

太原盆地霾日气溶胶垂直分布及气象要素分析

杨倩¹, 郭媛媛^{1*}, 孙颖姝², 宋秀瑜³, 米晓楠¹, 栾青¹, 赵永强¹, 李孟蔚¹¹山西省气候中心, 山西 太原 030002;²山西省气象台, 山西 太原 030002;³大连市气象装备保障中心, 辽宁 大连 116001

摘要 近年来,太原盆地气溶胶污染比较严重。为探讨太原盆地气溶胶垂直分布及气象要素的影响,本研究团队应用 CALIOP 气溶胶资料、地面观测站资料获得了太原盆地 2018—2020 年气溶胶消光系数的垂直分布;基于 HYSPLIT 后向轨迹和聚类分析方法,结合 CALIOP 气溶胶类型数据、NCEP/NCAR 再分析资料、MICAPS 高空和地面常规观测资料对太原盆地不同来源的气溶胶的垂直分布、类型及天气形势进行了探讨。结果表明:太原盆地霾日气溶胶消光系数的最大值为 1.22 km^{-1} ,消光系数随着高度的增加而减小;晴日消光系数的最大值为 0.33 km^{-1} ;新疆和内蒙古方向的气团对太原霾日的贡献最大(46%),其次为来自本地的污染气团(39%);太原盆地受西北或偏西气流的影响,同时在低层暖平流的控制下,易聚集污染沙尘型气溶胶;在静稳天气背景下,低层暖平流导致逆温层形成,地面弱气压区及弱风速区使污染物不易扩散,容易聚集污染沙尘型气溶胶和大陆污染型气溶胶;地面上,太原盆地处于高压底部前部,地面风速较大,700~850 hPa 处的冷平流将高纬度的污染物输送至太原盆地,气溶胶以沙尘型气溶胶为主,气溶胶抬升高度较大。

关键词 遥感;霾日;气溶胶类型;CALIPSO;垂直分布;太原盆地

中图分类号 X513

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0710002

1 引言

太原盆地作为全国能源重化工基地之一,受经济迅速发展和地形的限制^[1],环境问题越来越严重,霾就是其中之一。霾主要源于严重的气溶胶污染。气溶胶不仅影响人们的身心健康,还通过吸收和散射太阳辐射影响地气系统的能量平衡^[2-5]。另外,垂直分布的气溶胶通过影响不同高度层的云相态,间接地影响地球的辐射收支和全球的水循环系统^[6]。研究表明,气象条件对气溶胶的形成、分布、维持与变化具有显著作用^[7]。

目前,人们已针对太原的气溶胶进行了大量研究,如:冯新宇^[8]利用单颗粒气溶胶质谱仪,对 2017 年 11 月 5—6 日太原市雾霾天气中细颗粒物的化学组成进行了分析,并研究了雾霾成因;结果表明,此次雾霾天气中的细颗粒物主要有 9 种,污染过程是

由外来污染物输送和风速低等气象因素造成的。李军霞^[9]利用飞机和地面观测资料研究了山西 5000 m 以下气溶胶粒子的数谱特征、光学特性的垂直分布及气溶胶活化特性。李艳红等^[10]利用常规地面气象观测资料、高空探测资料和大气污染物观测资料,对太原灰霾天气的特征及形成机制进行了综合分析;结果表明,太原地区灰霾天气出现的频率存在明显的季节变化,高压类型的天气形势对灰霾具有重要影响。张祚荣^[11]利用 MODIS 遥感数据,采用暗像元算法对山西省气溶胶进行了反演;结果表明,气溶胶光学厚度(AOD)与 $\text{PM}_{2.5}$ 具有较高的相关性,根据 AOD 可在一定程度上预测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其变化趋势。

美国国家航空航天局(NASA)和法国空间研究中心(CNES)联合研制的云-气溶胶激光雷达和红外探测卫星(CALIPSO)可以获得气溶胶的垂直分布,

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-08-30; 录用日期: 2021-09-16

基金项目: 山西省科技攻关项目(20130311037-2)、山西省气象局重点课题(SXKZDQH201510009)、山西省气象局面上项目(SXKMSQH20226312)、山西省气象局青年基金项目(SXKQNQH20195645)

