

气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望

黄忠伟^{1,2}, 王雍恺², 闭建荣^{1,2}, 王天河^{1,2}, 李武仁^{1,2},
李泽^{1,2}, 周天²

1. 兰州大学 西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州 730000;

2. 兰州大学 大气科学学院 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要: 大气气溶胶具有显著的环境与气候效应, 而定量评估上述效应需要准确了解气溶胶物理化学光学性质的时空分布特征。过去几十年, 激光雷达已被国内外学者广泛应用于气溶胶探测研究, 主要依赖于其在探测范围、时空分辨率等方面具有独特的技术优势。本文主要总结激光雷达在探测气溶胶方面的国内外研究进展, 首先简要介绍可用于探测气溶胶的主要激光雷达类型, 然后分别根据气溶胶大小、组分、浓度、形状、光学性质等关键信息介绍相关研究进展, 最后进行总结并对气溶胶激光雷达发展进行了展望。

关键词: 激光雷达, 气溶胶, 大气遥感, 遥感

引用格式: 黄忠伟, 王雍恺, 闭建荣, 王天河, 李武仁, 李泽, 周天. 2022. 气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望. 遥感学报, 26(5): 834-851

Huang Z W, Wang Y K, Bi J R, Wang T H, Li W R, Li Z and Zhou T. 2022. An overview of aerosol lidar: progress and prospect, 26(5): 834-851 [DOI: 10.11834/jrs.20221388]

1 引言

气溶胶是大气中的重要组分, 对气候、环境、生态系统均有重要的影响 (Andreae 和 Crutzen, 1997; 毛节泰等, 2002; 石广玉等, 2008; Bi等, 2014; Huang等, 2014)。而要准确评估其气候与环境效应, 必须获知它们物理化学光学特性的时空分布及其演变规律。不同地区、不同季节及在不同的高度上, 气溶胶性质有着显著的差异, 使得气溶胶研究存在很大不确定性 (Aloyan等, 1997)。

由于具有探测距离远、相干性好、时空分辨率高等独特技术优势, 激光雷达成为气溶胶研究领域的不可或缺手段。激光雷达结合了传统雷达技术和现代激光技术, 是常规地面监测技术的有力补充, 可探测气溶胶垂直分布及其快速变化 (周军等, 1998, 2000; 邹炳芳等, 2008; 赵一鸣等, 2014)。1963年, 世界首台红宝石米散射激光雷达诞生于美国 (Fiocco 和 Smullin, 1963)。

1966年, 中国科学院大气物理研究所与上海光学精密机械研究所共同研制中国第一台大气探测激光雷达 (王青梅和张以谟, 2006)。随着探测业务需求与光电技术的快速发展, 中国多家科研院所也开展了大量的大气探测激光雷达的仪器研发与应用研究, 例如, 中国科学院安徽光学精密机械研究所、上海光学精密机械研究所、武汉物理与数学研究所, 西安理工大学、武汉大学、中国海洋大学、浙江大学、兰州大学等 (Gong等, 2015; 吕达仁等, 1977; 刘金涛等, 2003; 程学武等, 2007; 毛建东等, 2010; 刘东等, 2013; 闫庆等, 2013; 周天等, 2013; 黄寒璐等, 2014; 冯长中等, 2018; Huang等, 2020), 有力推动了中国大气探测激光雷达的发展, 并逐步引领国际激光雷达领域的技术前沿。

当前, 激光雷达已被广泛应用于地基观测网与卫星观测, 获得连续、可靠的区域或全球气溶胶光学物理特性观测数据资料。例如, 美国宇航局 (NASA) 建设以全自动运行的微脉冲米散射激

收稿日期: 2021-06-08; 预印本: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41875029, 41627807); 高等教育学科创新项目-111项目 (编号: b13045); 甘肃省野外科学观测研究站项目 (编号: 18JR2RA013); 中央高校基本科研业务费专项资金 (编号: lzujbky-2021-kb12, lzujbky-2021-kb02, lzujbky-2021-sp04)

第一作者简介: 黄忠伟, 研究方向为大气探测、生物气溶胶观测。E-mail: huangzhongwei@lzu.edu.cn

光雷达为主的MPLNET (Welton等, 2018), 欧洲航空局 (ESA) 主导建设的以拉曼激光雷达系统为主的欧洲激光雷达观测网EARLINET (Pappalardo等, 2014), 日本科研机构建设的以偏振激光雷达为主的东亚沙尘观测激光雷达网AD-net (Murayama等, 2001; Sugimoto等, 2018), 以及全球大气成分变化探测网NDACC (De Mazière等, 2018)、美国东部激光雷达观测网REALM (Hoff等, 2005)、独联体激光雷达网CIS-LINET (Chaikovsky等, 2006)等。此外, 近年来星载激光雷达的发展也越来越快。1994年, 搭载发现号航天飞机升空的LITE激光雷达是世界上第一台星载激光雷达 (McCormick和Hostetler, 1995)。2006-04, CALIPSO卫星搭载全球首个星载云与气溶胶激光雷达 (CALIOP) 成功投入使用。CALIOP采用532 nm和1064 nm两个波长, 拥有偏振探测能力可更准确地区分云和气溶胶类型, 为气溶胶—云—气候效应评估提供了全球气溶胶的三维时空分布 (Vaughan等, 2004; Winker等, 2007)。

激光雷达已成为国内外大气探测的重要手段, 在探测气溶胶物理光学特性取得了长足的进步。本文主要总结国内外在气溶胶激光雷达硬件研发、算法开发以及大气遥感与环境监测应用等方面的研究进展。

2 激光雷达基本探测原理

气溶胶激光雷达的主要探测原理是激光器向大气中发射的激光被气溶胶、空气分子散射与吸收后, 其中散射回波信号被天文望远镜接收, 然后通过精细分光、提取再使用光电探测器转换成电信号, 采用高速数据采集卡获得数据并保存, 最后进行数据处理与反演就可以得到气溶胶特征信息, 如图1所示。通常情况下, 激光雷达系统包

括激光发射、信号接收探测与数据采集处理等3个子系统。

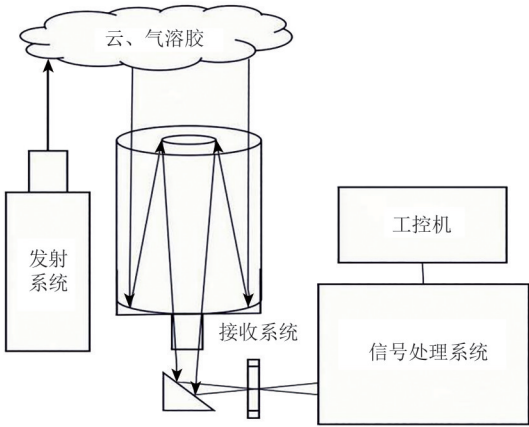


图1 气溶胶激光雷达系统基本探测原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of basic detection principle of aerosol lidar system

激光发射子系统包括激光器和扩束器。按照工作物质类型不同, 激光器可分为固体、半导体、染料和气体激光器; 扩束器可扩大激光光斑, 同时使得发散角变小。信号接收子系统包括望远镜、光阑、分光镜、探测器等。常用望远镜有牛顿反射式望远镜、卡塞格林反射式望远镜; 光阑放置在望远镜的焦点, 可减少天空背景噪声和多次散射效应影响; 目前探测器主要使用雪崩二极管 (APD), 光电倍增管 (PMT) 以及电荷耦合器件 (CCD) 等。数据采集子系统包括高速数据采集卡、电脑等。有两种数据采集方式: 一是模数转换技术, 具有高线性度的特点, 常用于采集强回波信号; 二是光子计数技术, 具有高灵敏度的特点, 适合微弱回波信号。通常情况下, 同时使用两种采集技术, 提高探测信号动态范围, 有效提升激光雷达探测能力。常用的气溶胶激光雷达类型, 如表1所示。

表1 气溶胶激光雷达主要类型介绍
Table 1 Main types of aerosol lidar

激光雷达类型	探测原理	特点
米散射激光雷达	米散射	没有能量交换, 不发生频移, 散射前后波长不发生变化
偏振激光雷达	米散射+偏振	通过偏振晶体将信号分为平行的P通道和垂直的S通道
拉曼激光雷达	拉曼散射	非弹性散射过程, 发生频率漂移
高光谱分辨率激光雷达	米散射+瑞利散射	通过滤波器 (F-P干涉仪、原子\分子吸收滤波器、FWMI)
荧光激光雷达	紫外激光诱导荧光	激光与气溶胶相互作用的能级跃迁造成荧光效应

2.1 米散射激光雷达

米散射激光雷达是激光雷达中发展的最成熟、应用最广泛的类型。当散射粒子尺寸与激光波长相当的时候发生米散射现象，其特点是散射前后波长没有变化，大气中与激光发生米散射的主要是气溶胶与云。由于其散射截面较大，通常米散射激光雷达的回波信号较强。

在使用激光雷达的数据反演气溶胶消光系数或后向散射系数之前，需要先对原始数据进行一系列订正，依次包括背景噪声、距离平方及几何重叠因子等订正（黄忠伟，2012）。一般选取高空无气溶胶的区域信号平均值作为背景信号，将回波信号减去该平均值即完成背景噪声订正，然后把观测数据乘以对应探测距离的平方即可完成距离平方订正。由于发射场与接收场的交迭并不完全重合，导致在近距离只有部分信号被探测，需对此进行信号修正，因而准确地订正几何重叠因子极为重要。目前常用的几何重叠因子获取方法有解析法、水平实验法及拉曼观测法等。把经过距离订正的信号除以几何重叠因子，就可完成该订正步骤。

$$\beta_1(I) = -\beta_2(I) + \frac{X(I) \exp(A(I, I+1))}{\frac{X(I+1)}{\beta_1(I+1) + \beta_2(I+1)} + S_1(X(I+1) + X(I) \exp(A(I, I+1))) \Delta Z} \quad (2)$$

式中， $A(I, I+1) = (S_1 - S_2)(\beta_2(I) + \beta_2(I+1))\Delta Z$ ， β_1 、 β_2 分别是气溶胶与空气分子的后向散射系数， β_2 可以由美国标准大气模式或探空资料的空气分子密度计算； X 是经过背景去除、距离平方订正、几何重叠因子订正之后的回波信号强度； ΔZ 是激光雷达距离分辨率； I 是探测距离； S_1 、 S_2 分别是气溶胶和空气分子的激光雷达比，且 $S_2 = \frac{8\pi}{3}$ 。

(2) Klett法。假设气溶胶消光系数 σ 与后向散射系数 β 存在如下关系（Collis和Russell，1976；Klett，1981）：

$$\beta = C\sigma^k \quad (3)$$

式中， C 为常数， k 受气溶胶物理化学特性和入射激光波长影响，通常情况下 k 取值范围为0.67—1.0。

将式（3）代入激光雷达方程，解得：

$$\sigma(z) = \frac{\exp\left(\left(X - X_m\right)/k\right)}{\sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_z^{z_m} \exp\left(\left(X - X_m\right)/k\right) dz'} \quad (4)$$

式中， X 为已订正处理后的激光雷达数据， Z_m 往

利用米散射激光雷达数据反演气溶胶消光系数，需要先假定雷达比（LR），即气溶胶消光系数与后向散射系数之比，由气溶胶组分、大小、形状与湿度等因子决定。不同类型气溶胶的雷达比，如表2所示。

米散射激光雷达方程为

$$P(z) = \frac{C \cdot E \cdot O(z) \beta(z) e^{-2 \int_0^z \sigma(z) dz}}{z^2} + P_B \quad (1)$$

式中， P 为激光雷达回波信号强度， C 是雷达常数， E 是发射激光脉冲能量， $O(z)$ 是几何重叠因子， σ 与 β 分别是大气总消光系数和总后向散射系数， Z 是探测距离， P_B 是接收背景信号。目前求解米散射激光雷达方程的方法主要有Fernald和Klett法。

(1) Fernald法。假设大气由空气分子和气溶胶两部分组成，于是大气消光系数（后向散射系数）也是由大气分子和气溶胶两部分的消光系数（后向散射系数）共同组成。因此，气溶胶后向散射系数反演方程为（Fernald，1984；Welton和Campbell，2002）

