

星载高光谱探测激光雷达沙尘气溶胶光学特性研究

胡建波^{1,2}, 王 雄¹, 马鹏飞³, 赵少华³, 杨巨鑫^{1,2}, 戴光耀⁴, 谢 缘^{1,2},
竹孝鹏^{1,2}, 刘 东⁵, 侯 霞^{1,2}, 卜令兵⁶, 刘继桥^{1,2*}, 陈卫标^{1,2*}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空天激光技术与系统部 王之江激光创新中心, 上海 201800;

2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049;

3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

4. 中国海洋大学 信息科学与工程学部 海洋技术学院, 山东 青岛 266100;

5. 浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;

6. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 大气环境监测卫星(DQ-1)主载荷大气探测激光雷达(ACDL)于2022年4月发射, 是国际首个星载高光谱气溶胶探测激光雷达, 在气溶胶廓线测量上性能优异。对ACDL激光雷达和气溶胶自动监测网络(AERONET)的气溶胶光学厚度(AOD)数据进行了星地对比, 验证了ACDL的AOD数据的准确性($R^2=0.924$)。2025年3月, 中国北方地区沙尘频发, 产生了大量沙尘气溶胶。本文分析了沙尘气溶胶的时空分布特征及其光学特性。研究分析表明, 沙尘气溶胶主要集中于对流层, 其退偏振比(0.19~0.38)和激光雷达比(38~60 sr)呈现典型沙尘光学特性, 垂直方向最大覆盖高度5 km, 水平空间上覆盖超1600 km。研究验证了ACDL的气溶胶高光谱分辨率探测技术在复杂气溶胶环境下的观测优势, 为大气污染研究提供了重要数据支持。

关键词: 星载激光雷达; 高光谱分辨率探测技术; 气溶胶光学厚度; 沙尘气溶胶
中图分类号: P412.27 **文献标识码:** A

Spaceborne high-spectral-resolution lidar ACDL dust aerosol measurements

HU Jian-Bo^{1,2}, WANG Xiong¹, MA Peng-Fei³, ZHAO Shao-Hua³, YANG Ju-Xin^{1,2}, DAI Guang-Yao⁴,
XIE Yuan^{1,2}, ZHU Xiao-Peng^{1,2}, LIU Dong⁵, HOU Xia^{1,2}, BU Ling-Bing⁶,
LIU Ji-Qiao^{1,2*}, CHEN Wei-Biao^{1,2*}

(1. Wangzhijiang Innovation Center for Laser, Aerospace Laser Technology and System Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

4. College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

5. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

6. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In April 2022, the Atmospheric Environment Monitoring Satellite (DQ-1) was launched with its main payload Aerosol and Carbon Detection Lidar (ACDL). The ACDL is the first spaceborne high-spectral-resolution aerosol

收稿日期: 2025-03-31, 修回日期: 2025-05-09

Received date: 2025-03-31, Revised date: 2025-05-09

基金项目: 中国科学院国际伙伴计划项目(18123KYSB20210013); 上海市“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项(22dz208700)

Foundation items: Supported by the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (18123KYSB20210013); the Shanghai "Science and Technology Innovation Action Plan" Science And Technology Support Carbon Peak Carbon Neutral Project (22dz208700)

作者简介: 胡建波(1997—), 男, 四川内江人, 在读博士研究生, 主要研究领域为高光谱分辨率激光雷达气溶胶探测研究. E-mail: jianbohu@siom. ac. cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: liujiao@siom. ac. cn, wbchen@siom. ac. cn

detection lidar with great performance in aerosol profile measurement. The accuracy of ACDL was quantified ($R^2 = 0.924$) by comparing the aerosol optical depth (AOD) between ACDL and Aerosol Robotic Network (AERONET). In March 2025, frequent dust events occurred in northern China, generating substantial quantities of dust aerosols. The spatiotemporal distribution characteristics and optical properties of dust aerosols were analyzed. The results indicated that aerosols were mainly concentrated in the troposphere, with the depolarization ratio of 0.19 – 0.38 and the lidar ratio of 38 – 60 sr, exhibiting typical optical characteristics of dust. The vertical distribution demonstrates a maximum dust aerosol layer height reaching 5 km, while spatially extending over 1600 km in horizontal dimension. This study confirms the observational advantages of high-spectral-resolution detection techniques from ACDL in complex aerosol environments, providing important data for atmosphere pollution research.

Key words: spaceborne lidar, high-spectral-resolution detection technique, aerosol optical depth, dust aerosol

引言

气溶胶是地球大气的重要组成部分,通常由自然源和人为源释放到大气中^[1-2]。这些气溶胶不仅直接影响大气的辐射平衡,还通过散射和吸收太阳辐射、改变云的微物理特性等方式,对气候变化、空气质量和生态环境产生深远影响^[3-4]。其中,沙尘是含量最丰富的大气气溶胶类型之一。沙尘气溶胶可以在洲际、半球甚至全球范围内传播;因此,高时空分辨率的沙尘监测对于研究沙尘的输送和沉积、估计沙尘的辐射效应以及评估数值天气和气候模式中的沙尘模拟是至关重要的^[5]。卫星遥感是在区域到全球范围内观测沙尘的重要手段。自 Terra 和 Aqua 卫星成功发射以来,其搭载的中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 在全球沙尘气溶胶监测方面取得了显著成效。MODIS 具备大尺度、高频率的观测能力,能够提供多光谱、高分辨率的气溶胶光学厚度数据,为研究气溶胶的时空分布和长期变化趋势提供了关键支撑^[6]。然而,MODIS 观测的局限性也较为突出。由于其被动遥感技术主要依赖太阳辐射与大气散射之间的关系,夜间观测几乎无法实现。极夜现象以及极地地区大量云层的覆盖,导致这些区域的观测数据稀缺。此外,被动遥感几乎无法提供气溶胶的垂直分布信息^[7],而在反演过程中对地表反射率的依赖以及卫星辐射值的校正要求,使得气溶胶探测的精度受限,易引入系统性误差^[8]。

