

CALIOP 激光探测的运城地区气溶胶垂直分布特征

杨倩¹, 韩琛惠², 米晓楠^{1*}, 王潇³, 王晓琼¹, 赵永强¹, 杨超¹¹山西省气候中心, 山西 太原 030002;²山西省气象服务中心, 山西 太原 030002;³西安地球环境创新研究院, 陕西 西安 710061

摘要 利用 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日山西省运城地区 9 个气象站点的地面逐小时资料、地面日值资料和 CALIOP 激光雷达资料, 分别对运城地区霾日和晴日的气溶胶垂直分布特征进行分析。结果表明: 运城地区霾发生时, 气溶胶主要聚集在 0~2 km 高度的大气层中, 尤其是 517 m 左右的大气中, 气溶胶的最大消光系数为 0.61 km^{-1} ; 0~1 km 高度内, 霾日最大消光系数约为晴日最大消光系数的 3 倍; 白天与夜间气溶胶垂直分布有明显差别, 在气溶胶消光系数相同的情况下, 白天气溶胶所在的高度比夜间高; 霾发生时, 气溶胶体积退偏比集中在 0~0.2; 晴日近地面体积退偏比在 0~0.2 的分布频率低于霾日, 小粒径气溶胶数量多于大粒径气溶胶数量。

关键词 遥感; 气溶胶; 光学特性; 垂直分布; 消光系数

中图分类号 X513

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0228004

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution in Yuncheng Area Based on CALIOP

Yang Qian¹, Han Chenhui², Mi Xiaonan^{1*}, Wang Xiao³, Wang Xiaoqiong¹,
Zhao Yongqiang¹, Yang Chao¹¹Shanxi Climate Center, Taiyuan, Shanxi 030002, China;²Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan, Shanxi 030002, China;³Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an, Shaanxi 710061, China

Abstract Ground hourly, daily, and CALIOP data from nine meteorological stations in the Yuncheng area of Shanxi Province from January 1, 2017 to December 31, 2019 were used to analyze the vertical aerosol distribution characteristics on haze and clear days. The results showed that aerosols were mainly concentrated in the atmosphere layer of 0~2 km on haze days, especially the layer of approximately 0.517 km, and the maximum aerosol extinction coefficient was 0.61 km^{-1} . Within 0~1 km, on haze days, the maximum extinction coefficient was approximately three times greater than that on clear days. There was a significant difference in the vertical distributions of aerosols during the day and night. When the aerosol extinction coefficient was the same, the aerosol height was higher during the day than that at night. When haze events happened, volume depolarization ratios of aerosols concentrated in 0~0.2. On clear days, the frequency of near-surface volume depolarization ratios ranged from 0 to 0.2, which was lower than that on haze days, and the number of small-particle aerosols was greater than that of large-particle aerosols.

Key words remote sensing; aerosol; optical properties; vertical distribution; extinction coefficient

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-01-07; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 山西省气象局重点课题(SXKZDQH201510009)

通信作者: bigrice12345@126.com

1 引言

随着我国城市化和工业化的进程加快,汾渭平原的大气环境形势日益严峻。运城作为汾渭平原的重要城市之一,近年来污染问题比较严重。大气气溶胶不仅影响交通安全,威胁人们的身心健康,还通过对太阳辐射的吸收和散射影响地气系统的能量平衡^[1-4];此外,气溶胶的垂直分布通过影响不同高度层的云相态,间接影响地球的辐射收支和全球水循环系统^[5]。

目前针对大气气溶胶的监测,主要有地基观测和卫星监测两大类。地基观测精度较高,但站点稀疏且成本高昂,而卫星遥感监测可以获得大范围的数据,弥补了地基观测难以反映气溶胶空间分布的不足,尤其是在资源匮乏的地区。针对气溶胶分布特征,国内外开展了不少研究,但多是关于时空分布方面,如孙灏等^[6]结合暗像元算法和深蓝算法,对中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的 L1B 数据进行气溶胶光学厚度遥感反演,揭示了京津冀地区冬季气溶胶光学厚度的空间分布特征。陈辉等^[7]基于高分五号卫星的多角度偏振相机数据,对京津冀及周边地区的气溶胶光学厚度进行遥感反演,证实了高分五号卫星可用于大气气溶胶反演。