往是最大探测距离或者气溶胶浓度很低的高度。

k 值的确定主要通过两个步骤，一是采用不同 k 值反演气溶胶消光系数随高度的变化值及其垂直分布趋势。一般认为只要有气溶胶粒子存在，消光系数大于零，所以若反演的消光系数存在负值或者随高度升高出现明显振荡，便可缩小 k 的取值范围。二是通过太阳光度计结果和激光雷达反演光学厚度比较差异性，当差值近似为零时，可精确 k 值如表3所示（王治华等，2006；张文煜等，2008；张京朋等，2016；孙海波，2017）。

2.2 偏振激光雷达

偏振激光雷达探测原理是发射线偏振激光与气溶胶发生散射，非球形粒子会改变激光偏振方向。当回波信号经过偏振晶体（PBS）后，被分为与发射激光偏振方向平行的P通道和垂直的S通道。其中，气溶胶退偏比 δ 可定义为S通道信号 $P_{\perp}$ 与P通道信号 $P_{\parallel}$ 之比，其方程如下：

$$\delta(z) = K \frac{P_{\perp}(z)}{P_{\parallel}(z)} \quad (5)$$

式中， K 为偏振订正系数，由两个偏振探测通道的光学和电子学增益差别造成（刘东等，2003）。一般来说，球形粒子的退偏比为零，而非球形粒子的退偏比大于零。

表2 主要气溶胶类型的激光雷达比
Table 2 Lidar ratios of major aerosol types

气溶胶类型	地点	532 nm 激光雷达比/sr	参考文献
沙尘		40	马盈盈(2009)
	敦煌(中国)	34	华雯丽(2018)
	安眠岛(韩国 春季)	48±22	Noh(2007)
	安眠岛(韩国 秋季)	61±6	Noh(2007)
	东京(日本)	47±18	Sakai(2003)
		55±10	Müller(2003)
	撒哈拉沙漠	63±6	Groß(2011)
		50±11	Berjón(2019)
		49.5±36.8	
	地中海	44.4±15.9	
	大西洋中部	40.3±12.4	
	阿拉伯海	37.5±12.1	Kim(2018)
	塔克拉玛干沙漠 (澳大利亚)	35.5±31.1 35.4±34.4	
	阿拉伯沙漠	42.5±12.4	
烟尘		46.5±10.5	Liu(2002)
		44±9	CALIPSO
		50	Sugimoto(2006)
		40–58	Burton(2012)
		43–53	Groß(2013)
		98	王向川(2005)
	安眠岛(韩国 春季)	58±4	Noh(2007)
霾	安眠岛(韩国 秋季)	66±9	Noh(2007)
	东京(日本)	60	Murayama(2004)
		70±16	CALIPSO
		30–50	Burton(2012)
		52–86	Groß(2013)
海洋气溶胶	广州(中国)	46.7±5.6	Ansmann(2005)
		50–70	Burton(2012)
		50–62	Groß(2013)
生物质燃烧		20	马盈盈(2009)
		28(5)	张朝阳(2013)
		23±5	CALIPSO
		15–25	Burton(2012)
		13–23	Groß(2013)
大陆清洁气溶胶		70	马盈盈(2009)
		60(8)	张朝阳(2013)
火山灰/硫酸盐颗粒	莱比锡(德国)	52.3±16.6	Müller(2004)
	俄克拉荷马(美国)	68±12	Ferrare(2001)
		70±25	CALIPSO
	普耶韦(智利)	69±13	
	萨里切夫(俄罗斯)	63±14	Prata(2017)
	卡萨托奇(美国)	66±19	
		44±9	CALIPSO

表3 不同天气和k值下消光系数平均值(王治华等,2006)
Table 3 Average extinction coefficient under different weather and k value (Wang et al., 2006)

参数 $k(\text{km}^{-1})$	不同天气		
	阴天	雾天	晴天
0.7	0.4423	0.6125	0.1352
0.8	0.4465	0.6864	0.1257
0.9	0.3539	0.7244	0.0985
1.0	0.0885	0.6771	0.0511

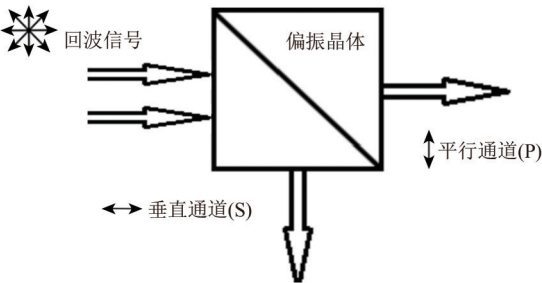


图2 偏振雷达的分光装置图
Fig. 2 Polarization lidar splitter device diagram

由于两个偏振通道光电效率不一定相等，即 K 往往不等于1，需要进行有效定标。目前常用的偏振订正方法（李保卫等，2019）有：一是大气分子法，利用大气分子的退偏比作为已知量，再获取某一高度退偏比实际值。该值与大气分子退偏比的比值即为两通道订正系数；二是半波片法，在偏振晶体之前插入半波片，通过半波片使P、S通道发生旋转，比较前后偏振信号的差异进而完成定标（Freudenthaler等，2009）。

2.3 拉曼激光雷达

拉曼散射是激光与大气分子之间的一种非弹性散射过程，在相互作用中散射光因为分子内部结构的振动发生频率漂移，导致散射光波长与入射光波长不一致。目前一般使用短波飘移部分，常用波长为355 nm，532 nm。大气中各种主要气体的拉曼频移量为：氧气（1556 cm^{-1} ），氮气（2331 cm^{-1} ），水汽（3652 cm^{-1} ）。拉曼激光雷达探测气溶胶利用大气中高度分布稳定的氮气分子振动拉曼散射信号只受气溶胶消光影响的特点，在无需激光雷达比、边界条件假设条件下实现对气溶胶光学特性的精细探测，从而减小误差（高飞等，2017）。由于拉曼信号比较弱，比米散射信号要小3—4个量级，且散射截面小，受背景噪音影响大，不适合白天探测（刘东等，2015）。所以必须对噪

音进行有效抑制,一般使用高灵敏度的PMT和光子计数进行信号探测。拉曼激光雷达方程为如下所示:

$$P(\lambda_R, z) = C_R \frac{Y(z)}{z^2} N(z) \sigma_{N_2} \times \exp\left(-\int_0^z (\alpha_m(\lambda_L, z') + \alpha_m(\lambda_R, z')) dz'\right) \times \exp\left(-\int_0^z (\alpha_a(\lambda_L, z') + \alpha_a(\lambda_R, z')) dz'\right) \quad (6)$$

式中, $P(\lambda_R, z)$ 为拉曼通道回波信号, λ_R 为经过氮分子拉曼散射后的波长, λ_L 为激光波长, C_R 为拉曼通道的雷达常数, $Y(z)$ 为雷达接收视场角内的重叠系数, $N(z)$ 为高度 z 处的氮气分子数密度, σ_{N_2} 为氮气分子后向散射截面, $\alpha_m(\lambda_L, z)$ 和 $\alpha_m(\lambda_R, z)$ 分别为高度 z 处的大气分子在 λ_L 、 λ_R 的消光系数, $\alpha_a(\lambda_L, z)$ 和 $\alpha_a(\lambda_R, z)$ 分别为高度 z 处的大气气溶胶分子在 λ_L 、 λ_R 的消光系数。

拉曼方法求解气溶胶消光系数的公式为 (Ansman 等, 1992)

$$\alpha_a(\lambda_L, z) = \frac{\frac{d}{dz} \ln \left(N_N^2(z) / \left(z^2 P(\lambda_R, z) \right) \right) - \alpha_m(z, \lambda_L) \left(1 + (\lambda_R / \lambda_L)^{-4} \right)}{1 + (\lambda_R / \lambda_L)^{-p}} \quad (7)$$

式中, $N_N^2(z)$ 是高度为 z 处的氮气分子数密度, 一般氮气在大气中含量比较稳定常用作参考值, 可以利用标准大气模式获得。 $\alpha_m(z)$ 、 $\alpha_a(z)$ 分别是高度 z 处的大气分子和气溶胶消光系数。 λ_L 、 λ_R 分别为激发波长和拉曼散射波长。气溶胶消光波长指数 V 一般取 1。

此外, 可选择石英作为探测矿物气溶胶的示踪剂, 利用拉曼激光雷达探测二氧化硅的拉曼散射, 估计气溶胶中石英或沙尘的质量浓度 (Tatarov 和 Sugimoto, 2005; Tatarov 等, 2008)。由于石英的拉曼后向散射系数几乎是恒定的。在探测矿物气溶胶, 特别是在球形和非球形气溶胶的混合情况下, 这种方法相较于偏振探测方法具有显著的优势, 且有助于表征大气气溶胶和矿物粉尘的研究, 对区分沙尘和冰云特别有用。

2.4 高光谱分辨率激光雷达

由于米散射激光雷达反演气溶胶参数的精度较低, 而拉曼激光雷达又由于信号较弱, 白天探

测能力受限。Fiocco 和 DeWolf 于 1968 年提出了高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) (DeWolf 和 DeWolf, 1968)。其基本原理是利用大气气溶胶粒子和大气分子光谱宽度的不同, 使用窄带滤光器将回波信号的大气气分子瑞利散射和气溶胶米散射分开, 从而实现气溶胶的高精度精细探测 (刘东 等, 2015), 如图 3 所示。

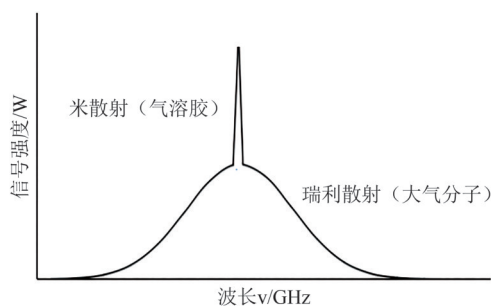


图3 大气回波散射信号的光谱图 (刘东, 2015)

Fig. 3 Spectrum of atmospheric echo scattering signal (Liu et al., 2015)

分离后的空气分子信号和气溶胶信号光子数为 (刘东 等, 2015)

$$N_{mol}(r) = K_{mol} r^{-2} O(r) \left(f_{am} \beta_{aer}(r) + f_{mm} \beta_{mol}(r) \right) \times \exp \left(-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right) \quad (8)$$

$$N_{aer}(r) = K_{aer} r^{-2} O(r) \left(f_{aa} \beta_{aer}(r) + f_{ma} \beta_{mol}(r) \right) \times \exp \left(-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right) \quad (9)$$

式中, K_{mol} 和 K_{aer} 包含了所有与测量高度无关的系统常数; f_{am} 和 f_{mm} 分别为分子通道中气溶胶信号和分子信号的通过率; f_{aa} 和 f_{ma} 分别为气溶胶通道中气溶胶信号和分子信号的通过率, 这些参数均可通过实验前的校准过程获得。又因为 β_{mol} 可以根据大气密度直接计算得到, 所以通过式 (8) 和式 (9) 即可反演得到气溶胶后向散射系数 β_{aer} 以及气溶胶消光系数 α_{aer} 的值。

HSRL 是一种将以精细分光技术为核心的激光雷达, 具有较高的光谱分辨能力。而目前为了实现激光系统的小型化, 促进星载 HSRL 的发展, 将多纵模激光器应用于 HSRL 也是一大热点 (成中涛 等, 2017), 这一技术不需要对谐振腔实施精密控制, 极大地提高了激光器的稳定性和环境适应性。鉴频技术是 HSRL 实现对大气参数精确探测的

关键所在，其核心是滤波器，主要有F-P干涉仪滤光器、原子/分子吸收滤光器以及视场展宽迈克尔逊干涉滤光器(FWMI)等。1983年Wisconsin大学的第1台基于F-P干涉仪的HSRL(Shiple等, 1983)。Shimizu等(1983)提出了在HSRL中使用窄带原子吸收滤波器测量大气参数的概念，利用原子或分子的特征吸收峰实现对米散射和瑞利散射的分离。之后钡原子吸收滤光器、碘分子吸收滤光器相继被应用；Hair等(2001, 2008)分别利用碘分子吸收滤光器搭建了HSRL对大气参数进行测量。目前碘吸收滤波器是应用最多、性能最好的滤波器，但使用要求高和适用范围较小，所以HSRL的发展还是受限于硬件稳定性。