通信作者: *guoyy36@qq.com

搭载在 CALIPSO 上的带偏振的云-气溶胶激光雷达(CALIOP)可以探测全球范围内气溶胶的垂直分布情况^[12]。CALIOP 数据^[13]已被广泛应用于气溶胶垂直特性的研究方面,例如:罗卉卉等^[14]利用 CALIOP 数据和地基激光雷达数据,对廊坊 3 种天气个例下的气溶胶垂直分布特性进行了对比分析,结果发现不同天气类型下两种激光雷达数据反演的消光系数廓线整体一致;于彩霞等^[15]利用 CALIOP 资料对安徽沿淮地区霾天的气溶胶类型及垂直分布特征进行了分析;杨昊等^[16]利用星地联合观测方法对合肥地区的气溶胶垂直分布进行了分析,结果表明,在无云天气条件下,星载激光雷达和地基激光雷达探测结果的一致性很高。

已有针对太原气溶胶垂直特性的研究多从地面单站点观测、飞机观测等角度入手,而采用星载激光雷达监测太原盆地气溶胶垂直分布特征的相关研究较少。本研究团队利用 2018 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日太原盆地地面观测站数据和 CALIOP 数据,对该地区气溶胶的垂直分布特征进行了分析,同时结合 NCEP/NCAR 再分析资料、MICAPS 高空和地面常规观测资料,对不同污染来源的气溶胶的垂直分布特征及典型天气形势进行研究,以期为太原市防治大气污染、制定减排政策提供一定的理论支持。

2 材料和方法

2.1 研究区概况

太原盆地地处山西省中部,是山西省人口密集区以及重要的工业、能源基地。太原盆地主要包括太原市、晋中市和吕梁市,是华北地区重要的重工业基地之一,近年来污染问题比较严重。本研究选取 111.50°E~113.00°E、37.00°N~38.20°N 作为研究范围。受盆地地形的限制,研究区域发生污染时,污染物不易扩散。

2.2 数据介绍

在本研究中,常规地面观测数据选取了山西省观象台站点(112.58°E,37.62°N)2018 年 1 月 1 日

至 2020 年 12 月 31 日共三年的逐小时气象观测数据以及日天气现象(雨、霜、雪、霾、浮尘、雾、吹雪、沙尘暴等)数据,数据来源于中国地面逐小时资料和中国地面日值资料;后向轨迹分析所用的气象资料来源于网络(ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1/)。本研究所用的 NCEP/NCAR 再分析资料的水平分辨率为 1°×1°。

本研究中的激光雷达数据取自 2018 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日这一时间段 CALIOP Level 1 级和 Level 2 级产品提供的 532 nm 总衰减后向散射系数、532 nm 消光系数和气溶胶类型掩码产品(VFM)等数据。文中使用的 CALIOP 数据的垂直分辨率为 30 m,水平分辨率为 333 m。

2.3 研究方法

选取地面观测数据中 08:00、14:00、20:00(北京时间)三个时刻的水平能见度和相对湿度的均值分别代表当天的水平能见度和相对湿度。如果当天的水平能见度小于 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,则判定为霾日^[2];如果当日天气现象为霾,也判定为霾日;如果当天的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,则判定为晴日。

本研究中的消光系数和 532 nm 总衰减后向散射系数可以直接从 CALIOP 产品中获得。CALIOP 二级 VFM 产品将气溶胶分为 6 种类型,分别是清洁海洋型、沙尘型、大陆污染型、清洁大陆型、污染沙尘型和烟尘型^[17]。

3 结果与分析

3.1 霾日气溶胶消光系数的垂直分布

基于 2018—2020 年逐小时气象观测数据和日天气现象数据,利用晴日霾日判定方法对太原盆地的霾日和晴日进行判定,最终获得研究区域内的霾日数为 121 d,晴日数为 520 d。将地面观测数据和 CALIOP 激光雷达数据分别获得的霾日数和晴日数进行时空匹配,最终获得霾日样本数为 17 d,晴日样本数为 80 d,详见表 1。

表 1 霾日、晴日样本数统计

Table 1 Sample number statistics of haze and clear days

Station	CALIOP data	Ground meteorological observation data		Star-to-ground matching	
	Number of transit day /d	Number of haze day /d	Number of clear day /d	Number of haze day /d	Number of clear day /d
Shanxi observatory	179	120	520	17	80

研究表明,霾日、晴日气溶胶消光系数在 2 km 以下的差异比较大^[18],所以图 1 给出了太原盆地霾日和晴日近地面 2 km 高度以下气溶胶消光系数的垂直分布廓线。由于太原盆地地形复杂,同时星载激光雷达探测近地面时误差较大,因此将 200 m 高度以下的数据舍弃^[15]。从图 1 中可以看出:霾日气溶胶消光系数的最大值为 1.22 km^{-1} ,其所处高度为近地面 300 m 处;晴日气溶胶消光系数的垂直变化不明显,最大值不超 0.33 km^{-1} 。由此可知太原盆地发生霾时,近地面 300 m 大气中的气溶胶污染最严重。

