

光学学报

星载高光谱分辨率激光雷达大气气溶胶和云探测研究

胡建波^{1,2}, 王雄^{1,3}, 赵少华⁴, 王中挺⁴, 杨巨鑫^{1,2,5}, 戴光耀⁶, 谢缘¹, 竹孝鹏^{1,2,5}, 刘东⁷, 侯霞^{1,2,5,8}, 刘继桥^{1,2,5,8**}, 陈卫标^{2,5,8*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

⁴生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

⁵中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

⁶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;

⁷浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;

⁸崂山实验室, 山东 青岛 266237

摘要 为实现对全球气溶胶光学参数剖面的高精度测量,采用基于碘分子滤波器的高光谱分辨率探测技术。结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的大气再分析数据集(ERA5)的温度和压强数据,选取在轨期间途经撒哈拉沙漠和加拿大山火区域的星载高光谱分辨率激光雷达(HSRL)的观测数据,对沙尘类气溶胶和烟尘类气溶胶的光学特性进行分析,包括气溶胶的后向散射系数、消光系数、退偏振比和雷达比。结果表明:撒哈拉沙漠地区近地面5 km以内的气溶胶分布主要以沙尘类气溶胶为主,其退偏振比集中在0.2~0.4,雷达比数值集中在40~60 sr;加拿大山火地区的气溶胶主要以烟尘类气溶胶为主,其退偏振比集中在0.02~0.15,雷达比在50~70 sr范围。激光雷达特有的高光谱探测技术,在气溶胶和云的精细化探测和分类方面具有重要应用,将在环境监测中发挥重要作用。

关键词 大气气溶胶; 云; 气溶胶光学参数; 星载激光雷达; 高光谱分辨率探测技术

中图分类号 P412.27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231437

1 引言

气溶胶在地球大气的组成成分中占比较低,但对全球的辐射收支平衡以及气候变化有着不可估量的影响。大气气溶胶一般从以下两个方面对全球的气候变化造成影响:通过散射和吸收影响全球辐射收支平衡,从而产生直接影响;作为云的凝结核影响云的光学特性和降水,从而产生间接影响^[1]。在预测气候变化方面,最重要的未知量为气溶胶和云的辐射效应之间的关系^[2]。为了确定大气中的气溶胶分布及其变化规律,对大气中的气溶胶进行高时空分辨率的高精度观测是十分重要的^[3]。激光雷达作为一种主动遥感探测工具,具有高时空分辨率和昼夜连续探测的优势,被广泛应用于大气气溶胶的探测。大气遥感激光雷达中,相较于传统的米散射激光雷达,高光谱分辨率激光雷

达(HSRL)可以分离大气气溶胶米散射信号和分子的瑞利散射信号,从而能够避免传统米散射激光雷达反演中需要假设激光雷达比误差较大的问题,其不仅能直接反演出气溶胶的光学参数,包括后向散射系数、消光系数和雷达比,还能获得更高的气溶胶光学参数反演精度^[4],是大气遥感激光雷达的一个重要发展方向。

国际上 Fiocco 等^[5]在 1968 年提出了 HSRL 的基本概念。随后, Shimizu 等^[6]对基于钡原子滤波器的 HSRL 系统展开了相关研究。1994 年, Piironen 等^[7]详细介绍了基于碘分子滤波器的 HSRL 系统。2004 年,欧洲航天局提出了 EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) 星载激光雷达计划, EarthCARE 有效载荷由 4 个仪器组成,其中云和气溶胶探测激光雷达 ATLID (Atmospheric Backscatter Lidar) 在 355 nm 波段采用基于法布里-珀罗(F-P)干涉

收稿日期: 2023-08-17; 修回日期: 2023-08-19; 录用日期: 2023-08-22; 网络首发日期: 2023-09-05

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)

通信作者: *wbchen@siom.ac.cn; **liujiqiao@siom.ac.cn

仪滤波器的高光谱探测体制^[8],计划于2024年发射。自2006年起,美国国家航空航天局(NASA)兰利研究中心利用机载高光谱分辨率激光雷达系统(HSRL-1)开展飞行实验,对多个观测地区的不同类型的气溶胶垂直分布特征及光学参数进行了准确的探测^[9]。随后,NASA兰利研究中心在HSRL-1的基础上进行优化和提升,集成了性能更好的多波长机载HSRL-2系统并进行相关的飞行实验,得到了观测区域精确的气溶胶微物理特征^[10]。2015年,NASA在搭载于空间站的云-气溶胶传输系统(CATS)设计了高光谱探测通道,但由于仪器故障,高光谱通道并没有成功开启^[11]。国内从2008年起,中国海洋大学的宋小全等^[1]利用研制的基于碘分子滤波器的HSRL系统开展相关实验,结果表明该系统在气溶胶光学参数测量方面显示出优越性。自2012年起,浙江大学的刘东课题组在高光谱鉴频器技术与应用方面开展了研究,分析比较了视场展宽的迈克耳孙干涉仪和F-P干涉仪作为高光谱滤波器的探测性能^[12-13]。2019年,中国科学院上海光学精密机械研究所的徐俊杰等^[14]在秦皇岛地区开展了机载HSRL飞行实验,对该地区的气溶胶垂直分布及光学特性进行了研究。2022年4月16日,由中国科学院上海光学精密机械研究所研制的大气探测激光雷达(ACDL)随着大气环境监测(DQ-1)卫星成功发射,ACDL搭载的负责探测大气气溶胶的HSRL系统成功在轨工作,并在轨连续工作超1年,为全球气溶胶的精准探测和科学应用提供了重要数据。

本文介绍了ACDL基于碘分子滤波器的星载HSRL系统,并利用HSRL系统的测量数据,通过数据预处理和数据反演得到气溶胶的退偏振比、后向散射系数、消光系数和激光雷达比等重要光学参数。同时,选取2022年6月途经撒哈拉沙漠地区和2023年6月途经加拿大山火地区的ACDL探测数据,分析了不同气溶胶类型的光学参数的垂直分布特征及变化特征。

