

2002年4月6日一次强沙尘暴天气的成因分析*

付桂琴 沈桐立 尤凤春

(河北省科技服务中心 075000 南京气象学院 210044 河北省气象台 050021)

摘要

本文利用常规观测资料和数值模拟的方法,对2002年4月6日发生在河北省北部中雨后紧接着出现的强沙尘暴天气过程进行了分析和诊断。结果表明:(1)强冷空气爆发南下、致使斜压能量释放、地面气旋发展是有利于本次沙尘暴天气产生的大尺度背景;(2)高空急流的高度迅速下降代表了动量下传,这是形成大风,产生沙尘暴的动力原因;(3)在高空急流下方,日间湍流加强,湍流涡旋的下沉气流也是沙尘暴形成的动力因子。农谚称它是“刮地风”,可见其机制作用。(4)降水结束后,天气转晴,并出现6~7级西北风,在西北大风出现6个多小时的短时间内就能迅速使土表蒸发变干出现沙尘暴。

关键词:沙尘暴 成因分析 数值模拟 动力诊断

引言

沙尘暴天气是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和某种次天气尺度系统相互作用发生发展的一种危害大的灾害性天气。一般的情况是,沙尘暴发生前期干旱少雨、气温异常回暖^[1]。据统计,张家口在沙尘暴前期近20d的时间内,没有透雨出现^[2]。春季出现较大降水后,潮湿的地面一般是不利于沙尘暴产生的。而本文分析的个例(2002年4月6日)却不同。在沙尘暴发生前一天(4月5日),出现一场较大降水过程(坝上四县雨量为16.8~25.0mm)之后出现的。并且4~5日,张家口日平均气温8.0℃,比2~3日的平均气温15.5℃下降了7.5℃,可见,此次沙尘暴天气必然有其相当强的起沙动力条件和沙尘输送机制。为此,本文从天气学和动力学两方面对这次沙尘暴天气形成的条件进行了分析,以揭示沙尘暴天气的成因和动力机制。

1 天气过程概况

过程前两天,4~5日,张家口大部分站降雨量达中雨以上,坝上四县(康保、沽源、尚义、张北)平均雨量为18.3mm,最大雨量为尚义25.0mm。6日08时,500hPa横槽转竖,使贝加尔湖西部-40℃的强冷空气爆发南下,并且地面蒙古气旋强烈发展东移,造成内蒙古、山西、河北、京津等地自北向南先后出现大风、沙尘天气。上午

* 基金项目:国家自然科学基金项目40075023;国家重点基础研究项目G1998040910

9 时 56 分开始, 张家口坝上的康保出现大风天气, 14 时 07 分, 出现沙尘暴; 14 时 55 分, 沽源出现沙尘暴; 17 时 53 分, 张北出现沙尘暴; 到 20 时, 康保、沽源达到强沙尘暴, 能见度最低时不足 200m (图略)。入夜后, 虽风力有所减小, 但坝上沙尘暴一直持续到 7 日凌晨。7 日白天, 高空又一股冷空气补充南下, 14 时, 张家口坝上再次出现强沙尘暴, 同时, 沙尘暴区域也在向东南扩展, 8 日上午, 冷空气东移, 张家口沙尘暴天气开始减弱, 9 日, 这次沙尘暴天气过程基本结束。由此可见, 降水后的潮湿地面在大风的作用下很快变干, 仅在降水后 24h (降水停止到出现沙尘暴间隔时间), 出现西北大风 6 个多小时以后, 出现沙尘暴。分析其原因主要是在此段时间内, 天气转晴, 并出现 6~7 级西北大风, 使土表蒸发加快迅速变干。这与文献^[2]给出的降水后出现沙尘暴的平均时间间隔近 20d 的统计结果是不同的。

2 高空 500hPa 环流演变分析

沙尘暴过程前 2~4 日, 冷空气在缓慢东移的过程中, 欧亚大陆环流径向度逐渐加大, 其能量也在储蓄加强。到 6 日 08 时, 强冷空气中心移到贝加尔湖西部, 与之配合的横槽转竖携带着大量的冷空气爆发南下, 为沙尘暴的产生提供了大尺度背景。蒙古国中部最大风速由 5 日 08 时 16m/s 增大到 6 日 08 时的 50m/s, 张家口本站风速由 5 日 20 时 22 m/s 增大到 42m/s。此时, 蒙古国中西部高空峰区压在 42° N 到 44° N 之间, 在约 2 个纬距的宽度有 4 条等温线。这样强的冷空气东移南下, 系统发展, 地面的风速急剧增大, 张北站地面风由 6 日 08 时的西北风 4m/s 迅速增大到 09 时的 8m/s, 10 时 38 分, 出现 17m/s 以上的瞬时大风, 扬沙天气出现; 15 时风速达到最大, 17 时 53 分, 出现沙尘暴。

