

廖家艳, 周天, 韩璧森, 等. 我国西北半干旱区气溶胶类型的地基激光雷达判别[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 570-578. [LIAO Jiayan, ZHOU Tian, HAN Biseng, et al. Aerosol types discrimination in semi-arid region of Northwest China using ground-based lidar data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 570-578], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-04-0570

我国西北半干旱区气溶胶类型的地基激光雷达判别

廖家艳, 周天, 韩璧森, 黄忠伟, 闭建荣

(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, 甘肃 兰州 730000)

摘要:气溶胶类型的准确识别是进一步研究其气候与环境效应的重要前提。基于兰州大学半干旱气候与环境观测站2009年10月至2012年11月地基双波长偏振激光雷达观测资料, 分别在清洁天、人为污染物、沙尘事件和强沙尘暴事件4种典型情形下挑选若干个例, 对其气溶胶消光系数、体积线性退偏比、气溶胶退偏比等进行统计分析, 明确不同气溶胶类型的判定阈值。结果表明: 清洁天该区域气溶胶消光系数小于 0.085 km^{-1} 。在消光系数大于该阈值的污染情形下, 人为污染物的体积线性退偏比小于0.07, 相应的气溶胶退偏比小于0.09; 污染沙尘的体积线性退偏比介于0.07和0.22之间, 气溶胶退偏比为0.09~0.31; 纯沙尘的体积线性退偏比大于0.22, 气溶胶退偏比大于0.31。当出现强沙尘暴时, 体积线性退偏比大于0.35, 气溶胶退偏比大于0.49。

关键词:地基偏振激光雷达; 气溶胶类型; 半干旱区

文章编号: 1006-7639(2023)04-0570-09 DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-04-0570

中图分类号: P425.5+5

文献标志码: A

引言

气溶胶是地球大气层中微小的悬浮粒子, 也是影响气候变化最不确定因素之一(Boucher et al., 2013), 它不仅可以通过吸收和散射到达地球表面的太阳辐射直接影响地气系统辐射收支, 而且可以通过影响云量改变云的行星反照率、充当云凝结核影响成云过程和改变云滴有效半径、影响云的寿命等方式扰动全球辐射收支。此外, 大气中吸收性气溶胶颗粒还会加热大气使云滴蒸发加快, 云覆盖量减少, 从而使到达地面的短波辐射增多, 进而影响气候变化。因此, 气溶胶是影响地气系统能量收支的重要因素。

不同类型气溶胶由于光学特性和理化性质不同, 产生的辐射效应有所差异。尹宏和韩志刚(1989)利用一维辐射对流模式计算晴空和沙尘暴条件时气溶胶粒子对太阳辐射的吸收和对大气的加热, 发现沙尘气溶胶大量存在时, 大气对太阳辐射加热率增加80%~318%。毕鸿儒等(2022)通过

MIROC6(Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6)模式研究发现, 部分人为气溶胶(硫酸盐、硝酸盐和有机碳等)的辐射强迫对地表有明显的辐射冷却效应, 可部分抵消温室气体引起的增温效应。当具有不同辐射效应的气溶胶相互作用产生混合气溶胶时, 其辐射效应将变得更加复杂。IPCC报告(Ramaswamy et al., 2001)显示, 吸收性气溶胶黑碳导致的正辐射强迫会极大减弱散射性气溶胶硫酸盐带来的负辐射强迫, 使得黑碳和硫酸盐混合产生的黑碳-硫酸盐气溶胶在辐射强迫估算时不确定性增大。Ma等(2012)研究表明, 仅气溶胶混合状态、大小和密度的不确定性就可对全球气溶胶强迫造成 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的影响。在我国西北沙尘源区和近源区, 大气颗粒物常年以粗模态的沙尘气溶胶为主, 特别在冬春季沙尘天气频发时期, 源区的沙尘被抬升后, 可跨区域远距离传输至我国东部地区和日韩等国, 甚至可以跨太平洋传输至北美。传输过程中, 沙尘气溶胶与沿途的人为污染物(硫化物、氮化物、生物质燃烧烟羽和黑碳等)相互混合作用

收稿日期: 2022-07-02; 改回日期: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41975019)及甘肃省科技计划项目(23JRRA1032)共同资助

作者简介: 廖家艳(1999—), 女, 研究生, 主要从事气溶胶及其气候效应研究。E-mail: liaojy18@lzu.edu.cn。

通信作者: 周天(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事气溶胶及其气候效应研究。E-mail: zhoutian@lzu.edu.cn。

形成污染沙尘,导致气溶胶颗粒的物理光学、化学组分等特性发生复杂变化,从而使其辐射效应评估更加困难(Zhang et al., 2019)。已有研究表明,在敦煌、民勤和兰州等沙尘源区和近源区,沙尘气溶胶受人类活动影响越多,其光学厚度与波长指数的分布关系越复杂(Zhou et al., 2018)。由此可见,对气溶胶类型的准确区分是进一步研究其气候与环境效应的前提。

