第 17 卷 第 3 期
2023 年 6 月
沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology

于雷,丁和悦,熊秋芬,等.一次冷锋过境时引发多种天气现象的成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):59-65.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.008
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

一次冷锋过境时引发多种天气现象的成因分析

于　雷[1],丁和悦[1],熊秋芬[2*],郭志强[1],韩英杰[1]
(1.保定市气象局,河北　保定 071000;2.中国气象局气象干部培训学院,北京 100081)

摘　要:利用观测数据、雷达产品、ERA5 再分析资料对 2021 年 4 月 15 日河北保定一次天气过程进行综合分析,结果表明:(1)天气背景高层干冷,低层有暖脊,整层大气较为干燥。冷锋过境引起地面风力加大,锋面触发干对流后,冷池出流进一步加大了地面风速,湍流加强并出现扬沙。(2)对流云内存在水平弱风区,其径向速度近于 0 m/s,弱风区后侧的雷达回波强度呈增加趋势。雷达低仰角 0 径向速度区的上方有水凝物粒子迅速集中、生长,生长区内径向速度为 5~10 m/s,降雹区域上空各仰角均为 0 径向速度。(3)下击暴流和动量下传引发了干对流大风,降水粒子的蒸发、拖曳作用进一步加剧了气流下沉,其中蒸发作用的贡献更显著。(4)干对流消亡后,锋面东移,锋后西北风减弱,扬沙天气结束,较小的近地层风通量有利于沙尘粒子缓慢下降,地面能见度好转但 PM_{10} 浓度依然较高。(5)夜间冷空气下沉,上游输送的沙尘粒子随之沉降,造成了浮尘天气。

关键词:干对流;冷锋;0 径向速度区;扬沙;浮尘
中图分类号:P458.11　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002-0799(2023)03-0059-07

冷锋是我国强对流、沙尘等天气过程的主要影响系统之一[1-8]。司福意等[9]统计分析了 8 个历史样本后发现,锋面逼近使抬升运动加强是斜压锋生类强对流天气启动的重要因素。陈淑琴等[10]对个例进行对比分析指出,中性层结大气内的锋面垂直环流也能够触发强对流天气。但由于大气环境的差异,某些强对流天气触发后表现为“干”对流,即降水量不大但大风、冰雹等灾害性天气明显[11-15]。在沙尘天气研究方面,刘景涛等[16]基于强沙尘暴个例诊断指出冷锋后大风是地面起沙的动力之一。云静波等[17]的研究则表明地面强风造成起沙,锋面抬升作用导致沙尘粒子扬升,随着天气系统的移动下游出现沙尘暴或扬沙天气,同时粒径较小的沙尘继续上扬并随高空风快速向下游输送,最终在较远距离造成浮尘天气。

冷锋影响某地时,强对流和沙尘相继出现的天气个例较少。在为数不多的研究中,李金香等[18]针对一次沙尘过程出现降水的个例,分析了雨滴化学组分后发现降水初始阶段 PM_{10} 的浓度有增加趋势;张迎新等[19]发现京津冀的一次雨后浮尘天气是上游沙尘粒子随高空西西北气流飘至本地上空沉降而形成的,本地沙源并没有补充。

2021 年 4 月 15 日下午与蒙古气旋相伴的冷锋在过境河北保定时率先触发了“干对流”,随后扬沙和浮尘天气相继出现,在当地造成了较大的影响。本次天气过程有以下几点值得探讨:一是较短的时间内相继出现了大风、冰雹、弱降水、扬沙、浮尘等多种天气;二是预报偏差较大,过程发生前当地仅对冷锋后西北大风和浮尘天气进行了预报,漏报了干对流过程;三是当日的能量条件并不理想,但对流触发后出现了局地冰雹;四是干对流触发后,部分时段扬沙

收稿日期:2022-01-27;**修回日期**:2022-06-21
基金项目:国家重点研发计划“科技冬奥”专项“冬奥会气象条件预测保障关键技术”项目子课题“冬奥赛场定点气象要素客观预报技术研究及应用(2018YFF0300104);中亚大气科学研究基金项目(CAAS201906)
作者简介:于雷(1985—),男,高级工程师,主要从事灾害性天气预报预警及服务工作。E-mail:yulei_qk@126.com
通信作者:熊秋芬(1968—),女,正高级工程师,主要从事天气预报教学与研究。E-mail:xiongqf@cma.gov.cn