激光雷达作为一种主动遥感手段,具备在昼夜条件下连续工作的能力,并能够提供气溶胶的垂直分布信息。这种技术支持全球大气气溶胶的高时空分辨率三维观测,尤其在穿透薄云以探测云下气溶胶垂直廓线方面展现出独特优势^[9]。云气溶胶激光雷达和红外探路者卫星观测 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, CALIP-

SO) 卫星搭载的正交偏振云-气溶胶激光雷达 (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP) 已广泛应用于全球气溶胶监测,能够获取气溶胶粒子的光学特性并对气溶胶类型进行分类^[10],同时有效追踪沙尘的长距离传输^[11]。然而,由于反演光学参数时需要假设激光雷达比, CALIOP 的检索结果可能存在偏差,难以准确反映气溶胶的真实特性。受制于仪器性能, CALIOP 已于 2023 年 8 月停止工作,当前不再提供观测数据。欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 于 2024 年 5 月成功部署了地球云、气溶胶和辐射探测器 (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer, EarthCARE) 卫星,其搭载的大气后向散射激光雷达 (Atmospheric Backscatter Lidar, ATLID) 在紫外 355 nm 波段采用了基于法布里-珀罗干涉仪滤波器的高光谱探测方案。但受限于单波长探测体制, ATLID 在气溶胶多参数光学特性反演方面存在固有技术约束,同时也制约了气溶胶类型的精确识别^[12]。

2022 年 4 月 16 日,中国成功发射了大气环境监测卫星 DQ-1,其主载荷为大气探测激光雷达 (Atmospheric Detection Lidar, ACDL)。ACDL 采用多波长混合探测体制,通过多波长激光器分别产生 532 nm、1064 nm 和 1572 nm 激光,用于大气气溶胶和二氧化碳的高精度测量^[13]。基于高光谱分辨率激光雷达 (High Spectral Resolution Lidar, HSRL) 技术, ACDL 无需依赖激光雷达比的假设,能够直接反演气溶胶的光学参数,显著提升了复杂气溶胶环境下的观测精度^[14]。DQ-1 的成功发射不仅填补了 CALIPSO 退役后全球气溶胶观测的空白,还凭借其独特的高光谱分辨探测能力,为全球气溶胶监测提供了重要数据支持。

本文基于 ACDL/DQ-1 卫星系统提供的高光谱分辨率激光雷达数据,并结合 AERONET 的气溶胶

光学厚度数据,在第一部分介绍了 ACDL 系统及其反演算法,以及 AERONET 数据集在气溶胶监测中的应用;第二部分展示了基于 ACDL 的数据分析结果,并与 AERONET 进行对比;第三部分选取了 2025 年 3 月中国境内沙尘地区的 ACDL 探测数据,并详细分析了沙尘气溶胶的光学参数及其分布特性;第四部分总结了本研究的主要结论,并讨论了 ACDL 在未来气溶胶监测中的潜在应用前景。

1 星载高光谱激光雷达系统及原理

大气探测激光雷达(ACDL)是大气环境监测卫星(DQ-1)的主载荷,集成了两种先进探测技术:高光谱分辨率激光雷达(HSRL)技术和积分路径差分吸收(Integral Path Differential Absorption, IPDA)技术,用于探测大气气溶胶和云的垂直分布特性,以及测量大气二氧化碳柱浓度^[15]。星载 HSRL 的系统参数如表 1 所示^[13,16]。在发射系统方面,HSRL 的激光中心波长为 532.245 nm,脉冲重复频率为 20 Hz,单脉冲能量为 130 mJ,脉冲宽度小于 50 ns。激光经扩束后,发散角小于 0.1 mrad,确保了高精度远距离探测性能。接收系统配备直径 1 m 的望远镜,接收视场角约 0.2 mrad。为了抑制背景光干扰,接收光路中引入了法布里-珀罗窄带滤波器,其滤波带宽小于 30 pm。

表 1 星载高光谱分辨率激光雷达系统参数

Table 1 Main system parameters of spaceborne HSRL

Parameters	Values
Laser wavelength	532.245 nm
Laser energy	130 mJ
Laser repetition rate	20 Hz
Laser pulse width	< 50 ns
Frequency stability (RMS)	< 2 MHz
Laser divergence angle	< 0.1 mrad
Telescope diameter	1 m
Receiving field of view	< 0.2 mrad
Filter bandwidth	< 30 pm
Data acquisition	50 M/s

HSRL 的 532 nm 波段设计了三个接收通道:垂直偏振通道、平行参考通道和高光谱分子通道,如图 1 所示。回波光信号通过法布里珀罗干涉仪滤除背景噪声,随后通过偏振分光棱镜分为垂直偏振信号和平行信号,其中垂直偏振信号由垂直偏振通道接收,平行信号一部分到达平行通道,另一部分经过高光谱鉴频器后到达高光谱通道。接收通道中