碘吸收滤波器所测到的两个通道的后向散射信号强度为

$$N_M(z) = C_M(\beta_a(z) + \beta_R(z))T^2(z) \quad (10)$$

$$N_F(z) = C_F(f_a(z)\beta_a(z) + f_R(z)\beta_R(z))T^2(z) \quad (11)$$

式中， $T(z) = T_R(z)T_a(z)$ ； f_a 、 f_R 分别为激光、气溶胶与碘分子光谱的卷积结果和激光、大气分子散射和碘分子光谱卷积的结果； C_M 、 C_F 分别为两路的系统常数，其中包括激光能量、光学效率、探测器的量子效率和激光雷达的距离因子等。对式(10)、(11)两式进行相除，就可以得到气溶

$$\frac{dE}{d\lambda_{ba}}(\lambda_{ba}, \lambda_0, r) = n_{pu} E_0(\lambda_0) \xi(r) \frac{A_0}{r^2} t_{oc}(\lambda_0) t_{ac}(\lambda_{ba}) t_{ac}(\lambda_0, r) t_{ac}(\lambda_{ba}, r) \Delta r N_{ba}(r) \frac{d^2 \sigma}{d\Omega d\lambda_{ba}}(\lambda_0, \lambda_{ba}) \quad (13)$$

式中， $\frac{dE}{d\lambda_{ba}}$ 是每间隔波段内非弹性散射体的能量， λ_{ba} 是收集的回波信号波长， λ_0 是激发波长， r 是生物气溶胶所在高度。等式右边分别是能量项、接收几何项(重叠因子 $\xi(r)$ 与接收望远镜口径 A_0 的乘积经过距离订正)、光学参数项、大气参数项、散射体特性项和散射体厚度项。

Stowers等(2006)成功利用四倍频266 nm紫外激光测量了生物气溶胶颗粒的荧光光谱。德国CBRN研究中心实现了1064 nm波长探测弹性散射信号，532 nm波长测量偏振，266/355 nm作为生物气溶胶荧光激发波长的多波长雷达系统(Joshi等, 2013)。Wojtanowski等(2015)构建了一台266/355 nm作为激发波长的激光诱导生物气溶胶荧光雷达。目前，在激光诱导荧光探测生物气溶胶的研究方面，国内仍处于起步阶段。2014年兰

胶后向散射比 R ：

$$R_b(z) = (\beta_a(z) + \beta_R(z)) / \beta_R(z) \quad (12)$$

2.5 荧光激光雷达

荧光激光雷达常被用于探测生物气溶胶。与拉曼散射相似，荧光效应是激光与大气分子或原子相互作用的能级跃迁造成的，并且荧光效应产生的是连续较宽光谱。紫外激光诱导荧光技术可通过不同种类生物气溶胶的吸收光谱和发射光谱，将有机粒子从无机气溶胶粒子区分出来，再经过比较不同固有荧光谱带的光谱强度，进行反演计算，获得生物气溶胶的相关信息。多数生物气溶胶主要的组成成分为芳香族氨基酸和辅酶，荧光光谱范围多在200—600 nm(饶志敏等, 2017)。为了保证回波信号质量要求尽可能的避免杂散光的影响，提高荧光回波强度，一般激光发射波长选择为266 nm或355 nm。

荧光光谱强度受温度、pH值、激光能量、气溶胶浓度的影响。在实际应用中，荧光雷达回波信号的强度较弱，探测距离有限，一般采用光子计数法探测，通常辅以氮气拉曼信号，有效保证精度的同时避免繁琐校准。

荧光激光雷达方程为(Measures, 1984)

州大学黄建平教授团队成功搭建了一台多波段拉曼荧光激光雷达系统，355 nm作为激发光源，接收38个波段，对大气状态实现了高精细探测(2014)。西安理工大学饶志敏等构建了一台用于大气生物气溶胶预警和探测的双波长激光诱导荧光雷达系统，覆盖紫外到红外波段，能够实现对生物气溶胶云团的预警跟踪和辨别(饶志敏等, 2017)。

2.6 其他类型激光雷达

随着光电技术快速发展，近年来也涌现出一些新型激光雷达用于探测气溶胶，如沙式激光雷达、CCD探测激光雷达和LED激光雷达等。

沙式雷达技术以沙式成像原理为基础，可实现大气后向散射信号的距离分辨探测。沙氏成像原理的优点在于激光雷达回波信号不随距离的平方衰减，不需要运用单光子计数技术，降低了系

统对测量动态范围的要求；且近场探测盲区小于100 m，有效解决了传统脉冲式大气激光雷达近距离探测盲区大的问题（梅亮，2018）。2015年，瑞典隆德大学联合挪威纳斯克公司最早利用SLidar技术开展了大气气溶胶遥感探测实验研究工作，初步论证了SLidar技术在大气气溶胶探测方面的可行性（Brydegaard, 2014；Mei和Brydegaard, 2015）。

沙式激光雷达方程可表示为

$$P(\lambda, z) = KP_0(\lambda)O(r)\beta(\lambda, z) \times \exp\left(-2\int_0^z \alpha(\lambda, z')dz'\right) \quad (14)$$

式中， λ 是波长； z 是测量距离； $P_0(\lambda)$ 是激光器的输出功率； K 是系统常数； $O(r)$ 是几何重叠因子； $\beta(\lambda, z)$ 是大气的后向散射系数； $\alpha(\lambda, z)$ 是大气消光系数； $P(\lambda, z)$ 是SLidar系统探测到的距离分辨的大气后向散射信号。

CCD雷达，也称侧向激光雷达。该系统将发射装置与接收装置分两处放置，激光器发射出激光，利用大张角的CCD相机对激光光柱进行拍照，进而分析被探测区域的大气性质（陶宗明等，2014）。侧向激光雷达在近距离段的探测精度很高，可以实现无盲区探测，没有几何因子的问题，特别适合于近距离段的大气气溶胶探测，缺点在于远距离段空间分辨率不高、信噪比较低。目前常把CCD探测与后向散射激光雷达联合在一起进行工作。Barnes等（2003）利用CCD相机侧向激光雷达系统在夏威夷的莫纳罗亚山上对大气边界层的气溶胶空间分布进行了探测。国内相关单位利用CCD雷达对近地面的气溶胶进行了探测研究（史博等，2015；麻晓敏等，2018；陶宗明等，2019）。

LED光源雷达是近年来出现的一种新型主动式遥感雷达。LED雷达的优点在于选用LED作为探测光源，波长丰富，在进行多波长探测时容易实现气溶胶高分辨率的粒子谱分布探测（Thurmond等，2016）。但是目前来说LED雷达光源的发散角太大，发射能量偏低，在实际应用中需要复杂的发射光源整形系统。日本千叶大学Tatsuo等学者研制了第一台LED光源大气遥感雷达，该雷达可以实现夜间200 m范围内的气溶胶探测。由于LED雷达体积小、坚固耐用，Tatsuo和Sonoko等在2016年设计了一款可用于火星车探测烟雾和灰尘的LED

雷达（Shiina, 2013；Shiina等，2016）。钟文婷等（2016，2018）设计并研发了新型单波长LED光源雷达系统，探测西安城区上空气溶胶分布。

3 探测气溶胶性质的进展

3.1 光学特性

气溶胶散射信号与粒径谱、波长、大气折射率、浓度等都有关系。通过测量不同波段的回波信号，可以获得气溶胶光学特性，如消光系数、后向散射系数、雷达比（LR）、气溶胶光学厚度（AOD）、Ångström波长指数等。气溶胶消光系数和后向散射系数是激光雷达方程的两个未知参量。后向散射系数越大表明大气中颗粒物的散射能力越强，反之越弱。影响后向散射系数的因素较多，例如颗粒物浓度，粒子半径，相互之间的关系较复杂。气溶胶消光系数反映了气溶胶消光能力。Ångström波长指数是度量米散射粒子尺度分布的重要参数。Ångström波长指数的值一般在0—4.0的范围内，与气溶胶的大小密切相关，揭示了消光对入射光波长的依赖关系。当气溶胶粒子半径与入射激光波长相比很大时，Ångström指数接近于0，并随着粒子尺寸的减小而变大（狄慧鸽等，2014）。

目前通过多通道激光雷达系统，可实现气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比等光学特性垂直分布的。太阳光度计提供的准确AOD值作为约束条件为精确求解米散射激光雷达方程给予了极大帮助，拉曼或者高光谱分辨率激光雷达的使用使反演总消光系数误差降低到10%，甚至后向散射系数的误差降到5%（Bösenberg和Hoff, 2017）。但是要得到较为准确的气溶胶光学特性，难点在于反演算法的不稳定。国内许多学者一直致力于反演方法与激光多次散射问题的研究，发展了不同的多次散射激光雷达方程（吕达仁等，1977；周诗健等，1981；邱金桓等，1992，2003）。

激光雷达在探测气溶胶光学特性方面具有明显的技术优势，例如，黄忠伟等人通过多部激光雷达追踪2010年春季发生在东亚地区的一次大尺度沙尘暴，发现亚洲沙尘气溶胶在5 d内从中国西北部迅速传输到北极。其中SACOL、仙台两地的激光雷达探测沙尘层垂直分布结果如图4所示（Huang等，2015b）。

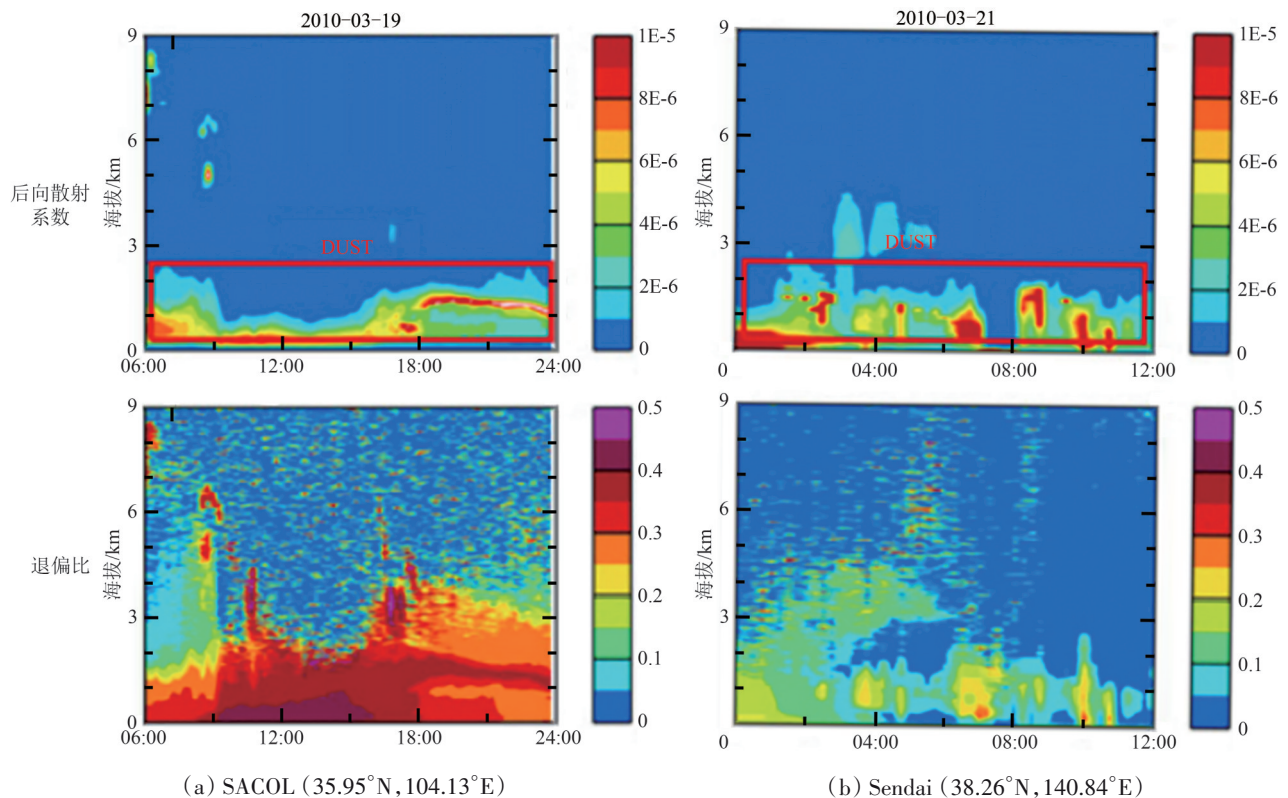


图4 位于SACOL、仙台的2部激光雷达追踪同一沙尘事件的观测结果(Huang等, 2015)

