

基于激光雷达和遥感数据的2021年春季两次跨境沙尘暴过程对比研究

德日格尔¹, 咏梅^{1,2*}, 孙鑫^{3*}, 高海林⁴, 金额尔德木吐^{1,2}, 包玉龙^{1,2}, 包春玲¹

¹内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

³内蒙古自治区气象台, 内蒙古 呼和浩特

⁴内蒙古自治区锡林郭勒盟气象局, 内蒙古 锡林浩特

收稿日期: 2023年3月14日; 录用日期: 2023年4月17日; 发布日期: 2023年4月26日

摘要

沙尘暴通过远距离输送影响下风地区的空气质量, 对生态环境及社会经济造成严重危害。本文利用高时空分辨率遥感卫星Himawari-8数据、SYNOP沙尘天气数据与HYSPLIT模式对2021年3月15日与3月27日的两次强沙尘暴的源地及其发展变化进行识别, 结合气象数据与激光雷达探测技术分析中蒙边境地区跨境沙尘过程中气象要素变化情况与沙尘垂直分布特征。结果表明: 3月15日沙尘暴过程持续时间更长, 垂直分布高度更高, 风速更大, 而3月27日沙尘暴影响范围更广, 对阿巴嘎旗站点造成的空气污染更严重, 能见度更低。空间上, 两次沙尘暴均起源于蒙古国西部, 向东南方向输送影响蒙古国、中国北方地区(特别是内蒙古和京津冀地区)、朝鲜、韩国等地, 3月27日的沙尘事件除上述地区甚至波及日本; 时间上, 3月15日沙尘暴持续时间更长, 对下游地区的影响时间更久; 沙尘气溶胶垂直分布上, 激光雷达测量显示3月15日的沙尘气溶胶垂直分布高度最高达1.7 km, 比3月27日沙尘气溶胶垂直分布高0.3 km; 污染程度方面, 沙尘事件期间近地面PM10最高浓度分别达到300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 最低能见度分别为3.7 km、0.7 km, 对能见度造成显著影响; 激光雷达探测得到的消光系数与颗粒物浓度具有良好的—致性, 可以反映气溶胶颗粒物浓度变化特征。

关键词

沙尘暴, 激光雷达, Himawari-8, 垂直分布, 中蒙边境地区

Comparative Study of Two Cross-Border Dust Storms in Spring 2021 Based on Lidar and Remote Sensing Data

*通讯作者。

文章引用: 德日格尔, 咏梅, 孙鑫, 高海林, 金额尔德木吐, 包玉龙, 包春玲. 基于激光雷达和遥感数据的 2021 年春季两次跨境沙尘暴过程对比研究[J]. 地理科学研究, 2023, 12(2): 262-273. DOI: 10.12677/gser.2023.122024

Rige'er De¹, Mei Yong^{1,2*}, Xin Sun^{3*}, Hailin Gao⁴, E'erdemutu Jin^{1,2}, Yulong Bao^{1,2}, Chunling Bao¹

¹College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

²Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

³Meteorological Observatory of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia

⁴Xilingol League Meteorological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Xilinhot Inner Mongolia

Received: Mar. 14th, 2023; accepted: Apr. 17th, 2023; published: Apr. 26th, 2023

Abstract

Dust storms affect the air quality of downwind areas through long-distance transportation, and cause serious harm to the ecological environment and social economy. In this paper, Himawari-8 data of high spatial and temporal resolution remote sensing satellite, SYNOP dust weather data and HYSPLIT model are used to identify the sources and development changes of two strong dust storms on March 15 and March 27, 2021. In addition, the meteorological data and Lidar detection technology are combined to analyze the meteorological changes and the vertical distribution characteristics of the cross-border dust process in the China-Mongolia border area. The results showed that: the dust storm process on March 15 lasted longer, the vertical distribution height was higher, and the wind speed was larger, while the dust storm on March 27 affected a wider range, and caused more serious air pollution and lower visibility to ABAG QI Station. Spatially, the two dust storms originated from western Mongolia and transported southeast to affect Mongolia, northern China (especially Inner Mongolia and the Beijing-Tianjin-Hebei region), North Korea, South Korea and other regions. In addition to the above regions, the dust event on March 27 even affected Japan. Temporality, the dust storm lasted longer on March 15 and affected the downstream area for a longer time. In terms of the vertical distribution of dust aerosol, the Lidar measurement showed that the vertical distribution height of dust aerosol on March 15 was up to 1.7 km, 0.3 km higher than that on March 27. In terms of pollution degree, the highest concentrations of surface PM₁₀ during dust events reached 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the lowest visibility was 3.7 km and 0.7 km, respectively, which had a significant impact on visibility. The extinction coefficient detected by Lidar has a good consistency with the concentration of particulate matter, which can reflect the variation characteristics of aerosol particulate matter concentration.

Keywords

Dust Storms, Lidar, Himawari-8, Vertical Distribution, China-Mongolia Border Area

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沙尘暴作为一种特殊且影响显著的自然灾害之一，多发生于干旱半干旱地区[1] [2] [3] [4]。沙尘暴的巨大破坏力会造成房屋倒塌、人畜伤亡；沙尘颗粒通过吸收和散射太阳辐射，改变云微物理特性使降水量降低，导致干旱加剧[5]；沙尘暴所及之处能见度严重降低、空气质量恶化[6] [7]并引发各类疾病[8] [9]，

对人类生命健康和生产生活造成恶劣影响。近年来,除中东北部地区外,全球沙尘气溶胶发生频率呈急剧增长趋势[10],特别是2021年春季,沙尘天气频发,其中近10年来强度最强、范围最广的强沙尘天气于3月15日席卷东亚[11],此次强沙尘暴波及蒙古、中国、韩国等地区,对生态环境和人类生命财产安全造成严重危害,引起社会各界广泛关注,其中蒙古国遇难10人、房屋建筑严重破坏、畜牧业蒙受重大损失[12][13];中国北部部分地区能见度小于1 km [14],北京市PM₁₀最高日均浓度达1630 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [15],内蒙古、甘肃、宁夏和新疆等地沙尘暴灾害导致直接经济损失3000余万元[16];韩国多地PM₁₀日均浓度均超过90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [17]。鉴于此,沙尘暴具有巨大危害,因此全方位了解沙尘暴的输送特征可以及时发出预警,有利于各地方政府及时做出决策,减少沙尘灾害。

沙尘暴的输送兼具水平输送和垂直输送,并且其垂直分布高度决定沙尘暴持续时间及是否进行远程输送[18],因此沙尘暴研究必须全面掌握其水平和垂直特征。目前,学者普遍利用卫星遥感技术与地基观测数据准确掌握沙尘天气分布特征。被动遥感,如新一代静止气象卫星Himawari-8的高时空分辨率遥感影像数据可以监测沙尘暴的发生和水平运输特征[19],但垂直分布信息缺失;云-气溶胶激光雷达和红外探路者观测卫星(CALIPSO)能探测从源头到下风区的沙尘气溶胶垂直结构和运输路径[20],但该数据局限于卫星运行轨迹,无法完全反演指定时空的沙尘垂直分布;亚洲沙尘和气溶胶激光雷达观测网络(AD-Net)常用于识别东亚地区的沙尘事件并能准确反映其垂直分布特征[19][21][22],但站点分布有限;地面激光雷达可以获取长时间序列的定点观测数据,而且在监测沙尘天气的持续影响方面表现出比监测地面颗粒物更明显的优势[23],然而激光雷达组网观测未覆盖全球,局地沙尘垂直分布研究仍缺少数据支持。为克服使用单一数据的缺陷,本研究采用遥感卫星与地面激光雷达结合的技术手段分析沙尘天气的水平和垂直分布特征。

