

大气模式对气溶胶光学参量反演及分类的影响研究

王元祖¹, 孙东松¹, 韩於利¹, 郑俊¹, 赵一鸣²

- (1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;
2. 北京遥测技术研究所, 北京 100076)

摘要: 气溶胶对全球生态系统、物质循环具有重要影响, 研究气溶胶光学参量等基础数据反演的准确性意义重大。利用来自欧洲气溶胶研究激光雷达网的 4 个观测站点 (波坦察、莱比锡、里尔、埃武拉) 在两次集中观测任务中的数据, 对使用不同大气模式的温度、压强数据在反演气溶胶光学参量 (消光和后向散射系数) 及气溶胶分类中所产生的影响进行研究。结果表明: 选用不同的大气模式对气溶胶光学参量进行反演会导致计算结果出现偏差, 其中对于 Raman 法获取气溶胶消光系数的影响较大, 在 355 nm 和 532 nm 处的最大偏差均可达到~20%。大气气溶胶浓度也会对不同模式的气溶胶光学参量反演结果产生影响, 并且随观测波长的不同而有所差异。此外, 不同大气模式会使气溶胶激光雷达比以及 Ångström 指数等与气溶胶类型相关的参量反演结果产生偏差, 并最终影响气溶胶的分类。文中研究结果对于揭示大气模式的选取在反演气溶胶光学参量中的重要性以及对于气溶胶分类乃至大气科学的相关研究都具有重要的参考价值。

关键词: 大气模式; 气溶胶; 激光雷达; 偏差; 气溶胶分类

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220262

Influence of atmospheric models on the aerosol optical parameters inversion and classification

Wang Yuanzu¹, Sun Dongsong¹, Han Yuli¹, Zheng Jun¹, Zhao Yiming²

- (1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Aerosols have a significant impact on the global ecosystem, material cycle, so it is important to study the accuracy of basic data such as aerosol optical parameters. Using the data from four observing stations (Potenza, Leipzig, Lille, Evora) of the European Aerosol Research Lidar Network during two intensive measurement campaigns, the effects of temperature and pressure profiles provided by different atmospheric models on the inversion of aerosol optical parameters (extinction and backscatter coefficients) and aerosol classification are analyzed. The results show that: different atmosphere models have an influence on the retrieval results of aerosol optical parameters, resulting in deviations in the calculation results, more influence can be found from the aerosol extinction coefficients obtained by the Raman method, with the maximum deviation ~20% at both 355 nm and 532 nm. Atmosphere aerosol concentration can also affect the retrieval results of aerosol optical parameter with different models and vary with the wavelength of observation. In addition, different models can

收稿日期: 2022-04-18; 修订日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (42104146)

作者简介: 王元祖, 男, 博士生, 主要从事拉曼激光雷达方面的研究。

导师简介: 孙东松, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事测风激光雷达方面的研究。

influence the retrieval results of the aerosol lidar ratio and Ångström exponent, which are related to aerosol types, and ultimately affect the aerosol classification. The results are significant for revealing the importance of the selection of atmospheric models in the retrieval of aerosol optical parameters, for aerosol classification and related research in atmospheric science.

Key words: atmospheric model; aerosol; lidar; deviation; aerosol classification

0 引言

气溶胶种类多样,不同类型的气溶胶具有不同的化学和微物理特性,这主要与气溶胶的大小及组成成分密切相关^[1]。气溶胶颗粒可以通过散射和吸收太阳辐射,直接影响大气辐射平衡。它们也可以改变云的物理和微物理特性进而改变云的辐射特征,对辐射平衡间接造成影响^[2]。气溶胶还会降低大气能见度,影响人们的出行,甚至危害人们的身体健康^[3]。因此,实时、准确地了解气溶胶特性、类型及分布对于气候、环境乃至人体健康等方面研究都是至关重要的^[4-5]。

激光雷达技术在大气探测^[6-8],尤其是在气溶胶探测中发挥着重要作用。可以通过不同类型的激光雷达系统以较高的时间和空间分辨率获取气溶胶的消光、后向散射系数等光学参量^[9-11],其中,多波长拉曼激光雷达以及弹性散射激光雷达是重要的技术手段。虽然这两种激光雷达的反演算法存在差异,但大气分子数密度在反演中均是一个重要的输入参量。它可以通过大气温度和压强信息反演获得,而其中所需的温度和压强则可通过多种方式来获取,如无线电探空仪提供的观测数据,美国标准大气模式或者全球大气模式等。1992年,Ansmann等人研究发现当无线电探空仪观测到的温度数据出现明显的逆温,使用无线电探空仪数据与标准大气模式数据反演气溶胶消光系数会出现明显的偏差^[12];2008年,闫顺生等人分析指出由于季节、经纬度和海拔的差异,采用美国标准大气模式对反演结果会引入较大的误差,计算气溶胶消光系数甚至会出现负值^[13],可见不同的温度、压强数据源会对气溶胶光学参量的反演结果产生一定的影响。此外,由于无线电探空仪上升过程中在水平方向上的位移会导致提供的大气参量与真实的大气垂直分布情况存在差异,最终可能影响气溶胶光学参量的反演及后续的研究工作。与无线电探空仪、美国标准大气模式相比,全球模式是基于更广泛的气象观测数据,包括来自地基、船舶和飞机上的气象站以及

无线电探空仪和气象卫星的观测数据,通过先进的同化算法及模型实现对全球大气参量的预测或者再分析^[14-16],它可以为激光雷达反演提供具有更高的时间和空间分辨率且较为可靠的大气温度、压强数据。

文中的重点在于比较使用两种不同全球模式(预测和再分析模式)对气溶胶光学参量反演及气溶胶分类产生的影响。因此,基于欧洲气溶胶研究激光雷达网4个观测站点(波坦察、莱比锡、里尔、埃武拉)的多波长拉曼激光雷达在两次集中观测任务中的数据,对不同大气模式在气溶胶光学参量反演中的影响进行了分析,并且还对比气溶胶分类结果的影响进行了研究,为激光雷达近实时观测反演以及在气溶胶分类、微物理特性反演等方面的研究提供参考。

1 气溶胶光学参量反演及分类

1.1 反演方法

拉曼激光雷达观测的基本原理是利用出射的激光与大气中空气分子发生相互作用产生的拉曼散射信号来实现对气溶胶光学参量的反演^[17]。激光雷达系统可以通过接收在387 nm和607 nm处的氮气拉曼散射信号(分别对应发射波长355 nm和532 nm)并通过公式(1)反演获取在发射波长处的气溶胶消光系数,之后利用氮气拉曼散射信号及对应的弹性散射信号实现对气溶胶后向散射系数的反演,此计算过程称为Raman法^[12]。

$$\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(z) = \frac{\frac{d}{dz} \ln \left[\frac{N_R(z)}{P_R(z)z^2} \right] - \alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z) - \alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)}{1 + (\lambda_0/\lambda_R)^4} \quad (1)$$

式中: λ_0 和 λ_R 分别表示激光发射波长和对应的拉曼散射波长; $P_R(z)$ 为激光雷达接收到的来自距离 z 在波长 λ_R 处的拉曼散射回波信号; $N_R(z)$ 为大气中的氮气分子数密度; $\alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z)$ 和 $\alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)$ 分别表示在波长 λ_0 和 λ_R 处的随高度变化的分子消光系数。