2 星载HSRL系统及气溶胶光学参数反演方法

2.1 星载HSRL系统原理

星载HSRL系统的主要指标参数如表1所示。系统中532 nm探测通道采用基于碘分子滤波器的高光谱探测方法对气溶胶进行探测,选用1110 nm的碘分子吸收线作为高光谱滤波器^[15]。激光在大气中传输时,散射粒子的多普勒展宽主要影响激光的散射光谱,其中大气分子的瑞利散射光谱展宽相对较大,而气溶胶的米散射光谱宽度较窄,与瑞利散射光谱宽度相比,可以忽略不计。因此,当激光雷达采用窄线宽激光器作为光源时,激光雷达接收的分子瑞利散射信号和气溶胶米散射信号的光谱宽度有明显差异^[16],使用碘分子滤波器可以有效滤除气溶胶米散射信号,得到纯分

子信号,实现了气溶胶信号和大气分子信号的分离,避免了米散射激光雷达反演中需要假设激光雷达比求解病态方程的问题,从而可以直接反演出气溶胶的后向散射系数、消光系数和激光雷达比等光学参数^[17]。

表1 星载HSRL主要系统参数

Table 1 Main system parameters of spaceborne HSRL

| Parameter | Value |
|--|---------|
| Wavelength /nm | 532.245 |
| Laser energy /mJ | 150 |
| Laser pulse width /ns | 35 |
| Pulse repeat frequency /Hz | 20 |
| Line width /MHz | <50 |
| Frequency stability (RMS) /MHz | <2 |
| Diverging angle /mrad | 0.05 |
| Telescope diameter /m | 1 |
| Field of view /mrad | 0.19 |
| Filter bandwidth /pm | <30 |
| Data acquisition /($MSa \cdot s^{-1}$) | 50 |

星载HSRL接收系统可以简化为三探测通道结构,如图1所示。回波光信号通过窄带滤光片和F-P干涉仪组合滤除背景噪声,回波光信号经过偏振分光棱镜后会分光为垂直偏振分量和平行分量,其中垂直偏振分量经过偏振分光棱镜后由垂直偏振通道光电倍增管(PMT)接收,平行分量会依次经过偏振分光棱镜、半波片、分光镜分光后,一部分到达平行通道PMT,另一部分经过碘分子滤波器后到达高光谱通道PMT。

通过HSRL探测接收系统,分别得到平行通道、垂直偏振通道和高光谱通道的气溶胶散射信号和纯分子散射信号。通过对这3个通道的信号进行求解即可直接得到气溶胶的退偏振比、后向散射系数、消光系数和激光雷达比等光学参数。

2.2 气溶胶光学参数的基本反演算法

对于气溶胶高光谱分辨率激光雷达,根据接收系统的三通道探测信号建立3个激光雷达方程:

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

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

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

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

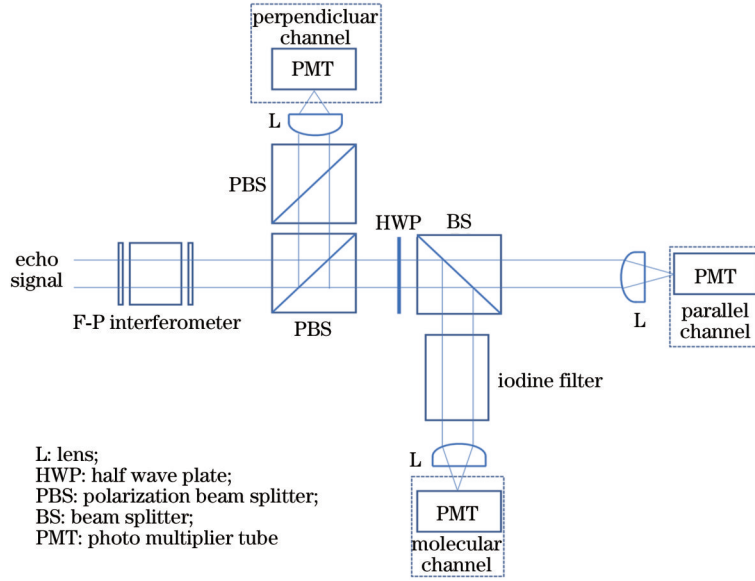


图 1 高光谱分辨率激光雷达接收系统图

Fig. 1 Schematic of HSRL receiver

通道的后向散射光功率、平行参考通道的后向散射光功率和高光谱分子通道的光功率; $\beta_a(r)$ 和 $\beta_m(r)$ 分别表示探测距离为 r 时的大气气溶胶后向散射系数和空气分子的后向散射系数; 上标“ \perp ”和“ \parallel ”分别表示垂直偏振和平行; $\alpha_a(r)$ 和 $\alpha_m(r)$ 分别表示探测距离为 r 时的大气气溶胶消光系数和空气分子的消光系数; P_0 为激光发射脉冲功率; A_r 为接收望远镜的接收面积; $\psi(r)$ 表示距离为 r 时的雷达重叠因子; 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 $c = 299792.458 \text{ km/s}$ 为光速, Δt 为脉冲宽度; $T_m(r)$ 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。

为了方便描述计算过程, 定义垂直偏振通道、平行参考通道和高光谱分子通道的衰减后向散射信号(经过距离和系统常数校正的信号) $B_C^\perp, B_C^\parallel, B_M^\parallel$ 分别为

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

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

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

式中: $B_{i,j}(r) = P(r)r^2 [P_0 \eta_i A_r L \psi(r)]$, 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。引入 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

