

基于 CALIPSO 卫星的不同天气类型下气溶胶垂直分布特征对比研究

陈晓磊, 金莲姬

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044

摘要 基于 CALIPSO 卫星激光雷达数据, 以卫星过境路线上 $33.5^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 之间的区域为研究对象, 对在清洁天气、霾、沙尘和烟花爆竹燃放污染天气下的气溶胶垂直分布特征进行了对比分析。研究表明: 清洁天气时高空以大陆清洁型气溶胶为主; 霾天时以大陆污染型气溶胶为主, 其消光与后向散射能力强, 粒子球形度较高且粒径较小; 沙尘时气溶胶垂直分布广, 近地面到高空范围内沙尘型气溶胶占主导, 非球形度高且粒径较大; 烟花爆竹燃放时主要产生集中在中低空的细粒子污染, 以大陆污染型和污染沙尘型气溶胶为主。不同污染类型下气溶胶垂直分布特征各不相同, 将 CALIPSO 卫星激光雷达数据与气象要素、Hysplit 模型结合可用于对污染类型进行判别。

关键词 大气光学; CALIPSO; 气溶胶; 垂直分布; 光学参数

中图分类号 P407.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020101

Vertical Distribution Characteristics of Aerosols in Different Weathers Based on CALIPSO Satellite

Chen Xiaolei, Jin Lianji

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, CMA Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Aiming at the region of $33.5^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ on the satellite transit route, we compare the aerosol vertical distribution characteristics during clean period, haze, dust, and pollution caused by fireworks based on CALIPSO satellite laser radar data. The results show that, in the sunny day, most of aerosols are clean continental aerosols at high altitude; in haze, most of aerosols are polluted continental aerosols whose backscatter and extinction are strong, and most of aerosol particles are spherical particles with small diameters; in dust, aerosols have a wide vertical distribution from the ground to the high altitude, and most of aerosol particles are non-spherical particles with big sizes; in pollution caused by fireworks, aerosol particles are the small size particles at low altitude, whose types are the polluted continental aerosol and the polluted dust aerosol. It is concluded that the vertical distributions of aerosol under different population types are different. We can use CALIPSO satellite laser radar data, together with meteorological element and HYSPLIT model to characterize the category of the atmospheric aerosol.

Key words atmospheric optics; CALIPSO; aerosol; vertical distribution; optical parameters

OCIS codes 010.1110; 010.3640; 280.1100

收稿日期: 2017-07-27; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFA0602003)

作者简介: 陈晓磊(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事气溶胶方面的研究。E-mail: 1739136658@qq.com

导师简介: 金莲姬(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要从事大气物理与大气环境方面的研究。E-mail: jlj@nuist.edu.cn

1 引言

气溶胶的各项光学参数如消光系数、后向散射系数等的垂直分布特征会影响不同高度的大气辐射特征,进而影响大气的稳定性^[1]。对气溶胶特性的遥感研究主要集中在整层大气观测上,无法得到不同高度上的垂直分布特征,而激光雷达的出现很好地解决了这一问题。目前,国内外学者对气溶胶垂直分布的研究已经开展了许多工作,Amiridis 等^[2]对比分析了雅典地区地面激光雷达与星载激光雷达相匹配的观测数据,得出 3~10 km 的海拔高度内两者同步测量结果的平均偏差; Generoso 等^[3]基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)和星载云-气溶胶激光雷达(CALIPSO)数据分析了从撒哈拉沙漠到美国东海岸夏冬季两次具有代表性的沙尘运输事件;伯广宇等^[4]提出一种利用激光雷达反演气溶胶消光吸湿增长因子的新方法;赵一鸣等^[5]通过 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶后向散射去偏振度进行研究,得出气溶胶的组成成分、光学性质及分布高度等信息;祝存兄等^[6]以微脉冲激光雷达数据为基础,对南京地区气溶胶消光系数和退偏比廓线进行了分析;赵虎等^[7]研制出了一台多波长的激光雷达,能够全天候地对对流层气溶胶的光学特性和微物理特性进行探测。地基激光雷达存在只能单点观测,且受天气状况影响较大的缺点,而星载激光雷达以其探测范围广、探测时间连续、不受天气状况变化影响、较高的分辨率和精度等优点,在全球大气气溶胶垂直分布特征探测中被广泛应用^[8]。以 CALIPSO 星载激光雷达数据为基础,对 4 种不同天气类型下气溶胶光学特征的垂直分布进行对比研究,得出其相同和差异之处,以对不同污染天气类型进行判别和研究。