3 起沙成因分析

3.1 高空动量下传

由张家口本站高空风和张北地面风速随时间的演变中可以看出 (图略) (张家口与张北相距 60 公里, 以张家口高空风近似代替坝上张北站高空风): 5 日 20 时, 20m/s 的风速高度出现在 500hPa, 到 6 日 08 时, 此风速高度下降到 700hPa, 上午张北出现大风扬沙天气, 午后出现沙尘暴, 到 6 日 20 时, 20m/s 的风速高度继续下降到 850hPa (注: 坝上四测站平均海拔高度 1400 多米, 850hPa 已接近坝上地区地面风速), 坝上出现强沙尘暴。由 20m/s 的风速高度随时间演变而下降并且引起地面风速迅速增大, 出现沙尘暴的过程说明: 高空急流高度下降与沙尘暴的形成有着紧密的关系。姜学恭^[3]等指出: 高空急流高度下降, 对流层中低层表现为强的垂直风切变。从 5 日 20 时到 6 日 20 时, 24h 内, 500hPa 到 850hPa 风速垂直切变由 14m/s (20m/s~6m/s) 增大到 30m/s (50m/s~20m/s), 中低层高空风垂直切变的成倍增大, 这说明强的垂直

风切变有利于动量下传。5日20时，冷空气影响前，急流轴高度约在200hPa附近，这与春季北支急流平均高度在200hPa左右的气候平均相一致，到6日08时，冷空气开始影响时，急流轴高度下降到300hPa附近，地面风速开始增大。这说明高空急流外强大的动量下传引起地面出现大风及沙尘暴。由此作者认为：在高空急流下，会产生强的湍流运动（湍流涡旋的强阵性下沉气流农谚称它是“刮地风”），引起近地面风速增大。由观测事实，阵阵的“刮地风”常常卷起团团沙尘，因而沙尘暴过程也表现了很强的阵性。由湍流强度 $I_v = \frac{\sqrt{(\bar{V}')^2}}{\bar{V}}$ ，其中， \bar{V} 为平均风速， \bar{V} 为瞬时风速，

\bar{V}' 为脉动风速， $\bar{V}' = \bar{V} - \bar{V}$ ，即瞬时风速与平均风速的差。由此可知：湍流强度与脉动风速成正比，当脉动风速大时，湍流强度也强，反之，当脉动风速小时，湍流强度也小。本文用自记风（十分钟平均风速）近似代替瞬时风速，用水平平均风速代替平均风速，来近似的分析湍流强度与地面大风的的关系。图1是2002年4月6日01h~24h张北站地面自记风与24h平均风速示意图，其中，横坐标代表时间，单位：h，纵坐标为风速，单位：m/s。图中标有大风符号的时段为瞬时风速达到17m/s以上的西北大风时段，标有沙尘暴符号的为张北出现沙尘暴的时段。

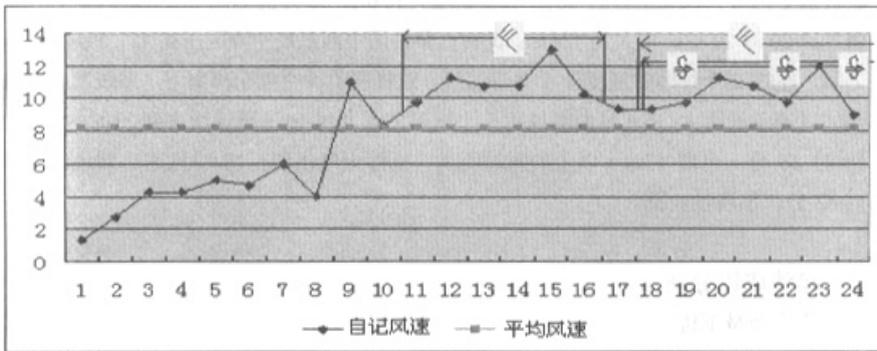


图1 2002年4月6日01h-24h张北站地面每小时自记风变化曲线与平均风速直线图
横坐标为时间，单位：h，纵坐标为风速，单位：m/s；图中标有大风符号的时段为瞬时风速达到17m/s以上的时段，标有沙尘暴符号的为张北出现沙尘暴的时段