多波长拉曼激光雷达可以实现独立反演气溶胶

消光和后向散射系数^[12],但由于拉曼散射回波信号较弱,因此只有在没有强烈太阳背景的夜间条件下进行拉曼散射信号的测量,而对于白天观测期间,通常只有弹性散射信号可以用于观测及研究。通过弹性散射信号反演气溶胶后向散射系数的算法称为弹性散射法^[18-19],由于弹性散射激光雷达方程中包含两个未知量(气溶胶消光及后向散射系数),在通过弹性散射信号反演气溶胶后向散射系数时需要对激光雷达比进行假设,不合适的激光雷达比将会对反演结果引入较大的不确定度^[20]。此外,红外波段对于光子计数模式下的探测非常具有挑战性^[21-22],因此,在红外波段也通常仅探测弹性散射信号。

1.2 气溶胶分类原理

气溶胶的分类是基于不同类型气溶胶的光学参数的差异反映其不同特性^[23]。多波长拉曼激光雷达反演获取的气溶胶光学参量(气溶胶消光和后向散射系数)可用于气溶胶分类等后续研究。利用气溶胶消光和后向散射系数可以计算激光雷达比 S^{λ} ,该参量与气溶胶颗粒物的形状、大小尺寸以及化学成分有关^[24]。当获取多个波长处的激光雷达比,对应的双波长色比可以通过下式计算得到^[25]:

$$Y(\lambda_1, \lambda_2) = S^{\lambda_1} / S^{\lambda_2} \quad (2)$$

式中: S^{λ_1} 和 S^{λ_2} 分别表示在波长 λ_1 、 λ_2 处的气溶胶激光

雷达比。

此外,利用已获取的气溶胶光学参量还可以通过公式(3)反演对气溶胶尺寸敏感的Ångström指数^[25]:

$$\kappa_X(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\ln[X(\lambda_1)/X(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_2/\lambda_1)} \quad (3)$$

式中: X 表示在波长 λ_1 、 λ_2 处的气溶胶消光系数或者后向散射系数。Ångström指数是度量气溶胶颗粒尺度分布的一个重要参量,并且与气溶胶颗粒物的平均半径有较好的相关性^[26]。

上述的气溶胶激光雷达比、双波长色比以及Ångström指数等参量是进行气溶胶分类的理论基础。而实现气溶胶的分类是基于大量的实验观测结果以及对特殊类型的气溶胶(如沙尘气溶胶等)进行实地探测,再经过大量数据的分析、定标后实现气溶胶的合理分类,并最终确定不同种类气溶胶类型相关特性的典型值^[23]。根据Papagiannopoulos等人总结的相关研究资料^[25],表1中列举了不同气溶胶类型的激光雷达比和Ångström指数的典型值,可依据此表数据值对气溶胶进行初步分类。由于气溶胶分类是一种定性的类型分配方法,因此,在最终确定气溶胶类型时可能会出现错误^[25]。表中,CC表示干净的大陆气溶胶,PC表示污染的大陆气溶胶,D表示沙尘,MD表示混合的沙尘,PD表示污染的沙尘,MM表示混合的海盐气溶胶,S表示烟尘,V表示火山灰。

表 1 气溶胶类型相关特性典型值的平均值及标准差

Tab.1 Mean and standard deviation of typical values of aerosol type related characteristics

Type	S^{355}/sr	S^{532}/sr	$\kappa_{\alpha}(355, 532)$	$\kappa_{\beta}(355, 1064)$	$\kappa_{\beta}(532, 1064)$	$\kappa_{\beta}(355, 532)$
CC	50±8	41±6	1.7±0.6	1.0±0.2	1.0±0.3	1.3±0.3
PC	69±12	63±13	1.7±0.5	1.3±0.3	1.3±0.2	1.4±0.6
D	58±12	55±7	0.3±0.4	0.4±0.1	0.4±0.1	0.3±0.2
MD	42±4	47±6	0.5±0.3	0.5±0.2	0.4±0.3	0.7±0.3
PD	54±8	64±9	0.6±0.2	0.9±0.3	0.8±0.1	1.0±0.5
MM	25±7	24±8	0.9±0.3	0.8±0.1	0.8±0.2	1.0±0.3
S	81±16	78±11	1.3±0.3	1.3±0.1	1.3±0.1	1.2±0.3
V	50±11	48±13	0.2±0.3	0.1±0.1	0.4±0.3	0.2±0.3

2 数据库介绍

2.1 激光雷达观测数据

研究中所使用的多波长拉曼激光雷达预处理数据分别来自:意大利环境分析方法研究所(40.600°N,

15.720°E)、德国莱布尼兹对流层研究所(51.350°N, 12.433°E)、葡萄牙埃武拉大学(38.567°N, -7.911°E)以及法国里尔大学(50.611°N, 3.141°E)。表2中列出了上述各机构的多波长拉曼激光雷达系统基本信

表 2 EARLINET 观测站点激光雷达系统基本信息

Tab.2 Basic information of EARLINET observing stations

Lidar	Elastic scattering/nm			Raman/nm			Institution
	355	532	1 064	387	607	530	
MUSA	√	√	√	√	√		CNR-IMAA, Potenza, Italy
LRD200	√			√			
Polly ^{XT}	√	√	√	√	√		TROPOS, Leipzig, Germany
PAOLI	√	√	√	√	√		Universidade de Évora, Portugal
LILAS	√	√	√	√		√	Université de Lille, France

息。这 4 个站点均属于欧洲气溶胶研究激光雷达网 (European Aerosol Research Lidar Network, EARLINET)^[27]。观测数据选自 EARLINET 两次集中观测任务: 2020 年 5 月 1 日~31 日, ACTRIS 全球新冠大流行欧洲封闭期间观测任务, 以及 2012 年 7 月 9 日~12 日, EARLINET 72 h 连续观测任务^[28-29]。

用于反演的数据均是由 EARLINET 开发的自动反演程序 (Single Calculus Chain, SCC) 中的数据预处理模块 (EARLINET Lidar Pre-Processor, ELPP)^[30] 提供的预处理数据产品。这些预处理数据是经过死时间校正、大气背景和系统暗信号的移除、触发延迟校正以及激光雷达信号粘接等处理后的可直接用于后续反演, 且已通过 EARLINET 质量保证的产品。从 ELPP 获取的不同站点的预处理数据具有相同的距离分辨率 (60 m), 通常每一条信号廓线的累积时间为 1 h。但是不排除特殊情况的出现 (如低云或者降雨等), 信号累计时间会有所减少。

2.2 大气模式数据

无论是通过 Raman 法反演气溶胶消光和后向散射系数或者仅通过弹性散射信号反演气溶胶后向散射系数时, 大气分子数密度均是一个重要的输入参量。该参量是通过下式反演得到的:

$$N_{mol}(z) = \frac{P(z)}{k \times T(z)} \tag{4}$$

式中: $P(z)$ 代表大气压强; $T(z)$ 为大气温度; k 为玻耳兹曼常量 ($k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K)。大气的温度和压强信息可以通过大气模式来获得。目前常用的大气模式主要分为全球预测模式以及全球再分析模式。相较于预测模式, 再分析模式可以同化更多的观测数据, 因此可提供更为准确的大气信息。但是, 再分析模式数据的获取具有一定的滞后性 (通常为 1~2 个月), 因此不能用于激光雷达近实时的观测反演, 而预测模式成

