

# 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

张寅超<sup>1</sup>, 陈粟<sup>1</sup>, 檀望舒<sup>1\*</sup>, 陈思颖<sup>1</sup>, 陈和<sup>1</sup>, 郭磐<sup>1</sup>, 步志超<sup>2\*\*</sup>, 胡芮<sup>1</sup>, 徐清玥<sup>1</sup>, 郑熠泽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**摘要** 结合毫米波雷达和双波长激光雷达对水云粒子进行微物理特性和光学特性建模, 构建水云粒子有效半径与反射率因子-消光比、反射率因子-后向散射比的关系。通过假设参考高度处的云滴粒子有效半径和下一个距离门处的雷达比, 以双波长反演的有效粒子半径和后向散射系数反演误差为约束条件得到边界值处的后向散射系数。进而, 利用 Fernald 后向积分方法反演水云天气下的气溶胶后向散射系数廓线。仿真结果与所提方法处理后的粒子有效半径一致性系数为 0.98, 与双波长后向散射系数的一致性系数均为 0.81。实际处理结果表明, 所提方法能够改善水云天气下气溶胶反演的连续性, 得到相对准确的后向散射系数。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 毫米波雷达; 后向散射系数; 边界值

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2428002

## Inversion Algorithm of Aerosol Backscattering Coefficient with Water Cloud Particle Backscattering Coefficient as Boundary Value

Zhang Yinchao<sup>1</sup>, Chen Su<sup>1</sup>, Tan Wangshu<sup>1\*</sup>, Chen Siying<sup>1</sup>, Chen He<sup>1</sup>, Guo Pan<sup>1</sup>,  
Bu Zhichao<sup>2\*\*</sup>, Hu Rui<sup>1</sup>, Xu Qingyue<sup>1</sup>, Zheng Yize<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** We propose a millimeter-wave radar and dual-wavelength lidar combined model for the microphysical and optical properties of water cloud particles. On this basis, we build the relationships of the effective radius and reflectivity-extinction ratio, as well as reflectivity-backscattering ratio of water cloud particles. Assuming the effective radius of the cloud droplet at the reference height and the lidar ratio at the next range gate, we can obtain the backscattering coefficient at the boundary value using the effective radius and backscattering coefficient inversion errors by dual-wavelength as constraints. Moreover, we employ Fernald backward integration method for the inversion of the aerosol profiles under water cloud conditions. The correlation coefficient between the simulated effective radius and that after algorithm processing is 0.98, and the correlation coefficient of the dual-wavelength backscattering coefficient is 0.81. The case studies indicate that this method can give rise to better inversion continuity of aerosols under water cloud conditions and a relatively accurate backscattering coefficient.

**Key words** remote sensing; lidar; millimeter-wave radar; backscattering coefficient; boundary value

## 1 引言

大气气溶胶是大气的重要组成部分, 对大气辐射的散射、吸收, 以及云的形成和降水量均有显著影响, 因此气溶胶成为气候和环境等领域的一个研究热点。

激光雷达具有高时空分辨率、高探测精度、连续昼夜观测的特点, 已成为探测大气气溶胶的重要手段之一<sup>[1-3]</sup>。为了获得气溶胶的光学特性, 可以使用激光雷达反演气溶胶的后向散射系数。在反演过程中, 需要假设参考高度和参考高度处的边界值来反演后向散射

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-05-05

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M680369)、国家重点研发计划(2017YFC1501700)

通信作者: \*tanws@bit.edu.cn; \*\*buzhichao@163.com

系数廓线。当存在云层时,激光雷达信号会出现较大的衰减,导致其无法探测到高层大气中气溶胶含量较小的区域。此时,参考高度与边界值的合理选取成为正确反演气溶胶后向散射系数的关键。

为了解决上述问题,常用的传统激光雷达反演方法有固定散射比法<sup>[4]</sup>、斜率法<sup>[5]</sup>和迭代修正法<sup>[6]</sup>。固定散射比法是在某一气溶胶含量较少的区域假设气溶胶后向散射比为一定值,通常将 6~9 km 处的后向散射比假设为 1.02~1.05 并求取边界值。由于此区域气溶胶含量一般较低且随时间变化稳定,此时设定的边界值对气溶胶后向散射系数反演的影响较小,但是该算法会受到地面气溶胶源的影响,导致气溶胶分布具有较大的时空差异。斜率法是利用参考高度附近的一个小区间进行拟合来确定边界值,这种方法要求拟合区间内的气溶胶分布均匀,但是该条件一般难以满足。迭代修正法则是定义一个信号校正因子,利用透过率及各个高度上的消光系数不能小于 0 为约束条件,通过迭代修正校正因子以及透过率确定边界条件。但是该方法假设气溶胶消光系数与后向散射系数成幂指数关系,对实际大气情况的反演不准确。当存在云层时,大气气溶胶含量将产生显著的变化,利用上述 3 种方法反演后向散射系数均会产生极大的误差。

随着毫米波雷达与多波长激光雷达的发展,结合两者可以实现对水云后向散射系数、消光系数的探测,并将其作为气溶胶反演的后向散射系数边界值<sup>[7]</sup>。Donovan 等<sup>[8]</sup>提出结合毫米波雷达与单波长激光雷达获得云滴粒子有效半径和消光系数的方法,并通过假设参考高度附近处的粒子有效半径变化不大来限制反演该高度处的粒子有效半径。Tinel 等<sup>[9]</sup>则假设参考

高度附近的归一化云滴粒子数密度稳定,通过消光系数与毫米波经验公式的迭代反演,得到云滴粒子有效半径。毫米波雷达和单波长激光雷达结合的方法由于已知条件不够,都需要假设云滴粒子随高度变化的情况,但是实际大气中的云滴粒径和粒子数密度变化很大,这样的假设条件会导致探测过程中产生较大的误差。

本文通过毫米波雷达和双波长激光雷达信号重合区域的数据可以得到参考高度处的云滴粒子半径、后向散射系数和消光系数,进而直接用 Fernald 后向积分法对有云天气下的气溶胶进行反演,无需假设云滴粒子半径随高度的变化情况。

## 2 基本原理

### 2.1 Fernald 反演方法

激光雷达垂直发射的激光束通过大气时,由于受到大气气溶胶及大气分子的散射与消光作用,激光雷达接收的后向散射回波信号为

$$P(\lambda, z) = C \frac{\beta(\lambda, z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(\lambda, z') dz'\right], \quad (1)$$

式中:  $C$  为激光雷达仪器常数;  $\beta(\lambda, z) = \beta_a(\lambda, z) + \beta_m(\lambda, z)$ ,  $\beta_a(\lambda, z)$  和  $\beta_m(\lambda, z)$  分别为高度  $z$  处的大气气溶胶和大气分子的后向散射系数,  $\lambda$  为波长;  $\alpha(\lambda, z) = \alpha_a(\lambda, z) + \alpha_m(\lambda, z)$ ,  $\alpha_a(\lambda, z)$  和  $\alpha_m(\lambda, z)$  分别为大气气溶胶和大气分子的消光系数。