美国 NASA 和法国 CNES 联合研制的云-气溶胶激光雷达和红外探测卫星(cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations, CALIPSO)的出现,不仅弥补了地基观测的不足,还可以获得气溶胶的垂直分布数据。CALIPSO 搭载的带偏振的云-气溶胶激光雷达(cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization, CALIOP)可用来探测全球范围内气溶胶的垂直分布情况^[8]。于彩霞等^[9]基于 CALIOP 观测数据,对合肥地区晴日和霾日的气溶胶垂直分布特征进行对比分析,发现在霾日气溶胶出现明显的聚集现象,气溶胶以一般陆地型气溶胶为主。刘璇等^[10]基于 CALIOP 数据,对长江三角洲一次严重的霾污染过程进行分析,发现气溶胶主要存在于地面至 2 km 的大气层内。许潇锋等^[11]利用 CALIOP Level 2 气溶胶廓线产品,分析了华北地区的气溶胶垂直分布规律。罗卉卉等^[12]利用 CALIOP 数据和地基激光雷达数据,对廊坊市清洁天、霾天和多云 3 种天气下的气溶胶垂直分布特征进行对比分

析,证实 CALIOP 和地基激光雷达反演数据的相关程度高。杨昊等^[13]利用 CALIOP 和地基激光雷达数据对合肥地区气溶胶垂直分布特征进行联合观测,发现 CALIOP 对气溶胶的探测在多云天气下受到一定的影响。

目前针对山西省气溶胶的研究多是从地面站点观测和时空分布特征入手^[14-15],对气溶胶的遥感监测和垂直分布研究较少。基于此,本文利用 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的运城地区地面逐小时资料、地面日值资料和 CALIOP 激光雷达资料,分别对山西省运城地区霾日和晴日的气溶胶垂直分布特征及霾发生时主要气溶胶类型进行研究,期为山西省气溶胶监测提供新的技术支撑和科学依据。

2 数据及处理方法介绍

2.1 数据来源

本文的地面观测数据选取了运城地区 9 个气象站点(稷山、万荣、河津、临猗、运城、新绛、闻喜、夏县和平陆)2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日这 3 年的逐小时气象观测数据和日天气现象数据(雨、霜、雪、霾、浮尘、雾、吹雪、沙尘暴等),数据来源于中国地面逐小时资料和中国地面日值资料。

CALIPSO 于 2006 年 4 月成功发射,其上搭载的 CALIOP 可探测全球气溶胶和云光学性质与形态的垂直分布^[16]。CALIOP 探测范围广,单条廓线的垂直分辨率为 15 m,水平分辨率为 333 m^[17]。CALIOP 可以提供白天和夜间 532 nm 和 1064 nm 两个波长的消光后向散射强度的垂直分布,重访周期约 16 天^[9,18]。本文使用的卫星数据来自 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日 CALIOP Level 1 级和 Level 2 级产品提供的 532 nm 总消光后向散射系数、532 nm 消光系数、1064 nm 消光后向散射系数和气溶胶类型掩码产品(vertical feature mask, VFM)等数据。本研究所用的 CALIOP 数据,单条廓线的垂直分辨率为 30 m,水平分辨率为 333 m。由于运城地形以盆地为主,发生雾霾时受地形限制不易消散,同时为了提高 CALIOP 气溶胶产品的可利用率,故划定运城盆地雾霾频发区^[14-15](110°30'E~111°30'E, 34°48'N~35°48'N)为研究范围。运城地形及所选气象站点分布见图 1。

