

基于机载高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类研究

姚娜¹, 张苗苗², 卜令兵^{1*}, 郜海阳¹, 王勤¹

¹南京信息工程大学大气物理学院, 中国气象局气溶胶与云降水重点实验室教育部气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044;

²上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要 气溶胶在大气辐射收支平衡、气候变化、降水、云的形成以及环境污染方面扮演着重要的角色。为了实现对气溶胶光学参数的大范围、高精度、定量化测量,2019年3月使用大气环境星气溶胶碳探测激光雷达(ACDL)的机载缩比系统(Air-ACDL)在中国山海关地区开展了机载观测试验。试验完成了不同污染天气、不同高度以及不同地表类型下的多次观测。将六次飞行试验得到的机载高光谱激光雷达(HSRL)测量的气溶胶光学深度(AOD)分别与地面站点的太阳光度计和卫星遥感数据进行对比分析,其相关系数 R 均达到0.90以上,其样本数量分别为86与2200。基于机载HSRL的观测数据,提出了适用于Air-ACDL的气溶胶分类方法,并对山海关地区的气溶胶进行了分类研究。使用后向轨迹传输模型、云气溶胶激光雷达和红外探路卫星观测(CALIPSO)气溶胶分类结果,以及Aura卫星臭氧监测仪(OMI)传感器等数据验证Air-ACDL测量的气溶胶分类的可靠性。多次Air-ACDL观测结果表明:相比于传统激光雷达气溶胶分类方法,基于Air-ACDL的气溶胶分类方法能够对气溶胶进行更加准确的分类;山海关地区地理位置特殊,观测期间,当地气溶胶除由本地供暖等活动产生的城市气溶胶之外,还有受大气传输影响来自内蒙古地区的沙尘气溶胶,以及来自东南渤海地区的海洋气溶胶。

关键词 机载高光谱分辨率激光雷达; 大气气溶胶; 气溶胶光学特性; 气溶胶分类

中图分类号 TN958.98;X831;P412.25

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230519

1 引言

气溶胶是由分散并悬浮在大气中的固态、液态和固液混合态微粒所形成的胶体分散系,其粒子直径在 $0.001\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间。作为大气的重要组成部分,气溶胶含量很低却扮演着重要的角色,对大气辐射收支平衡、气候、降水、云的形成以及环境污染方面都起着重要的作用,并且影响空气质量和人类的身体健康^[1]。在气候变化的驱动因素中,气溶胶和云对气候变化的影响是最不确定的因素^[2],气溶胶既可以通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射来直接扰动地-气系统的辐射能量收支,产生直接气候效应,又可以作为云、雾的凝结核影响云、雾的光学特性,对云的形成、降水过程造成影响,产生间接气候效应。气溶胶类型是影响气溶胶气候效应的最重要因素,可以为源属性研究提供有用的信息。然而,大气气溶胶通常不是单一的类型,而是多种类型的混合物。这种混合会影响气溶胶的光学和辐射特性。因此,通过有效的观测手段

开展气溶胶种类识别的研究是尤其重要的^[3]。

激光雷达作为一种主动遥感探测工具,是探测大气中云和气溶胶光学特性以及其时空分布的重要手段之一^[4]。使用激光雷达观测数据对气溶胶类型进行分类是研究气溶胶特性的一种重要途径。Liu等^[5]在2002年对亚洲沙尘暴沙尘气溶胶的激光雷达比以及退偏振比进行了统计分析,且提供了用激光雷达直接测量亚洲尘埃的激光雷达比的方法,这有助于验证先前的理论与实验研究。Sugimoto和Lee^[6]在2006年利用双波长偏振激光雷达分析了不同波长下沙尘气溶胶的退偏振比和激光雷达比,提出了一种简单的双组理论,并将其应用于观测数据,导出了尘埃和球形气溶胶的混合比以及向后向散射相关的Angström指数。Xie等^[7]在2008年运用拉曼激光雷达对北京地区的气溶胶退偏比和激光雷达比分别在轻度污染、重度污染和沙尘暴天气下的数值变化进行了总结。2009年,Winker等^[8]描述了云-气溶胶激光雷达和红外探路卫星观测(CALIPSO)产品处理系统中的一种算法,运用

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-02; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(42175145)、上海航天科技创新基金(SAST2022-039)

通信作者: *lingbingbu@nuist.edu.cn

此算法首次通过激光雷达观测在全球范围内识别气溶胶类型。Groß等^[9]于2011年在SUMUM-2的实验期间对三台同步观测的激光雷达结果进行了对比分析,主要对撒哈拉沙尘、海洋性气溶胶、生物质这三种特殊的气溶胶类型的退偏振比和激光雷达比进行了分析。Burton等^[10]在2012年运用已有的大量高光谱分辨率激光雷达(HSRL)数据并且基于已知的气溶胶类型,根据数据反演得到的激光雷达比、退偏振比、色比等光学参数的阈值来建立气溶胶的分类模型。Groß等^[11]在2013年利用1998年与2008年这两年间三次机载HSRL的实地实验数据,并结合冷凝颗粒计数器(CPC)和差分迁移率分析器(DMA)同步观测的气溶胶的微物理特性对气溶胶进行了分类,同时提出了混合气溶胶类型的识别方法。曹念文等^[12]在2014年通过建立包含背景气溶胶和云两种不同类型气溶胶光学参数(后向散射系数、消光系数)的两个激光方程,推导计算出其解的表达式,并反演出两种不同类别气溶胶的光学参数,以此来区分背景气溶胶和云。刘秉义等^[13]在2017年根据已有的气溶胶分类研究结果,给出了基于气溶胶光学参数的分类方法,并建立了气溶胶分类查找表。李明阳等^[14]在2019年针对激光条件下探测的云和气溶胶特有的光学信息和空间分布,结合概率统计与机器学习算法,提出了一种针对云/气溶胶、云相态及气溶胶子类型识别的分类算法,实现了星载激光雷达的大气特征层的快速、有效分类。郑仰成等^[15]在2021年基于臭氧检测仪(OMI)遥感产品的气溶胶特征参数,利用随机算法,将广东省2014年的气溶胶类型划分为沙尘气溶胶、生物质燃烧型气溶胶和硫酸盐型城镇-工业气溶胶3种类型,并统计分析了随机森林算法以及特征参数的重要性。周妹等^[16]在2022年根据AERONET SGP站的气溶胶光学反演数据,提出了一种基于朴素贝叶斯分类器的气溶胶分类模型,以气溶胶单次散射反照率、复折射率指数等作为输入变量识别了该地区5种类型的气溶胶,分析了不同类型的光学特性。朱鑫琦等^[17]在2022年提出了一种利用归一化荧光信号对气溶胶颗粒分类的方法,将其应用于以405 nm激光二极管为激发光源的荧光粒子计数器,可以对不同气溶胶粒子进行初步分类。

已有的激光雷达气溶胶分类方法大都使用传统的米散射或偏振激光雷达,其不确定性给气溶胶分类带来了误差。HSRL利用大气气溶胶和大气分子对激光光谱的展宽不同使用窄带滤波器滤除了气溶胶信号^[18],在不需要激光雷达比的情况下,能得到独立反演的气溶胶的消光系数和后向散射系数,杜绝了引入其他因子所带来的误差,能够更加精准地探测气溶胶的光学性质。HSRL克服了传统米散射激光雷达在反演气溶胶消光系数时需要假设激光雷达比这一问题,与拉曼激光雷达相比,具有较强的散射强度,易于实现全天时观测^[19-20]。自2000年开始,国内一些学者也开展

