫星<sup>[9]</sup>,它们分别搭载了大气探测激光雷达和多波束激光雷达,均具有 532 nm 垂直和平行偏振通道及 1064 nm 通道,为未来我国乃至全球的气溶胶监测提供了重要支持。

由于大气气溶胶物理化学特性复杂且成分多样,从激光雷达后向散射回波信号中反演气溶胶消光特性是一个较为复杂的过程。当前最为常用的星载大气激光雷达信号反演气溶胶消光系数廓线的方法为 Fernald<sup>[10-11]</sup>法,其特点在于考虑了大气分子和气溶胶粒子两种组分的粒子对光的散射。由于 Mie 散射激光雷达方程中存在大气气溶胶的消光系数和后向散射系数两个未知数,在求解方程时需假设消光-后向散射比 (也称为激光雷达比),这是反演结果中误差的主要来源<sup>[12]</sup>。为了提高气溶胶消光系数廓线的反演精度,研究人员开展了大量激光雷达比的优化评估工作。如

Welton 等<sup>[13]</sup>以同步观测的气溶胶光学厚度作为约束条件,实现了气溶胶激光雷达比的动态调整,优化了气溶胶消光系数廓线的反演结果;包青等<sup>[14]</sup>将激光雷达比与污染物及气象数据进行回归分析,利用动态估算的激光雷达比反演气溶胶特性参数。此外,随着偏振激光雷达的出现,其特殊的退偏比信息在研究云和气溶胶的粒子形状方面得到了突出的应用,有助于估计气溶胶类型和相应的激光雷达比<sup>[15-17]</sup>,也为气溶胶消光系数反演精度的提升提供了助力。然而这些方法中激光雷达比的优化均需其他观测信息的支持。不同气溶胶的复折射指数具有特异性,同时随波长发生变化,且根据 Mie 散射理论可知,气溶胶的消光特性和后向散射特性均为入射光波长、气溶胶粒谱分布及复折射指数的函数,不同类型气溶胶在不同波长上的光学特性存在特定的相关性,即气溶胶光学特性对波长的依赖性<sup>[18]</sup>。基于该特性,Sasano 等<sup>[19]</sup>证明了多波长激光雷达在区分海洋、大陆及沙尘气溶胶等几种气溶胶类型方面的能力。因此,本研究提出了一种新的解决思路,考虑到激光雷达双通道数据对应同一激光探测路径的气溶胶信息,联合现有星载激光雷达在 532 nm 和 1064 nm 通道的观测信号,构建气溶胶类型、含量与光学特性在双通道中的相关模型,以此为约束对粒子类型组成进行识别,在无其他同步观测信息支持下实现激光雷达比的评估优化,提升气溶胶消光系数廓线精度。以内蒙古包头地区为研究区域,分析气溶胶组成的季节变化特征,以不同季节的气溶胶信息作为背景场构建了反演模型并对模型精度进行了分析,最后评估了该方法在 CALIOP 传感器数据中的应用潜力。

## 2 实验数据与方法

### 2.1 方法

#### 2.1.1 正向模型

正向模型的建立是气溶胶反演过程的核心部分之一<sup>[20]</sup>,具体包括两个步骤:首先,基于 Mie 散射理论,根据气溶胶的质量廓线信息模拟气溶胶消光系数等光学特性参数;其次,采用 Mie 散射激光雷达方程,对星载激光雷达的后向散射回波信号进行仿真。

#### 1) 气溶胶光学特性的模拟

气溶胶对光的吸收和散射能力由气溶胶类型、尺度参数和复折射指数决定。通过 Mie 散射理论<sup>[21-22]</sup>计算获取气溶胶粒子的消光效率 ( $Q_{i,ext}$ ) 和后向散射效率因子 ( $Q_{i,back}$ ) 后,气溶胶消光系数 ( $\sigma_{a,i}$ ) 和气溶胶后向散射系数 ( $\beta_{a,i}$ ) 可以表示为

$$\sigma_{a,i,fwd} = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{i,ext}(m_i, r, \lambda) n_i(r) dr, \quad (1)$$

$$\beta_{a,i,\text{fwd}} = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{i,\text{back}}(m_i, r, \lambda) n_i(r) dr, \quad (2)$$

式中： $i$ 为气溶胶的类型； $r$ 为粒子半径； $r_1$ 、 $r_2$ 分别为气溶胶粒子的最小和最大半径，本文中分别取  $0.005 \mu\text{m}$  和  $20 \mu\text{m}$ ； $m$ 为粒子的复折射指数； $\lambda$ 为入射光波长； $n(r)$ 为气溶胶的数浓度谱分布。

利用对数正态分布函数来描述气溶胶粒子的数浓度谱分布，表示为

$$n_i(r) = \frac{dN_i(r)}{dr} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} \ln \delta_i} \frac{1}{r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{\text{mod},i})^2}{2 \ln^2 \delta_i}\right], \quad (3)$$

式中： $r_{\text{mod},i}$ 为气溶胶数浓度谱分布的中值半径； $\delta_i$ 为  $r_{\text{mod},i}$ 的标准差； $N_i$ 表示类型为  $i$ 的气溶胶粒子数密度，可根据各气溶胶类型密度  $\rho_{a,i}$ 及标准大气层的密度  $\rho_m$ ，由该类型气溶胶的质量廓线  $x_{a,i}$ 计算得出，公式为  $N_i = 4\pi r^3 \cdot x_{a,i} \cdot \rho_m / 3\rho_{a,i}$ 。

对于混合态的气溶胶，基于多种气溶胶组分的质量混合比廓线  $x_{a,i}$ ，其消光系数和后向散射系数<sup>[18,23]</sup>可近似表示为

$$\sigma_a = \sum_{i=1}^n \sigma_{a,i} = \sum_{i=1}^n \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{i,\text{ext}}(m_i, r, \lambda) n_i(x_{a,i}, r) dr, \quad (4)$$

$$\beta_a = \sum_{i=1}^n \beta_{a,i} = \sum_{i=1}^n \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{i,\text{back}}(m_i, r, \lambda) n_i(x_{a,i}, r) dr. \quad (5)$$

基于气溶胶的消光系数和后向散射系数在垂直方向上的积分结果，可计算获取气溶胶的消光-后向散射比(激光雷达比) $S_a$ 。

## 2) 激光雷达后向散射信号模拟

基于Mie散射激光雷达方程仿真计算星载激光雷达探测气溶胶的后向散射信号。Mie散射激光雷达方程<sup>[11,24]</sup>可以表示为

$$P(R) = \frac{1}{R^2} E_0 \xi [\beta_m(R) + \beta_a(R)] T_m^2(0, R) T_a^2(0, R), \quad (6)$$