由图1可以看出：从08时开始，也就是冷空气开始影响时，湍流强度迅速增大，到15时达到最大。10时38分，张北站出现大于17m/s的瞬时西北大风，同时扬沙天气出现，在10时38分到16时27分出现西北大风时间段内，虽然湍流强度很强，但由于地面湿度较大，张北仅出现了扬沙天气，此时段也是大风使土壤增发加快，地面被吹干的时段（当然也有日晒的作用，但大风的作用远比日晒大），到17时48分，张北再次出现大于17m/s的瞬时西北大风，由于地面已被吹干，沙尘浓度加大，17

时 53 分张北出现沙尘暴, 且沙尘暴一直持续到次日 1 时 15 分, 可见, 在西北大风出现 6 个多小时, 地面就被吹干, 出现沙尘暴。从早上 9 时开始, 张北站自记风速一直大于平均风速, 且存在着阵性起伏变化, 说明湍流的强度也在阵性变化。由此可以说: 湍流涡旋的强阵性下沉气流是沙尘暴形成的触发机制。

4 模式及资料

本文采用中尺度非静力 MM5 预报模式, 垂直方向分 25 层, 模式层顶 30hPa, 采用双重嵌套, 粗网格距 60km, 细网格距 20km, 网格范围 61×61 个格点。模式中心 ($40^{\circ} \text{ N}, 115^{\circ} \text{ E}$), 下垫面选用 Landuse 资料, 积分时段 2002 年 4 月 6 日 08 时至 7 日 08 时, 积分时间步长 3min, 3h 输出一次结果。

模式采用 2002 年 4 月 6 日 08 时到 7 日 08 时间隔 12h 的高空常规观测资料和间隔 6h 的地面观测资料以及中国气象局 T213 模式全球资料。

4.1 锋面动力结构特征:

由模式预报 3h、6h 和 12h 1000hPa 流场平面图 (图略) 中可以看出: 在沙尘暴过程中, 存在着明显的冷锋气旋。6 日 11h, 在蒙古国东部到我国内蒙古东部有一冷锋气旋, 与气旋配合的冷锋中段已经过张家口到达河北省中部, 冷锋后的河北省北部、内蒙古及蒙古国境内配合有大面积的大风区, 风矢量杆最长的代表 20m/s 的风, 而冷锋前为较小的偏南风, 冷锋附近存在着明显的风向、风速辐合, 这种辐合将产生较强的上升运动, 有助于将沙尘粒子带来到空中, 此时, 张家口已经出现大风扬沙天气。到 6 日 14h, 冷锋进一步东移, 但地面气旋中心位置几乎没变, 大风区也紧跟着扩展东移, 而且沙尘暴区域也在向东南扩展, 坝上的康保、沽源、张北先后出现沙尘暴, 到 20h, 地面冷锋东移到我国东北三省到渤海湾一带, 张家口完全处于锋后强风区内控制, 坝上出现强沙尘暴, 而且强风区基本与地面产生沙尘暴天气区相对应。可见, 冷锋过境产生的大风及强抬升作用对大风沙尘暴的形成有直接的关系, 地面冷锋气旋后持续的大风是沙尘暴得以维持的重要条件。上述分析表明: 沙尘暴的动力结构特征不仅是高空强冷空气和中低层动量下传使地面产生大风及沙尘暴, 而且与地面强冷锋引起的较强的垂直运动有直接的关系, 徐祥德等^[4]指出: 沙尘暴过程是地面强冷锋影响下导致的起沙、扬沙及其沙尘输送的综合反应, 可见, 地面强冷锋是沙尘暴形成和能量维持及发展的动力源。

由 6 日 20 时 700hPa 流场分布图 (图略) 上可以看出, 在黑龙江经辽宁西部到内蒙古与河北交界处, 存在着明显的风向切变, 说明此事, 700hPa 的冷空气到达此处, 这与实况完全一致。由 6 日 20 时流场分布图冷锋在 1000hPa 高度上的位置 (图略) 与 700hPa 流场冷锋位置 (图略) 的对比可以看出, 此次过程高层冷空气滞后, 存在着明显的斜压性, 这种斜压能量释放对气旋的发展及沙尘暴的形成是有利的。