为实现近实时观测反演的最佳选择。

为了研究不同模式 (预测和再分析模式) 对于气溶胶光学参量反演以及气溶胶分类的影响, 再分析模式选用欧洲中尺度天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的第 5 代再分析系统 (ERA5) 提供的大气温度和压强垂直分布数据^[14]。预测模式分别来自 ECMWF 的综合预报系统数据 (IFS_ECMWF)^[15] 以及美国 NOAA 国家环境预测中心开发的大气模式 (GDAS)^[16]。其中, IFS_ECMWF 模式用于 Potenza 和 Leipzig 站点, GDAS 模式用于 Evora 和 Lille 站点, ERA5 模式则用于上述所有 4 个站点, 这是由各站点实际可获取的大气模式源所决定的。此外, ERA5、IFS_ECMWF 和 GDAS 模式提供的温度和压强数据的垂直气压分层是固定的, 如表 3 所示, 但是其垂直分辨率随高度的升高而降低, 例如, ERA5 模式垂直分辨率可以从 ~20 m 降低到 ~4000 m, 而来自不同站点的激光雷达数据在整个观测范围内的垂直分辨率均为 60 m。因此, 对模式数据进行线性插值处理来获取与激光雷达观测数据对应高度处的温度和压强信息。

表 3 不同模式数据垂直气压分层

Tab.3 Vertical pressure levels of different model data

Dataset	Vertical pressure levels
ERA5	137 vertical levels from the surface to 0.02 hPa
IFS_ECMWF	137 vertical levels from the surface to 0.01 hPa
GDAS	23 vertical levels from the surface to 20 hPa

3 研究方法

为了保证预处理信号具有足够的信噪比, 并且排除昼夜交替时大气变化对反演气溶胶光学参量产生的影响, 文中所选用的预处理数据均是来自稳定大气

条件下的连续观测 30 min 以上的数据。此外,每个站点在每个观测日至少选择一个白天和一个夜晚的观测案例进行分析,以研究大气模式对不同反演算法(Raman 法和弹性散射法)的影响。反演中所使用的大气模式(预测和再分析模式)的数据时间需与激光雷达观测时间保持一致。

利用激光雷达观测数据反演了两组气溶胶光学参量(气溶胶消光和后向散射系数):一组使用大气预测模式(IFS_ECMWF 或 GDAS)作为输入数据,另一组使用再分析模式(ERA5)作为输入数据。反演气溶胶消光系数时滑动线性拟合点数,反演后向散射系数时选取的校准高度,以及弹性散射法反演过程中激光雷达比的设定均需保持一致,而来自不同大气模式的温度和压强数据是唯一变量,最后对这两组气溶胶光学参量反演结果进行比较。此外,还使用蒙特卡洛技术获取了气溶胶光学参量对应的统计误差^[31]并用于确定光学参量的信噪比。最后,还为了保证用于比较的反演结果的可靠性,需同时满足以下 3 个限定条件:(1) 属于激光雷达系统几何因子完全重叠区域中的观测信号;(2) 气溶胶光学参量的信噪比高于预先设定的阈值,文中设置为 $SNR > 5$; (3) 气溶胶光学参量的数值大于激光雷达系统可观测最小值 ($\alpha_{min} > 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $\beta_{min} > 3 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$),用于排除满足信噪比要求,但已接近设备的探测极限值。还需要说明的是,在满足上述 3 个限定条件后的数据点数如果过少将不再具有统计代表性,通过比较,最终选取数据点数大于 4 作为进行后续处理的阈值条件。

由于 EARLINET 站点是通过使用预测模式实现对气溶胶光学参量近实时观测反演的,基于此,设定所有使用预测模式反演得到的气溶胶光学参量组成的数据集作为与其他数据集进行比较的参考量,并且使用固定高度范围内的平均偏差来表征不同模式(预测和再分析模式)对气溶胶光学参量反演的影响。假设 $X_F(z_i, \lambda)$ 和 $X_R(z_i, \lambda)$ 分别代表从预测和再分析模式反演获得的在波长 λ 处的气溶胶消光或者后向散射系数。则在每一个独立高度 z_i 处的 $X_R(z_i, \lambda)$ 相较于 $X_F(z_i, \lambda)$ 的相对偏差可表示为:

$$\Delta X(z_i, \lambda) = \frac{X_R(z_i, \lambda) - X_F(z_i, \lambda)}{X_F(z_i, \lambda)} \times 100\% \quad (5)$$

在高度范围 $\Delta z = z_M - z_N$, 即 $M - N + 1$ 个高度 bin

内, $X_R(z_i, \lambda)$ 相较于 $X_F(z_i, \lambda)$ 的平均相对偏差可定义为:

$$\overline{\Delta X}(\Delta z, \lambda) = \frac{\sum_{i=N}^M \Delta X(z_i, \lambda)}{M - N + 1} \quad (6)$$

文中也研究了大气气溶胶浓度对 Raman 法和弹性散射法反演气溶胶光学参量的结果的影响,通过对气溶胶光学参量从地面到无气溶胶区域积分计算的结果来表征大气气溶胶浓度。以气溶胶消光系数计算得到的结果称之为气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD),而在无法获取消光系数的情况下,则将气溶胶后向散射系数进行积分计算,得到的结果定义为积分的后向散射系数(Integrated Backscatter, IB)。具体研究大气模式对气溶胶光学参量反演影响的方法流程如图 1 所示。

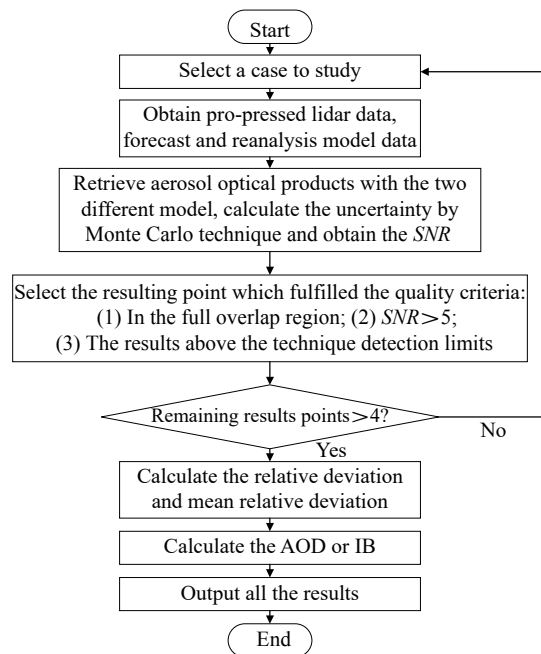


图 1 研究大气模式对气溶胶光学参量反演影响的方法流程

Fig.1 Methodological flow for studying the influence of atmosphere model on the retrieval of aerosol optical parameters

对于气溶胶的分类,通常是利用与气溶胶类型相关的参量(激光雷达比、Ångström 指数等)的反演结果和气溶胶不同类型所对应的典型值进行比较,实现对气溶胶种类的初步判定。因此,可通过对个例进行分析,即在同一案例中根据使用不同大气模式(预测和再分析模式)获取的气溶胶类型相关参量的反演结果所判定的气溶胶类型是否一致来研究大气模式对