内蒙古地处蒙古高原,受上风区蒙古国沙尘天气影响显著,其中60%的沙尘事件来源于蒙古国跨境沙尘[24],更有研究指出,内蒙古中西部地区强沙尘天气呈增长态势[25],监测中蒙边界地区的沙尘有利于掌握跨境沙尘事件的传输特征。基于此,本文利用地面激光雷达数据、Himawari-8数据、气象数据和HYSPLIT模式对比分析2021年春季两次沙尘暴的时空分布特征、输送特征以及沙尘天气前后气象变化特征,揭示两次沙尘过程造成的影响,以为气溶胶来源和污染分析提供经验,提高环境空气质量预测预报的精度。

2. 数据与方法

2.1. 基于Himawari-8数据识别沙尘来源与过程

本文利用日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)提供的新一代静止气象卫星(Himawari-8)数据识别2021年春季两次强沙尘暴过程,可视化两次沙尘暴的源地、传输路径以及影响范围。Himawari-8卫星于2015年7月7日正式开始在全球范围内实时提供Himawari-8数据,是全球第一颗拍摄彩色图像的静止卫星,搭载的AHI传感器有16个波段:1~3为可见光,4~6为近红外波段,7~16为红外波段。Himawari-8卫星监测范围为85°E~225°E,60°N~60°S,空间分辨率为2 km,时间分辨率为10分钟。目前,Himawari-8卫星数据广泛应用于包括火灾识别、云检测、强降水/沙尘暴/台风预警、空气污染监测等领域,并在实时监测亚洲沙尘事件上优势显著[26]-[31],但无法获取长时间序列数据。本文采用Himawari-8红外通道沙尘RGB方法反演沙尘暴发生发展过程,追溯沙尘暴源地及其影响区域。该方法通过对比沙尘暴与其他物质反射和透射特性的差异,对3个红外通道进行处理:首先计算通道15与13、13与11亮温差,再与通道13亮温值进行RGB假彩色合成(R: B15 - B13, G: B13 - B11, B: B13),设置Gamma拉伸1/2.5/1,获取沙尘影像。在影像中粉红色阴影区域为沙尘天气,其中静态为浮尘和扬沙,移动的为沙尘暴或强沙尘暴。为便于区分,本文以北京时间为标准对所获取的数据进行时间转换,将两次沙尘暴过程定义为3月15日沙尘暴过程与3月27日沙尘暴过程。

2.2. 基于 HYSPLIT 后向轨迹模式模拟沙尘暴移动路径

本文使用 HYSPLIT 后向轨迹模式模拟沙尘暴的移动路径。HYSPLIT 模式是由美国国家海洋大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局(ABOM)联合开发的用于计算简单气团结构与模拟复杂扩散和复杂沉积的一个完整系统,该模式是拉格朗日方法和欧拉方法相结合的混合模型[32],被认为是大气科学中应用最广泛的大气传输和扩散模式之一。HYSPLIT 模式生成的轨迹线的长度可以用来判断气流的移动速度,一般情况下,轨迹线越长,气团运动越快。本文采用美国国家环境预报中心(NCEP)的全球数据同化系统(GDAS) GDAS1 气象资料,其水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,根据两次沙尘暴过程中激光雷达数据的消光系数与退偏振比的垂直分布特征,使用网页在线版 HYSPLIT 模式

(<https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive>)计算了每次观测中 500 m、1000 m 和 1500 m 的气团后向轨迹分析沙尘暴的来源与移动路径。

2.3. 基于激光雷达数据反演沙尘暴过程垂直分布特征

本文采用位于内蒙古自治区锡林郭勒盟阿巴嘎旗气象局(44.02°N , 115°E)的 LK-A-HP-01 型双波长(355 nm、532 nm)激光雷达探测沙尘分布高度,其地处我国中蒙边境地区(如图 1 所示),是蒙古国跨境沙尘传输至中国北方地区的重要位置。该激光雷达仪器的脉冲能量为 30 mJ,时间分辨率 1~30 分钟(可调),测量范围白天 ≥ 8 km,晚上达到 15 km 以上高度,探测盲区为 75 m。激光雷达基本结构由发射、接收和探测系统组成。本文利用 5 分钟和 7.5 m 空间分辨率的米散射后向散射信号检索气溶胶消光系数(AEC)和气溶胶退偏振比(PDR)与 PM10 颗粒物浓度数据。AEC 采用 Fernald 算法进行检索。气溶胶消光系数反映大气中不同气溶胶粒子通过散射和吸收作用,对某一波段太阳辐射衰减综合的描述,消光系数值越大,说明能见度越低;退偏振比反映气溶胶和云粒子的非球形特征,沙尘气溶胶为不规则粒子,其产生的退偏振比值较高,一般大于 0.2 [33] [34],因此通常利用激光雷达退偏振比数据判识沙尘气溶胶。在本研究中,我们使用了从 3 月 14 日的 00:00 到 3 月 15 日 24:00 和 3 月 26 日的 22:00 到 3 月 28 日 24:00 的激光雷达观测数据,分析沙尘事件的垂直分布特征。

2.4. 气象数据

本文利用沙尘暴期间监测到沙尘天气的地面天气观测(SYNOP)站点数据结合 Himawari-8 和 HYSPLIT 模式分析东亚地区发生的沙尘暴输送过程。SYNOP 气象报告中,天气代码(ww)是从 00 到 99 的两位数,其中与沙尘天气相关的天气代码为 ww = 06、07、07、09、30~35、98 [35] [36]。本文使用的沙尘天气组分为:ww = 06 表示出现浮尘天气,ww = 07 和 08 表示出现扬沙天气,ww = 09、30~35、98 为出现沙尘暴天气。此外,运用阿巴嘎旗站点每 3 小时测量一次的 SYNOP 气象数据的地表风速、气温、能见度、海平面气压等变量,以探析沙尘事件发生时气象要素的变化情况。

3. 结果与讨论

3.1. 基于 Himawari-8 数据、HYSPLIT 模式与地面观测数据的沙尘来源与过程分析

2021 年春季东亚地区发生了多起沙尘输送事件,其中 3 月 15 日沙尘暴与 3 月 27 日沙尘暴影响范围广且持续时间长,是最典型的沙尘输送事件。本文采用 Himawari-8 沙尘 RGB 方法进行沙尘判识,并将判识结果与 SYNOP 沙尘数据和 HYSPLIT 模式相结合揭示沙尘来源与发生发展过程,如图 1、图 2 所示。

2021 年 3 月 15 日沙尘暴过程如图 1 所示。3 月 13 日晚蒙古国西部 ULGI 站点出现沙尘暴天气,由于云的影响 himawari-8 未识别到云下沙尘。14 日蒙古国西部地区开始出现沙尘天气,个别站点出现沙尘