激光雷达作为一种主动遥感手段,可以通过发射的激光束与大气颗粒物相互作用获得大气结构和成分等垂直分布信息,是用以开展大气颗粒物类型识别研究的重要途径。现阶段,基于不同平台的激光雷达观测在大气气溶胶和云类型区分方面已积累了丰富成果。其中,星载激光雷达监测覆盖面广、周期观测能力强,是观测大空间范围、长时间大气状况的有效手段。Omar等(2009)基于CALIPSO(The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)卫星观测数据,并融合地表类型(陆地/海洋)、地理位置和海拔高度、地基观测主导型气溶胶类别、气溶胶后向散射特性和退偏比等因素,将全球气溶胶分成了10个亚类。Sugimoto等(2011)基于355 nm激光雷达的消光系数、后向散射系数和退偏比数据,发展了一种适用于EarthCARE(Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)卫星高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法,可以给出沙尘、黑碳和硫酸盐-硝酸盐-有机碳混合物的气溶胶垂直剖面信息。Ke等(2022)基于中国研制的第一台星载气溶胶-云高光谱激光雷达发展了气溶胶和云的反演算法,其反演的消光系数和后向散射系数等在识别气溶胶和云方面应用良好。Burton等(2012)使用机载高光谱分辨率激光雷达的激光雷达比、退偏比和色比等数据将气溶胶分为8种不同类型,并基于该分类标准,研究了2008年在阿拉斯加和加拿大西北部观测试验期间气溶胶类型的垂直变化特征。地基激光雷达以高精度、高时空分辨率和实时连续等优势成为开展大气气溶胶区域影响研究的有力手段,它可以观测大气气溶胶的散射和吸收特性以及时空分布。Baars等(2017)利用多年、多站点的EARLINET(The European Aerosol Research Lidar Network)数据提出了一个具有高时间分辨率的新参数——准粒子后向散射系数,该参数根据气溶胶的物理特性(大小、形状)将其分成了4类(小粒子、球形大粒子、非球形大粒子、混合粒子)。Shimizu等(2004)用地基偏振激光雷达在北京、长崎和筑波开展连续观测,根据532 nm波段的退偏比估

算沙尘和球形粒子对后向散射系数的贡献,并用它们的后向散射廓线表征不同类型气溶胶的特性。Zhang等(2019)基于偏振激光雷达观测,利用体积线性退偏比和太阳光度计的光学厚度与波长指数等变量,给出我国黄土高原地区纯沙尘和污染沙尘的区分标准。Qi等(2021)基于不同大气颗粒物在355 nm和532 nm波段的体积线性退偏比的响应差异,结合532 nm/355 nm色比分布建立了可区分水云、冰云、污染物、沙尘和污染沙尘等亚类的阈值。此外,也有结合气团轨迹特征进行气溶胶分类的研究,如Mylonaki等(2021)开发了一种基于气团后向轨迹分析和卫星数据改进的自动层分类算法,可对气溶胶混合物进行分类。

上述诸多研究表明,退偏比是区分不同气溶胶类型的重要参量,它与气溶胶颗粒的粒径大小和形状密切相关(Pan et al., 2017)。我国西北干旱半干旱区地处内陆,海拔较高,气候干旱,降水稀少,气温年较差、日较差大,植被稀疏,下垫面类型多样(任朝霞和杨达源, 2007; 姚玉璧等, 2009)。该区域包含东亚最大的矿物沙尘排放源地——塔克拉玛干沙漠和戈壁荒漠,故常年以非球形沙尘颗粒为主导型气溶胶(Zhou et al., 2021; Han et al., 2022)。起源于该源区的沙尘向东传输过程中,颗粒大小和形状变化使其呈现出较低的退偏比。与我国东部地区丰富的气溶胶类型相比,西北干旱半干旱区气溶胶类型中具有更多的沙尘情景。然而,已有的基于激光雷达观测的气溶胶类型区分仍不够完善,特别是对清洁天和沙尘类别中的强沙尘暴情形等的判定标准尚未见研究报道。此外,随着现阶段大气环境立体监测技术的蓬勃发展,建立区域气溶胶精细分类的区分标准在大气环境监测业务应用中具有十分重要的意义。本文利用兰州大学半干旱气候与环境观测站地基双波长偏振激光雷达的长期观测资料,明确该地区清洁大气、人为污染物、污染沙尘、沙尘和强沙尘暴的体积线性退偏比和气溶胶退偏比判定阈值,以期与研究区域气溶胶气候影响和大气环境监测业务应用提供一定参考。

1 数据与方法

1.1 观测站点

兰州大学半干旱气候与环境观测站位于中国西北部甘肃省兰州市东部兰州大学榆中校区萃英山顶(104.137°E, 35.946°N),海拔1 965.8 m,距离兰州市中心约48 km。该站点是按国际标准建设的气

候观测平台,观测场占地约8 hm²,地处黄土高原、内蒙古高原和青藏高原(东北侧)的交汇区,是东部季风区、西北干旱区与高原高寒区三大自然气候区的过渡带,具有典型的区域代表性。下垫面为典型的黄土高原地貌,基本为原生草地植被,属于温带大陆性气候;台站周围环境受人类活动影响较小,可代表方圆几百公里半干旱区平均状况。

1.2 偏振激光雷达

双波长偏振激光雷达(L2S-SM II型)由激光发射单元、信号接收单元和数据采集单元3部分组成。雷达系统激光器采用Nd:YAG闪光灯泵,通过发射波长为532 nm(偏振通道)和1 064 nm的激光探测空气分子和大气颗粒物,由一个直径为20 cm的施密特卡塞格林望远镜接收回波信号。通过回波信号的延迟时间确定粒子高度,回波信号的强度与对应高度大气颗粒或大气分子的浓度成正比。该激光雷达系统的空间分辨率为6 m,时间分辨率为15 min(周天等, 2013)。