当已知参考高度  $z_m$  处的气溶胶后向散射系数边界值时, Fernald 方法给出  $z_m$  高度以下[后向积分公式]和  $z_m$  高度以上[前向积分公式]的气溶胶后向散射系数

$$\beta_{\text{backward}}(\lambda, z) = -\beta_m(\lambda, z) + \frac{P(\lambda, z) z^2 \exp\left\{2 \int_z^{z_m} [R_{L,a}(\lambda, z') - R_{L,m}] \beta_m(\lambda, z') dz'\right\}}{\frac{P(\lambda, z_m) z_m^2}{\beta_a(\lambda, z_m) + \beta_m(\lambda, z_m)} + 2 \int_z^{z_m} R_{L,a}(\lambda, z) P(\lambda, z) z^2 \exp\left\{2 \int_z^{z_m} [R_{L,a}(\lambda, z') - R_{L,m}] \beta_m(\lambda, z') dz'\right\} dz}, \quad (2)$$

$$\beta_{\text{forward}}(\lambda, z) = -\beta_m(\lambda, z) + \frac{P(\lambda, z) z^2 \exp\left\{-2 \int_z^{z_m} [R_{L,a}(\lambda, z') - R_{L,m}] \beta_m(\lambda, z') dz'\right\}}{\frac{P(\lambda, z_m) z_m^2}{\beta_a(\lambda, z_m) + \beta_m(\lambda, z_m)} - 2 \int_{z_m}^z R_{L,a}(\lambda, z) P(\lambda, z) z^2 \exp\left\{-2 \int_{z_m}^z [R_{L,a}(\lambda, z') - R_{L,m}] \beta_m(\lambda, z') dz'\right\} dz}, \quad (3)$$

式中:  $R_{L,a} = \alpha_a/\beta_a$  为气溶胶的雷达比,与气溶胶的谱分布和粒子成分等有关;  $R_{L,m}$  为大气分子的雷达比,本文使用大气模型的常数  $R_{L,m} = 8\pi/3$ , 对于 532 nm 波长的大陆气溶胶雷达比,通常设为常数 53 sr, 1064 nm 波长时则一般设为 30 sr<sup>[10]</sup>。

### 2.2 参考高度与边界值的确定方法

激光雷达和毫米波雷达具有共同探测水云的能力,但激光雷达对于云底的探测精度更高<sup>[11]</sup>。因此,本实验根据简单多尺度的方法<sup>[12]</sup>对激光雷达的云底位置进行探

测,当云底以上存在与毫米波雷达共同识别的区域,则认为这个重叠区域的最低点所在高度为参考高度  $z_m$ 。

为了获得参考高度处的后向散射系数,根据米散射理论,将水云粒子当作球形粒子,建立水云的微物理特性与光学特性模型,构建水云粒子有效半径与反射率因子-消光比、反射率因子-后向散射比的关系。

假设云滴谱分布  $n(D)$  为广义伽马分布,即

$$n(D) = \frac{N_{t, \text{gam}}}{\Gamma(v_{\text{gam}})} \left(\frac{D}{D_{n, \text{gam}}}\right)^{v_{\text{gam}}-1} \frac{1}{D_{n, \text{gam}}} \exp\left(\frac{-D}{D_{n, \text{gam}}}\right), \quad (4)$$

式中:  $D$  为粒子直径;  $N_{t, \text{gam}}$  为单位体积中的粒子数密度;  $v_{\text{gam}}$  为伽马分布的形状参数;  $\Gamma(\cdot)$  为伽马分布函数;  $D_{n, \text{gam}}$  为模式直径。代入实际观测的云滴粒子参数进行建模<sup>[13]</sup>, 粒子直径  $D$  的范围为  $0.5 \sim 200 \mu\text{m}$ ,  $N_{t, \text{gam}} = 288 \text{ cm}^{-3}$ ,  $v_{\text{gam}}$  的范围为  $0.7 \sim 23.9$ ,  $D_{n, \text{gam}}$  的范围为  $0.4 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 。

基于云滴谱的仿真模型, 可以得到云滴粒子的有效半径, 即

$$R'_{\text{eff}} = D'_{\text{eff}}/2 = \left( \frac{\int_0^{\infty} D^6 n(D) dD}{\int_0^{\infty} D^2 n(D) dD} \right)^{1/4} / 2, \quad (5)$$

式中:  $D'_{\text{eff}}$  为云滴粒子的有效直径。

由毫米波雷达可以获得雷达反射率因子  $Z$ :

$$Z = \int_0^{\infty} n(D) D^6 dD. \quad (6)$$

在已知云滴谱分布函数之后, 可通过米散射理论得到消光系数和后向散射系数, 即

$$\alpha = \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 n(D) dD, \quad (7)$$

$$\beta = \int_0^{\infty} Q_{\text{b}} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 n(D) dD, \quad (8)$$

式中:  $Q_{\text{ext}}$ 、 $Q_{\text{b}}$  分别为米散射消光效率因子和后向散射系数效率因子<sup>[14]</sup>。使用米散射计算时, 需要已知3个波长下的复折射指数。20 °C下 8.6 mm、1064 nm、532 nm 的复折射指数分别为  $5.25 - 2.81j$ 、 $1.33 - j(2.9 \times 10^{-6})$ 、 $1.32 - j(1.32 \times 10^{-9})$ <sup>[15-16]</sup>。

根据消光系数与后向散射系数的比值, 可以得到雷达比:

$$R_L = \alpha/\beta. \quad (9)$$

将上述谱分布下的  $R'_{\text{eff}}$ 、 $Z/\alpha$ 、 $Z/\beta$  和  $R_L$  进行统计制表, 由于  $R_L$  对于小粒径粒子比较敏感, 因此将  $R'_{\text{eff}}$  划分成 100 个指数区间, 用区间的均值代表该区间的值, 拟合融合毫米波雷达和激光雷达光学特性与微物理特性的查数表 (RLC 查数表)。RLC 查数表如图 1 黑线所示, 分布在模型区域的中心, 表征  $Z/\alpha$ 、 $Z/\beta$ 、 $R_L$  随  $R'_{\text{eff}}$  的变化关系。