暴, 20:00 沙尘覆盖了蒙古国东南部区域, 而且以沙尘暴天气为主, 向东南方向传输, 随即我国内蒙古北部边境地区也开始出现沙尘天气(以沙尘暴为主), 且蒙古气旋及锋面于 14 日 20:00~15 日 08:00 从内蒙古东北部移动到东北地区[37]。15 日 08:00 中国北方地区出现了以沙尘暴、扬沙为主的沙尘天气, 部分站点表现为浮尘; 蒙古国、中国境内沙尘天气于当日 20:00 减弱表现为浮尘、扬沙天气, 沙尘略微南压。在 16 日新疆、甘肃等西北地区由扬沙浮尘增强为沙尘暴, 韩国朝鲜等地区也出现浮尘天气, 自此大范围的沙尘不再向东移, 反而造成西北地区的沙尘回流[38]。17 日韩国仍有部分站点监测到了浮尘天气, 我国西北地区扬沙浮尘天气持续。已有研究发现, 此次西北地区沙尘从 14 日持续到 19 日结束[39]。HYSPLIT 轨迹模式计算的 14 日 23:00 的 24 小时后向轨迹也表明了此次沙尘的来源, 图中气团从蒙古国境内夹卷蒙古国沙尘进入我国。

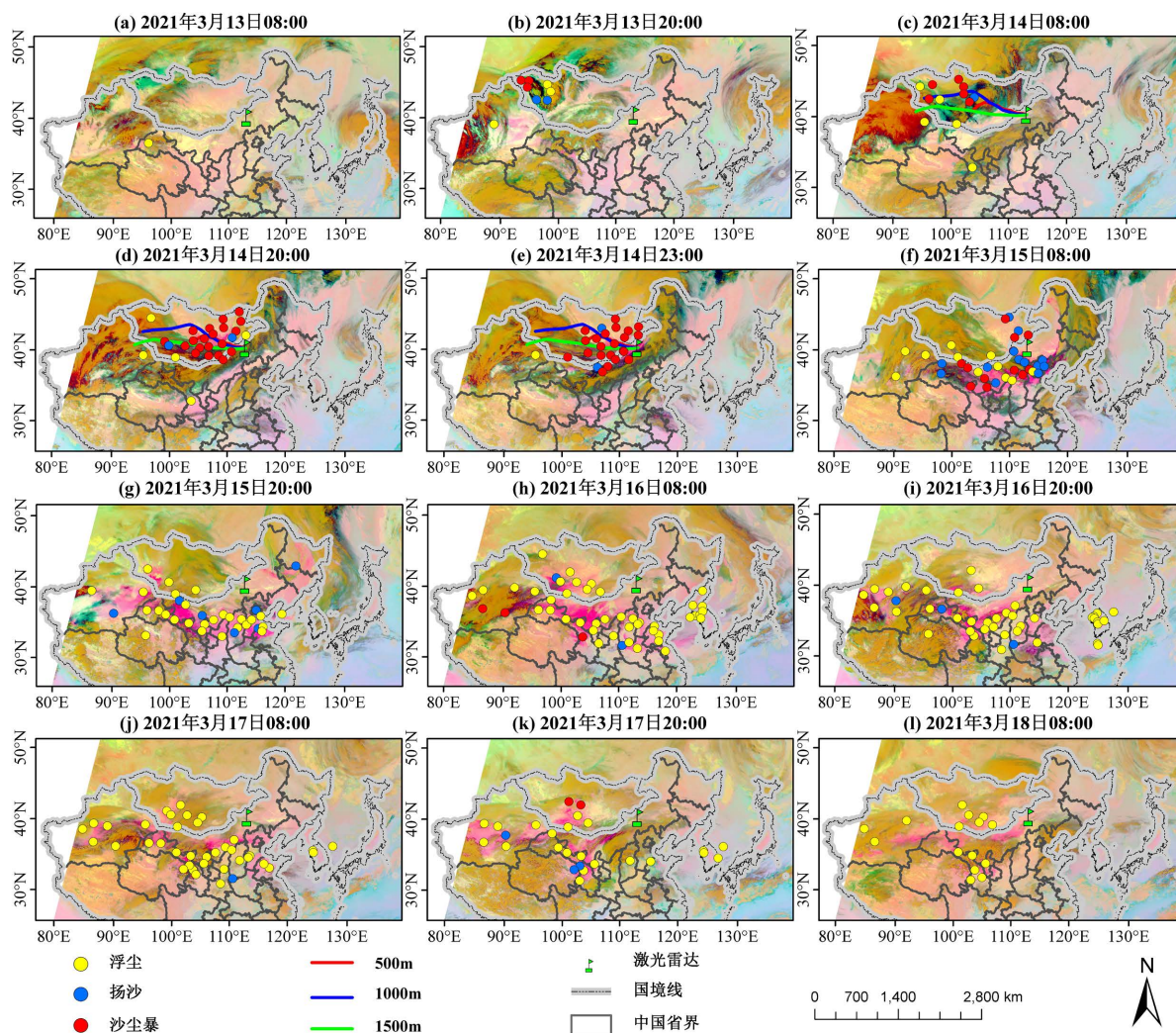


Figure 1. Dust monitoring maps of Himawari-8 from March 13~18, 2021 (The points are the site where dust is observed at the surface meteorological station, and the lines represent the 24 hours backward trajectory from the Lidar observation station at 23:00 UTC, March 14, 2021). Note: This map is based on the standard map of the Map Technical Review Center of the Department of Natural Resources (review No. GS (2016) 1600), the base map has not been modified

图 1. 2021 年 3 月 13 日~2021 年 3 月 18 日 Himawari-8 沙尘监测图(圆点为观测有沙尘出现的地面气象站点, 线表示 2021 年 3 月 14 日 23:00 从激光雷达观测站开始的 24 小时后向轨迹)。注: 该图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号为 GS (2016) 1600 号)制作, 底图无修改

2021年3月27日沙尘暴过程如图2所示。3月26日蒙古国西部ULGI站点最先出现了沙尘暴, himawari-8识别的沙尘区域也随之显现, 这比中分辨率成像光谱仪(MODIS)探测到沙尘事件的时间更早[40], 充分展现了 Himawari-8 卫星高时间分辨率的优势。随后沙尘自西向东影响蒙古国大部分地区, 于次日 08:00 沙尘区域扩展到中蒙边界, 27日 23:00 蒙古国受沙尘暴影响区域明显减少, 沙尘运输至内蒙古地区, 激光雷达观测站点表现为沙尘暴。从这一次沙尘暴可以清晰地看出 SYNOP 观测站点监测到的沙尘天气随着 Himawari-8 沙尘 RGB 影像中的沙尘区域的迁移而变化。28日沙尘袭击中国北方地区, 沙尘强度明显减弱, 京津冀地区表现为扬沙天气, 蒙古国境内沙尘趋于结束。29日沙尘影响区域持续东移扩展到朝鲜、韩国、日本等地区多表现为浮尘天气, 至此此次影响中国、蒙古国的大范围沙尘过程基本趋于结束。HYSPLIT 轨迹模式计算的 27日 20:00 的 24 小时后向轨迹也表明了此次沙尘来源于蒙古国, 图中气团从蒙古国境内穿过南部戈壁沙漠进入我国。

