基于激光雷达观测的呼伦贝尔一次沙尘过程分析

郝峰1,徐曼1,谷雨1,周兴军1,田永莉1*,马丽2,李荣忠2,3

- 1. 内蒙古自治区环境监测总站干旱半干旱区减污降碳监管评估实验室,内蒙古 呼和浩特 010011;
- 2. 青岛镭测创芯科技有限公司, 山东 青岛 266102;
- 3. 中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系, 山东 青岛 266100)

摘要:基于测风激光雷达和地面常规观测资料,借助机器学习算法以及 HYSPLIT 模型分析了发生在呼伦贝尔的一次典型的沙 尘天气过程。研究表明,本次沙尘起始时南风突增,风向转西南偏南风后风速降低,传输减弱,当风向转西风时,沙尘传输增 强,在西风降低后沙尘传输结束。沙尘传输期间,湍流运动偏弱,混合层高度抬升受限。借助机器学习分粒径计算发现,沙尘 前期传输以粗颗粒为主,后期粗、细颗粒物均有明显增长。不同传输时期粒径的不同,暗示沙尘的源可能发生变化,后向轨迹 揭示沙尘传输前期来自蒙古国西北部,经过我国锡林郭勒后北上到达呼伦贝尔;而后期沙尘是从俄罗斯南部直接进入呼伦贝尔。 最后使用总传输通量研究发现,沙尘前至起始时刻总传输通量比地面颗粒物浓度更早显示出对沙尘的响应,并用箱线图确定了 本次沙尘的总传输通量阈值。总传输通量变化以及阈值设定可为沙尘预警的新参考指标。

关键词:沙尘过程;测风激光雷达;机器学习;后向轨迹

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23096

Analysis of a sand dust process in Hulunbuir based on coherent Doppler wind lidar

Hao Feng¹, Zhou Xingjun¹, Xu Man¹, Gu Yu¹, Tian Yongli^{1*}, Ma Li², Li Rongzhong^{2,3}

- 1. Laboratory for Supervision and Evaluation of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Arid and Semi-Arid Regions, Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Central Station, Hohhot Inner Mongolia, 010011, China;
- 2. Qingdao Leice Transient Technology Co. LTD, Qingdao 266102, China;
- 3. Department of Marine Technology, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 2661 00, China)

Abstract: Based on coherent Doppler wind lidar and ground-based conventional observational data, a typical dust weather process occurring in Hulunbuir was analyzed using machine learning and the HYSPLIT model. The study revealed that the dust event started with a sudden increase in southerly wind. Subsequently, the wind direction shifted to south-southwest, resulting in a reduction in wind speed and a weakening of dust transport. However, when the wind shifted to westerlies, the dust transport intensified again. The transport of dust ceased after a decrease in westerly wind speeds. During the dust transport period, turbulence was relatively weak, and the mixing layer height remained limited. Machine learning particle size calculations indicated PM10 dominating the early transport and both PM10 and PM2.5 showing substantial growth in the later phase. This divergence in particle sizes across different transport periods suggests a potential change in dust sources. HYSPLIT revealed that in the early phase of dust transport originated from northwestern Mongolia, passing through Xilingol League in China before reaching Hulunbuir. In the later phase, dust transport directly entered Hulunbuir from the southern regions of Russia, resulting in an escalation of dust pollution. Finally, using total mass flux analysis, it was determined that the response to dust occurred earlier in the period from the pre-dust period until the beginning,

通讯作者: 田永莉

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项"呼包鄂区域大气环境预测预警与污染防治重大关键技术研究"(2020ZD0013)

收稿日期: 2023-11-16 收修定稿: 2023-11-17

作者简介:郝峰 (1982年-),男,内蒙古巴彦淖尔市人。硕士研究生,高级工程师,主要从事大气环境监测及污染防治, 15849191058, nmghaofeng2023@163.com.

compared to ground-level particulate concentration. The total mass flux threshold for this dust event was established using box-and-whisker plot. Variations in total mass flux and the establishment of thresholds could serve as novel indicators for dust event early warning systems.

Key words: dust process; coherent Doppler wind lidar; machine learning; HYSPLIT

1 引言

沙尘是一种常见的自然现象,对大气环境和人类健康产生重要影响,因此研究其起源、传输和影响具有重要意义。随着遥感技术的进展,激光雷达在沙尘研究中得到广泛应用。在先前的研究中,学者们利用激光雷达对成都、北京等地的沙尘天气进行研究,发现激光雷达不仅能有效监测沙尘过程,还能预测颗粒物浓度的变化(宋明昊等,2020;张晋茹等,2018)。同时也有学者利用星载和地基激光雷达对沙尘进行研究,如陈楠等(2019)使用星载激光雷达和地基激光雷达监测沙尘传输高度和尘降现象。测风激光雷达利用激光穿过大气中的尘埃或气溶胶,通过散射和多普勒频移来测量风速和风向,可用于观测沙尘研究中的大气风场变化,包括风速、风向和风切变等(刘超等,2019),而目前利用测风雷达反演出的光学特性和颗粒物浓度在沙尘研究中的应用相对较少。作为新兴监测技术,测风激光雷达具有高空间分辨率、探测灵敏度和抗干扰能力的优势,可提供高时空分辨率的风场和大气垂直分布数据,为研究沙尘事件的时空演变规律和沙尘污染物的输送强度提供了有力的技术支持。