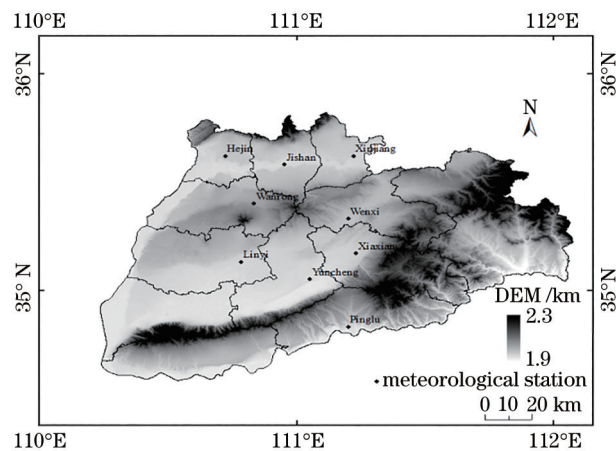


图 1 运城地形及气象站点分布图

Fig. 1 Landform and location of meteorological stations in Yuncheng

2.2 研究方法

2.2.1 晴日、霾日的判定方法

在进行晴日、霾日的判定时,首先对地面观测数据进行处理,选取 08:00、14:00、20:00(北京时间)3 个时刻的水平能见度和相对湿度的平均值,分别代表当日的水平能见度和相对湿度。使用 9 个气象站点的水平能见度和相对湿度日平均值代表运城地区当日整体情况。若当日水平能见度小于 10 km,相对湿度小于 90%,且未发生降水、吹雪、沙尘、扬沙等明显影响视程的天气现象,则判定为一个霾日^[1]。若当日水平能见度大于等于 10 km,且未发生明显影响视程的天气现象,则判定为一个晴日。

2.2.2 CALIOP 激光雷达数据处理方法

在选取的研究时段内,CALIOP 在 110°30'E~111°30'E,34°48'N~35°48'N 研究范围内一共过境 78 天。为了减少云的影响,剔除云影响较大的 CALIOP 激光雷达数据,并根据晴日、霾日的判别标准,对 CALIOP 激光雷达探测数据和地面观测数据进行时间匹配,最终获得效果较好的样本 35 天,其中晴日样本 15 天,霾日样本 20 天。

本研究中的消光系数和 532 nm 总后向散射系数从 CALIOP 气溶胶产品中直接获取。体积退偏比是 532 nm 垂直衰减后向散射系数与 532 nm 平行衰减后向散射系数的比值,颜色比是指 532 nm 总衰减后向散射系数与 1064 nm 总衰减后向散射系数的比值^[19]。CALIOP VFM 产品将气溶胶分为 6 种类型,分别是烟尘型、清洁海洋型、沙尘型、污染沙尘型、大陆清洁型及大陆污染型^[20],通过

CALIOP VFM 二级产品分析霾发生时主要的气溶胶类型。

3 结果分析

3.1 气溶胶消光系数垂直分布特征

图 2 给出了研究区域内 0~4 km 高度霾日和晴日的消光系数及其标准偏差垂直分布特征。霾日共 395 条廓线参与平均,晴日共 260 条廓线参与平均。从图 2 可以看到:1.5 km 以上霾日和晴日的消光系数标准偏差较小,1.5 km 以下标准偏差有所增加;霾日消光系数标准偏差最大值为 0.08 km⁻¹,晴日消光系数标准偏差最大值为 0.04 km⁻¹;霾日消光系数随高度的变化比较明显,晴日消光系数随高度的变化不明显。同时还可以看到:2 km 以上霾日和晴日消光系数的差别不明显,2 km 以下霾日的气溶胶消光作用明显强于同一高度处的晴日气溶胶消光作用;霾日 532 nm 消光系数最大值为 0.61 km⁻¹,所在海拔高度为 516.8 m;晴日消光系数最大值为 0.21 km⁻¹,所在海拔高度为 456.9 m。

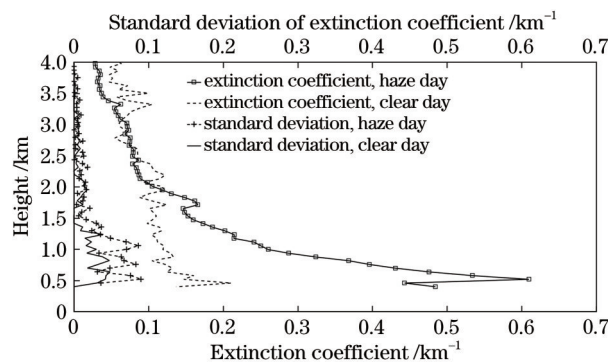


图 2 霾日、晴日气溶胶消光系数及其标准偏差垂直分布廓线
Fig. 2 Vertical profiles of aerosol extinction coefficients and their standard deviations on haze and clear days