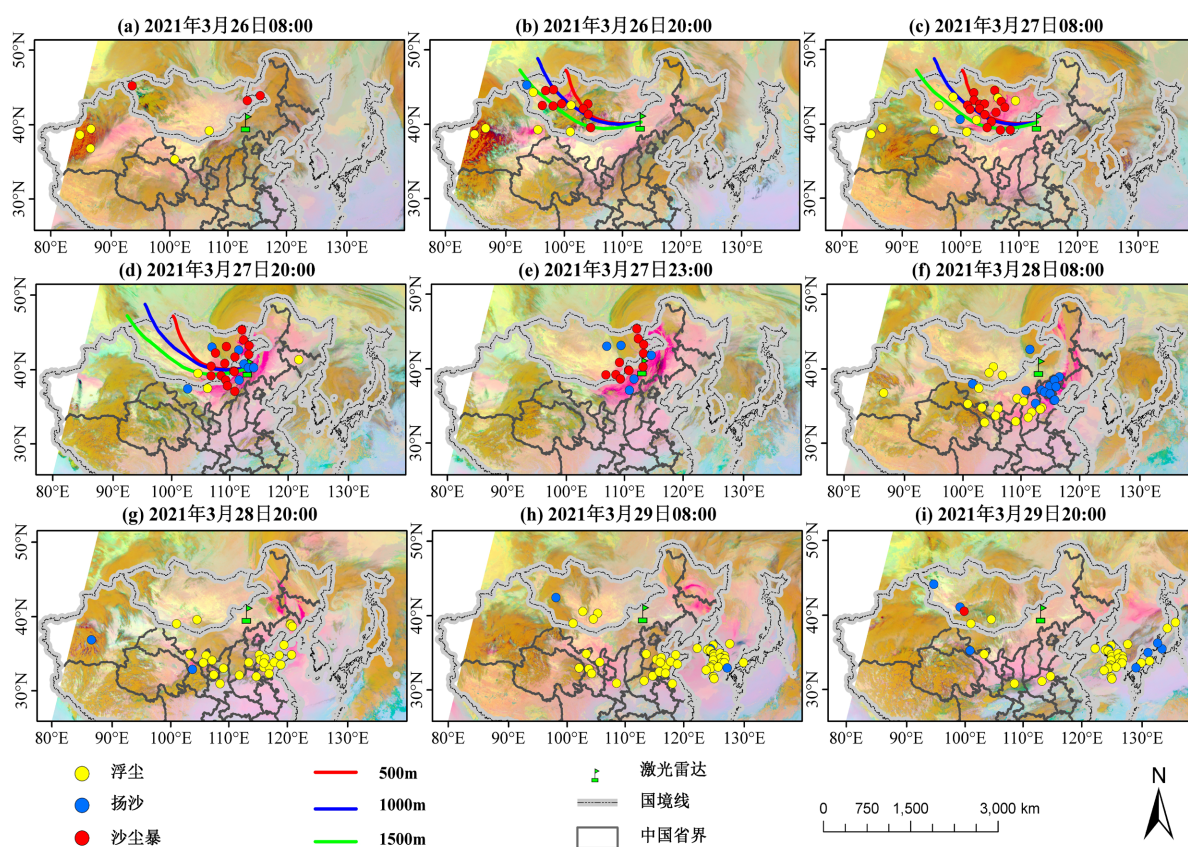


Figure 2. Dust monitoring maps of Himawari-8 from March 26~29, 2021 (The backward trajectory starts at 20:00 on March 27, 2021. Other Illustrations are same as Figure 1). Note: This map is based on the standard map of the Map Technical Review Center of the Department of Natural Resources (review No. GS (2016) 1600), the base map has not been modified

图 2. 2021 年 3 月 26 日~2021 年 3 月 29 日 Himawari8 沙尘监测图(后向轨迹以 2021 年 3 月 27 日 20:00 为起始时间, 其他同图 1)。注: 该图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号为 GS (2016) 1600 号)制作, 底图无修改

总的来说, 两次沙尘暴均起源于蒙古国西部, 且影响范围较广, 最早报告发生沙尘暴的站点为蒙古国西部 ULGI 站, 沙尘暴向东南运输均影响了蒙古国、中国北方地区、朝鲜、韩国等地区。不同的是, 3 月 15 日沙尘暴持续时间更长, 对下游地区造成的影响时间较长, 而 3 月 27 日沙尘暴影响范围更广, 沙尘暴从蒙古国西部输送至日本。

3.2. 内蒙古激光雷达反演的沙尘天气过程垂直分布特征分析

内蒙古地处中国北部的蒙古高原,气候干燥,常年经受沙尘暴的袭击。而激光雷达观测仪器恰好安装于浑善达克沙地北部中蒙边境地区,可以探测跨境沙尘过程的垂直分布特征、开始和结束时间。图 3 为 2021 年 3 月 14 日~15 日、3 月 26 日~28 日在内蒙古阿巴嘎旗的激光雷达观测沙尘事件垂直分布图。

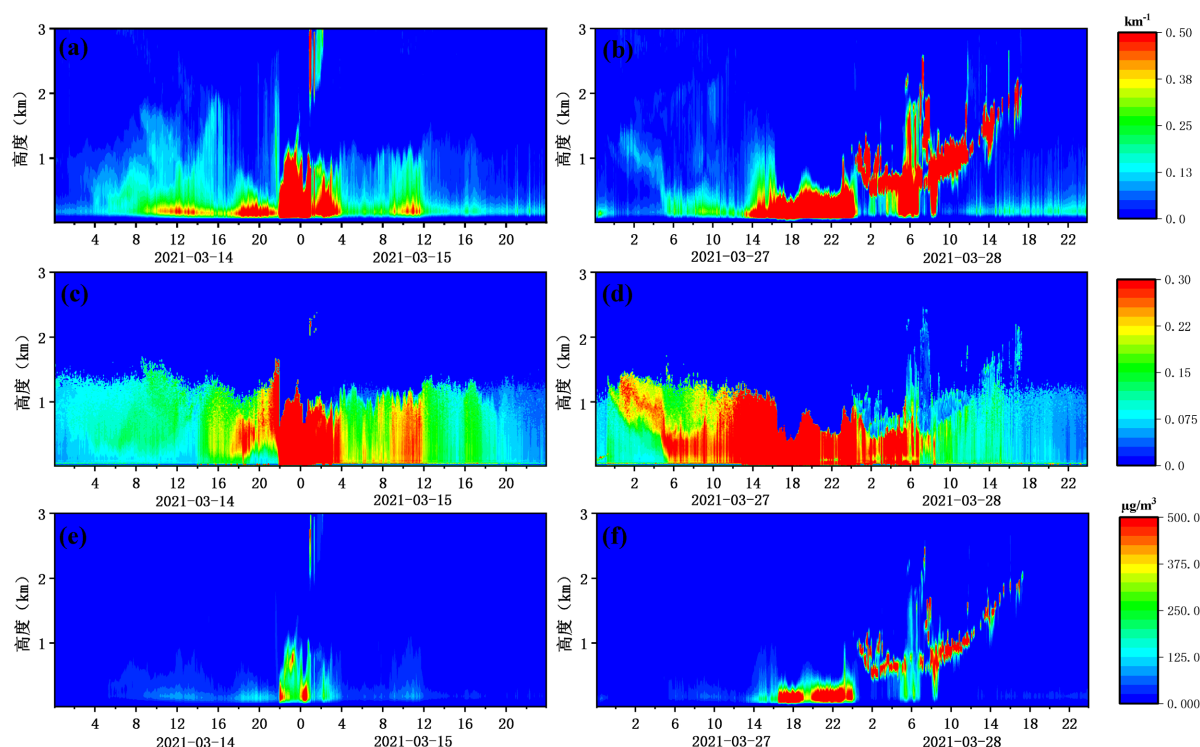


Figure 3. Time series graphs of extinction coefficient (a) (b), depolarization ratio (c) (d) and PM10 (e) (f) monitored by LiDAR during March 14~15, 2021 (a), (c), (e) and March 26~28, 2021 (d), (e), (f)