了相关的HSRL技术的研究,结合滤波器技术对大气风场和气溶胶光学参数探测方法进行研究,验证了碘分子滤波器的优点、适用性以及HSRL技术在大气气溶胶探测方面的独特优势,促进了其发展和应用^[21-26]。中国海洋大学的刘智深等^[27]在应用碘分子滤波器的HSRL技术测量大气温度、风场方面做了不少开拓性工作。结合HSRL观测的大气气溶胶和风场结果,2010年,刘金涛等^[28]对碘分子滤波器的实用性和便利性进行了相关验证和论述。自2012年开始,浙江大学的刘东及其团队^[29-30]在高光谱鉴频器方面做了大量的工作,应用视场展宽的迈克尔孙干涉仪作为高光谱滤波器进行大气气溶胶、温度和风场观测,在鉴频器技术研究应用方面进行了进一步拓展。2018年,中国科学院上海光学精密机械研究所董俊发、刘继桥等^[31-32]结合大气模式等系统参数选取了更优的碘分子吸收线,并于2019年开展了机载HSRL外场观测试验,对秦皇岛地区的气溶胶分布和变化进行了研究^[33-34]。

由于存在固有优势,HSRL被设计为我国大气环境星的一个重要组成部分,旨在连续获取全球云、气溶胶类型和光学特性的垂直分布信息,支持全球气候变化、云与气溶胶相互作用等研究。本课题组在研制气溶胶碳探测激光雷达(Air-ACDL)的基础上,进行了多次机载观测校飞试验,首次获得Air-ACDL机载观测数据,为大气环境星数据应用效能提升做了重要支撑^[33]。由于机载HSRL可以提供更多、更准的气溶胶观测信息,因此,可以实现更为准确的气溶胶分类。

本文基于Air-ACDL机载观测数据开展了气溶胶分类方法的研究,首先主要介绍了基于碘分子滤波器的HSRL系统原理与气溶胶光学参数的反演方法;然后介绍了基于现有的气溶胶类型分类的研究成果,建立了气溶胶分类查找表,利用2019年在山海关地区进行的机载观测数据,对气溶胶进行了分类研究;最后分析了气溶胶分类的个例结果,并运用混合单粒子拉格朗日积分轨道模型(HYSPLIT)轨迹模式等方法进行了验证。

2 HSRL系统、机载观测试验及数据介绍

2.1 HSRL系统

机载HSRL气溶胶通道接收系统如图1所示。

偏振型基于碘分子吸收池的HSRL接收系统可以简化为三探测通道结构。回波光信号首先经过一个532 nm的带通滤光片,然后通过一个窄带法布里-珀罗(F-P)腔,窄带F-P腔的中心波长为所选定的碘吸收线波长。532 nm的带通滤光片用于去除窄带F-P腔其他边带的影响,限制进入窄带F-P腔的光谱范围,使得进入窄带F-P腔的光谱在所选定的碘吸收线波长附近。窄带F-P腔用于进一步去除背景噪声,使得所选定的碘吸收线波长的透过率最大。如果后向散射的回

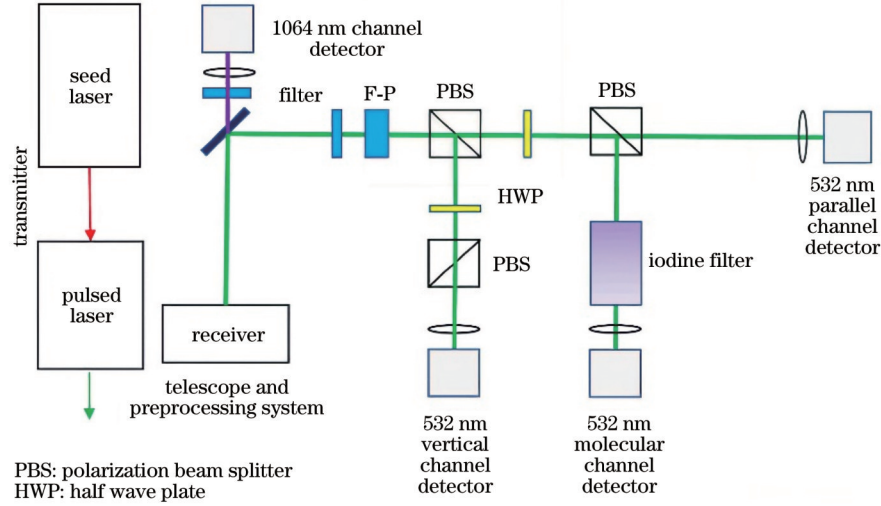


图 1 HSRL 气溶胶通道接收系统组成

Fig. 1 Composition of aerosol channel receiver system in HSRL system

波信号光偏振方向发生改变,则将存在垂直偏振分量和平行偏振分量。回波信号光的垂直偏振分量经过第一个偏振分光棱镜(PBS1)后会被 PBS 45°反射,然后经由已经镀了 532 nm 增透膜的聚焦镜聚焦到垂直通道探测器中。没有发生退偏的回波或者退偏回波信号光的平行偏振分量会经过第一个 PBS 透射后,依次经过一个 1/2 波片和第二个 PBS(PBS2),一部分回波信号光经过碘分子吸收池后经聚焦镜聚焦进入高光谱分子通道探测器,另一部分信号光经过聚焦镜后直接进入平行参考信道探测器。通过改变 1/2 波片的角度,能够改变高光谱的分子信道与平行参考信道的分光比。

接收系统包括大气气溶胶垂直信道、平行信道、高光谱信道。利用垂直和平行信道信号进行气溶胶退偏比测量,可用于气溶胶粒子的形状探测。通过高光谱通道反演气溶胶后散和消光系数,进而求解激光雷达比,以及精确测量气溶胶的散射参数特征。另外,系统中加入 1064 通道,可以对两个波段的气溶胶散射特性参数进行研究。

HSRL 反演气溶胶光学参数的具体反演方法可参考文献[34]。退偏比通过垂直信道与平行信道的信号比值与分子退偏比值的差所得:

$$\delta_a = \delta_{\text{total}} - \delta_m = \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} - \delta_m, \quad (1)$$

式中: B_{\perp} 和 B_{\parallel} 分别代表接收到的垂直信道和平行信道信号; δ_m 为大气分子退偏比,可以通过理论计算获得。之后通过气溶胶在 532 nm 波长的消光系数 α_a 与后向散射系数 β_a 的比值可以得到气溶胶的激光雷达比 S_a :

$$S_a(r) = \frac{\alpha_a(r)}{\beta_a(r)}. \quad (2)$$

通过 Fernald 算法计算 1064 nm 波段的气溶胶后向散射系数 β_{1064} , 其中 β_{1064} 的大小虽然取决于假设的

激光雷达比的大小,但其对假设激光雷达比的误差不太敏感,通常将激光雷达比设为 40 sr^[35]。结合 HSRL 反演计算得到的 532 nm 波长处气溶胶后向散射系数 β_{532} , 进而可求色比,表达式为

$$C_r = \frac{\beta_{532}}{\beta_{1064}}. \quad (3)$$

2.2 机载观测试验

2019 年 3 月,在河北省秦皇岛市进行了飞行试验,此次飞行试验区域临近渤海湾,试验地表包括海洋、城镇、厂区、山地等多种地表类型,飞行区域为 118°~122°E, 38°~42°N。此次正式的机载 HSRL 系统飞行试验,共飞行 7 个架次,累计飞行时间为 30 h 左右。利用机载 HSRL 系统对短时间内秦皇岛地区不同下垫面类型下的气溶胶分布和气溶胶特征展开了大范围的观测。