1~2 km 高度内,霾日 532 nm 消光系数在 0.12~0.25 km⁻¹ 范围内,晴日消光系数在 0.09~0.12 km⁻¹ 范围内,霾日的最大消光系数约为晴日最大消光系数的 2 倍。在 0~1 km 内,霾日 532 nm 消光系数在 0.26~0.61 km⁻¹ 范围内,晴日消光系数在 0.10~0.21 km⁻¹ 范围内,霾日的最大消光系数约为晴日最大消光系数的 3 倍。由此可以看出,0~1 km 高度范围内霾日和晴日消光系数的差异比 1~2 km 大,气溶胶对大气的消光作用更强。

3.2 霾日近地层气溶胶消光系数垂直分布特征

由 3.1 节的分析得知,霾发生时,气溶胶主要聚集在 0~2 km 高度的大气中。为了进一步了解

霾日 0~2 km 高度内气溶胶垂直分布情况,分别作出霾日白天和夜间的气溶胶消光系数及其标准偏差垂直分布廓线,见图 3。可以看到,霾日夜间标准偏差较白天小,白天气溶胶消光系数的最大标准偏差为 0.13 km^{-1} ,夜间气溶胶消光系数的最大标准偏差为 0.08 km^{-1} 。分析发现:白天气溶胶消光系数的最大值为 0.79 km^{-1} ,所在高度为 516.8 m;晚上气溶胶的最大消光系数为 0.50 km^{-1} ,所在高度为 516.8 m。上述结果表明无论是白天还是夜间,此高度处气溶胶的消光作用最强,且白天的气溶胶消光系数较晚上高。从图 3 还可以看出,在气溶胶消光系数相同的情况下,白天气溶胶所在的高度比夜

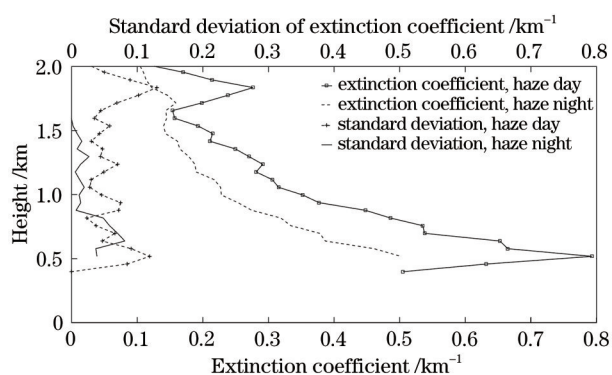


图 3 霾日白天和夜间近地层气溶胶消光系数及其标准偏差垂直分布廓线

Fig. 3 Vertical profiles of near-surface aerosol extinction coefficients and their standard deviations during the haze day and night

间高,这可能与白天湍流作用和夜间逆温作用有关,还可能受到传输和吸湿等因素的综合影响,由于缺乏综合观测资料,其具体原因有待深入分析。

3.3 气溶胶后向散射系数垂直分布特征

一般情况下,可以定性地认为 532 nm 总消光后向散射强度值小于 $8.0 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的气溶胶是空气分子,在 $8.0 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 范围内的是气溶胶颗粒,大于 $4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 是云^[10]。排除云的影响,图 4 为研究时段内运城地区典型霾日(2019 年 10 月 29 日) 532 nm 总后向散射强度垂直剖面图,其中 532 nm 总后向散射强度值小于 $8.0 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 代表空气分子, $8.0 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 代表气溶胶粒子,大于 $4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 代表云。从图 4 可以看出,霾日的气溶胶粒子有明显的聚集层,主要分布在近地面 0~2 km 的大气层中,高层大气相对比较干净。