1.3 数据

利用2009年10月1日至2012年11月30日期间双波长偏振激光雷达观测资料反演的消光系数、体积线性退偏比、气溶胶退偏比、散射比等数据产品。

气溶胶消光系数是气溶胶散射系数与吸收系数之和,它反映气溶胶通过吸收和散射作用对某波段辐射的削减程度,消光系数越大说明气溶胶消光能力越强;体积线性退偏比反映颗粒物的非球形程度,粒子形状越接近球形,其退偏比越小。体积线性退偏比(δ_v)定义为激光雷达后向散射信号强度的垂直分量 P_{\perp} 与平行分量 P_{\parallel} 的比值(Zhou et al., 2018; Zhou et al., 2021),即:

$$\delta_v = P_{\perp}/P_{\parallel} \quad (1)$$

在估算非球形粒子对总消光的影响时,选用对体积线性退偏比有贡献的气溶胶退偏比更优(Zhou et al., 2018),气溶胶退偏比(δ_a)定义为:

$$\delta_a = \frac{\delta_v(\text{BR} + \text{BR} \times \delta_m - \delta_m) - \delta_m}{\text{BR} - 1 + \text{BR} \times \delta_m - \delta_v} \quad (2)$$

式中: δ_m 是空气分子体积线性退偏比,本文取值0.004 4(Andreas and Takuji, 2002);BR是后向散射比,是气溶胶后向散射系数 β_a 和空气分子后向散射系数 β_m 的比值(Chen et al., 2007): $\text{BR} = 1 + \beta_a/\beta_m$ 。

通常,沙尘气溶胶的体积线性退偏比大于0.2,且沙尘气溶胶的非球形特征越明显,产生的体积线性退偏比越大(毛毛和孙昊飞, 2020)。

1.4 主导型气溶胶的筛选

太阳光度计和激光雷达是区分气溶胶类型的重要遥感手段。前者基于大气柱气溶胶光学厚度、波长指数及其光谱特征可粗略实现气溶胶类型区分,根据气溶胶的光吸收和散射特性、粗细模态分数等参量可进一步精细化分类;后者主要基于气溶胶消光系数和退偏比两个光学变量获得气溶胶类型的垂直剖面,更先进的激光雷达系统还可以进一步根据后向散射系数比、激光雷达比、波长指数等实现精细化分类。气溶胶消光系数在垂直方向的积分可表示相应大气层的气溶胶光学厚度,气溶胶消光系数和光学厚度均与大气气溶胶载荷量成正比。根据AERONET(Aerosol Robotic Network)的气溶胶光学厚度和波长指数的聚类分析(Ma et al., 2017)发现,当光学厚度小于0.07时认定为清洁大气,而城市气溶胶/生物质燃烧、混合型气溶胶光学厚度的变化范围为0.07~2.00,沙尘的光学厚度主要为0.20~2.00,远大于清洁大气。同时,不同类型气溶胶因粒径差异使其对应的波长指数范围不同,人为污染物/生物质燃烧、混合型气溶胶和沙尘的波长指数依次为1.1~2.0、0.5~1.1和-0.5~0.5(Toledano et al., 2011),分别对应细颗粒主导型、混合型和粗颗粒主导型(Jin et al., 2010)。该分布特征与气溶胶的退偏比也存在较好的对应关系,Zhou等(2018)研究结果表明沙尘类别中光学厚度高值区所对应的气溶胶体积线性退偏比多高于0.30,而波长指数大于1.1时气溶胶体积线性退偏比几乎都小于0.10,且不同观测站点混合型气溶胶的体积线性退偏比变化范围会有不同。此外,Groß等(2011)基于多波段偏振激光雷达观测的聚类分析表明沙尘气溶胶退偏比在所有气溶胶类型中最大,沙尘与其他气溶胶的混合都会使退偏比减小,特别在532 nm波段差异最为明显。据此,可以确定清洁大气、生物质燃烧、人为污染物的退偏比小,沙尘气溶胶的退偏比大;清洁大气情景下消光系数很小,人为污染物的消光系数变化幅度大;沙尘事件发生时,光学厚度和消光系数均为高值。其中,混合型气溶胶并不能直观地从退偏比和消光系数中界定。另外,根据本文研究区域实际观测,激光雷达在强沙尘暴过程中体积线性退偏比和消光系数均很大,且激光束在沙尘层内被完全衰减,而一般沙尘事件不会出现激光束无法穿透沙尘层的情形。因此,按照表1对2009年10月1日至2012年11月30日期间的观测资料进行挑选,共选出9例清洁大气、45例人为污染事件和57例沙尘事件,其中沙尘事件中包含3例

强沙尘暴事件。

表1 主导气溶胶情景挑选依据

Tab. 1 Dominant aerosol type selection criteria

典型情形	是否穿透气溶胶层	体积线性退偏比	消光系数
清洁大气	是	小	小
人为污染	是	小	大
沙尘	是	大	大
强沙尘暴	否	大	大

1.5 阈值确定方法

根据上述不同气溶胶情景下消光系数和体积线性退偏比的特征差异,通过两个变量的概率密度分布进一步明确区分阈值。

(1)当密度分布为单峰型分布[图1(a)]时,采用三角法(Zack et al., 1977)确定阈值,即使用直方

图数据,基于纯几何方法寻找最佳阈值。它的成立条件是假设直方图最大波峰在灰度级更高一侧,然后通过三角形求得最大直线距离,最大直线距离对应的横坐标即为阈值。如图1(a)所示,连接波峰A和拟求阈值侧的最小值B,曲线右侧距离直线AB最大点的横坐标值T即为所求阈值。

(2)当密度分布为双峰型分布[图1(b)]时,可采用Prewitt(1966)提出的直方图双峰法,即如果直方图双峰明显,则选取两峰之间的谷底所对应的灰度级作为阈值。直方图双峰法虽然可以准确快速地找到阈值,但该方法不适用于双峰间差别很大或双峰间谷宽且平的情况[图1(c)],对于这种情况可通过波谷最小值把峰拆分为两个单峰,再分别采用三角法求取各自阈值。