2 数据与方法

所用的数据来自 CALIPSO 卫星搭载的正交极化云-气溶胶激光雷达(CALIOP),其主动发射的激光与大气气溶胶、水汽或云等成分经过散射、反射、消光等一系列相互作用,最终以雷达信号的形式返回卫星,从而得到后向散射系数、消光系数、体积退偏比、色比等不同的光学参数值。所使用的资料为 Level1B 剖面产品数据、Level2 气溶胶廓线产品数据和气溶胶类型(VFM)分类数据。其中,Level1B 数据产品主要包括了 532 nm 和 1064 nm 通道的总衰减后向散射剖面数据、温湿度、风速风向、气压等不同高度气象数据以及各种地理位置辅助数据;Level2 廓线产品数据主要包括云或气溶胶的后向

散射系数、消光系数以及偏振比、色比等光学参数的垂直廓线信息;Level2 VFM 产品主要是以 Level1 和 Level2 数据信息为基础,应用云-气溶胶分类识别算法与气溶胶层分类算法^[9-10],对卫星接收回的雷达信号进行判别,从而推断出垂直方向上不同高度的气溶胶类型。大陆型气溶胶分类标准为:当气溶胶的体积退偏比大于 0.2 时,判断气溶胶为沙尘型;当气溶胶体积退偏比为 0.075~0.2 时,认为气溶胶为污染沙尘型;当体积退偏比小于 0.075 时,需要依据 532 nm 后向散射系数大小再分类,小于 0.0005 时判定为大陆清洁型气溶胶,而大于 0.0005 时判定为大陆污染型气溶胶。

另外,依据 Liu 等^[11]的定义,以体积退偏比为 0.06 作为阈值来区分气溶胶粒子的球形化程度,退偏比大于 0.06 的为球形气溶胶,反之为非球形气溶胶。判别气溶胶粒径大小的依据是:色比值大于 0.5 的气溶胶定义为粗粒子,小于 0.5 的为细粒子。

研究区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 每小时质量浓度(ρ)数据的来源为环保部环境监测总站空气质量实时发布系统,下载自青悦开放环境数据中心;每三小时大气能见度数据来源于国家自然科学基金委员会地球科学部南京信息工程大气资料服务中心。此外,以 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)后向轨迹模式来分析不同高度上污染物的可能来源,从而对污染过程的形成原因进行探讨。HYSPLIT 后向轨迹模式包含不同的气象输入场、物理过程和多种类型的污染排放源,是一种常用于追踪气流或气团所夹带的粒子或气体等污染物移动方向的模式,可应用于区域性污染过程的分析^[12]。

3 结果与分析

分别选择清洁天气、霾天、沙尘天气与一次烟花爆竹燃烧导致的污染天气,以卫星过境路线上 33.5°N~34.5°N 的地区为研究区域。对星载激光雷达观测所得的各光学参数垂直分布特征进行分析,卫星过境轨迹图如图 1 所示,其中红色方框为研究区域;不同类型天气个例的 PM₁₀、PM_{2.5} 及能见度变化如图 2 所示;气溶胶消光系数廓线图如图 3 所示;气溶胶后向散射系数分布图如图 4 所示。

2014 年 10 月 1 日,研究区域空气质量为良,卫星过境前后 PM₁₀ 质量浓度低于 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,大气能见度大于 15 km,为较清洁且无云天气。由图 3(a)可知,整个大气层内气溶胶消光系数不超过

0.2 km⁻¹,近地面和0.6 km 高度处消光系数最大, 分别达到约 0.175 km⁻¹和 0.185 km⁻¹,接近 1.2 km 高度处气溶胶消光系数减小为 0。由图 4(a)可见, 整个气溶胶层的后向散射系数不超过 0.004 km⁻¹·sr⁻¹。

2014 年 1 月 25 日为霾天气。卫星过境时刻前后大气能见度不足 6 km,PM10 质量浓度约为 170 μg·m⁻³,PM2.5 质量浓度约为 115 μg·m⁻³,空