和弱降水共存,“泥雨”给行人造成较大影响,社会关注程度较高。综上所述,对本次过程中出现多种天气的机理进行分析具有重要的意义。

本文利用常规和自动站加密观测、保定风廓线雷达和石家庄天气雷达观测资料以及 ERA5 再分析资料，对上述多种天气现象集于一次天气过程的成因进行资料和诊断分析，以提高预报员对此类天气过程的认识，并为当地的精细化气象预报预警工作提供参考。

1 天气过程概况

2021 年 4 月 15 日 16:13(北京时,下同),对流最先在保定站(38.74°N,115.48°E)附近触发,气象信息员在保定站西南侧几公里处（蒋村 38.66°N,115.45°E)观测到降水伴有花生米大小的冰雹,保定市辖区内的过程最大降水量为 1.9 mm(高阳县扬水 38.73°N,115.82°E)。各站降水的空间分布见图 1。

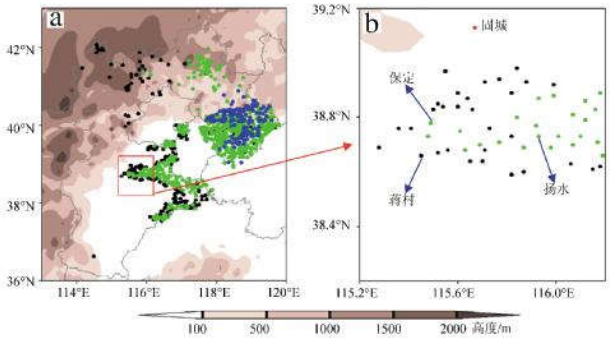

图 1 2021 年 4 月 15 日 12:00—20:00 河北省地形(a,黑色实线区域)及降水站点分布(b)
(黑色 0.1~1.0 mm;绿色 1.1~9.9 mm;蓝色≥10 mm)
(阴影为地形高度)

图 2 给出了保定站的地面分钟观测数据,16:13—16:24 有弱降水,最大分钟降水出现在 16:16 和 16:18,为 0.3 mm。降水前,16:04 海平面气压开始跃升,至 16:14 增幅为 2.1 hPa。16:04,地面瞬时风速为 4.2 m/s,16:10,达峰值 19.5 m/s 后在波动中减弱。降水前露点温度、水汽压明显下降,16:09—16:11 二者降幅最大,分别为 3.9 ℃和 2.7 hPa。温度由 16:10 的 21.1 ℃持续下降,至 16:26 降为 16.5 ℃。以上实况中，弱降水出现前近地面已有干冷空气影响保定同时伴有气压涌升、风力增大等特征,以及弱降水、小冰雹和短时大风等天气现象,表明这是一次冷锋东移南下造成的干对流过程。

由图 2 还可知，降水趋于结束时地面冷池强度减弱导致气压短时、小幅下降;降水结束后冷池不再

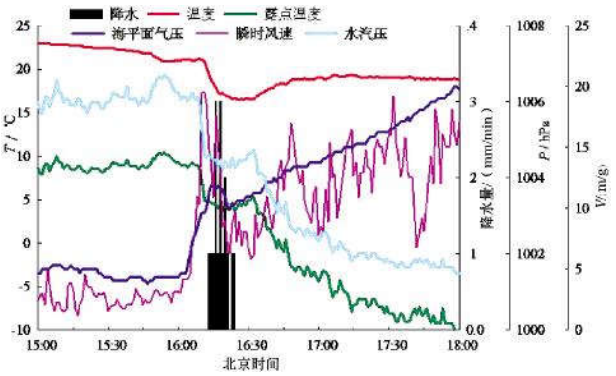

图 2 2021 年 4 月 15 日保定站地面瞬时风速、露点温度、气温、降水、水汽压和海平面气压随时间的演变

维持。16:25—16:33,气温、露点温度变动较小而地面风速基本维持在 6 m/s 以上。以上分析表明,冷锋过境造成的风力加大、干对流的冷池出流等因素引发的混合性大风导致了降水期间保定站地面风力加大。16:33,风速在波动中再次跃升,海平面气压持续升高,露点温度和水汽压迅速下降,温度露点差持续增大，表明保定开始受冷锋后干冷气团控制并有锋后西北大风(图 3)。