偏振通道用于提取气溶胶粒子的偏振信息,以判别粒子的形状^[17];高光谱分子通道利用碘吸收池(吸收线 1110 线)作为高光谱滤波器^[16],能够有效滤除气溶胶的米散射信号,提取大气分子的瑞利散射信号,从而实现气溶胶与大气分子信号的分离。这一设计在反演过程中规避了传统米散射激光雷达依赖假设激光雷达比求解病态方程的问题^[9]。

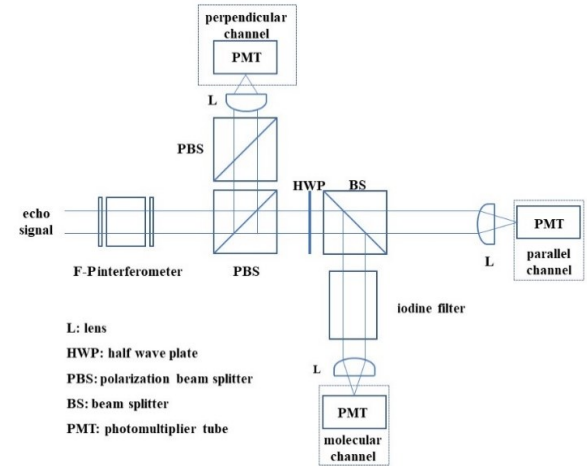


图 1 星载高光谱分辨率激光雷达接收系统图

Fig. 1 Schematic of spaceborne HSRL receiver

对于星载 HSRL,根据接收系统的三个通道的探测信号建立 3 个激光雷达方程^[16]:

$$P_c^{\perp}(r) = \frac{P_0 \eta_1 A_r L}{r^2} [\beta_m^{\perp}(r) + \beta_a^{\perp}(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \right\}, \quad (1)$$

$$P_c^{\parallel}(r) = \frac{P_0 \eta_2 A_r L}{r^2} [\beta_m^{\parallel}(r) + \beta_a^{\parallel}(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \right\}, \quad (2)$$

$$P_m^{\parallel}(r) = \frac{P_0 \eta_3 A_r L}{r^2} [T_m(r) \beta_m^{\parallel}(r) + T_a(r) \beta_a^{\parallel}(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \right\}, \quad (3)$$

式中: P_c^{\perp} 、 P_c^{\parallel} 、 P_m^{\parallel} 分别表示回波信号入射到垂直偏振通道、平行参考通道和高光谱分子通道的后向散射光功率; $\beta_a(r)$ 和 $\alpha_a(r)$ 分别表示气溶胶后向散射系数和消光系数; $\beta_m(r)$ 和 $\alpha_m(r)$ 分别表示分子后向散射系数和消光系数; P_0 为激光发射脉冲功率; A_r 为接收望远镜的接收面积; η_1 、 η_2 、 η_3 分别表示垂直偏振通道、平行参考通道和分子通道的光学效率; L 为激光发射脉冲空间长度的一半 ($L = c\Delta t/2$), 其中 C 为

光速, $\Delta t\alpha$ 为脉冲时间宽度; $T_m(r)$ 和 $T_a(r)$ 分别表示回波信号中分子瑞利散射和气溶胶米散射信号经过碘吸收池时的透过率。

本研究使用 ACDL 的二级数据产品 (L2A) 中包含的垂直偏振通道、平行参考通道和高光谱分子通道的衰减后向散射信号 (分别为 B_C^\perp 、 B_C^\parallel 和 B_M^\parallel), 反演气溶胶的光学参数。反演结果的水平分辨率为 20 km。衰减后向散射系数的计算基于以下公式:

$$B_C^\perp(r) = [\beta_m^\perp(r) + \beta_a^\perp(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \right\} \quad (4)$$

$$B_C^\parallel(r) = [\beta_m^\parallel(r) + \beta_a^\parallel(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \right\} \quad (5)$$

$$B_M^\parallel(r) = [T_m(r) \beta_m^\parallel(r) + T_a(r) \beta_a^\parallel(r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \right\} \quad (6)$$

式中: $B_i^j(r) = P_i^j(r) r^2 / [P_0 \eta_i A_r L]$, i 表示参考通道 (C) 和高光谱分子通道 (M) 两种情况, j 表示垂直 (\perp) 和平行 (\parallel) 两种情况。

δ 表示垂直通道与平行通道的衰减后向散射信号的比值:

$$\delta(r) = \frac{B_C^\perp(r)}{B_C^\parallel(r)} \quad (7)$$

式(8)中 K 的定义与 δ 类似, 即:

$$K(r) = \frac{B_C^\parallel(r)}{B_M^\parallel(r)} \quad (8)$$

联合式(4)~(8), 得到以下气溶胶后向散射系数:

$$\beta_a(r) = \beta_m(r) \frac{[1 + \delta(r)] [T_m(r) - T_a(r)] K(r)}{1 + \delta_m(r) [1 - T_a(r) K(r)]} - \beta_m(r) \quad (9)$$

根据式(4)~(8)可以得到大气光学厚度的表达式:

$$\begin{aligned} \tau(r_0) &= \int_0^{r_0} [\alpha_a(r) + \alpha_m(r)] dr \\ &= -\frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{[1 - K(r_0) T_a(r_0)] (1 + \delta_m) B_M^\parallel(r_0)}{[T_m(r_0) - T_a(r_0)] \beta_m(r_0)} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10)可得到气溶胶的消光系数 α_a :

$$\alpha_a(r_0) = \frac{\partial \tau(r_0)}{\partial r} - \alpha_m(r_0) \quad (11)$$