Fig. 4 Observation results of two lidar systems in SACOL and Sendai tracking the same dust event (Huang et al., 2015)

3.2 大小

气溶胶尺度大小常用色比CR (Color Ratio) 来表示, 往往是长波变量(如衰减后向散射系数或消光系数)除以短波变量的比值, 即较大的色比值表示颗粒较粗, 反之则反。下面给出以532 nm波长和355 nm波长之间的色比:

$$\chi(z) = \frac{\beta_{a,532}(z)}{\beta_{a,355}(z)} \quad (15)$$

实际应用中, 很难通过色比大小来定量确定粒子尺寸。一般云的色比往往大于气溶胶的, 而沙尘气溶胶的色比大于城市污染气溶胶的色比。

气溶胶粒子大小也会随环境因素发生改变。例如, 相对湿度的增加会使气溶胶粒径变大, 且相对湿度越大, 粒径变化越明显。2008年中美联合沙尘天气试验在中国西北进行, 利用3个多脉冲激光雷达(MPL)系统以及其他地面仪器和星载遥感技术, 测量了沙尘暴的沙尘气溶胶垂直廓线及其远距离输送。图5显示为CALIPSO观测到高浓度气溶胶层, 该气溶胶层出现在北京时间03:50左右, 其色比介于0.6—0.9 (Huang等, 2010)。

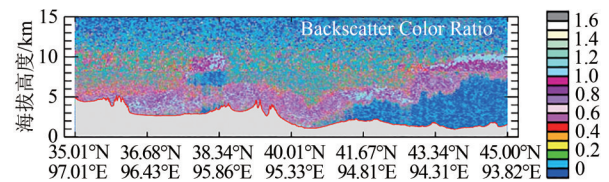


图5 CALIPSO星载激光雷达探测2008-05-02中国西北地区沙尘暴期间的沙尘色比大小(Huang等, 2010)

Fig. 5 The size of dust color ratio detected by CALIPSO during the sandstorm in Northwest China on May 2, 2008 (Huang et al., 2010)

3.3 形状

气溶胶退偏比可反映其形状的不规则性, 理论上球形粒子的退偏比为零, 非球形粒子的退偏比大于零。退偏比被认为是鉴别沙尘气溶胶的重要参数, 532 nm波长的气溶胶退偏振比达到30%—35%时, 可以表明是纯沙尘 (Sugimoto 和 Lee, 2006; Freudenthaler 等, 2009), 冰晶粒子也有较高的退偏比, 例如卷云 (Mishchenko 和 Sassen, 1998)。

Scholand等(1971)首先利用偏振激光雷达对云进行了探测。经过几十年的发展, 目前偏振激光雷达已被广泛应用于探测气溶胶和云的垂直分布 (Ansmann 等, 1992; Cairo 等, 1999; McGill 等,

2015)。偏振激光雷达在区分云相位具有独特的探测能力 (Sassen, 1991)。Liu 等 (2002) 对亚洲沙尘暴沙尘气溶胶的退偏比和激光雷达比进行了统计分析, 更准确地地区分云和气溶胶粒子层。Sassen 等 (2001) 根据激光雷达区分了各种大气目标, 如冰水云、幡状云、降水和气溶胶等。Liu 等 (2008) 利用 CALIPSO 激光雷达观测的层平均退偏比研究了对流层沙尘粒子的特征。周天等 (2013) 利用层积分后向散射衰减系数和层积分退偏比之间的关系识别塔克拉玛干沙漠上空的沙尘。Burton 等 (2014) 提出了一种参数化方案, 整合了激光雷达比、后向散射比和退偏比三者用以识别气溶胶类型。

应指出的是, 研究还发现退偏比不仅取决于颗粒形状, 与颗粒的大小和浓度也有关系。青藏

高原夏季的沙尘气溶胶在不同海拔高度上的体退偏比发现具有显著的差异 (Huang 等, 2007); 大气中相对湿度的增加会使非球形气溶胶转化为球形气溶胶, 且非球形气溶胶与球形气溶胶随着海拔升高而逐渐增加 (孙冉 等, 2017); 沙尘气溶胶随着远距离传输和抬升高度增加, 受自身重力沉降作用以及其他污染物的吸附和包裹影响, 造成不规则程度降低 (茹建波, 2017); Huang 等 (2020) 发现沙尘气溶胶在 532 nm 和 355 nm 处的 DRs 比值与气溶胶的吸收系数有很好的关系, 证实了沙尘气溶胶的吸收特性导致了紫外和可见波长的退偏比差异。如图 6 所示, 气溶胶和云在不同波段退偏比具有显著的差异。

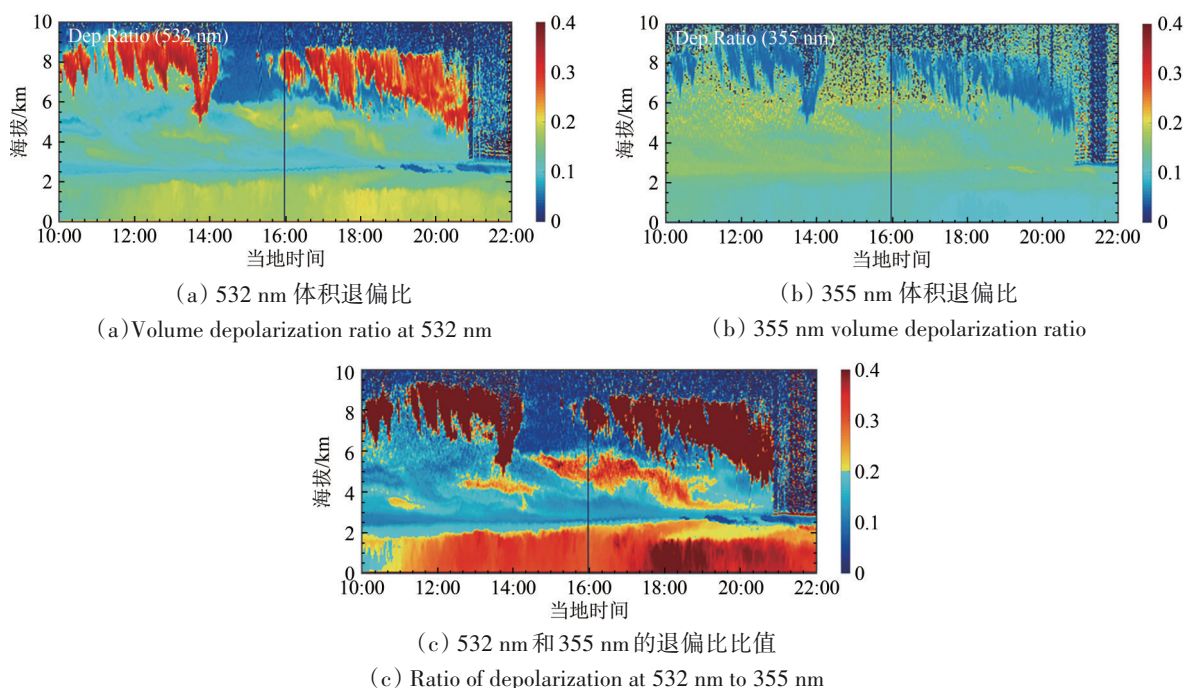


图 6 兰州大学自主研发的双波段偏振激光雷达于 2014-03-11 在兰州市探测的云和气溶胶垂直结构 (齐思齐, 2020)

Fig. 6 Vertical structure of cloud and aerosol detected by dual-band polarization lidar independently developed by Lanzhou University in Lanzhou city on March 11, 2014 (Qi et al., 2020)

3.4 组分

大气气溶胶的种类很多, 按其来源可以分为自然源和人为源, 自然源主要是源于海洋、土壤、火山爆发、森林燃烧的粒子, 人为源主要是源于人为活动, 如化石燃烧等。由于不同气溶胶类型具有不同光学物理特性, 为区分气溶胶提供了物理基础。并且气溶胶排放源的空间、时间非均匀性、以及气溶胶老化和二次生成引起的气溶胶变

化, 也让通过激光雷达来开展气溶胶类型探测研究显得非常必要。目前随着地基激光雷达观测站的增加、星载激光雷达的全球覆盖和观测时间的累积, 结合地基和卫星资料, 发挥各自所长对气溶胶进行分类, 使划分的气溶胶类型更为准确合理, 有望极大地提高对气溶胶在全球分布及其气候效应的认识。利用不同波长的偏振测量可以显著改善气溶胶分类 (Burton 等, 2012, 2014;

Huang等, 2020)。目前, CALIOP激光雷达观测数据已被广泛用于评估多种气溶胶类型的气溶胶模型模拟。CALIPSO卫星气溶胶和云的官方分类识别算法经历了多个版本的改进, 2016年11月发布的版本4.10 (V4) 2级气溶胶数据产品, 对气溶胶分类和激光雷达比值选择算法进行了重大改进。

重新定义气溶胶分类规则, 更新所有类型气溶胶的激光雷达比率, 使气溶胶的分类更加完善合理, 可靠性大大提高。图7显示了CALIPSO卫星经过东欧到北非的气溶胶类型分布, 通过气溶胶分类算法发现6种气溶胶类型都出现在轨道上 (Omar等, 2008)。

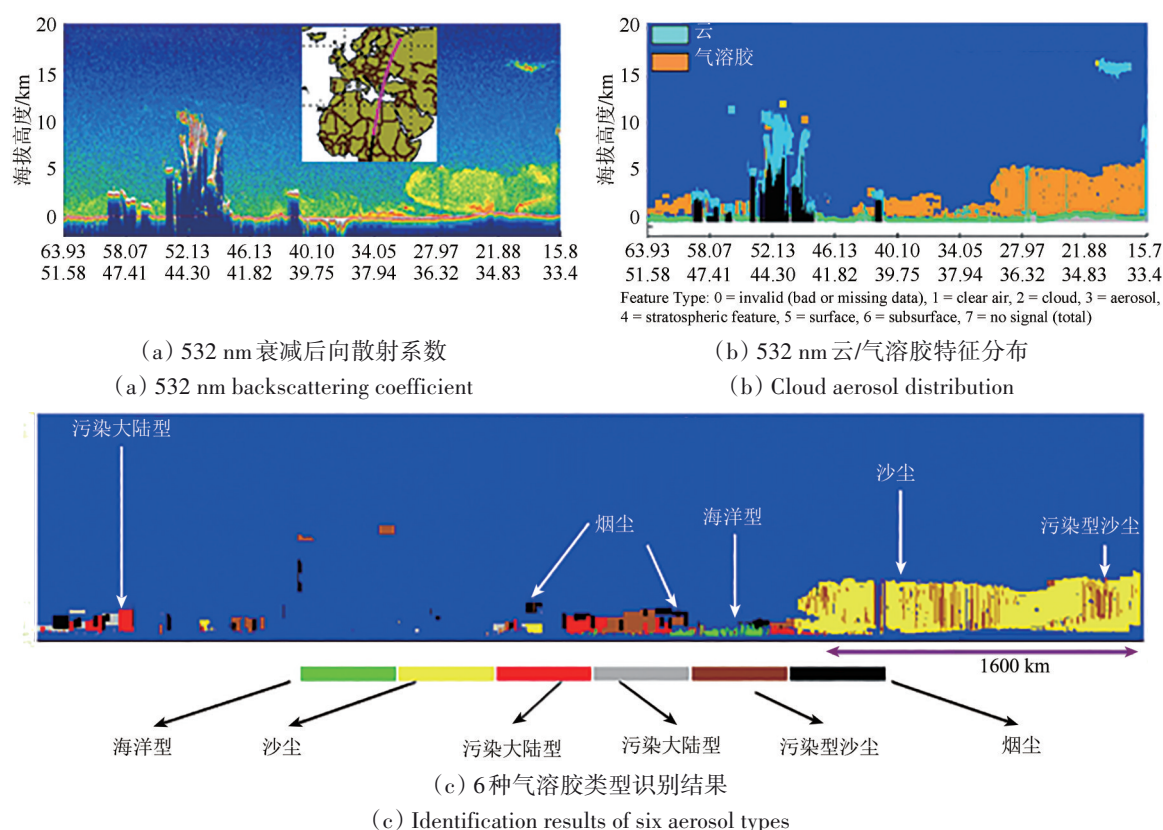


图7 CALIPSO星载激光雷达在2006-08-12观测的云和气溶胶分类结果(Omar等, 2008)