地面气温在 16:33 后不降反升，此时锋后西北风速的大幅度波动反映了边界层存在较强的湍流交换(图 2),而 15 日 20:00,北京站和邢台站地面至 850 hPa 的温度递减率均为 9.6 ℃/km,由此可知,锋后边界层空气在下沉过程中以近似干绝热的直减率升温导致了地面附近气温的升高，此外沙尘气溶胶的辐射强迫也会对气温的变化速率造成影响[20]。

本次过程中保定站先后出现了扬沙和浮尘天气。如图 3 所示,混合性大风导致保定站水平能见度迅速下降:降水前,能见度由 16:06 的 15 453 m 降至 16:12 的 11 548 m；降水后能见度继续下降,16:20 降至最低,为 3 129 m,期间扬沙与弱降水共存、有

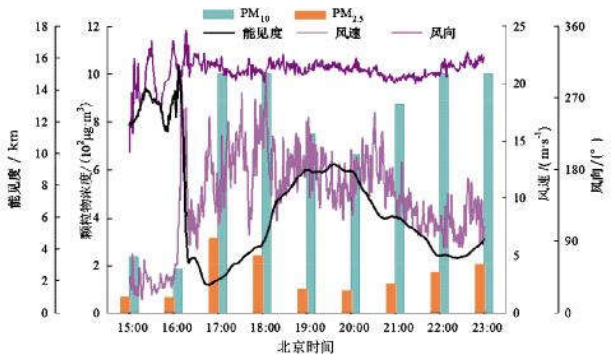

图 3 2021 年 4 月 15 日保定站 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 浓度以及地面瞬时风向、瞬时风速、水平能见度随时间的演变

“泥雨”出现;降水结束后,16:24—16:29 能见度稳定在 3.4 km 左右;随着冷锋继续东移南下、锋后西北风加强，能见度再次下降,16:46 能见度达低谷,为 1 766 m。PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 小时浓度分别由 16:00 的 179.2、65.5 μg/m³ 增至 17:00 的 1 000、311.7 μg/m³。20:00 后有浮尘出现,地面风速逐渐下降,能见度也再次转差,PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度增加。

2 环流形势及影响系统演变

本次过程发生在冷锋过境的天气形势下。环流背景为:15 日 08 时(图 4)500 hPa 高空槽自贝加尔湖东侧伸至河套北部,温度槽略落后于高度槽,槽线南部有强盛偏西风(> 20 m/s)影响河北中南部,未来冷槽将加深东移影响河北中南部。850 hPa 京津冀上空有一暖脊。在 925 和 850 hPa 分别有湿舌北伸(图 4),但大气整体较为干燥,850 hPa 邢台站和北京站比湿分别为 3 和 1 g/kg,925 hPa 则分别为 4 和 3 g/kg,两站的 0 ℃层高度分别位于 2 775 和 2 505 m,-20 ℃层高度分别位于5 519 和 4 992 m,地面至 500 hPa 垂直风切变分别为 19 和 18.1 m/s。基于北京站 08 时探空数据并以保定站 16 时的观测实况进行探空订正分析,*CAPE* 值为 1 182.5 J/kg。综上,大气层结具有一定的不稳定潜势。

08 时地面冷锋经内蒙古、河套伸至甘肃,锋面两侧有沙尘天气出现(图 4)。位于锋后的内蒙古吉兰泰站观测记录为沙尘暴,能见度为 0.2 km。其余台站的观测记录为扬沙或霾，能见度为 0.8~7 km。38°~40°N 锋面两侧的温度差为 2~4 ℃，气压差为 2~4 hPa。14 时,38°~40°N 纬带内冷锋移至山西、河北交界处，锋面两侧的温度差为 4~8 ℃，气压差为 5~7 hPa。冷锋在东移过程中有所加强。

08 时 925 hPa 有西南急流北上并到达河北东部(图4),此时在河北省中南部的山脉与平原交界处存在一干线,露点温度差约为 10 ℃(图 2)。当冷锋东移下山,在干线附近开始有对流系统被触发,其中保定出现了干对流、混合性大风及扬沙等天气。随着冷锋继续东移南下,锋后保定又出现了西北大风、浮尘等天气。