气质量为中度污染。从图 3(b)可以看出强污染区域主要在 2 km 以下,尤其是近地面的气溶胶消光系数很大,超过 5 km⁻¹,是清洁天气的 25 倍以上,消光系数随高度的增加而减小,当高度约为 2 km,消光系数降为 0,高空再无明显的气溶胶层。图 4 (b)表明 2 km 以下高度层气溶胶后向散射系数很大,有的甚至超过 0.006 km⁻¹·sr⁻¹,说明污染十分严重。

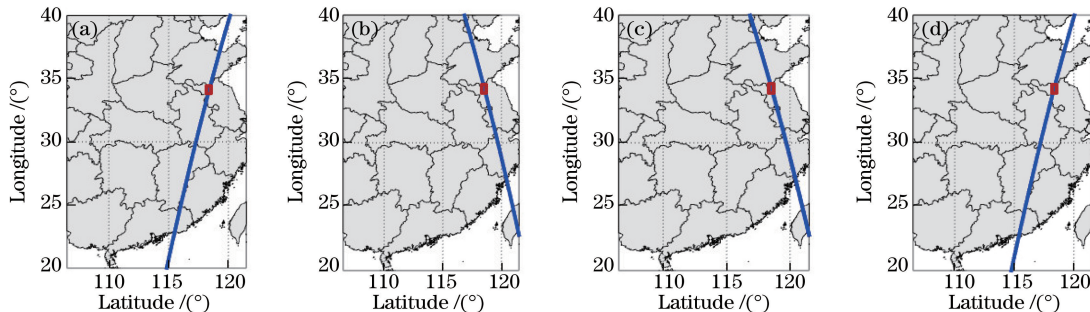


图 1 卫星过境轨迹图。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘;(d)烟花爆竹燃放

Fig. 1 Transit trajectory of satellite. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust; (d) fireworks

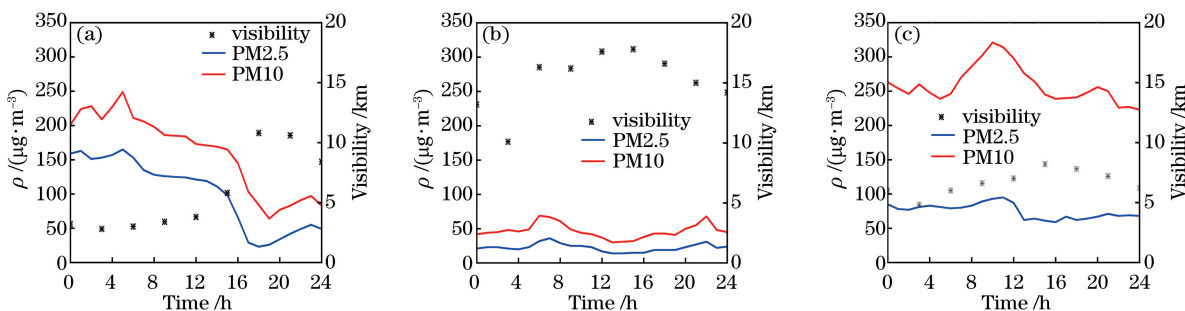


图 2 不同类型天气个例的 PM10、PM2.5 及能见度。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘

Fig. 2 PM10, PM2.5 and visibility in different weathers. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust;

2014 年 5 月 26 日为沙尘过境天气。卫星过境时刻前后大气能见度不足 8 km,PM10 质量浓度超过 250 μg·m⁻³。由图 3(c)可见,沙尘时整个气溶胶层的

消光系数维持在 0.1~0.4 km⁻¹,整体变化很小。由图 4(c)可见,0~2 km 高度范围内的气溶胶后向散射系数为 0.02 ~0.05 km⁻¹·sr⁻¹,污染较为严重。