本文使用测风激光雷达和地面空气质量自动监测站数据,对 2023 年 5 月 1 日至 3 日发生在内蒙古呼伦贝尔的一次沙尘过程进行深入分析。同时借助机器学习算法,研究不同粒径沙尘的垂直传输规律,确定主要来源方向,并使用后向轨迹追踪沙尘远距离输送路径,揭示沙尘的复杂传输路径和演变规律。为增强沙尘天气的预测和预警能力,和提高沙尘污染的监测和应对水平,提供重要的技术支持。

2 数据与方法

2.1 地面监测数据选取

本文选用了内蒙古自治区呼伦贝尔市的环境空气质量国控站点——区环保局(44.23N,119.76E)的环境空气质量逐小时监测数据(包括 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度和 AQI)以及相对湿度和能见度等地面气象数据。



2.2 测风激光雷达设备

本文使用了青岛镭测创芯科技有限公司的 WindMast PBL 型边界层风廓线测风激光雷达进行观测。该雷达的基本原理是激光发射系统将激光波束发射到大气中,与气溶胶相互作用后产生回波信号,光学天线接收并采集信号后,基于光学脉冲相干多普勒频移检测原理,利用大气中气溶胶的激光后向散射信号与本振光做外差检测,分析回波信号的多普勒频移信息进而计算径向风速,再进一步计算出水平和垂直风场以及湍流强度、混合层高度等其他二次产品。观测时间为 2023 年 4 月 27 日至 6 月 5 日,雷达放置于国控点海拉尔区环保局附近,直线距离约 10m。雷达的激光波束俯仰角度为 71.38°,起测高度为 28m,径向距离分辨率为 15m,高度分辨率为 14m(径向距离分辨率 15m×sin 71.38°),最大径向探测距离为 3000m。本文所采用雷达数据为 10min 平均数据,数据产品包括水平风速、水平风向以及垂直方向气流速度、信噪比等一次产品,以及反演计算的湍流强度、混合层高度、消光系数等二次产品。

2.3 机器学习算法介绍

由于大气中颗粒物浓度和粒径分布的复杂多变性,激光雷达在直接测算环境空气中颗粒物质量浓度垂直分布及分粒径计算方面面临挑战。过去的研究主要利用雷达反演的消光或后向散射系数,通过回归模型获取颗粒物浓度(Cui et al, 2021)。近年来,机器学习算法的应用在探测气溶胶和颗粒物浓度方面取得显著进展。研究人员利用多元回归、支持向量机、随机森林等机器学习模型,对气象条件和人为减排对污染物浓度的贡献进行了深入研究,为环境污染和空气质量预测提供了有力工具(代兴良等,2021)。本文参考郝勇等(2022)在专利中提出的方法,使用 matlab 软件中机器学习工具箱中的神经网络拟合工具,利用地面站数据小时能见度和湿度(将小时数据插值成 10min 数据)和雷达起测高度 28m 处的一个多月的一次数据产品(风速、风向、垂直气流速度、信噪比)和二次数据产品(湍流强度)作为影响因子,分别建立了与地面 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度的反演模型。通过评估模型的预测值与实测值的相关性 R 最高,均方误差 MSE最小的原则选出最优模型。然后利用雷达获取的其他不同高度的数据产品作为输入因子,对垂直方向颗粒物浓度进行分粒径计算。

2.4 HYSPLIT 模式介绍

HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)即欧拉—拉格朗日混合单粒子轨道模型,是质点轨迹、扩散及沉降综合的模式系统,可用于计算和分析大气污染物的输送和扩散轨迹。该模型在分析污染物来源及传输路径时非常直观高效。本文采用 NOAA 提供的在线 HYSPLIT 后向轨迹模型 https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php 和美国国家环境预报中心(NCEP)与美国国家大气研究中心(NCAR)的全球再分析资料(水平分辨率为 1°×1°)来进行相应研究。

2.5 通风量与总传输通量

通风量是指在一定高度层内累计风速的大小,通常被用于表征不同风场对污染物输送能力(刘超等.2018)。计算公式为:

 $VI = \sum_{i=1}^{i=max} (h_i - h_{i-1}) \times V_i$

式中:i 为该时刻风廓线数据中垂直高度从低至高的第i个数据; h_i 为第i个数据所对应的垂直高度, h_0 为 0m; V_i 为第i个数据对应的风速大小。

通风量仅根据风速和垂直高度计算,代表了输送能力,却忽视了风向的转变以及垂直颗粒物分布情况等影响。因此本文借鉴于传输通量以及通风量的计算方法,使用总传输通量(TMF: Total Mass Flux)来评价传输特征。其中颗粒物传输通量是量化颗粒物在空气中的移动速度和数量,主要由风速和浓度两个变量组成,计算采用当前颗粒物浓度和风速在某一方向的乘积表示(赵逢波,2019)。总传输通量(TMF: Total

Mass Flux)的计算公式为:

$$TMF = \sum_{i=1}^{i=max} V_i \times C_i$$

式中 i 为该时刻风廓线数据中垂直高度从低至高的第 i 个数据; V_i 为第 i 个数据对应的风速大小; C_i 为第 i 个数据对应模拟出的浓度。TMF 最终单位为 $\mu g/m^2/s$,其物理意义是一定高度内单位时间内单位面积上颗粒物的传输总量。

3 结果与分析

3.1 沙尘过程分析

5月1日08时随着贝加尔湖以北低压系统的形成,中纬度地区出现了一个浅槽并开始向东移动。随着槽东移,5月2日08时呼伦贝尔位于槽前西南气流控制中,等高线密集,风速较大,2日20时,槽结构减弱,呼伦贝尔上空为偏西风,风速较大。在此期间,根据地面监测站数据显示呼伦贝尔经历了一次严重的沙尘污染过程。沙尘开始阶段是从5月1日17时 AQI 从优转为良,粗颗粒 PM₁₀浓度从50μg/m³(5月1日16时)迅速上升至119μg/m³,达到轻度污染。然后在20时至22时短暂好转。1日夜间23时进入沙尘爆发阶段,PM₁₀浓度再次上升,发展至5月2日2时达到轻度污染,7时达到中度污染。空气质量在轻度和中度之间波动,并在17时出现严重污染。截止至2日23时,共有18个小时出现污染,其中5个小时达到严重污染,PM₁₀峰值出现在19时,浓度达到1140μg/m³。细颗粒 PM_{2.5}的变化幅度整体较小,沙尘前16时的18μg/m³,中度污染时在37μg/m³左右,严重污染时为133μg/m³,之后逐渐降低。5月3日0时至3时沙尘影响减弱,空气质量好转为良,4时转优,沙尘影响彻底结束。

此次沙尘过程不仅影响了呼伦贝尔的空气质量,还对能见度造成了严重的影响。能见度与 PM_{10} 浓度呈现出明显的负相关性,在沙尘期间能见度普遍下降,其中当地面 PM_{10} 浓度达到峰值时,能见度最低仅 3km。沙尘结束后,能见度开始逐渐恢复。