2.3 数据来源

机载 HSRL 系统提供了在山海关上空进行飞行试验得到的 532 nm 和 1064 nm 波长通道的观测数据,根据这些数据可以反演气溶胶的后向散射系数、消光系数、激光雷达比、退偏等光学参数。基于反演得到的光学参数可以对气溶胶进行分类。本次机载试验获取了海洋区域、城镇区域、山地区域等不同地表类型以及不同飞行高度和不同天气污染条件下的探测数据,具体飞行试验进程如表 1 所示。本文选取了 2019 年 3 月 11 日、3 月 14 日和 3 月 19 日的数据进行分析,其对应的机载高度分别为 7、8、5 km。

为了验证气溶胶分类方法的准确性,使用 CALIOP 的 Level2 VFM (Vertical Feature Mask) 产品 (V4 版本) 进行对比验证。CALIOP 的 Level2 VFM 产品使用云-气溶胶分类识别算法与气溶胶分类算法判别接收的信号,识别出垂直方向上不同高度的气溶胶类型,并将其分为清洁大陆型、清洁海洋型、烟尘、沙

表 1 机载 HSRL 系统飞行试验进程
Table 1 Airborne HSRL system flight test process

Serial number	Time	Place	Event
1	March 4, 2019		Flight 1: 4 km highly airspace-adapted flight
2	March 9, 2019		Flight 2: 3 km altitude flight test
3	March 11, 2019		Flight 3: 5 km altitude flight test
4	March 14, 2019	Shanhaiguan, Qinhuangdao, Hebei Province	Flight 4: 7 km altitude flight test
5	March 16, 2019		Flight 5: 8 km altitude flight test
6	March 18, 2019		Flight 6: 4 km altitude flight test
7	March 19, 2019		Flight 7: 5 km altitude flight test

尘、污染沙尘、污染大陆型以及污染海洋型 7 种类型^[36-37]。同时利用来自中国环境检测中心的 PM2.5 与 PM10 数据、HYSPLIT 轨迹模式以及 Aura 卫星 OMI 数据对分类结果进行辅助验证。

HYSPLIT 即混合单粒子拉格朗日综合轨迹模型,是由美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室联合澳大利亚气象局,共同研发的一种用于气团传输轨迹追踪、计算分析大气污染、扩散和沉降过程轨迹的专业模型^[38]。本文主要运用 HYSPLIT 模型分析山海关地区 24 h 的后向轨迹,主要分析山海关上空 500、1500、3000 m 这 3 个高度的污染气团来源。

OMIAuraAER 是美国国家航空航天局(NASA)公布的一组近紫外型气溶胶产品,该产品是由搭载在 Aura 卫星上的 OMI 传感器观测数据反演得到的,包含多项气溶胶特征参数以及气溶胶类型产品,其中,α 指数和紫外线气溶胶指数(UVAI)是气溶胶重要的分类指标^[15]。

3 基于 HSRL 的气溶胶分类方法

气溶胶分类是基于不同类型气溶胶光学参数的差异反映其不同特性,气溶胶退偏振比 δ_a 反映粒子的形状特征,气溶胶激光雷达比 S_a 用以表征粒子的吸收特性,双波长色比值 C_r (532 nm/1064 nm) 对应粒子尺寸

大小,这些特性是进行气溶胶分类的理论基础。一般地, S_a 随气溶胶颗粒尺寸、形状以及成分的不同而不同,对于吸收性强的粒子其数值更高; δ_a 被公认是鉴别沙尘气溶胶的重要参数,它与粒子的形状规则程度有关,球形粒子的 δ_a 数值最小,形状越不规则其值越大;色比值 C_r 对应粒子尺寸的大小,一般色比值越大粒子越小^[39]。根据这些特征,可以很好地实现气溶胶颗粒物的分类。

要实现气溶胶的分类需要基于大量的实验观测,在大量数据分析、定标的基础上结合地域因素,才能实现气溶胶的合理分类。本文在总结已有工作的基础上,对不同气溶胶类型的 S_a 、 δ_a 与 C_r 的阈值范围进行了梳理,建立了气溶胶分类查找表,如表 2 所示,将气溶胶分为冰、纯尘、混合沙尘、海洋、污染海洋、城市、烟雾与新鲜烟雾 8 类,并对每类气溶胶的 S_a 、 δ_a 与 C_r 的阈值范围进行了总结。冰类型严格意义上来说并不是气溶胶类型,也不是云类型鉴别器,这是 Sassen 和 Wang^[40]为了更好地描述实验期间飞机下方出现的大量光学冰晶薄雾而提出的。

基于对 S_a 、 δ_a 与 C_r 进行气溶胶分类的总结,可实现不同气溶胶的分类查找,对于表 2 中的分类阈值存在重叠的情况,可以利用其他气溶胶光学参数,如色比、Angström 指数等进行进一步的区分^[10]。

表 2 分类测量的气溶胶强度参数测量范围

Table 2 Measurement range of aerosol strength parameters for categorical measurements

Aerosol type	Aerosol depolarization /%	Lidar ratio /sr	Backscatter color ratio	Measuring equipment or method information	Source
	30-45			Polarization diversity lidar	Sassen and Hsueh (1998, cirrus clouds) ^[41]
	60-70			Polarization diversity lidar	Sassen and Hsueh (1998, contails) ^[41]
	30-70			Polarization lidar/T~matrix computations	Mischenko and Sassen (1998) ^[42]
Ice	<30			Raman lidar and polarization lidar	Sakai et al. (2003) ^[43]
	50-60	~20	0.7-2.9	Airborne HSRL/Haar wavelet et al.	Burton et al. (2012) ^[10]
	18-33	23-32	0.7-1.1	Airborne HSRL	Burton et al. (2013) ^[44]
	18-70	20-32	0.7-2.9		Summary