图 3. 2021 年 3 月 14~15 日(a)、(c)、(e)、3 月 26~28 日(d)、(e)、(f)激光雷达监测消光系数(a) (b)、退偏振比(c) (d)、PM10 (e) (f)时间序列图

3 月 14 日近地面消光系数值高于 0.5 km^{-1} , 表明沙尘污染前已存在浓度高的细颗粒物污染, 15:00 在海拔 1.4 km 以下首次观测到退偏振比值大于 0.2 的沙尘气溶胶, 并未沉降到地面。22:00 以后沙尘影响地面, 激光雷达监测的粒子退偏振比在 0.3 左右, 其对应的 PM10 颗粒物浓度也升高, 最大浓度达到 $800 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与之对应的时间的图 1(d)、图 1(e)中 20:00~23:00 沙尘覆盖范围过境激光雷达观测点, 此次沙尘传输高度最高到达 1.7 km。3 月 15 日 05:00 沙尘强度有所减弱, 一直到 12:00 沙尘影响结束。之后监测点上空的退偏振比值有所减小, 但对近地面空气污染依然有影响。

3 月 26 日 23:25 在海拔 0.6~1.4 km 处观测到退偏振比 0.2~0.35 的沙尘输送过程。27 日 05:00 左右 0.5 km 以下沙尘退偏振比大于 0.25, 0.5 km 以上为 0.15~0.25, 这可能是由于大粒径沙尘颗粒的优先沉降。08:00~10:00 期间 0.7~1.4 km 高度出现另一沙尘层。13:00 后与近地面污染物混合, PM10 颗粒物浓度也升高, 最大浓度达到 $1000 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图 2(d)、图 2(e)中沙尘覆盖范围过境激光雷达观测点, 与之对应的激光雷达探测沙尘高度低于 1.4 km。3 月 28 日 10:00 沙尘影响结束。

图 4 给出了各个沙尘事件中四个时间段的 532 nm 处消光系数、退偏振比平均值的垂直分布廓线。3 月 14 日沙尘过程开始前(11:30~12:30), 0.25 km 以下消光系数达到 0.5 km^{-1} , 退偏振比较小, 而上层高值

区对应的消光系数值较小,表明 0.25 km 以下该时段气溶胶由浓度较高的球形粒子组成。3 月 14 日下午(17:30~18:30),消光系数垂直结构相似,1 km 以下退偏振比值 0.15~0.3,说明该时段近地面球形粒子与沙尘粒颗粒发生混合,导致近地面退偏振比比纯沙尘颗粒较小。3 月 14 日晚(23:00~00:00),1 km 以下高度退偏振比值高达 0.4,其对应的消光系数值也增大,可能是由于出现密集的低云,沙尘天气持续造成影响。3 月 15 日下午(16:00~17:00),1.2 km 以下退偏振比小于 0.2,消光系数有所减弱,沙尘影响结束。3 月 27 日的沙尘过程初始阶段(01:00~02:00),0.8 km~1.4 km 沙尘层消光系数达到 0.1 km^{-1} ,退偏振比在 0.2~0.3。3 月 27 日上午(08:00~09:00),0.6 km 以上高度退偏振比 0.2,0.6 km 以下退偏振比较大至 0.3 左右,沙尘发生了沉降,消光系数峰值为 0.3 km^{-1} 。28 日凌晨(00:30~01:00),0.7 km 以上消光系数异常大对应的退偏振比值较小说明有水云存在,0.7 km 以下沙尘层退偏振比 0.3 左右。28 日上午(09:00~09:30),0.6 km 以下退偏振比 0.15 左右,消光系数减弱,0.6 km 以上消光系数大退偏振比小,仍有水云存在。

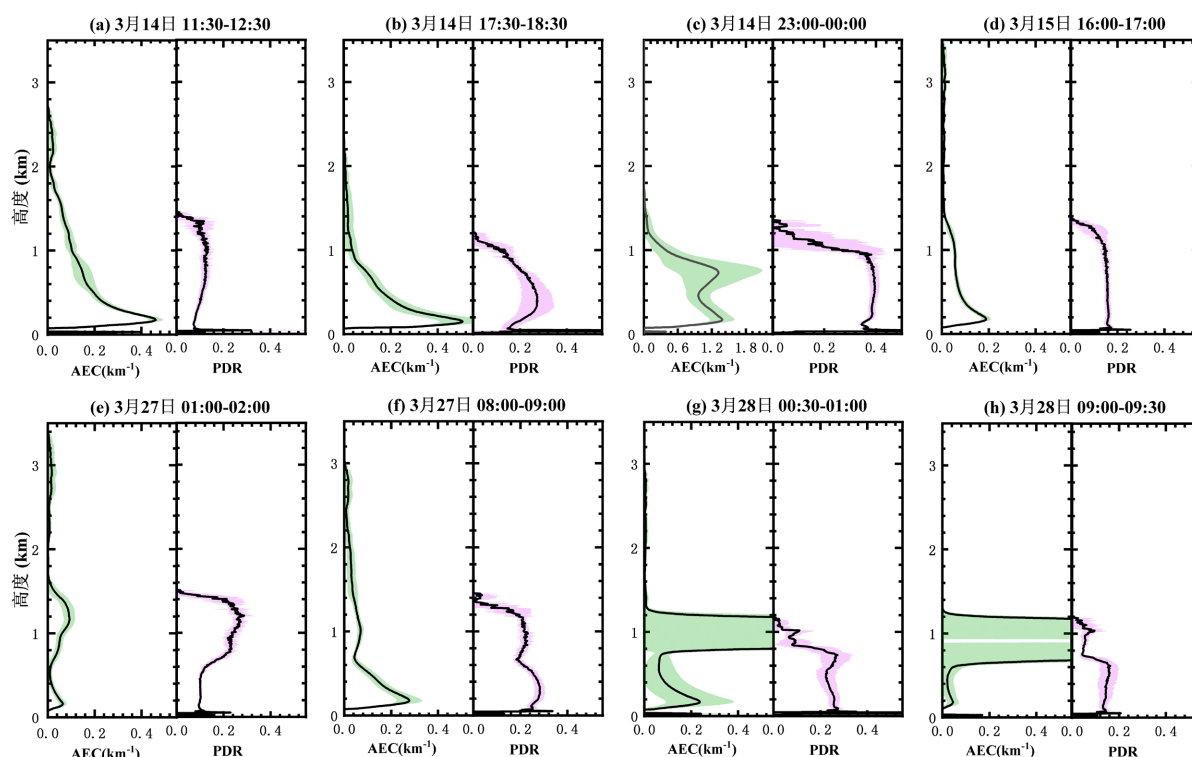


Figure 4. Average vertical profiles of extinction coefficient (AEC) and depolarization ratio (PDR) observed by Lidar in different time periods (The shaded part represents the standard deviation of the extinction coefficient and depolarization ratio)