气溶胶分类的影响。

4 结果与讨论

4.1 大气模式对气溶胶光学参量反演的影响

图 2 所示的是法国里尔站点于 2020 年 5 月 8 日, 20:00~21:00 UTC, 分子数密度以及通过 Raman 法获取的 355 nm 处的气溶胶光学参量(消光和后向散射系数)的反演结果在使用不同大气模式(GDAS 和 ERA5)情况下所产生的相对偏差。从图 2(a)中可以看出, 大气分子数密度相对偏差数值较小且随高度变化缓慢, 而在图 2(b)中, 气溶胶消光系数的相对偏差随高度变化较大, 在图中所示高度范围内最大偏差值为~35%。对于气溶胶后向散射系数, 图 2(c)中出现了明显的突变, 这是由于在突变位置高度处, 气溶胶后向散射系数数值已经低于系统的探测极限, 因此只考虑突变高度以下区域的结果, 可以看出使用不同大气模式对反演后向散射系数造成的相对偏差数值较小且随高度变化不大。

文中主要针对大气模式在一定高度区间内对气溶胶光学参量反演结果影响的平均效应进行研究。图 3 为在波长 355 nm 处, 各站点 Raman 法反演气溶胶消光系数的平均相对偏差(蓝色)及对应分子数密度平均相对偏差(红色)。可以看出, 气溶胶消光系数的偏差结果浮动较大, 但所有案例的分子数密度偏差结果变化不大, 且始终小于±3%。波长 532 nm 处的结果与 355 nm 处的结果类似(图未给出)。表 4 中列出了在所有站点案例中, 不同模式的使用对于 Raman 法

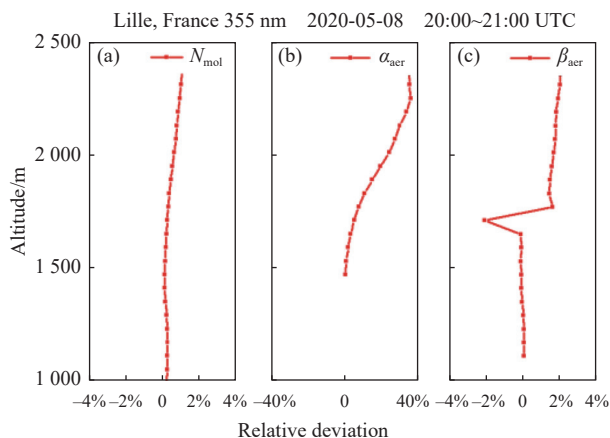


图 2 法国里尔站点(2020 年 5 月 8 日, 20:00~21:00 UTC), 使用不同大气模式(GDAS 和 ERA5)对反演结果造成的影响。(a) 大气分子数密度相对偏差; (b) Raman 法获取的 355 nm 处气溶胶消光系数的相对偏差; (c) Raman 法获取的 355 nm 处气溶胶后向散射系数的相对偏差

Fig.2 The use of different atmospheric models (GDAS and ERA5) for the case of the Lille site in France (8th May, 2020, 20:00 to 21:00 UTC) has an impact on the retrieval results. (a) Relative deviation of the atmospheric molecular number density; (b) Relative deviation of the aerosol extinction coefficient at 355 nm obtained by the Raman method; (c) Relative deviation of the aerosol backscatter coefficient at 355 nm obtained by the Raman method

获取的在两个不同波长处的气溶胶消光系数所产生的最大偏差及对应的分子数密度偏差。如表所示, 在两个波长处最大偏差均可达到~20%, 而对应的分子数密度偏差较小。该结果表明, Raman 法反演气溶胶

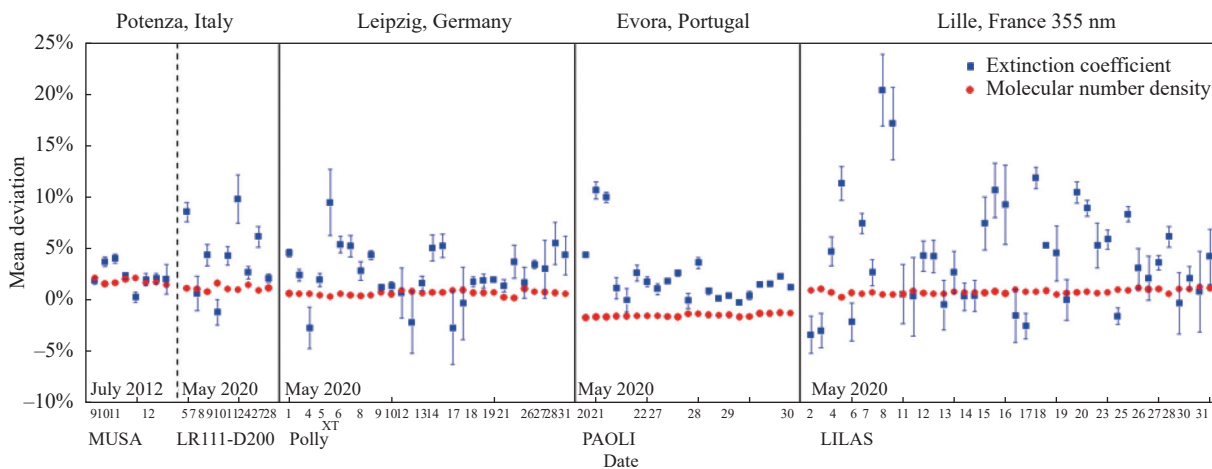


图 3 4 个站点在 355 nm 处气溶胶消光系数及分子数密度平均相对偏差

Fig.3 Mean relative deviation of aerosol extinction coefficient and molecular number density at 355 nm from four stations

表 4 在所有站点中, 不同模式对于 Raman 法在不同波长处获取气溶胶消光系数所产生的最大偏差及对应分子数密度偏差

Tab.4 Maximum deviation of different models for aerosol extinction coefficient obtained by Raman algorithm at different wavelengths and corresponding deviation of molecular number density from four stations

Algorithm	Raman method	
Wavelength/nm	355	532
Maximum deviation D_α	20.43%	19.44%
Corresponding deviation D_N	0.59%	0.44%

消光系数对大气模式的选择较为敏感, 不同模式提供的大气温度、压强数据将导致气溶胶消光系数反演结果出现较大的偏差, 并且由不同模式引起的分子数密度的差异不是影响气溶胶消光系数产生较大偏差的主要因素。分析其原因是由于在使用公式 (1) 反演消光系数的过程中需要对 $\ln[N_R(z)/(P_R(z)z^2)]$ 求导数, 说明在反演消光系数不仅会受到分子数密度数值差异的影响, 也会受到分子数密度廓线斜率的影响, 这也印证了 Ansmann 等人的研究结果^[12], 并且该文献提到