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

式中: δ_m 为大气分子的退偏振比, 可以通过大气模型获得^[18]。分子消光系数、分子后向散射系数、碘分子滤波器的分子透过率和气溶胶透过率等的计算在相关论文^[14, 19]中有详细说明。本文在计算以上参数时温度和压强数据取自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的大气再分析数据集(ERA5)的廓线数据。

大气光学厚度是气溶胶消光系数和分子消光系数在激光路径上的积分, 因此根据式(4)~(8)可以得到大气光学厚度的表达式:

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

根据式(10)可得到气溶胶的消光系数 α_a :

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

在利用式(11)计算气溶胶消光系数时, 采用最小

二乘曲线拟合求斜率的方法计算各高度层的消光系数。气溶胶的激光雷达比 S_a 为

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

2.3 气溶胶分类基本方法

根据 2.2 节反演得到的气溶胶主要光学参数, 可进一步求得大气散射比和气溶胶退偏振比。大气散射比 $R_{SR}(r)$ 为

$$R_{SR}(r) = \frac{\beta_a(r) + \beta_m(r)}{\beta_m(r)}, \quad (13)$$

气溶胶退偏振比 $\delta_p(r)$ 为

$$\delta_p(r) = \frac{R_{SR}(r)(\delta_m + 1)\delta(r) - \delta_m[\delta(r) + 1]}{R_{SR}(r)(\delta_m + 1) - [\delta(r) + 1]}. \quad (14)$$

根据不同类型气溶胶光学参数的差异, 利用卫星数据的反演结果以及探测位置的地表类型和高度等信息对气溶胶进行分类。结合 NASA 的云和气溶胶激光雷达 (CALIPSO) 第四版 (V4) 的气溶胶分类算法^[20] 给出的几种典型气溶胶的光学参数参考值, 对 ACDL 探测的气溶胶沿垂直方向进行分类, 具体的分类流程图如图 2 所示。根据气溶胶类型分类流程, 将卫星探测的气溶胶分为沙尘气溶胶、混合沙尘气溶胶、海洋气溶胶、城市气溶胶、污染海洋气溶胶和烟尘气溶胶等六类, 并结合典型气溶胶类型和事件进行分析。

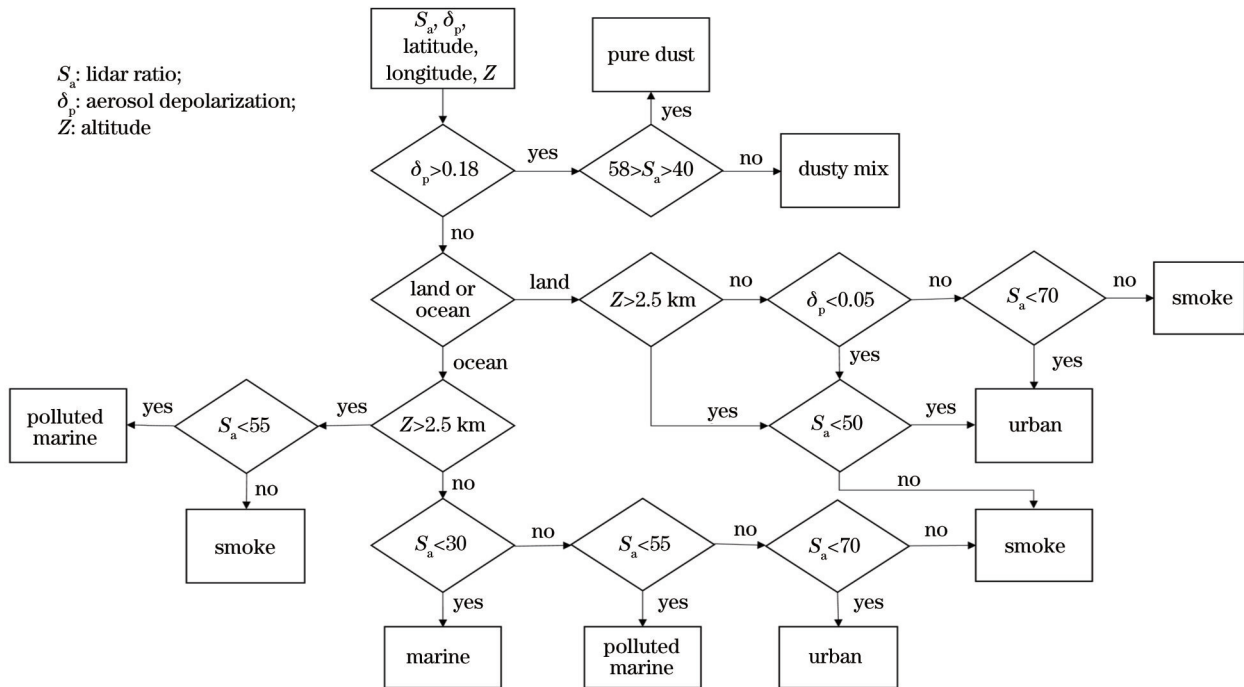


图 2 气溶胶分类流程图

Fig. 2 Flowchart of aerosol classification

3 星载激光雷达在轨数据测量结果

自 DQ-1 卫星发射以来, ACDL 已经连续工作一年多, 采集了大量全球气溶胶和云的廓线数据。使用前文所述方法对这些遥感数据进行处理, 得到云和气溶胶退偏振比 (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。为了更好地展示气溶胶和云光学参数廓线反演结果, 本文选取一些典型地区及典型事件进行气溶胶数据的展示与分析。

3.1 沙漠地区气溶胶分析

撒哈拉沙漠作为全球最大的沙漠, 一直是全球最大的沙尘源, 因此选取 DQ-1 卫星经过撒哈拉沙漠的一轨数据进行分析。这一轨数据于 2022 年 6 月 27 日 [这里所指的时间以及后文中提及的时间均为世界标准时间 (UTC)] 采集, 轨迹从东欧到非洲。为了更好