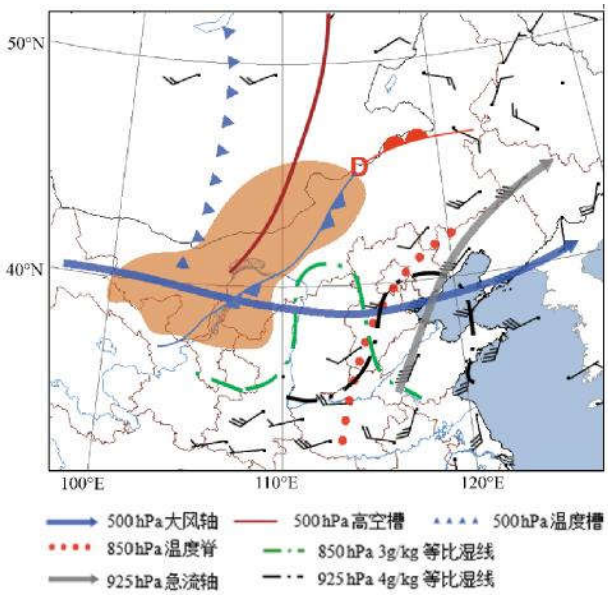

图 4　2021 年 4 月 15 日 08 时天气系统综合配置
(风场为 925 hPa,冷、暖锋为地面锋面,阴影为沙尘天气区,D 为蒙古气旋中心)

3 小尺度系统及雷达回波分析

许焕斌等[21]、王建恒等[22]对云中宏、微观运动量场间的相互作用研究后发现,因垂直翻滚,强对流云内会出现相对水平气流近于零的区域（“零域”),附近的水凝物粒子向“零域”集中后很难被吹离,当粒子成长为大雨滴或冰雹后才会克服上升气流的承托而下落。由 16:15 石家庄雷达的径向速度(图 5)可知，蒋村附近各仰角的径向速度均<5 m/s 且存在 0

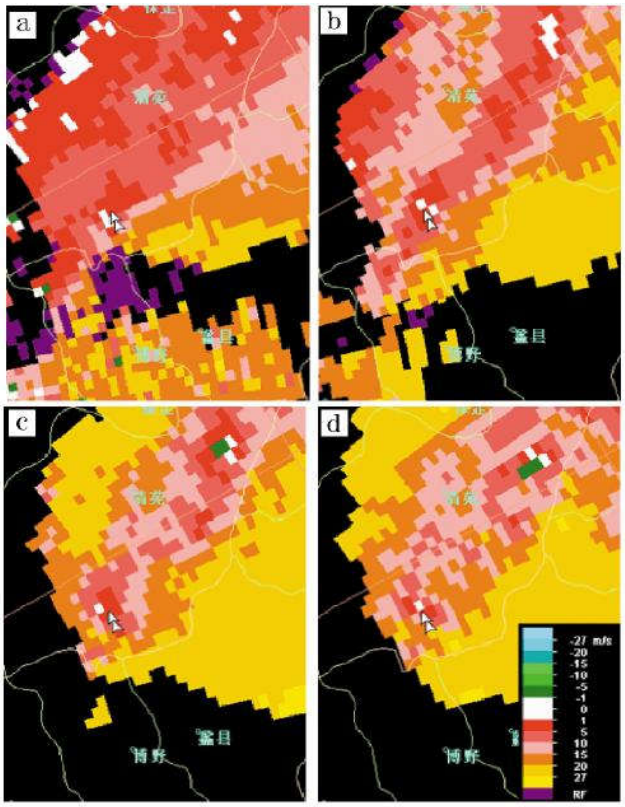

图 5　2021 年 4 月 15 日 16:15 石家庄雷达 0.5°(a)、1.5°(b)、2.4°(c)、3.4°(d)仰角径向速度
(箭头所示位置为蒋村)

径向速度,表明此处水平风场较弱,有利于水凝物粒子在此处长时间停留并在垂直方向上不断循环增长、形成雹胚。

由对流系统初生及发展时段的雷达回波特征和径向速度分布(图 6)可知,径向速度场中存在一“西南—东北”向的弱风区(椭圆所示),弱风区附近尤其是其后侧的回波强度随时间迅速增加。沿图 6c 中的线段剖面,15:46,水平方向 0~9 km 高度的径向速度值均≤10 m/s,3 km 高度以下为 0 径向速度区(图 7e);15:52,回波质心(反射率因子≥45 dBZ)位于上述 0 径向速度区的上方(图 7a),其下方的径向速度均≤5 m/s,其中 1 km 高度以下为 0 径向速度区,同时水平方向 9 km 处出现一新的 0 径向速度区并伸展至 3 km 高度(图 7f);图 7a 中的回波质心在 15:58 已不可辨,此时有新单体的回波质心在水平方向 9 km、垂直高度 3~6 km 处出现(图 7b),新回波质心恰位于图 7f 中新 0 径向速度区的上方。以上分析表明,低仰角 0 径向速度区的上方有水凝物粒子迅速集中、生长,水凝物生长区内径向速度为 5~10 m/s。