用于计算分子数密度的大气温度数据是重要的影响因素。

对于气溶胶后向散射系数, 由不同模式引起的 Raman 法和弹性散射法反演结果的偏差整体小于气溶胶消光系数的偏差, 限于篇幅图未给出。为便于分析, 表 5 中列出了考虑所有站点案例, 不同模式对于两种算法在不同波长处获取气溶胶后向散射系数所产生的最大偏差及对应的分子数密度偏差。可以看出, 在 355 nm 处, 使用弹性散射法反演后向散射系数时最大偏差值超过 10%, 而在其他情况下, 两种算法获取的后向散射系数的最大偏差均小于 $\pm 5\%$ 。此外, 对比两种算法结果发现, 对于弹性散射法, 随着观测波长的增加, 后向散射系数的最大偏差逐渐降低。而 Raman 法在两个波长处的后向散射系数最大偏差均较小, 且与观测波长无明显依赖性。分析认为其原因是通过 Raman 法反演气溶胶后向散射系数时, 需计算两种散射信号 (弹性散射信号及对应氮气拉曼散射信号) 的比值, 此过程降低了不同模式数据的差异对反演结果的影响。此外, 相较于白天, 夜晚观测获取的散射信号具有更高的信噪比, 将有助于降低不同模式引起的后向散射系数偏差对观测波长的依赖性。

表 5 4 个站点中, 不同模式对于两种算法在不同波长处获取后向散射系数所产生的最大偏差及对应分子数密度偏差

Tab.5 Maximum deviation of different models for backscatter obtained by two algorithms at different wavelengths and corresponding deviation of molecular number density from four stations

Algorithm	Raman method		Elastic scattering method		
	355	532	355	532	1064
Wavelength/nm	355	532	355	532	1064
Maximum deviation D_β	-2.22%	-2.27%	11.11%	4.80%	2.79%
Corresponding deviation D_N	-2.29%	-2.16%	-2.02%	0.20%	1.56%

研究还发现, 大气气溶胶浓度会对 Raman 法和弹性散射法获取的气溶胶光学参量反演结果产生影响, 并且对于弹性散射法获取的后向散射系数的偏差影响较为显著, 下面仅以弹性散射法的偏差结果为例进行详细论述。图 4 为使用弹性散射法反演获取的在 3 个波长处的气溶胶后向散射系数平均相对偏差与气溶胶浓度之间的关系, 红点表示不同案例的结果, 蓝色虚线为图中所示案例线性拟合结果, K 为拟合直线

的斜率值。从图 4(a) 中可以看出, 气溶胶浓度最低的情况所对应的后向散射系数偏差值最大, 在低气溶胶浓度区域 ($IB < 0.0015 \text{ sr}^{-1}$) 偏差值较为分散, 随着气溶胶浓度的增加, 偏差值趋于稳定。在图 4(b) 中, 低气溶胶浓度区域内的偏差值同样较为分散, 但相较于图 4(a), 气溶胶浓度与后向散射系数偏差的相关性降低, 而在 1064 nm 处的后向散射系数的偏差基本不随浓度的变化而改变 (如图 4(c) 所示)。

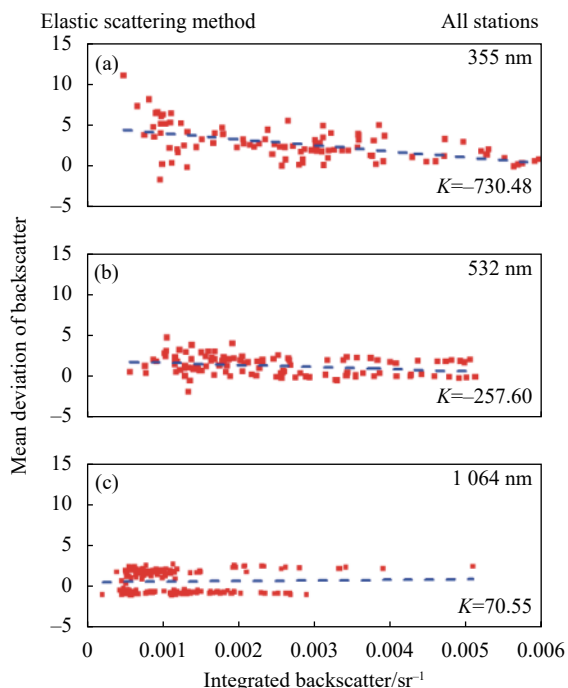


图 4 后向散射系数的平均相对偏差与气溶胶浓度之间的关系

Fig.4 Relationship between the mean relative deviation of backscatter coefficient and aerosol concentration

对图 4 中,各观测波长处在低气溶胶区域内 (IB<0.0015 sr⁻¹) 所有案例中的最大偏差值、平均偏差值以及标准差分别进行统计,结果如表 6 所示。可以看出,随着波长的增加,低气溶胶区域内各项统计结果均逐渐减小,表明大气气溶胶浓度对于弹性散射反演结果的影响随激光雷达观测波长的增加而降低。分析其原因可能是在较长波段下,气溶胶散射和分子散射信号的对比度较高所导致的结果。当气溶胶浓

表 6 考虑 4 个站点案例,低气溶胶浓度区域 (IB<0.0015 sr⁻¹) 3 个波长处最大偏差、均值偏差以及标准差

Tab.6 Maximum deviation, mean value and standard deviation in the low aerosol concentration region (IB < 0.0015 sr⁻¹) at three wavelengths from four stations

Statistics project	Results		
	355 nm	532 nm	1064 nm
Maximum deviation	11.11%	4.8%	2.79%
Mean value	4.26%	1.58%	0.74%
Standard deviation	2.80%	1.27%	1.24%

度较低时,相较于 532 nm 和 1064 nm,激光雷达在 355 nm 处获取的弹性散射信号中的分子后向散射信号更占主导作用,因此会使得在较短波长处反演后向散射系数的结果更不稳定。此外,从 355 nm 处的统计结果可以看出,其平均偏差小于 5%,但存在最大偏差超过 10% 的案例,说明短波长处使用弹性散射信号反演后向散射系数时,在低气溶胶浓度情况下,虽然选取不同的大气模式数据对于反演结果整体的影响较小,但是不排除出现较大偏差的可能性。

近实时的观测反演气溶胶光学参量对于研究环境污染、大气传输等具有重要意义,而地基、星载激光雷达系统需要通过使用预测模式来实现对气溶胶光学参量近实时的观测反演。但是,相较于预测模式,再分析模式提供的数据通常更加符合真实的大气特征。通过上文分析可以看出,预测模式与再分析模式提供的数据对于气溶胶光学参量的反演,尤其是对 Raman 法反演气溶胶消光系数的影响较大。此外,大气气溶胶浓度在激光雷达近实时观测反演时也是需要考虑的影响因子。因为在低气溶胶浓度条件下,对于短波长处仅通过弹性散射信号反演气溶胶后向散射系数的情况,其反演结果对选用不同大气模式较为敏感,这也验证了 Ansmann 等人的研究结果^[32]。因此,在地基、星载激光雷达系统近实时观测反演后,建议有必要使用再分析模式对观测数据进行再次处理以获取更为准确的气溶胶光学参量进而用于后续的研究。

4.2 大气模式对气溶胶分类的影响

从上文中的分析发现,反演气溶胶光学参量时选取不同的大气模式计算结果会产生偏差。而与气溶胶类型相关的参量,如激光雷达比、双波长色比以及 Ångström 指数等与气溶胶消光和后向散射系数存在直接或间接的联系,因此分析认为不同大气模式也会对以上几个参量的反演结果产生影响,并最终影响气溶胶的分类结果。为了验证此分析内容,对表 2 中 4 个站点的观测案例进行了研究,由于篇幅有限,文中仅以 Evora 观测站点 (38.567°N, -7.911°E) 于 2020 年 5 月 21 日, 20:00~21:00 UTC 的观测结果为例进行分析。