式中： $R$ 为雷达探测距离； $E_0$ 为激光脉冲能量； $\xi$ 为激光雷达系统参数，其值可由  $\xi = G_A C$  计算得出，其中  $G_A$ 为放大器增益系数， $C$ 为雷达校准参数； $\beta_m(R)$ 为大气分子的后向散射系数； $\beta_a(R)$ 为气溶胶后向散射系数； $T_m^2$ 为  $R$ 范围内的大气双程透过率曲线，可以写为

$$T_m^2(0, R) = \exp\left[-2 \int_0^R \sigma_m(R') dR'\right], \quad (7)$$

式中， $\sigma_m(R) = S_m \beta_m(R)$ ，是大气分子的消光系数，其中， $S_m$ 为大气分子的激光雷达比，其值为  $8\pi/3$ <sup>[25]</sup>。式(6)中， $T_a^2$ 为气溶胶粒子的双程透过率，表示为

$$T_a^2(0, R) = \exp\left[-2 \int_0^R \sigma_a(R') dR'\right] = \exp[-2\tau_a(0, R)], \quad (8)$$

式中， $\tau_a(0, R)$ 为  $R$ 范围内的气溶胶光学厚度(AOD)。

## 2.1.2 反演算法

一般来说，真实大气环境中的气溶胶是多种不同类型气溶胶的混合物，包括沙尘型气溶胶、有机物气溶胶、硫酸盐气溶胶、黑碳气溶胶和海盐气溶胶等。由于气候、地球活动、地表环境、人类活动等差异，地区之间的气溶胶组成也各不相同。不同类型的气溶胶具有特有的尺寸分布特征和复折射指数，这意味着可以根据多波长激光雷达观察到的波长依赖性来区分气溶胶类型。考虑到当前星载激光雷达多为双通道观测，因此假设大气中含量较低的气溶胶类型的光学效应可以被忽略，仅针对两种主导气溶胶构建反演模型。

该模型首先根据先验信息对气溶胶的成分组成进行预估，其先验信息来源于局地区域的多年观测资料。依据该先验得到对应的气溶胶激光雷达比后，采用Fernald法反演双通道的气溶胶消光系数廓线和光学厚度。其次，在正向模式的支持下，利用气溶胶光学厚度信息，反演得到两个通道的气溶胶质量柱总量信息。理论上，同一激光探测路径具有相同的气溶胶成分组成，但其对应的两个波长的光学特性存在差异。反过来说，尽管两通道的光学特性不同，但其独立得到的气溶胶成分组成应是相同的。不过，在反演过程中，由于气溶胶组成及其对应的激光雷达比与实际情况存在偏差，因此一般而言两通道独立反演的气溶胶质量柱总量信息存在差异。最后，以双通道中气溶胶质量柱总量差异作为约束，进而实现整体的迭代反演，对气溶胶组成信息和激光雷达比进行优化，以达到提升气溶胶消光系数反演精度的目的。具体的算法流程如图1所示，其中： $c_a^{\text{type1}}$ 和  $c_a^{\text{type2}}$ 分别为两种不同类型气溶胶的质量柱总量； $c_a$ 为两种类型气溶胶质量柱总量之和； $x_a^{\text{type1}}$ 和  $x_a^{\text{type2}}$ 分别为两种不同类型气溶胶的质量廓线； $x_a$ 为两种类型气溶胶质量廓线之和。

接下来详细介绍算法的具体流程和迭代步骤。

首先基于激光雷达信号对应的背景场信息根据正向模型计算获得  $532 \text{ nm}$  和  $1064 \text{ nm}$  通道的初始气溶胶激光雷达比。将其应用于Fernald方法中，从激光雷达的后向散射信号中反演获取双通道的气溶胶消光系数  $\sigma_{a,\text{chl}}$  ( $i=1$ 表示  $532 \text{ nm}$  通道， $i=2$ 表示  $1064 \text{ nm}$  通道)。Fernald方法分别处理分子散射和气溶胶散射两种分量对激光雷达回波信号的贡献，是目前应用最广泛的从激光雷达观测中获取气溶胶消光廓线的方法<sup>[11]</sup>。考虑到星载激光雷达系统的特点，选择Fernald前向积分法反演气溶胶消光系数，激光雷达探测距离为  $R$  的高度层的消光系数  $\sigma_{a,\text{chl}}$  可以表示为