地突出撒哈拉沙漠气溶胶类型, 主要截取了从地中海开始横穿撒哈拉沙漠, 到达几内亚湾的卫星数据, 卫星运行轨迹如图 3 所示, 激光雷达获取的 532 nm 波段平

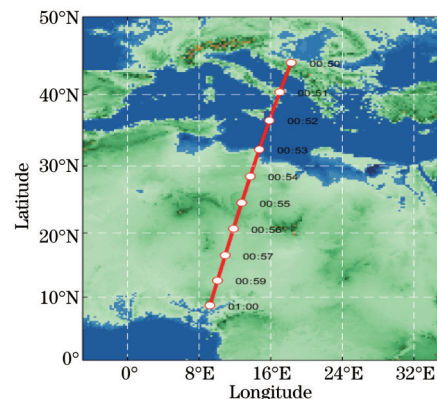


图 3 2022 年 6 月 27 日 DQ-1 卫星运行轨迹

Fig. 3 Flight trajectory of DQ-1 satellite on June 27, 2022

行通道、偏振通道和高光谱分子通道的衰减后向散射系数如图 4 所示,对应气溶胶光学参数的处理结果如图 5 所示,其水平分辨率为 20 km,垂直分辨率为 48 m,横坐标为雷达指向点的经纬度,纵坐标为海拔高度。此外,根据图 5 所示的退偏振比和激光雷达比以及探测位置的地表类型和高度等信息对卫星探测的气溶胶进行分类,结果如图 6 所示。结合图 5 和图 6 可以看到,卫星经过撒哈拉沙漠地区时,在 0~5 km 高度检测到垂直和水平路径的大范围气溶胶,其退偏振比集中在 0.2~0.4,雷达比集中在 40~60 sr,处于沙尘和混合沙尘气溶胶的通常范围,因此图 5 所示的气溶胶被分为沙尘和混合沙尘气溶胶,这符合撒哈拉沙漠的一般气溶胶类型。

分类,结果如图 6 所示。结合图 5 和图 6 可以看到,卫星经过撒哈拉沙漠地区时,在 0~5 km 高度检测到垂直和水平路径的大范围气溶胶,其退偏振比集中在 0.2~0.4,雷达比集中在 40~60 sr,处于沙尘和混合沙尘气溶胶的通常范围,因此图 5 所示的气溶胶被分为沙尘和混合沙尘气溶胶,这符合撒哈拉沙漠的一般气溶胶类型。

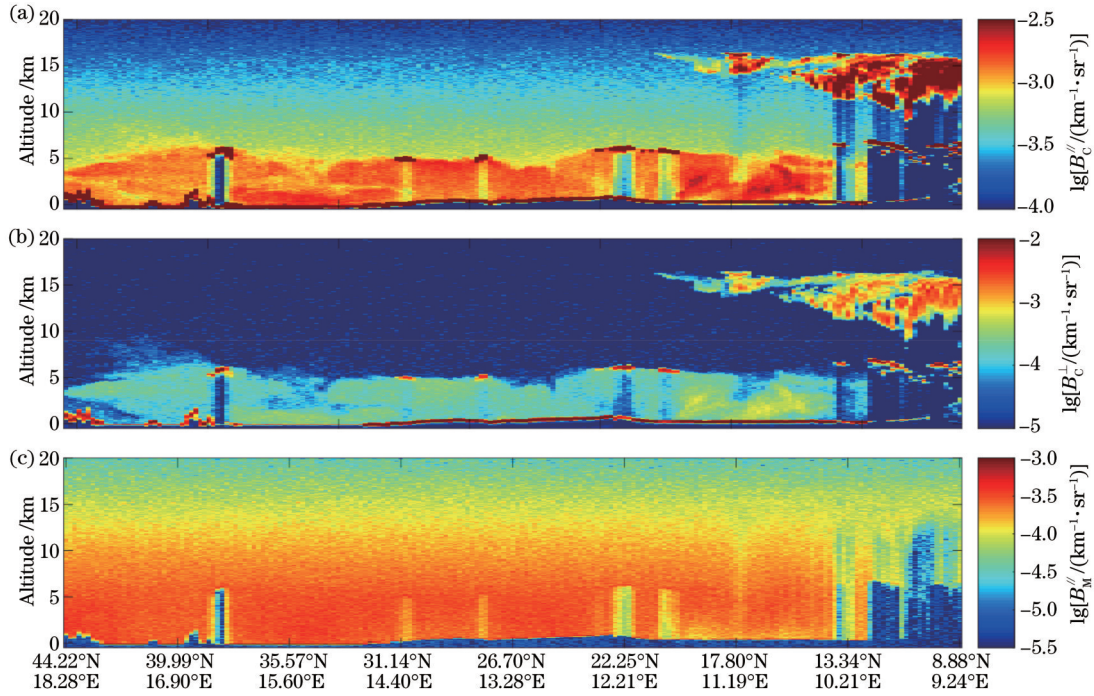


图 4 2022 年 6 月 27 日激光雷达获取的 532 nm 波段的衰减后向散射系数。(a)平行通道;(b)偏振通道;(c)高光谱分子通道
Fig. 4 Attenuated backscattering coefficients at 532 nm obtained by lidar on June 27, 2022. (a) Parallel channel; (b) perpendicular channel; (c) high spectral resolution molecular channel