气溶胶的激光雷达比 S_a 为:

$$S_a(r) = \frac{\alpha_a(r)}{\beta_a(r)} \quad (12)$$

大气后向散射比 $R(r)$ 为:

$$R(r) = \frac{\beta_a(r) + \beta_m(r)}{\beta_m(r)} \quad (13)$$

气溶胶退偏振比 $\delta_p(r)$ 为:

$$\delta_p(r) = \frac{R(r) (\delta_m(r) + 1) \delta(r) - \delta_m(r) (\delta(r) + 1)}{R(r) (\delta_m(r) + 1) - (\delta(r) + 1)} \quad (14)$$

详细的去噪算法、辐射校正方法及质量验证过程已在相关文献中进行了充分的探讨和阐述, 因此在本文中不再详细展开^[18-19]。

2 激光雷达同气溶胶自动监测网络 AERONET 数据对比验证

气溶胶自动监测网 (Aerosol Robotic Network, AERONET) 是由美国国家航空航天局 NASA 和法国 PHOTONS 于 20 世纪 80 年代末联合建立的全球气溶胶监测系统, 旨在为环境监测和大气气溶胶的分布特性研究提供可靠的数据支持^[20]。AERONET 在全球范围内部署了多个地面观测站点, 能够以高时空分辨率提供气溶胶数据产品, 广泛应用于气候研究、卫星遥感验证以及大气模式评估^[21-22]。AERONET 主要使用法国 Cimel 电子公司生产的太阳光度计进行观测, 其中 CE-318-T 型设备还具备夜间观测能力, 进一步拓展了气溶胶监测的时间范围^[23]。本研究选取了亚洲和欧洲地区 AERONET 网络中数据质量等级达到 Level 2.0 的标准站点的 500 nm 气溶胶光学厚度数据作为验证基准, 与 ACDL 反演的气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 结果进行对比分析, 以评估两种观测方式在气溶胶监测中的一致性与差异性。

图 2 展示了 2022 年 6 月至 12 月期间 ACDL 与 AERONET 气溶胶光学厚度数据的对比验证结果。AOD 二维散点分布图反映了两者的相关性。在对比分析中, 本研究设定了 30 分钟的时间窗口和 50 公里的空间窗口进行数据匹配。时空窗口的选择基于既有研究^[24], 表明 AERONET 在该时空尺度内的 AOD 数据质量较高; 在数据筛选过程中, 还综合考虑了匹配点的地面高程差异以及云信号对 ACDL 的 AOD 检索的潜在影响^[18, 25]。从二维散点分布图可以看出, ACDL 和 AERONET 的 AOD 数据吻合程度较高, 拟合结果的决定系数 $R^2=0.921$ 。这一

结果初步验证了卫星观测数据与地面监测数据之间的一致性。

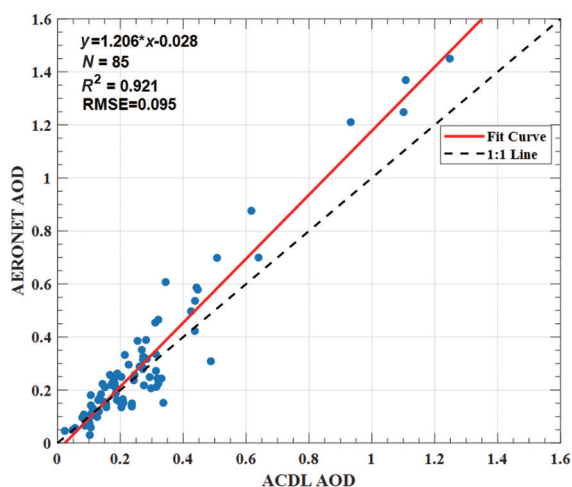


图2 ACDL和AERONET测量的气溶胶光学厚度散点图
Fig. 2 Scatterplot of aerosol optical depth measured by ACDL and AERONET

3 星载激光雷达中国境内沙尘监测结果及分析

2025年3月,我国北方地区频繁出现沙尘天气,这一现象与多重自然因素和地理条件密切相关。利用ACDL的高光谱通道数据,选取了途径沙尘区域的数据进行分析,检索得到了气溶胶粒子退偏振比(DR)、后向散射系数(BC)、消光系数(EC)和激光雷达比(LR)等光学参数剖面,并利用光学参数实现了气溶胶类型的光学阈值分类^[26]。

3.1 激光雷达白天过境典型观测数据及分析

基于大气环境监测卫星DQ-1于2025年3月23日午后的观测数据,分析表明中国中北部区域存在显著的沙尘气溶胶传输事件。图3显示,卫星星下点的气溶胶光学厚度(AOD)水平分布呈现明显的空间梯度特征。ACDL获取的1064 nm波段的衰减后向散射系数如图4所示,反演的532 nm波段的气溶胶粒子退偏振比、后向散射系数、消光系数和激光雷达比如图5所示,利用反演的光学参数、地表类型和高度等信息对相应的云和气溶胶进行分类,分类结果如图6所示。光学参数剖面图和气溶胶分类图表明,在湖北-陕西-内蒙古构成的带状区域(地理跨度约1600 km)内存在大范围沙尘气溶胶团,其垂直厚度超过4 km。该气溶胶团表现出典型的沙尘特征^[10]:粒子退偏振比集中在0.21~0.38,激光雷达比介于29~65 sr。同时,沿沙尘分布路径的AOD

空间变化显著,由背景值0.026急剧上升至峰值0.65,随后衰减至本底水平0.02,反映了沙尘的持续影响。多参数联合分析表明,图6中黑色虚线对应于高AOD区域(AOD=0.44, 36.53° N, 108.78° E),气溶胶光学参数垂直廓线图如图7所示:1~3.5 km高度层内对应增加的消光系数(0.1~0.4 km⁻¹)和退偏振比(>0.3),证实了粗模态粒子的主导地位及其对区域能见度的显著影响。