续表

Aerosol type	Aerosol depolarization /%	Lidar ratio /sr	Backscatter color ratio	Measuring equipment or method information	Source
		42-55		HSRL et/T~matrix calculation	Liu et al. (2002) ^[5]
	~30	45-63		Mie backscatter lidar and C~130 aircraft	Murayama et al. (2003) ^[45]
	~35	50		Mie scattering lidar with polarization channels/Two~component model for aerosol	Sugimoto and Lee (2006) ^[6]
Pure dust	30-32	44-64		SAMUM~2a and SAMUM~2b et al.	Tesche et al. (2011) ^[46]
	30-35	~59		Depolarization lidar	Wiegner et al. (2011) ^[47]
	30-32	57-67		Three wavelengths with three lidar systems	Groß et al. (2011) ^[9]
	~33	40-58	1.0-1.7	Aerborne HSRL	Burton et al. (2012) ^[10]
	29-33	43-53		CPC, DMA, HSRL	Groß et al. (2013) ^[11]
	31-33	45-51	1.4-1.6	Airborne HSRL	Burton et al. (2013) ^[44]
	29-35	40-67	1.0-1.7		Summary
	8-20			Raman, depolarization lidar	Chen et al. (2007) ^[48]
	17-23	28-48		Raman lidar	Xie et al. (2008) ^[7]
	19-28				Groß et al. (2011) ^[9]
Dusty mix	24-32	46-60		CIMEL sun photometer, multiwavelength Raman lidar et al.	Preißler et al. (2011) ^[49]
	20-35	30-50	1.0-2.2		Burton et al. (2012) ^[10]
	25-29	46-54			Groß et al. (2013) ^[11]
	13-20	29-49	1.3-1.8		Burton et al. (2013) ^[44]
	8-35	28-60	1.0-2.2		Summary
	~8				Sakai et al. (2010) ^[50]
	1-3	16-20			Groß et al. (2011) ^[9]
Marine	<10	15-25	1.2-1.8		Burton et al. (2012) ^[10]
	2-4	13-23			Groß et al. (2013) ^[11]
	4-9	17-27	1.3-1.6		Burton et al. (2013) ^[44]
	1-10	13-27	1.2-1.8		Summary
Polluted marine	3-5	36-45	1.5-1.7		Burton et al. (2013) ^[44]
	3-5	36-45	1.5-1.7		Summary
	5-9	47-75			Xie et al. (2008, moderate pollution) ^[7]
Urban	5-9	36-52			Xie et al. (2008, heavy pollution) ^[7]
	<10	50-70	1.4-2.4		Burton et al. (2012) ^[10]
	5-7	50-62			Groß et al. (2013) ^[11]
	3-7	53-70	1.7-2.1		Burton et al. (2013) ^[44]
	3-10	36-75	1.4-2.4		Summary
	2-5	30-60	1.4-3.0		Burton et al. (2012) ^[10]
Smoke	5-9	52-86			Groß et al. (2013) ^[11]
	4-9	55-73	1.9-2.5		Burton et al. (2013) ^[44]
	2-9	30-86	1.4-3.0		Summary
Fresh smoke	3-6	33-46	2.1-2.5		Burton et al. (2013) ^[44]
	3-6	33-46	2.1-2.5		Summary

4 基于 HSRL 的气溶胶分类结果

4.1 机载 HSRL 测量的 AOD 对比验证

本次观测试验期间,除了将 HSRL 安装在飞机上进行机载观测之外,还在飞机航线上布置相应的地面

观测站点^[33-34]。为了验证机载 HSRL 观测数据的可靠性,将机载 HSRL 测量的 AOD 与地面站点太阳光度计及星载探测器的观测结果进行对比分析,其中星载数据探测器包括 Aqua 卫星、Terra 卫星、VIIRS 卫星以及 Aura 卫星,对比结果如图 2 所示。

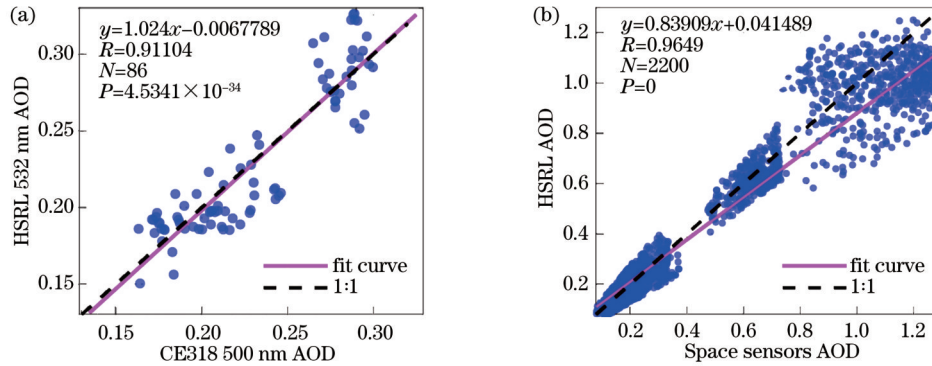


图 2 HSRL、CE318 和星载探测器的 AOD 的相关性分析。(a)HSRL 与 CE318 的 AOD 的相关性;(b)HSRL 与星载探测器的 AOD 的相关性

Fig. 2 Correlation analysis of AODs of HSRL, CE318, and spaceborne detector. (a) AOD correlation between HSRL and CE318; (b) AOD correlation between HSRL and spaceborne detector

图 2(a)为六天飞行试验中临近地面站点的机载激光雷达计算的 AOD 结果与地面站点数据结果的相关性分析图, $P < 0.01$,两者为非常显著的相关关系,并且两者的相关系数大于 0.90。图 2(b)为飞行试验过程中全部的机载激光雷达计算的 AOD 与星载探测器的 AOD 数据对比分析结果,从图中可以看出 $P < 0.01$,二者为非常显著的相关关系且二者的相关性大于 0.95。通过机载 HSRL 与太阳光度计和星载探测器的 AOD 之间的相关性分析可以看出,机载 HSRL 反演的 AOD 结果是可信的。

4.2 基于 HSRL 的气溶胶分类方法与 CALIPSO 的气溶胶分类方法对比

以 2019 年 3 月 11 日的飞行架次为例对气溶胶进行分类。图 3 为 3 月 11 日山海关附近的四个站点在机载试验时间段内的 PM2.5 和 PM10 的含量变化图,由图可知三个站点的 PM2.5 最大值在 50~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

内,属于轻度污染,第一关站 PM10 最大值在 100~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 内,属于中度污染,并且四个站点的 PM10 的最大值在 150~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,属于污染范围。而从 PM2.5 以及 PM10 数值的整体变化情况来看,机载试验期间污染数值有所减小,故可判定,该天有污染性气溶胶的存在,并且污染有消散的趋势^[51]。

图 4 为下垫面分别为山地、城镇与海洋所反演出的气溶胶光学性质参数廓线,选取位置如图 5(a)中的点划线、虚线、点线所示。从图 4 中可以看出,下垫面类型为山地的激光雷达比数值集中分布在 28~40 sr,同时色比值分布在 1.0~2.2,并且退偏值分布在 0.08~0.15,符合表 2 中混合沙尘气溶胶的特点。下垫面类型为城市的激光雷达比数值绝大部分分布在 13~27 sr,同时色比值主要集中在 1.2~1.8,当高度靠近 3 km 时,激光雷达比数值分布额在 30~50 sr,色比值分布在 1.4~3.0,并且退偏值均小于 0.1,符合

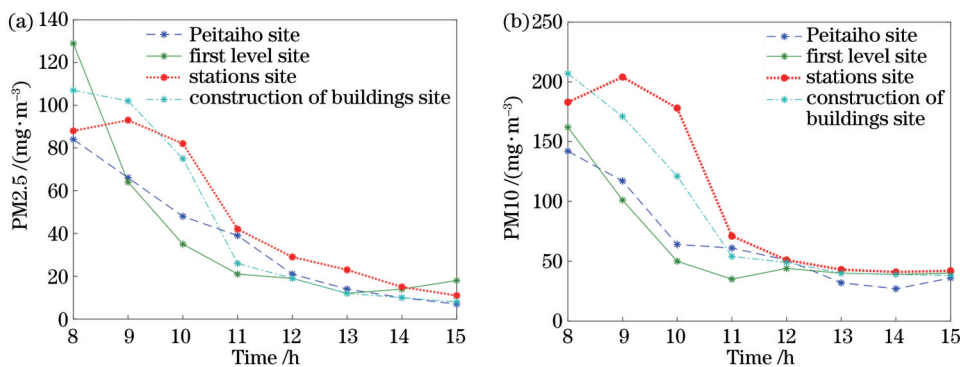


图 3 四个站点 PM2.5 和 PM10 的变化。(a)PM2.5;(b)PM10
Fig. 3 Changes of PM2.5 and PM10 at four sites. (a) PM2.5; (b) PM10