图 5 所示的是使用两种大气模式 (GDAS 和 ERA5) 分别通过 Raman 法反演得到的在 355 nm 和 532 nm

处的气溶胶消光系数。红色实线表示使用 GDAS 模式数据的反演结果,蓝色虚线为使用 ERA5 模式的反演结果。可以看出,在海拔 1.3~2 km 范围内,使用不同模式所获取的消光系数廓线在两个观测波段处均具有较大的差异,最大偏差结果分别为~12%@355 nm,~19%@532 nm。

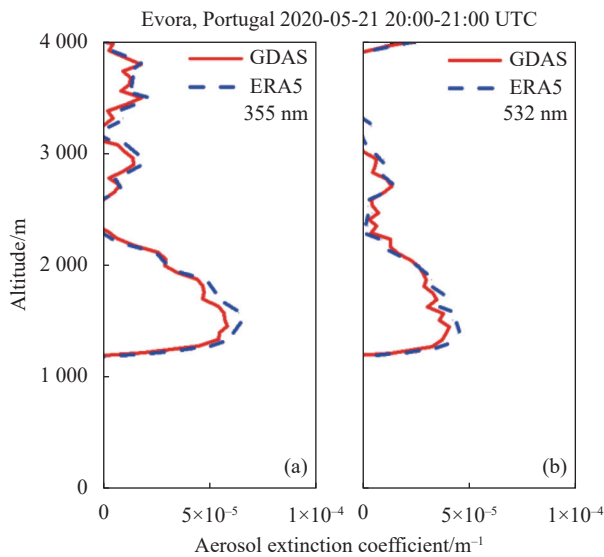


图 5 利用不同大气模式通过 Raman 法反演获取的气溶胶消光系数
Fig.5 Aerosol extinction coefficient obtained by Raman method using different atmospheric models

图 6 为使用不同模式分别通过 Raman 法反演得到的在 355 nm 和 532 nm 处的气溶胶后向散射系数以及通过弹性散射法反演得到的在 1064 nm 处的后向散射系数。可以看出,在反演气溶胶后向散射系数时,使用不同的大气模式所得到的反演结果在 3 个不同波段处一致性较好,并且相较于图 5,不同模式对于两种反演气溶胶后向散射系数算法的结果影响均较小。在海拔 1.3~2 km 范围内,后向散射系数在 3 个波段处的最大偏差分别为~1.8%@355 nm,~2.0%@532 nm 和~0.78%@1064 nm。

使用不同模式反演得到的在 355 nm 和 532 nm 处的气溶胶激光雷达比(S^{532}/S^{355})以及双波长色比结果,如图 7 所示。图 7(a)、(b)中,在两个观测波长处的激光雷达比均具有一定的差异。分析其原因主要是由于不同大气模式对气溶胶消光系数的反演结果影响较大,并最终影响激光雷达比的反演。在海拔 1.3~2 km 范围内,两波长处的激光雷达比最大偏差分别

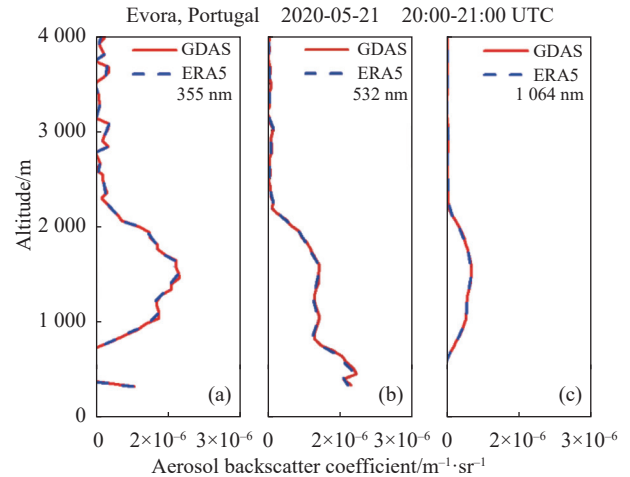


图 6 利用不同大气模式通过 Raman 法及弹性散射法反演获取的气溶胶后向散射系数

Fig.6 Aerosol backscatter coefficient obtained by the Raman and elastic scattering methods using different models

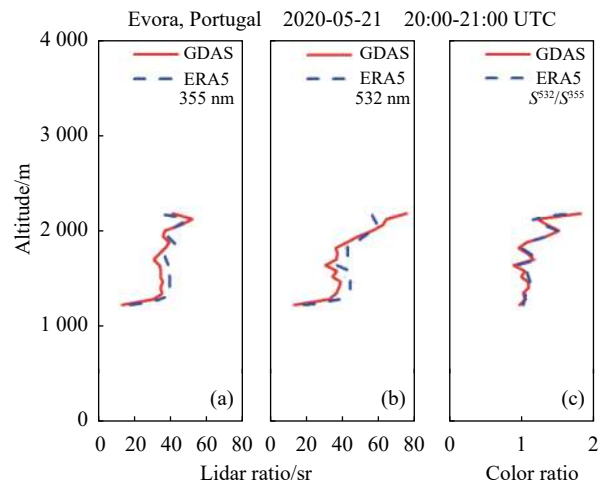


图 7 利用不同大气模式反演得到的气溶胶激光雷达比及双波长色比结果
Fig.7 Aerosol lidar ratio and color ratio results of dual wavelength obtained by different atmospheric models

为~14%@355 nm,~21%@532 nm。文中案例中双波长色比偏差结果较小,如图 7(c)所示,在海拔 1.3~2 km 范围内的最大偏差为~6.5%。

图 8 为在不同模式使用情况下通过公式 (3) 反演得到的 Ångström 指数。图 8(a)中与气溶胶消光系数相关的两 Ångström 指数廓线具有一定的差异,而对于与气溶胶后向散射系数相关的 Ångström 指数,来自两种大气模式的计算结果基本一致(如图 8(b)~(d)所示)。在海拔 1.3~2 km 范围内,不同类型的 Ångström 指数最大偏差分别为~11% κ_α (355, 532),~0.48% κ_β (355,

