

基于HYSPLIT模式的北京两场 一次沙尘暴过程探究及 气象服务保障分析

徐梦翔, 袁 为, 王 跃

民航气象中心, 北京

收稿日期: 2021年10月21日; 录用日期: 2021年11月5日; 发布日期: 2021年11月15日

摘 要

利用机场报文、ECWMF-ERA5再分析、北京市环境监测保护中心的PM10浓度等资料, 运用HYSPLIT模式对2021年3月15日北京首都机场和大兴机场发生的一次强沙尘过程进行了研究, 并结合对航空运行的影响探讨了此次过程的气象服务保障情况。结果表明: 此次沙尘过程是由对流层中低层强干冷平流引导蒙古气旋后部冷高压东移南下导致的。冷高压前沿位置偏南, 影响大兴机场的沙尘路径也偏南, 同时沙尘翻山后受地面偏北气流影响向南扩散, 使得大兴机场不仅出现大风天气, 还出现了沙尘暴天气。影响首都机场的沙尘路径偏北, 因此首都机场以大风天气为主。此次过程中, 各级民航气象部门对大兴机场沙尘暴天气的预报前期较为乐观, 但由于前期对大风的预报结论准确, 过程中服务及时有效, 此次沙尘过程对首都和大兴机场的航空运行影响相对可控。

关键词

沙尘, HYSPLIT模式, 蒙古气旋, 气象服务, 航空运行

Research on a Dust Storm Process and Analysis of Meteorological Service Guarantee in Beijing Capital International Airport and Beijing Daxing International Airport Based on HYSPLIT Model

Mengxiang Xu, Wei Yuan, Yue Wang

Aviation Meteorological Center, CAAC, Beijing

Received: Oct. 21st, 2021; accepted: Nov. 5th, 2021; published: Nov. 15th, 2021

Abstract

Based on the data of airport reports, ECWMF-ERA5 reanalysis datasets and PM10 concentration data of Beijing Environmental Monitoring and Protection Center, a heavy dust process occurred in Beijing capital international airport and Beijing Daxing international airport on March 1, 2021 was studied by using HYSPLIT model. And the meteorological service guarantee was also discussed in combination with the impact on civil aviation. The results showed that the dust was sent by the cold anticyclone behind the Mongolia Cyclone which was led to move southward by the dry and cold advection in the lower troposphere. Front of cold anticyclone was located to the south, thus the dust path to Beijing Daxing international airport was to the south. At the same time, the dust spread southward after crossing the mountain under the influence of north wind, which resulted in not only high wind but also sandstorm in Beijing Daxing international airport. The path of dust to the Beijing capital international airport is further north. For this process, civil aviation meteorological departments are optimistic about the severity of the weather in Beijing Daxing international airport. But, due to the accurate prediction of high wind and timely and effective services, the impact of dust weather on civil aviation of two airports was limited.

Keywords**Dust, HYSPLIT Model, Mongolia Cyclone, Meteorological Guarantee, Aviation Operation**

Copyright © 2021 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

沙尘是影响航空运行安全的重要灾害性天气之一[1] [2]。当有沙尘天气时，常伴有低能见度和大风，不仅容易造成飞机迷航、着陆困难、无法起降等问题，还常使飞机在着陆时偏离跑道。此外，沙粒与飞机之间的摩擦产生的静电可干扰无线电通讯，沙粒进入机体和发动机可造成机件故障、油路堵塞等[3]。因此，探究沙尘来源及传输过程对提高航空气象服务质量，保障航空运行安全及效率至关重要。

北京处在沙尘暴高发区的下风方向，易受沙尘天气侵袭。HYSPLIT 模式是研究沙尘传输、沉降以及回流机制的重要手段[4] [5]。花丛等[6]通过 HYSPLIT 沙尘模式对影响北京的两次沙尘传输轨迹进行追踪和对比分析，发现由蒙古气旋引起的两次沙尘过程受大气中低层的偏南风影响，沙尘通过回流轨迹输送至北京。同样受蒙古气旋影响，王华等[7]对比分析影响北京两次的重污染过程，发现沙尘除了通过低层回流传输之外，还可以通过西北路径翻越山脉传输至北京。由此可见，不同过程中沙尘传输至北京的路径不同。王郭臣等[8]结合 HYSPLIT 模式对北京冬季重污染过程进行轨迹聚类分析，认为西北方向的气团路径占主要作用，低层南部气流的作用也不容忽视。桂海林[9]等利用 HYSPLIT 模式追踪北京春季一