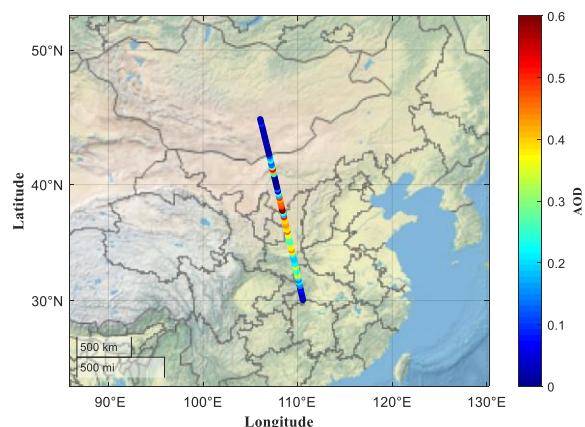


图3 2025年3月23日激光雷达获取的气溶胶光学厚度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of aerosol optical depth obtained by lidar on March 23rd, 2025

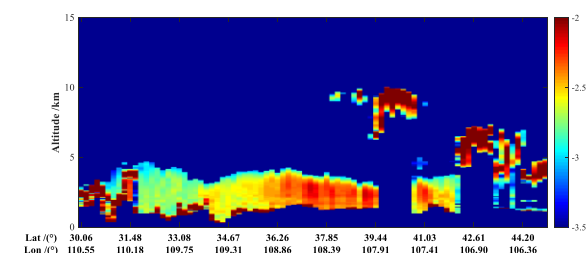


图4 2025年3月23日激光雷达获取的1064 nm波段的衰减后向散射系数

Fig. 4 Attenuated backscattering coefficients at 1064 nm obtained by lidar on March 23rd, 2025

3.2 激光雷达夜晚过境典型观测数据及分析

星载大气探测激光雷达(ACDL)2025年3月24日凌晨的观测数据表明,中国北方至东部沿海存在跨区域沙尘传输现象。卫星过境吉林-内蒙古-辽宁-渤海-山东-江苏地区的气溶胶光学厚度(AOD)空间分布特征如图8所示。ACDL获取的1064 nm通道的衰减后向散射系数如图9所示,532 nm的气溶胶光学参数反演结果和分类结果如图10和图11所示。结果表明,该区域对流层内存在垂直厚度超

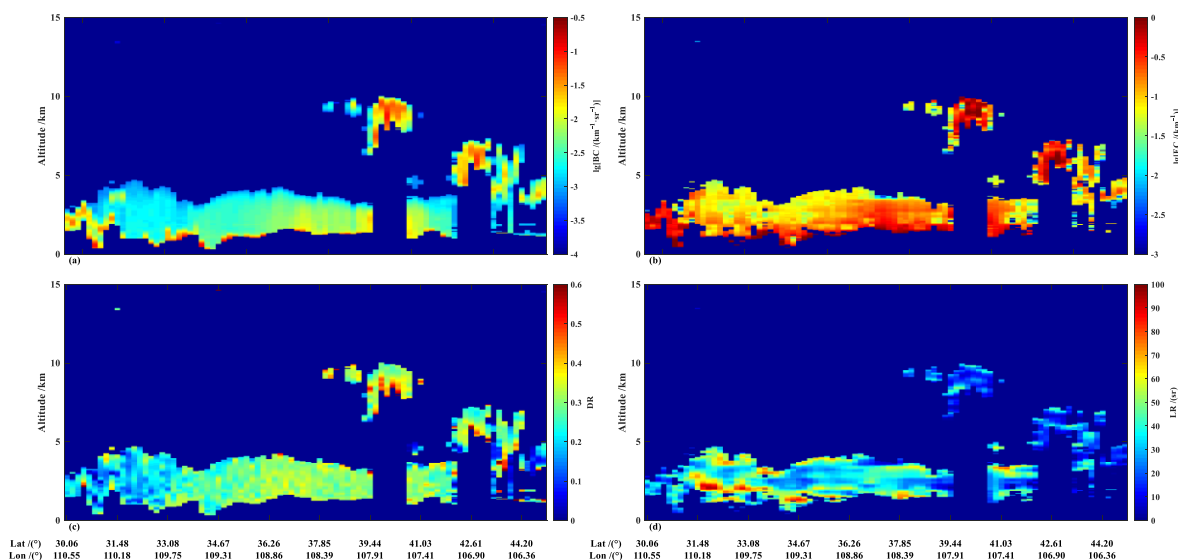


图5 2025年3月23日激光雷达获取的云和气溶胶光学参数剖面:(a)后向散射系数;(b)消光系数;(c)粒子退偏振比;(d)激光雷达比
Fig. 5 Cloud and aerosol optical parameter profiles obtained by lidar on March 23rd, 2025: (a) backscattering coefficient; (b) extinction coefficient; (c) depolarization ratio; (d) lidar ratio

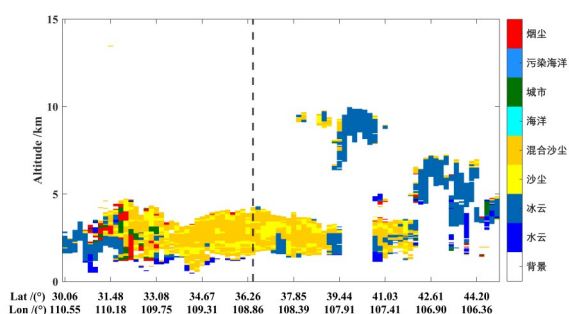


图6 2025年3月23日云和气溶胶分类结果
Fig. 6 Cloud and aerosol classification on March 23rd, 2025