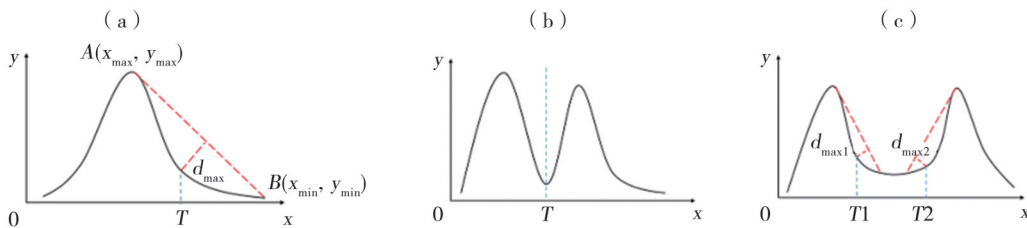


图1 阈值选择示意图

Fig. 1 Schematic diagram of threshold selection

2 结果与讨论

2.1 典型情景下体积线性退偏比阈值

强沙尘暴事件发生时,沙尘气溶胶浓度激增,其非球形特征更加突出,导致体积线性退偏比增大,因此,强沙尘暴事件的体积线性退偏比和普通沙尘事件有所不同。图2是强沙尘暴事件的体积线性退偏比和消光系数的频数分布和概率密度分布,频数分布的高值区对应概率密度的峰值,由于体积线性退偏比概率密度的两个峰值是对同一个频数高值区的反映,且两峰距离较近,此处按照单峰处理。由三角法可以得到区分强沙尘暴事件的体积线性退偏比阈值为0.35。

图3是沙尘事件、人为污染以及清洁天情景下体积线性退偏比和消光系数的频数分布及概率密度分布。消光系数概率密度分布的波谷对应的消光系数为 0.085 km^{-1} 。消光系数小于 0.085 km^{-1} 时,大气对激光能量的衰减作用弱,大气透明度高,基本不含人为污染物或沙尘气溶胶,可认为是清洁大气;当消光系数大于 0.085 km^{-1} 时,体积线性退偏比的分布有两个明显的频数高值区,利用三角法得到

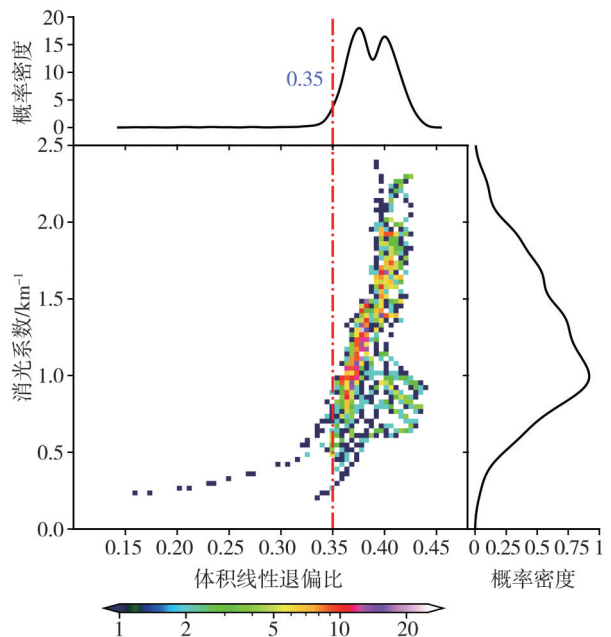


图2 强沙尘暴事件的体积线性退偏比和消光系数的频数分布及概率密度分布

Fig. 2 Frequency distribution and probability density distribution of volume linear depolarization ratio and extinction coefficient of severe sandstorm events

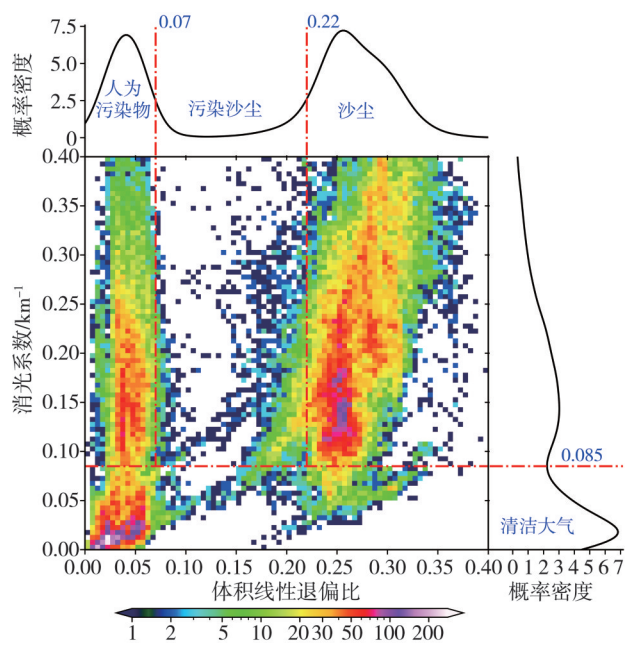


图3 清洁大气、人为污染和沙尘情形下体积线性退偏比和消光系数的频数分布及概率密度分布

Fig. 3 Frequency distribution and probability density distribution of volume linear depolarization ratio and extinction coefficient under the conditions of clean sky, air pollution and dust weathers