图 4. 激光雷达观测的不同时间段消光系数(AEC)、退偏振比(PDR)的平均垂直廓线图(阴影部分代表消光系数和退偏振比的标准差)

总的来看,两次跨境沙尘过程的垂直分布特征与其持续时间存在一定的差异。3 月 15 日沙尘过程开始前近地面已出现细颗粒物污染随后与沙尘混合,沙尘层垂直分布高度更高,而 3 月 27 日沙尘过程持续时间更长,PM₁₀ 颗粒物浓度较高。

3.3. 激光雷达反演的 PM₁₀ 数据与消光系数

激光雷达探测盲区为 75 m,图 5 为 82.5 m 高度的激光雷达反演的消光系数与颗粒物浓度时间序列图。由图 5 可知,近地面沙尘过程 PM₁₀ 浓度峰值分别达到 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$,激光雷达探测得到的消光

系数与颗粒物浓度具有良好的一致性,可以反映气溶胶颗粒物浓度变化特征。激光雷达反演的消光系数与颗粒物浓度变化趋势基本一致,近地面消光系数越大颗粒物浓度越高。消光系数与颗粒物浓度成正比,激光雷达探测得到的消光系数与颗粒物浓度具有良好的一致性,可以反映气溶胶颗粒物浓度变化特征。文中激光雷达反演的 PM10 颗粒物浓度空间分布有待进一步与遥感数据、地面空气质量监测数据进行校准,后续对其校准订正并用于激光雷达的区域组网观测,可以为沙尘的预警预报提供数据支持。

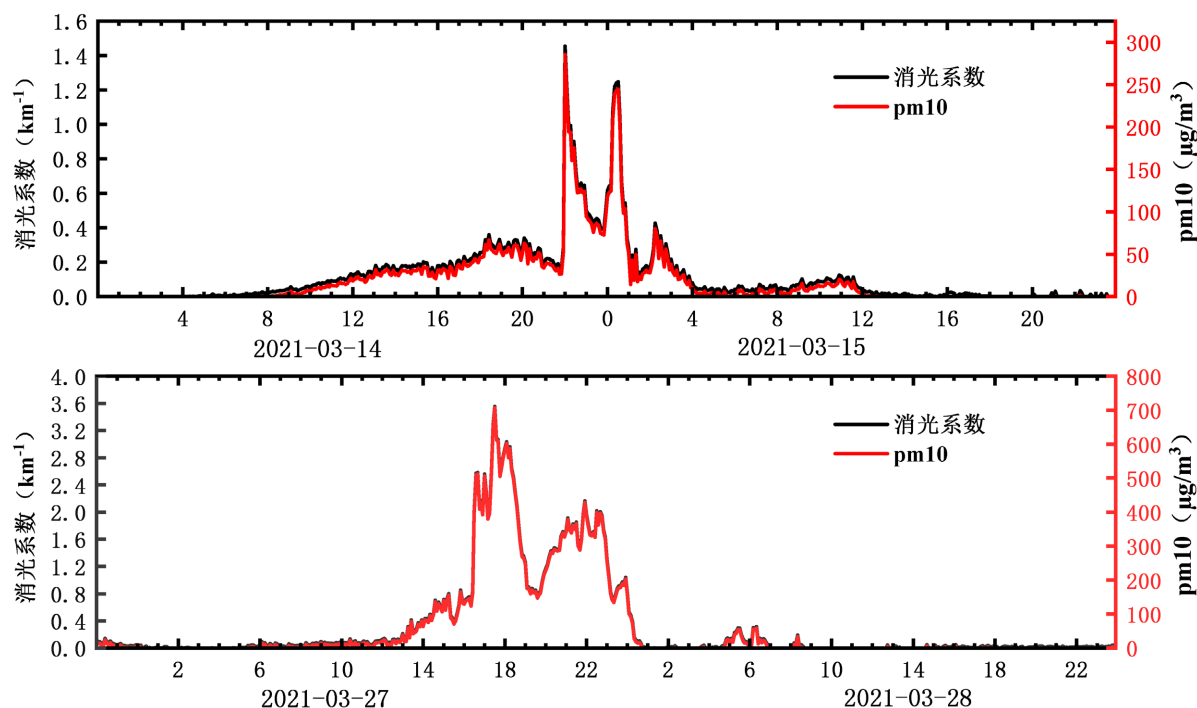


Figure 5. Extinction coefficient and PM10 concentration at 82.5 m retrieved by Lidar

图 5. 激光雷达反演 82.5 米处消光系数与 PM10 浓度图

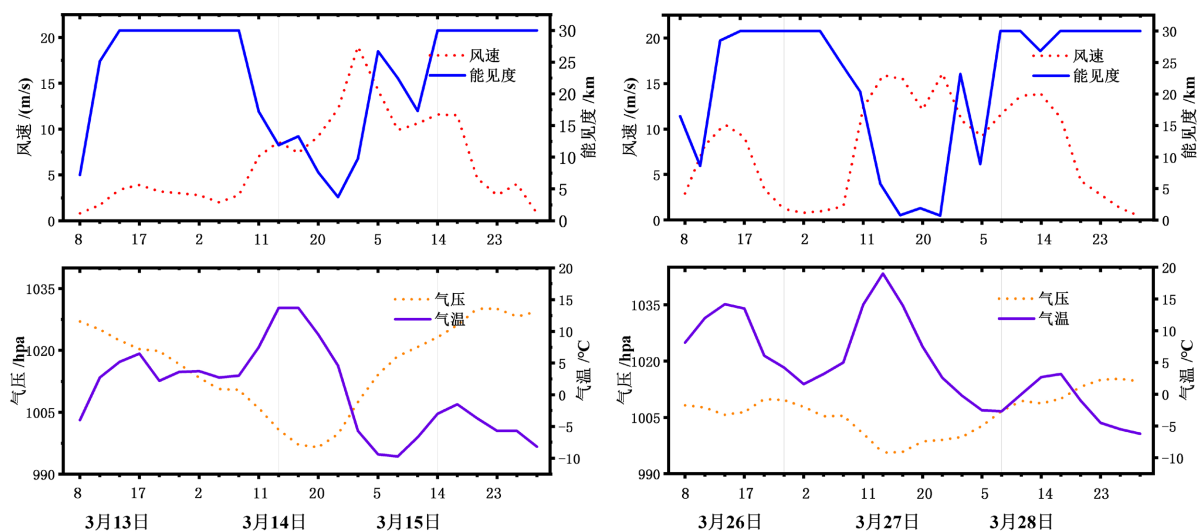


Figure 6. The 3-hour variation curves of wind speed, visibility, air temperature and sea level pressure at ABAG QI Station during two dust events