低空为海洋气溶胶、靠近 3 km 高度为烟雾及城市气溶胶的特点。下垫面为海洋的激光雷达比数值分布在

13~27 sr, 同时退偏数值分布在 0.01~0.1, 且色比数值分布在 1.2~1.8, 符合表 2 中海洋气溶胶的特点。

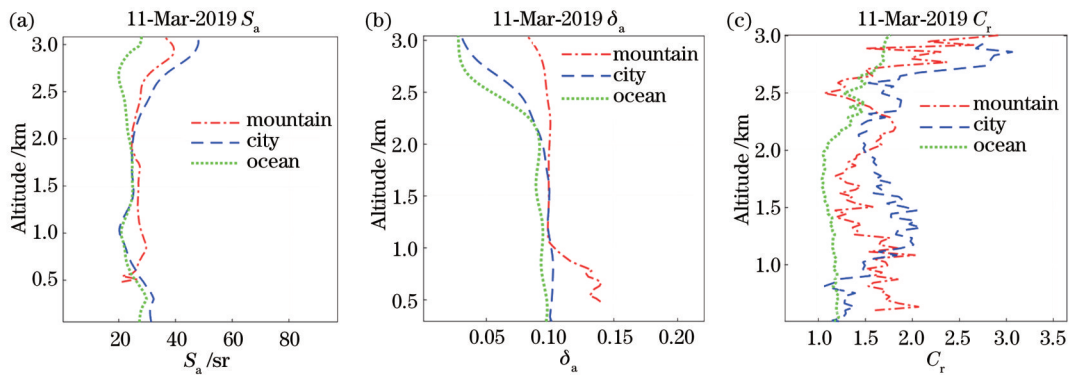


图 4 三种下垫面上空气溶胶光学参数廓线结果。(a)激光雷达比廓线;(b)退偏廓线;(c)色比廓线

Fig. 4 Profiles of aerosol optical parameters on three underlying surfaces. (a) Lidar ratio profile; (b) depolarization profile; (c) color ratio profile

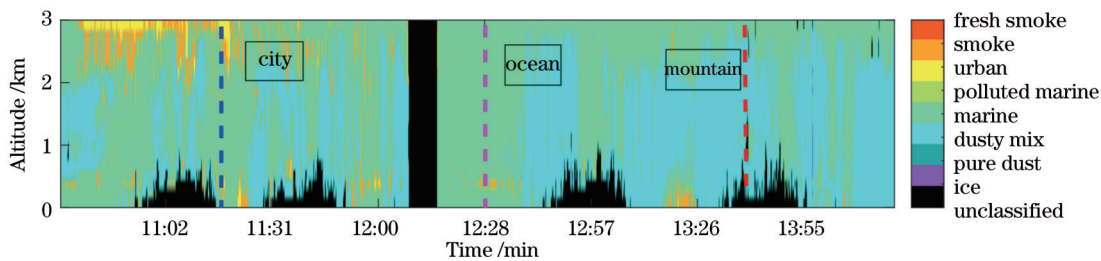


图 5 2019 年 3 月 11 日的气溶胶分类结果

Fig. 5 Aerosol classification results on March 11, 2019

基于上文总结的气溶胶分类方法,从图 5 可以看出,2019 年 3 月 11 日山海关气溶胶类型主要是海洋气溶胶与混合沙尘气溶胶构成的,其次还包含烟雾和城市气溶胶。图中黑色部分为山地以及未检测到的部分。为了验证气溶胶分类结果的合理性,结合 HYSPLIT 模式对试验地点(山海关)上空 500、1500、3000 m 高度大气层的 24 h 气流后向轨迹进行追踪,可以看出,低空气流来自河北区域,1500 m 高度以及 3000 m 高度气团均来自内蒙古地区,这三股气团将沿途的混合沙尘气溶胶带到山海关地区。山海关濒临渤海,机载飞行试验亦经过渤海上空,故检测到海洋气溶胶,同时 3 月份正值山海关供暖期,易产生烟雾和城市气溶胶。根据以上分析,与基于 HSRL 的气溶胶分类方法的分类结果相吻合,初步验证了该方法的可行性。

图 6 为 2019 年 3 月 11 日 CALIPSO 的气溶胶分类结果,图中方框内为山海关上空的 CALIOP 的 Level2 VFM 产品。CALIPSO 飞行路线经过渤海上空且与机载路线十分接近,最近距离仅为 60 km。从图中可知,CALIOP 的 Level2 VFM 产品识别的山海关(39~41N°)上空的气溶胶类型主要为沙尘气溶胶、污染沙尘气溶胶以及污染海洋气溶胶,这与基于 HSRL 的气溶胶分类方法得到的结果相吻合,进一步验证了该方

法的可行性。综上所述,通过与多源数据的对比可知,该方法对山海关上空的气溶胶类型的分类结果是可信的。

4.3 气溶胶分类结果及个例分析

4.3.1 2019 年 3 月 14 日气溶胶类型分类结果个例分析

图 7 为 2019 年 3 月 14 日的气溶胶分类结果。从图中可以看出,3 月 14 日山海关上空主要存在海洋、污染沙尘以及沙尘气溶胶,并且还存在着烟雾、新鲜烟雾和城市气溶胶。除此之外,还有少量冰粒子的存在。

图 8 为 3 月 14 日的山海关附近的四个站点的 PM10 以及 PM2.5 的含量变化图,在监测的时间范围内,四个站点的 PM10 含量均在 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,PM2.5 的含量在 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,属于污染范围。并且机载飞行时间段内,PM2.5 以及 PM10 的含量逐渐增加,其中 PM2.5 的含量超过 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,属于中度污染,北戴河环保局站的 PM2.5 含量最高可达 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,属于重度污染。并且结合 HYSPLIT 模式进行后向轨迹追踪可看出观测地点上空 500、1500、3000 m 高度的污染气团来自内蒙古,其中 500 m 和 1500 m 的高度均有下降趋势(分别从 2000 m 高度降至 500 m 以及从 2500 m 的高度下降到 1500 m),这会形成下降的气流导致沙尘的下沉。在该天数据分析