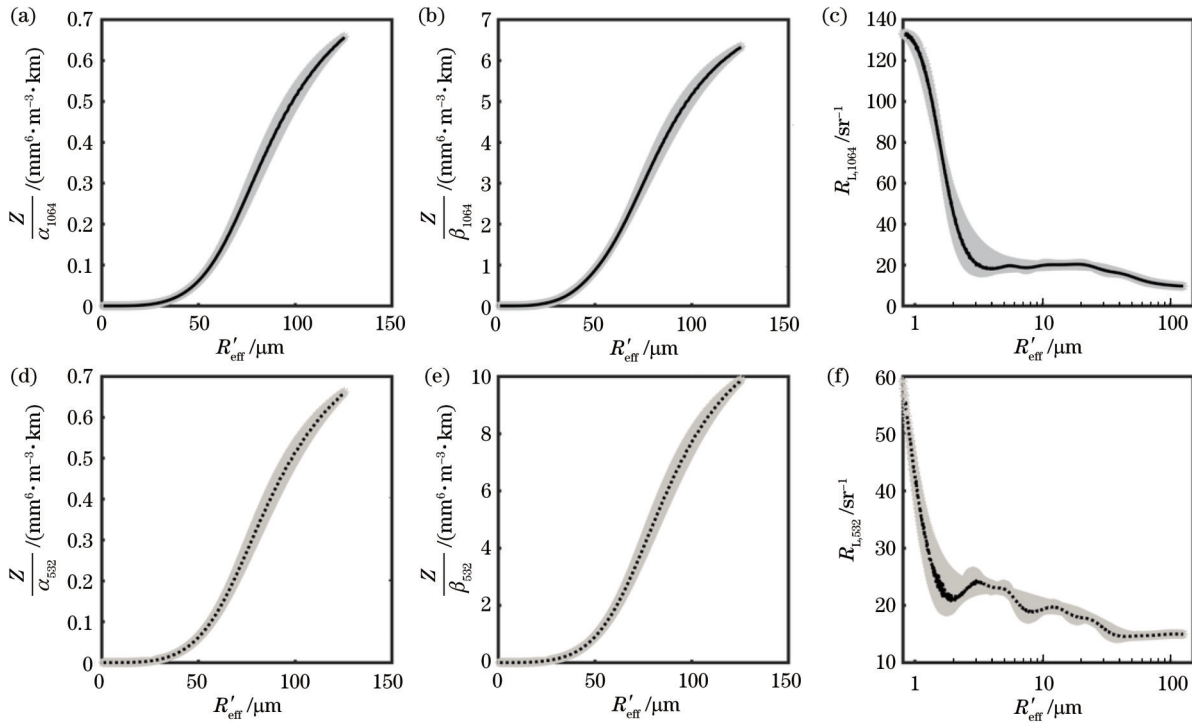


图1 RLC模型与RLC查数表与粒子有效半径  $R'_{\text{eff}}$  的关系。(a) 反射率因子与1064 nm消光比  $Z/\alpha_{1064}$ ; (b) 反射率因子与1064 nm后向散射比  $Z/\beta_{1064}$ ; (c) 1064 nm雷达比  $R_{L,1064}$ ; (d) 反射率因子与532 nm消光比  $Z/\alpha_{532}$ ; (e) 反射率因子与532 nm后向散射比  $Z/\beta_{532}$ ; (f) 532 nm雷达比  $R_{L,532}$

Fig. 1 RLC model and RLC table results with the effective radius  $R'_{\text{eff}}$ . (a) Reflectivity-extinction ratio at 1064 nm ( $Z/\alpha_{1064}$ ); (b) reflectivity-backscattering ratio at 1064 nm ( $Z/\beta_{1064}$ ); (c) lidar ratio at 1064 nm ( $R_{L,1064}$ ); (d) reflectivity-extinction ratio at 532 nm ( $Z/\alpha_{532}$ ); (e) reflectivity-backscattering ratio at 532 nm ( $Z/\beta_{532}$ ); (f) lidar ratio at 532 nm ( $R_{L,532}$ )

### 3 算法与仿真结果

#### 3.1 算法的流程图

根据上述模型关系, 结合毫米波雷达与双波长激光雷达可求解参考高度处的水云后向散射系数, 算法

流程如图2所示。根据RLC查数表的描述, 它是一个随着  $R'_{\text{eff}}$  变化的  $Z/\alpha_{1064}$ 、 $Z/\beta_{1064}$ 、 $R_{L,1064}$ 、 $Z/\alpha_{532}$ 、 $Z/\beta_{532}$ 、 $R_{L,532}$  的  $100 \times 7$  的查数表,  $i$  和  $j$  分别代表在  $z_m$  和  $z_{m1}$  高度下参数在查数表中的位置。当已知激光雷达1064 nm和532 nm的回波信号  $P_{1064}$  和  $P_{532}$  以及雷达的



反射率因子  $Z$  时,需要假设参考高度  $z_m$  处的粒子有效半径  $R'_{\text{eff},z_m}(i)$ ,然后根据 RLC 查数表与  $Z$  的关系得到  $z_m$  处的后向散射系数  $\beta_{1064,z_m}(i)$  和  $\beta_{532,z_m}(i)$ 。为了得到参考高度更高一个距离门处 ( $z_{m1}$  处) 的后向散射系数  $\beta_{1064,z_{m1}}(j,i)$  和  $\beta_{532,z_{m1}}(j,i)$ ,还需要假设  $z_{m1}$  处的雷达比  $R_{L,1064,z_{m1}}(j)$  和  $R_{L,532,z_{m1}}(j)$ 。通过 Fernald 前向积分法 [式 (3)] 可计算出  $z_{m1}$  处的后向散射系数  $\beta_{1064,z_{m1}}(j)$  和  $\beta_{532,z_{m1}}(j)$ 。再次使用 RLC 查数表与  $Z_{z_{m1}}$  的值,可以得到  $z_{m1}$  处粒子有效半径  $R'_{\text{eff},1064,z_{m1}}(j,i)$  与  $R'_{\text{eff},532,z_{m1}}(j,i)$  和设定雷达比下的反演误差值  $D_{\text{diff},1064}(j,i)$  和  $D_{\text{diff},532}(j,i)$ 。

以双波长粒子有效半径相等、指定雷达比下的误差最小为限制条件,可以获得最优参数  $i$  和  $j$ ,最终得到参考高度处的双波长粒子有效半径、后向散射系数。图 3 所示为仿真  $i=53, j=52$  即  $R'_{\text{eff},z_m}=11.53 \mu\text{m}$ 、 $R_{L,1064,z_m}=20.14 \text{ sr}$ 、 $R_{L,532,z_m}=19.67 \text{ sr}$ 、 $R_{L,1064,z_{m1}}=20.09 \text{ sr}$ 、 $R_{L,532,z_{m1}}=19.59 \text{ sr}$  时,实现上述算法的过程中  $R'_{\text{eff},1064,z_{m1}}(j,i)$  与  $R'_{\text{eff},532,z_{m1}}(j,i)$  和设定雷达比下的反演误差值  $D_{\text{diff},1064}(j,i)$  和  $D_{\text{diff},532}(j,i)$  的反演结果。从图 3 (c)、(d) 可以明显地看出,存在一条在指定雷达比下反演误差极小的廓线,最终识别结果如白框所示。