图 5 给出了运城地区霾日和晴日 532 nm 总后向散射系数在 0~4 km 高度的频率分布。图 5(a) 所示为霾日 532 nm 总后向散射系数的分布频率,图 5(b) 所示为晴日 532 nm 总后向散射系数的分布频率。从图 5 可以看出:霾日的后向散射系数为 $0 \sim 8.0 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的分布频率随着高度的增加而增大;后向散射系数为 $8.0 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的分布频率随着高度的增加而减小;低层大气(0~1 km 和 1~2 km 高度,下同)中后向散射系数为 $8.0 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的分布频率较高,分别为

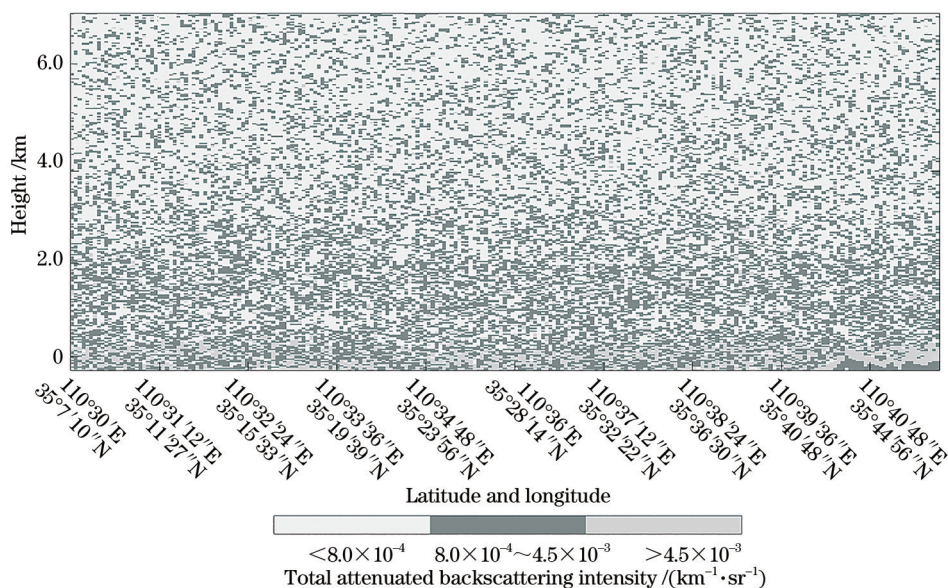


图 4 运城地区典型霾日(2019 年 10 月 29 日) 532 nm 总后向散射强度垂直剖面图

Fig. 4 Altitude-orbit cross-section of 532 nm total attenuated backscattering intensity on a typical haze day (October 29, 2019) in Yuncheng area

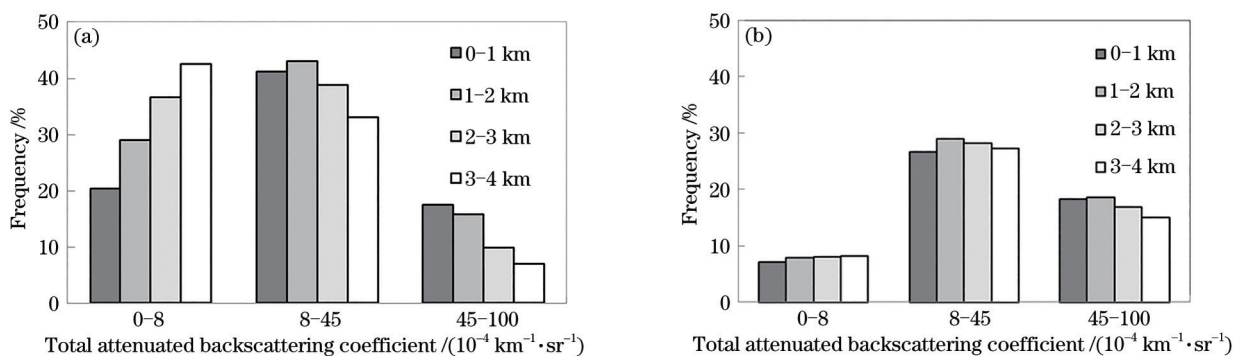


图 5 霾日、晴日 532 nm 总后向散射系数在不同高度处的频率分布。(a)霾日;(b)晴日

Fig. 5 Frequencies of 532 nm total attenuated backscattering coefficients at different heights on haze and clear days. (a) Haze day; (b) clear day

