

蒙古气旋爆发性发展导致的 强沙尘暴个例研究^{*}

刘景涛¹⁾ 郑新江²⁾ 康 玲¹⁾
姜学恭¹⁾ 邱伏裕¹⁾ 方 翔²⁾

1) (内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051)

2) (国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要 对 2001 年 4 月 6~7 日发生在中国北方的一次强沙尘暴过程, 从沙尘源、干旱气候背景、天气系统及起沙和扬沙的动力机制进行了初步研究, 揭示了强沙尘暴与蒙古气旋和高空急流活动的关系。得出: 位于内蒙古西部的巴丹吉林沙漠和中部的浑善达克沙地, 是沙尘暴的主要沙尘源区; 持续两年的干旱是强沙尘暴形成的气候背景; 蒙古气旋的爆发性发展和冷锋后大风是起沙的主要动力; 湍流输送和高空急流出口区左侧气流辐散强迫形成的干对流上升气流是沙尘向高空输送的动力机制等结论。作者认为强沙尘暴是挟带大量沙尘的强干对流风暴。

关键词: 沙尘暴; 蒙古气旋; 高空急流

p4 A

1 引言

强沙尘暴是一种严重的灾害性天气。近几年来, 特别是 1993 年 5 月 5 日我国西北地区遭遇强沙尘暴袭击后, 引起了各方面关注, 相继开展了沙尘暴气候学和成因机制的研究。方宗义等^[1]较系统地汇集了近几年来我国对沙尘暴的研究成果。Brazel^[2]分析了美国亚利桑那州 1965~1980 年期间沙尘暴爆发时各种天气系统特征, 指出形成沙尘暴有锋面系统、雷暴对流、热带扰动和高层切断低压 4 种天气系统。我国已有的研究认为沙尘暴主要分为纯冷锋型和干飑线加冷锋的混合型两类^[1,3~5], 目前尚未见到由蒙古气旋强烈发展导致强沙尘暴的研究。

2001 年 4 月 6~7 日我国北方出现了一次大范围强沙尘暴过程, 其中内蒙古中部的偏北地区出现了特强沙尘暴(水平能见度<50 m), 其影响范围之广、强度之强、持续时间之长为历史罕见^[6]。本文从生态环境、干旱气象条件、蒙古气旋的活动、卫星遥感图象和某些物理量特征对这次强沙尘暴的成因进行初步研究, 揭示蒙古气旋和高空急流与沙尘暴发生发展的关系, 并与 1993 年 5 月 5 日强沙尘暴过程的若干方面作了对比分析, 这对进一步认识沙尘暴的成因机制和防御沙尘暴灾害有重要意义。

2002-02-26 收到, 2003-03-28 收到修改稿

* 国家重点科技项目 2000K010302 资助

2 沙尘暴时空演变和主要灾情

2001年4月6日02时(北京时,下同),西西伯利亚冷空气开始侵入新疆,在吐鲁番出现扬沙。08时冷空气东移侵入内蒙古西部阿拉善盟,造成该盟大范围扬沙。14时沙尘天气迅猛加强,内蒙古阿拉善盟、巴彦淖尔盟北部、包头市北部、乌兰察布盟北部和锡林郭勒盟西部出现大范围沙尘暴和特强沙尘暴,风力达到7~9级(巴彦淖尔盟乌拉特后旗定时风速 24 m s^{-1} ,满都拉庙定时风速 22 m s^{-1})。水平能见度下降到200m到300m,其中阿拉善盟的额济纳旗沙尘暴从8点25分持续到16点17分,持续时间近8h,能见度下降到0m。6日20时,阿拉善盟、巴彦淖尔盟沙尘暴停止,上述其余地区沙尘暴仍在持续,其范围向东扩展到锡林郭勒盟中东部,能见度下降到200m以下。7日02时,沙尘暴和强沙尘暴区稳定少动。在6日16时到7日02时,沙尘暴强度达到最强,内蒙古中部偏北地区5个气象站能见度降至0m,形成特强沙尘暴(黑风暴)。7日08时包头市北部、乌兰察布盟北部、沙尘暴停止,沙尘暴区继续向东扩展到内蒙古赤峰市北部、通辽市北部、兴安盟北部,其中兴安盟北部出现了强沙尘暴,能见度下降到50m到300m。7日14时上述地区沙尘暴仍然持续,同时黑龙江和吉林省开始出现沙尘暴。7日20时横扫我国西北、华北、东北7个省、区及蒙古国南部,历时40多个小时的沙尘暴才告停止。

图1是6日14时到7日20时各站最小能见度分布。由图可见,这次沙尘暴过程,特强沙尘暴中心主要位于内蒙古中部偏北地区,满都拉、朱日和、二连浩特、苏尼特左旗和阿巴嘎旗能见度均为0m。强沙尘暴区(能见度 $\leq 200\text{ m}$)主要位于 42°N 以北,呈东西带状。它与西北路径寒潮冷锋造成的沙尘暴区(如1993年5月5日我国西北特