次沙尘天气的低层传输轨迹,发现沙尘轨迹主要来自北路。因此,在不同过程中,还需要结合 HYSPLIT 模式来对沙尘路径进行具体分析。近年来, HYSPLIT 模式用于影响机场的沙尘过程的研究较少。受北京周边地形影响,沙尘在北京不同区域的堆积浓度不同[10],而首都和大兴机场周边地形环境也有差异。因此,仍然需要结合 HYSPLIT 模式来探究沙尘分别对北京两场的影响如何。

研究表明,北京春季沙尘暴天气出现较少[11]。2021 年春季,北京沙尘天气过程频发,共经历了 4 次较强沙尘天气过程,其中 3 月 15 日的沙尘过程强度达沙尘暴级别,是近 10 年以来我国经历的最强的一次沙尘天气过程,并给首都和大兴机场的航班运行带来一定的影响。因此,本文选取 2021 年 3 月 15 日的沙尘暴天气过程,首先运用 HYSPLIT 模式对传输到首都和大兴机场的沙尘路径进行分析,其次探究导致此次沙尘过程的天气原因,最后结合沙尘过程对航空运行的影响分析了气象服务保障情况,以便于对今后的沙尘预报和气象服务提供借鉴与参考。

2. 资料与方法

2.1. 数据资料

本文选取 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)再分析资料中 GDAS (the Global Data Assimilation System)资料用于 HYSPLIT 式计算,选取的时间为 3 月 15 日,时间分辨率为 3 h,空间水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向上为 1000~100 hPa 共 17 层,所用二维变量为海平面气压、2 米相对湿度、2 米温度、10 米纬向风、10 米经向风,所用三维变量为气温、纬向风、经向风、垂直风、相对湿度、位势高度。

地面风场选取 ECWMF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)再分析资料中 ERA-5 资料,时间分辨率为 1 h,空间水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

PM10 浓度逐小时资料来源于北京市环境保护监测中心。

机场天气实况资料来自机场报文数据。

2.2. 方法

HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)模式是由美国国家海洋和大气管理局与澳大利亚气象局联合开发,用于追踪气团传输和扩散轨迹。由于其包含较为完整的沉降、扩散和传输模式,常被用于沙尘溯源和传输研究中。本文利用 HYSPLIT 模式计算后向轨迹来分析不同高度层的沙尘输送至机场的路径特征。分别选择首都和大兴机场为参考点,参考高度分别为各自机场标高(首都机场标高 35 米,大兴机场标高 25 米)、800 米、1500 米。

3. 沙尘过程的机场实况

3 月 15 日,首都和大兴机场全天伴有扬沙或浮尘天气,期间两场出现大风或沙暴天气。表 1 给出了 15 日沙尘过程中机场出现的重要天气及发生时段。可以发现此次过程中,沙尘对首都和大兴机场的影响程度不同。大兴机场的天气更为恶劣,具有典型的沙尘暴天气特征,伴有低能见度的沙暴和大风,沙暴时间持续较长,维持近两小时,能见度最低达 600 米。15 日上午沙暴席卷过程中,大兴机场也出现较短时次的超过 12 米/秒的大风。沙暴过后,大兴机场在 15 日下午以西北大风伴扬沙为主,大风持续两个半小时,最大平均风速达 12~14 米/秒,最大阵风达 19 米/秒。首都机场受沙尘天气影响较小,主要以扬沙或浮尘为主,能见度在 800 米以上,只出现较短时次的西北大风,平均风 12~13 米/秒,阵风 17~18 米/秒。首都机场和大兴机场相距仅 67 公里左右,为何在同一次沙尘过程的天气影响程度不同,下面将从沙尘输送机制、天气成因及其与地形的关系等方面进一步分析。

Table 1. Significant weather of Beijing capital international airport and Beijing Daxing international airport at March 15th
表 1. 首都和大兴机场 3 月 15 日重要天气实况

过程时段	机场	天气类型	发生时段(北京时)	具体天气
3 月 15 日	首都机场	大风	10:00、12:00	西北风 12~13 米/秒, 阵风 17~18 米/秒
	大兴机场	沙暴	09:10~11:00	能见度 600~700 米
		大风	10:00、12:00~16:30	偏北风 12~14 米/秒, 阵风 19 米/秒

4. 沙尘输送特征分析

图 1 为首都和大兴机场 15 日 08 时起向后追踪 24 小时的在不同高度层的气团轨迹。可以看出, 影响首都和大兴机场的沙尘轨迹路径和传输速度有明显不同。影响首都机场的沙尘主要是来对流层中高层 5 千米及以上区域, 传输路径主要以西北路径为主。其中机场标高和 800 米高度处的沙尘起源于西伯利亚, 经蒙古国西北部至蒙古国东南部最终达首都机场; 中层 1500 米高度的沙尘起源于蒙古国西南部最终输送至首都机场。影响大兴机场的沙尘主要以偏西路径为主。机场标高处的沙尘一直来自低层扩散, 期间从 14 日 02 时有明显被吹起到高空 500 米处左右, 随后沉降到机场。800 和 1500 米高度的沙尘来自 1500 米处, 同时在 14 日 20 时也被吹起到 2500~3000 米处而后沉降。此外, 在后 24 小时轨迹追踪中, 影响首都机场的沙尘经过的路径长度比影响大兴机场的沙尘路径要明显更长, 沙尘传输速度也较快, 影响大兴机场的沙尘传输速度明显要慢, 并且最低层轨迹的传输速度最慢。