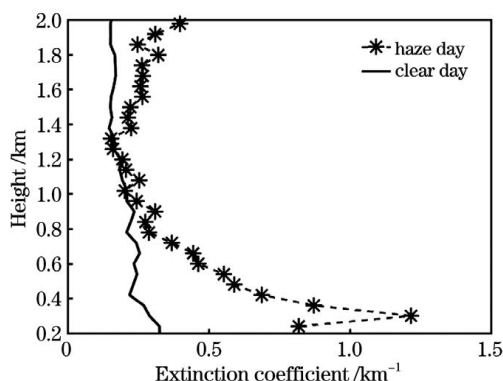


图 1 太原盆地霾日、晴日气溶胶消光系数的垂直分布廓线
Fig. 1 Vertical profile of aerosol extinction coefficient on haze day and clear day in Taiyuan Basin

3.2 霾日的后向轨迹聚类分析

HYSPLIT 模型由美国国家海洋和大气管理局的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发,是一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。本研究团队利用 HYSPLIT 模型对 2018—2020 年霾日的后向轨迹进行聚类分析。每个霾日后向轨迹的起始时间设置为 5 时(世界时),后推时间为 72 h;结合 3.1 的分析结果,将起始位置设置为距地面 300 m 高度处。研究时间段内共有 120 条后向轨迹参与聚类分析。聚类原则是组内各轨迹差异极小,而组间差异比较大^[19]。聚类分析结果(图略)表明,霾日太原盆地的污染气团来源主要分为 3 个方向,其中:来自新疆和内蒙古方向的气团的贡献最大,频率约 46%;本地污染气团的贡献次之,频率约为 39%;来自蒙古方向的气团对太原盆地的污染也有影响,频率约为 15%。

3.3 不同来源气溶胶的垂直分布特征

3.3.1 新疆和内蒙古气团影响下的气溶胶垂直分布及气象要素分析

在本研究选取的三种个例下,CALIPSO 过境

太原盆地的时刻分别为 2019 年 1 月 2 日 05:07 左右(世界时)、2020 年 1 月 3 日 05:15 左右和 2018 年 2 月 9 日 18:27 左右。

根据霾日晴日判定结果得知,2019 年 1 月 1~14 日太原盆地发生了一次连续的霾过程。分析 2019 年 1 月 2 日 05 时的 72 小时后向轨迹可知,此次霾过程前期受到新疆和内蒙古方向气团的影响。图 2(a)为 532 nm 总衰减后向散射系数的垂直剖面图,色坐标代表 532 nm 总衰减后向散射系数,其中小于 $8 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的代表空气分子,在 $8 \times 10^{-4} \sim 45 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 之间的代表气溶胶粒子,大于 $45 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的代表云。从图 2(a)可以看出,气溶胶粒子有明显的聚集层,主要分布在近地面约 1.2 km 以下的大气层中,高层大气相对比较洁净。从图 2(b)所示的消光系数垂直分布图可以看出,消光系数的最大值 0.53 km^{-1} 出现在近地面 240 m 高度处。从图 2(c)可以看出,在此次污染过程中,研究区域内 ($37.00^\circ\text{N} \sim 38.20^\circ\text{N}$) 的气溶胶以污染沙尘型气溶胶和大陆污染型气溶胶为主,同时还伴有少量沙尘型气溶胶。

对 2019 年 1 月 2 日 500 hPa 处的高度场和环流进行分析,可知 500 hPa 处贝加尔湖西南侧有高空冷涡低槽存在,但位置偏北,振幅小,移动缓慢,高纬度的冷空气南下困难,太原盆地受西北或偏西气流影响,环流稳定,有利于静稳天气的形成。在图 2(d)所示的探空图中可以看出:500 hPa 以下,风随高度顺转,有明显的暖平流;12 时(世界时),700~850 hPa 处的逆温层厚度明显增大。地面上,太原盆地始终受弱气压区控制,地面风速小,有利于污染物聚集。因此,在大气环流稳定少动的背景下,低层的暖平流导致逆温层形成,而且污染物在垂直方向的扩散受到抑制,地面弱气压区及弱风速区使污染物汇集。