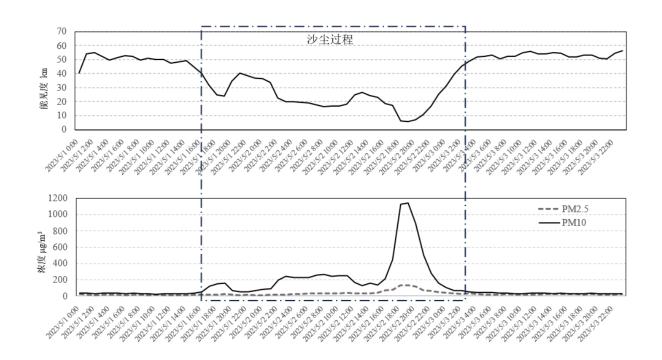


图 2 能见度与 PM₁₀、PM_{2.5}浓度变化时序图

Fig.2 Time series diagram of visibility and PM₁₀, PM_{2.5} concentration

3.2 雷达观测的气象特征

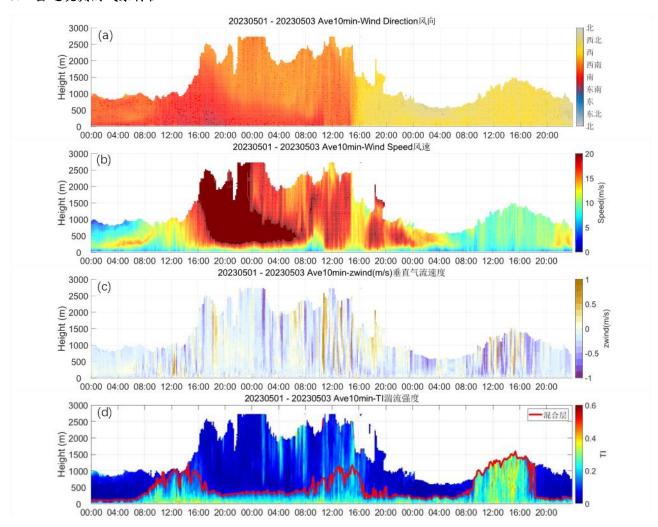


图 3 雷达观测结果

Fig.3 Lidar Observations

如图 3 所示沙尘天气下,风场变化明显。从 5 月 1 日 16 时开始,呼伦贝尔高空南风风速由 10m/s 迅速增至 20m/s 以上,近地面 200m 以下风速增长至 10m/s 以上。2 日 0 时高空的风速先出现降低,风向转西南偏南风,但近地面的风速在 8 时后才开始降低,高空风速减小对悬浮在空气中的沙尘颗粒物的携带能力降低,这可能导致沙尘颗粒物的扩散范围缩小,更多的颗粒物停留在低层,并逐渐沉降到地面,此时段地面颗粒物浓度逐渐上升。2 日 8 时至 10 时近地面风速短时降低,后又增大至 15m/s 以上,但此时较强的西南偏南风并未明显推高颗粒物浓度的增长。16 时风向整层突变为西风,西风风速增强至 15m/s 以上时,传输最强,地面颗粒物浓度达到峰值,风速降低后,污染逐渐结束。沙尘过境时垂直气流运动以弱上升气流为主,速度大多在 1m/s 以下,湍流运动偏弱,混合层降低多在 1km 以下,沙尘结束后湍流运动增强,混合层抬升至 1.5km,垂直扩散能力增强。

3.3 气溶胶光学特性及粒径分布模拟

消光系数是根据激光雷达探测数据进行反演所得的一个参数,用来表征大气中颗粒物的光学特性(任超等,2022)。消光系数通常与颗粒物浓度相关联,较高的消光系数意味着大气中存在更多的颗粒物,但却无法进行粒径区分。因此借助机器学习算法实现 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度模拟,最终选出模型的相关性结果见图 4,图中横坐标为实测的颗粒物浓度,纵坐标为模型模拟出的颗粒物浓度。结果显示 PM_{10} 的相关性更好,可达到 0.96,均方误差为 295.60,而 $PM_{2.5}$ 的相关性稍差为 0.89,均方误差为 25.37。

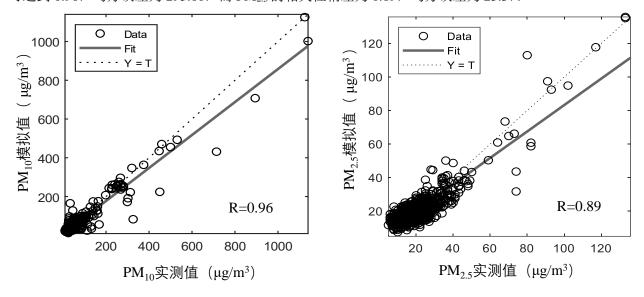


图 4 PM₁₀与 PM_{2.5} 所选模型的相关性 Fig.4 Correlation of Selected Models for PM₁₀ and PM_{2.5}

根据模型计算出的本次沙尘过程 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布结果见图 5,由图可知在沙尘前和沙尘后整体较清洁,消光系数值低,没有颗粒物浓度高值出现。5 月 1 日 16 时沙尘开始阶段气溶胶消光系数增大,粗颗粒物 PM_{10} 浓度快速上升,传输高度可至 2500m。在 1 日的 20 时至 22 时,消光系数短时迅速下降,近地面 PM_{10} 浓度同步降低。5 月 2 日 0 时进入沙尘爆发阶段,气溶胶消光系数显著增大, PM_{10} 传输在 1000m以下更强,1000m以上较弱,而 $PM_{2.5}$ 浓度变化不大,此时段沙尘传输对粗颗粒物有明显的贡献。5 月 2 日 16 时后,强沙尘传输至此,雷达探测高度降低,在 1000m以下消光系数出现高值, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度显著增长,沙尘发展的后期 $PM_{2.5}$ 的浓度相较于前期有显著增加。5 月 3 日 0 时后,消光系数值开始降低, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度明显降低,沙尘传输的影响逐渐结束。沙尘前期和后期的粒径变化差异,说明其来源可能发生改变。