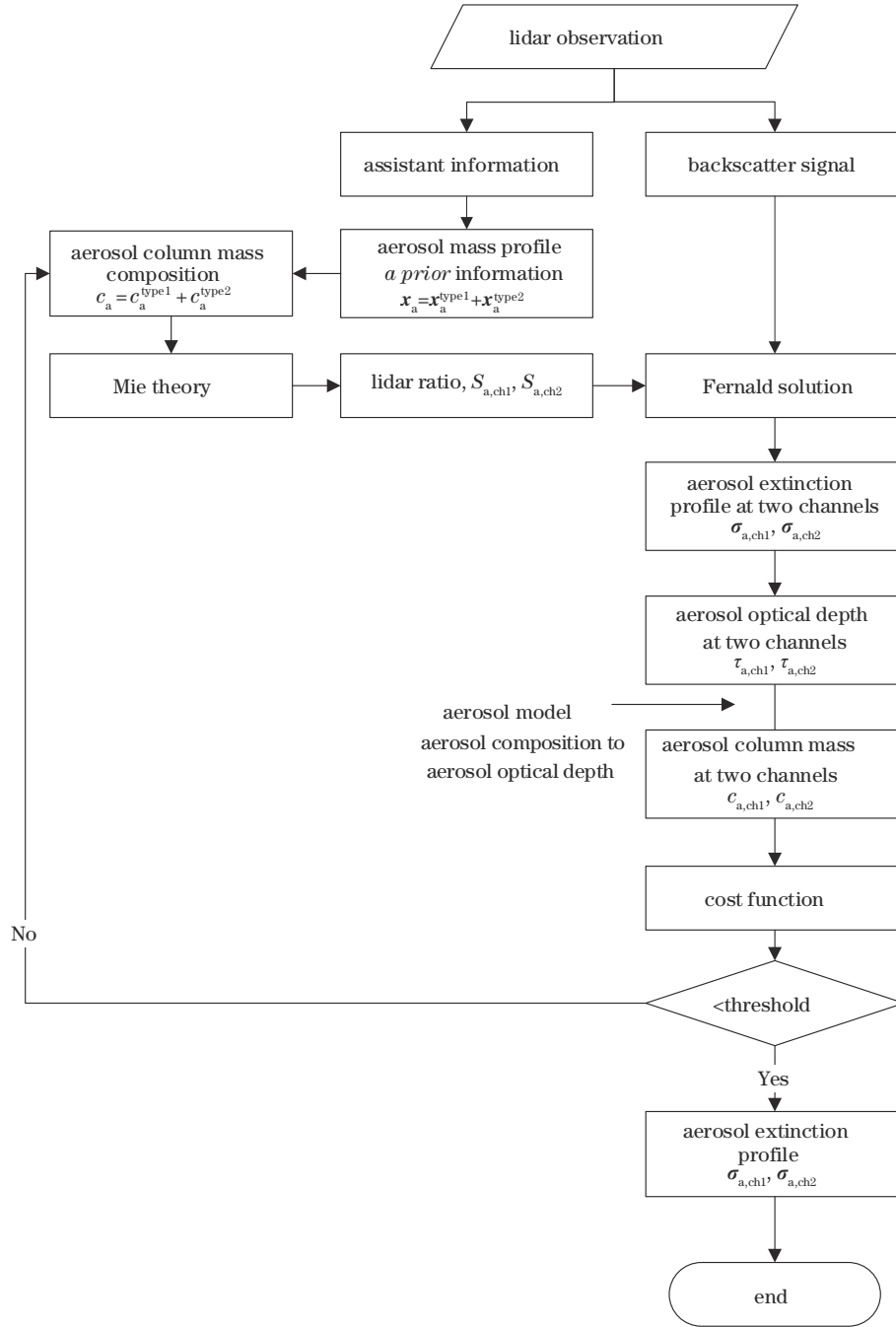


图 1 两种类型气溶胶迭代反演算法流程图  
Fig. 1 Flow chart of the two-type aerosol retrieval algorithm

$$\sigma_{a,chi}(R) = -\frac{S_{a,chi}}{S_{m,chi}}\sigma_{m,chi}(R) + X_{chi}(R) \cdot \exp\left[-2\left(S_{a,chi}/S_{m,chi} - 1\right)\int_{R_t}^R \sigma_{m,chi}(R')dR'\right], \quad (9)$$

$$\left\{ X_{chi}(R_t) \left[ \sigma_{a,chi}(R_t) + S_{a,chi}\sigma_{m,chi}(R_t)/S_{m,chi} \right] - 2 \int_{R_t}^R X_{chi}(R') \exp\left[-2\left(S_{a,chi}/S_{m,chi} - 1\right)\int_{R_t}^{R'} \sigma_{m,chi}(R'')dR''\right] dR' \right\}$$

式中： $S_{a,chi}$ 、 $S_{m,chi}$  分别为气溶胶粒子和大气分子在通道  $chi$  上的激光雷达比； $\sigma_{m,chi}$  为大气分子消光系数； $X(R) = P(R) \cdot R^2$ ； $R_t$  为边界高度； $\sigma_a(R_t)$  是该边界高度上的气溶胶消光系数。

基于反演的消光系数廓线，计算获取对应波长的气溶胶光学厚度：

$$\tau_{a,chi}(0, R) = \int_0^R \sigma_{a,chi}(R')dR'. \quad (10)$$

其次,结合已构建的气溶胶光学厚度与气溶胶成分组成信息的关系,获取双通道中气溶胶质量柱总量,分别为  $c_{a,chl}$  和  $c_{a,ch2}$ 。气溶胶光学厚度和气溶胶成分组成信息的关系构建主要基于正向模型,该关系模型可以表示为

$$\tau_{a,chr} = f_1(c_{a,chr}^{type1}) + f_2(c_{a,chr}^{type2}), \quad (11)$$

式中:  $f_1$  和  $f_2$  为两种类型气溶胶的光学厚度与其对应质量柱总量之间的函数关系;  $c_{a,chr}^{type1}$  和  $c_{a,chr}^{type2}$  分别为大气中占比较大的两种气溶胶类型(下文中称为主导气溶胶)的质量柱总量信息。为了对模型进行简化,忽略气溶胶的多重散射效应。

最后,考虑到两个通道的激光雷达观测数据对应相同的气溶胶质量柱总量,将两通道中气溶胶质量柱总量差异与两通道气溶胶质量柱总量平均值之比作为代价函数,具体表示为

$$\frac{\|c_{a,chl} - c_{a,ch2}\|_2}{(c_{a,chl} + c_{a,ch2})/2} \quad (12)$$

基于代价函数,可以在迭代过程中逐渐实现气溶胶成分比例、气溶胶激光雷达比的优化。当代价函数大于阈值时,假设的气溶胶质量柱总量和成分组成与实际差别较大,此时需基于式(11)更新气溶胶质量柱总量信息,同时通过比较 Mie 散射和 Fernald 分别获取的气溶胶光学厚度信息调整主导气溶胶的成分比例。基于正向模型,利用更新后的气溶胶质量柱总量和混合比例计算更新后的激光雷达比,进行下一轮的迭代。当代价函数小于阈值时,认为已经获取到气溶胶质量柱总量和成分比例的最大似然估计值,结束迭代。此时两个通道内的气溶胶质量柱总量间的差异可以忽略不计。基于气溶胶的类型评估结果获得激光雷达比后,即可代入到 Fernald 反演模型中获取最佳的气溶胶消光系数廓线结果。在该过程中,分别考察了阈值为 0.02, 0.10, 0.20, 0.30 对气溶胶消光系数廓线反演精

度的影响。结果显示:当阈值设为 0.02 或 0.10 时,很多数据会出现迭代次数过多的情况;当该值设置为 0.30 时,迭代过快,且迭代结果精度提升不明显。因此,选用阈值 0.20。

## 2.2 实验数据

### 2.2.1 背景场数据收集与分析

局地气溶胶背景场信息是星载激光雷达信号仿真的基础,可为气溶胶消光系数廓线反演模型的建立提供先验知识。选取内蒙古包头地区( $40^\circ\text{N}\sim 41^\circ\text{N}$ 、 $109^\circ\text{E}\sim 110^\circ\text{E}$ )作为研究区域,所使用的实验数据为 2011~2020 年沙尘、海盐、硫酸盐、有机物和黑碳 5 种类型气溶胶的质量混合比廓线和光学厚度数据。其中,不同类型气溶胶的质量混合比廓线为不同高度层上该类型气溶胶质量与该层大气总质量的比,单位为 kg/kg。数据集从欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的大气成分再分析数据库(EAC4)<sup>[26-27]</sup>中下载,其时间分辨率为 3 h,空间分辨率为  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ,在垂直方向上有 60 个分层。同时,在 AERONET 网站下载了布设在研究区域内太阳光度计的 Level 1.5 气溶胶观测信息,以对再分析数据提供的气溶胶信息进行补充。该站点位于北纬  $40.852^\circ$ 、东经  $109.629^\circ$ ,下载的数据时间范围为设备布设起(2013 年)至 2020 年。由于该地区 2 月份天气寒冷,设备处于维护状态,因此 2013~2020 年未有该月份的有效观测数据。