3.3.2 本地污染累积过程中的气溶胶垂直分布及气象要素分析

2020 年 1 月 2—4 日,太原盆地为霾日,从 1 月 3 日的 72 小时后向轨迹分析可知,此次霾天气主要是由本地污染累积造成的,污染主要聚集在 2 km 以下的大气层中,如图 3(a)所示。消光系数的最大值 0.49 km^{-1} 出现在近地面 360 m 高度处,如图 3(b)所示,消光系数的最大值低于 3.3.1 节中的结果,其所处高度略有上升。在此次霾天气中,占据主要类型的气溶胶是污染沙尘型气溶胶和大陆污染型气溶胶,同时还伴随有极少量沙尘型气溶胶,

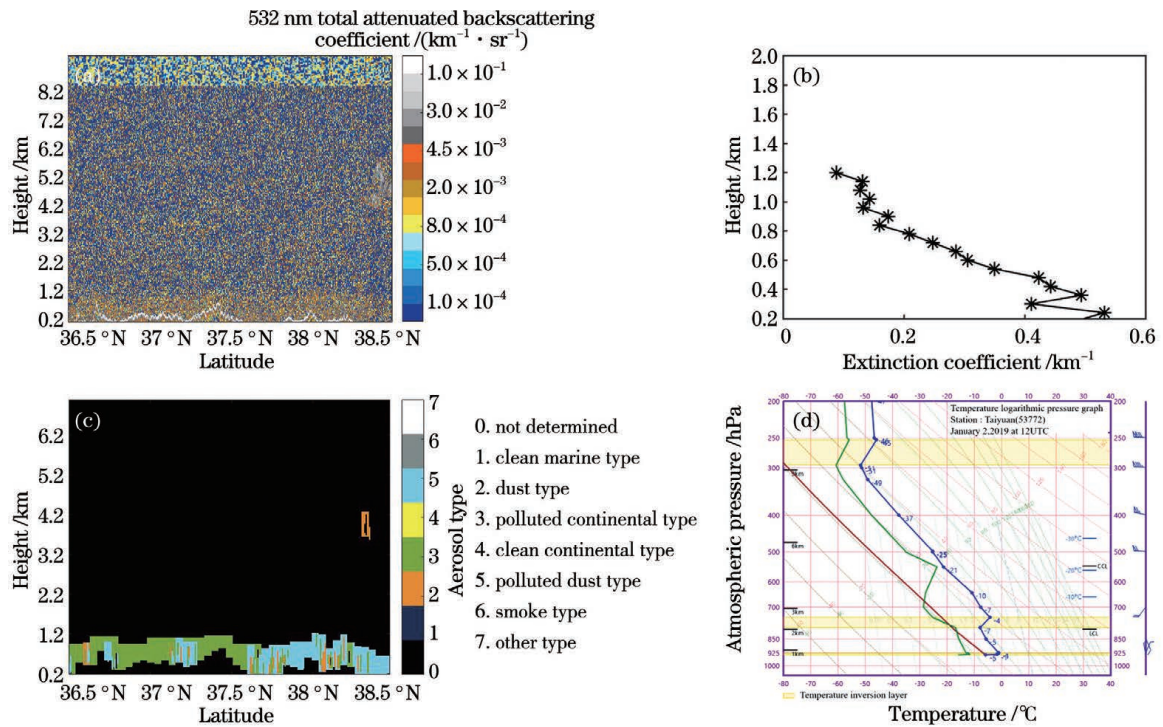


图 2 2019 年 1 月 2 日太原盆地的气溶胶垂直分布特征及气象条件分析。(a)532 nm 总衰减后向散射系数的垂直剖面；(b)平均消光系数的垂直廓线；(c)气溶胶类型的垂直分布；(d)太原盆地的 T - $\ln P$ 图

Fig. 2 Analysis of vertical aerosol distribution characteristics and meteorological condition in Taiyuan Basin on January 2, 2019. (a) Altitude-orbit cross-section of 532 nm total attenuated backscattering coefficient; (b) average vertical profile of 532 nm extinction coefficient; (c) vertical distribution of aerosol type; (d) T - $\ln P$ diagram in Taiyuan Basin