41.2% 和 43.0%，说明霾日近地面聚集了大量的气溶胶粒子；晴日后向散射系数随高度的变化不明显，低层大气中气溶胶颗粒的分布频率比大气分子和云粒子高，0~1 km 和 1~2 km 的分布频率分别为 26.7% 和 29.0%，比霾日分别减少了 14.5% 和 14.0%。

3.4 气溶胶体积退偏比垂直分布特征

体积退偏比越大，反映了粒子在一定程度上越趋于非球形^[12]。图 6 所示为运城地区霾日和晴日的气溶胶体积退偏比在不同高度处的频率分布。从图 6 可以看出，霾日和晴日在每个高度层的体积退偏比分布频率均随着高度值的增大而减小；霾日的体积退偏比值在 0~0.1 的分布频率最高，0~1 km、

1~2 km、2~3 km 和 3~4 km 高度的分布频率分别为 13.7%、33.1%、25.3% 和 10.9%；体积退偏比值为 0.1~0.2 的分布频率次高，频率分别为 10.0%、20.1%、15.6% 和 10.0%。经过统计分析发现，霾日 0~2 km 高度内体积退偏比值大于 0.06 的频率为 39.4%，小于 0.06 的频率为 60.6%，晴日 0~2 km 高度内体积退偏比值大于 0.06 的频率为 33.9%，小于 0.06 的频率为 66.1%。从图 6 还可以看出，晴日的体积退偏比范围在 0~0.1 的分布频率低于霾日，0~1 km、1~2 km、2~3 km 和 3~4 km 高度的频率比霾日分别减少了 4.5%、18.3%、16.3% 和 8.0%，0.1~0.2 的分布频率相较于霾日分别减少了 3.2%、7.5%、8.7% 和 6.3%。

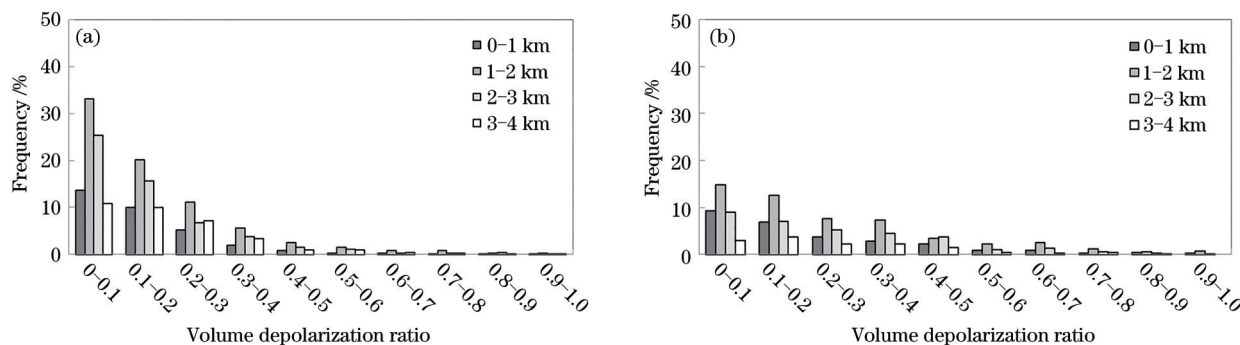


图 6 霾日、晴日体积退偏比在不同高度处的频率分布。(a)霾日;(b)晴日

Fig. 6 Frequency distributions of volume depolarization ratios at different heights on haze and clear days. (a) Haze day; (b) clear day

3.5 气溶胶颜色比垂直分布特征

一般情况下，颜色比越大，表示颗粒越大^[10]。通常定性地认为，颜色比小于 0.5 为细粒子，大于 0.5 为粗粒子^[12]。从图 7(a) 可以看到，随着颜色比的增大，频率减小，颜色比为 0~0.2 的分布频率最高，0.2~0.4 的分布频率次之。霾日 0~2 km 高度内颜色比大于 0.5 的频率为 50.9%，小于 0.5 的频