根据下载的数据,对内蒙古包头地区 2011~2020 年的气溶胶组成和空间分布进行了分析。首先基于沙尘、硫酸盐、有机物、黑碳、海盐气溶胶的质量混合比廓线数据求解相应的气溶胶月平均柱总量,其在 10 年间的变化趋势如图 2 所示。可以明显看出,沙尘、硫酸盐和有机物气溶胶是研究区域内最主要的气溶胶类型,三者相加占气溶胶总量的 80% 以上。与其他气溶胶相比,沙尘型气溶胶的含量相对较高,尤其在春季

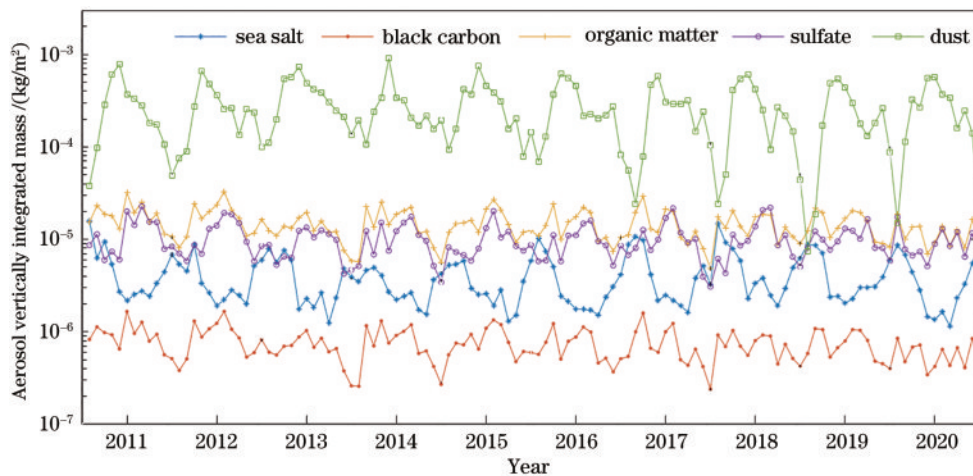


图2 2011~2020年内蒙古包头区域5种类型气溶胶的月平均柱总量

Fig. 2 Monthly mean vertically integrated mass of five types aerosol in the study area of Baotou, Inner Mongolia, China, through 2011 to 2020 period

(3~5月),这可以归因于当地在该季节的大风天气<sup>[28-29]</sup>。硫酸盐和有机物气溶胶的含量在春末有所增加,并在夏季达到高峰,这是由于来自华南和华东的季风带来了SO<sub>2</sub>和有机化合物,它们是硫酸盐和有机物气溶胶的前驱体<sup>[30]</sup>。此外,随着春夏季节空气中水分的增加,硫酸盐和有机物气溶胶等气溶胶颗粒吸收大气中的水分而膨胀<sup>[28]</sup>,这在一定程度上提升了其光学厚度。值得注意的是,近年来该地区的硫酸盐气溶胶的柱总量有上升的趋势。

基于再分析数据库提供的研究区域不同类型气溶胶的光学厚度数据,表1进一步展示了2011~2020年5种类型的气溶胶在550 nm处光学厚度的逐月变化情况。

结果表明,在大多数月份中,与其他气溶胶相比,沙尘型气溶胶的月平均光学厚度更高,尤其在春季,这和图2中该类型气溶胶在春季的高月平均柱总量相吻合。与气溶胶柱总量结果不同的是,在多数情况下,硫酸盐气溶胶的AOD比有机物气溶胶高,这是由于硫酸盐气溶胶在550 nm处具有更强的散射能力。基于研究区内架设太阳光度计(CE318)的AOD观测数据,获得该地区550 nm波长处的气溶胶月平均光学厚度,如表1所示。该数据在全年范围的变化趋势与再分析资料相一致,但是从整体看来,再分析数据的月平均气溶胶光学厚度值相对偏高,这是由于太阳光度计的观测受到太阳和天气的影响,仅能反映晴朗少云的白天时段的气溶胶光学信息。

从研究区域气溶胶背景场的统计结果可以看出,沙尘型气溶胶是研究区域最为主要的气溶胶类型,同时硫酸盐气溶胶散射能力强且近年来含量增加趋势明显。因此,在分析模型在包头地区的适用性时,以沙尘

表1 2011~2020年内蒙古包头研究区域550 nm处的月平均气溶胶光学厚度

Table 1 Monthly mean aerosol optical depth at 550 nm in the study area of Baotou, Inner Mongolia, China, through 2011 to 2020 Period

AOD@550 nm	Source	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.
Dust	EAC4	0.05	0.07	0.20	0.30	0.37	0.26
Sea salt	EAC4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Black carbon	EAC4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Organic matter	EAC4	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05	0.08
Sulfate	EAC4	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.09
Total	EAC4	0.16	0.21	0.34	0.41	0.48	0.44
	CE318	0.17	—	0.26	0.26	0.22	0.20
AOD@550 nm	Source	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Dust	EAC4	0.18	0.15	0.13	0.13	0.13	0.07
Sea salt	EAC4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Black carbon	EAC4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Organic matter	EAC4	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04
Sulfate	EAC4	0.11	0.11	0.09	0.07	0.05	0.04
Total	EAC4	0.39	0.34	0.28	0.26	0.24	0.16
	CE318	0.27	0.23	0.16	0.19	0.19	0.14

型气溶胶和硫酸盐型气溶胶为主要研究对象,同时考虑到气溶胶的成分变化具有较强的季节特征,后续的研究将针对春夏秋冬4个季节的背景场展开。

2.2.2 星上观测数据模拟

利用上述正向模型进行双通道激光雷达信号的仿真模拟。图3展示了2020年3月20日内蒙古包头区域沙尘和硫酸盐气溶胶质量混合比廓线的再分析数据、模拟的气溶胶消光系数和激光雷达后向散射信号实例。