0.07和0.22两个阈值,分别对应区分人为污染物和沙尘事件的阈值,体积线性退偏比在0.07~0.22之间的部分,则认为是沙尘在传输途中与人为污染物混

合形成的污染沙尘,此时沙尘气溶胶非球形特征减弱,体积线性退偏比变小。

2.2 气溶胶退偏比阈值

根据公式(2)可以推断,当后向散射比(BR)趋近于1.0时,会导致气溶胶退偏比超出正常取值范围。以全天所有廓线均有发散且发散最显著的2009年12月9日气溶胶变化(图4)为例,该日气溶胶主要集中于1.0 km以下,1.0 km以下后向散射比较大,且相应的体积线性退偏比在0.10~0.15之间;而1.0 km以上高度后向散射比多为1.0~2.0,多数体积线性退偏比小于等于0.10。从图4(b)中的气溶胶退偏比可以看出,在相应的气溶胶层顶部出现大量高值,这主要是气溶胶层上空的大气比较洁净,导致计算得到的气溶胶退偏比大于合理取值范围。该日23:00(世界时)后向散射比、气溶胶退偏比及体积线性退偏比的垂直廓线[图4(d)]更加直观地反映出这种异常情形。对比后向散射比和体积线性退偏比两条廓线,约在0.5 km以上气溶胶退偏比开始快速增大。因此,为明确气溶胶退偏比的气溶胶类别判定阈值,首先对其进行数据质量控制。

图5是2009年10月1日至2012年11月30日共669 d数据绘制的气溶胶退偏比和后向散射比频数分布。选取后向散射比0.95分位数处的3.39作为气溶胶退偏比阈值,当气溶胶散射比趋近1.00时,

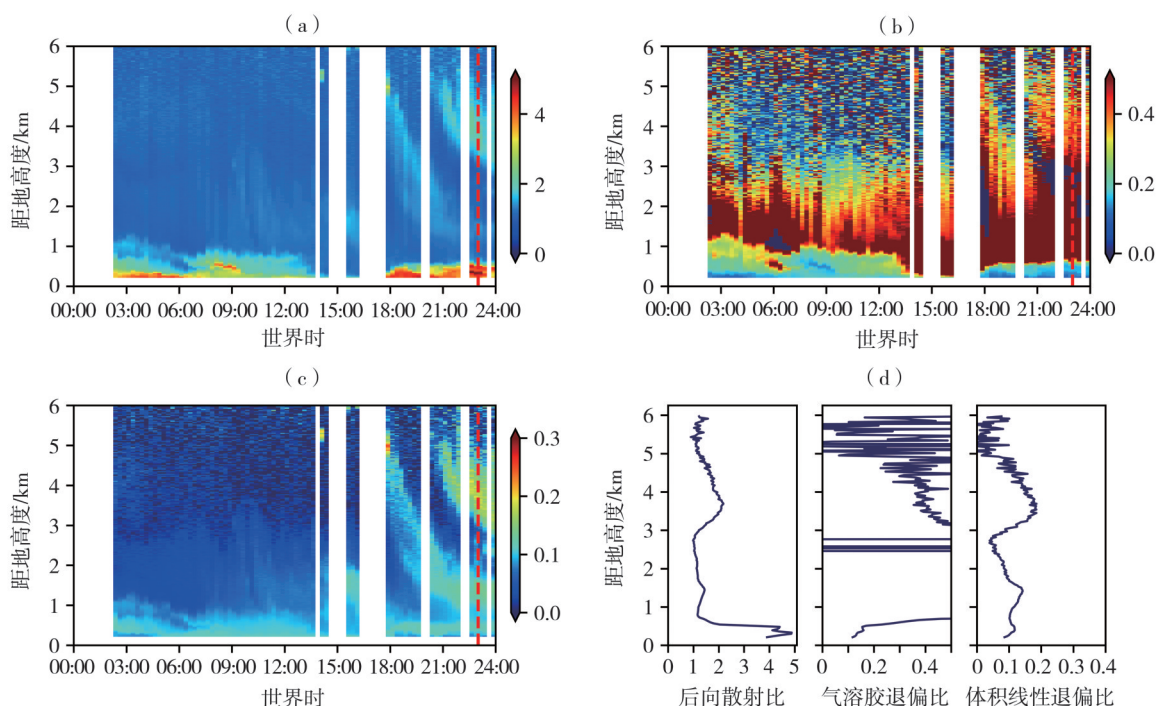


图4 2009年12月9日后向散射比(a)、气溶胶退偏比(b)、体积线性退偏比(c)的时间-高度剖面及23:00 UTC各变量廓线(d)
Fig. 4 Time-height cross sections of backscatter ratio (a), aerosol depolarization ratio (b) and volume linear depolarization ratio (c) and the profiles of each variable at 23:00 UTC (d) on 9 December 2009

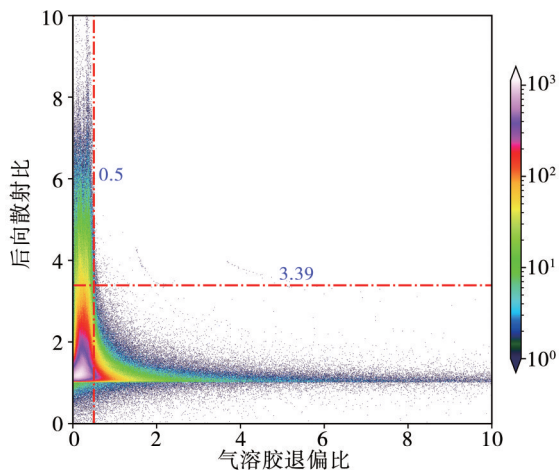


图5 2009年10月1日至2012年11月30日气溶胶退偏比和后向散射比的频数分布

Fig. 5 Frequency distribution of aerosol depolarization ratio and backscatter ratio from 1 October 2009 to 30 November 2012