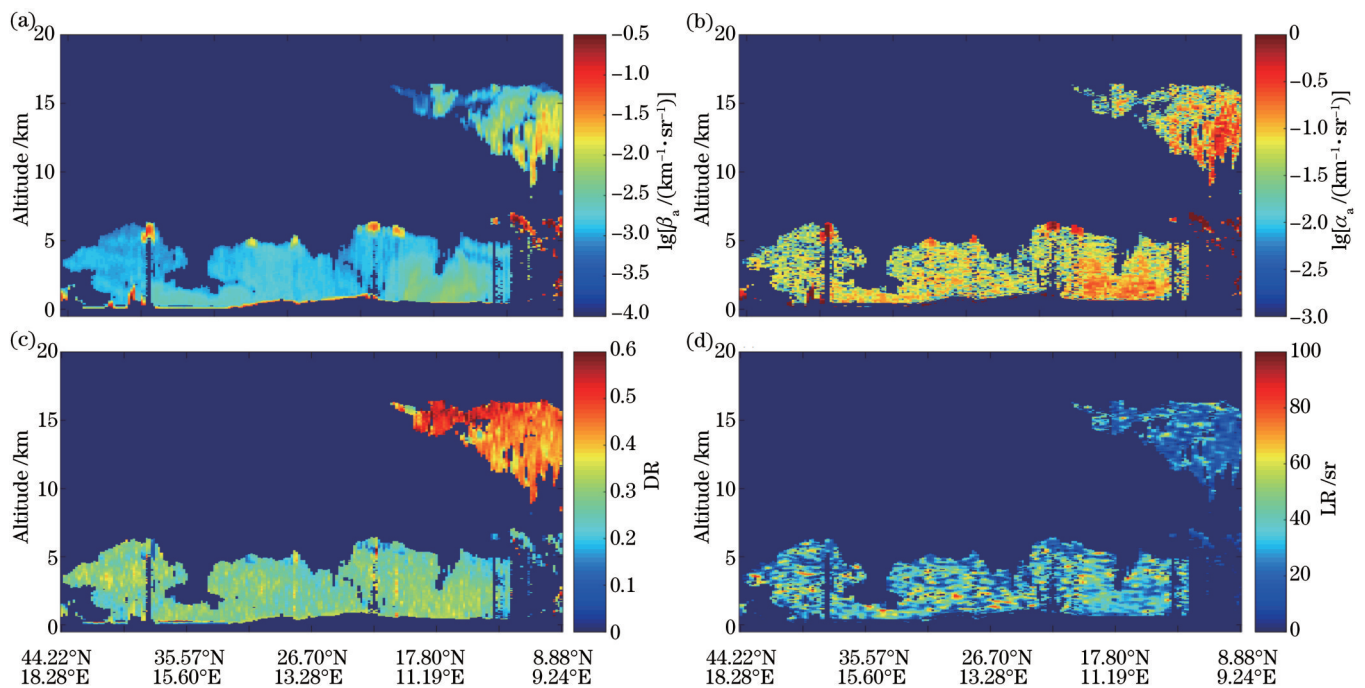


图 5 2022 年 6 月 27 日激光雷达获取的云和气溶胶光学参数剖面。(a)后向散射系数;(b)消光系数;(c)粒子退偏振比;(d)激光雷达比
Fig. 5 Cloud and aerosol optical parameter profiles obtained by lidar on June 27, 2022. (a) Backscattering coefficient; (b) extinction coefficient; (c) depolarization ratio; (d) lidar ratio

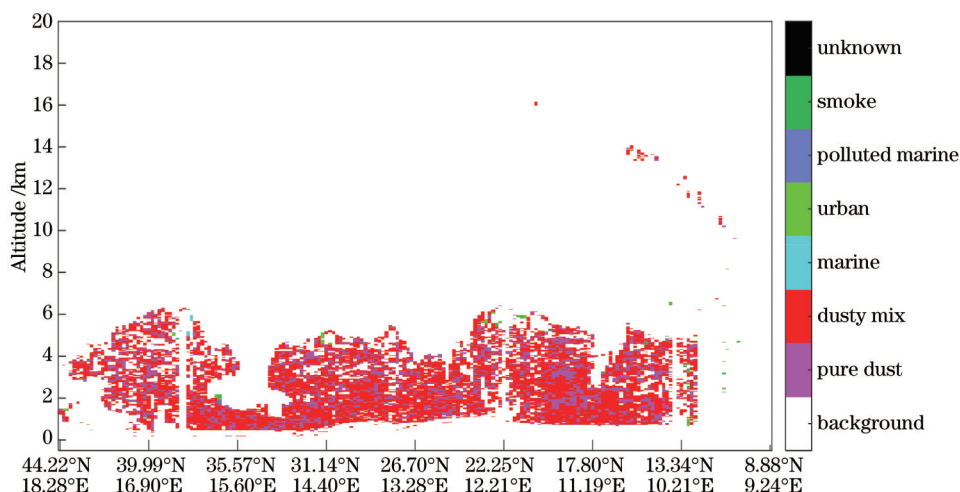


图 6 2022 年 6 月 27 日气溶胶分类结果

Fig. 6 Aerosol classification on June 27, 2022

3.2 森林火灾地区气溶胶分析

自 2023 年 5 月起,加拿大山火灾害不断发生,对大气环境已经造成很大的影响。为了研究山火对气溶胶的影响,选取 2023 年 6 月 5 日的 DQ-1 卫星采集的一轨数据,卫星运行轨迹如图 7 所示,激光雷达获取的 532 nm 波段平行通道、偏振通道和高光谱分子通道的衰减后向散射系数如图 8 所示,数据反演结果如图 9、图 10 所示。43.19°N 左右以北为加拿大境内,43.19°N 左右以南则在美国境内。在 55.27°N~47.23°N 范围即加拿大上空 5~10 km 处探测到大范围的气溶胶,其退偏振比集中在 0.02~0.15 范围内,激光雷达比在 50~70 sr 范围内,该气溶胶主要为烟尘,这是因为加拿