过4 km的沙尘气溶胶层,其水平扩散范围跨越海陆交界约1 800 km。定量分析表明,沙尘气溶胶团呈现典型非球形粒子特征:退偏振比值介于0.19~0.34,激光雷达比分布在38~60 sr。沿卫星轨迹的AOD演变呈现以下特征:从吉林地区的0.14快速抬升至辽宁上空的0.48,随后在渤海至山东持续提升至峰值0.87,最终在江苏西部地区降至正常水平。同时选取了单个星下点(40.45° N, 121.42° E)的气溶胶光学参数垂直廓线结果,如图12所示,在0.5~3.9 km高度范围内气溶胶退偏振比(0.22~0.32)与激光雷达比(35~53 sr)揭示了该海面上空出现沙尘入侵,与人为排放气溶胶交互作用,形成沙尘气溶胶混合模态。结果表明,沙尘气溶胶不仅影响华北陆地,更通过长距离传输扩散至渤海海域,为研究沙尘气溶胶的海路传输提供了新的观测数据。

4 结论与展望

本研究介绍了ACDL/DQ-1星载高光谱分辨率激光雷达系统及数据反演方法,利用地面太阳光度计气溶胶自动监测网络AERONET数据,验证了气溶胶光学厚度结果的准确性。ACDL反演的气溶胶光学厚度与AERONET产品具有高度一致性,两者相关性 R^2 为0.921,表明ACDL在气溶胶分布监测中的可靠性和准确性。研究并分析了2025年3月中国地区沙尘气溶胶事件中星载激光雷达测量的气溶胶剖面光学特性,在中国区域ACDL不仅揭示了沙尘气溶胶的输送,还提供了气溶胶详细的垂直廓线分布特征,这是被动卫星遥感技术难以实现的优势之一,未来可以进一步利用激光雷达数据分析颗粒物垂直分布的质量浓度。星载高光谱分辨率激光雷达系统在气溶胶研究中具有独特价值,尤其是在沙尘等复杂动态气溶胶事件中的应用潜力。未来,结合卫星观测、地基观测与数值模拟,有望更全面地揭示沙尘气溶胶的物理机制及其气候效应。ACDL凭借其先进的高光谱分辨率探测技术,正在全球气候变化研究和环境监测中发挥不可或缺的作用。

References

- [1] Prather K A, Hatch C D, Grassian V H. Analysis of atmospheric aerosols [J]. Annual Review of Analytical Chemistry, 2008, 1(1): 485-514.

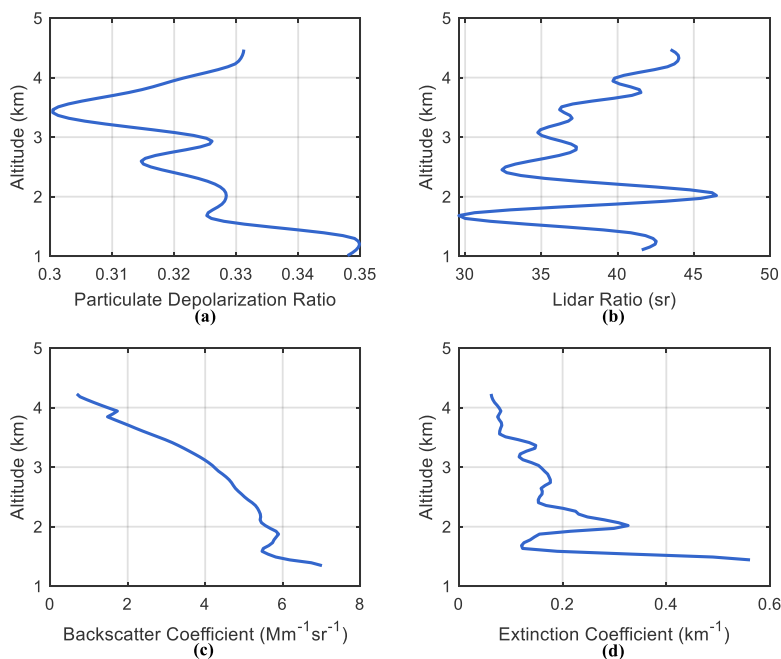


图7 2025年3月23日激光雷达在36.53° N, 108.78° E获取的气溶胶光学参数垂直廓线:(a)粒子退偏振比;(b)激光雷达比;(c)后向散射系数;(d)消光系数

Fig. 7 Aerosol optical parameter profiles obtained by lidar at 36.53° N, 108.78° E on March 23rd, 2025: (a) depolarization ratio; (b) lidar ratio; (c) backscattering coefficient; (d) extinction coefficient

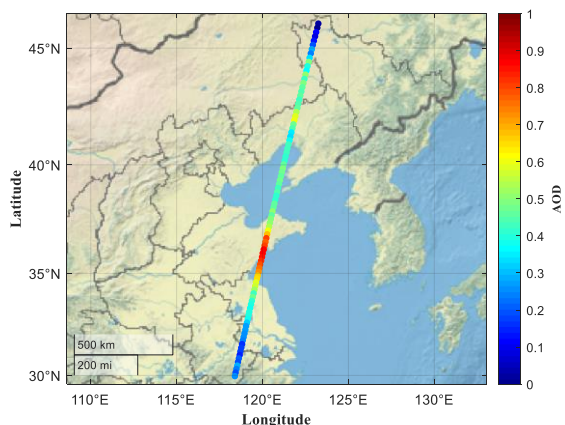


图8 2025年3月24日激光雷达获取的气溶胶光学厚度空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of aerosol optical depth obtained by lidar on March 24th, 2025

- [2] Calvo A I, Alves C, Castro A, et al. Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 120–121: 1–28.
- [3] Sathesh S, Moorthy K. Radiative effects of natural aerosols: A review [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39 (11): 2089–2110.
- [4] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 215–223.