气溶胶退偏比开始趋向急剧增加,即后向散射比越接近 1.00,气溶胶退偏比超出正常取值范围越多;后向散射比大于 3.39 时,99% 的气溶胶退偏比小于

0.50,回到合理取值区间。因此,为保证气溶胶退偏比阈值的可靠性,选择后向散射比大于 3.39 时的气溶胶退偏比进行数据分析。

图 6 是 2009 年 12 月 9 日后向散射比大于阈值 3.39 时后向散射比、气溶胶退偏比的时间-高度剖面 and 23:00 (世界时)的各变量廓线。可以看出,在对气溶胶退偏比进行控制后,符合条件的后向散射比数据都在 1.0 km 以下[图 6(a)];气溶胶退偏比同样也仅有 1.0 km 以下的数据符合条件,经控制后气溶胶退偏比均小于 0.50[图 6(c)]。控制气溶胶退偏比后,气溶胶退偏比廓线发散部分被消除[图 6(d)],对比图 4 有较大改善,气溶胶退偏比可信度提高明显。

在此基础上,进一步对整个研究时段涉及污染情形的体积线性退偏比和气溶胶退偏比进行相关性分析,确定不同情形下对应的气溶胶退偏比阈值(图 7)。可以看出,体积线性退偏比和气溶胶退偏比呈线性正相关,两者经线性拟合得到的关系式为

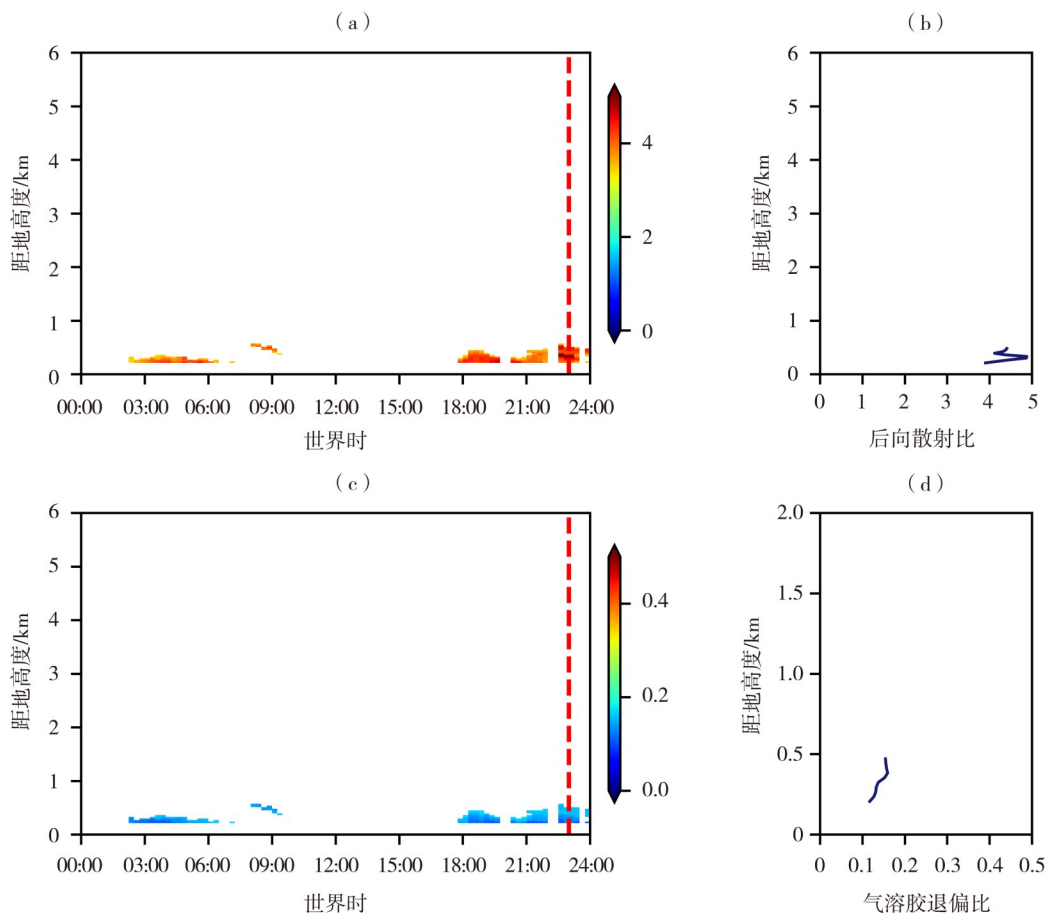


图6 2009年12月9日气溶胶退偏比控制后的后向散射比(a)、气溶胶退偏比(c)的时间-高度剖面及 23:00 UTC 后向散射比(b)与气溶胶退偏比(d)廓线

Fig. 6 Time-height cross sections of backscatter ratio (a) and aerosol depolarization ratio (c) after data control of aerosol depolarization ratio and profiles of backscatter ratio (b) and aerosol depolarization ratio (d) at 23:00 UTC on 9 December 2009

$\delta_a = 1.407 \times \delta_v - 0.002$, 根据已确定的体积线性退偏比阈值再结合线性关系式, 可得相应的气溶胶退偏比阈值(表2)。