Fig. 7 Cloud and aerosol classification results observed by CALIPSO on August 12, 2006 (Omar et al., 2008)

基于CALIPSO星载激光雷达观测, Huang等(2015b)融合了MODIS地表类型、土地利用等多元数据, 根据自然沙尘与人为沙尘的后向散射以及退偏比等光学特性的差异, 提出了一种人为沙尘气溶胶识别的新方法。

3.5 浓度

一般来说, 激光雷达回波信号强度越大, 说明气溶胶浓度较高, 光学厚度也较大。于是气溶胶光学厚度也被广泛用于确定大气中颗粒物的浓度。

现阶段针对全球尺度的气溶胶质量浓度分布的研究主要还是利用被动遥感, 从AOD数据中提供区域或全球范围内白天颗粒物浓度的分布。但是被动遥感缺少夜间信息与高垂直分辨率信息,

且在高反照率地区反演不确定性较高、受云的影响严重等, 难以满足高精度气溶胶反演研究的需求 (Stubenrauch等, 2013)。

因此, 通过高时空分辨率的主动遥感长期连续观测获得可靠的全球颗粒物浓度非常重要。国内外学者提出了利用激光雷达观测反演颗粒物质量浓度垂直分布的方法 (Koelemeijer等, 2006; Lin等, 2015; Tao等, 2016; Toth等, 2019)。近些年, 深度学习技术也被引入反演气溶胶质量浓度的研究中 (Chen等, 2018; Shen等, 2018), 但这些研究没有充分考虑气溶胶类型对反演结果的影响, 难以满足支持全球气候变化研究的需求。华雯丽等人结合气溶胶退偏比进行粗细粒子分离的反演方法, 在实时反演沙尘质量消光系数的基础上, 反演了敦煌地区沙尘的质量浓度垂直分布

特征 (华雯丽等, 2018)。Ma等 (2020) 根据 CALIPSO 星载激光雷达观测, 开发了一种反演全球 PM_{10} & $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分布的方法, 为全球范围内的颗粒物质量浓度提供了一个可靠的高分辨率数据库。2007年—2016年全球平均 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分布昼夜差异结果。

目前通过传统的算法反演得到气溶胶消光系数廓线和基于粒子谱算法反演得到颗粒物粒子谱分布, 结合由米散射理论可以求得颗粒物质量消光效率 (MEE) (饶志敏, 2018):

$$\text{MEE} = \frac{\pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) n(r) dr}{\frac{4}{3} \pi \rho \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^3 n(r) dr} \quad (16)$$

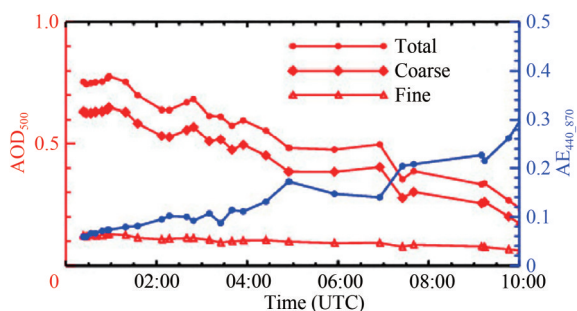
式中, r 气溶胶粒子半径; ρ 为粒子标准密度, $\rho =$

$2 (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$; Q_{ext} 为球形粒子消光效率; n 为粒子谱分布情况; m 为负折射率; λ 为激光波长。

最后, 通过气溶胶消光系数与质量消光效率相结合获得颗粒物的质量浓度:

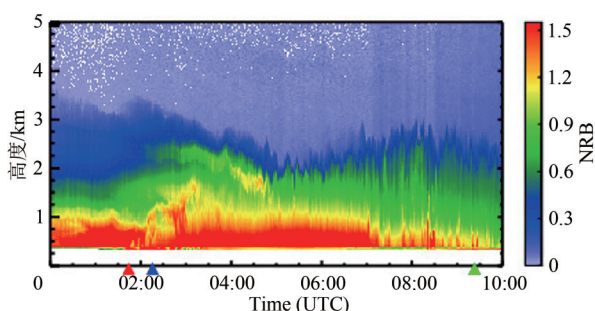
$$C(z) = \frac{\sigma(z)}{\text{MEE}} \quad (17)$$

但是由于现有卫星遥感技术的局限性, 直接获取 MEE 很难。目前常用的方法是地基偏振激光雷达和太阳光度计相结合获得 MEE。首先分离沙尘和污染物, 获得了沙尘 MEE, 王天河等 (2021) 证实了基于微脉冲激光雷达 MPL 观测可有效获得沙尘质量浓度 (DMC) 剖面, 并评估上述不确定性的影响。2012-04-24 敦煌站激光雷达观测到沙尘过程的结果, 以及沙尘质量浓度反演结果, 如图 8 所示 (Wang 等, 2021)。



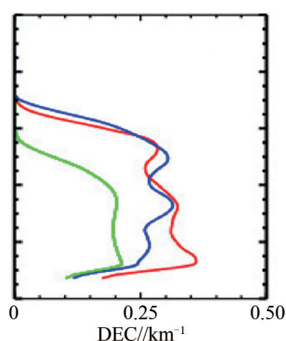
(a) 同期太阳光度计观测到的 500 nm AOD 和 AE440_870 的变化特征

(a) The variation characteristics of AOD and AE440_870 at 500 nm observed by solar photometer at the same time



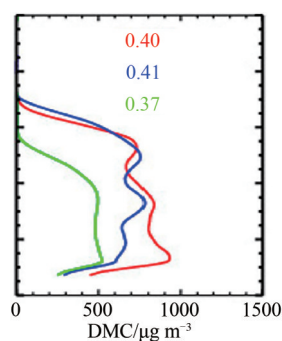
(b) MPL 探测的沙尘垂直分布特征

(b) Vertical distribution characteristics of dust detected by MPL



(c) 01:36, 02:08, 09:15 共 3 个时刻的沙尘消光系数

(c) Dust extinction coefficient at 01:36, 02:08 and 09:15



(d) 01:36, 02:08, 09:15 共 3 个时刻的沙尘消光系数

(d) Dust mass concentration at 01:36, 02:08 and 09:15

图 8 2012 年 4 月 24 日敦煌站激光雷达观测沙尘过程 (Wang 等, 2021)

Fig. 8 Dust process observed by LiDAR at Dunhuang Station on April 24, 2012 (Wang et al., 2021)

4 结 语

激光雷达是大气遥感与环境监测不可或缺的手段, 是跨领域多学科交叉的应用系统, 需要各

技术领域互相协调。目前国内外已经进行了大量有关气溶胶特性的激光雷达观测与研究, 积累了大量宝贵的观测资料, 取得一批批有价值的成果。随着光电技术、人工智能、精密加工等方面的进

一步发展, 激光雷达发展必将再上一个新的台阶。今后, 气溶胶激光雷达的主要发展趋势有以下几方面:

(1) 硬件技术方面: 将朝着小型化、智能化、易维护、高稳定性等方面发展, 甚至在不久的将来实现可搭载在无人机平台上的气溶胶激光雷达;

(2) 反演算法方面: 随着探测参量越来越多, 且人工智能算法的加入, 将获得更为准确、更丰富的气溶胶参数, 例如粒子谱、复折射指数、吸收系数、单次散射反照率SSA等。

(3) 地基雷达观测网: 目前, 全球已经有多个地基激光雷达网, 今后将会有更多覆盖更大范围的气溶胶观测网络陆续建立或完善, 如兰州大学正在建设的“一带一路”激光雷达网。这些观测网有望发展成为各具特色的、高度融合的全球性数据共享激光雷达网络;

(4) 星载激光雷达观测: CALIPSO卫星已提供连续15 a的全球气溶胶和云三维时空分布观测资料, 2022年4月中国成功发射了大气环境监测卫星, 这是全球首颗激光雷达二氧化碳探测卫星, 也是中国第一颗可探测全球气溶胶和云三维分布的星载激光雷达卫星。今后还会发射更多的可探测气溶胶的星载激光雷达, 例如欧空局和日本宇航局合作的EarthCARE卫星, 以及中国即将发射的另一颗星载激光雷达。这些丰富的星载激光雷达观测数据, 将极大地推动气溶胶环境与气候效应相关研究。

参考文献

- Aloyan A E, Arutyunyan V O, Lushnikov A A and Zagaynov V A. 1997. Transport of coagulating aerosol in the atmosphere. *Journal of Aerosol Science*, 28(1): 67-85 [DOI: 10.1016/S0021-8502(96)00043-2]
- Andreae M O and Crutzen P J. 1997. Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, 276(5315): 1052-1058 [DOI: 10.1126/science.276.5315.1052]
- Ansmann A, Engelmann R, Althausen D, Wandinger U, Hu M, Zhang Y H and He Q S. 2005. High aerosol load over the Pearl River Delta, China, observed with Raman lidar and Sun photometer. *Geophysical Research Letters*, 32(13): L13815 [DOI: 10.1029/2005GL023094]
- Ansmann A, Riebesell M, Wandinger U, Weitkamp C, Voss E, Lahmann W and Michaelis W. 1992. Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio. *Applied Physics B*, 55(1): 18-28 [DOI: 10.1007/BF00348608]
- Barnes J E, Sebastian B, Robert B and Parikh N C. 2003. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar. *Applied Optics*, 42(15): 2647-2652 [DOI: 10.1364/AO.42.002647]
- Berjón A, Barreto A, Hernández Y, Yela M, Toledano C and Cuevas E. 2019. A 10-year characterization of the Saharan Air Layer lidar ratio in the subtropical North Atlantic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9): 6331-6349 [DOI: 10.5194/acp-19-6331-2019]
- Bi J R, Huang J P, Hu Z Y, Holben B N and Guo Z Q. 2014. Investigating the aerosol optical and radiative characteristics of heavy haze episodes in Beijing during January of 2013. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(16): 9884-9900 [DOI: 10.1002/2014JD021757]
- Bösenberg J and Hoff R. 2007. Plan for the Implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION. GAW Report No. 178. WMO
- Brydegaard M, Gebru A and Svanberg S. 2014. Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles-application to interacting flying insects. *Progress in Electromagnetics Research*, 147: 141-151 [DOI: 10.2528/PIER14101001]
- Burton S P, Ferrare R A, Hostetler C A, Hair J W, Rogers R R, Obland M D, Butler C F, Cook A L, Harper D B and Froyd K D. 2012. Aerosol classification using airborne High Spectral Resolution Lidar measurements-methodology and examples. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(1): 73-98 [DOI: 10.5194/amt-5-73-2012]
- Burton S P, Vaughan M A, Ferrare R A and Hostetler C A. 2014. Separating mixtures of aerosol types in airborne High Spectral Resolution Lidar data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(2): 419-436 [DOI: 10.5194/amt-7-419-2014]
- Cairo F, Di Donfrancesco G, Adriani A, Pulvirenti L and Fierli F. 1999. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar. *Applied Optics*, 38(21): 4425-4432 [DOI: 10.1364/AO.38.004425]
- Chaikovskiy A, Ivanov A, Balin Y, Elnikov A, Tulinov G, Plusnin I, Bukin O and Chen B. 2006. Lidar network CIS-LiNet for monitoring aerosol and ozone in CIS regions//Proceedings Volume 6160, Twelfth Joint International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics. Tomsk, Russian Federation: SPIE: 616035 [DOI: 10.1117/12.675920]
- Chen G B, Li S S, Knibbs L D, Hamm N A S, Cao W, Li T T, Guo J P, Ren H Y, Abramson M J and Guo Y M. 2018. A machine learning method to estimate PM_{2.5} concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information. *Science of the Total Environment*, 636: 52-60 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.251]
- Cheng X W, Gong S S, Li F Q, Dai Y, Song J, Wang J M and Li F Y. 2007. 24 h continuous observation of sodium layer over Wuhan by lidar. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 50(3): 287-293 (程学武, 龚顺生, 李发泉, 戴阳, 宋娟, 王嘉珉, 李奉延. 2007. 武汉高空钠层的激光雷达24 h连续观