15:58—16:04,回波质心(图 7a~7c)下方均为 0 径向速度区(图 7f~7h),有利于水凝物粒子在水平弱风区内向地面迅速降落。

保定站附近,干对流被触发前相对湿度>60%的区域位于 0 ℃层之上、>80%的区域位于-10 ℃层上方,中低层大气干燥,上升运动中心位于 0~-10 ℃,因而弱降水有可能是冰雹粒子融化而来。

冰雹粒子和雨滴在干燥的低层大气中蒸发是干对流大风出现的一个重要因素。图 7a 和图 7b 中回波在 6 km 附近生成后逐渐向地面伸展且回波质心向地面迅速沉降的特征较明显,表明了下击暴流的存在;在回波逐渐及地的过程中愈向线段右端径向速度愈大,表明近地层有风速辐散;同时近地层径向速度随时间明显增大,表明近地层开始出现一定厚度的大风区。综上,干对流大风过程中存在明显的空中风速和动量向地面下传的现象。

参照李彩玲等[23]提出的 1 ℃温差可抵消约 4 g/kg 水成物产生的重力拖曳,16:10—16:18,保定站气温降幅为 4 ℃,温差造成的负浮力效应大约相当于 16 g/kg 水成物的重力拖曳作用。干对流发生时整层大气较为干燥且保定站过程降水量仅 1.6 mm,由此可知相较于拖曳作用,降水粒子在干燥大气中蒸发对干对流大风的贡献更大。

4 沙尘天气成因

4.1 混合性大风导致扬沙天气

固城站(中国气象科学研究院固城生态与农业气象试验站 39.13°N,115.67°E)与保定站的直线距离约为 46 km,本次过程中该站无降水出现;15:50,其 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 PM_1 的浓度分别为 313.2、45 和 19.3 μg/m^3;16:10,分别升至 2 760.8、310.1 和 47.3 μg/m^3。表明在地面降水出现前,冷锋过境引起的风力加大造成了扬沙。

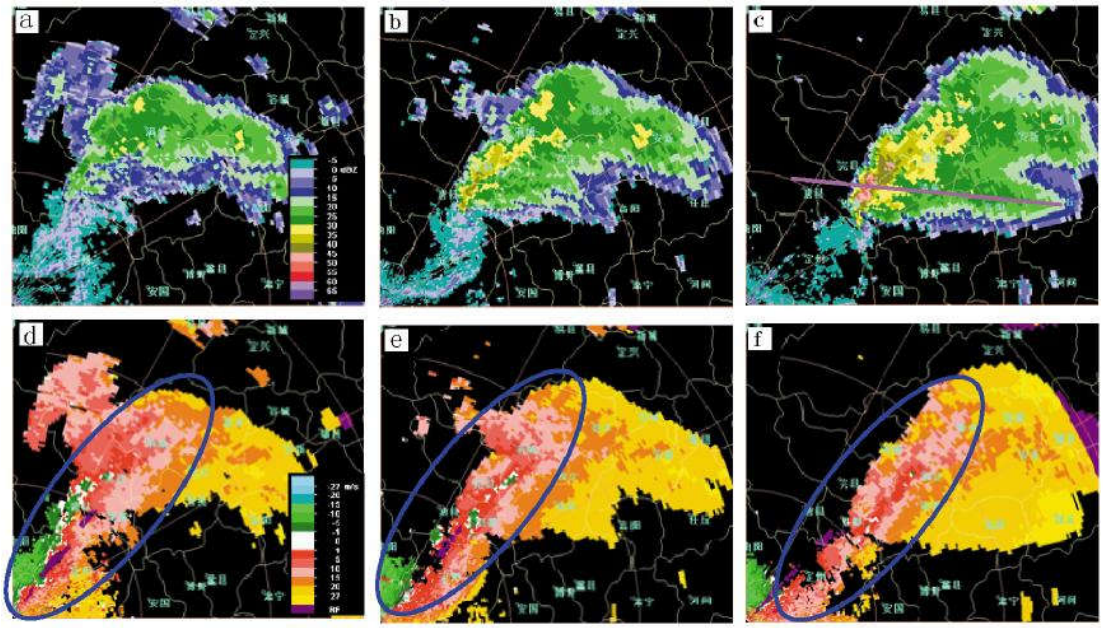

图 6 2021 年 4 月 15 日 15:35(a,d)、15:46(b,e)、15:58(c,f)石家庄雷达 2.4°仰角反射率因子(a~c)与径向速度(b~f)