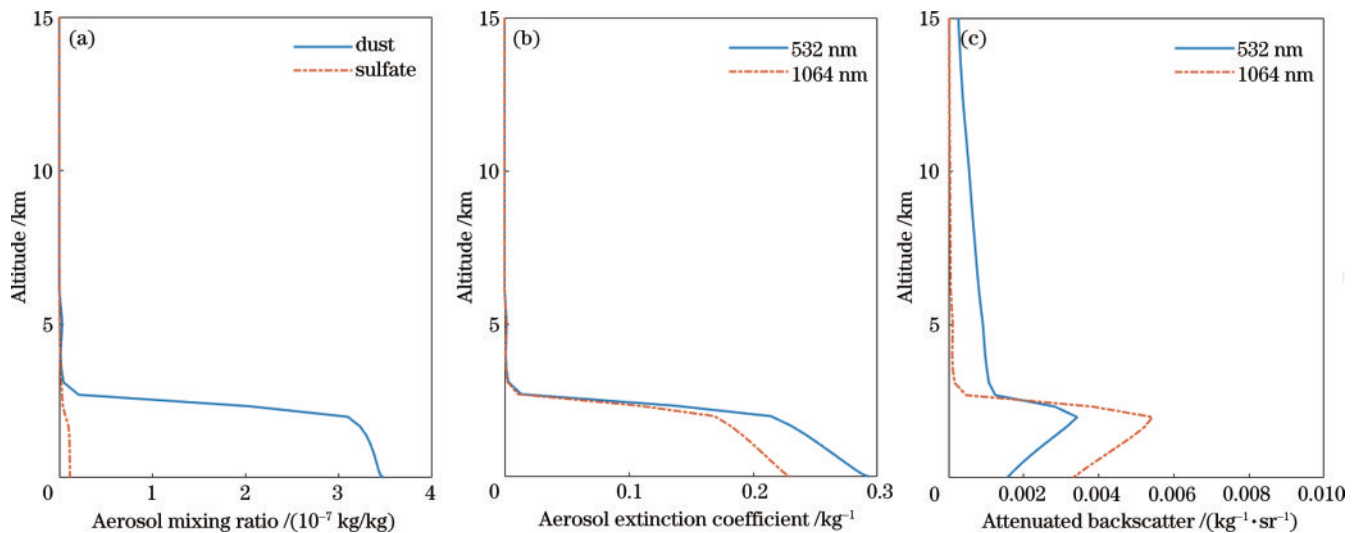


图3 2020年3月20日内蒙古包头地区沙尘和硫酸盐气溶胶的再分析数据与双通道激光雷达信号模拟数据。(a)质量混合比廓线;(b)模拟的气溶胶消光系数;(c)模拟的激光雷达后向散射信号  
Fig. 3 Reanalysis of dust and sulfate aerosols and simulation data dual-channel lidar signal on March 20, 2020, in Baotou, Inner Mongolia, China. (a) Mass profiles; (b) simulated aerosol extinction coefficients; (c) simulated lidar backscatter signals

### 2.2.3 天上观测数据

CALIOP 提供了迄今为止最完整的全球气溶胶垂直结构观测数据,目前已经产生了一个庞大的高质量数据集。将所提反演模型应用到 CALIOP Level 1B Version 4.1 产品的 532 nm 和 1064 nm 衰减后向散射系数中,并利用相应的 Level 2 5-km 气溶胶廓线产品对反演结果进行验证。考虑到 CALIOP 数据在光照条件下会受到太阳光的影响,为确保数据的可靠性,选

用的验证数据为 CALIOP 夜间观测数据。同时,为了弱化卫星观测数据与所提模型背景场的时空差异,所选同步数据的时间差在 1 h 以内,经纬度差在  $0.15^\circ$  以内,距离差在 15 km 以内。基于以上原则,筛选了两个夜间探测的 CALIOP 数据(图 4)开展相应的模型验证工作,数据的探测时间分别为:世界标准时间(UTC)2016 年 9 月 13 日 18:44:58 和 2018 年 5 月 30 日 18:50:58。

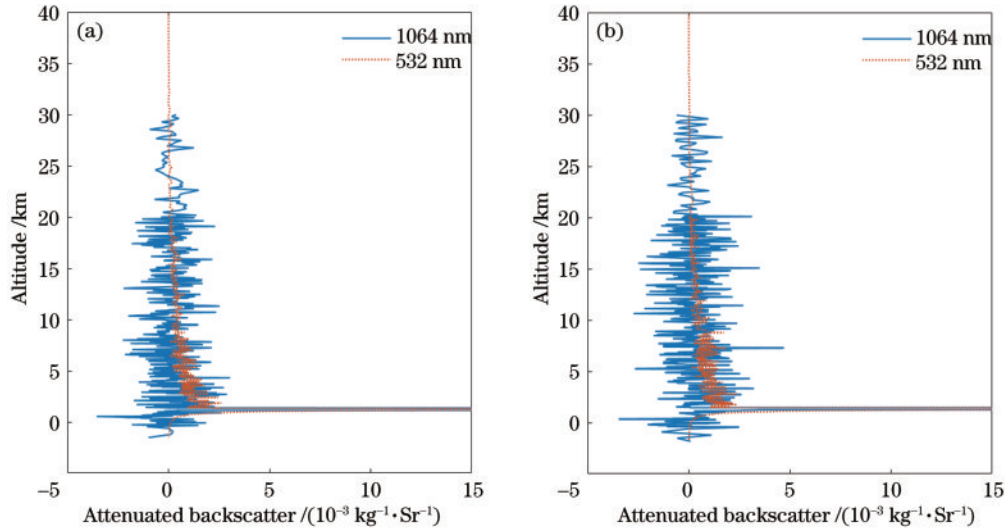


图 4 CALIOP 传感器 532 nm 和 1064 nm 通道的衰减后向散射系数廓线。(a) 2016 年 9 月 13 日; (b) 2018 年 5 月 30 日

Fig. 4 Attenuated backscatter coefficient profiles for 532 nm and 1064 nm channels of the CALIOP sensor. (a) September 13, 2016; (b) May 30, 2018.

## 3 结 果

### 3.1 气溶胶消光系数反演模型精度评估

将上述构建的气溶胶消光廓线反演模型应用到基于研究区域再分析气溶胶成分信息的双通道激光雷达信号仿真数据中,对反演过程中优化的气溶胶成分比例、激光雷达比及反演获得的气溶胶消光系数结果进行评估。为了说明所提方法的优越性,选用经典的 Fernald 法作为对照,对照组所用的激光雷达比根据背景场的气溶胶成分信息对应的经验值确定,将该方法称为经验法(empirical method)。

使用均方根误差(RMSE)来评估模型获得的各参数精度,计算公式为

$$R_{\sigma_a} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{a, \text{ret}} - \sigma_{a, \text{true}})^2}, \quad (13)$$

$$R_{\tau_a} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tau_{a, \text{ret}} - \tau_{a, \text{true}})^2}, \quad (14)$$

$$R_{x_p} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{p, \text{ret}} - x_{p, \text{true}})^2}, \quad (15)$$

式中: $N$ 为样本数;激光雷达信号仿真时使用的气溶胶消光系数廓线  $\sigma_a$  及其对应的光学厚度  $\tau_a$  被作为真实值,用下标“true”表示;气溶胶成分比例  $x_{p, \text{true}}$  基于已构

建的背景场成分数据计算,其定义为沙尘型气溶胶的柱总量与沙尘和硫酸盐气溶胶柱总量和的比值;下标“ret”则表示所提反演算法的气溶胶结果数据。

#### 3.1.1 气溶胶成分比例和激光雷达比优化评估

所提反演模型主要利用双通道观测信息的约束实现气溶胶成分比例的优化,并基于 Mie 散射理论计算出更贴近实际的激光雷达比。表 2 首先比较了所提反演模型中优化的气溶胶成分比例与经验方法中激光雷达比对应的气溶胶成分比例。结果表明,在以 4 个季节大气信息分别构建的反演模型中,所提算法获取的气溶胶成分比例精度均优于经验估计对应的气溶胶成分比例,模型精度平均提升了 4.64%。