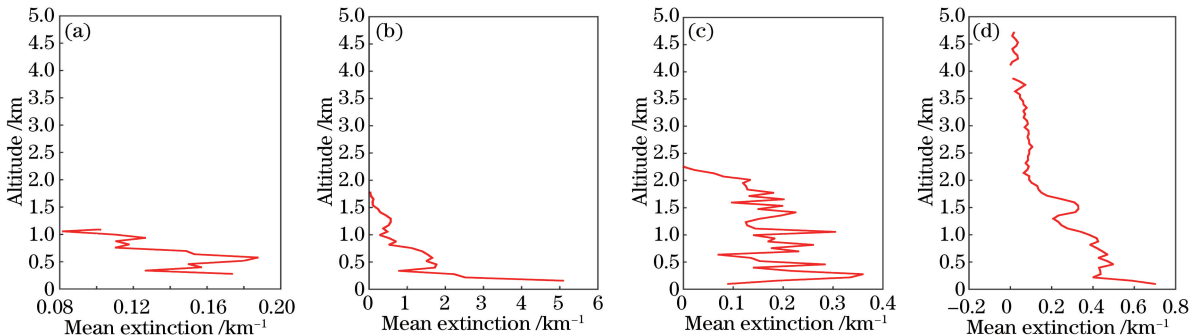


图 3 气溶胶消光系数廓线图。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘;(d)烟花爆竹燃放

Fig. 3 Profiles of extinction coefficient of aerosol. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust; (d) fireworks

2011 年 2 月 3 日为烟花爆竹燃放污染天气,卫星过境时间正值春节期间的农历初一凌晨。由图 3(d)

可见,烟花爆竹燃放污染期,1 km 以下的气溶胶消光系数较大,尤其是近地面约 200m 高度处,消光系数

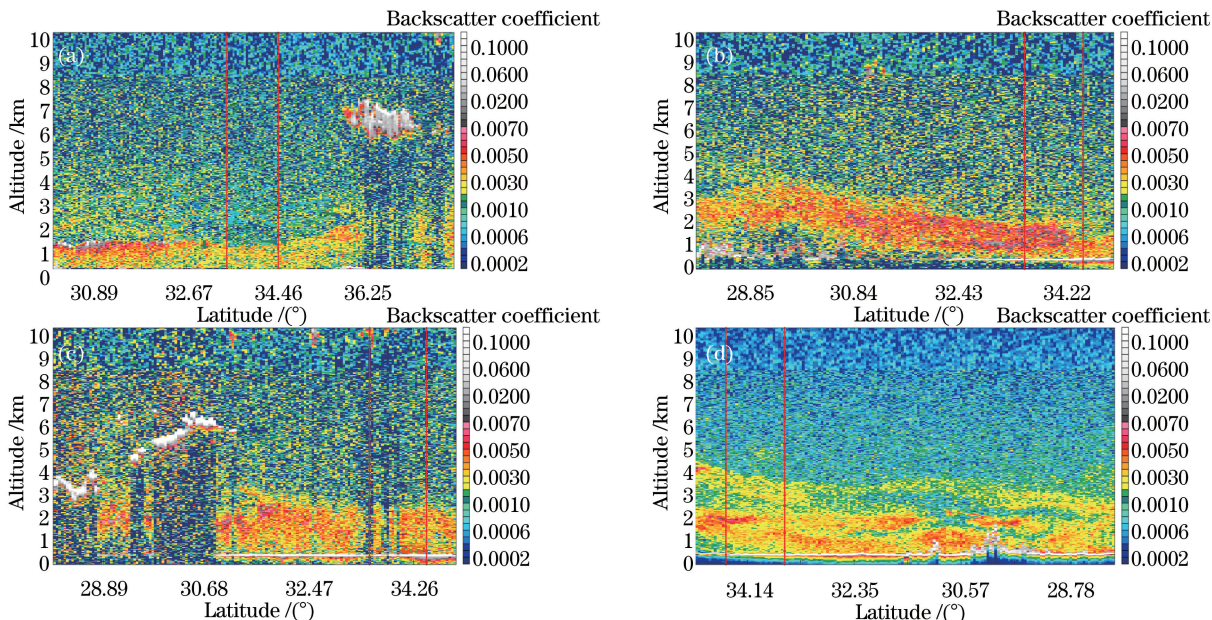


图 4 气溶胶后向散射系数分布图。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘;(d)烟花爆竹燃放

Fig. 4 Distribution of backscatter coefficient of aerosol. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust; (d) fireworks

高达 0.7 km^{-1} , 这可能是由烟花爆竹燃放导致的。由图 4(d)可知, $0\sim 2 \text{ km}$ 高度范围内大气后向散射系数较大, $2\sim 4 \text{ km}$ 高度范围内后向散射系数变小, 4 km 以上较为洁净, 这与消光系数廓线较为一致。