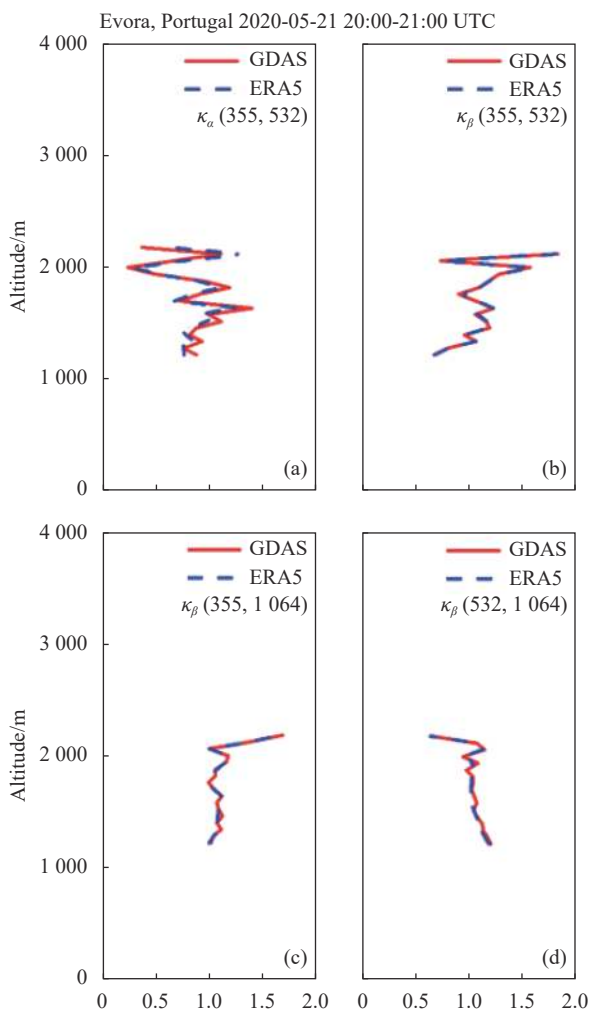


图 8 利用不同大气模式反演得到的Ångström 指数结果

Fig.8 Ångström exponent results retrieved by different atmospheric models

532), $\sim 0.96\% \kappa_{\beta}(355, 1\ 064)$, $\sim 1.7\% \kappa_{\beta}(532, 1\ 064)$ 。

根据图 5 和图 6 可知,文中案例在海拔 1.3~2 km 范围内,气溶胶浓度水平较高,并且在两个波段处的激光雷达比变化较小(如图 7(a)、(b)所示),分析认为在此高度范围内可能含有同种类型的气溶胶颗粒物。由于 Evora 站点海拔高度 290 m,该站点的 PAOLI

激光雷达系统收发视场完全重合高度为 800 m,此外,在气溶胶消光系数的反演过程中对激光雷达观测数据进行了滑动线性拟合处理,为了排除激光雷达系统几何因子的影响,最终选取海拔 1.5~2 km 范围内观测结果进行分析。

表 7 列出了在海拔 1.5~2 km 范围内,使用两种大气模式(GDAS 和 ERA5)分别反演得到的气溶胶类型相关参量的平均值及标准差。可以看出,对于与气溶胶消光系数和后向散射系数相关的Ångström 指数,使用不同模式反演得到的结果基本一致,且在 1 附近变化;对于双波长色比,使用两种模式的反演结果均为 1.1 ± 0.2 ;而对于激光雷达比,在两个观测波长处,反演结果表现出较大的差异。

对比表 1 中所列气溶胶类型及典型值,表 7 中与气溶胶消光系数和后向散射系数相关的Ångström 指数结果与混合类型的海盐颗粒物(海盐颗粒物占主体混有沙尘颗粒物)的典型值具有较好的一致性。但是,该类型的气溶胶与其他气溶胶混合类型的Ångström 指数典型值存在交集,因此,文中案例中激光雷达比成为确定气溶胶类型的重要依据。可以看出,使用两种大气模式(GDAS 和 ERA5)分别反演得到的激光雷达比结果在两个波段处均大于混合类型的海盐颗粒物所对应的典型值($S^{355}=(25 \pm 7)$ sr, $S^{532}=(24 \pm 8)$ sr)。对比表 1 中所列的其他气溶胶类型的激光雷达比典型值可以发现,通过 ERA5 模式反演得到的结果与混合类型的沙尘颗粒物(沙尘颗粒物占主体并混有海盐气溶胶)的典型值($S^{355}=(42 \pm 4)$ sr, $S^{532}=(47 \pm 6)$ sr)较为接近,而通过 GDAS 模式反演得到的结果则介于上述两种气溶胶类型典型值之间。因此,根据 ERA5 模式反演结果可以初步判定海拔 1.5~2 km 范围内气溶胶种类为混合类型沙尘颗粒物,而根据 GDAS 模式反演结果则可能判定为其他气溶胶颗粒物的混合情况。

表 7 在海拔 1.5~2 km 高度范围内,使用不同大气模式获取的气溶胶类型相关参量平均值及标准差

Tab.7 Mean value and standard deviation of related parameters of aerosol type using different atmospheric models at an altitude of 1.5-2 km

Model	Related parameters						
	$\kappa_{\alpha}(355, 532)$	$\kappa_{\beta}(355, 532)$	$\kappa_{\beta}(355, 1\ 064)$	$\kappa_{\beta}(532, 1\ 064)$	S^{355}/sr	S^{532}/sr	$Y(532, 355)$
GDAS	0.9 ± 0.3	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1	36 ± 2	40 ± 7	1.1 ± 0.2
ERA5	0.8 ± 0.3	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1	39 ± 2	45 ± 6	1.1 ± 0.2

为了印证上述分类结果的合理性,还使用美国 NOAA 提供的 HYSPLIT 后向轨迹模式,对本案例中的气溶胶的来源及行进轨迹进行模拟。图 9 为 HYSPLIT 模式提供的 Evora 地区海拔高度 1.5 km 和 2 km 处,气溶胶 48 h 后向轨迹结果。可以看出,在两个高度处的气溶胶来源方向虽然不同,但均是来自于大西洋的海盐颗粒物。由于 Evora 站点并未与海洋直接相连,当海盐气溶胶通过大气传输至 Evora 站点上空时,会伴随有陆地沙尘以及烟尘的混入,此过程会减小气溶胶混合物的大小并增加其吸收能力,最终导致观测到的气溶胶激光雷达比数值高于海盐气溶胶的典型值。因此将 1.5~2 km 范围内气溶胶类型归类于混合类型的沙尘颗粒物 (ERA5 分析结果) 或者其他气溶胶颗粒物的混合情况 (GDAS 分析结果) 均具有一定的合理性。至于传输到 Evora 上空的气溶胶中哪一种气溶胶颗粒物占主体 (海盐颗粒物或者陆地沙尘),还将依赖于后续对气溶胶类型进一步的研究分析。

当气溶胶种类成分较为复杂情况下,仅根据 Ångström 指数结果无法区分气溶胶种类时,激光雷达比对于气溶胶类型的分类起到重要的作用。通过上述分析可知,使用不同大气模式反演得到的激光雷达比的差异会最终影响气溶胶的分类结果。此外,在表 2 中的其他站点观测案例进行分析时,同样发现不同的大气模式会对气溶胶的分类结果产生影响。这表明,在根据不同大气模式反演得到的气溶胶类型相关的参量对气溶胶进行分类时,存在分类结果与真实

情况出现偏差的可能性。因此,建议使用更为接近真实大气特征的再分析模式 (ERA5) 对激光雷达观测数据进行反演,并基于此结果对气溶胶种类进行研究。

5 结 论

文中基于 EARLINET 的 4 个站点 (波坦察、莱比锡、里尔、埃武拉) 在两次集中观测任务中的数据,分析了不同模式 (预测与再分析模式) 在反演气溶胶光学参量 (消光和后向散射系数) 及气溶胶分类中的影响。结果表明:当选用不同的大气模式提供的温度、压强数据对气溶胶光学参量进行反演时,会导致计算结果出现偏差,并且对于 Raman 法反演气溶胶消光系数影响较大。其中,大气气溶胶浓度是需要考虑的影响因素,且随观测波长的不同,影响有所差异。此外,在对激光雷达比、Ångström 指数等与气溶胶类型相关参量进行反演时,使用不同模式数据计算出的结果会有所不同,并且在激光雷达比的反演中表现出较大偏差,最终可影响气溶胶的分类结果。