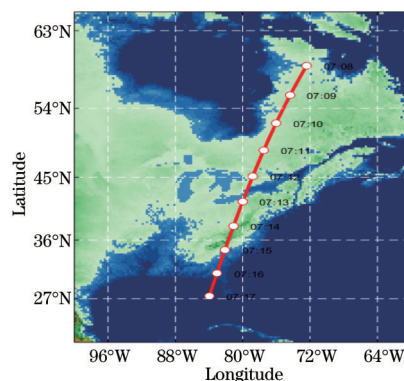


图 7 2023 年 6 月 5 日 DQ-1 卫星运行轨迹

Fig. 7 Flight trajectory of DQ-1 satellite on June 5, 2023

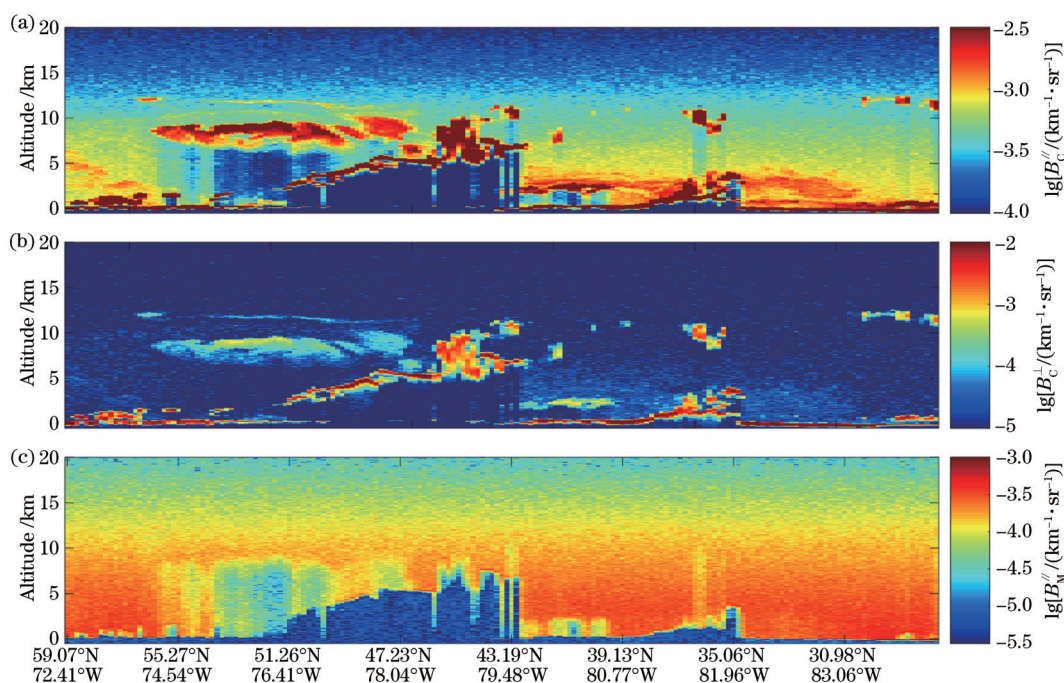


图 8 2023 年 6 月 5 日激光雷达获取的 532 nm 波段的衰减后向散射系数。(a) 平行通道;(b) 偏振通道;(c) 高光谱分子通道

Fig. 8 Attenuated backscattering coefficients at 532 nm obtained by lidar on June 5, 2023. (a) Parallel channel; (b) perpendicular channel; (c) high spectral resolution molecular channel