对比三种不同污染天气的气溶胶消光系数与后向散射系数, 发现烟花爆竹燃放时期的气溶胶消光和后向散射系数的高度分布与烟花爆竹燃放高度有关, 烟花燃放的高度上的气溶胶消光和后向散射系数更大; 而霾天近地面气溶胶消光和后向散射系数更大, 其消光系数是沙尘时期消光系数的 10 倍以上, 是清洁天气消光系数的 20 倍以上; 而沙尘天时高层气溶胶消光和后向散射系数更大, 这是由污染

源高度不同导致的。

接下来, 对 4 种不同天气类型下气溶胶在不同高度上的退偏比和色比分布频率进行分析, 得到不同高度气溶胶体积退偏比频率分布图和不同高度气溶胶色比频率分布图分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 可见, 清洁天气时, 球形粒子气溶胶约占 $20\%\sim 35\%$, 其余均为非球形粒子; 由图 6 可见, 细粒子约占 $50\%\sim 65\%$, 其余均为粗粒子。非球形粗粒子可能来源于地面和建筑用地扬尘, 而球形细粒子可能是由汽车尾气和工业废气等经过一系列反应形成的。

与清洁天气相比, 霾天时大多数气溶胶的球形程度高且粒径小, 从而大大削弱了大气消光, 造成能见

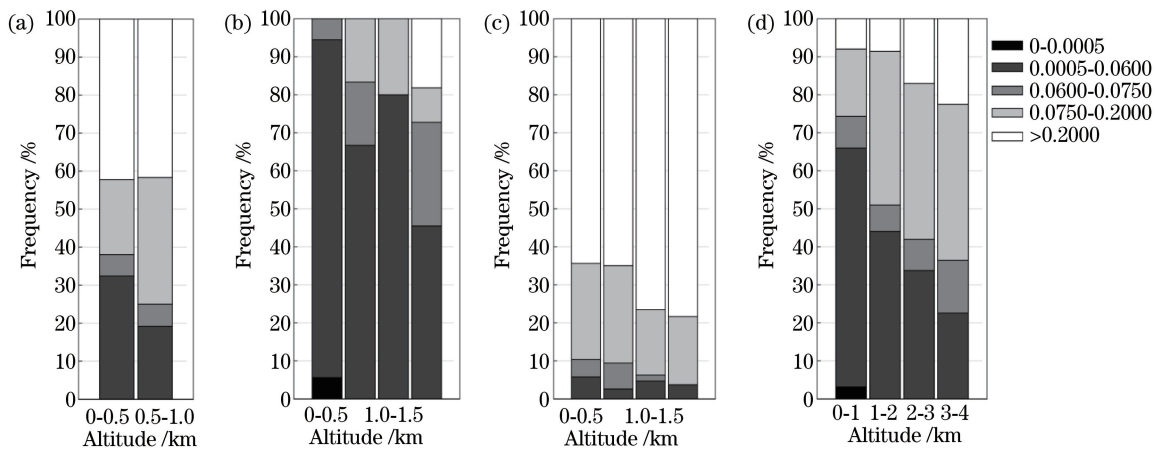


图 5 不同高度气溶胶体积退偏比频率分布图。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘;(d)烟花爆竹燃放

Fig. 5 Volume depolarization ratio frequency distribution of aerosols at different altitudes. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust; (d) fireworks