率为 49.1%。从图 7(b) 可以看出，晴日的颜色比在 0~0.2 的分布频率最高，0~2 km 高度内颜色比大于 0.5 的频率为 45.0%，小于 0.5 的频率为 55.0%，这表明晴日近地面小粒径气溶胶数量多于大粒径气溶胶数量。利用 CALIOP VFM 二级产品对霾日气溶胶类型进行统计分析，结果表明：霾发生时，大气中气溶胶以大陆污染型气溶胶为主。

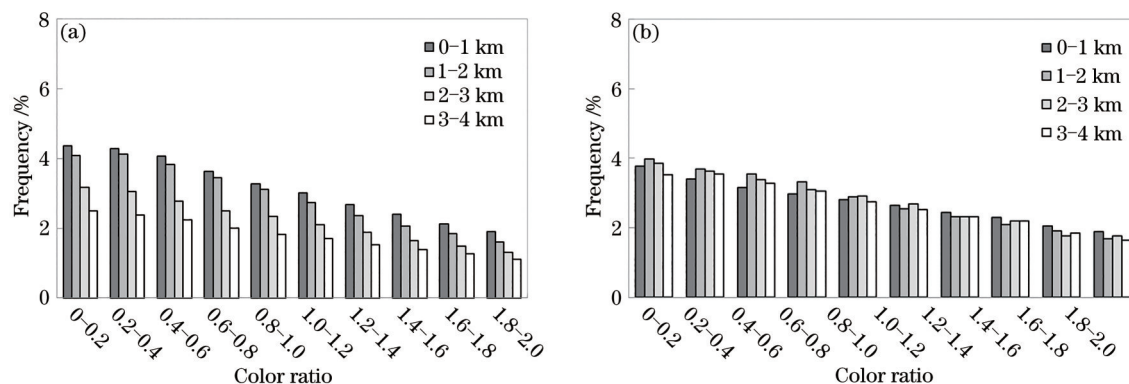


图7 霾日、晴日颜色比在不同高度处的频率分布。(a)霾日;(b)晴日

Fig. 7 Frequency distributions of color ratios at different heights on haze and clear days. (a) Haze day; (b) clear day

4 结 论

利用2017年1月1日至2019年12月31日山西省运城地区9个气象站点地面逐小时资料、地面日值资料和过境的CALIOP激光雷达资料,分别对该地区霾日、晴日的气溶胶垂直分布特征进行分析,结果表明:运城地区霾日的气溶胶消光系数随高度的变化较晴日更为明显。气溶胶主要聚集在0~2 km高度的大气层中,特别是在高度为517 m左右的大气中。相较于1~2 km高度,0~1 km高度内气溶胶对大气的消光作用更强,且霾日的最大消光系数约为晴日最大消光系数的3倍。白天与夜间的气溶胶垂直分布有明显差别,在气溶胶消光系数相同的情况下,白天气溶胶所在的高度比夜间高。霾发生时,低层大气中气溶胶体积退偏比集中在0~0.2。晴日近地面体积退偏比在0~0.2的分布频率低于霾日,小粒径气溶胶数量多于大粒径气溶胶数量。由于在气溶胶光学参数到物理参数的演算过程中,受气溶胶类型、吸湿及混合状态等不确定因素的影响较多,接下来将结合地表污染源调查和气象条件,对气溶胶特性进行深入分析。