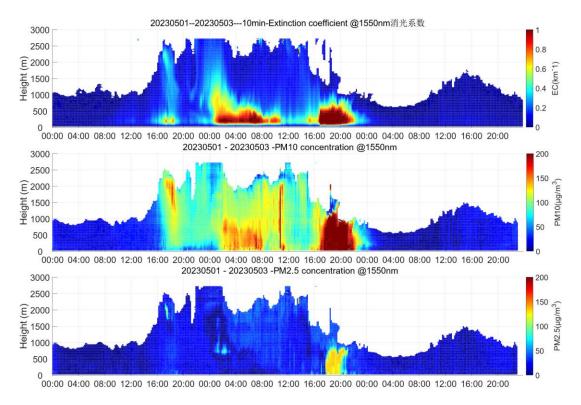


图 5 消光系数、PM₁₀质量浓度、PM_{2.5}质量浓度变化

Fig.5 Variation of Extinction Coefficient, PM₁₀ and PM_{2.5} Mass Concentration

3.4 后向轨迹分析

在沙尘传输期间,呼伦贝尔市风向发生明显转变,表明其传输路径可能发生改变。中国大陆的标准时间为东八区,以沙尘影响的起始时间 5 月 1 日 17 时(May 1,09:00 UTC,图 6 左)和传输影响呼伦贝尔最强的时间点为 5 月 2 日 19 时(May 2,11:00 UTC,图 6 右),通过 HYSPLIT 后向轨迹模型对呼伦贝尔进行后向 48 小时追溯,并选择 3 个高度(200m、800m、1500m),来分析影响呼伦贝尔的沙尘来源轨迹。

影响呼伦贝尔的沙尘来源轨迹在两个时间段内总体趋势都是从西往东输送,但沙尘粒子的移动路径和高度有显著差异。5月1日17时(May 1,09:00 UTC),200m 处的沙尘来自蒙古国西北部1500m 处,沿着东南方向传输。至5月1日2时(Apr 30,18:00 UTC),沙尘抵达我国内蒙古锡林郭勒盟后,沙尘传输方向发生转变,沿北向传输至呼伦贝尔市。800m 处的移动轨迹基本与200m 处一致,只是800m 处的路线更长,起点位于蒙古与俄罗斯边境,起始高度在2000m,在沙尘传输过程中先进行抬升,然后开始下降。1500m 处的传输路径与200m 和800m 处有所不同,沙尘起始于蒙古中部2000m 处,沿着中蒙西部边境进入呼伦贝尔1500m 处。

在沙尘污染最严重时即 5 月 2 日,200m 和 800m 处的传输主要来自俄罗斯南部直接进入呼伦贝尔。200m 高度的沙尘粒子来自 2000m 处逐渐下降,而 800m 处是从 500m 先进行下沉后又抬升输入。1500m 处的传输路径则更为远,来自俄罗斯经哈萨克斯坦和我国新疆北部,之后穿过蒙古中部进入呼伦贝尔,起始高度从 7000m 逐渐下降至 1500m。由于雷达观测到的沙尘传输主要集中在 800m 以下,所以 1500m 处此时基本没有沙尘污染气团。

综上,本次沙尘过程前期呼伦贝尔主要受到来自蒙古国经过我国锡林郭勒然后北上的影响,高空也有蒙古中部的传输路径,但整体对呼伦贝尔地面的影响相对较低。而在后期沙尘直接从俄罗斯南部进入呼伦贝尔,此路径对呼伦贝尔的影响较大,且传输高度集中在低空。

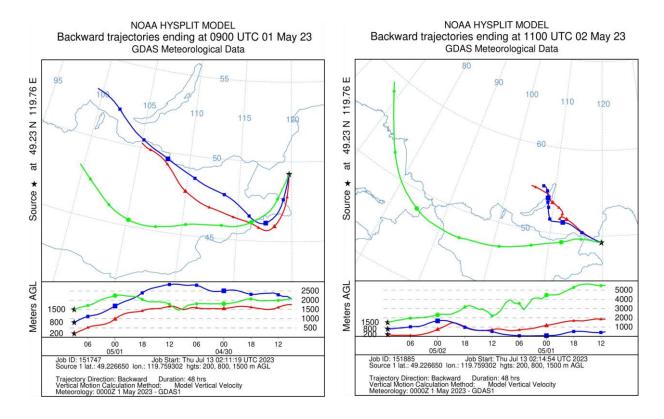


图 6 后向轨迹图(左为沙尘起始时后向,右为沙尘最严重时后向)

Fig. 6 Backward Trajectory (left: the beginning of dust events, right: the peak of dust events)

3.5 通风量与总传输通量计算

根据雷达在沙尘过境时混合层高度,计算 1000m 以下的通风量大小,雷达显示 1000m 以下共计 69 层,所以 max=69。图 7 为此次沙尘过程中 1000m 以下的 10 分钟混合层通风量。在沙尘前,通风量较低,1 日 10 时接近 10000m²/s,之后逐渐增大。沙尘来临后,风速大增,通风量继续增大,在 1 日 22 时达到最大值为 24873m²/s,之后开始降低,2 日 10 时后波动性变化,通风量在 10000~18000m²/s 之间变化。3 日沙尘结束,通风量继续降低之后保持在 10000m²/s 左右。从通风量来看,本次沙尘前后通风量均较低。在沙尘过境时段通风量先增长,短时达到峰值后出现降低,之后在 10000~18000m²/s 之间波动。稍小的通风量有助于沙尘天气的维持和沙尘粒子的缓慢沉降且随着风向的转变,短时的波动增长可能是有新的传输。