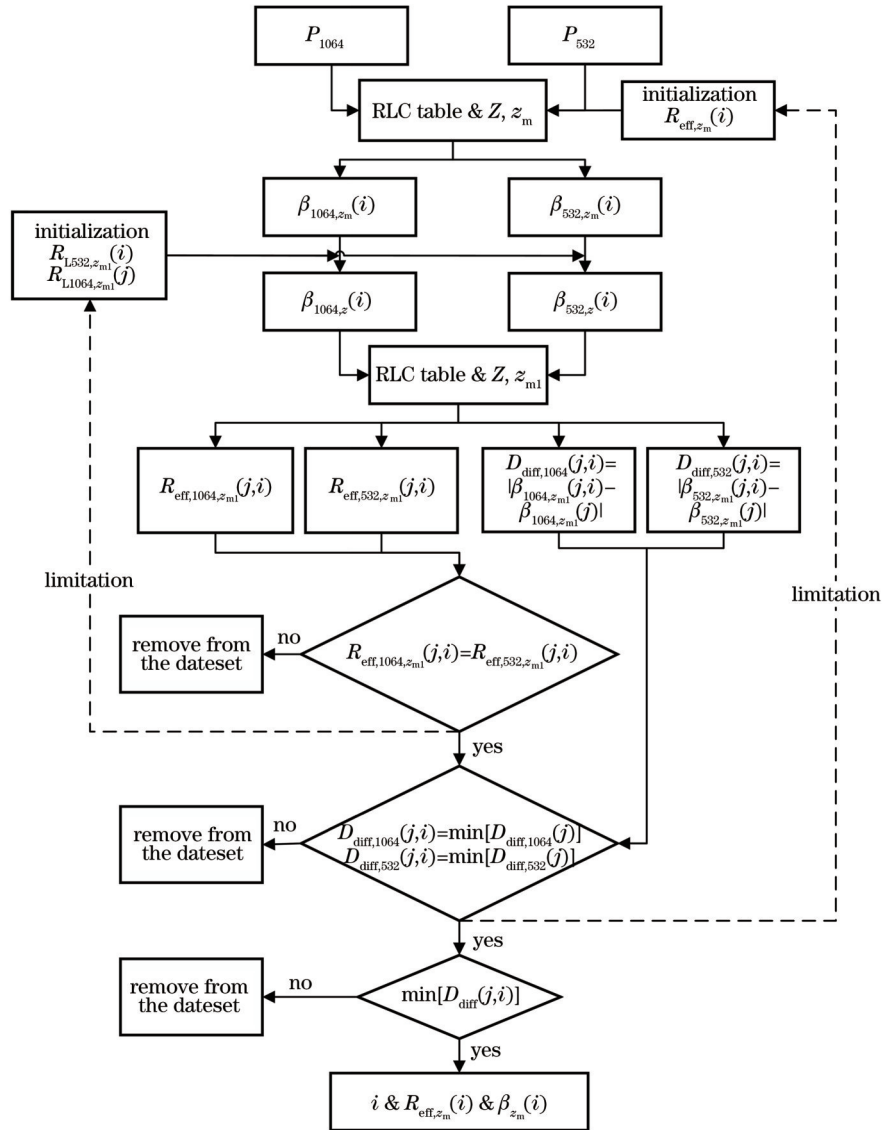


图 2 参考高度下反演后向散射系数边界值的算法流程

Fig. 2 Flow chart of retrieving boundary values of backscattering coefficient at the reference height

### 3.2 仿真结果

将上述流程图描述的结合毫米波雷达与激光雷达计算参考高度处后向散射系数的方法称为 RLC 算法,将仿真模型中所有参数都用 RLC 算法进行计算,结果如图 4 所示。所有粒径下的粒子有效半径与后向散射系数分布均在 1:1 线附近,  $R'_{\text{eff}}$  仿真值与 RLC 算法所得

结果的一致性系数为 0.98,  $\beta_{1064}$  和  $\beta_{532}$  的仿真值与 RLC 算法所得结果的一致性系数均为 0.81,  $\beta_{1064}$  的  $\beta_{532}$  方均根误差分别为 1.73 和 1.71,  $\beta_{1064}$  的数据波动比  $\beta_{532}$  稍大。上述结果验证了 RLC 算法的可行性和准确性。

根据图 5 所示的结果,  $R'_{\text{eff}}, \beta_{1064}, \beta_{532}$  在全部反演结果下的相对绝对误差 (RAE) 均值分别为 14.9%、

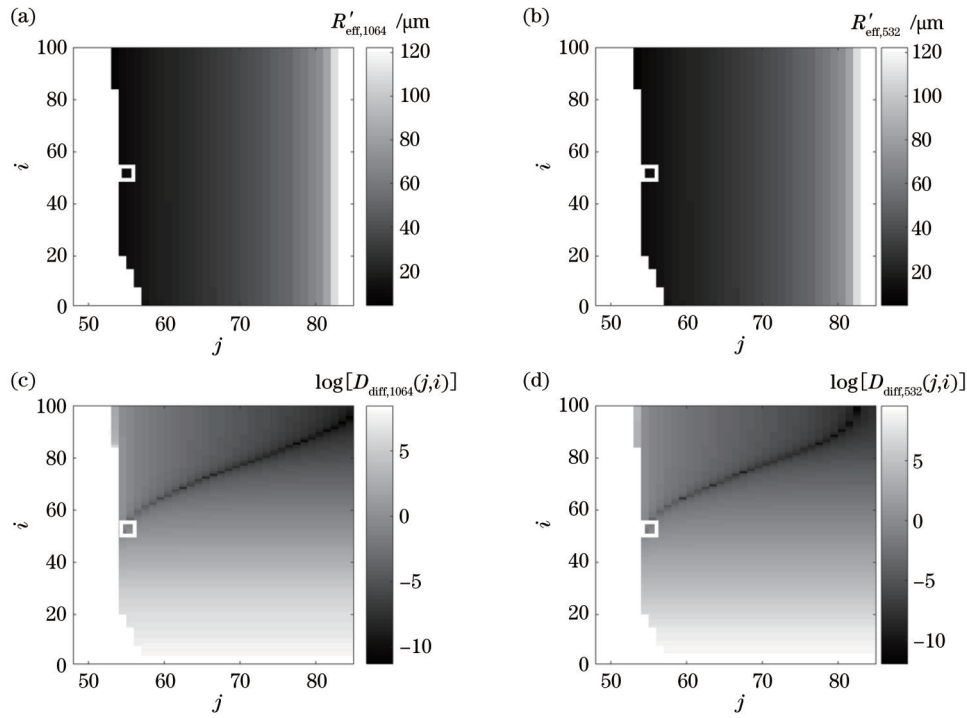


图 3 仿真参数  $i=53, j=52$  (白框) 时反演过程中主要参数的图像。(a) 1064 nm 反演的粒子有效半径  $R'_{\text{eff},1064}$ ; (b) 532 nm 反演的粒子有效半径  $R'_{\text{eff},532}$ ; (c) 1064 nm 的后向散射系数反演误差  $D_{\text{diff},1064}$ ; (d) 532 nm 的后向散射系数反演误差  $D_{\text{diff},532}$

Fig. 3 Images for the main parameters in the inversion when the simulation parameters  $i=53$  and  $j=52$  (white box). (a) Effective radius for 1064 nm ( $R'_{\text{eff},1064}$ ); (b) effective radius for 532 nm ( $R'_{\text{eff},532}$ ); (c) error of backscattering coefficient for 1064 nm ( $D_{\text{diff},1064}$ ); (d) error of backscattering coefficient for 532 nm ( $D_{\text{diff},532}$ )