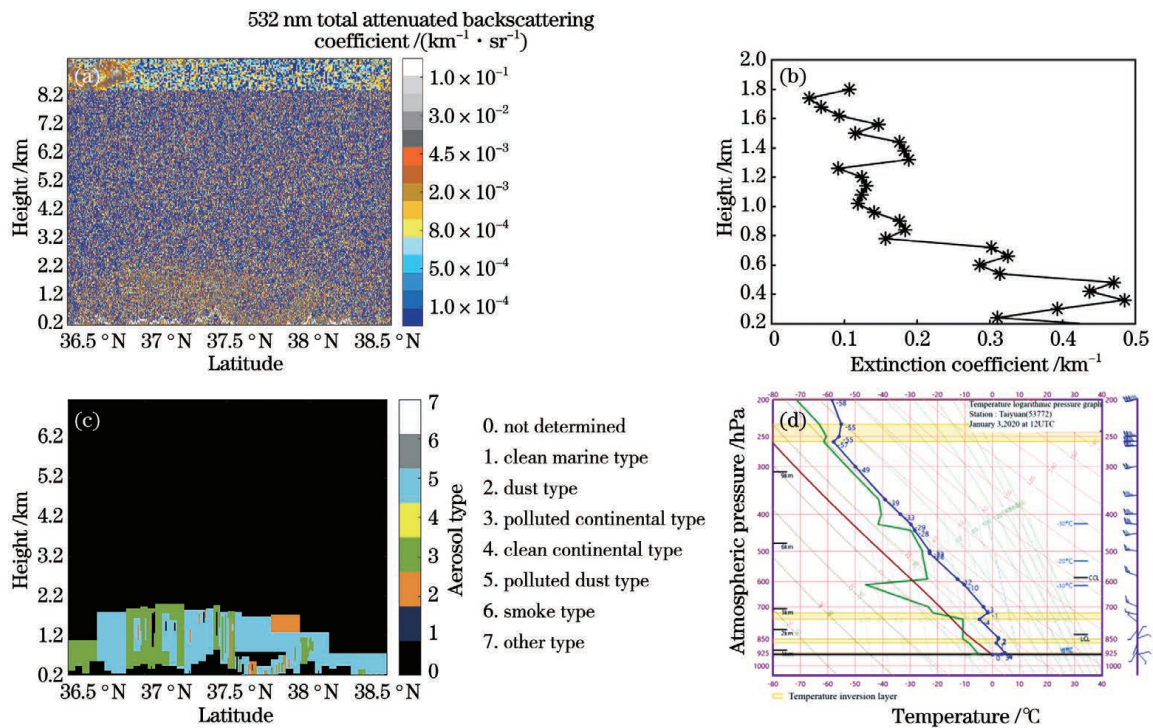


图 3 2020 年 1 月 3 日太原盆地的气溶胶垂直分布特征及气象条件分析。(a)532 nm 总衰减后向散射系数的垂直剖面；(b)平均消光系数的垂直廓线；(c)气溶胶类型的垂直分布；(d)太原盆地的 T - $\ln P$ 图

Fig. 3 Analysis of vertical aerosol distribution characteristics and meteorological condition in Taiyuan Basin on January 3, 2020. (a) Altitude-orbit cross-section of 532 nm total attenuated backscattering coefficient; (b) average vertical profile of 532 nm extinction coefficient; (c) vertical distribution of aerosol type; (d) T - $\ln P$ diagram in Taiyuan Basin

如图 3(c)所示。

对太原盆地 2020 年 1 月 3 日 500 hPa 处的高度场和风场进行分析,可知 500 hPa 处欧亚高纬度地区的位势高度场是“两槽一脊”型,新疆东部存在一高空短波槽,但移动缓慢,太原盆地受偏西气流的影响,有利于静稳天气的形成。由图 3(d)所示的探空图可以看出:700 hPa 以下,风随高度顺转,有暖平流;700 hPa 附近和 850 hPa 附近均存在逆温层,12 时(世界时)逆温层更加明显。地面上,太原盆地处于高压底部,气压场较弱,且地面风速小,有利于污染物聚积。因此,在静稳天气背景下,低层的暖平流导致逆温层形成,地面弱气压区及风速区使污染物在本地汇集。

3.3.3 蒙古气团输送过程中的气溶胶垂直分布及气象要素分析

2018 年 2 月 9 日,太原盆地为霾日。分析 2 月 9 日的 72 小时后向轨迹可知,此次霾天气主要受蒙古气团输送的影响,气溶胶所处高度较高,在 7 km 以下的大气中均有分布,如图 4(a)所示。气溶胶消光系数的最大值 1.44 km^{-1} 出现在近地面 1.26 km 高度处,如图 4(b)所示,气溶胶消光系数的最大值高于 3.3.1 节和 3.3.2 节的统计结果,消光系数最大值所处高度也高于 3.3.1 节和 3.3.2 节的统计结果。在此次污染过程中,占据主要类型的气溶胶是沙尘型气溶胶,此外还伴随有少量污染沙尘型气溶胶。