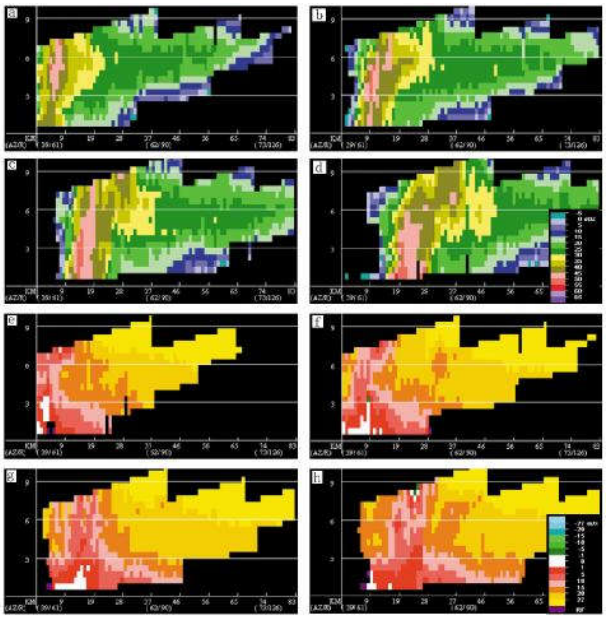

图 7　沿图 6c 线段反射率因子(a~d)与径向速度(e~h)剖面

(a 为 15:52,b 为 15:58,c 为 16:04,d 为 16:09,e 为 15:46,f 为 15:52,g 为 15:58,h 为 16:04)

本次过程保定站雨量为 1.6 mm，降水时间为 12 min,降水时相对湿度由 36%升至 45%。结合图 3 中能见度实况分析可知，虽然弱降水时雨滴的消光作用在一定程度上引起了能见度的降低，但混合性大风造成的地面扬沙是这一时段能见度降低的主要因素,降水对沙尘颗粒的清除作用较弱。

16:30,冷空气继续影响保定站,地面 10 m处风速为 6.8 m/s,风廓线雷达显示 390 m 处风速为 17.2 m/s,二者风向分为 325°和 327°,风向基本一致且风速随高度迅速增加有利于气流裹挟沙尘粒子上扬，这一现象与郝玉峰等[18]的研究结论相一致。16:54,10 m 风速为 10.7 m/s,390 m 风速为 10.1 m/s,此时能见度已经开始好转。17:30,10 m 风速增至 16.4 m/s,而 390 m 风速减弱至 3.8 m/s，风速的垂直分布状态变为随高度降低,沙尘粒子上扬的幅度进一步减弱,能见度逐渐增加。

综上,在降水前地面已出现扬沙天气;冷锋触发的干对流大风和锋后西北大风在较短的时间内相继出现,加强了近地层湍流并进一步加剧了扬沙天气,能见度持续下降并于 16:46 达低谷;随着冷锋东移,地面风速持续加大而近地层风速逐渐减小，垂直交换减弱,能见度有所回升。

4.2　由扬沙转为浮尘天气

通风量 V_I(Ventilation Index)反映了一定高度层内累计风速的大小，可以用来表征风场对污染物的输送能力[24-26],其计算公式为：

$$V_I=\sum_{i=1}^{i=\max}(h_i-h_{i-1})\times V_i \quad . \tag{1}$$

将某时刻风廓线数据按垂直高度从低到高排列,上式中 i 为第 i 个数据,h_i 和 V_i 分别为第 i 个数据所在高度和对应的风速,h_0 为 0 m。

基于保定站风廓线雷达数据,以 870 m 表征混合层高度并计算通风量(图 8),16:00—19:00,通风量先增后减,16:30 达到峰值 12 537 $m^2\cdot s^{-1}$,结合图 2 可知干对流过程结束后通风量有所下降,18:00,锋后西北风速明显减弱、通风量迅速下降。通风量的降低有利于沙尘粒子在重力作用下缓慢自由沉降，有助于沙尘天气的维持[26-27],因此扬沙天气结束后,尽管能见度有所好转但 PM_{10} 依然维持在较高的浓度(图 3)。

随着冷锋进一步东移,21:00 近地面西北风速逐渐降至 10 m/s 以下，而边界层通风量再次增大(图 8)，此时能见度再度下降、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度增加,这是上游沙尘粒子在本地沉降的结果。