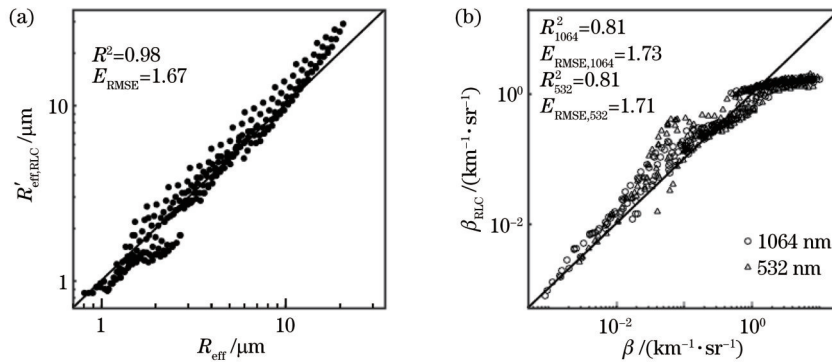


图 4 仿真值与 RLC 算法反演值的散点图分布。(a) 有效半径  $R'_{\text{eff}}$ ; (b) 1064 nm 和 532 nm 的后向散射系数  $\beta$

Fig. 4 Scatter plot distribution of simulated values and RLC method values. (a) Effective radius  $R'_{\text{eff}}$ ; (b) backscattering coefficient  $\beta$  at 1064 nm and 532 nm

48.0% 和 64.4%，这些误差大部分由  $R'_{\text{eff}}$  的偏差导致。限制  $R'_{\text{eff}}$  的反演误差在 10% 以内， $\beta_{1064}$ 、 $\beta_{532}$  的 RAE 会迅速下降到 20.7% 和 16.5%。这是因为 RLC 查数表的设计是以  $R'_{\text{eff}}$  的指数区间划分，当  $R'_{\text{eff}}$  越小时， $\beta_{1064}$  和  $\beta_{532}$  的拟合精准度越高，使用 RLC 算法的反演误差越小。当参考高度处的  $\beta_{1064} < 0.01 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  时，常见水云参数范围内反演参考高度处的双波长气溶胶后向散射系数的反演误差在 35% 以内。此外，考虑到算法效率的问题，查数表的制作只使用了 100 个区间制表，如果对精度有进一步要求，可以按照本文方法将查数表划分为更多区间。虽然 Donovan 的方法<sup>[8]</sup>讨论了  $R'_{\text{eff}}$  随高度变化对反演结果的影响，对于光学厚度大于

0.4 的云层，估计误差在 25% 以内，但该方法还要求  $R'_{\text{eff}}$  随高度的相对变化  $\frac{dR'_{\text{eff}}}{dz} \times \frac{1}{R'_{\text{eff}}}$  不能超过  $1.0 \text{ km}^{-1}$ 。Tinel 的方法<sup>[9]</sup>假设毫米波雷达与激光雷达信号重合区域的归一化粒子数密度  $N_0^*$  随高度不变，但  $N_0^*$  与大气分布情况有关，不太容易量化其对误差的影响。对比上述已有的研究，RLC 算法有效避免了对云滴粒子数密度随高度分布情况的假设，因此有更好的应用前景。

在验证后向散射边界值反演的准确性后，可通过 Fernald 后向积分得到气溶胶后向散射系数廓线。将 RLC 算法与常用的几种气溶胶反演方法的结果进行对比。通过仿真计算得到的雷达反射率因子为

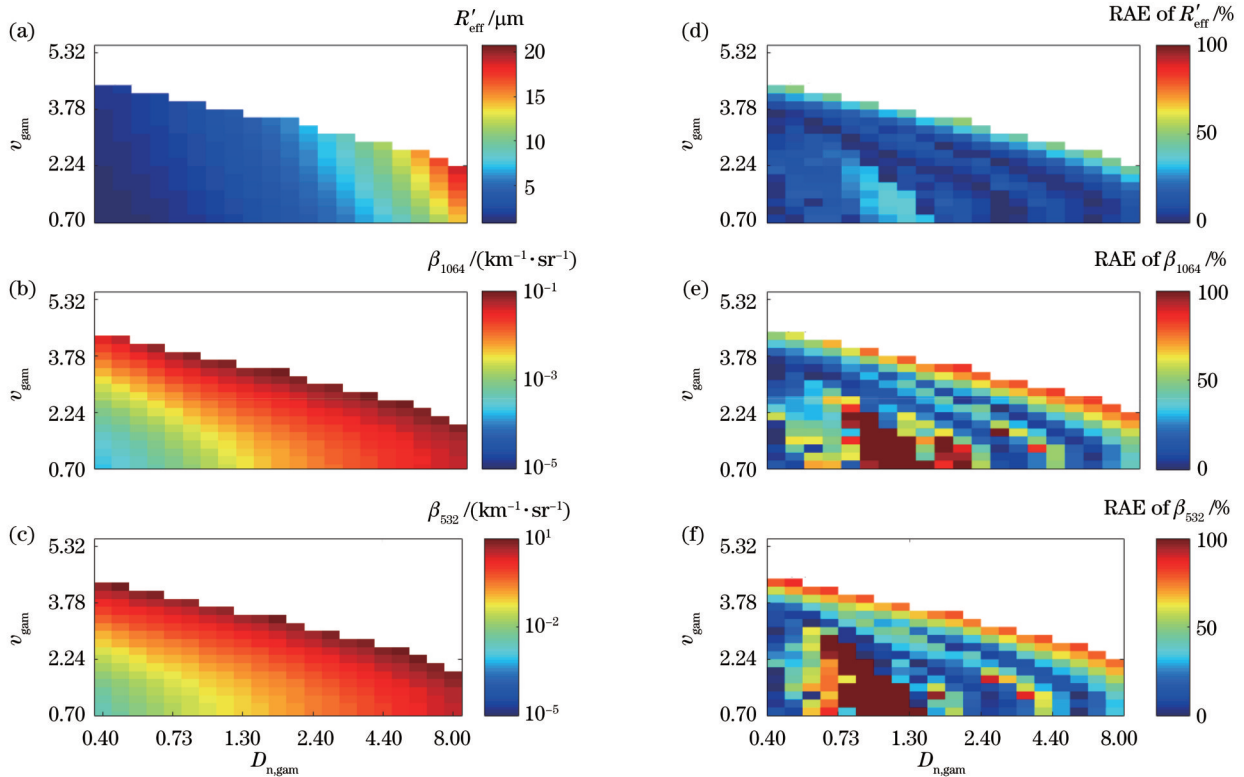


图 5 仿真值与RLC算法反演结果的RAE。(a)有效半径仿真值 $R'_{\text{eff}}$ ；(b)1064 nm后向散射系数的仿真值 $\beta_{1064}$ ；(c)532 nm后向散射系数仿真值 $\beta_{532}$ ；(d)有效半径的RAE；(e)1064 nm后向散射系数的RAE；(f)532 nm后向散射系数的RAE

Fig. 5 Simulated values and RAE of inversion results of RLC method. (a) Simulated value of effective radius  $R'_{\text{eff}}$ ; (b) simulated value of backscattering coefficient at 1064 nm ( $\beta_{1064}$ ); (c) simulation value of backscattering coefficient at 532 nm ( $\beta_{532}$ ); (d) RAE of  $R'_{\text{eff}}$ ; (e) RAE of  $\beta_{1064}$ ; (f) RAE of  $\beta_{532}$