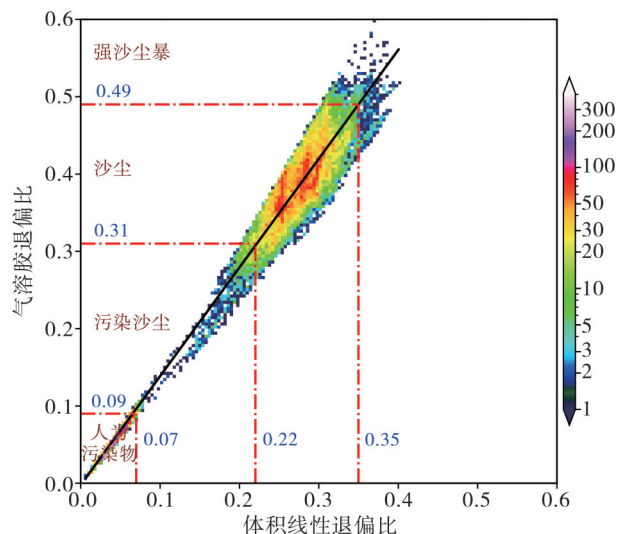


图7 4种典型情形下的体积线性退偏比和气溶胶退偏比频数分布及线性回归

Fig. 7 Frequency distribution and linear regression of volume linear depolarization ratio and aerosol depolarization ratio under four typical conditions

表2 气溶胶类别判定阈值

Tab. 2 Discrimination threshold of aerosol types

典型情形	消光系数/ km^{-1}	体积线性退偏比	气溶胶退偏比
清洁大气	<0.085	<0.07	<0.09
人为污染	>0.085	<0.07	<0.09
污染沙尘	>0.085	>0.07 且 <0.22	>0.09 且 <0.31
沙尘	>0.085	>0.22	>0.31
强沙尘暴	>0.085	>0.35	>0.49

Liu等(2008)通过分析无云条件下的CALIPSO(The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)观测资料发现,黑碳、硫酸盐等人为污染物的体积线性退偏比不会超过0.02,并用体积线性退偏比0.06来判定沙尘。Chen等(2007)通过台湾激光雷达2004—2005年观测资料统计发现沙尘的体积线性退偏比在0.06~0.30之间。Mamouri和Ansmann(2014)在POLIPHON(polarization-lidar photometer networking)算法中分别采用体积线性退偏比0.16和0.39判定细模态和粗模态沙尘,得到沙尘气溶胶的退偏比为0.31。Córdoba-Jabonero等(2018)在改进的POLIPHON算法中也采用气溶胶退偏比0.31来区分纯沙尘。本文结论与上述研究结果具有较好的一致性。

3 结论

利用兰州大学半干旱气候与环境观测站双波段偏振激光雷达于2009年10月至2012年11月的观测资料,通过对4种典型情形下气溶胶的激光雷达回波信号强度、体积线性退偏比、消光系数和气溶胶退偏比的分析,得到相应情形下的消光系数、体积线性退偏比和气溶胶退偏比的判定阈值。

该地区清洁大气的消光系数小于 0.085 km^{-1} 。在消光系数大于该阈值的污染情形下,人为污染物的体积线性退偏比小于0.07,气溶胶退偏比小于0.09;污染沙尘的体积线性退偏比介于0.07和0.22之间,气溶胶退偏比为0.09~0.31;纯沙尘的体积线性退偏比大于0.22,气溶胶退偏比大于0.31。当出现强沙尘暴时,其体积线性退偏比大于0.35,气溶胶退偏比大于0.49。

本研究给出的气溶胶类型判定阈值,尤其是结合观测经验给出了一般沙尘事件和沙尘暴事件的判断阈值,可为气溶胶辐射特性和气候变化评估提供技术支持,改善气候模式的参数化方案,提高模式预测的准确性。

参考文献:

- 毕鸿儒, 张越, 陈思宇, 等, 2022. 基于MIROC6模式探讨1850—2014年全球不同类型人为气溶胶的时空分布及辐射强迫[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 58(1): 111-117.
- 毛毛, 孙昊飞, 2020. 随机取向沙尘气溶胶激光雷达退偏比特性研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 12(2): 256-260.
- 任朝霞, 杨达源, 2007. 西北干旱区近50年气候变化特征与趋势[J]. 地球科学与环境学报, 29(1): 99-102.
- 姚玉璧, 肖国举, 王润元, 等, 2009. 近50年来西北半干旱区气候变化特征[J]. 干旱区地理, 32(2): 159-165.
- 尹宏, 韩志刚, 1989. 气溶胶大气对太阳辐射的吸收[J]. 气象学报, 47(1): 118-123.
- 周天, 黄忠伟, 黄建平, 等, 2013. 黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究[J]. 干旱气象, 31(3): 246-253.
- ANDREAS B, TAKUJI N, 2002. Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature [J]. Optics Express, 10(16): 805-817.
- BAARS H, SEIFERT P, ENGELMANN R, et al, 2017. Target categorization of aerosol and clouds by continuous multiwavelength-polarization lidar measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 10(9): 3175-3201.
- BOUCHER O, RANDALL D, ARTAXO P, et al, 2013. Cli-