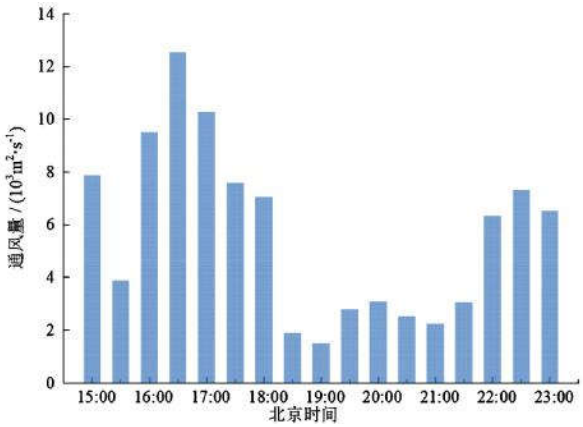

图 8　2021 年 4 月 15 日保定站 0~870 m 通风量

刘超等[26]研究表明,由高空向地面传输的沙尘粒子会导致大气折射率结构常数增大。由保定风廓线雷达观测数据可知,21:12，开始有冷空气下沉，23:00,15 m/s 等风速线由 2.1 km 逐渐降至 1.3 km,150 m 处的风速也由 1.7 m/s 增至 8.5 m/s,750~1 590 m 的大气折射率结构常数的数值有较大幅度增长，以上特征表明这一时段有上游沙尘粒子在本地沉降。

浮尘期间 500 m 以下近地层内的最大风速维持在 150 m 高度,这与扬沙阶段的风速垂直分布有明显不同。

5 结论与讨论

（1）在冷锋逼近，地面降水未出现时，保定站已出现扬沙天气。地面冷锋过境保定时触发了干对流，锋后较大的风力与干对流大风共同导致了地面风速加大、湍流加强并造成扬沙。弱降水对沙尘粒子的影响较小，地面有“泥雨”出现。干对流结束后，冷锋继续东移，边界层风速减小、湍流减弱，地面能见度有所回升，前期上扬的沙尘粒子缓慢降落，使 PM_{10} 仍维持在较高浓度。随着冷锋进一步东移，上游输送的沙尘在本地沉降造成浮尘天气。

（2）雷达各仰角上的强回波均出现在径向速度近于 0 m/s 的弱风区附近，尤其是弱风区后侧的回波强度随时间明显加强。垂直剖面分析表明，水凝物粒子在低仰角 0 径向速度区的上方迅速集中、生长，生长区内的径向速度为 5~10 m/s，随后水凝物粒子在低仰角 0 径向速度区内降落，其中降雹区域上空各仰角径向速度均为 0 m/s。

（3）下击暴流和动量下传导致了干对流大风的出现，其中粒子蒸发的贡献要大于拖曳作用。锋后西北大风加剧了边界层的湍流交换，气块近似干绝热下沉使地面气温出现短时上升。

（4）干对流发生时湿区主要位于 0 ℃层以上的中层大气内，中低层大气干燥、无明显外来水汽输送，可能是融化的冰雹粒子造成了地面弱降水。但由于降水时间短、数据资料较少，这一推断有待进一步验证。

参考文献：

[1] 王芬，唐浩鹏，杨帆，等.2020 年 1 月 24—25 日贵州冰雹、雨雪共存天气机理分析[J].沙漠与绿洲气象，2021，15（4）：17-25

[2] 叶东.一次强风雹天气的干侵入作用及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象，2020，14（5）：44-52.

[3] 齐铎，张桂华.一次强降水过程的多尺度环流背景及成因分析[J].沙漠与绿洲气象，2020，14（4）：10-17.

[4] 赵强，陈小婷，王楠，等.副热带高压影响下陕西关中强对流发生的环境场及触发机制[J].气象，2022，48（1）：28-43.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 李玲萍，李岩瑛，李晓京，等.河西走廊不同强度冷锋型沙尘暴环流和动力特征[J].中国沙漠，2021，41（5）：219-228.

[8] 武威，顾佳佳，牛淑贞.2013 年春季一次沙尘暴天气成因分析[J].气象与环境科学，2014，37（4）：71-79.

[9] 司福意，赵海清，李社宗.西风槽影响下豫西北两类强对流天气流型和物理量特征分析[J].气象与环境科学，2018，41（3）：57-63.