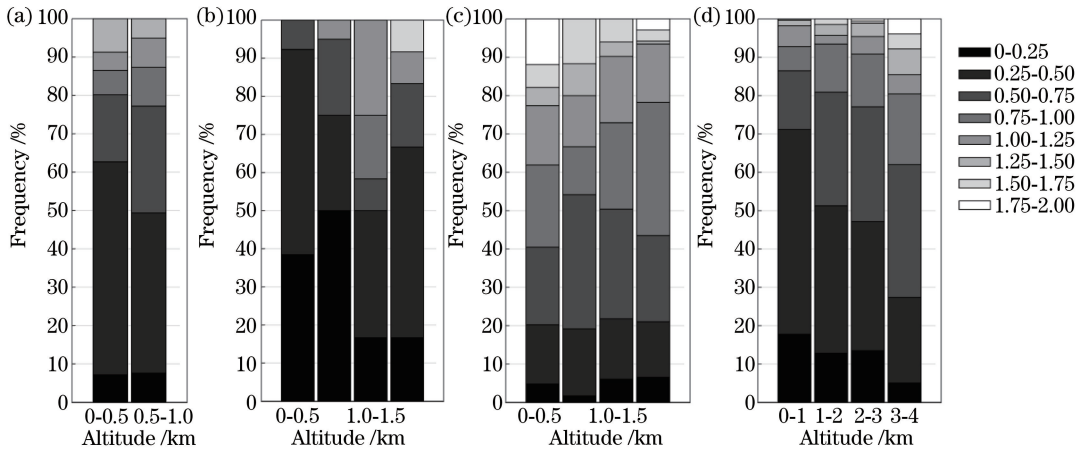


图 6 不同高度气溶胶色比频率分布图。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘;(d)烟花爆竹燃放

Fig. 6 Color ratio frequency distribution at different altitudes. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust; (d) fireworks

度的下降。退偏比和色比的频率分布图均显示,霾天时 0.5 km 以下球形细粒子约占 90% 以上,且随着高度的增加,球形粒子占比逐渐减小,但依然以球形细粒子为主导。

沙尘天气时整层大气都以非球形粗粒子为主,整个大气层球形度高的粒子均小于 10%,其余均为球形度较低的粒子,退偏比大于 0.2 的非球形粒子占比达到 65% 以上。同时,色比频率分布图显示各高度层的细粒子占比也较小,且各个高度层内粗细粒子占比变化不大,色比大于 1.5 的气溶胶粒子在近地面占比最大,这可能是由重力作用导致的。退偏比和色比的频率分布均很好地反映了沙尘气溶胶

的光学特性。

烟花爆竹燃放时期,在近地面 1 km 以下,球形粒子约占 65%,细粒子约占 70%,由于烟花爆竹燃放高度一般不超过 300 m,因此球形细粒子的重要来源为烟花爆竹的燃放。随高度的增加,非球形粗粒子占比逐渐增大。高空 3~4 km 范围内球形粒子占比仅为 20%,细粒子占比不到 30%,高空非球形粗粒子气溶胶占比明显增多,可能来自外来源输送。

根据气溶胶类型判断依据,对 4 种不同天气下的气溶胶进行分类,同时结合 48 h 后向轨迹分析气溶胶来源。图 7、8 分别为不同天气时气溶胶类型分布图和后向轨迹图。由图可见,清洁天气时的近地