大山火产生的大量烟尘,随上升的气流抬升到此高度,形成气溶胶团。在 43.19°N 左右美国和加拿大边境处,在 3~4 km 的高度上也出现不少的烟尘气溶胶,一

直到 35.06°N 左右(已经到达美国境内)烟尘气溶胶才被城市气溶胶代替,可见加拿大山火的影响范围之大。

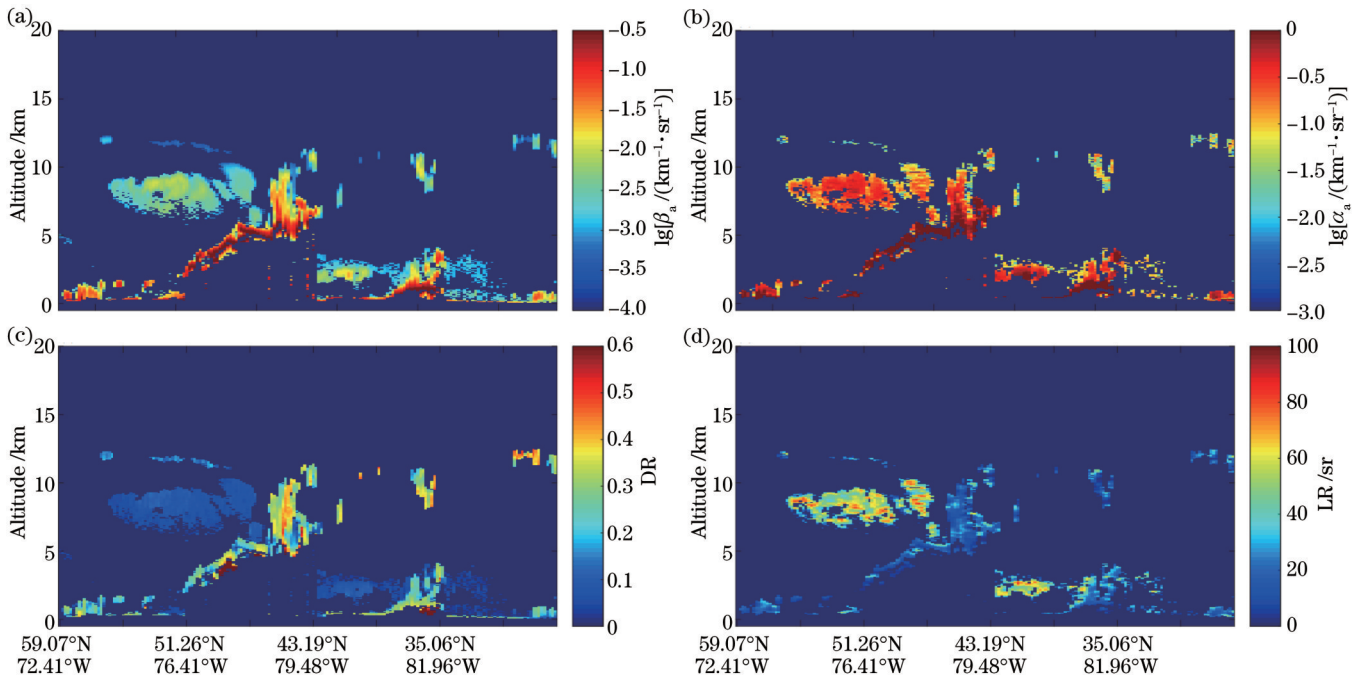


图 9 2023 年 6 月 5 日激光雷达获取的云和气溶胶光学参数剖面。(a)后向散射系数;(b)消光系数;(c)粒子退偏振比;(d)激光雷达比
Fig. 9 Cloud and aerosol optical parameter profiles obtained by lidar on June 5, 2023. (a) Backscattering coefficient; (b) extinction coefficient; (c) depolarization ratio; (d) lidar ratio

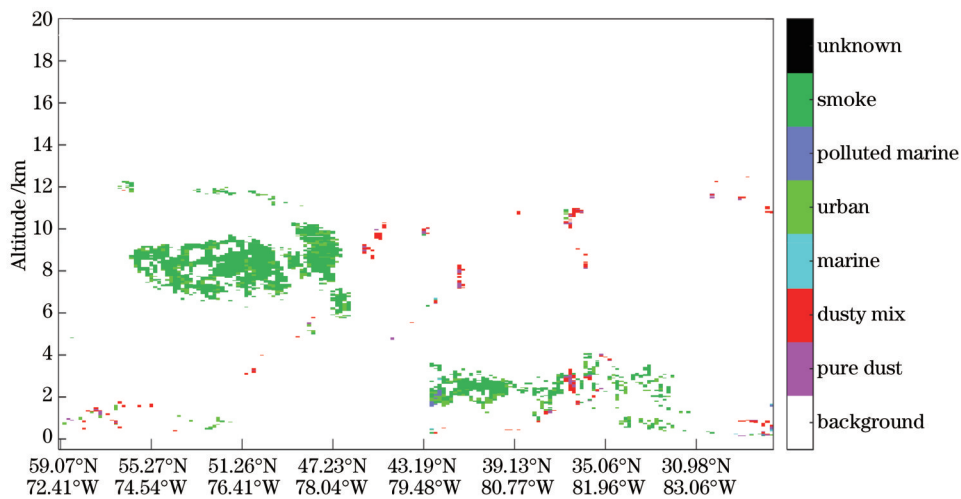


图 10 2023 年 6 月 5 日气溶胶分类结果
Fig. 10 Aerosol classification on June 5, 2023

4 结 论

介绍了中国星载激光雷达 ACDL 基于碘分子滤波器的 HSRL 系统组成以及利用卫星数据对气溶胶光学参数进行反演的的方法。选取撒哈拉沙漠地区的沙尘气溶胶和加拿大山火产生的烟尘气溶胶作为典型气溶胶事件进行分析,通过卫星遥感手段得到该地区大范

围连续观测的气溶胶廓线数据,使用 ACDL 数据反演算法得到精确的气溶胶光学参数廓线,并根据这些参数对气溶胶进行分类,初步分析该地区气溶胶的时空分布特点和形成原因。所得研究结果充分体现了星载高光谱探测激光雷达遥感在大范围连续和精确观测全球气溶胶廓线分布的优势,为全球气溶胶的精准探测和科学应用提供了有力手段。

参 考 文 献

- [1] 宋小全, 郭金家, 闫召爱, 等. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究[J]. 自然科学进展, 2008, 18(9): 1009-1015.
Song X Q, Guo J J, Yan Z A, et al. Study on detection of optical parameters of atmospheric aerosol by lidar with high spectral resolution[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(9): 1009-1015.
- [2] 肖昊. 美国发射“云卫星”和“卡利普索”“地球观测系统”再添 2 颗重要卫星[J]. 国际太空, 2006(6): 1-5.
Xiao H. The United States has added two more important satellites to the launch of Cloud Satellite and Calypso Earth Observation System[J]. Space International, 2006(6): 1-5.
- [3] Hobbs P V. Aerosol-cloud-climate interactions[M]. San Diego: Academic Press, 1993.
- [4] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 21-27.
- [5] Fiocco G, DeWolf J B. Frequency spectrum of laser echoes from atmospheric constituents and determination of the aerosol content of air[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 25(3): 488-496.
- [6] Shimizu H, Lee S A, She C Y. High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters[J]. Applied Optics, 1983, 22(9): 1373-1381.
- [7] Piironen P, Eloranta E W. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter[J]. Optics Letters, 1994, 19(3): 234-236.
- [8] Durand Y, Hélière A, Bézy J L, et al. The ESA EarthCARE mission: results of the ATLID instrument pre-developments[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6750: 675015.
- [9] Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, et al. Airborne High Spectral Resolution Lidar for profiling aerosol optical properties [J]. Applied Optics, 2008, 47(36): 6734-6752.
- [10] Müller D, Hostetler C A, Ferrare R A, et al. Airborne Multiwavelength High Spectral Resolution Lidar (HSRL-2) observations during TCAP 2012: vertical profiles of optical and microphysical properties of a smoke/urban haze plume over the northeastern coast of the US[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(10): 3487-3496.
- [11] 毛飞跃, 罗熙, 宋捷, 等. 中国星载气溶胶和云高光谱分辨率激光雷达的模拟和反演[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(4): 620-633.
Mao F Y, Luo X, Song J, et al. Simulation and inversion of spaceborne aerosol and cloud hyperspectral resolution lidar in China[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2022, 52(4): 620-633.
- [12] Liu D, Hostetler C, Miller I, et al. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1406-1420.
- [13] Cheng Z T, Liu D, Yang Y Y, et al. Interferometric filters for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: performance comparisons between Fabry-Perot interferometer and field-widened Michelson interferometer[J]. Applied Optics, 2013, 52(32): 7838-7850.
- [14] 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.
- [15] Dong J F, Liu J Q, Bi D C, et al. Optimal iodine absorption line applied for spaceborne high spectral resolution lidar[J]. Applied Optics, 2018, 57(19): 5413-5419.
- [16] Eloranta E E. High spectral resolution lidar[M]//Lidar. New York: Springer-Verlag, 2006: 143-163.
- [17] Zhang Y P, Liu D, Zheng Z F, et al. Effects of auxiliary atmospheric state parameters on the aerosol optical properties retrieval errors of high-spectral-resolution lidar[J]. Applied Optics, 2018, 57(10): 2627-2637.
- [18] Cairo F, di Donfrancesco G, Adriani A, et al. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar[J]. Applied Optics, 1999, 38(21): 4425-4432.
- [19] 董俊发. 大气探测的高光谱分辨率激光雷达技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2019.
Dong J F. Study of high spectral resolution lidar technology for atmospheric detection[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [20] 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.