-41 dBZ < Z < -15 dBZ 时,水云粒子的有效半径范围为 2.26~31.53  $\mu\text{m}$ ,图 6 所示为粒子有效半径为 5.25  $\mu\text{m}$  的反演廓线,其中,Ff为 Fernald 前向积分方法,Fb105为使用云底处固定后向散射比为 1.05 的方法,Ft102为在云顶处固定后向散射比为 1.02 的方法。从图 6(a)~(d)可以看出,反演结果最好的是前

向积分法。但是在实际反演中,前向积分需要已知仪器常数和激光雷达的几何因子,因此对系统稳定性要求较高。固定后向散射比法对大气情况的假设是不准确的。RLC算法的准确性介于前向积分法与定后向散射比法之间,对水云粒子参数范围内的后向散射系数反演精度较高。

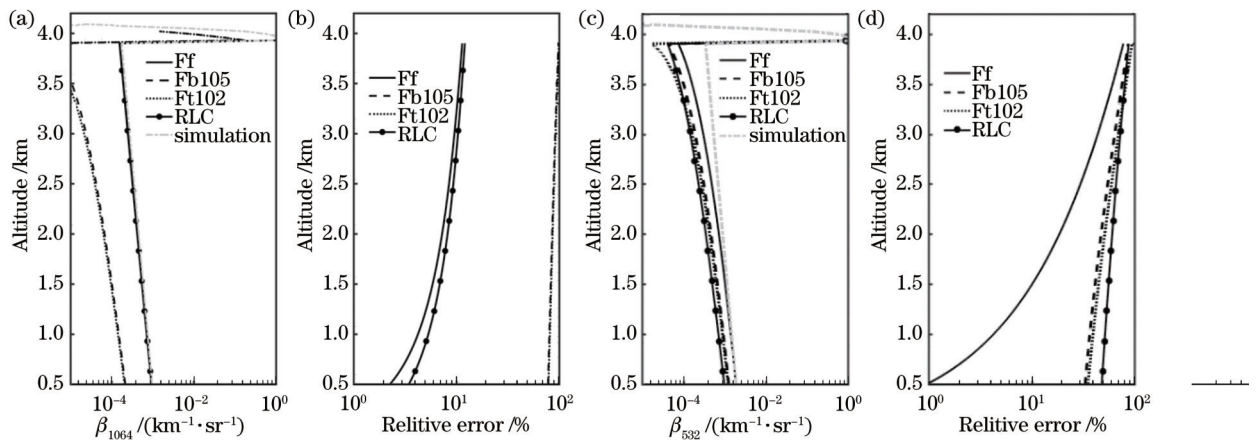


图 6 气溶胶后向散射系数的反演结果及相对误差廓线。(a)1064 nm后向散射系数反演结果与仿真值；(b)1064 nm后向散射系数的相对误差；(c)532 nm后向散射系数反演结果与仿真值；(d)532 nm后向散射系数的相对误差

Fig. 6 Inversion profiles of aerosol backscattering coefficient and their relative errors. (a) 1064 nm backscattering coefficient and its simulated value; (b) relative error of 1064 nm backscattering coefficient; (c) 532 nm backscattering coefficient and its simulated value; (d) relative error of 532 nm backscattering coefficient



## 4 实例分析

### 4.1 仪器与数据预处理

在中国气象局海淀站(54399站)放置一台毫米波雷达和一台多波长米散射激光雷达。毫米波雷达的波长为 8.6 mm, 距离分辨率为 30 m, 采用仰角为 90° 的天顶观测模式, 探测范围为 30 km<sup>[17]</sup>。多波长激光雷达有 3 个米散射通道, 本次实验只使用 1064 nm 和 532 nm 通道数据, 重复频率为 20 Hz, 垂直分辨率为 15 m<sup>[18]</sup>。先将两台仪器根据探测区域的重合区间进行高度上的匹配, 在本次实验中毫米波雷达的数据向远端平移了 6 个距离门即 180 m。在高度匹配完成后, 将垂直分辨率通

过插值法统一成 30 m, 再将 5 min 内的信号进行平均, 统一时间分辨率。

### 4.2 实际案例的分析

2019 年 11 月 14 日 6:00—8:00 在 3 km 处有一层水云。图 7(a)、(b) 中参考高度选择 6~9 km 范围内的距离修正信号与大气分子后向散射信号比值最小的位置所在高度。可以观察到当云层出现时, 气溶胶含量显著减少。使用 RLC 算法得到的气溶胶含量与两侧未使用 RLC 算法区域的含量变化稳定, 证明 RLC 算法改善了气溶胶反演的连续性[图 7(c)、(d)]。RLC 算法使用区域的粒子有效半径为 9.32  $\mu\text{m}$ , 在水云粒子的有效半径范围内, 验证了 RLC 算法的可行性。

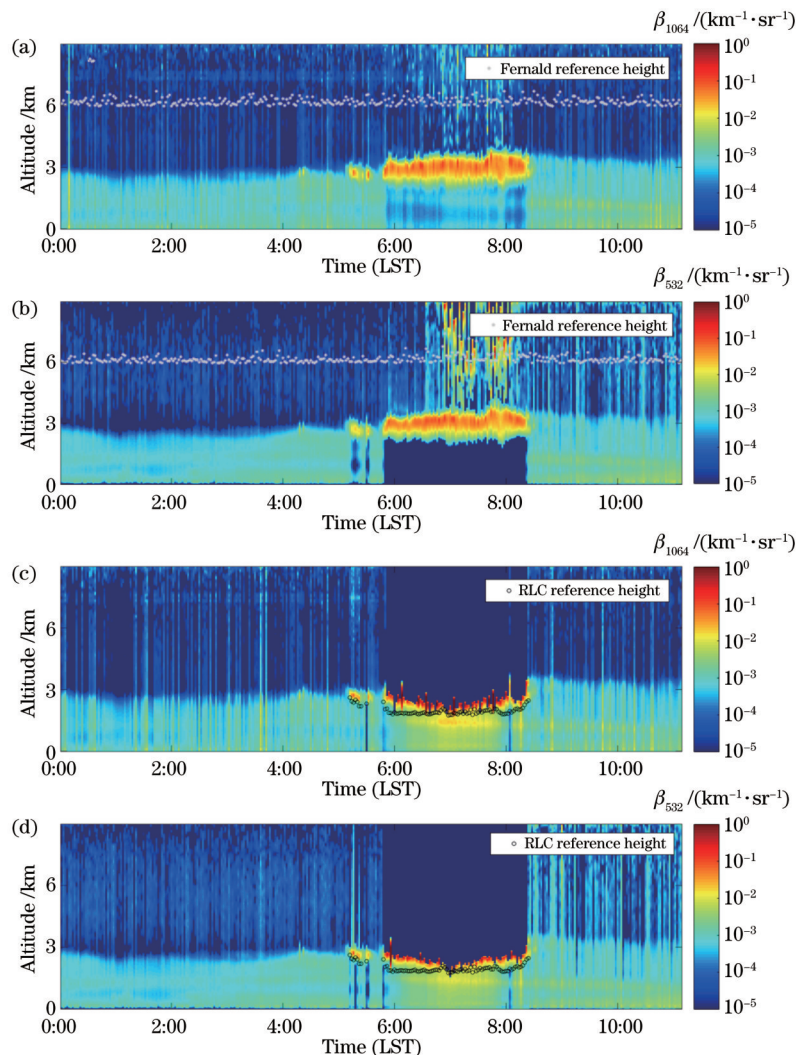


图 7 2019 年 11 月 14 日后向散射系数的时空演化图。(a) Fernald 方法测得的 1064 nm 后向散射系数;(b) Fernald 方法测得的 532 nm 后向散射系数;(c) RLC 算法测得的 1064 nm 后向散射系数;(d) RLC 算法测得的 532 nm 后向散射系数