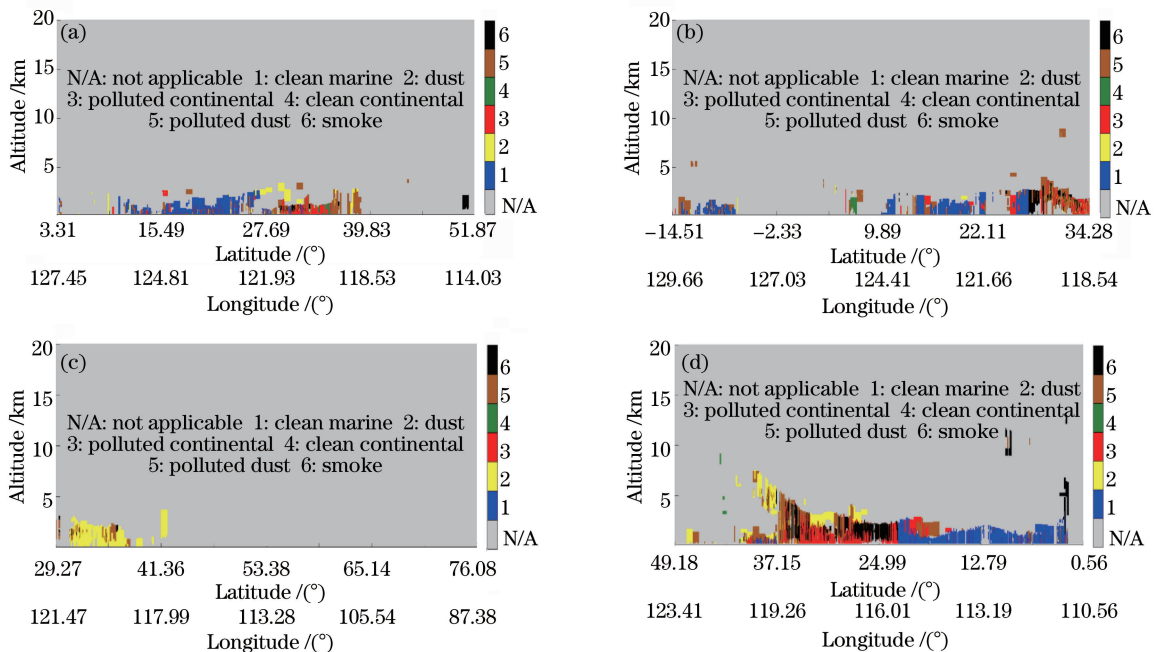


图 7 气溶胶类型分布图。(a)清洁天气;(b)霾;(c)沙尘;(d)烟花爆竹燃放

Fig. 7 Distribution of aerosol types. (a) Fine day; (b) haze; (c) dust; (d) fireworks

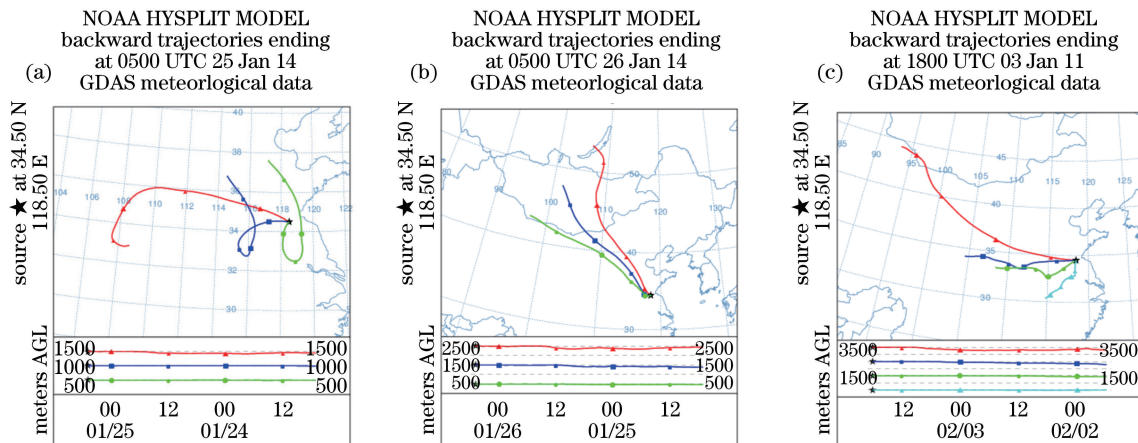


图 8 48 h 后向轨迹图。(a) 霾; (b) 沙尘; (c) 烟花爆竹燃放

Fig. 8 48 h HYSPPLIT back trajectory. (a) Haze; (b) dust; (c) fireworks

面依然会有污染型气溶胶的集聚,以大陆污染型气溶胶为主导,夹杂少许污染型沙尘气溶胶,这可能是由地面及工业扬尘、汽车尾气和工业废气排放等导致,而较高高度上的气溶胶以大陆清洁型为主。霾天气气溶胶类型以大陆污染型为主,夹带少许污染沙尘型气溶胶和沙尘型气溶胶,由后向轨迹分析可知,污染气团主要来源于周边城市,因此霾污染的主要成因为本地和周边污染源的排放集聚。沙尘天气时以沙尘气溶胶为主导,夹杂少许污染型沙尘气溶胶,由后向轨迹分析可知,由蒙古国和贝加尔湖地区出发,途径我国西北地区和内蒙古地区所携带的沙尘的远距离输送是此次沙尘污染的主要成因。烟花爆竹燃放时期低层气溶胶主要为大陆污染型,而高空以污染沙尘型气溶胶为主,后向轨迹分析显示低层气团来源于周边城市,而高空气团为从西北地区远距离输送而来的沙尘型气溶胶。