由沙尘模式输出的后向轨迹可知, 到达首都机场的沙尘路径相较于大兴机场偏南。从能见度实况来看(图 2), 15 日 02 时沙尘暴集中在内蒙古偏南区域, 能见度不足 200 米, 北京能见度在 1~1.5 千米左右, 直到 15 日 08 时, 北京西部偏南区域的能见度不足 200 米, 由此可知偏南路径中携带的沙尘浓度较高, 从而使得大兴机场的沙尘天气更恶劣, 能见度更低。

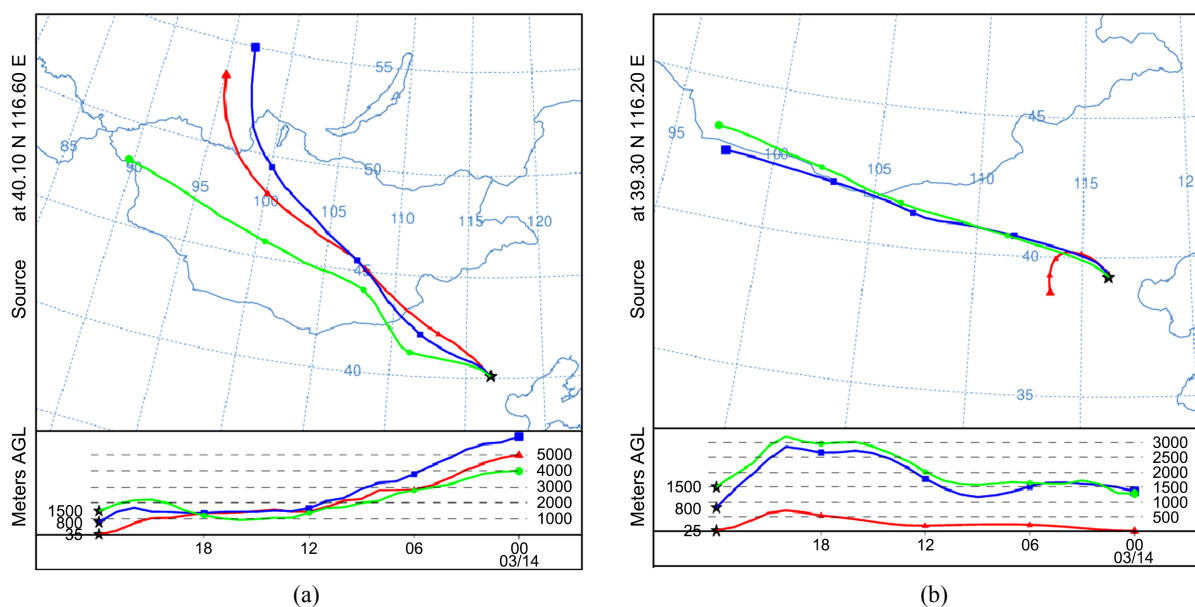


Figure 1. (a) Beijing capital international airport and (b) Beijing Daxing international airport 24-hour backward trajectories begin with 08:00 on Marth 15th at airport elevation, 800 m and 1500 m. The elevation of Beijing capital international airport is 35 m, that of Beijing Daxing international airport is 25 m. The time of picture is UTC

图 1. 3 月 15 日 08 时 (a) 首都机场、(b) 大兴机场在各自机场标高、800 米、1500 米高度的 Hysplit 模式 24 小时后向轨迹。注: 首都机场标高为 35 米, 大兴机场标高为 25 米。图中时间为世界时