进一步基于气溶胶的成分比例信息计算反演模型所需的激光雷达比。考虑到 532 nm 波段对气溶胶激光雷达比的变化更为敏感<sup>[31]</sup>,对反演模型中不同季节在 532 nm 波长上的气溶胶激光雷达比进行分析。由于气溶胶成分比例存在季节性差异,春夏秋冬 4 个季节中 532 nm 波长上气溶胶的激光雷达比分别在 50, 44, 41, 30 Sr 左右浮动。进一步比较了不同季节模型中 532 nm 波长上所提方法和经验法所得激光雷达比与真值之间的偏差,结果如表 3 所示。结果表明,所提方法获取的激光雷达比的偏差在各个季节均小于经验法选取的激光雷达比的偏差。从整体看来,所提方法

表 2 不同模型在包头地区的气溶胶混合比例精度分析结果

Table 2 Accuracy of aerosol proportion for different retrieval models in Baotou region

Aerosol proportion	Method	Spring	Summer	Autumn	Winter
RMSE	Empirical estimated	0.17	0.12	0.23	0.35
	Proposed method	0.16	0.11	0.22	0.35
Accuracy improvement / %	—	5.88	8.33	4.35	0

表 3 532 nm 波长下获取的气溶胶激光雷达比精度分析

Table 3 Accuracy of aerosol lidar ratio obtained at wavelength of 532 nm

	Method	Spring	Summer	Autumn	Winter
Bias of lidar ratio / Sr	Empirical method	11.6	9.7	5.2	3.0
	Proposed method	8.4	7.3	4.1	2.9

所得激光雷达比与真值之间的平均偏差为 5.7 Sr, 而经验法所得激光雷达比的平均偏差为 7.4 Sr。相比于经验法, 所提反演模型可以有效优化气溶胶激光雷达比的评估。

3.1.2 气溶胶消光系数反演结果精度评估

图 5 和图 6 分别展示了 532 nm 和 1064 nm 波长下气溶胶消光系数廓线的模型反演精度。考虑到气溶胶主要分布在近地表的大气层, 因此模型在地表附近区域反演的气溶胶消光系数的精度较差。图 5 中 532 nm 通道对应的廓线反演结果表明, 相比于经验法, 所提反演方法在 4 个季节均可有效提升气溶胶消光系数的精

度。相比之下, 冬季提升效果较弱, 这与气溶胶成分比例和激光雷达比优化结果相一致。结合表 1 中包头地区 550 nm 处沙尘和硫酸盐气溶胶的月平均 AOD 水平, 表明所提方法对高 AOD 背景具有较大敏感性。在 1064 nm 通道也可以得到类似的结果, 但是由于 1064 nm 波段对激光雷达比的变化较为不敏感, 因此所提模型对该通道反演结果的优化效果相对不明显。

此外, 还对两种方法获取的 AOD 精度进行了分析, 结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 气溶胶的 AOD 反演精度提升效果与图 5 和图 6 中气溶胶消光系数廓线的反演精度表现一致。其中: 532 nm 通道

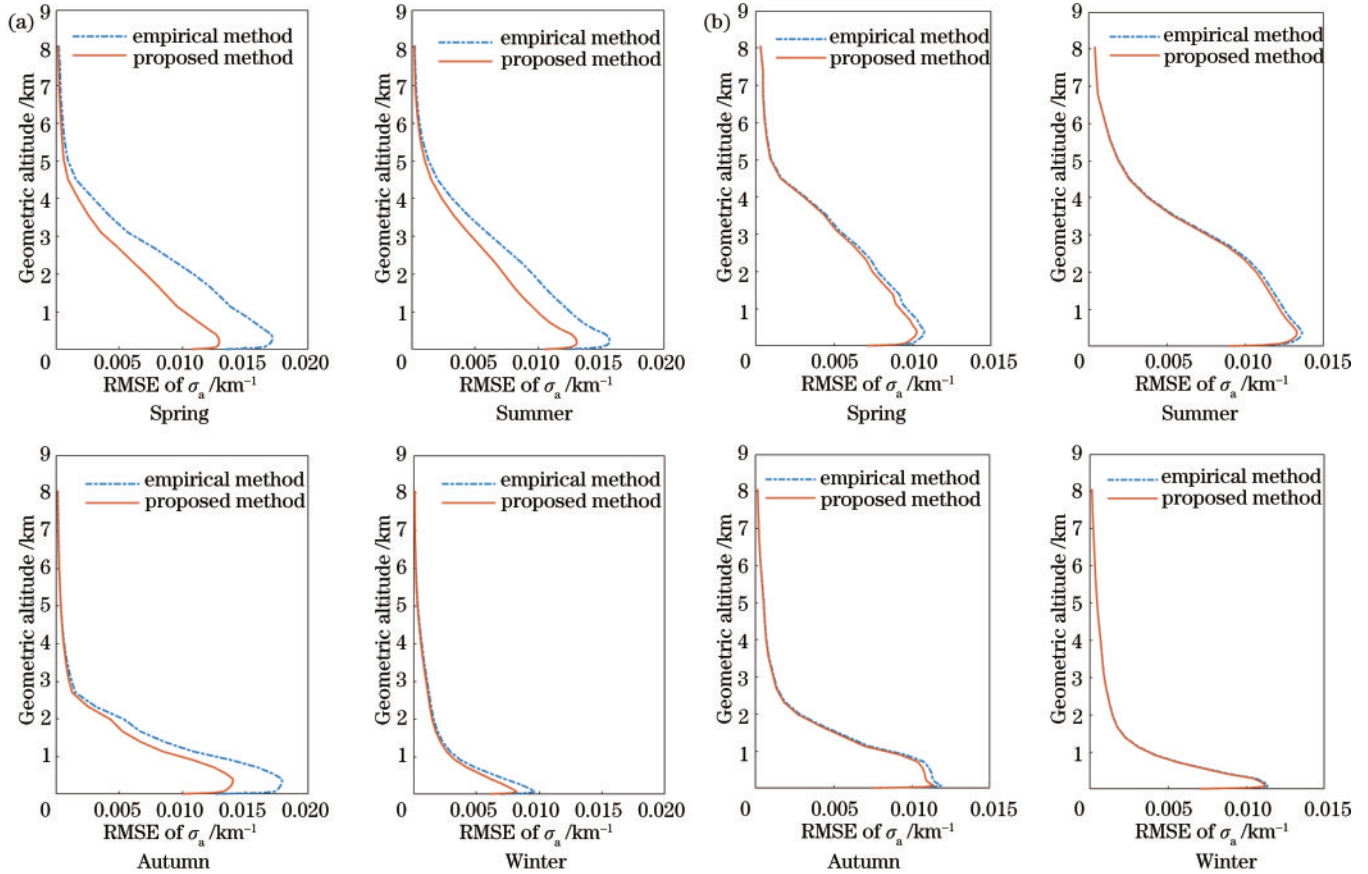


图 5 不同波长下四季的气溶胶消光系数廓线反演精度。(a)532 nm;(b)1064 nm

Fig. 5 Profile retrieval accuracy of aerosol extinction coefficients in four seasons at different wavelengths. (a) 532 nm; (b) 1064 nm