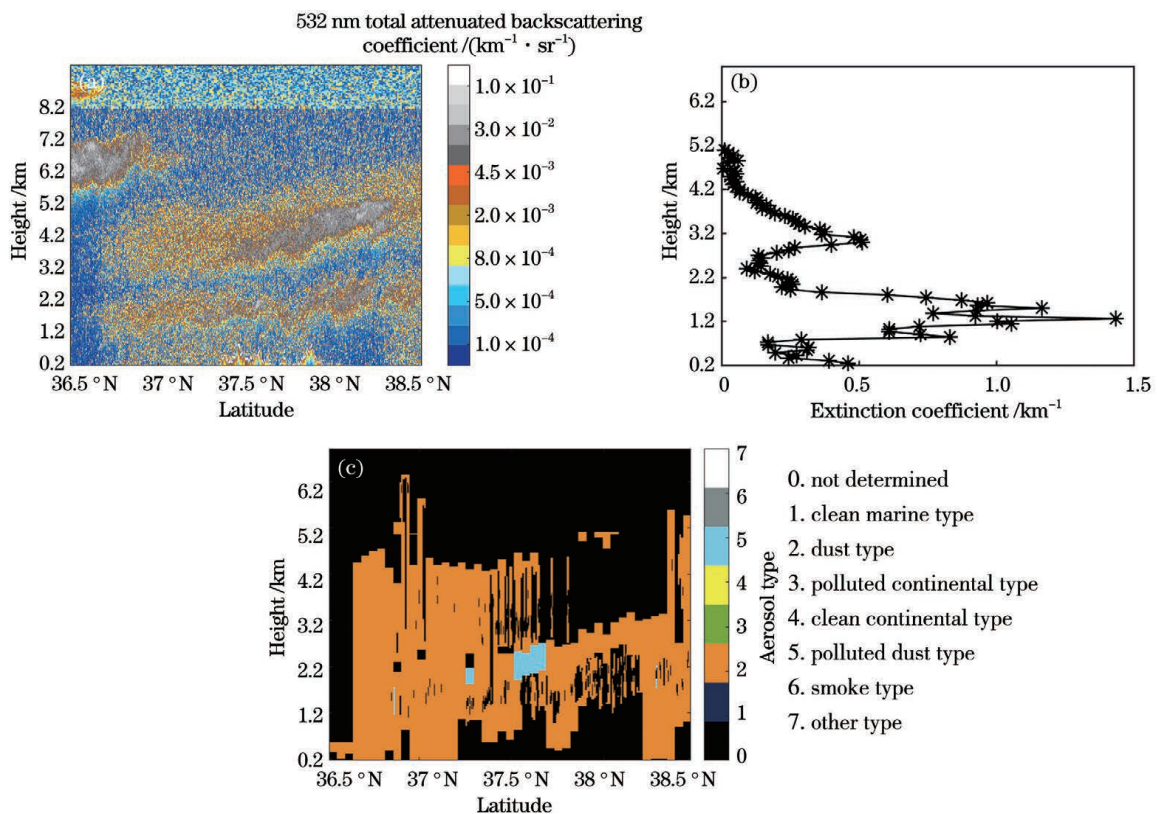


图 4 2018 年 2 月 9 日太原盆地的气溶胶垂直分布特征。(a)532 nm 总衰减后向散射系数的垂直剖面; (b)平均消光系数的垂直廓线;(c)气溶胶类型的垂直分布

Fig. 4 Analysis of aerosol distribution characteristics in Taiyuan Basin on February 9, 2018. (a) Altitude-orbit cross-section of 532 nm total attenuated backscattering coefficient; (b) average vertical profiles of 532 nm extinction coefficient; (c) vertical distribution of aerosol type

500 hPa 处欧亚高纬度地区的位势高度场是“一槽一脊”型(图略),深厚的东北冷涡移动缓慢,太原盆地处于其底部,受偏西气流的影响。在 700~850 hPa 的低层,风场垂直于温度场,有明显的冷平流,太原盆地始终受一致的西北风影响,垂直方向上有利于高纬度冷空气向低纬度扩散。地面上,太原