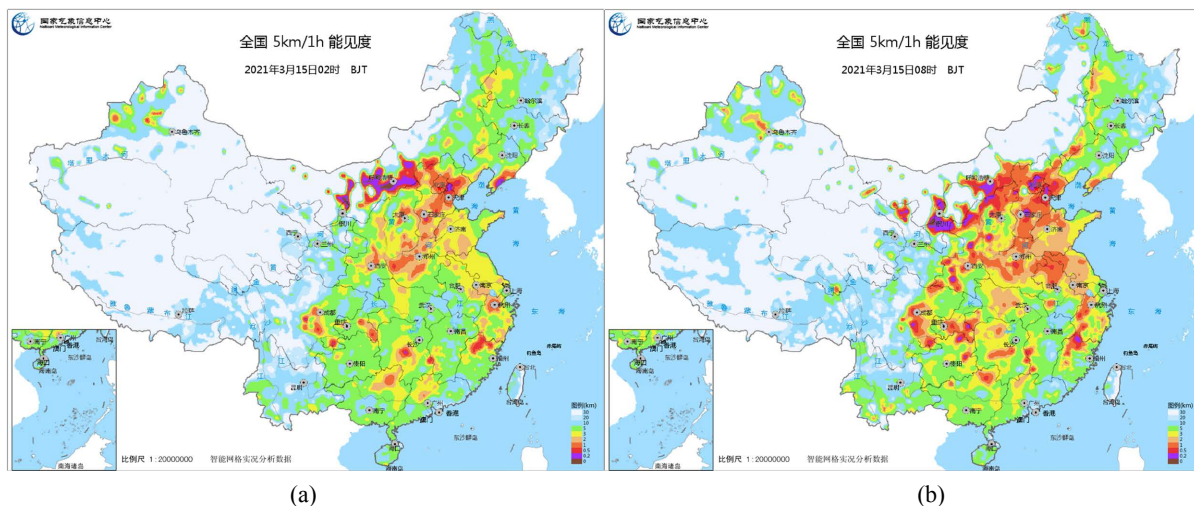
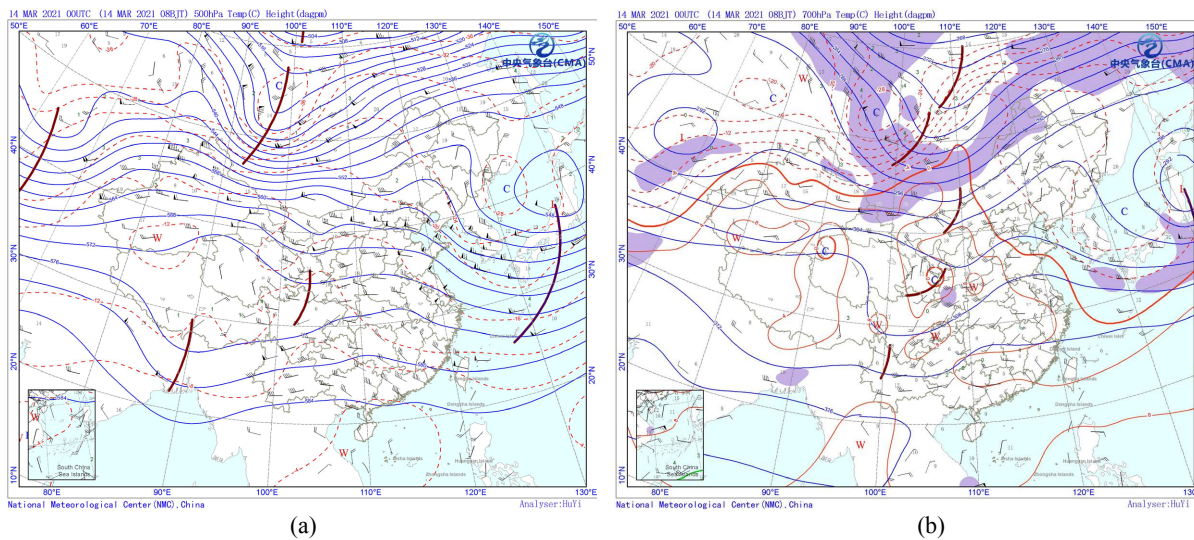


Figure 2. Visibility distribution at (a) 02:00 Marth 15th and (b) 08:00 March 15th (unit: km)
图 2. (a) 3 月 15 日 02 时、(b) 3 月 15 日 08 时能见度分布图(单位：千米)

5. 沙尘天气成因及其与地形的关系

众多研究表明，强沙尘过程中不仅需要沙源，还需要有利的起沙机制[12]。强风和不稳定的大气层结是引起沙尘的重要因素[13]。此次沙尘过程前期，蒙古国在 2020 年冬天和 2021 年春季的气温均偏高，降水量偏少。随着春季回暖，沙地陆续解冻，裸露的沙土给此次过程提供了良好的起沙条件[14]。从大形势场来看，14 日 08 时，500 hPa 上蒙古国西部有一较强深槽(图 3(a))，对应 700 hPa (图 3(b))和 850 hPa (图 3(c))上同样有一深槽位于蒙古国中部，并且在槽后有很强的冷平流，引领强冷空气不断南下堆积。于是在地面上(图 3(d))，有较强冷高压位于蒙古国西部，而在冷高压前部发展为蒙古气旋。随着蒙古气旋过境，近地面层不稳定性加大。在高空(700 hPa 和 850 hPa)强干冷平流和蒙古气旋过境带来的大风席卷下，地面沙尘随着上升气流输送到高空，给此次沙尘过程提供了非常有利的起沙机制。15 日 08 时，伴随高空冷槽东移(图 4(a)~(c))，蒙古气旋后部冷高压东移南压，沙尘也开始南下影响我国。北京位于高空槽后部，其中低层仍然受较强的冷平流控制(图 4(b)、图 4(c))。地面冷锋位于北京南部地区。由于冷高压南压速度较快，15 日 08 时，冷高压前部位于北京西部偏南位置，随之使得北京南部沙尘浓度更高。