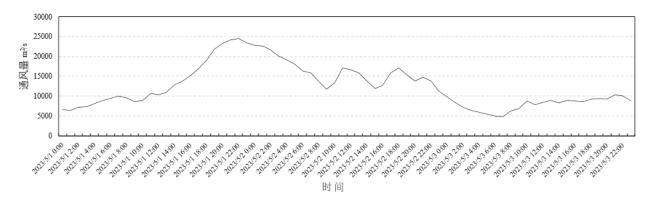


图 7 通风量的时序变化

Fig.7 Time-Series Variation of Ventilation Index

考虑到地面监测站小时浓度要比雷达实测数据起始晚一个小时(如地面监测站的 16 时浓度取的是 15

时 01 分至 16 时 00 分的测量均值,而雷达时间尺度更精确,可以直接观测到 15 时 50 分开始出现污染)。地面监测站实测 17 时 AQI 转良,因此定义沙尘起始时间比地面监测站早 1 个小时,即定义沙尘时间段为 5 月 1 日 16 时至 5 月 3 日 3 时,沙尘前为 5 月 1 日 0 时至 16 时,沙尘后为 5 月 3 日 3 时至 23 时,分别对三个时段做 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的总传输通量和风向的玫瑰图,此处总传输通量的计算高度选用与通风量取值一致,均为 1000m 以下,风向采用 1000m 以下的平均风向,采用 16 向划分展示,结果见图 8。沙尘前以南向和西南偏南传输为主,其中西南偏南传输出现的频率高于南向传输,颗粒物总传输通量整体较低,1 日 14 时前 PM_{10} 总传输通量均低于 25000 μ g/m²/s, $PM_{2.5}$ 总传输通量在 6000 μ g/m²/s 以下,此时段前总传输通量变化平缓,无明显增长和降低。从 1 日 14 时开始颗粒物总传输通量迅速增长,到 1 日 16 时 PM_{10} 总传输通量增长了 0.8 倍, $PM_{2.5}$ 增长了 1.8 倍,而地面颗粒物是从 1 日 16 时开始显著增长,总传输通量的变化要早于地面颗粒浓度的变化,表明总传输通量对沙尘变化的敏感性更高。沙尘过境时,主要来自西南偏南与西北偏西两个方向传输影响,与前文采用后向轨迹追踪气团的来源方向一致。沙尘过境时总传输通量大幅增加, PM_{10} 最高可至 680000 μ g/m²/s, $PM_{2.5}$ 最高达 150000 μ g/m²/s,最高值出现在西北偏西方向的传输时,而此阶段内西南偏南风传输影响的总频率最高,表明西南偏南风的影响时间最长。沙尘结束后,西北偏北传输主导,但颗粒物总传输通量显著降低,其中 PM_{10} 降低速率明显高于 $PM_{2.5}$,这与沙尘过境后粗颗粒更容易沉降有关,而细颗粒物易悬浮在空气中,总传输通量降低较为缓慢。