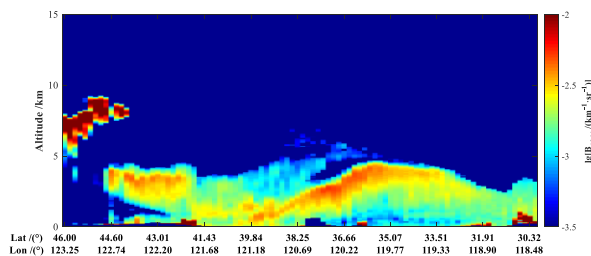


图9 2025年3月24日激光雷达获取的1064 nm波段的衰减后向散射系数

Fig. 9 Attenuated backscattering coefficients at 1064 nm obtained by lidar on March 24th, 2025

- [5] Song Q, Zhang Z, Yu H, et al. Global dust optical depth climatology derived from CALIOP and MODIS aerosol retrievals on decadal time scales: regional and interannual variability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(17): 13369–13395.
- [6] King M D, Menzel W P, Kaufman Y J, et al. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41 (2): 442–458.
- [7] Ma X, Bartlett K, Harmon K, et al. Comparison of AOD between CALIPSO and MODIS: significant differences over major dust and biomass burning regions [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(9): 2391–2401.
- [8] Remer L A, Mattoo S, Levy R C, et al. MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective [J]. *Atmo-*

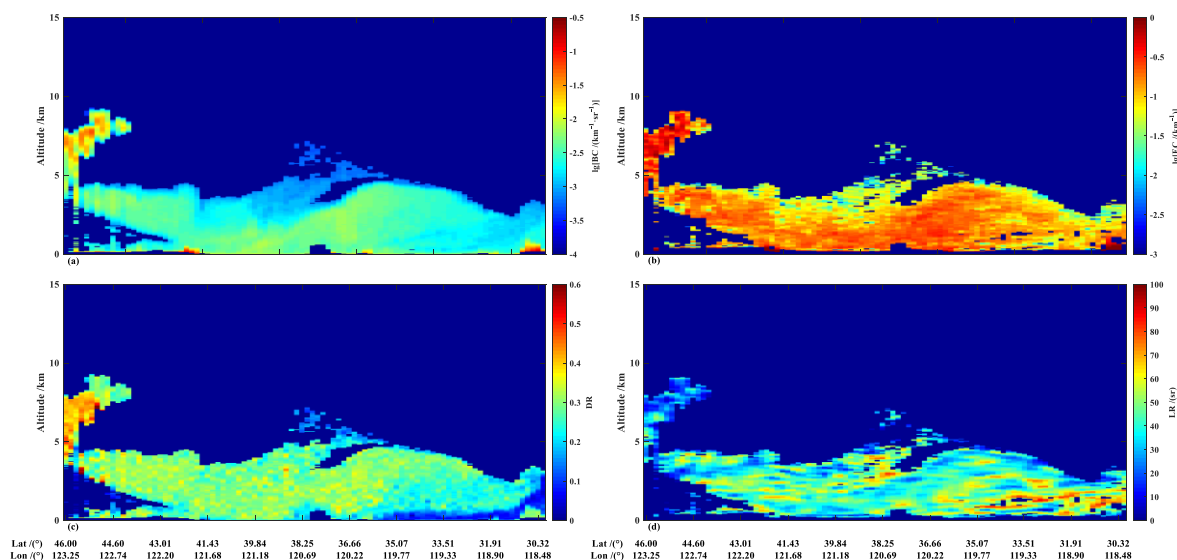


图10 2025年3月24日激光雷达获取的云和气溶胶光学参数剖面:(a)后向散射系数;(b)消光系数;(c)粒子退偏振比;(d)激光雷达比

Fig. 10 Cloud and aerosol optical parameter profiles obtained by lidar on March 24th, 2025: (a) backscattering coefficient; (b) extinction coefficient; (c) depolarization ratio; (d) lidar ratio

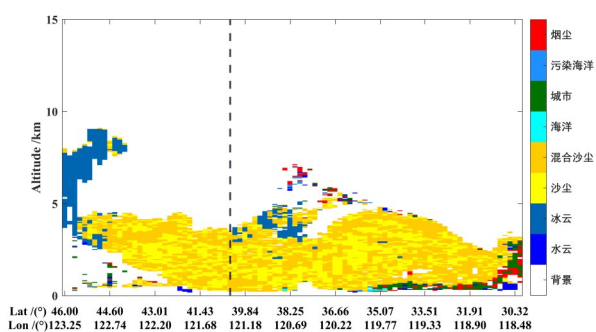


图11 2025年3月24日云和气溶胶分类结果

Fig. 11 Cloud and aerosol classification on March 24th, 2025

spheric Measurement Techniques, 2013, 6 (7) : 1829–1844.