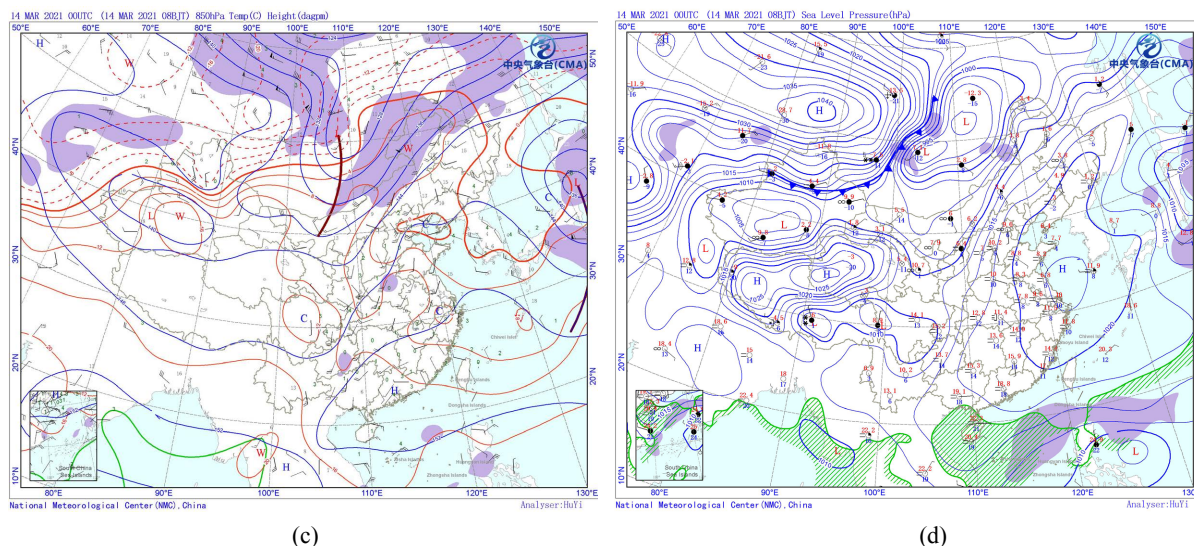
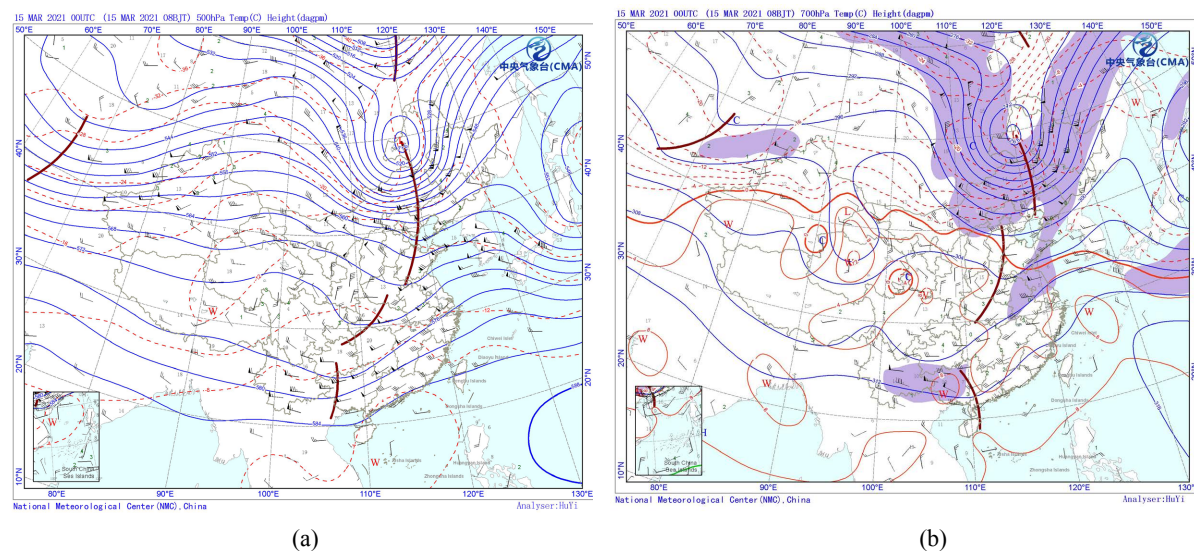