[10] 陈淑琴，章丽娜，曹宗元，等.华东地区冷季两次高架对流个例分析[J].气象与环境科学，2019，42（4）：63-67.

[11] 武麦凤，吉庆，武维刚.一次槽前“干”对流背景下阵风锋天气过程分析[J].高原气象，2017，36（3）：845-851.

[12] 卓鸿，王冀，霍苗，等.不同类型大尺度环流背景下首都国际机场的雷暴特征分析[J].暴雨灾害，2016，35（4）：371-377.

[13] 翟丽萍，农孟松，屈梅芳，等.相同大尺度环流背景下不同类型强对流天气个例分析[J].暴雨灾害，2013，32（4）：346-353.

[14] 曹彦超，韩晶，路亚奇，等.陇东两类夏季雷暴的活动特征及影响因素分析[J].沙漠与绿洲气象，2021，15（5）：64-70.

[15] 朱平，俞小鼎，王振会，等.青海高原致灾性对流天气时空分布特征[J].干旱气象，2019，37（3）：377-383.

[16] 刘景涛，郑新江，康玲，等.蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究[J].气候与环境研究，2003，8（2）：218-229.

[17] 云静波，姜学恭，孟雪峰，等.冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程典型个例对比分析[J].中国沙漠，2013，33（6）：1848-1857.

[18] 李金香，李峰.北京市一次沙尘过程中降水化学组分的监测分析[J].中国环境科学，2012，32（12）：2149-2154.

[19] 张迎新，李林，曹晓冲，等.京津冀地区一次持续时间较长浮尘天气的分析[J].沙漠与绿洲气象，2021，15（4）：123-129.

[20] 郝玉峰，施占军，相栋.典型沙尘天气过程近地层气象要素演变特征[J].气象科技，2014，42（4）：671-677.

[21] 许焕斌，田利庆.强对流云中“穴道”的物理含义和应用[J].应用气象学报，2008，19（3）：372-379.

[22] 王建恒，陈瑞敏，胡志群，等.一次强雹云结构的双多普勒雷达观测分析[J].气象学报，2020，78（5）：796-804.

[23] 李彩玲，蔡康龙，黄先香，等.桂林一次强下击暴流成因分析[J].气象，2021，47（2）：242-252.

[24] 刘健，吴兑，范绍佳.珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征[J].环境科学，2015，36（11）：3989-3998.

[25] 王坚，蔡旭晖，宋宇.北京地区日最大边界层高度的气候统计特征[J].气候与环境研究，2016，21（5）：525-532.

[26] 刘超，张碧辉，花丛，等.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，2018，38（5）：1663-1669.

[27] 刘超，花丛，张恒德，等.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，2019，39（5）：88-96.

Causes of Various Weather Phenomenon Triggered by a Cold Front

YU Lei[1],DING Heyue[1],XIONG Qiufen[2],GUO Zhiqiang[1],HAN Yingjie[1]
(1.Baoding Meteorological Bureau,Baoding 071000,China;
2.China Meteorological Administration Training Center,Beijing 100081,China)

Abstract Using observational data,radar products and the ERA5 reanalysis data,the mechanism of a cold front occurred in Baoding,Hebei province on April 15th,2021,was studied.It shows that:(1) There was a mass of dry and cold air at upper level overlapping a mass of warm air at low level,with a relative low humidity for the whole atmospheric layer.Surface wind speed increased during the passing of the cold front,and triggered dry convection which formed the outflow of the cold pool,thus further strengthened surface wind speed and turbulence accompanied by sand blowing.(2)There was weak radial wind zone inner convective cloud with the radial velocity close to zero,and the radar echo intensity on the rear of the weak radial wind zone increased.Meanwhile,hydrometer gathered and grew above the region with radial velocity at lower elevation angle equal to zero,while the radial velocity ranged from 5 to 10 m/s in the growth region of the hail,and the radial velocity at each elevation angle above hail area was zero as well.(3)The dry convective gale was trigger by downburst and downward-transport momentum,and further strengthened by the evaporation and drag of rain droplets,with the former contribute more.(4)The northwesterly wind weakened and the cold front moved eastward after the decay of dry convection,leading to the ending of sand weather.A weak near-surface wind flux induced a relative slower falling velocity of dust particles,the near-surface visibility thus improved, while the PM_{10} concentration was still relatively high.(5)The cold air descended at night,then the accompanied dust particles transported from the upwind regions deposited,leading to a floating dust weather.

Key words dry convection;cold front;zero velocity;sand blowing;dust weather