图 6. 两次沙尘事件中阿巴嘎旗站点风速、能见度、气温及海平面气压的 3 小时变化曲线

3.4. 沙尘暴过程前后气象特征分析

气象要素在沙尘过程前后发生剧烈的变化, 本文利用阿巴嘎旗站点地面观测气象数据对比分析两次沙尘天气过境前后气象要素的变化, 如图 6 所示。3 月 15 日沙尘事件发生前地面风速维持在 2.5 m/s, 由于近地面细颗粒物浓度高能能见度较低, 至 14 日 14:00, 气温呈上升, 气压呈下降趋势。沙尘事件期间 14 日地面风速上升至 19 m/s, 能见度降低至 3.7 km, 直到 3 月 15 日 14:00 气压增加 22.4 hPa, 气温下降 16.7℃。沙尘天气过后, 能见度回升到 30 km, 风速逐渐降低。3 月 27 日沙尘事件期间气象要素演变过程与 3 月 15 日的沙尘过程有所区别。沙尘沉降至地面之前, 地面风速维持在 1 m/s, 有利于沙尘沉降, 气压呈下降趋势, 27 日 2:00 到 11:00 增温 12.5℃, 27 日 14:00 地面风速骤增为 15.9 m/s, 23:00 风速达到峰值为 16.1 m/s, 沙尘天气期间能见度降至 0.7 km, 气温有所下降。27 日 14:00 到 28 日 08:00, 气压增加 13 hPa, 随后能见度恢复至 30 km, 此次沙尘事件基本结束。两次沙尘事件前后风速和能见度变化均表现为风速骤增能见度降低。3 月 15 日沙尘过程风速较高, 而 3 月 27 日沙尘过程中能见度较低。

4. 结论

本文利用 Himawari-8 遥感影像数据结合 SYNOP 沙尘数据与 HYSPLIT 后向轨迹模式分析了沙尘天气的发生与输送过程, 从而确定了沙尘的来源。并利用阿巴嘎旗站点激光雷达数据和气象数据对比分析了沙尘过程的垂直分布特征与气象要素的变化情况。两次沙尘暴均起源于蒙古国西部, 其持续时间、垂直分布特征、污染程度均有差别。

1) 2021 年 3 月 15 日和 3 月 27 日的沙尘暴均由位于蒙古国西部边境地区的 ULGI 站点最早监测到, 但在 Himawari-8 遥感影像中显示两次沙尘暴分别于 3 月 14 日与 26 日开始向东南方向输送, 并于 3 月 14 日 20:00 和 3 月 27 日 08:00 后跨境影响中国北方地区、朝鲜、韩国等地区。其中, 3 月 15 日的沙尘暴对中国的影响时间更长, 而 3 月 27 日的沙尘暴影响更广, 甚至波及日本。

2) 中蒙边境地区激光雷达反演结果显示, 沙尘过程消光系数与退偏振比发生剧烈的变化。3 月 15 日沙尘传输高度最高达 1.7 km, 近地面 PM₁₀ 最高浓度达 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 3 月 27 日凌晨在 0.6~1.4 km 高度范围内有明显的沙尘传输过程, 随后沉降至地面, 近地面 PM₁₀ 最高浓度为 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对比之下, 3 月 15 日沙尘传输高度更高, 而 3 月 27 日的沙尘天气持续时间更长。

3) 激光雷达反演得到的有效最低观测高度处的消光系数与近地面 PM₁₀ 颗粒物浓度变化有较好的对应关系。

4) 两次沙尘天气发生前后气象条件发生剧烈变化。3 月 15 日沙尘过程风速更大、气压增加 22.4 hPa、能见度 3.7 km; 后者能见度更低, 为 0.7 km。

基金项目

国家自然科学基金项目(41867070); 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSH0091); 内蒙古自治区军民融合重点科研项目及软科学研究项目(JMRKX202207)。

参考文献

- [1] Furman, H.K.H. (2003) Dust Storms in the Middle East: Sources of Origin and Their Temporal Characteristics. *Indoor and Built Environment*, **12**, 419-426. <https://doi.org/10.1177/1420326X03037110>
- [2] Gao, T., Han, J., Wang, Y., Pei, H. and Lu, S. (2012) Impacts of Climate Abnormality on Remarkable Dust Storm Increase of the Hunshadak Sandy Lands in Northern China during 2001-2008. *Meteorological Applications*, **19**, 265-278. <https://doi.org/10.1002/met.251>
- [3] Javadian, M., Behrangi, A. and Sorooshian, A. (2019) Impact of Drought on Dust Storms: Case Study over Southwest