Figure 3. Geopotential height (blue line, Unit: gpm), temperature (red line, Unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind distribution (vector) at 08:00 March 14th on (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa. And surface pressure (blue line, Unit: hPa) distribution (d). The brown line in (a)~(c) represents trough line and shear line

图 3. 3月14日08时 (a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850 hPa 的位势高度(蓝线, 单位: 位势米)、温度(红线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 wind(矢量), (d) 地面气压场(蓝线, 单位: hPa)。 (a)~(c) 褐色线为槽线或切变线

此次过程中, 由于高空深槽东移, 中低层较强冷平流引导蒙古气旋后部的冷高压持续东移南下, 从而引导蒙古国沙尘一路南下影响到北京两场, 冷平流和冷高压前沿位置偏南使得北京南部沙尘浓度更高, 也使得大兴机场沙尘能见度更低。

PM10 值越高, 沙尘浓度越高[15][16]。图 5 给出了 15 日 08~11 时逐小时的风场和 PM10 浓度的分布。该时段为沙尘影响北京最强时段, 沙尘浓度高。可以看出, 08 时沙尘开始影响北京西部, 由于受北京西部山区的阻挡, 地面风速较小, 沙尘随西北气流翻山而过后首先在西部沿山沉降(图 5(a))。09 时, 地面风风向的偏北分量开始增大, 而且北京南部平原的地面风速也增大, 这就造成沙尘更容易在沿西南部山区集中, 较大的偏北风将沙尘输送至大兴机场, 大兴机场随之出现沙暴天气(图 5(b))。随着地面风逐渐由西北风转变为偏北风, 北京南部的沙尘浓度持续增高(图 5(c)), 并且强沙尘逐渐由沿山山区向南部城区发展(图 5(d))。



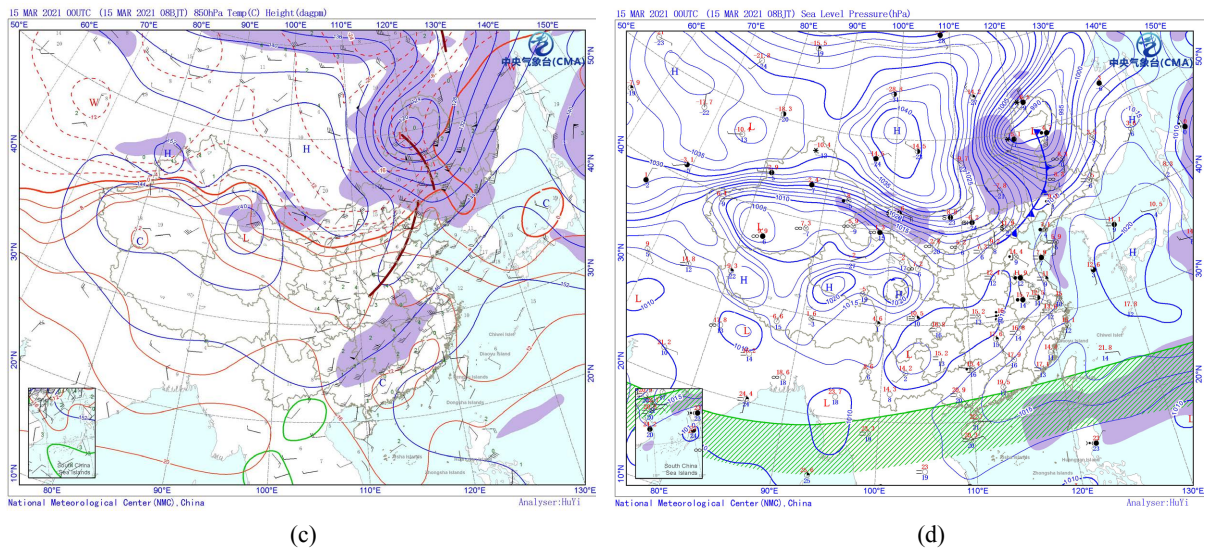


Figure 4. Geopotential height (blue line, Unit: gpm), temperature (red line, Unit: °C) and wind distribution (vector) at 08:00 March 15th on (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa. And surface pressure (blue line, Unit: hPa) distribution (d). The brown line in (a)~(c) represents trough line and shear line

图 4. 3月15日08时 (a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850 hPa 的位势高度(蓝线, 单位: 位势米)、温度(红线, 单位: °C) 和风场(矢量), (d) 地面气压场(蓝线, 单位: hPa)。 (a)~(c)褐色线为槽线或切变线