综上所述:不同天气类型下气溶胶在不同高度上的退偏比和色比差异较大。文中烟花爆竹燃放时低层气溶胶与霾时较为接近,均以球形细粒子的大陆污染型气溶胶为主,污染源多以本地源为主;而烟花爆竹燃放时和沙尘时高层气溶胶均以非球形粗粒子的沙尘型或污染型沙尘气溶胶为主,这是由远距离沙尘输送引起的。在对烟花爆竹燃放时和霾时的气溶胶进行判别时,可依据消光系数进行区分,霾是一次排放污染物经过一系列化学反应生成的二次气溶胶,且空气中水汽的作用促使气溶胶吸湿老化,使得球形细粒子增加,共同对气溶胶消光作用产生影响;而烟花爆竹燃放为污染物直接排放,从而对气溶胶消光作用产生影响。

4 结 论

以 CALIPSO 卫星激光雷达数据为基础,通过对

4 种不同天气类型下气溶胶光学参数的廓线图、剖面图、频率分布图等进行分析比对,得出消光系数、后向散射系数、体积退偏比和色比的差异及原因,并依此对气溶胶类型进行分类。结果表明,不同污染天气类型下气溶胶消光系数差异较大,其中霾时近地面的消光系数很大,文中霾时气溶胶消光系数达到其他污染天气类型时气溶胶消光系数的 7 倍以上,也反映了细粒子的消光能力大于粗粒子的消光能力。不同污染天气类型的气溶胶垂直分布与其污染源的高度分布有紧密的联系。一种天气类型下的污染常常由不同气溶胶类型组成,不同高度上气溶胶的光学参数各有变化,污染源也不尽相同。不同类型天气状况下气溶胶的主导类型各不相同,文中沙尘天气时以球形度较低且粒径尺寸较大的沙尘型气溶胶为主,霾和烟花爆竹燃放等污染天气时以球形度高且粒径小的大陆污染型气溶胶为主,晴天时空以后向散射系数小的大陆清洁型气溶胶为主。可以据此并结合后向轨迹分析等对天气状况进行判别及成因分析。不同天气类型下的气溶胶垂直分布差异较大,而 CALIPSO 星载激光雷达数据可以很好地对其进行观测和分析。

参 考 文 献

- [1] Johnson B T, Heese B, McFarlane S A, *et al.* Vertical distribution and radiative effects of mineral dust and biomass burning aerosol over West Africa during DABEX[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D23): D00C12.
- [2] Amiridis V, Papayannis A D, Mamouri R E. Validation of CALIPSO space-borne-derived attenuated backscatter coefficient profiles using a ground-based lidar in Athens, Greece[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009,

- 2(2): 513-522.
- [3] Generoso S, Bey I, Labonne M, *et al.* Aerosol vertical distribution in dust outflow over the Atlantic: comparisons between GEOS-Chem and Cloud-aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D24): D24209.
- [4] Bo G Y, Li A Y, Xu C D. Remote sensing aerosol extinction hygroscopic growth factor and its wavelength dependence using lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601003.
伯广宇, 李爱悦, 徐赤东. 激光雷达遥感地表气溶胶消光吸湿因子及其对波长的依赖特性 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601003.
- [5] Zhao Y M, Jiang Y S, Zhang X G, *et al.* Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 2943-2951.
赵一鸣, 江月松, 张绪国, 等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究 [J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 2943-2951.
- [6] Zhu C X, Cao N W, Yang F K, *et al.* Micro pulse lidar observations of aerosols in Nanjing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 050101.
祝存兄, 曹念文, 杨丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(5): 050101.
- [7] Zhao H, Hua D X, Di H G, *et al.* Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0113001.
赵虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析 [J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113001.
- [8] Liu G, Shi W Z, You R. Cloud-aerosol lidar of America [J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17(1): 78-84.
刘刚, 史伟哲, 尤睿. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述 [J]. *航天器工程*, 2008, 17(1): 78-84.
- [9] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, *et al.* Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [10] Winker D, Vaughan M, Hunt B. The CALIPSO mission and initial results from CALIOP [J]. *SPIE*, 2006, 6409: 640902.
- [11] Liu Z, Liu D, Huang J, *et al.* Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(16): 5045-5060.
- [12] Draxler R, Stunder B, Rolph G, *et al.* HYSPLIT4 user's guide (version 4. 9) [OL]. [2017-07-27] <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>, 2009.