- 测. 中国科学(G辑: 物理学 力学 天文学), 37(2): 196-201 [DOI: 10.1007/s11433-007-0032-z]
- Cheng Z T, Liu D, Liu C, Bai J, Luo J, Tang P J, Zhou Y D, Zhang Y P, Xu P T, Wang K W, Shen Y B and Yang Y Y. 2017. Multi-longitudinal-mode high-spectral-resolution lidar. *Acta Optica Sinica*, 37(4): 0401001 (成中涛, 刘东, 刘崇, 白剑, 罗敬, 唐培钧, 周雨迪, 张与鹏, 徐沛拓, 汪凯巍, 沈亦兵, 杨雨英. 2017. 多纵模高光谱分辨率激光雷达研究. *光学学报*, 37(4): 0401001 [DOI: 10.3788/AOS201737.0401001])
- Collis R T H and Russell P B. 1976. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption// Hinkley E D, ed. *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer: 71-151 [DOI: 10.1007/3-540-07743-X_18]
- De Mazière M, Thompson A M, Kurylo M J, Wild J D, Bernhard G, Blumenstock T, Braathen G O, Hannigan J W, Lambert J C, Leblanc T, McGee T J, Nedoluha G, Petropavlovskikh I, Seckmeyer G, Simon P C, Steinbrecht W and Strahan S E. 2018. The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(7): 4935-4964 [DOI: 10.5194/acp-18-4935-2018]
- Di H G, Hou X L, Zhao H, Yan L J, Wei X, Zhao H and Hua D X. 2014. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar. *Acta Physica Sinica*, 63(24): 244206 (狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 阎蕾洁, 卫鑫, 赵欢, 华灯鑫. 2014. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析. *物理学报*, 63(24): 244206 [DOI: 10.7498/aps.63.244206])
- Feng C Z, Wu S H and Liu B Y. 2018. Research on wind retrieval method of coherent Doppler Lidar and experimental verification. *Chinese Journal of Lasers*, 45(4): 0410001 (冯长中, 吴松华, 刘秉义. 2018. 相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证. *中国激光*, 45(4): 0410001 [DOI: 10.3788/CJL201845.0410001])
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments. *Applied Optics*, 23(5): 652-653 [DOI: 10.1364/AO.23.000652]
- Ferrare R A, Turner D D, Brasseur L H, Feltz W F, Dubovik O and Tooman T P. 2001. Raman lidar measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio over the Southern Great Plains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17): 20333-20347 [DOI: 10.1029/2000JD000144]
- Fiocco G and DeWolf J B. 1968. Frequency spectrum of laser echoes from atmospheric constituents and determination of the aerosol content of air. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25(3): 488-496 [DOI: 10.1175/1520-0469(1968)025<0488:FSOLEF>2.0.CO;2]
- Fiocco G and Smullin L D. 1963. Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140 km) by optical radar. *Nature*, 199(4900): 1275-1276 [DOI: 10.1038/1991275a0]
- Freudenthaler V, Esselborn M, Wiegner M, Heese B, Tesche M, Ansmann A, Müller D, Althausen D, Wirth M, Fix A, Ehret G, Knipertz P, Toledano C, Gasteiger J, Garhammer M and Seefeldner M. 2009. Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006. *Tellus B*, 61(1): 165-179 [DOI: 10.1111/j.1600-0889.2008.00396.x]
- Gao F, Li W W, Nan H S, Lei N, Yuan F M, Shi D C, Wang L and Hua D X. 2017. Fine detection of aerosol in the lower troposphere using twin scanning lidars. *Acta Photonica Sinica*, 46(9): 0901002 (高飞, 李婉婉, 南恒帅, 雷宁, 袁方苗, 石冬晨, 汪丽, 华灯鑫. 2017. 双扫描激光雷达精细探测低层大气气溶胶方法. *光子学报*, 46(9): 0901002 [DOI: 10.3788/gzxb20174609.0901002])
- Gong W, Liu B M, Ma Y Y, Zhang M. 2015. Mie LIDAR observations of tropospheric aerosol over Wuhan. *Atmosphere*, 6(8): 1129-1140 [DOI: 10.3390/atmos6081129]
- Groß S, Esselborn M, Weinzierl B, Wirth M, Fix A and Petzold A. 2013. Aerosol classification by airborne high spectral resolution lidar observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(5): 2487-2505 [DOI: 10.5194/acp-13-2487-2013]
- Groß S, Wiegner M, Freudenthaler V and Toledano C. 2011. Lidar ratio of Saharan dust over Cape Verde Islands: assessment and error calculation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D15): D15203 [DOI: 10.1029/2010jd015435]
- Hair J W, Caldwell L M, Krueger D A and She C Y. 2001. High-spectral-resolution lidar with iodine-vapor filters: measurement of atmospheric-state and aerosol profiles. *Applied Optics*, 40(30): 5280-5294 [DOI: 10.1364/AO.40.005280]
- Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, Harper D B, Ferrare R A, Mack T L, Welch W, Isquierdo L R and Hovis F E. 2008. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties. *Applied Optics*, 47(36): 6734-6752 [DOI: 10.1364/AO.47.006734]
- Hoff R M, Gross B, Demoz B, Eloranta E, Philbrick C R, Whiteman D A, Venable D D, Moshery F, Joseph E, Gimmestad G, Dors I G, Mccann K, Strawbridge K B, Newchurch M J, McCormick M P and Duck T J. 2005. REALM Observations during the 2004 NEAQS/INTEX study period//85th AMS Annual Meeting. San Diego, CA: AMS
- Hua W L, Han Y, Qiao H Y, Wang T H, Huang Z W, Bi J R and Zhou T. 2018. Profiling of dust aerosol mass concentration over Dunhuang: case studies. *Plateau Meteorology*, 37(5): 1428-1439 (华雯丽, 韩颖, 乔瀚洋, 王天河, 黄忠伟, 闭建荣, 周天. 2018. 敦煌沙尘气溶胶质量浓度垂直特征个例分析. *高原气象*, 37(5): 1428-1439 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00017])
- Huang H L, Liu D, Yang Y Y, Cheng Z T, Luo J and Shen Y B. 2014. Design of the high spectral resolution lidar filter based on a field-widened Michelson interferometer. *Chinese Journal of Lasers*, 41(9): 0913003 (黄寒璐, 刘东, 杨雨英, 成中涛, 罗敬, 沈亦兵. 2014. 基于视场展宽迈克尔孙干涉仪的高光谱分辨率激光雷达滤光器设计研究. *中国激光*, 41(9): 0913003 [DOI: 10.3788/CJL201441.0913003])
- Huang J P, Liu J J, Chen B and Nasiri S L. 2015a. Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(20): 11653-11665 [DOI: 10.5194/acp-15-11653-2015]
- Huang J P, Minnis P, Yi Y H, Tang Q, Wang X, Hu Y X, Liu Z Y, Ayers K, Trepte C and Winker D. 2007. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research*

- Letters, 34(18): L18805 [DOI: 10.1029/2007GL029938]
- Huang J P, Wang T H, Wang W C, Li Z Q and Yan H R. 2014. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(19): 11398-11416 [DOI: 10.1002/2014JD021796]
- Huang Z W. 2012. Study of Physical and Optical Properties of Atmospheric Aerosols using Lidar. Lanzhou: Lanzhou University (黄忠伟. 2012. 气溶胶物理光学特性的激光雷达遥感研究. 兰州: 兰州大学)
- Huang Z W, Huang J P, Bi J R, Wang G Y, Wang W C, Fu Q, Li Z Q, Tsay S C and Shi J S. 2010. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U.S. joint dust field experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D7): D00K15 [DOI: 10.1029/2009JD013273]
- Huang Z W, Huang J P, Hayasaka T, Wang S S, Zhou T and Jin H C. 2015b. Short-cut transport path for Asian dust directly to the Arctic: a case study. *Environmental Research Letters*, 10(11): 114018 [DOI: 10.1088/1748-9326/10/11/114018]
- Huang Z W, Qi S Q, Zhou T, Dong Q Q, Ma X J, Zhang S, Bi J R and Shi J S. 2020. Investigation of aerosol absorption with dual-polarization lidar observations. *Optics Express*, 28(5): 7028-7035 [DOI: 10.1364/OE.390475]
- Joshi D, Kumar D, Maini A K and Sharma R C. 2013. Detection of biological warfare agents using ultra violet-laser induced fluorescence LIDAR. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 112: 446-456 [DOI: 10.1016/j.saa.2013.04.082]
- Kim M H, Omar A H, Tackett J L, Vaughan M A, Winker D M, Trepte C R, Hu Y X, Liu Z Y, Poole L R, Pitts M C, Kar J and Magill B E. 2018. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(11): 6107-6135 [DOI: 10.5194/amt-11-6107-2018]
- Klett J D. 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Applied Optics*, 20(2): 211-220 [DOI: 10.1364/AO.20.000211]
- Koelemeijer R B A, Homan C D and Matthijsen J. 2006. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, 40(27): 5304-5315 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.044]
- Lanzhou University. 2014. Multiband Raman-fluorescence laser radar system. CN, 201410363057.8 (兰州大学. 2014. 多波段拉曼-荧光激光雷达系统. 中国, 201410363057.8)
- Li B W, Chen S Y, Zhang Y C, Guo P and Chen H. 2019. The calibration of a fluorescence-Mie polarization lidar system. *Optical Technique*, 45(5): 590-595 (李保卫, 陈思颖, 张寅超, 郭磐, 陈和. 2019. 荧光-米偏振激光雷达系统定标. 光学技术, 45(5): 590-595) [DOI: 10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2019.05.015]
- Lin C Q, Li Y, Yuan Z B, Lau A K H, Li C C and Fung J C H. 2015. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level $PM_{2.5}$. *Remote Sensing of Environment*, 156: 117-128 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.015]
- Liu D, Qi F D, Jin C J, Yue G M and Zhou J. 2003. Polarization Lidar observations of cirrus clouds and Asian dust aerosols over Hefei. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 27(6): 1093-1100 (刘东, 戚福弟, 金传佳, 岳古明, 周军. 2003. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测. 大气科学, 27(6): 1093-1100) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.12]
- Liu D, Tao Z M, Wu D C, Wang Z Z, Wang B X, Zhong Z Q, Bo G Y, Xie C B, Zhou J and Wang Y J. 2013. Development of Three-Wavelength-Raman-Polarization lidar system and case study. *Acta Optica Sinica*, 33(2): 0228001 (刘东, 陶宗明, 吴德成, 王珍珠, 王邦新, 钟志庆, 伯广宇, 谢晨波, 周军, 王英俭. 2013. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例. 光学学报, 33(2): 0228001) [DOI: 10.3788/aos201333.0228001]
- Liu D, Yang Y Y, Zhou Y D, Huang H L, Cheng Z T, Luo J, Zhang Y P, Duan L L, Shen Y B, Bai J and Wang K W. 2015. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review. *Infrared and Laser Engineering*, 44(9): 2535-2546 (刘东, 杨雨英, 周雨迪, 黄寒璐, 成中涛, 罗敬, 张与鹏, 段绿林, 沈亦兵, 白剑, 汪凯巍. 2015. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展. 红外与激光工程, 44(9): 2535-2546) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.09.001]
- Liu J T, Chen W B and Liu Z S. 2003. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 27(1): 115-122 (刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 2003. 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. 大气科学, 27(1): 115-122) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.11]
- Liu Z Y, Omar A, Vaughan M, Hair J, Kittaka C, Hu Y X, Powell K, Trepte C, Winker D, Hostetler C, Ferrare R and Pierce R. 2008. CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: a case study of long-range transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D7): D07207 [DOI: 10.1029/2007JD008878]
- Liu Z Y, Sugimoto N and Murayama T. 2002. Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar. *Applied Optics*, 41(15): 2760-2767
- Lü D R, Wei Z, Lin H, Gu S F, Shi B Z, Ma H Y and Zhang D G. 1977. Vertical distribution of the extinction coefficient of lower atmosphere explored by lidar. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1(3): 199-205 (吕达仁, 魏重, 林海, 谷淑芳, 施秉钊, 马惠英, 张东光. 1977. 低层大气消光系数分布的激光探测. 大气科学, 1(3): 199-205) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1977.03.05]
- Ma X J, Huang Z W, Qi S Q, Huang J P, Zhang S, Dong Q Q and Wang X. 2020. Ten-year global particulate mass concentration derived from space-borne CALIPSO lidar observations. *Science of the Total Environment*, 721: 137699 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137699]
- Ma X M, Tao Z M, Zhang L L, Shan H H, Zhang H, Ma M J, Wang S H and Wang Y J. 2018. Ground layer aerosol detection technology during daytime based on side-scattering lidar. *Acta Optica Sinica*, 38(4): 0401005 (麻晓敏, 陶宗明, 张璐璐, 单会会, 张辉, 马明俊, 王申浩, 王英俭. 2018. 侧向散射激光雷达探测白天近地面气溶胶探测技术. 光学学报, 38(4): 0401005) [DOI: 10.3788/