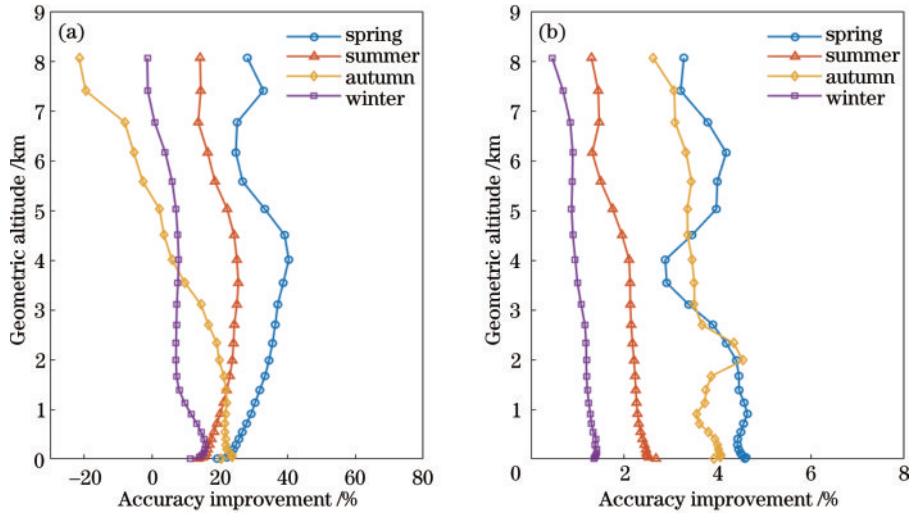


图 6 不同波长包头地区的气溶胶消光系数廓线反演精度提升效果。(a)532 nm;(b)1064 nm

Fig. 6 Accuracy improvement of profile retrieval of aerosol extinction coefficients in Baotou region at different wavelengths. (a) 532 nm; (b) 1064 nm

表 4 气溶胶反演模型在包头地区的 AOD 反演精度分析

Table 4 Analysis of AOD retrieval accuracy for the retrieval models in Baotou region

AOD	$\lambda$ /nm	Method	Spring	Summer	Autumn	Winter
RMSE	532	Empirical method	0.038	0.036	0.024	0.010
		Proposed method	0.026	0.028	0.019	0.009
Accuracy improvement / %		—	31.58	22.22	20.83	10.00
RMSE	1064	Empirical method	0.028	0.039	0.017	0.011
		Proposed method	0.027	0.038	0.016	0.011
Accuracy improvement / %		—	3.57	2.56	5.88	0

AOD 的反演精度平均提高了 21.16%，特别是在春季，气溶胶廓线的 AOD 反演精度提高了 31.58%；1064 nm 通道的改进最大达到 5.88%，平均提升 3.00%。

### 3.2 CALIOP 数据应用

进一步开展所提气溶胶消光系数廓线反演方法在 CALIOP 观测数据的应用，为降低噪声影响，反演前对 CALIOP 实测信号在空间范围内进行了平均，并在垂

直范围内进行了降噪处理，所得结果如图 7 所示。将结果与 CALIOP Level 2 中的气溶胶消光廓线产品进行比较，发现所提方法和经验方法得到的气溶胶消光系数均表现出与 CALIOP 产品之间较强的相关性。进一步对不同来源的气溶胶消光系数廓线在垂直方向上求积分，获得相应的气溶胶光学厚度，结果如表 5 所示。可以看出，相比于经验方法，所提算法获取的 AOD 与 CALIOP 产品更为接近。

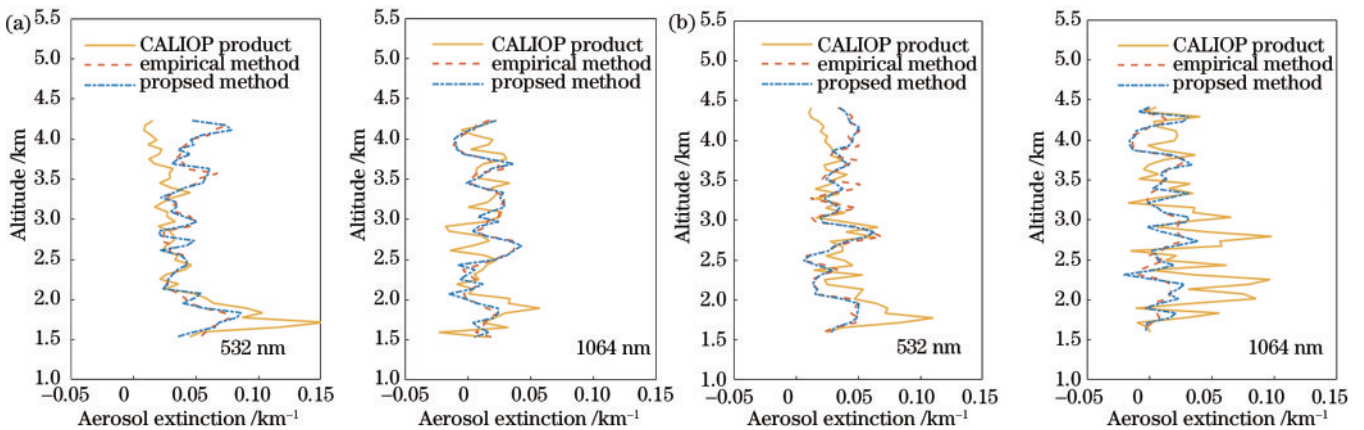


图 7 双通道气溶胶消光系数反演结果。(a)2016年9月13日;(b)2018年5月30日

Fig. 7 Profile retrieval results of the aerosol extinction coefficients at dual-wavelength. (a) September 13, 2016; (b) May 30, 2018

表 5 532 nm 处气溶胶光学厚度反演结果对比

Table 5 Comparison of retrieved results of aerosol optical depth at wavelength of 532 nm

Date	AOD@532 nm		
	CALIOP	Empirical method	Proposed method
2016-09-13	0.17	0.20	0.18
2018-05-30	0.14	0.13	0.14