地基和星载激光雷达系统是使用预测模式数据实现对气溶胶光学参量近实时观测反演,但是相较于预测模式,再分析模式提供的数据通常更为接近真实大气。文中发现选用不同模式会对气溶胶光学参量、气溶胶分类等造成影响,并最终可能影响气溶胶光学模型的完善以及气溶胶时空分布和传输特征的相关研究工作,而这些研究对于理解区域辐射强迫机制、全球物质循环以及气候环境影响等具有重要意义。因此建议在使用激光雷达系统对气溶胶光学参量近实时观测反演后,可根据需要使用再分析模式 (ERA5) 对观测数据进行再次反演,以获取更为准确的气溶胶光学参量,并基于此反演结果开展气溶胶的分类及后续研究。

由于文中所使用的激光雷达观测数据及模式数据均是来自于欧洲大陆,而全球不同区域自然与人为因素导致的气溶胶主要排放类型以及不同模式 (预测和再分析模式) 之间差异大小会有所不同,因此文中的研究结果存在一定的地域局限性,后续可以使用同样的研究方法对欧洲大陆以外地区的观测数据进行分析比较,进而将研究结果的地域适用范围扩大。此外,由于退偏比在气溶胶分类中也是一个重要依据,后续也将开展关于不同大气模式对气溶胶线性退偏

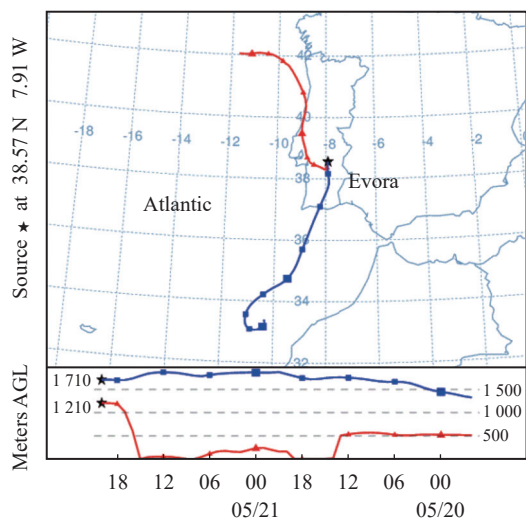


图 9 由 HYSPLIT 模式提供的气溶胶 48 h 后向轨迹

Fig.9 48 h backward trajectory of aerosol provided by HYSPLIT model

比影响的研究工作,为进一步讨论不同模式在气溶胶分类中的影响提供参考。

致谢 特别感谢意大利环境分析方法研究所的 Aldo Amodeo 研究员和 Giuseppe D'Amico 研究员对文中研究内容的帮助,以及意大利环境分析方法研究所、德国莱布尼兹对流层研究所、葡萄牙埃武拉大学和法国里尔大学站点提供的激光雷达观测数据。

参考文献:

- [1] Ackerman S A, Chung H. Radiative effects of airborne dust on regional energy budgets at the top of the atmosphere [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(2): 223-233.
- [2] Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840. (in Chinese)
- [3] Ge P, Zhang T S, Fu Y B, et al. Aerosol optical properties in Beijing based on AERONET [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(1): 18-27. (in Chinese)
- [4] Chen S Y, Nian X, Chen H, et al. Observation and analysis of aerosol optical properties during pollution episodes in Beijing [J]. *Optical Technique*, 2021, 47(5): 570-576. (in Chinese)
- [5] Ren L X, You R G, Lv W X, et al. The physical and chemical characteristics of aerosols in the urban region and their influence on human health [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(1): 67-73. (in Chinese)
- [6] Ji C L, Tao Z M, Hu S X, et al. Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001. (in Chinese)
- [7] Li T, Qi F D, Yue G M, et al. Raman lidar system for the measurements of water vapor mixing ratio in the atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(6): 843-854. (in Chinese)
- [8] Wang Y Z, Han Y L, Sun D S, et al. Multi-season observation and analysis of quasi-zero wind layer based on Doppler lidar in middle latitudes of China [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305004. (in Chinese)
- [9] Liu D, Tao Z M, Wu D C, et al. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001. (in Chinese)
- [10] Lv W Y, Yuan K E, Wei X, et al. A mobile lidar system for aerosol and water vapor detection in troposphere with mobile lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0330001. (in Chinese)
- [11] Chi R L, Wu D C, Liu B, et al. Dual-wavelength Mie lidar for measuring the whole tropospheric aerosols [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(3): 179-186. (in Chinese)
- [12] Ansmann A, Wandinger U, Riebesell M, et al. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(33): 7113-7131.
- [13] Yan S S, Hu S X, Hu H L, et al. A new derivation method for aerosol extinction coefficient detected by Raman lidar [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 433-435. (in Chinese)
- [14] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146: 1999-2049.
- [15] Strube C, Preusse P, Ern M, et al. Propagation paths and source distributions of resolved gravity waves in ECMWF-IFS analysis fields around the Southern Polar Night Jet [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(24): 18641-18668.
- [16] Abreu P, Aglietta M, Ahlers M, et al. Description of atmospheric conditions at the Pierre Auger Observatory using the Global Data Assimilation System (GDAS) [J]. *Astroparticle Physics*, 2012, 35(9): 591-607.
- [17] Teng M, Zhuang P, Zhang Z Y, et al. New all-weather outdoor Raman-Mie scattering lidar system used in atmospheric aerosol pollution monitoring [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706001. (in Chinese)
- [18] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [19] Di Girolamo P, Ambrico P F, Amodeo A, et al. Aerosol observations by lidar in the nocturnal boundary layer [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4585-4595.
- [20] Sasano Y, Browell E V, Ismail S. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(22): 3929-3932.
- [21] Shu R, Huang G H, Kong W. Development and review of space-based laser altimetry technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20201047. (in Chinese)
- [22] Yang H, Wang C, Sun Z B, et al. High speed single-photon detector at 1550 nm wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 325-329. (in Chinese)
- [23] 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. (in Chinese)
- [24] Wang X C, Rao R Z. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 19-

22. (in Chinese)
- [25] Papagiannopoulos N, Mona L, Amodeo A, et al. An automatic observation-based aerosol typing method for EARLINET [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(21): 15879-15901.
- [26] Di H G, Hou X L, Zhao H, et al. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 244206. (in Chinese)
- [27] Amodeo A, Bösenberg J, Ansmann A, et al. EARLINET: The european aerosol lidar network [J]. *Optica Pura Y Aplicada*, 2006, 39(1): 1-10.
- [28] D'Amico G, Amodeo A, Baars H, et al. EARLINET Single Calculus Chain – overview on methodology and strategy [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4891-4916.
- [29] Sicard M, D'Amico G, Comerón A, et al. EARLINET: Potential operationality of a research network [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4587-4613.
- [30] D'Amico G, Amodeo A, Mattis I, et al. EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 1: Pre-processing of raw lidar data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(2): 491-507.
- [31] Mattis I, D'Amico G, Baars H, et al. EARLINET single calculus chain – technical – Part 2: Calculation of optical products [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(7): 3009-3029.
- [32] Ansmann A, Riebesell M, Weitkamp C. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(13): 746-748.