- AOS201838.0401005]
- Ma Y Y, Gong W and Zhu Z M. 2009. Aerosol optical characteristics in South east China determined using spaceborne lidar. *Journal of Remote Sensing*, 13(4): 707-722 (马盈盈, 龚威, 朱忠敏. 2009. 中国东南部地区气溶胶光学特性激光雷达探测. *遥感学报*, 13(4): 707-722)
- Mao J D, Hua D X and He T Y. 2010. A compact Mie scattering lidar and its observation. *Acta Photonica Sinica*, 39(2): 284-288 (毛建东, 华灯鑫, 何廷尧. 2010. 小型米散射激光雷达的研制及其探测. *光子学报*, 39(2): 284-288) [DOI: 10.3788/gzxb20103902.0284]
- Mao J T, Zhang J H and Wang M H. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 60(5): 625-634 (毛节泰, 张军华, 王美华. 2002. 中国大气气溶胶研究综述. *气象学报*, 60(5): 625-634) [DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2002.05.014]
- McCormick M P and Hostetler C A. 1995. LITE-the first spaceborne lidar//Conference Proceedings Second Topical Symposium on Combined Optical-microwave Earth and Atmosphere Sensing. Atlanta, GA, USA: IEEE: 163-166 [DOI: 10.1109/COMEAS.1995.472376]
- McGill M J, Yorks J E, Scott V S, Kupchock A W and Selmer P A. 2015. The Cloud-Aerosol Transport System (CATS): a technology demonstration on the International Space Station//Proceedings Volume 9612, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XV. San Diego, California, United States: SPIE: 96120A [DOI: 10.1117/12.2190841]
- Measures R M. 1984. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Hoboken: Wiley
- Mei L and Brydegaard M. 2015. Atmospheric aerosol and gas sensing using Scheimpflug lidar//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria: EGU
- Mei L. 2018. Shahler atmospheric lidar technology and its research progress. *Laser & optoelectronics progress*, 2018, 55(09): 44-57 (梅亮. 沙氏大气激光雷达技术及其研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(09): 44-57) [DOI: 10.3788/LOP55.090004]
- Mishchenko M I and Sassen K. 1998. Depolarization of lidar returns by small ice crystals: an application to contrails. *Geophysical Research Letters*, 25(3): 309-312 [DOI: 10.1029/97GL03764]
- Murayama T, Müller D, Wada K, Shimizu A, Sekiguchi M and Tsukamoto T. 2004. Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003. *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23103 [DOI: 10.1029/2004GL021105]
- Murayama T, Sugimoto N, Uno I, Kinoshita K, Aoki K, Hagiwara N, Liu Z Y, Matsui I, Sakai T, Shibata T, Arao K, Sohn B J, Won J G, Yoon S C, Li T, Zhou J, Hu H L, Abo M, Iokibe K, Koga R and Iwasaka Y. 2001. Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16): 18345-18359 [DOI: 10.1029/2000JD900554]
- Müller D, Mattis I, Ansmann A, Wehner B, Althausen D, Wandinger U and Dubovik O. 2004. Closure study on optical and microphysical properties of a mixed urban and Arctic haze air mass observed with Raman lidar and Sun photometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D13): D13206 [DOI: 10.1029/2003JD004200]
- Müller D, Mattis I, Wandinger U, Ansmann A, Althausen D, Dubovik O, Eckhardt S and Stohl A. 2003. Saharan dust over a central European EARLINET-AERONET site: combined observations with Raman lidar and Sun photometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D12): 4345 [DOI: 10.1029/2002JD002918]
- Noh Y M, Kim Y J, Choi B C and Murayama T. 2007. Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea. *Atmospheric Research*, 86(1): 76-87 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2007.03.006]
- Noh Y M, Kim Y J and Müller D. 2008. Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn. *Atmospheric Environment*, 42(9): 2208-2224 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.11.045]
- Omar A, Vaughan M, Kittaka C and Winker D. 2008. Case studies and comparisons of the CALIPSO aerosol optical depth measurements and aerosol type estimates//Proceedings Volume 7111, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IV. Cardiff, Wales, United Kingdom: SPIE: 71110A [DOI: 10.1117/12.800353]
- Pappalardo G, Amodeo A, Apituley A, Comerón A, Freudenthaler V, Linné H, Ansmann A, Bösenberg J, D'Amico G, Mattis I, Mona L, Wandinger U, Amiridis V, Alados-Arboledas L, Nicolae D and Wiegner M. 2014. EARLINET: towards an advanced sustainable European aerosol lidar network. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(8): 2389-2409 [DOI: 10.5194/amt-7-2389-2014]
- Prata A T, Young S A, Siems S T and Manton M J. 2017. Lidar ratios of stratospheric volcanic ash and sulfate aerosols retrieved from CALIOP measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(13): 8599-8618 [DOI: 10.5194/acp-17-8599-2017]
- Qi S Q. 2020. Study on discrimination of aerosols and clouds and aerosols absorption properties by using dual-wavelength polarization lidar observation. Lanzhou: Lanzhou University (齐思齐. 2020. 利用双波段偏振激光雷达观测研究气溶胶与云的识别及气溶胶吸收特性. 兰州: 兰州大学)
- Qiu J H and Lü D R. 1992. Parameterized multiple scatter lidar equation and its inversion theory Part II: Inversion theory. *Scientia Atmospherica Sinica*, 16(6): 725-736 (邱金桓, 吕达仁. 1992. 参数化的多次散射雷达方程和它的反演理论 II: 反演理论. *大气科学*, 16(6): 725-736) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.06.10]
- Qiu J H, Lü D R, Chen H B, Wang G C and Shi G Y. 2003. Modern research progresses in atmospheric physics. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 27(4): 628-652 (邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 王庚辰, 石广玉. 2003. 现代大气物理学研究进展. *大气科学*, 27(4): 628-652) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.14]
- Qiu J H, Quenzel H and Wiegner M. 1992. Parameterized lidar equation of multiple scattering and its retrieval theory I: Equations. *Scientia Atmospherica Sinica*, 16(5): 601-611 (邱金桓, Quenzel H, Wiegner M. 1992. 参数化的多次散射激光雷达方程和它的反演

- 理论 I: 方程. 大气科学, 16(5): 601-611 [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.05.12]
- Rao Z M, He T Y, Hua D X and Chen R X. 2018. Remote sensing of particle mass concentration using multi-wavelength lidar. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 38(4): 1025-1030 (饶志敏, 何廷尧, 华灯鑫, 陈若曦. 2018. 多波段激光雷达颗粒物质量浓度探测方法. 光谱学与光谱分析, 38(4): 1025-1030) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(201804-1025-06)]
- Rao Z M, Hua D X, He T Y, Wang Q and Le J. 2017. Performance analysis of double wavelength fluorescence lidar in detecting atmospheric biological aerosols. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(9): 2804-2808 (饶志敏, 华灯鑫, 何廷尧, 王强, 乐静. 2017. 双波长荧光雷达探测大气生物气溶胶的性能分析. 光谱学与光谱分析, 37(9): 2804-2808) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)09-2804-05]
- Ru J B. 2017. Dust Aerosol Properties over East Asia Derived from Satellite-Based Lidar. Lanzhou: Lanzhou University (茹建波. 2017. 基于星载激光雷达的东亚地区沙尘气溶胶特性研究. 兰州: 兰州大学)
- Sakai T, Nagai T, Nakazato M, Mano Y and Matsumura T. 2003. Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba. *Applied Optics*, 42(36): 7103-7116 [DOI: 10.1364/AO.42.007103]
- Sassen K. 1991. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72(12): 1848-1866 [DOI: 10.1175/1520-0477(1991)072<1848:TPLTFC>2.0.CO;2]
- Sassen K, Comstock J M, Wang Z and Mace G G. 2001. Cloud and aerosol research capabilities at FARS: the facility for atmospheric remote sensing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(6): 1119-1138 [DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<1119:CAAR-CA>2.3.CO;2]
- Schotland R M, Sassen K and Stone R. 1971. Observations by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 10(5): 1011-1017 [DOI: 10.1175/1520-0450(1971)010<1011:OBLOLD>2.0.CO;2]
- Shen H F, Li T W, Yuan Q Q and Zhang L P. 2018. Estimating regional ground-level $PM_{2.5}$ directly from satellite top-of-atmosphere reflectance using deep belief networks. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(24): 13875-13886 [DOI: 10.1029/2018JD028759]
- Shi B, Tao Z M, Ma X M, Shan H H, Zhao S G, Liu D and Xie C B. 2015. Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique. *Acta Optica Sinica*, 35(5): 0501006 (史博, 陶宗明, 麻晓敏, 单会会, 赵素贵, 刘东, 谢晨波. 2015. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测. 光学学报, 35(5): 0501006) [DOI: 10.3788/AOS201535.0501006]
- Shi G Y, Wang B, Zhang H, Zhao J Q, Tan S C and Wen T X. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 32(4): 826-840 (石广玉, 王标, 张华, 赵剑琦, 檀赛春, 温天雪. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应. 大气科学, 32(4): 826-840) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.11]
- Shiina T. 2013. LED mini-lidar for air and dust monitoring//*Proceedings Volume 8905, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Sensing and Imaging and Applications*. Beijing, China: SPIE: 890533 [DOI: 10.1117/12.2042370]
- Shiina T, Yamada S, Senshu H, Otake N, Hashimoto G and Kawabata Y. 2016. LED minilidar for Mars rover//*Proceedings Volume 10006, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XII*. Edinburgh, United Kingdom: SPIE: 100060F [DOI: 10.1117/12.2241976]
- Shimizu H, Lee S A and She C Y. 1983. High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters. *Applied Optics*, 22(9): 1373-1381 [DOI: 10.1364/AO.22.001373]
- Shipley S T, Tracy D H, Eloranta E W, Trauger J T, Sroga J T, Roesler F L and Weinman J A. 1983. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: Theory and instrumentation. *Applied Optics*, 22(23): 3716-3724 [DOI: 10.1364/AO.22.003716]
- Stowers M A, van Wuijkhuise A L, Marijnissen J C M, Kientz C E and Ciach T. 2006. Fluorescence preselection of bioaerosol for single-particle mass spectrometry. *Applied Optics*, 45(33): 8531-8536 [DOI: 10.1364/AO.45.008531]
- Stubenrauch C J, Rossow W B, Kinne S, Ackerman S, Cesana G, Chepfer H, Di Girolamo L, Getzewich B, Guignard A, Heidinger A, Maddux B C, Menzel W P, Minnis P, Pearl C, Platnick S, Poulsen C, Riedi J, Sun-Mack S, Walther A, Winker D, Zeng S and Zhao G. 2013. Assessment of global cloud datasets from satellites: project and database initiated by the GEWEX radiation panel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(7): 1031-1049 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00117.1]
- Sugimoto N and Lee C H. 2006. Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths. *Applied Optics*, 45(28): 7468-7474 [DOI: 10.1364/AO.45.007468]
- Sugimoto N, Shimizu A, Nishizawa T and Jin Y. 2018. Recent developments with the Asian dust and aerosol lidar observation network (AD-NET). *EPJ Web of Conferences*, 176: 09001 [DOI: 10.1051/epjconf/201817609001]
- Sun H B. 2017. Research on the correlation between aerosol optical properties and logarithmic ratio of aerosol backscatter-to-extinction. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (孙海波. 2017. 气溶胶光学特性与后向散射消光对数比的相关性研究. 南京: 南京信息工程大学)
- Sun R, Wang H Y, Ma X J, Chen Y H, Zhao B K, Qin Y, Zhang H and Ye W. 2017. Aerosol optical properties and formation mechanism of a typical air pollution episode in Shanghai during different weather condition periods. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(3): 814-823 (孙冉, 王鸿宇, 马骁骏, 陈勇航, 赵兵科, 秦艳, 张华, 叶文. 2017. 上海一次典型雾霾过程中不同天气现象的气溶胶光学特性及转化机制. 环境科学学报, 37(3): 814-823) [DOI: 10.