- mate Change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]// Clouds and Aerosols. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- BURTON S P, FERRARE R A, HOSTETLER C A, et al, 2012. Aerosol classification using airborne high spectral resolution lidar measurements-methodology and examples [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(1): 73–98.
- CHEN W N, TSAI F J, CHOU C C K, et al, 2007. Optical properties of Asian dusts in the free atmosphere measured by Raman lidar at Taipei, Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 41(36): 7 698–7 714.
- CORDOBA-JABONERO C, SICARD M, ANSMANN A, et al, 2018. Separation of the optical and mass features of particle components in different aerosol mixtures by using POLIPHON retrievals in synergy with continuous polarized Micro-Pulse Lidar (P-MPL) measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8): 4 775–4 795.
- GROß S, TESCHE M, FREUDENTHALER V, et al, 2011. 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 Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 63(4): 706–724.
- HAN B, ZHOU T, ZHOU X, et al, 2022. A new algorithm of atmospheric boundary layer height determined from polarization lidar[J]. *Remote Sensing*, 14(21): 5 436–5 460.
- JIN Y, KAI K, SHIBATA T, et al, 2010. Validation of the dust layer structure over the Taklimakan Desert, China by the CALIOP space-borne lidar using ground-based lidar [J]. *Sola*, 6(36): 121–124.
- KE J, SUN Y, DONG C, et al, 2022. Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration [J]. *Photonix*, 3(1): 17–37.
- LIU D, WANG Z, LIU Z, et al, 2008. A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113, D16214. DOI:10.1029/2007JD009776.
- MA X, YU F, LUO G, 2012. Aerosol direct radiative forcing based on GEOS-Chem-APM and uncertainties [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(12): 5 563–5 581.
- MA Y, XIN J, MA Y, et al, 2017. Optical properties and source analysis of aerosols over a desert area in Dunhuang, Northwest China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(8): 1 017–1 026.
- MAMOURI R E, ANSMANN A, 2014. Fine and coarse dust separation with polarization lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(11): 3 717–3 735.
- MYLONAKI M, GIANNAKAKI E, PAPAYANNIS A, et al., 2021. Aerosol type classification analysis using EARLINET multiwavelength and depolarization lidar observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3): 2 211–2 227.
- OMAR A H, WINKER D M, KITAKA C, et al, 2009. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(10): 1 994–2 014.
- PAN X, UNO I, WANG Z, et al, 2017. Real-time observational evidence of changing Asian dust morphology with the mixing of heavy anthropogenic pollution [J]. *Scientific Reports*, 7(1): 335–343.
- PREWITT J M S, MENDELSON M L, 1966. The analysis of cell images [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 128(3): 1 035–1 053.
- QI S, HUANG Z, MA X, et al, 2021. Classification of atmospheric aerosols and clouds by use of dual-polarization lidar measurements [J]. *Optics Express*, 29(15): 23 461–23 476.
- RAMASWAMY V, BOUCHER O, HAIGH J, et al, 2001. TAR Climate Change 2001: The Scientific Basis [C]//Radiative Forcing of Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 353–405.
- SHIMIZU A, SUGIMOTO N, MATSUI I, et al, 2004. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109, D19S17. DOI:10.1029/2002JD003253.
- SUGIMOTO N, NISHIZAWA T, SHIMIZU A, et al, 2011. Aerosol classification retrieval algorithms for EARTHCARE/ATLID, CALIPSO/CALIOP, and ground-based lidars [C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada: IEEE, 4 111–4 114. DOI: 10.1109/igarss.2011.6050137.
- TOLEDANO C, WIEGNER M, GROSS S, et al, 2011. Optical properties of aerosol mixtures derived from sun-sky radiometry during SAMUM-2 [J]. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 63(4): 635–648.
- ZACK G W, ROGERS W E, LATT S A, 1977. Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency [J]. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 25(7): 741–753.
- ZHANG Z, HUANG J, CHEN B, et al, 2019. Three-year continuous observation of pure and polluted dust aerosols over northwest China using the ground-based lidar and sun photometer data [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 124(2): 1 118–1 131.
- ZHOU T, XIE H, BI J, et al, 2018. Lidar measurements of

dust aerosols during Three Field Campaigns in 2010, 2011 and 2012 over Northwestern China [J]. *Atmosphere*, 9 (5): 173–193.
ZHOU T, XIE H L, JIANG T, et al, 2021. Seasonal character-

istics of aerosol vertical structure and autumn enhancement of non-spherical particle over the semi-arid region of northwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 244, 117912. DOI:10.1016/j.atmosenv.2020.117912.

Aerosol types discrimination in semi-arid region of Northwest China using ground-based lidar data

LIAO Jiayan, ZHOU Tian, HAN Biseng, HUANG Zhongwei, BI Jianrong

(*College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Semi-arid Climate Change, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The accurate identification of aerosol types is an important prerequisite for further research on its climatic and environmental effects. In this study, based on the observation data of ground-based dual-wavelength polarization lidar from the Semi-arid Climate and Environment Observation Station of Lanzhou University from October 2009 to November 2012, several cases were selected under four typical scenarios: clean day, anthropogenic pollutants, dust events and strong sandstorm events. The aerosol extinction coefficient, volume linear depolarization ratio and aerosol depolarization ratio were analyzed statistically, and the determination thresholds of different aerosol types were defined. The results show that the extinction coefficient of aerosol in this region is less than 0.085 km^{-1} on clean day. When the extinction coefficient is greater than 0.085 km^{-1} , the volume linear depolarization ratio of anthropogenic pollutants is less than 0.07, and the corresponding aerosol depolarization ratio is less than 0.09. The volume linear depolarization ratio of polluted dust is between 0.07 and 0.22, and the aerosol depolarization ratio is between 0.09 and 0.31. The volume linear depolarization ratio of pure dust is greater than 0.22, and the aerosol depolarization ratio is greater than 0.31. In particular, when severe sandstorms occur, the volume linear depolarization ratio is greater than 0.35, and the aerosol depolarization ratio is greater than 0.49.

Key words: ground-based polarization lidar; aerosol type; semi-arid region

(责任编辑:王涓力;校对:蔡迪花)