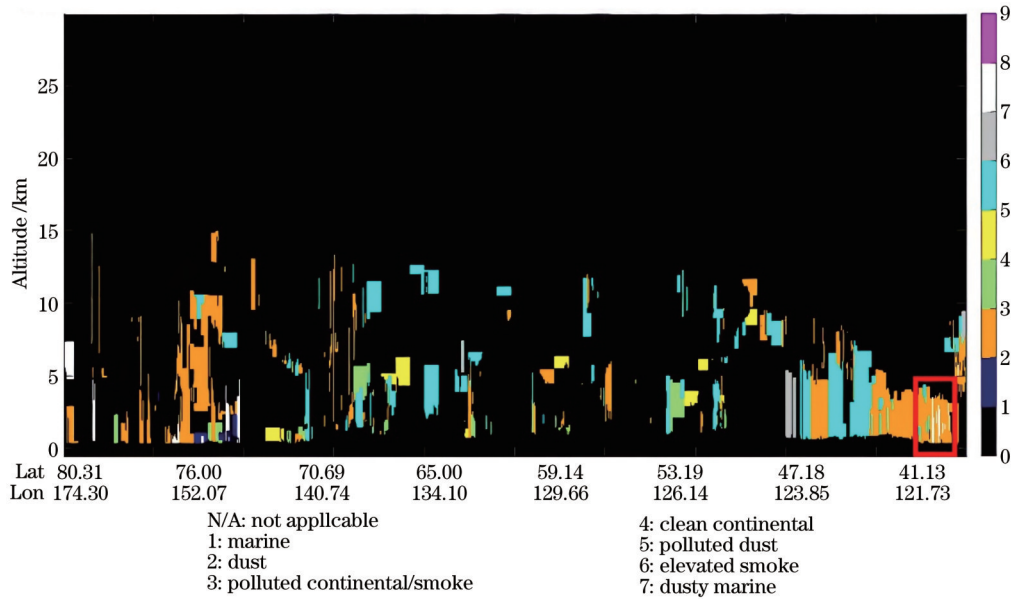


图 6 CALIPSO 的气溶胶分类结果
Fig. 6 Aerosol classification results of CALIPSO

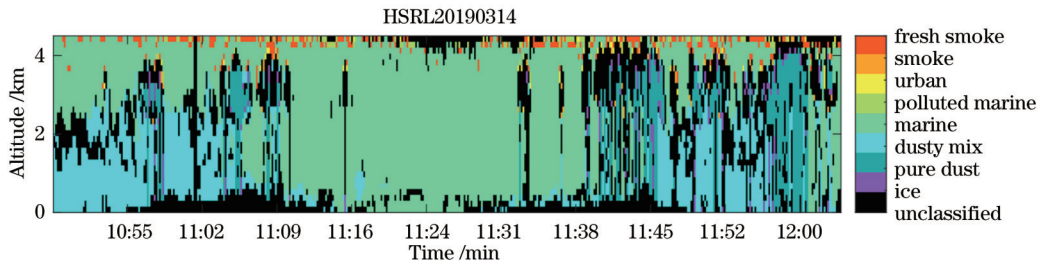


图 7 2019 年 3 月 14 日气溶胶分类结果
Fig. 7 Aerosol classification results on March 14, 2019

期间(10:30~12:00)空气相对湿度较大,如图 9 所示,并且正逢冬季,温度较低,大气中易产生冰粒子,证实了 3 月 14 日气溶胶分类结果中冰粒子存在的合理性,

综上可说明,机载 HSRL 气溶胶分类结果是可靠的。根据以上分析,与当天 HSRL 观测结果判断山海关上空存在沙尘气溶胶与混合沙尘气溶胶相吻合。

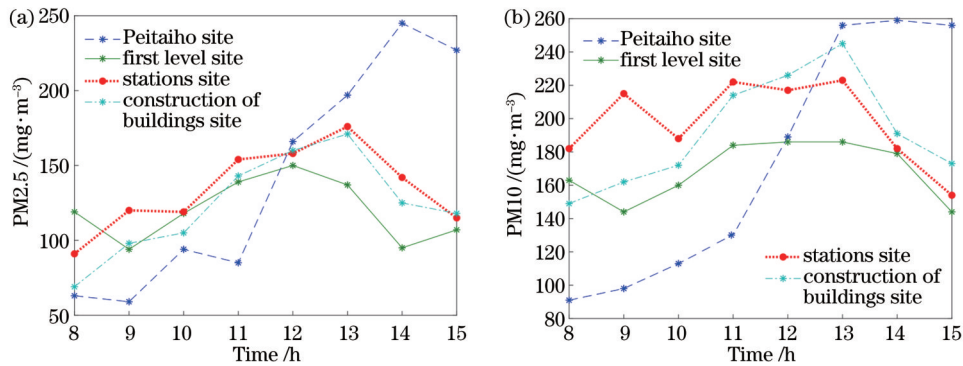


图 8 四个站点 PM2.5 和 PM10 的变化图。(a)PM2.5; (b)PM10
Fig. 8 Changes of PM2.5 and PM10 at four sites. (a) PM2.5; (b) PM10

4.3.2 2019 年 3 月 19 日气溶胶类型分类结果个例分析

如图 10 可知,2019 年 3 月 19 日机载观测试验期间,观测到了山海关上空存在大量的混合沙尘气溶胶,

此外,还存在着烟雾、城市 and 海洋气溶胶。

图 11 为当天的 PM10 与 PM2.5 的含量变化图,PM10 和 PM2.5 数值均属于污染范围,且 3 月 19 日这天污染较为严重。由 HYSPLIT 模型的山海关的

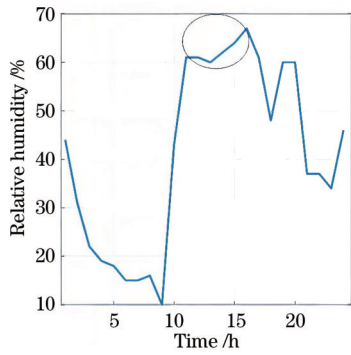


图9 2019年3月14日山海关的湿度图
Fig. 9 Humidity map of Shanhaiguan on March 14, 2019

24 h后向轨迹分析结果可知,山海关 1500 m 和 3000 m 两个高度层处气团源头分别来自河北和内蒙古,并且两个高度的污染气团均有下降的趋势,导致沙尘沉积,气团在升降起伏的过程中携带沿途的混合沙尘、烟雾与城市气溶胶,最终抵达山海关的上空。近地面(500 m)的污染气流沿陆地边缘抵达山海关附近。此外,在机载飞行试验期间且机载试验数据有效高度内的风向为南风,易将渤海上空的海洋气溶胶带到山海关,故山海关上空存在海洋气溶胶是合理的。综上,初步验证了气溶胶分类方法的准确性。

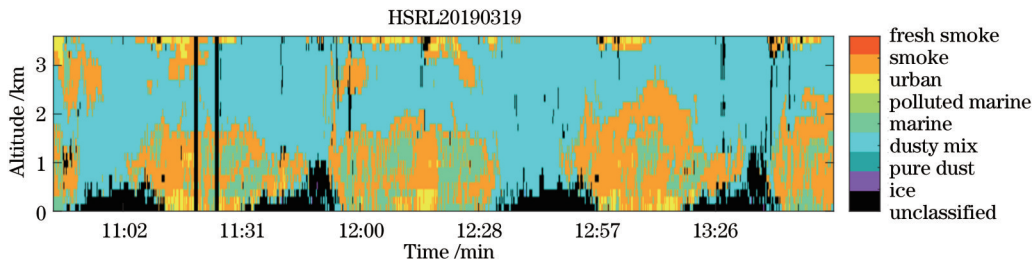


图10 2019年3月19日的气溶胶分类结果
Fig. 10 Aerosol classification results on March 19, 2019

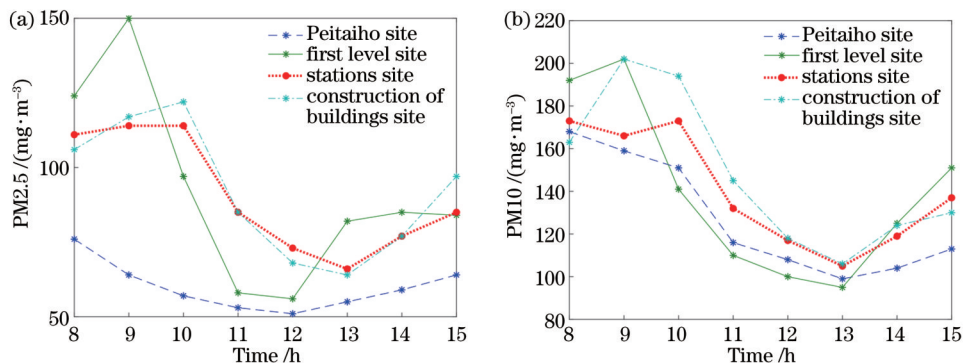


图11 四个站点PM2.5与PM10的变化图。(a)PM2.5;(b)PM10
Fig. 11 Changes of PM2.5 and PM10 at four sites. (a) PM2.5; (b) PM10