- 13671/j.hjkxxb.2016.0265]
- Tao Z M, Liu D, Ma X M, Chen X C, Wang Z Z, Xie C B and Wang Y J. 2014. Development and case study of side-scatter lidar system based on charge-coupled device. *Infrared and Laser Engineering*, 43(10): 3282-3286 (陶宗明, 刘东, 麻晓敏, 陈向春, 王珍珠, 谢晨波, 王英俭. 2014. 基于 CCD 的侧向激光雷达系统研制及探测个例. *红外与激光工程*, 43(10): 3282-3286) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2014.10.019]
- Tao Z M, Shi Q B, Xie C B, Liu D and Zhang S. 2019. Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar. *Infrared and Laser Engineering*, 48(S1): S106007 (陶宗明, 施奇兵, 谢晨波, 刘东, 张帅. 2019. 利用 CCD 和后向散射激光雷达精确探测近地面气溶胶消光系数廓线. *红外与激光工程*, 48(S1): S106007)
- Tao Z M, Wang Z Z, Yang S J, Shan H H, Ma X M, Zhang H, Zhao S G, Liu D, Xie C B and Wang Y J. 2016. Profiling the $PM_{2.5}$ mass concentration vertical distribution in the boundary layer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3): 1369-1376 [DOI: 10.5194/amt-9-1369-2016]
- Tatarov B and Sugimoto N. 2005. Estimation of quartz concentration in the tropospheric mineral aerosols using combined Raman and high-spectral-resolution lidars. *Optics Letters*, 30(24): 3407-3409 [DOI: 10.1364/OL.30.003407]
- Tatarov B, Sugimoto N and Matsui I. 2008. Lidar method for determination of quartz concentration in the tropospheric mineral aerosols//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, Spain: IEEE: 5262-5265 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4424049]
- Thurmond K, Loparo Z, Partridge W and Vasu S S. 2016. A Light-Emitting Diode- (LED-) based absorption sensor for simultaneous detection of carbon monoxide and carbon dioxide. *Applied Spectroscopy*, 70(6): 962-971 [DOI: 10.1177/0003702816641261]
- Toth T D, Zhang J L, Reid J S and Vaughan M A. 2019. A bulk-mass-modeling-based method for retrieving particulate matter pollution using CALIOP observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(3): 1739-1754 [DOI: 10.5194/amt-12-1739-2019]
- Vaughan M A, Young S A, Winker D M, Powell K A, Omar A H, Liu Z Y, Hu Y X and Hostetler C A. 2004. Fully automated analysis of space-based lidar data: an overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products//Proceedings Volume 5575, *Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing*. Maspalomas, Canary Islands, Spain: SPIE: 16-30 [DOI: 10.1117/12.572024]
- Wang Q M and Zhang Y M. 2006. Development of meteorological lidar. *Meteorological Science and Technology*, 34(3): 246-249 (王青梅, 张以谟. 2006. 气象激光雷达的发展现状. *气象科技*, 34(3): 246-249) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2006.03.002]
- Wang T H, Han Y, Hua W L, Tang J Y, Huang J P, Zhou T, Huang Z W, Bi J R and Xie H L. 2021. Profiling dust mass concentration in northwest china using a joint lidar and sun-photometer setting. *Remote Sensing*, 13(6): 1099 [DOI: 10.3390/rs13061099]
- Wang X C and Rao R Z. 2005. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles. *Chinese Journal of Lasers*, 32(10): 1321-1324 (王向川, 饶瑞中. 2005. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比. *中国激光*, 32(10): 1321-1324) [DOI: 10.3321/j.issn:0258-7025.2005.10.005]
- Wang Z H, He Y H, Li Z S, Zuo H Y, He J, Zheng Y C and Yang J G. 2006. Effects of backscatter extinction logarithmic ratio on the inversion of aerosol extinction coefficient. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 23(3): 335-340 (王治华, 贺应红, 李振声, 左浩毅, 何捷, 郑玉臣, 杨经国. 2006. 气溶胶后向散射消光对数比对消光系数反演的影响研究. *量子电子学报*, 23(3): 335-340) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2006.03.012]
- Welton E J and Campbell J R. 2002. Micropulse lidar signals: Uncertainty analysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12): 2089-2094 [DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<2089:MLSUA>2.0.CO;2]
- Welton E J, Stewart S A, Lewis J R, Belcher L R, Campbell J R and Lolli S. 2018. Status of the NASA Micro Pulse Lidar Network (MPLNET): overview of the network and future plans, new version 3 data products, and the polarized MPL. *EPJ Web of Conferences*, 176: 09003 [DOI: 10.1051/epjconf/201817609003]
- Winker D M, Hunt W H and McGill M J. 2007. Initial performance assessment of CALIOP. *Geophysical Research Letters*, 34(19): L19803 [DOI: 10.1029/2007GL030135]
- Wojtanowski J, Zygmunt M, Muzal M, Knysak P, Młodzianko A, Gawlikowski A, Drozd T, Kopeczyński K, Mierczyk Z, Kaszczuk M, Traczyk M, Gietka A, Piotrowski W, Jakubaszek M and Ostrowski R. 2015. Performance verification of a LIF-LIDAR technique for stand-off detection and classification of biological agents. *Optics and Laser Technology*, 67: 25-32 [DOI: 10.1016/j.optlastec.2014.08.013]
- Yan Q, Hua D X, Li S C and Ai Y. 2013. Observation and productization of the micro-pulsed Mie scattering lidar system. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 30(1): 123-128 (闫庆, 华灯鑫, 李仕春, 艾宇. 2013. 微脉冲米散射激光雷达系统的产品化研发及实验观测研究. *量子电子学报*, 30(1): 123-128)
- Zhang J P, Guo Y L, Qu Z X, Yang F Y, Li H F and Zhang W Y. 2016. Research into inversion parameter k of laser radar in semi-arid areas. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 52(5): 639-643 (张京朋, 郭燕玲, 曲宗希, 杨飞跃, 李海飞, 张文煜. 2016. 半干旱区激光雷达反演参数 k 值研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 52(5): 639-643) [DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2016.05.012]
- Zhang W Y, Wang Y Q, Song J Y, Zhang L and Sun L. 2008. Research on logarithmic ratio k of aerosol backscatter extinction using lidar. *Plateau Meteorology*, 27(5): 1083-1087 (张文煜, 王音琪, 宋嘉尧, 张镭, 孙璐. 2008. 激光雷达反演参数 k 值的研究. *高原气象*, 27(5): 1083-1087)
- Zhang Z Y, Su L and Chen L F. 2013. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China. *Chinese Journal of Lasers*, 40(5): 0513002 (张朝阳, 苏林, 陈良富. 2013. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析. *中国激光*, 40(5): 0513002) [DOI: 10.3788/CJL201340.0513002]
- Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, Li J, Yu Y and Li L H. 2014. Application and development direction of lidar. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 35(5): 4-22 (赵一鸣, 李艳华, 商雅楠,

- 李静, 于勇, 李凉海. 2014. 激光雷达的应用及发展趋势. 遥测遥控, 35(5): 4-22 [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1000.2014.05.002]
- Zhong W T, Hua D X, Liu J, Zhang C and Yan K J. 2016. Optimal design and preliminary experiments on new type of LED light source radar system for aerosol detection. *Acta Optica Sinica*, 36(10): 1028001 (钟文婷, 华灯鑫, 刘君, 张宸, 晏克俊. 2016. 新型LED光源气溶胶探测雷达系统优化设计与初步实验. 光学学报, 36(10): 1028001) [DOI: 10.3788/AOS201636.1028001]
- Zhong W T, Hua D X, Liu J, Zhang C and Yan K J. 2018. Development of LED light source for aerosol detection optical radar. *Journal of Xi'an University of Technology*, 34(1): 6-13 (钟文婷, 华灯鑫, 刘君, 张宸, 晏克俊. 2018. 用于气溶胶探测光学雷达的LED光源的研制. 西安理工大学学报, 34(1): 6-13) [DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.002]
- Zhou J, Yue G M, Jin C J, Qi F D, Yi W N, Li T, Chen Y H and Xiong L M. 2000. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol. *Acta Optica Sinica*, 20(10): 1412-1417 (周军, 岳古明, 金传佳, 戚福第, 易维宁, 李陶, 陈毓红, 熊黎明. 2000. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达. 光学学报, 20(10): 1412-1417) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2000.10.021]
- Zhou J, Yue G M, Qi F D, Jin C J, Wu Y H, Xiong L M, Chen Y H, Dou G D and Hu H L. 1998. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 15(2): 140-148 (周军, 岳古明, 戚福第, 金传佳, 吴永华, 熊黎明, 陈毓红, 窦根娣, 胡欢陵. 1998. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测. 量子电子学报, 15(2): 140-148)
- Zhou S J, Tao L J and Zhu W Q. 1981. Comparison among several methods for lidar probing of atmospheric extinction coefficient. *Scientia Atmospherica Sinica*, 5(4): 444-449 (周诗健, 陶丽君, 朱文琴. 1981. 几种激光探测大气消光系数方法的比较. 大气科学, 5(4): 444-449) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1981.04.11]
- Zhou T, Huang Z W, Huang J P, Li J M, Bi J R and Zhang W. 2013. Study of vertical distribution of cloud over loess plateau based on a ground-based lidar system. *Journal of Arid Meteorology*, 31(2): 246-253, 271 (周天, 黄忠伟, 黄建平, 李积明, 闭建荣, 张武. 2013. 黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究. 干旱气象, 31(2): 246-253, 271) [DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0246]
- Zou B F, Zhang Y C and Hu S X. 2008. Study on the design of measuring organic aerosol fluorescence lidar. *Laser Technology*, 32(3): 287-289, 292 (邹炳芳, 张寅超, 胡顺星. 2008. 探测有机气溶胶荧光激光雷达的设计研究. 激光技术, 32(3): 287-289, 292)

An overview of aerosol lidar: Progress and prospect

HUANG Zhongwei^{1,2}, WANG Yongkai², BI Jianrong^{1,2}, WANG Tianhe^{1,2}, LI Wuren^{1,2},
LI Ze^{1,2}, ZHOU Tian²

1. Collaborative Innovation Center for West Ecological Safety (CIWES), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Aerosols, solid or liquid particles suspended in the atmosphere, are an important component in the troposphere. It is well known that atmospheric aerosols have significant impacts on environment, climate and ecosystem. Thus, the knowledge of the spatial-temporal distribution and evolution of aerosol physical-chemical-optical properties with high resolution is of great importance to quantitatively and accurately assess their climate and environmental effects. As an advanced remote sensing technology, lidar has been widely used to observe aerosol properties around the world, which is mainly attributed as its unique advantages in large detection range and high spatial-temporal resolutions. The basic principle of lidar remote sensing is that after sending lasers to the atmosphere backscattering signals from aerosols can be detected and further analyzed. This paper summarizes the research progress of lidar for detecting atmospheric aerosol over the past decades from three aspects: Firstly, the main types of lidar that can be used for atmospheric aerosol detection are briefly introduced, such as Mie scattering lidar, polarized lidar, Raman lidar, high spectral resolution lidar, fluorescent lidar, etc. They usually employ several principles of physics, such as Mie scattering, Raman scattering and fluorescence scattering. Secondly, the lidar-based research progress of aerosol properties at home and abroad, such as optical properties (e.g., extinction/backscattering coefficient, lidar ratio, aerosol optical depth, Ångström exponent), size (e.g., color ratio), shape (e.g., depolarization ratio), composition (e.g., dust, smoke, sulfate, etc.), and concentration (e.g., mass concentration), are individually introduced. Finally, with the advances of photoelectric technology, artificial intelligence, and precision machining technology in recent years, the future development of aerosol lidar is prospected in this review paper. Lidar will be more miniaturized and intelligent, making it easier to carry on Unmanned Aerial Vehicle platforms. Abundant aerosol parameter inversion algorithms will be established. More ground-based lidar observation network and space-borne lidar projects will be established and improved successively.

Key words: Lidar, aerosol, atmospheric remote sensing, remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 41875029, 41627807); Higher Education Discipline Innovation Program-111(No. B13045); Gansu Provincial Field Observation And Research Station(No. 18JR2RA013); Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. LZUJBKY-2021-KB12, No. LZUJBKY-2021-KB02, No. LZUJBKY-2021-SP04)