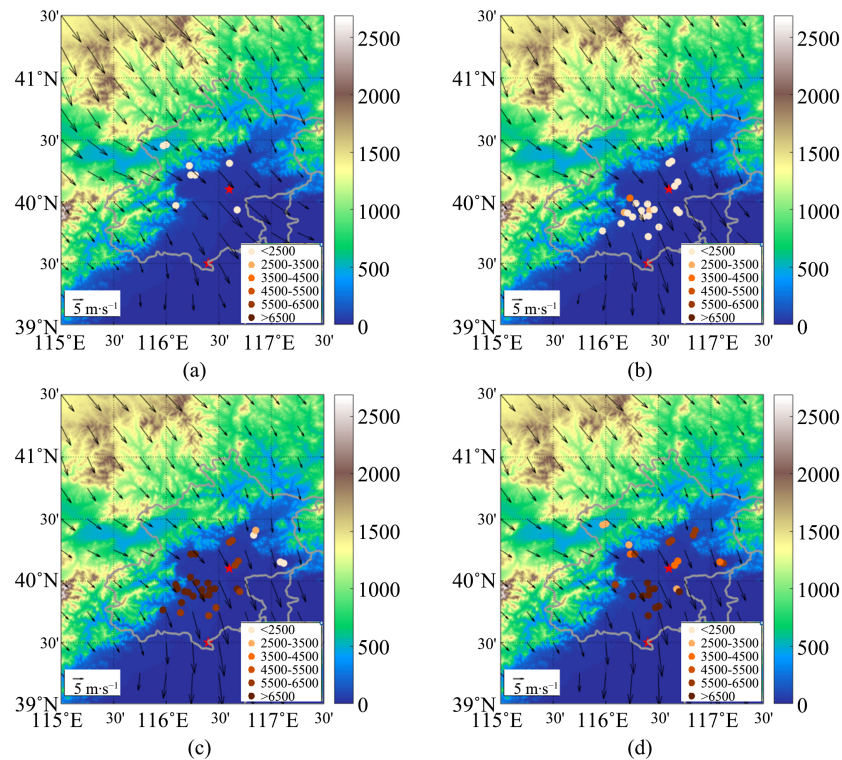


Figure 5. Surface wind (vector, Unit: m/s) and concentration of PM10 (dot, Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$) at (a) 08:00, (b) 09:00, (c) 10:00 and (d) 10:00 on March 15th. Shading represents terrain height (Unit: m). The asterisks at the north and south represent Beijing capital international airport and Beijing Daxing international airport respectively. The gray line represent boundary of Beijing

图 5. 3月15日 (a) 08时、(b) 09时、(c) 10时、(d) 11时地面风场(矢量, 单位: m/s)及PM10浓度(圆点, 单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。 填色为地形高度(单位: m), 北侧和南侧星号分别代表首都和大兴机场, 灰色等值线为北京市界

6. 航空运行影响及气象服务保障情况分析

6.1. 机场运行影响

3月15日,首都机场受大风天气影响,全部延误92班,其中离港延误47班。大兴机场受沙暴和大风天气共同影响,全部延误58班,其中离港延误29班。

6.2. 话音方式航空器空中报告

此次沙尘过程也给航空运行带来颠簸和风切变的影响。3月15日,在首都和大兴机场塔台和进近区域共收到8份话音方式航空器空中报告,其中在塔台报告1份,在进近区域报告7份。其中首都机场塔台报告的显示颠簸引起飞机复飞。在进近区域的话音方式航空器空中报告均由沙尘天气下大风导致的颠簸报告,强度为中到强,高度在4千米以下,并集中在1~3千米。

6.3. 气象服务保障情况

此次沙尘天气过程中,民航气象各部门对于北京两场,尤其是大兴机场的天气影响的前期预报相对乐观,未考虑沙尘到达北京后仍能达到沙暴强度。因此,首都和大兴机场以及民航气象各部门前一日对于次日沙尘天气,仅考虑15日08~16时有西北大风9~12米/秒,阵风15~17米/秒。15日07:05,沙尘天气位于华北西部,逐渐靠近北京,华北气象中心发布区域预警中对大兴机场沙暴天气预报乐观,强调了北京地区白天的西北大风,有沙尘或沙尘暴天气,能见度1~2公里,短时700~800米,对大兴机场考虑09~18时有扬沙,伴西北风9~11米/秒,阵风15~16米/秒,能见度1~2公里。直到09:26大兴机场发布机场警报,预报本场沙暴天气持续将至14时,能见度最低400米,RVR最低300米。对于首都机场,其机场警报中关于沙尘的预警于08:45发布后09:16便解除。民航气象中心于10时协调会上,对上述结论向民航全系统进行详细通报,着重强调大兴机场沙暴天气以及首都和大兴机场全天的西北大风天气,以及伴随的颠簸和风切变。11时后,大兴机场沙暴即将结束,能见度逐渐转好,待能见度和RVR均已转好并稳定后,民航气象中心于12时协调会对外通报大兴机场沙暴天气结束,并提醒要持续关注首都和大兴两场的西北大风及颠簸和风切变天气。首都和大兴机场分别于17:25和19:09解除大风警报,民航气象中心也第一时间通过电话和文字服务产品对各运行管理部门了通报。