- [9] Comerón A, Constantino M P, Francesc R, et al. Current research in Lidar technology used for the remote sensing of atmospheric aerosols [J]. Sensors, 2017, 17(6): 1450.
- [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] Dai G, Sun K, Wang X, et al. Dust transport and advection measurement with spaceborne lidars ALADIN and CALIOP and model reanalysis data [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2022, 22(12): 7975–7993.
- [12] Donovan D P, Van Zadelhoff G J, Wang P. The EarthCARE lidar cloud and aerosol profile processor (A-PRO): the A-AER, A-EBD, A-TC and A-ICE products [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2024, 17

(17): 5301–5340.

- [13] Fan C, Chen C, Liu J, et al. Preliminary analysis of global column-averaged CO₂ concentration data from the spaceborne aerosol and carbon dioxide detection lidar on-board AEMS [J]. Optics Express, 2024, 32 (12) : 21870–21886.
- [14] Di H, Zhang Z, Hua H, et al. Optimization design of spectral discriminator for high-spectral-resolution lidar based on error analysis [J]. Optics Express, 2017, 25 (5): 5068–5080.
- [15] Ke J, Sun Y, Dong C, et al. Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration [J]. Photonix, 2022, 3: 17.
- [16] Dong J, Liu J, Bi D, et al. Optimal iodine absorption line applied for spaceborne high spectral resolution lidar [J]. Applied Optics, 2018, 57(19): 5413–5419.
- [17] Liu Q, Huang Z, Liu J, et al. Validation of initial observation from the first spaceborne high-spectral-resolution lidar with a ground-based lidar network [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2024, 17(5): 1403–1417.
- [18] Zha C, Bu L, Li Z, et al. Aerosol optical properties measurement using the orbiting high-spectral-resolution lidar onboard DQ-1 satellite: retrieval and validation [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2024, 17 (14) : 4425–4443.
- [19] Dai G, Wu S, Long W, et al. Aerosols and clouds data processing and optical properties retrieval algorithms for the spaceborne ACDL/DQ-1 [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2024, 17(7): 1879–1890.
- [20] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sensing of Environment,

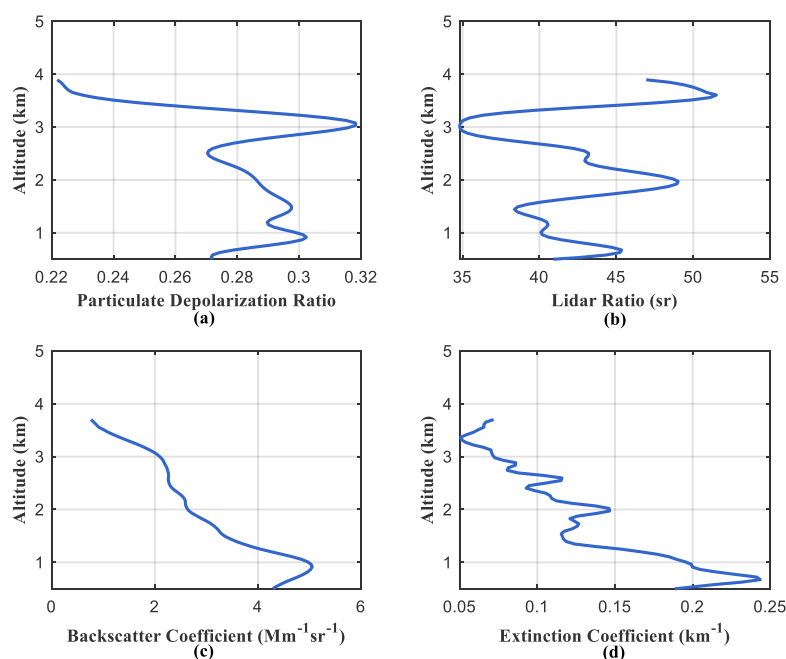


图 12 2025 年 3 月 24 日激光雷达在 40.45°N , 121.42°E 获取的气溶胶光学参数垂直廓线: (a) 粒子退偏振比; (b) 激光雷达比; (c) 后向散射系数; (d) 消光系数

Fig. 12 Aerosol optical parameter profiles obtained by lidar at 40.45°N , 121.42°E on March 24th, 2025: (a) depolarization ratio; (b) lidar ratio; (c) backscattering coefficient; (d) extinction coefficient

1998, 66(1): 1–16.

- [21] Shi H, Xiao Z, Zhan X, et al. Evaluation of MODIS and two reanalysis aerosol optical depth products over AERONET sites [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 220: 75–80.
- [22] Kambezidis H D, Kaskaoutis D G. Aerosol climatology over four AERONET sites: An overview [J]. *Atmospheric environment*, 2008, 42(8): 1892–1906.
- [23] Barreto A, Emilio C, Granados-Muñoz M J, et al. The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer – a comprehensive performance evaluation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(2): 631–654.
- [24] Schuster G L, Vaughan M, Macdonnell D, et al. Comparison of CALIPSO aerosol optical depth retrievals to

AERONET measurements, and a climatology for the lidar ratio of dust [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012, 12(16): 7431–7452.

- [25] Omar A H, Winker D M, Tackett J L, et al. CALIOP and AERONET aerosol optical depth comparisons: One size fits none [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(10): 4748–4766.
 - [26] Hu Jian-Bo, Wang Xiong, Zhao Shao-Hua, et al. Spaceborne high spectral resolution lidar for atmospheric aerosols and clouds profiles measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 1–10.
- 胡建波, 王雄, 赵少华, 等. 星载高光谱分辨率激光雷达大气气溶胶和云探测研究 [J]. *光学学报*, 2023, 43(18): 1–10.