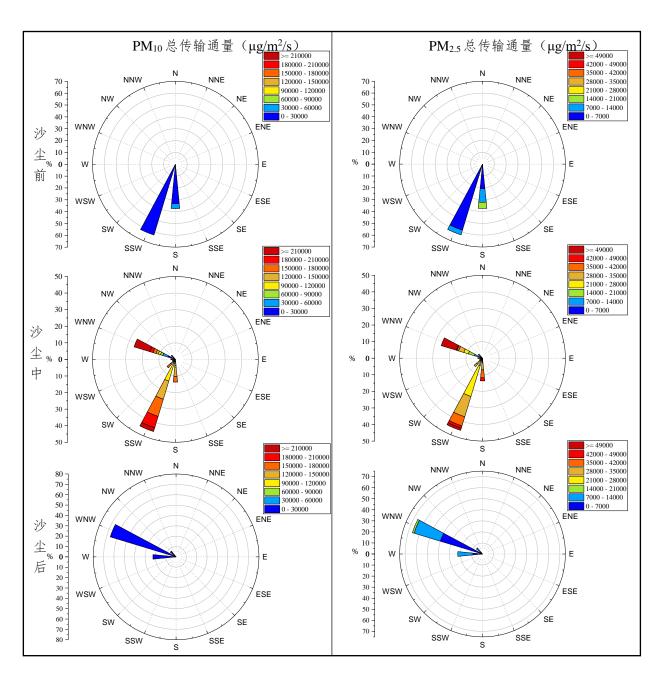


图 8 沙尘过程总传输通量

Fig.8 Total Mass Flux of Dust Process

使用箱线图来判断三个时段的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 总传输通量分布情况,并识别出潜在的异常值,结果见图 9。沙尘前和沙尘后的总传输通量分布相对集中,而在沙尘过程中,数据分布较为分散,且呈现多个离群点,尤其是 PM_{10} 总传输通量,为了在图中凸显其他数值,此处未呈现 PM_{10} 总传输通量大于 $300000\mu g/m^2/s$ 的离群点。在沙尘过程中,传输情况的复杂性导致计算出的总传输通量的变化范围较大,因此为了确保阈值的相对稳定,阈值范围上限选用了沙尘期间去除离群点后的下四分位数,阈值下限则选择了去除离群点后的沙尘前和沙尘后的总传输通量数据的最大观察值。经过计算沙尘过程 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 总传输通量阈值分别在 $29800~93700\mu g/m^2/s$ 和 $15800~21500\mu g/m^2/s$ 之间。

地面颗粒物浓度变化已是沙尘起始的重要标识之一。本次沙尘过程计算的总传输通量与地面实测的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度进行相关性分析,结果显示总传输通量与地面颗粒物浓度呈现较好的正相关性,其中 PM_{10} 总传输通量与浓度的相关性 R 更高达到 0.88, $PM_{2.5}$ 略低为 0.81。但总传输通量的变化早于地面浓度,

因此在沙尘预报预警方面,总传输通量的应用价值将会更高。对总传输通量的变化和阈值研究发现,当总 传输通量持续增加并超过一定阈值时,可成为沙尘提前预警预报的一个新的重要参考指标。当然,阈值的 设定需要建立在长期、大量的沙尘研究数据的充实支撑之上,以确保预警的准确性和可靠性。

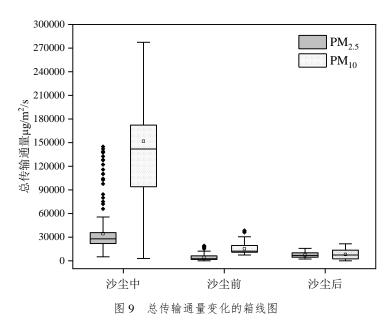


Fig.9 Box-and-Whisker Plot of Total Mass Flux

4 结论与展望

4.1 结论

- (1)本次沙尘过程中,强南风作为初始传输动力起到了重要作用。随后,风向转变为西南偏南风,风速降低,传输逐渐减弱。然而,当风向最终转为西风时,地面 PM₁₀浓度出现峰值 1140μg/m³。沙尘期间混合层高度发展受到抑制,这主要是由于沙尘对太阳辐射消光影响较大,导致辐射不能加热地面,感热较低从而造成混合层发展受限。综上所述,风速和风向的变化在本次沙尘过程中对颗粒物浓度和混合层高度产生了明显影响,这对于深入理解和应对类似沙尘事件具有重要意义。
- (2)沙尘过境时,消光系数值明显增大。沙尘传输前期以粗颗粒 PM₁₀ 为主,细颗粒 PM_{2.5} 变化不明显,沙尘传输高度可至 2500m。而在后期粗颗粒和细颗粒物均有明显增长,前期和后期传输至呼伦贝尔沙尘粒径有明显差别,一方面暗示其沙尘来源可能不同,另一方面也可能与细颗粒物的二次转化生成有关,后续有待与颗粒物组分特征结合做进一步的研究。
- (3) HYSPLIT 后向轨迹证实了沙尘前期和后期来源的改变,沙尘传输前期主要是来自蒙古国西北部的传输经过我国锡林郭勒后北上到达呼伦贝尔,而后期污染最重时则是从俄罗斯南部直接进入呼伦贝尔。
- (4)总传输通量显示本次沙尘过境 1000m 以下主要受西南偏南(前期)和西北偏西(后期)的传输影响,其中西南偏南的影响时间更长,而西北偏北的传输强度更强。沙尘前至起始时刻,总传输通量比地面颗粒物浓度响应更早;沙尘过境时 PM₁₀总传输通量增长更为显著;沙尘后 PM₁₀总传输通量降低更快,这与粗颗粒更易沉降有关,PM_{2.5}总传输通量降低较为缓慢。最后通过箱线图计算出本次沙尘 PM₁₀和 PM_{2.5}总传输通量阈值范围分别在 29800~93700μg/m²/s 和 15800~21500μg/m²/s 之间。未来在大量的研究基础上,可将总传输通量变化以及准确阈值设定作为沙尘预警预报的一个新的参考指标。

4.2 展望

本研究通过多普勒相干测风激光雷达和环境气象地面监测数据,深入研究了内蒙古自治区呼伦贝尔市一次沙尘污染过程的传输特征。然而,沙尘天气的复杂性和不可预测性仍然是挑战,因此未来研究可从以下几个方面展开:

- (1)完善环境监测网络:继续完善地面环境监测网络,提高监测数据的时空分辨率和覆盖范围。同时,结合卫星遥感数据加强对沙尘天气的全面监测,以便更准确地掌握沙尘事件的起源和传输路径。
- (2) 多种观测手段融合:将多普勒相干测风激光雷达与其他遥感技术相融合,形成多模式观测手段。综合利用各种数据信息,提高沙尘天气的监测和预测能力。
- (3)气象模型优化:针对沙尘天气的特点,改进气象模型的参数方案,提高对沙尘事件过程的模拟精度。同时加强数据同化技术的应用,提高模型的初始场和边界条件的准确性,增强对沙尘事件的数值模拟能力。测风激光雷达提供的实测数据将用于验证和改进模型的表现。
- (4) 优化机器学习的预测模型:继续深入探索机器学习在沙尘天气预测中的应用,通过更多样本数据和更复杂的特征提取,建立更准确、稳定的预测模型。提高沙尘天气预警和预测的准确性,为相关部门和公众提供更及时有效的预警信息。

综上所述,沙尘天气的研究对于理解大气环境的变化和应对气候变化具有重要意义。未来的研究将需要 综合运用多种技术手段,加强数据共享和合作交流,共同推动沙尘天气研究的深入发展。

参考文献 (References)

- Cui L K, Song X Q, Yang Y W, et al. 2021. Doppler lidar retrieval of particulate matter concentration based on statistical regression method[J]. Acta Photonica Sinica, 50(12):1201005.
- 陈楠,徐宝东,张瑜等.2019.激光雷达在湖北大气环境监测中的应用[J]. 中国环境监测,35(2):142-149. Chen N, Xu B D, Zhang Y, et al.2019. Application of lidar in atmospheric environment monitoring in Hubei province[J]. Environmental Monitoring in China,35(2):142-149. doi:10.19316/j.issn.1002-6002.2019.02.19
- 代兴良,宋国君,姜晓群等.2021.新冠肺炎疫情对咸阳市空气质量的影响[J]. 中国环境科学,41(7):3106-3114. Dai X L, Song G J, Jiang X Q, et al.2021. Impacts of the COVID-19 pandemic on air quality in Xianyang [J]. China Environmental Science, 41(7):3106-3114. doi:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210331.004
- 郝勇,宋小全,李荣忠. 2022.一种大气颗粒物浓度反演方法及相关组件[P]. CN114279915A.20220405.Hao Y, Song X Q, Li R Z. 2022. An atmospheric particulate matter concentration retrieval method and related components [P]. CN114279915A.20220405.
- 刘超,张碧辉,花丛等. 2018.风廓线雷达在北京地区一次强沙尘天气分析中的应用[J].中国环境科学, 38(5):1663-1669. Liu C, Zhang B H, Hua C, et al. 2018.Application of wind profiler radar in a strong sand dust weather analysis in Beijing[J]. China Environmental Science,38(5):1663-1669. doi:10.19674/j.cnki.issn.1000-6923.20180305.002
- 刘超,花丛,张恒德等.2019.基于风廓线雷达的北京春季一次"先霾后沙"空气污染过程分析[J]. 中国沙漠, 39(5):88-96. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al.2019. Analysis of a haze-dust air pollution process in spring of Beijing based on wind profiler radar[J]. Journal of Desert Research, 39(5):88-96. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2019.00010
- 任超,程周杰,李荣忠.2022.内蒙古自治区一次沙尘过程的激光雷达分析[J]. 激光技术, 46(3):427-434. Ren C, Cheng Z J, Li R Z.2022. Analysis of Lidar in a sand dust process in Inner Mongolia autonomous region[J].Laser Technology, 46(3):427-434. doi:10.7510 / jgjs.issn.1001-3806.2022.03.021
- 宋明昊,张小玲,袁亮等.2020.成都冬季一次持续污染过程气象成因及气胶垂直结构和演变特征[J]. 环境科学学报, 40(2):408-417. Song M H, Zhang X L, Yuan L, et al.2020.Meteorological effects and aerosol vertical structure and evolution characteristics of a continuous pollution process in winter in Chengdu[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 40(2):408-417. doi:10.13671/j.hjkxxb.2019.0421
- 张晋茹,陈玉宝,卜令兵.2018. 基于气溶胶和大气风场激光雷达对北京一次沙尘过程分析[J]. 激光与光电子学进展, 55(8): 080102. Zhang J R, Chen Y B, Bu L B. 2018. Analysis of a dust process in Beijing based on aerosol and atmospheric wind feld lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 55(8): 080102. doi:10.3788/LOP55.080102
- 赵逢波.2019.污染物通量的扫描激光雷达探测方法研究[D].西安理工大学. Zhao F B.2019. Investigation of the detection method of pollutant flux by scanning lidar. [D]. M. S. thesis (in Chinese), Xi'an University of Technology.