Fig. 7 Time-height cross section of backscattering coefficient on Nov. 14, 2019. (a) Backscattering coefficient obtained by Fernald method at 1064 nm; (b) backscattering coefficient obtained by Fernald method at 532 nm; (c) backscattering coefficient obtained by RLC method at 1064 nm; (d) backscattering coefficient obtained by RLC method at 532 nm

对中国气象局海淀站及其附近 AERONET 站点的气溶胶光学厚度(AOD)进行比较, 发现 5:00—9:00 气溶胶含量在近地面比较稳定, 使用 RLC 算法与使用 Fernald 方法反演的气溶胶含量分布均连续稳定, 其中 AOD 数据在 8:00—8:30 出现一个气溶胶含量先增加

后减少的过程, 这与图 8 中 RLC 算法反演的后向散射系数有相同的变化趋势, 因此进一步验证了 RLC 算法的正确性。

2019 年 12 月 18 日 8:00—10:00 和 20:00—24:00 在 3 km 高度上出现水云。图 9(a)、(b) 显示, 使用

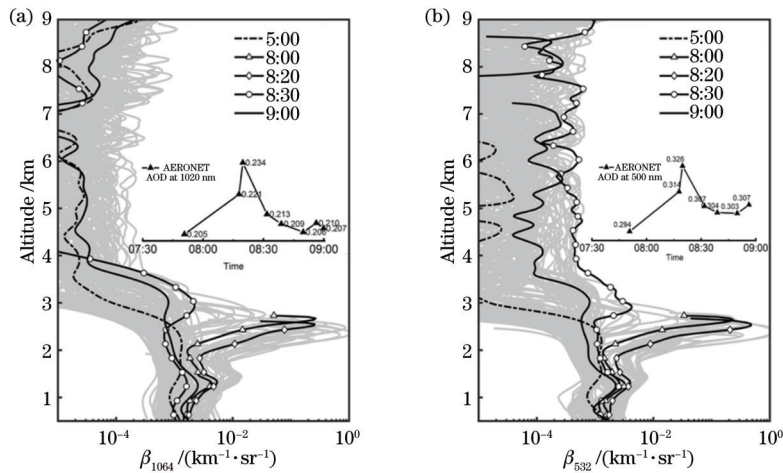


图 8 2019年11月14日RLC算法(带标识符)、Fernald方法(未带标识符)的反演结果。(a) 1064 nm后向散射系数 $\beta_{1064}$ ; (b) 532 nm后向散射系数 $\beta_{532}$

Fig. 8 Inversion results on Nov. 14, 2019 by RLC method (line with marker) and Fernald method (line without marker). (a) Backscattering coefficient at 1064 nm ( $\beta_{1064}$ ); (b) backscattering coefficient at 532 nm ( $\beta_{532}$ )

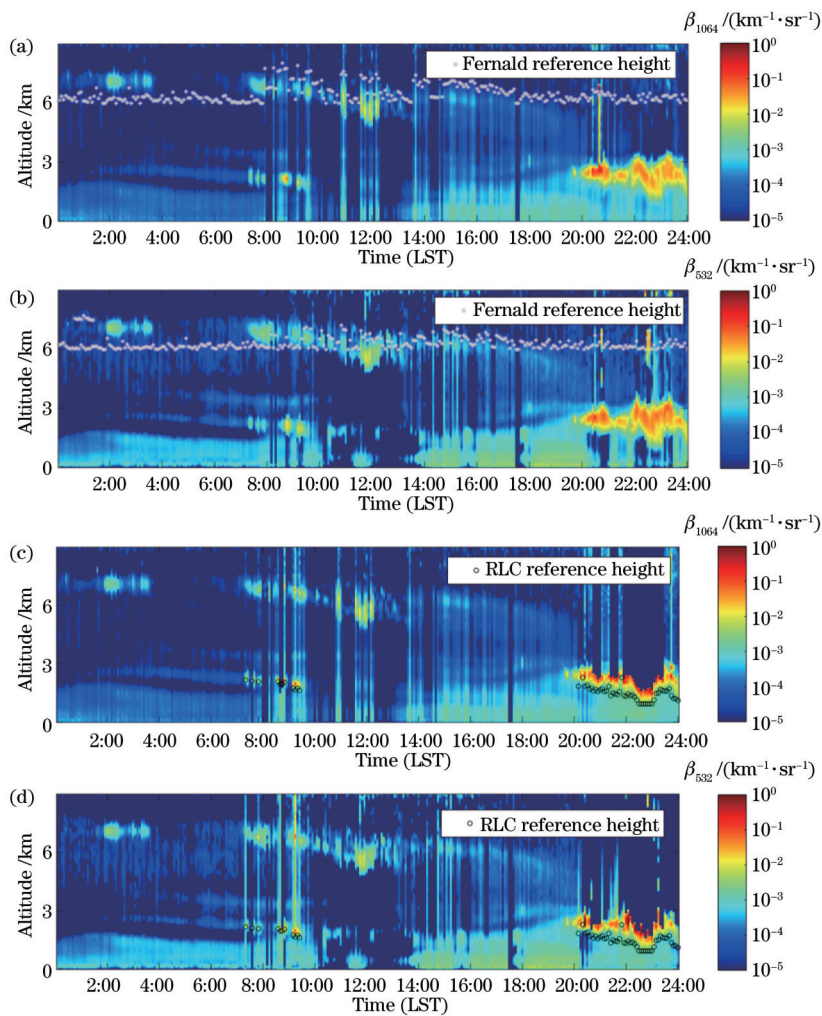


图 9 2019年12月18日后向散射系数时空演化图。(a) Fernald方法测得的1064 nm后向散射系数; (b) Fernald方法测得的532 nm后向散射系数; (c) RLC算法测得的1064 nm后向散射系数; (d) RLC算法测得的532 nm后向散射系数

Fig. 9 Time-height cross section of backscattering coefficient on Dec. 18, 2019. (a) Backscattering coefficient obtained by Fernald method at 1064 nm; (b) backscattering coefficient obtained by Fernald method at 532 nm; (c) backscattering coefficient obtained by RLC method at 1064 nm; (d) backscattering coefficient obtained by RLC method at 532 nm