Spaceborne High Spectral Resolution Lidar for Atmospheric Aerosols and Clouds Profiles Measurement

Hu Jianbo^{1,2}, Wang Xiong^{1,3}, Zhao Shaohua⁴, Wang Zhongting⁴, Yang Juxin^{1,2,5},
Dai Guangyao⁶, Xie Yuan¹, Zhu Xiaopeng^{1,2,5}, Liu Dong⁷, Hou Xia^{1,2,5,8}, Liu Jiqiao^{1,2,5,8**},
Chen Weibiao^{2,5,8*}

¹Space Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

³School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

⁴Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

⁵Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁶College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

⁷College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

⁸Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, Shandong, China

Abstract

Objective On April 16, 2022, the aerosol and carbon dioxide detection lidar (ACDL) was successfully launched with the atmospheric environment monitoring (DQ-1) satellite. The high spectral resolution lidar (HSRL) system of ACDL, which is responsible for measuring atmospheric aerosol and cloud profiles, has successfully worked in orbit for more than one year and provided accurate global aerosol and cloud profiles. Aerosols have a significant impact on the global radiation balance and climate change. The biggest unknown when it comes to predicting climate is the radiative effect between aerosols and clouds. Therefore, in order to determine the distribution and the change of aerosols in the atmosphere, it is important to make high-precision observations of aerosols in the atmosphere with high temporal and spatial resolution. As an active remote sensing instrument, lidar is widely used in atmospheric aerosol profiles with high temporal and spatial resolution and continuous observation during the day and night. High spectral resolution lidar has the advantage of separating atmospheric aerosols Mie scattering signal and molecular Rayleigh scattering signal, compared with traditional elastic scattering lidar. Therefore, HSRL can directly obtain the backscattering coefficient, extinction coefficient, depolarization ratio, and lidar ratio of aerosols, without assuming the lidar ratio. It significantly improves the accuracy of aerosol optical parameters which would be used widely in environment monitoring and climate study.

Methods The spaceborne HSRL system of ACDL based on an iodine molecular filter is implemented in orbit to measure aerosol and cloud profiles with high accuracy. Combined with the temperature and pressure data of the atmospheric reanalysis dataset (ERA5) of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the optical parameters such as backscattering coefficient, extinction coefficient, depolarization ratio, and lidar ratio of aerosols are obtained through data inversion. Aerosols are classified by reference values of optical parameters of different aerosol types. In this paper, cases of measurement data over Sahara Desert and Canadian wildfires region are selected to analyze the dust aerosols and smoke aerosols, respectively.

Results and Discussions The optical properties of dust aerosols and smoke aerosols are analyzed by selecting the observation data of spaceborne high spectral resolution lidar over the Sahara Desert and the Canadian wildfires. These optical parameters include the backscattering coefficient, extinction coefficient, depolarization ratio, and lidar ratio of aerosols. The trajectory of ACDL and the attenuated backscatter coefficients at 532 nm of the parallel channel, perpendicular channel, and molecular channel over the Sahara Desert (Figs. 3–4) and the Canadian wildfires (Figs. 7–8) are presented. The results show that the aerosols within 5 km near the ground in the selected Sahara Desert area are mainly dust aerosols (Fig. 6), and the depolarization ratio is concentrated in 0.2–0.4; the lidar ratio is concentrated in 40–60 sr (Fig. 5). The selected Canadian wildfire region is dominated by smoke aerosols (Fig. 10), whose depolarization ratio is

concentrated in the range of 0.02–0.15, and lidar ratio is in the range of 50–70 sr (Fig. 9). The unique high spectral resolution detection technique of lidar has important applications in the fine detection and classification of aerosols and clouds and will play an important role in environmental monitoring.

Conclusions In this paper, the high spectral resolution system based on the iodine molecular filter of Chinese spaceborne lidar ACDL and the inversion method of aerosol optical parameters are presented. Dust aerosols over the Sahara Desert and smoke aerosols generated by Canadian wildfires are selected as typical aerosol events for analysis. Accurate aerosol optical parameters are obtained by ACDL, and aerosols are classified according to those parameters. The spatial and temporal distribution characteristics and formation causes of aerosols in these areas are analyzed. The research in this paper shows the advantages of spaceborne high spectral resolution lidar in large-scale continuous and accurate observation of global aerosol distribution and provides a powerful means for accurate measurement and scientific application of global aerosol.

Key words atmospheric aerosol; cloud; aerosol optical parameters; spaceborne lidar; high spectral resolution detection technique