总的来说,此次大兴机场的沙暴天气的发生超乎预料,但由于前期对次日白天西北大风天气预报的较为准确,加上沙暴天气发生时,大兴机场、华北气象中心以及民航气象中心等各级气象部门做到了及时调整预报并对外通报结论,所以给实际航空运行带来的不利影响有限。对首都和大兴两场的大风及伴随的颠簸和风切变预报和服务效果均较好。

7. 结论

本文结合HYSPLIT模式对北京两场2021年3月15日沙尘天气过程进行了分析。得出以下结论:

1) 此次沙尘过程中,大兴机场天气更为恶劣,同时出现了沙暴和大风天气,首都机场只出现较短时次的大风天气;

2) 输送到北京两场的沙尘路径不同,沙尘以偏西路径输送到大兴机场,以西北路径输送到首都机场。更偏南的沙尘路径使得内蒙古南部较强的沙尘输送到大兴机场,导致大兴机场沙尘浓度更高,能见度更低;

3) 高空冷槽和中低层较强干冷平流引导蒙古气旋后部冷高压东移南下导致了此次北京两场沙尘天气过程。沙尘越山后先在沿山地区沉积,随着地面风由西北风转向偏北风,强沙尘区逐渐向北京南部扩散,从而给大兴机场带来更大的影响;

4) 此次过程对航空运行影响主要体现在航班延误和遭遇颠簸与风切变上, 但整体影响较小。民航各气象部门前期对北京两场, 尤其是对大兴机场的沙尘天气预报较为乐观。但一方面由于前期已准确预报出两场大风天气, 另一方面在大兴机场沙尘天气发生时, 民航气象部门实时监测, 及时将最新实况和预报结论通报运行部门, 并发布各项预报服务产品。

参考文献

- [1] 王式功, 董光荣, 陈慧忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356.
- [2] 杜星, 拓艳婷, 梁希豪. 银川河东机场一次沙尘暴天气过程诊断分析[J]. 民航管理, 2014(7): 80-83.
- [3] 张玉, 王程昱. 沈阳: 桃仙机场两次沙尘暴天气对比[J]. 中国航班, 2021(7): 4-7.
- [4] 张芊, 庞可, 马彩云, 等. 基于 HYSPLIT4 模式及 TraPSA 分析平台的甘肃地区春冬季大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J/OL]. 中国环境科学. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210929.006>, 2021-10-06.
- [5] 刘灏, 王颖, 王思潼, 等. 基于 HYSPLIT4 模式的天水市颗粒物输送路径[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3529-3538.
- [6] 花丛, 刘超, 张碧辉. 影响北京的两次沙尘过程传输特征对比分析[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 99-107.
- [7] 王华, 轩春怡, 吴方, 等. 北京两次重污染沙尘天气成因及动力传输特征的对比研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 18-26.
- [8] 王郭臣, 王东启, 陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 PM_{2.5} 污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1931-1937.
- [9] 桂海林, 秦贺, 赵培涛, 等. 2018 年春季北京一次沙尘天气边界层特征及来源分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 18-25.
- [10] 金莲姬, 刘峥, 朱彬, 等. PM_{2.5} 空中输送对北京地面污染影响的地形强迫机制模拟研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 2976-2986.
- [11] 杨民, 蔡玉琴, 王式功, 等. 2000 年春季中国北方沙尘暴天气气候成因研究[J]. 中国沙漠, 2001(21): 6-11.
- [12] 尹晓慧. 我国沙尘天气研究的最新进展与展望[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 782-733.
- [13] 彭维耿, 王海霞, 陈楠, 等. 银川河东机场沙尘天气环流类型及动力结构研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 26(9): 33-39.
- [14] 段伯隆, 刘新伟, 郭润霞, 等. “3.15”北方强沙尘暴天气成因分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 541-553.
- [15] 陈跃浩, 高庆先, 高文康, 等. 沙尘天气对大气环境质量影响的量化研究[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 364-369.
- [16] 熊亚军, 唐宜西, 寇星霞, 等. 北京春季一次霾和沙尘混合污染天气过程分析[J]. 气象, 2018(1): 180-188.