盆地处于高压底部前部,等压线密集,径向梯度较大,地面风速较大,有利于污染物由远到近输送。

4 结 论

本研究团队利用 CALIOP 气溶胶资料和地面观测站资料对太原盆地 2018—2020 年气溶胶消光

系数的垂直分布进行了讨论,结果表明:霾日气溶胶消光系数随高度的增加而减小,最大值为 1.22 km^{-1} ;晴日消光系数的最大值为 0.33 km^{-1} ,且消光系数随高度变化不明显。

HYSPLIT 后向轨迹和聚类分析结果表明:新疆和内蒙古方向的气团对太原霾日的贡献最大,频率约为 46%;本地污染气团的贡献次之,频率约为 39%;蒙古方向的气团对太原盆地的污染也有贡献,频率约为 15%。

不同污染来源条件下的气溶胶类型不同:在新疆和内蒙古方向气团的传输作用下,气溶胶类型以污染沙尘型气溶胶和大陆污染型气溶胶为主;在本地污染累积过程,容易聚集污染沙尘型气溶胶和大陆污染型气溶胶;在高纬度冷空气向低纬度扩散条件下,气溶胶类型以沙尘型气溶胶为主。

太原盆地气溶胶的垂直分布特征受气象条件的影响。太原盆地受西北或偏西气流的影响,如果同时受低层暖平流的控制,则易使西北或偏西方向输送来的气溶胶在本地聚集,近地面 200~300 m 高度处气溶胶的消光作用最强。在静稳天气背景下,低层暖平流使得逆温层形成,地面弱气压区及弱风速区导致污染物不易扩散,近地面 360 m 高度处气溶胶的消光作用最强。地面上,太原盆地处于高压底部前部,地面风速较大,700~850 hPa 处的冷平流将高纬度的污染物输送至太原盆地。在这类污染物输送过程中,距地面 1200 m 高度处气溶胶的消光作用最强。由于气象要素对气溶胶垂直分布的影响较为复杂,后续将对此展开深入研究。

参 考 文 献

- [1] Xu X D, Shi X H, Zhang S J, et al. The aerosol influence area of Beijing and surrounding cities and its related climate effects[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(22): 2522-2530.
徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应[J]. 科学通报, 2005, 50(22): 2522-2530.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [8] Feng X Y. Characteristics and formation mechanism of a haze event in the winter of Taiyuan investigated by single particle aerosol mass spectrometry (SPAMS) [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(1): 177-185.
冯新宇. 利用单颗粒气溶胶质谱仪 (SPAMS) 研究太原市冬季一次雾霾天气的污染特征及成因[J]. 环境化学, 2019, 38(1): 177-185.
- [9] Li J X. Aircraft and ground-based measurements of aerosol physical properties over Shanxi area in China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.
李军霞. 山西地区气溶胶物理特性的飞机-地面观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [10] Li Y H, Zhao C P, Jing X J, et al. Characteristics of dust haze in Taiyuan and its causative factors [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(2): 200-208.
李艳红, 赵彩萍, 荆肖军, 等. 太原地区灰霾天气特征及影响因子分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 200-208.
- [11] Zhang Z R. Study of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and its change trend in Shanxi Province based on MODIS data [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
张祚荣. 基于 MODIS 数据研究山西地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其变化趋势[D]. 太原: 山西大学, 2019.

- [12] 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.
- [13] Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): L18805.
- [14] 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.
- [15] Yu C X, Deng X L, Shi C E, et al. The analysis of aerosol type and vertical distribution characteristics along Huaihe River based on CALIOP satellite measuring[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1317-1326.
于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 基于 CALIOP 的安徽沿淮地区霾天气溶胶类型及垂直分布特征[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1317-1326.
- [16] Yang H, Xie C B, Fang Z Y, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based lidars[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.
- [17] 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.
- [18] Sun Q, Fan X H, Li Y W. Vertical distribution of aerosol optical properties during hazy days in North China Plain in January 2013 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 520-529.
孙强, 范学花, 李艳伟. 2013 年 1 月华北灰霾气溶胶光学特性的垂直分布[J]. *遥感学报*, 2015, 19(3): 520-529.
- [19] Gao Y G, Zhang K, Wang T J, et al. Concentration characteristics and influencing factors of atmospheric particulate matters in spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5): 1753-1759.
高元官, 张凯, 王体健, 等. 广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1753-1759.