- Iran. *Environmental Research Letters*, **14**, Article ID: 124029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab574e>
- [4] Khalidy, R., Salmabadi, H. and Saeedi, M. (2019) Numerical Simulation of a Severe Dust Storm over Ahvaz Using the HYSPLIT Model. *International Journal of Environmental Research*, **13**, 161-174. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0164-1>
 - [5] Huang, J., Minnis, P., Chen, B., Huang, Z., Liu, Z., Zhao, Q., *et al.* (2008) Long-Range Transport and Vertical Structure of Asian Dust from CALIPSO and Surface Measurements during PACDEX. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D23212. <https://doi.org/10.1029/2008JD010620>
 - [6] Shao, Y. and Dong, C.H. (2006) A Review on East Asian Dust Storm Climate, Modelling and Monitoring. *Global and Planetary Change*, **52**, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.011>
 - [7] Tsedendamba, P., Dulam, J., Baba, K., Hagiwara, K., Noda, J., Kawai, K., *et al.* (2019) Northeast Asian Dust Transport: A Case Study of a Dust Storm Event from 28 March to 2 April 2012. *Atmosphere*, **10**, Article 69. <https://doi.org/10.3390/atmos10020069>
 - [8] Cheng, M.F., Ho, S., Chiu, H.F., Wu, T., Chen, P. and Yang, C. (2008) Consequences of Exposure to Asian Dust Storm Events on Daily Pneumonia Hospital Admissions in Taipei, Taiwan. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, **71**, 1295-1299. <https://doi.org/10.1080/15287390802114808>
 - [9] Ko, R., Hayashi, M., Hayashi, H., Hayashi, K., Kato, H., Kurata, Y., Fuchino, Y., Nakamichi, T., Migita, H., Yano, H., Sakata, T. and Uchio, E. (2016) Correlation between Acute Conjunctivitis and Asian Dust on Ocular Surfaces. *Journal of Toxicology and Environmental Health—Part A—Current Issues*, **79**, 367-375. <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1162248>
 - [10] Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Korras-Carraca, M. and Mihalopoulos, N. (2021) A Global Climatology of Dust Aerosols Based on Satellite Data: Spatial, Seasonal and Inter-Annual Patterns over the Period 2005-2019. *Remote Sensing*, **13**, Article 359. <https://doi.org/10.3390/rs13030359>
 - [11] Wang, F., Yang, T., Wang, Z., Cao, J., Liu, B., Liu, J., Chen, S., Liu, S. and Jia, B. (2021) A Comparison of the Different Stages of Dust Events over Beijing in March 2021: The Effects of the Vertical Structure on Near-Surface Particle Concentration. *Remote Sensing (Basel, Switzerland)*, **13**, Article 3580. <https://doi.org/10.3390/rs13183580>
 - [12] 国际在线. 蒙古国特大沙尘暴遇难人数升至 10 人仍有 11 人失踪[EB/OL]. https://news.cri.cn/20210315/190ebf8f-3ed2-dc44-725e-97d05cd53aeb.html? zbs_baidu_bk, 2023-03-07.
 - [13] 新华网. 蒙古国强沙尘暴和暴风雪致死人数升至 10 人[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/world/2021-03/15/c_1127214673.htm, 2023-03-07.
 - [14] 央广网. 北京发布沙尘暴黄色预警信号 15 日傍晚沙尘将逐渐减弱[EB/OL]. http://news.cnr.cn/dj/20210315/t20210315_525436505.shtml, 2023-03-07.
 - [15] Xu, X., Zhao, P., Yin, Y., Cheng, W., Wang, J., Li, P., Liu, Y., Dai, J. and Yuan, W. (2022) Dust Particles Transport during the Rare Strong Sandstorm Process in Northern China in Early Year 2021. *Air Quality, Atmosphere & Health*, **15**, 929-936. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01159-2>
 - [16] 腾讯网. 经济损失 3000 余万元! 一季度 6 次沙尘天气过程, 近 10 年来同期最多[EB/OL]. <https://new.qq.com/rain/a/20210408A0D3E600>, 2023-03-07.
 - [17] 腾讯网. 蒙古特大沙尘暴从何而来? 为何中韩两国也齐齐受灾? [EB/OL]. <https://new.qq.com/rain/a/20210317A09WZF00>, 2023-03-07.
 - [18] Chen, S., Huang, J., Li, J., Jia, R., Jiang, N., Kang, L., Ma, X. and Xie, T. (2017) Comparison of Dust Emissions, Transport, and Deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011. *Science China Earth Sciences*, **60**, 1338-1355. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9051-0>
 - [19] Minamoto, Y., Nakamura, K., Wang, M., Kawai, K., Ohara, K., Noda, J., Davaanyam, E., Sugimoto, N. and Kai, K. (2018) Large-Scale Dust Event in East Asia in May 2017: Dust Emission and Transport from Multiple Source Regions. *Sola*, **14**, 33-38. <https://doi.org/10.2151/sola.2018-006>
 - [20] Tan, S., Li, J., Che, H., Chen, B. and Wang, H. (2017) Transport of East Asian Dust Storms to the Marginal Seas of China and the Southern North Pacific in Spring 2010. *Atmospheric Environment*, **148**, 316-328. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.054>
 - [21] Sugimoto, N., Nishizawa, T., Shimizu, A., Matsui, I., Jin, Y., Singh, U.N. and Asai, K. (2014) Characterization of Aerosols in East Asia with the Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-Net). *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **9262**, 92620K. <https://doi.org/10.1117/12.2069892>
 - [22] Kawai, K., Kai, K., Jin, Y., Sugimoto, N. and Batdorj, D. (2018) Lidar Network Observation of Dust Layer Evolution over the Gobi Desert in May 2013. *EPJ Web of Conferences*, **176**, Article No. 5009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817605009>
 - [23] 包新荣, 王莉娜, 杨燕萍, 陶会杰, 杨丽丽. 基于激光雷达对兰州市强沙尘过程的分析研究[J]. 干旱区资源与环

- 境, 2021, 35(1): 92-99.
- [24] Bao, T., Gao, T., Nandintsetseg, B., Yong, M. and Jin, E. (2021) Variations in Frequency and Intensity of Dust Events Crossing the Mongolia-China Border. *Sola*, **17**, 145-150. <https://doi.org/10.2151/sola.2021-026>
- [25] 包春玲, 咏梅, 金额尔德木吐, 包玉龙, 图布新巴雅尔, 包玉海. 东亚沙尘区域时空变化特征分析[J]. 地理研究, 2021, 40(11): 3002-3015.
- [26] 陈洁, 郑伟, 刘诚. Himawari-8 静止气象卫星草原火监测分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 197-204.
- [27] Liu, C., Yang, S., Di, D., Yang, Y., Zhou, C., Hu, X. and Sohn, B. (2022) A Machine Learning-Based Cloud Detection Algorithm for the Himawari-8 Spectral Image. *Advances in Atmospheric Sciences*, **39**, 1994-2007. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0366-x>
- [28] 朱平, 肖建设. 青海高原短时强降水天气的葵花-8 卫星监测预警特征对比分析[J]. 高原气象, 2022, 41(2): 502-514.
- [29] Bao, C., Yong, M., Bueh, C., Bao, Y., Jin, E., Bao, Y. and Purevjav, G. (2022) Analyses of the Dust Storm Sources, Affected Areas, and Moving Paths in Mongolia and China in Early Spring. *Remote Sensing*, **14**, Article 3661. <https://doi.org/10.3390/rs14153661>
- [30] 许冬梅, 沈菲菲, 李泓, 刘瑞霞, 王易, 束艾青. 新一代静止气象卫星葵花 8 号的晴空红外辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 40-52.
- [31] 伍万祥, 吴艳兰, 江鹏, 宁海涛. 地气解耦的Himawari-8 卫星 PM_{2.5}浓度估算深度神经网络方法[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1753-1763.
- [32] Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. and Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **96**, 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- [33] 宋跃辉, 华灯鑫, 李仕春, 王玉峰, 狄慧鸽, 强力虎. 微脉冲偏振激光雷达探测城市底层气溶胶[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1140-1144.
- [34] 刘东, 戚福弟, 金传佳, 岳古明, 周军. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1093-1100.
- [35] Takemi, T. and Seino, N. (2005) Dust Storms and Cyclone Tracks over the Arid Regions in East Asia in Spring. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D11S-D18S. <https://doi.org/10.1029/2004JD004698>
- [36] Wu, J., Kurosaki, Y., Shinoda, M. and Kai, K. (2016) Regional Characteristics of Recent Dust Occurrence and Its Controlling Factors in East Asia. *Sola*, **12**, 187-191. <https://doi.org/10.2151/sola.2016-038>
- [37] 张璐, 宋桂英, 范凡, 吴昊, 邹逸航, 周志花, 张昕, 高韶勃. 2021 年 3 月 14-16 日中国北方地区沙尘暴天气过程诊断及沙尘污染输送分析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(9): 351-363.
- [38] 段伯隆, 刘新伟, 郭润霞, 宋强, 狄潇泓, 段明铿. “3·15”北方强沙尘暴天气成因分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 541-553.
- [39] 杨晓军, 张强, 叶培龙, 秦豪君, 徐丽丽, 马莉, 巩崇水. 中国北方 2021 年 3 月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 245-255.
- [40] He, Y., Yi, F., Yin, Z., Liu, F., Yi, Y. and Zhou, J. (2022) Mega Asian Dust Event over China on 27-31 March 2021 Observed with Space-Borne Instruments and Ground-Based Polarization Lidar. *Atmospheric Environment*, **285**, Article ID: 119238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119238>