Fernald 方法处理得到的 1064 nm 数据的连续性比 532 nm 数据的连续性更好,但在受到云层遮挡的区域,气溶胶含量迅速减少。从图 9(d)可明显观察到,9:00、20:00、22:00 的气溶胶含量稳定,表明气溶胶反演的连续性得到改善。此时用 RLC 算法计算出的粒子平均有效半径为  $11.45 \mu\text{m}$ ,也在水云粒子的有效粒径范围内。此外,Fernald 方法与 RLC 算法在运行时间上没有显著差别;在数据获取率上,与激光雷达识别出的水云云底数目相比,RLC 算法的数据获取率为 96.5%。数据获取率需要毫米波雷达与激光雷达有共

同的探测区域,受到仪器探测性能的影响,毫米波雷达对小粒径的粒子识别效果不好,激光雷达无法穿透光学厚度较大的云层,这些会对数据获取率造成一定的影响。

如图 10 所示,从 AERONET 站点的数据结果可以看出,当天除了 8:00 的 AOD 较小,全天的 AOD 基本都很稳定,这与 RLC 算法反演结果的变化趋势一致,如需进一步验证 RLC 算法的准确性,可与拉曼散射激光雷达或者已知仪器常数的米散射雷达进行进一步比较。

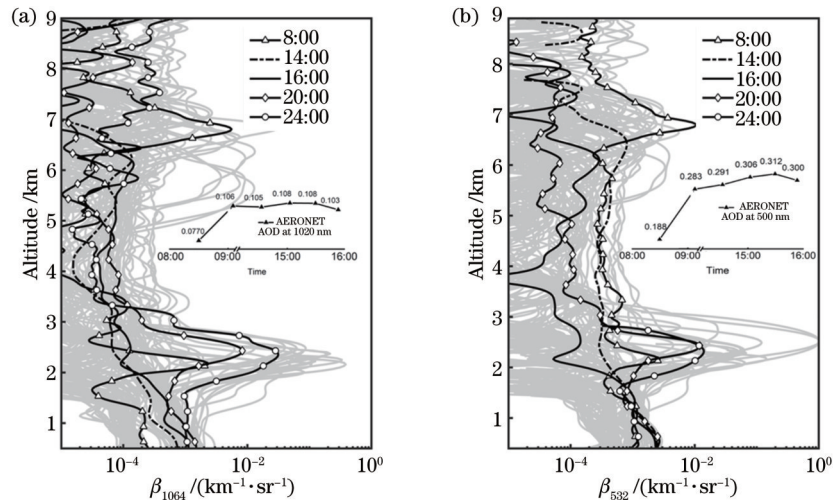


图 10 2019 年 12 月 19 日 RLC 算法(带标识符)、Fernald 方法(未带标识符)的反演结果。(a) 1064 nm 后向散射系数  $\beta_{1064}$ ; (b) 532 nm 后向散射系数  $\beta_{532}$

Fig. 10 Inversion results on Dec. 18, 2019 by RLC method (line with marker) and Fernald method (line without marker).

(a) Backscattering coefficient at 1064 nm ( $\beta_{1064}$ ); (b) backscattering coefficient at 532 nm ( $\beta_{532}$ )

## 5 结 论

通过仿真水云的微物理特性和光学特性构建了水云的粒子有效半径与反射率因子-消光比、反射率因子-后向散射比的关系。将 532 nm 和 1064 nm 数据反演的水云粒子有效半径相等及指定雷达比下的后向散射系数反演误差为限制条件,可以得到参考高度处的后向散射系数边界值。仿真结果与 RLC 算法处理后的粒子有效半径的一致性系数为 0.98,双波长后向散射系数的一致性系数均为 0.81。RLC 算法的反演误差主要是由制表过程中  $R'_{\text{eff}}$  的偏差导致,当限制  $R'_{\text{eff}}$  的反演误差在 10% 以内,  $\beta_{1064}$ 、 $\beta_{532}$  的 RAE 会迅速下降到 20.6% 和 16.5%。此外,考虑到算法效率的问题,查数表的制作只使用了 100 个区间制表,如果对精度有进一步要求,可以按照本文方法将查数表划分为更多区间。与其他常用的反演气溶胶廓线的方法相比,本文方法不需要已知激光雷达仪器常数的几何因子,因此可适用更广泛的场景。RLC 算法的准确性介于前向积分法与固定后向散射比法,对水云粒子的参数范围有较好的反演精度。通过两个实例可以观察到,RLC 算法可以改善有云天气下反演气溶胶廓线的连续性,反演结果与 AERONET 的 AOD 监测结果基本

一致,能得到相对准确的气溶胶后向散射系数廓线。

## 参 考 文 献

- [1] 麻晓敏,陶宗明,单会会,等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101003.  
Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101003.
- [2] 徐俊杰,卜令兵,刘继桥,等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0710003.  
Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0710003.
- [3] 朱首正,卜令兵,刘继桥,等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶光学特性及污染研究[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1710003.  
Zhu S Z, Bu L B, Liu J Q, et al. Study on airborne high spectral resolution lidar detecting optical properties and pollution of atmospheric aerosol[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710003.
- [4] Russell P B, Swissler T J, McCormick M P.

- Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(22): 3783-3797.
- [5] Kunz G J, de Leeuw G. Inversion of lidar signals with the slope method[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3249-3256.
- [6] Kovalev V A. Lidar measurement of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 6053-6065.
- [7] Zhang Y C, Chen S, Tan W S, et al. Retrieval of water cloud optical and microphysical properties from combined multiwavelength lidar and radar data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4396.
- [8] Donovan D P, van Lammeren A C A P. Cloud effective particle size and water content profile retrievals using combined lidar and radar observations: 1. Theory and examples[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D21): 27425-27448.
- [9] Tinel C, Testud J, Pelon J, et al. The retrieval of ice-cloud properties from cloud radar and lidar synergy[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(6): 860-875.
- [10] Kim M H, Omar A H, Tackett J L, et al. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(11): 6107-6135.
- [11] 狄慧鸽, 华灯鑫. 云探测中的激光雷达技术研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600002.
- Di H G, Hua D X. Research progress of lidar in cloud detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600002.
- [12] Mao F Y, Gong W, Zhu Z M. Simple multiscale algorithm for layer detection with lidar[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(36): 6591-6598.
- [13] Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(2): 295-311.
- [14] Mie G. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen[J]. *Annalen Der Physik*, 1908, 330(3): 377-445.
- [15] Gunn K L S, East T W R. The microwave properties of precipitation particles[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1954, 80(346): 522-545.
- [16] Kedenburg S, Vieweg M, Gissibl T, et al. Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(11): 1588-1611.
- [17] Wang Z J, Du L B, Li X X, et al. Development of three-wavelength polarization-Raman lidar and application to shipborne measurements[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 17003.
- [18] 唐英杰, 马舒庆, 杨玲, 等. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 680-687.
- Tang Y J, Ma S Q, Yang L, et al. Observation and comparison of cloud-base heights by ground-based millimeter-wave cloud radar[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(6): 680-687.