Analysis of Aerosol Vertical Distribution Characteristics and Meteorological Elements of Haze Day in the Taiyuan Basin

Yang Qian¹, Guo Yuanyuan^{1*}, Sun Yingshu², Song Xiuyu³, Mi Xiaonan¹, Luan Qing¹,
Zhao Yongqiang¹, Li Mengwei¹

¹ Shanxi Climate Center, Taiyuan, Shanxi 030002, China;

² Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan, Shanxi 030002, China;

³ Dalian Meteorological Equipment Support Center, Dalian, Liaoning 116001, China

Abstract

Objective Rapid economic expansion and terrain constraints are causing high levels of aerosol pollution in the Taiyuan Basin. Aerosols not only have an effect on people's physical and mental health, but also on the earth-atmosphere system's energy balance due to their absorption and scattering of solar radiation. The majority of research on the vertical characteristics of Taiyuan aerosols has been conducted using ground and aircraft observations. Few studies have been conducted using spaceborne lidars to study the vertical distribution of aerosols in the Taiyuan Basin. CALIOP data is frequently used in the research of aerosol vertical characteristics because it is used to identify the vertical distribution of global particles. The goal of this work is to examine the vertical distribution of aerosol optical characteristics and aerosol types on hazy days in the Taiyuan Basin using CALIOP data to provide theoretical support for the government in developing an emission reduction plan. By studying the weather conditions surrounding various sources of pollution, we may gain a better understanding of the effect of meteorological circumstances on the kind and spread of aerosols.

Methods Firstly, we used the clear day and haze day determination method to determine the haze and clear days in the Taiyuan Basin from 2018 to 2020, using hourly weather observation data and daily weather phenomenon data. Then, using ground data and CALIOP data, we matched the haze and clear days and obtained the vertical distribution characteristics of the aerosol extinction coefficient for the haze and clear days based on the CALIOP data. The CALIOP data used in this research provides a vertical resolution of 30 m and a horizontal resolution of 333 m. The HYSPLIT model was then used to do a cluster analysis on the backward trajectory of haze days between 2018 and 2020. Finally, the vertical distribution characteristics of aerosols from various sources and the influence of meteorological factors were analyzed using CALIOP aerosol data, NCEP/NCAR reanalysis data, and MICAPS data.

Results and Discussions According to the research findings, the maximum aerosol extinction coefficient of the haze day in the Taiyuan Basin was 1.22 km^{-1} , and the extinction coefficient declined with increasing height. On clear days, the largest extinction coefficient was 0.33 km^{-1} (Fig. 1). The air masses originating in Xinjiang and Inner Mongolia were the primary contributors to the Taiyuan haze day (46%), followed by the local pollution air masses (39%). Additionally, air masses from Mongolia had a significant impact on the Taiyuan Basin's pollution, with a frequency of roughly 15%. The Taiyuan Basin was influenced by northwest or westward winds and low-level warm advection. It was relatively simple to deposit dirty dust aerosols [Fig. 2(d)]. Under static and stable weather conditions, low-level warm advection resulted from an inversion layer. The area of low air pressure and low wind speed on the ground hampered the spread of pollutants, and it was easy to accumulate polluted dust-type and polluted continental-type aerosols [Fig. 3(d)]. On the ground, the Taiyuan Basin was placed at the front of the bottom of the high pressure system, with quite a strong ground wind. The cold advection between 700–850 hPa brought contaminants from high-latitudes to the Taiyuan Basin. The aerosols were primarily dust-type aerosols [Fig. 4(c)], with a high aerosol uplift height.

Conclusions On haze days, the aerosol extinction coefficient decreased as the height increased, whereas the change in extinction coefficient with height was not apparent on clear days. Weather circumstances had an effect on the vertical distribution of aerosols in the Taiyuan Basin. The aerosol extinction effect in the Taiyuan Basin was strongest at 200–300 m above ground, where it was influenced by northwest or westward airflow and regulated by low-level warm advection. Under static and steady weather conditions, low-level warm advection resulted in the production of an inversion layer, with the aerosol extinction effect being strongest at a height of 360 m above the ground. On the ground, the Taiyuan Basin was ahead of the bottom of the high pressure, with quite strong ground winds. The cold advection at 700–850 hPa brought pollutants from high-latitudes to the Taiyuan Basin. The aerosol extinction effect was strongest during the transmission of such pollutants at a height of 1200 m above the ground. Due to the complexity of the influence of meteorological components on the vertical distribution of aerosols, we intend to perform additional research in the future.

Key words remote sensing; haze day; aerosol type; CALIPSO; vertical distribution; Taiyuan Basin