## 4 结 论

提出了一种协同激光雷达双通道观测信息的气溶胶消光系数廓线反演策略。该方法基于 Mie 散射理论,挖掘了不同波长上气溶胶类型与其光学厚度之间的关系,基于激光雷达双通道信息构建约束,实现气溶胶的成分比例信息提取,以提高激光雷达比的估算精度,从而进一步优化了气溶胶消光系数廓线的反演效果。将所提反演模型分别在模拟数据和 CALIOP 实测数据中进行应用,验证了该算法的可行性和实用性。与基于经验估算的激光雷达比的反演结果相比,所提算法在 532 nm 和 1064 nm 通道的消光系数反演精度平均提高了 21.16% 和 3.00%。与 CALIOP 数据的初步对比结果也证实了该方法在星上观测数据上应用的可行性。

总体而言,所提算法可以在没有其他协同观测信息的支持下实现气溶胶激光雷达比的优化,有效提升气溶胶消光廓线的反演精度。同时,基于模拟信号的结果表明,该模型更适用于具有高 AOD 值的污染大气条件。虽然目前本模型在 CALIOP 数据中的应用具有较好的一致性,但是在将其应用于实际卫星数据处理之前,还应考虑以下几点问题:首先,所提算法忽略了有机物、黑碳等气溶胶的贡献,在实际应用时需适当对其进行修正;其次,本研究在星载激光雷达的后向散射信号仿真过程中只假设单次散射效应,没有考虑多次散射的影响;此外, Mie 理论基于球形粒子的假设给不规则粒子的光学特性计算带来了误差。后续的研究应考虑球形粒子假设的误差,或在正向模型中使用非球形气溶胶粒子的光学特性代替 Mie 散射计算。

## 参 考 文 献

- [1] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423-430.
- [2] Raut J C, Chazette P. Radiative budget in the presence of multi-layered aerosol structures in the framework of AMMA SOP-0[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(22): 6839-6864.
- [3] Zhang Z B, Meyer K, Yu H B, et al. Shortwave direct radiative effects of above-cloud aerosols over global oceans derived from 8 years of CALIOP and MODIS observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*,

2016, 16(5): 2877-2900.

- [4] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3/4): 405-445.
- [5] Lefsky M A, Harding D J, Keller M, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): L22S02.
- [6] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [7] 杨倩, 韩琛惠, 米晓楠, 等. CALIOP 激光探测的运城地区气溶胶垂直分布特征[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0228004.  
Yang Q, Han C H, Mi X N, et al. Characteristics of aerosol vertical distribution in Yuncheng area based on CALIOP[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0228004.
- [8] 李正强, 谢一淞, 石玉胜, 等. 大气环境卫星温室气体和气溶胶协同观测综述[J]. *遥感学报*, 2022, 26(5): 795-816.  
Li Z Q, Xie Y S, Shi Y S, et al. A review of collaborative remote sensing observation of greenhouse gases and aerosol with atmospheric environment satellites [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(5): 795-816.
- [9] 张新伟, 黄缙, 贺涛, 等. 陆地生态系统碳监测卫星总体设计[J]. *航天返回与遥感*, 2022, 43(6): 16-26.  
Zhang X W, Huang J, He T, et al. Overall Design of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(6): 16-26.
- [10] Fernald F G, Herman B M, Reagan J A. Determination of aerosol height distributions by lidar[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11(3): 482-489.
- [11] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [12] 张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.  
Zhang Z Y, Su L, Chen L F. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
- [13] Welton E J, Voss K J, Gordon H R, et al. Ground-based lidar measurements of aerosols during ACE-2: instrument description, results, and comparisons with other ground-based and airborne measurements[J]. *Tellus B*, 2000, 52(2): 636-651.
- [14] 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.  
Bao Q, He J L, Zha Y. Retrieval of aerosol extinction coefficient and optical thickness using varied lidar ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301002.
- [15] Groß S, Esselborn M, Weinzierl B, et al. Aerosol classification by airborne high spectral resolution lidar observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*,

- 2013, 13(5): 2487-2505.
- [16] Burton S P, Ferrare R A, Hostetler C A, et al. Aerosol classification using airborne High Spectral Resolution Lidar measurements-methodology and examples[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(1): 73-98.
- [17] Qi S Q, Huang Z W, Ma X J, et al. Classification of atmospheric aerosols and clouds by use of dual-polarization lidar measurements[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23461-23476.
- [18] Ackermann J. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(4): 1043-1050.
- [19] Sasano Y, Browell E V. Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(9): 1670-1679.
- [20] 廖淑君, 郜海阳, 寇蕾蕾, 等. 星载激光雷达探测云与气溶胶的仿真模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1028001.
- Liao S J, Gao H Y, Kou L L, et al. Simulation of cloud and aerosol detection based on spaceborne lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1028001.
- [21] Bhandari A, Hamre B, Frette Ø, et al. Modeling optical properties of human skin using Mie theory for particles with different size distributions and refractive indices[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14549-14567.
- [22] Grainger R G, Lucas J, Thomas G E, et al. Calculation of Mie derivatives[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(28): 5386-5393.
- [23] Dai B, Luo X, Chang H. Study on calculating method of aerosol extinction coefficients[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(1): 12-15.
- [24] Collis R T H, Russell P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[J]. *Laser Monitoring of the Atmosphere*, 1976: 71-151.
- [25] 张寅超, 陈粟, 檀望舒, 等. 以水云后向散射系数为边界值的激光雷达气溶胶后向散射系数反演方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(24): 2428002.
- Zhang Y C, Chen S, Tan W S, et al. Inversion algorithm of aerosol backscattering coefficient with water cloud particle backscattering coefficient as boundary value [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2428002.
- [26] Flemming J, Huijnen V, Arteta J, et al. Tropospheric chemistry in the integrated forecasting system of ECMWF[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(4): 975-1003.
- [27] Inness A, Ades M, Agustí-Panareda A, et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(6): 3515-3556.
- [28] 林泓锦, 都瓦拉, 玉山, 等. 基于 MODIS 的内蒙古气溶胶时空分布特征分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(12): 4573-4581.
- Lin H J, Du W L, Yu S, et al. Spatial-temporal characteristics of aerosol optical depth with MODIS data over Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12): 4573-4581.
- [29] 王天舒, 牛生杰. 内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与 PM<sub>10</sub>、能见度相关性分析[J]. *大气科学*, 2017, 41(1): 121-131.
- Wang T S, Niu S J. Dust aerosol scattering coefficient under three types of sand storm in eastern inner Mongolia in the spring and its correlations with PM<sub>10</sub> and visibility [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(1): 121-131.
- [30] Itahashi S, Uno I, Kim S. Source contributions of sulfate aerosol over East Asia estimated by CMAQ-DDM[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(12): 6733-6741.
- [31] Althausen D, Müller D, Ansmann A, et al. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(11): 1469-1482.