4.2 动力诊断分析

通过分析这次过程的散度场、涡度场及垂直速度场,可以看出:6日11h,在散度场的垂直分布图上(图略),张家口附近,高层250hPa出现一个 $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐合中心,与此对应低层850hPa出现一个 $2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐散中心,高层辐合低层辐散,对应着下沉运动,在涡度场上,同样表现出高层为负涡度,低层正涡度的垂直运动的结构配置。由垂直速度沿 115°E 的垂直剖面图上(图略),可以清晰地看出:在张家口附近,500hPa以下处于下沉运动区,最大下沉运动中心出现在750hPa,中心强度 $0.15 \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,而500hPa以上,为上升运动,最大上升运动中心出现在350hPa附近,中心强度 $0.12 \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种强的下沉运动一直持续到7日凌晨,且随着时间的推移,下沉运动区高度在向上发展,强度也在加强,可见这种动力下沉运动对这次大风沙尘暴起到重要的作用。

4.3 高空急流分析

模式预报开始、3h、6h和12h的全风速沿 115°E 的垂直剖面图中可以分析到:6日08h,在 48°N 高层300hPa附近,存在着一中心强度为55m/s的高空急流中心,这与实况的急流高度相吻合。急流轴的走向基本上呈东北-西南向,说明高层的强风有动量下传的动向。此时,张家口坝上近地面附近(40°N ,850hPa)的风速为5m/s。到6日11h,此急流中心增强到60m/s,并且急流中心高度下降到350hPa,受高空急流高度下降动量下传的影响,张家口坝上风力增强到10m/s以上,出现了大风天气。随着高空动量的下传,到6日14h,高空急流中心高度进一步下降到400hPa,强度转变成55m/s,坝上开始出现沙尘暴。6日20h,冷空气补充,急流中心再次加强到60m/s,高度在350hPa,此时,张家口坝上近地面风力增大到15m/s,坝上出现强沙尘暴。可见,高空急流高度下降,有效动量下传,致使近地面风力增大,产生大风沙尘暴。

5 沙源因素

张家口与内蒙古高原相邻,地形北高南低,坝上测站平均海拔高度1400m,这种地形在冷空气移动的过程中,有利于沙尘暴的形成。再者,坝上北部地区接近洪善达克沙地,多沙性土壤,降水渗透快,再加上风吹日晒的作用,土壤表层水汽蒸发加大,表层土壤易被风吹干。第三,由于近年来连续的干旱和气候变暖,以及其他因素的影响下,坝上植被相对稀少,裸土面积较大,为沙尘暴的产生提供了沙源。

6 结束语

1) 一般认为:沙尘暴天气多出现在前期少雨的干燥环境下。通过本个例的分析,即便是地面湿度较大,但由于本个例雨后日晒及风大,土壤蒸发快,很快使地面变干,在西北大风出现6个多小时后,出现沙尘暴天气。这与文献[14]给出的一场较大降水

后,当强冷空气活动时,平均间隔近 20d 左右的时间才能出现沙尘暴的统计结果是不同的。

2) 本次沙尘暴过程,高空急流高度下降引起的动量下传是地面产生大风及沙尘暴的动力因素,高空急流下湍流涡旋的阵性下沉气流冲击地面,农谚语:“刮地风”,是本次沙尘暴形成的动力机制和过程。

3) 尘暴过程出现在高空强冷空气爆发南下,地面气旋迅速发展的前提下,可见具备了产生沙尘暴天气的大尺度环流背景,而斜压能量释放对本次沙尘暴的形成起到助推作用。

4) 面冷锋气旋附近的强动力抬升作用,也是本次沙尘暴过程的一个动力因素,它对沙尘暴的形成、发展及维持起到重要作用。

参考文献

- [1] 康风琴,强沙尘暴过程的中尺度数值模拟分析和总动能收支。全国数值预报会议,2002年10月,广西桂林。
- [2] 李清森,藏建升。河北省沙尘暴天气与降水的统计分析。河北气象,1995,21(3):16~19。
- [3] 姜学恭,沈建国,刘景涛,等。导致一例强沙尘暴的若干因素的观测和模拟研究。气象学报,2003,61(5):606~618。
- [4] 徐祥德,翁永辉。沙尘暴预报的 TOVS 变分技术分析。大气遥感再分析场构造技术与原理,气象出版社,2003,160~170。