为了进一步验证结果的准确性,本文利用了 Aura 卫星 OMI 传感器在 2019 年 3 月 19 日这天对紫外波段吸收性气溶胶的识别能力。基于郑仰成^[15]的研究可知, α 指数偏小且 UVAI 指数较大为沙尘气溶胶。该天退偏比偏大,粒径分布较大,可推知 α 指数偏小,且该天秦皇岛的 UVAI 大于零,表明秦皇岛在 3 月 19 日这天存在沙尘气溶胶。综上,3 月 19 日山海关上空识别出混合沙尘气溶胶、海洋气溶胶以及烟雾和城市气溶胶是合理的。

5 结 论

本文分析了不同类型气溶胶的激光雷达比、退偏比以及色比的分布特征,在总结前人的分类方法的基础上建立了不同类型气溶胶光学参数查找表,将气溶

胶类型分为冰粒子、沙尘、混合沙尘、海洋、污染海洋、城市、烟雾以及新鲜烟雾 8 种类型。基于该查找表利用 2019 年 3 月 11 日的机载观测数据实现了对秦皇岛地区的气溶胶分类识别,结果表明,该天山海关上空存在混合沙尘气溶胶、海洋气溶胶以及烟雾等气溶胶类型,并利用 HYSPLIT 轨迹模式以及气象数据验证了该气溶胶分类方法的可行性。通过对观测期间 3 月 14 日与 3 月 19 日这两天的气溶胶类型的正确识别验证了该方法的适用性,3 月 14 日与 3 月 19 日两天为污染天,山海关上空均存在来自内蒙古地区的沙尘气溶胶,除此之外,由于山海关濒临渤海且试验期间正值冬季供暖期,故在山海关上空有海洋气溶胶与烟雾气溶胶类型的存在,当空气湿度较大时,空气中也会有冰粒子。

本次机载 HSRL 飞行试验是第一次用 Air-ACDL

进行的气溶胶观测试验,分析结果充分体现了HSRL探测气溶胶类型方面的优势,也为星载HSRL在反演气溶胶类型方面奠定了基础。未来,随着ACDL星载激光雷达数据的积累,可以利用ACDL数据建立更为准确、更为丰富的气溶胶分类数据库,进而实现全球气溶胶的分类。

参 考 文 献

- [1] Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects[J]. *Angewandte Chemie*, 2005, 44(46): 7520-7540.
- [2] Climate Change 2013: the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Tie X X, Cao J J. Aerosol pollution in China: present and future impact on environment[J]. *Particuology*, 2009, 7(6): 426-431.
- [4] Measures R M. Laser remote sensing: fundamentals and applications[M]. New York: Wiley, 1992.
- [5] Liu Z Y, Sugimoto N, Murayama T. Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(15): 2760-2767.
- [6] Sugimoto N, Lee C H. Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7468-7474.
- [7] Xie C B, Nishizawa T, Sugimoto N, et al. Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(27): 4945-4951.
- [8] 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.
- [9] Groß S, Tesche M, Freudenthaler V, et al. Characterization of Saharan dust, marine aerosols and mixtures of biomass-burning aerosols and dust by means of multi-wavelength depolarization and Raman lidar measurements during SAMUM 2[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 63(4): 706-724.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 曹念文, 颜鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1101003.
Cao N W, Yan P. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1101003.
- [13] 刘秉义, 庄全风, 秦胜光, 等. 基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0411001.
Liu B Y, Zhuang Q F, Qin S G, et al. Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0411001.
- [14] 李明阳, 范萌, 陶金花, 等. 星载激光雷达云和气溶胶分类反演算法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(2): 383-391.
Li M Y, Fan M, Tao J H, et al. The space-borne lidar cloud and aerosol classification algorithms[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(2): 383-391.
- [15] 郑仰成, 黎丽莉, 王云鹏. 基于多特征参数的OMI遥感产品气溶胶分类研究: 以广东省为例[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(4): 68-75.
Zheng Y C, Li L L, Wang Y P. The multi-feature parameter classification of aerosol based on OMI remote sensing data: a case study in Guangdong Province[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 53(4): 68-75.
- [16] 周妹, 常建华, 陈思成, 等. 一种基于朴素贝叶斯分类器的气溶胶类型识别模型[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1801006.
Zhou M, Chang J H, Chen S C, et al. An aerosol type recognition model based on naive Bayesian classifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1801006.
- [17] 朱鑫琦, 张佩, 王光辉, 等. 基于归一化本征荧光信号的气溶胶分类技术研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(13): 1310005.
Zhu X Q, Zhang P, Wang G H, et al. Study of aerosol classification technique based on normalized intrinsic fluorescence signal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(13): 1310005.
- [18] Martin G M, Johnson D W, Spice A. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51(13): 1823-1842.
- [19] 刘东, 杨雨英, 周雨迪, 等. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2535-2546.
Liu D, Yang Y Y, Zhou Y D, et al. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2535-2546.
- [20] 华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 21-27.
Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 21-27.
- [21] 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.
- [22] Liu Z S, Wu D, Liu J T, et al. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(33): 7079-7086.
- [23] Xu J Q, Witschas B, Kabelka P G, et al. High-spectral-resolution lidar for measuring tropospheric temperature profiles by means of Rayleigh - Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3320-3323.
- [24] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1200002.
Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral lidar imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1200002.
- [25] 戎宇航, 沈雪, 王南朝, 等. 双波长高光谱分辨率激光雷达光谱鉴频器设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0401001.
Rong Y H, Shen X, Wang N C, et al. Design of dual-wavelength spectral discriminator for high-spectral-resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0401001.
- [26] Gao F, Gao F J, Yang X, et al. Accurate measurement of aerosol optical properties using the multilongitudinal mode high-spectral-resolution lidar with self-tuning Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(3): 030101.
- [27] Liu Z S, Bi D C, Song X Q, et al. Iodine-filter-based high spectral resolution lidar for atmospheric temperature measurements[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2712-2714.
- [28] 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究[J]. *大气科学*, 2003, 27(1): 115-122.
Liu J T, Chen W B, Liu Z S. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,