参 考 文 献

- [1] Wu D, Wu X J, Li F, et al. Temporal and spatial variation of haze during 1951-2005 in Chinese mainland[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(5): 680-688.
吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化[J]. *气象学报*, 2010, 68(5): 680-688.
- [2] Li W J, Zhang D Z, Shao L Y, et al. Individual particle analysis of aerosols collected under haze and non-haze conditions at a high-elevation mountain site in the North China plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(22): 11733-11744.
- [3] Sun Q. Vertical distribution of atmospheric aerosol optical properties on the North China plain[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.
孙强. 华北地区大气气溶胶光学特性的垂直分布研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [4] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003.
徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0710003.
- [5] Zhang M. Vertical distribution of aerosols and effects on cloud phase[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
张敏. 气溶胶垂直分布及对云相的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [6] Sun H, Liu W H, Wang Y M, et al. Remote sensing retrieval of aerosol optical depth in Jing-Jin-Ji region in winter[J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(1): 38-44.
孙灏, 刘伟汉, 王艳梅, 等. 京津冀冬季气溶胶光学厚度遥感反演[J]. *遥感信息*, 2020, 35(1): 38-44.
- [7] Chen H, Li Q, Wang Z T, et al. Retrieval of fine particulate matter concentration using GF-5 satellite remote sensing[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 181-186.
陈辉, 厉青, 王中挺, 等. 利用高分五号卫星遥感反演近地面细颗粒物浓度方法[J]. *上海航天*, 2019, 36(S2): 181-186.
- [8] Wang T H, Sun M X, Huang J P. Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43

- (1): 144-158.
王天河, 孙梦仙, 黄建平. 中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 144-158.
- [9] Yu C X, Yang Y J, Deng X L, et al. Vertical distribution characteristics of aerosol optical properties on haze and clear day in Hefei based on CALIOP satellite measuring[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1677-1683.
于彩霞, 杨元建, 邓学良, 等. 基于 CALIOP 探测的合肥气溶胶垂直分布特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1677-1683.
- [10] Liu X, Zhu B, Hou X W, et al. Analysis of haze events based on satellite remote sensing and field observations: a case study of severe haze pollution over the Yangtze River Delta[J]. China Environmental Science, 2015, 35(3): 641-651.
刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析: 以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 641-651.
- [11] Xu X F, Liu C X, Tang Z W, et al. Characteristics of aerosol vertical distribution based on CALIPSO over North China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(1): 126-134.
许潇锋, 刘晨曦, 唐志伟, 等. 基于 CALIPSO 的华北地区气溶胶垂直分布特征[J]. 大气科学学报, 2018, 41(1): 126-134.
- [12] Luo H H, Chen Z Y, Zhang T S, et al. Comparison of aerosol vertical distribution based on CALIPSO satellite and ground observation data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1201003.
罗卉卉, 陈臻懿, 张天舒, 等. 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1201003.
- [13] Yang H, Xie C B, Fang Z Y, et al. Joint observation of vertical distribution of aerosol in Hefei area by spaceborne lidar and ground-based lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0110001.
杨昊, 谢晨波, 方志远, 等. 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0110001.
- [14] Guo X. Analysis on the spatial distribution characteristics and time variation characteristics of Shanxi Haze[C]// The 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S9 Collected Papers on Atmospheric Composition and Weather, Climate Change and Environmental Impact, September 27, 2017, Zhengzhou, China. Beijing: China Meteorological Society, 2017: 136-143.
郭雪. 山西霾的空间分布特点及时间变化特征分析[C]//第34届中国气象学会年会S9大气成分与天气, 气候变化及环境影响论文集. 北京: 中国气象学会, 2017: 136-143.
- [15] Wang Y M, Wu J, Chu H R, et al. Spatial and temporal variations and cause analysis of fog and haze in Shanxi in 1961-2012[J]. Shanxi Meteorological Quarterly, 2013, (4): 23-30.
王咏梅, 武捷, 褚红瑞. 1961—2012年山西雾霾的时空变化特征及成因分析[J]. 山西气象, 2013(4): 23-30.
- [16] Winker D M, Pelon J R, McCormick M P. CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4893: 1-11.
- [17] Zheng S Q, Xu J, He Y J, et al. Satellite cloud-aerosol lidar- CALIOP: capability, product and its applications[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(4): 313-320.
郑韶青, 徐峻, 何友江, 等. 星载激光雷达 CALIOP 功能、产品和应用[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(4): 313-320.
- [18] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D8): 9791-9806.
- [19] 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.
- [20] Omar A H, Winker D M, Vaughan M A, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10): 1994-2014.