- 2003, 27(1): 115-122.
- [29] 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.
- [30] Cheng Z T, Liu D, Zhang Y P, et al. Field-widened Michelson interferometer for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: practical development[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7232-7245.
- [31] 董俊发, 刘继桥, 朱小磊, 等. 星载高光谱分辨率激光雷达的高光谱探测分光比优化分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S2): S205001.
Dong J F, Liu J Q, Zhu X L, et al. Splitting ratio optimization of spaceborne high spectral resolution lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): S205001.
- [32] 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. Research on high-spectral resolution lidar technology for atmospheric detection[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 迟如利, 吴德成, 刘博, 等. 双波长米散射激光雷达探测对流层气溶胶消光特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(6): 1468-1472.
Chi R L, Wu D C, Liu B, et al. Dual-wavelength Mie lidar observations of tropospheric aerosols[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1468-1472.
- [36] Omar A H. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D10): D10S14.
- [37] Omar A H, Winker D M, Vaughan M A, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(10): 1994-2014.
- [38] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model, obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration's Air Resources Laboratory[EB/OL]. [2016-03-10]. <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>.
- [39] Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, et al. Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 1-4.
- [40] Sassen K, Wang Z E. The clouds of the middle troposphere: composition, radiative impact, and global distribution[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(3): 677-691.
- [41] Sassen K, Hsueh C Y. Contrail properties derived from high-resolution polarization lidar studies during SUCCESS[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(8): 1165-1168.
- [42] Mishchenko M I, Sassen K. Depolarization of lidar returns by small ice crystals: an application to contrails[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(3): 309-312.
- [43] Sakai T, Nagai T, Nakazato M, et al. Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(36): 7103-7116.
- [44] Burton S P, Ferrare R A, Vaughan M A, et al. Aerosol classification from airborne HSRL and comparisons with the CALIPSO vertical feature mask[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(5): 1397-1412.
- [45] Murayama T. An intercomparison of lidar-derived aerosol optical properties with airborne measurements near Tokyo during ACE-Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D23): 8651.
- [46] Tesche M, Gross S, Ansmann A, et al. Profiling of Saharan dust and biomass-burning smoke with multiwavelength polarization Raman lidar at Cape Verde[J]. *Tellus B*, 2011, 63(4): 649-676.
- [47] Wiegner M, Groß S, Freudenthaler V, et al. The May/June 2008 Saharan dust event over Munich: intensive aerosol parameters from lidar measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D23): 1-15.
- [48] Chen W N, Tsai F J, Chou C C K, et al. Optical properties of Asian dusts in the free atmosphere measured by Raman lidar at Taipei[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(36): 7698-7714.
- [49] Preißler J, Wagner F, Pereira S N, et al. Multi-instrumental observation of an exceptionally strong Saharan dust outbreak over Portugal[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D24): D24204.
- [50] Sakai T, Nagai T, Zaizen Y J, et al. Backscattering linear depolarization ratio measurements of mineral, sea-salt, and ammonium sulfate particles simulated in a laboratory chamber[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4441-4449.
- [51] 付松琳, 谢晨波, 李路, 等. 基于激光雷达探测技术的PM_{2.5}浓度辨识研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0928001.
Fu S L, Xie C B, Li L, et al. PM_{2.5} concentration identification based on lidar detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928001.

Aerosol Classification Based on Airborne High Spectral Resolution Lidar

Yao Na¹, Zhang Miaomiao², Bu Lingbing^{1*}, Gao Haiyang¹, Wang Qin¹

¹*School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China*

Abstract

Objective Aerosols play an important role in assessing radiation, climate, cloud formation, and environmental pollution. Additionally, their optical and physical properties exert a significant influence on the formation and transportation of air pollutants. Therefore, spatio-temporal distribution characteristics of tropospheric aerosols are vital for studying the uncertainties of aerosol environments and climate changes. It is of great significance to study the optical properties and vertical distribution changes of aerosols by effective observation methods. As a widely employed aerosol active detection instrument, lidar plays an irreplaceable role in detecting vertical aerosol distribution. Relevant scholars classify the aerosol types by classifying the distribution characteristics of optical parameters such as aerosol depolarization ratio, color ratio, and lidar ratio, which promotes the development of lidar detection research methods. High spectral resolution lidar (HSRL) can accurately detect optical parameters such as aerosol extinction coefficient and backscatter coefficient, and improve the inversion accuracy of aerosol optical parameters. This airborne high spectral lidar flight test is the first aerosol observation test with Air-ACDL, and the analysis results fully reflect the advantages of HSRL in detecting aerosol types and lay a foundation for spaceborne high spectral lidars to invert aerosol types.

Methods Aerosol classification is based on the difference in optical parameters of different aerosol types to reflect their various characteristics. For example, aerosol depolarization ratio δ_a reflects the shape characteristics of particles, aerosol lidar ratio S_a characterizes the absorption characteristics of particles, and dual-wavelength color ratio C_r (532 nm/1064 nm) corresponds to particle size. These characteristics are the theoretical basis for aerosol classification. Generally, S_a varies with the size, shape, and composition of aerosol particles, and the value is higher for particles with strong absorption. δ_a is an important parameter for identifying dust aerosols, which is related to the shape regularity degree of particles. Meanwhile, the δ_a value of spherical particles is the smallest, and the more irregular shape leads to the greater value. The color ratio corresponds to the particle size, and generally the larger color ratio brings smaller particles. Based on these characteristics, the aerosol particle classification can be well achieved. According to the summary of the existing studies, the threshold ranges of S_a , δ_a , and C_r for different aerosol types are sorted out, and an aerosol classification lookup table is established based on the classification threshold standard of aerosols. Additionally, aerosols in the Shanhaiguan area are classified by combining the aerosol optical parameters detected by airborne high spectral lidar.

Results and Discussion According to the comparison results of aerosol optical depth (AOD), the correlation between the airborne observation data, the ground-based sunphotometer, and the passive detector data carried by the satellite is greater than 0.90 (Fig. 2), Aerosol types on March 11, 2019 are classified by the established aerosol classification lookup table and detection data from airborne high spectral lidar [Fig. 6(a)]. The classification results are compared with those of CALIPSO [Fig. 6(c)], and then confirmed by combining meteorological data and backward trajectories (Figs. 4 and 7). The results show that the polluted air flow mainly comes from Mongolia, and it is prone to bring sand and dust aerosols over Shanhaiguan. In addition, since the experimental site is close to the Bohai Sea, there is marine aerosol over Shanhaiguan, and the flight path of CALIPSO passes over the Bohai Sea without marine aerosols. Thus, the classification results of the aerosol classification lookup table based on HSRL are more accurate. Then, by analyzing the aerosol classification results on March 14 and March 19, 2019, the feasibility of the proposed aerosol classification method is verified again.

Conclusions We analyze the distribution characteristics of lidar ratio, depolarization ratio, and color ratio of different aerosol types, and establish the optical parameter lookup table of different aerosol types on the basis of summarizing the previous classification methods. Meanwhile, the aerosol types are divided into eight types, including ice particles, sand, mixed sand, ocean, polluted ocean, city, smoke, and fresh smoke. Based on the lookup table, the airborne observation data on March 11, 2019 are employed to achieve aerosol classification and identification in Qinhuangdao. The results show that there are aerosol types such as mixed sand and dust aerosols, marine aerosols and smoke over Tianshan Customs, and the feasibility of the aerosol classification method is verified by adopting HYSPLIT trajectory mode and meteorological

data. The method applicability is verified by the correct identification of aerosol types on March 14 and March 19, 2019 during the observation period. March 14 and March 19, 2019 are polluted days, and there are dust aerosols from Mongolia over Shanhaiguan. Additionally, as Shanhaiguan is close to the Bohai Sea and the experiment is in the winter heating period, there are marine aerosols and smoke aerosol types over Shanhaiguan, and there will be ice particles in the air under large air humidity. This airborne hyperspectral lidar flight test is the first aerosol observation test with Air-ACDL. The analysis results fully reflect the advantages of HSRL in detecting aerosol types and lay a foundation for spaceborne high spectral lidars to invert aerosol types. In the future, as the ACDL spaceborne lidar data accumulate, they can be utilized to establish a more accurate and rich aerosol classification database and realize global aerosol classification.

Key words airborne high spectral resolution lidar; atmospheric aerosols; aerosol optical properties; aerosol classification