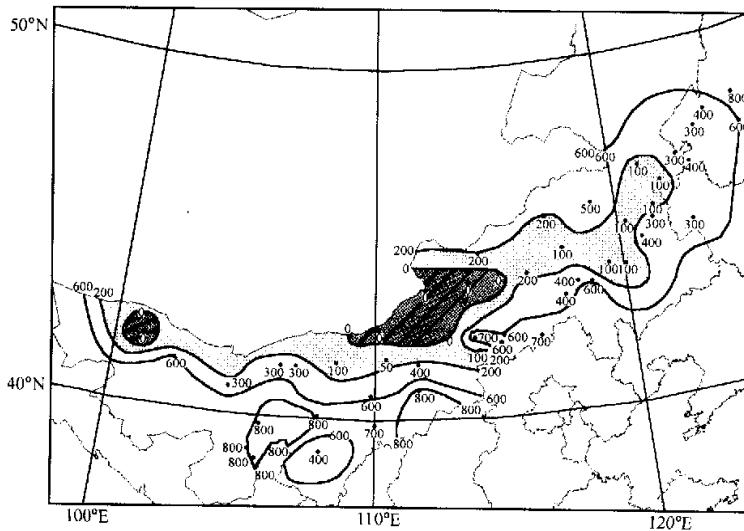


图1 2001年4月6~7日内蒙古、黑龙江、吉林沙尘暴最小能见度分布(单位:m)

强沙尘暴区)自西北向东南伸延不同^[7],与飑线系统造成的小范围沙尘暴区有更大差异。就强沙尘暴发生的地理区域而言,1993年5月5日强沙尘暴发生的地理区域较本例偏西,前者主要袭击了新疆东部、甘肃河西走廊地区、宁夏大部和内蒙古西部,尤以甘肃省最强,风暴中心在金昌市附近^[7]。另外,1993年5月5日强沙尘暴过后出现强烈降温,日平均气温下降了8~10℃,而本例降温很弱。

表1是各级能见度出现站数。由表可见此次沙尘暴过程非常猛烈,影响范围非常广阔。阿巴嘎旗特强沙尘暴(能见度0m)自6日20时一直持续到7日02时,持续时间长达6h之久。利用地理信息系统和卫星遥感图象分析此次沙尘暴在中国境内影响面积约103万km²。

表1 4月6~7日各级水平能见度出现站数

分级/m	$V \leq 50$	$50 < V \leq 200$	$200 < V \leq 500$	$500 < V \leq 1000$
站数	7	13	14	15

这场强沙尘暴给我国北方造成了严重环境灾害,给农牧业造成巨大损失,也严重影响了交通安全和人的身体健康。据不完全统计,仅内蒙古巴彦淖尔盟乌拉特后旗农区刚播种的15 334 km²小麦有95%被风刮出地表。锡林郭勒盟北部和西部5个旗成幼畜死亡30 783头(只),走失3万多头(只),倒塌和损坏棚圈4 310间,被沙埋没草场2 000 km²,大部分牧民住房屋顶瓦被刮掉,大量蒙古包被损坏。苏尼特右旗政府所在地赛汗塔拉,因强沙尘暴造成医院人满为患,有的人病情严重致死^[8]。齐齐哈尔因沙尘暴机场被迫关闭8h。

3 沙尘源

我国北方除东北各省,其余地区均处于干旱、半干旱气候区,生态环境恶劣,自西向东主要有塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地等原始沙漠、沙地。其中除塔克拉玛干沙漠,均主要位于内蒙古境内。位于阿拉善盟的巴丹吉林沙漠和锡林郭勒盟的浑善达克沙地是本次强沙尘暴的两大主要沙尘源区。

近几十年来,由于气候变暖和自20世纪50年代以来降水趋势总的减少,特别是人类活动,如超载放牧,人口和牲畜头数大量增加^[9],大面积草场被开垦为耕地和滥肆樵采等,破坏了地表原有稳定结构,打破了相对脆弱的平衡,造成草原和耕地严重沙化,也为沙尘暴的形成提供了丰富的沙尘物质。另外,与我国毗邻的蒙古国广袤的戈壁、荒漠也是本次强沙尘暴的沙尘源地。

4 干旱天气气候背景

继1999年我国北方干旱之后,2000年我国北方仍干旱少雨,内蒙古全区大部年降水量出现-25%~-50%的负距平,牧草低矮、稀疏、地表裸露。2001年2月和3月全区持续少雨,负距平达-40%~-100%。内蒙古西部连续30~90余天滴雨未落,

而气温迅速回升, 内蒙古东部积雪消融, 土壤水分大量蒸发。尤其是继1~3月10场大风和沙尘暴过程之后, 表层土壤极其干燥疏松。干土层深达5~15 cm, 在风力作用下极易起沙。

5 蒙古气旋爆发性发展和强冷空气入侵

5.1 蒙古气旋的生成发展和移动

这次大范围强沙尘暴与蒙古气旋爆发性发展关系密切。蒙古气旋2001年4月5日02时生成, 中心位于(51°N, 82°E), 中心气压1003 hPa。后向东偏南方向移动, 6日02时中心位于(49°N, 100°E), 中心气压加深到995 hPa, 此时气旋冷锋开始影响新疆、甘肃, 形成大风沙尘天气。6日08时越过蒙古西部山地, 移到乌兰巴托附近, 气旋中心加深到991 hPa, 在气旋冷锋袭击下, 内蒙古西部的阿拉善盟出现大范围扬沙。其后气旋沿48~50°N纬带东移, 气旋冷锋和副冷锋扫过内蒙古, 出现大范围强沙尘暴。6日20时到7日02时气旋爆发性发展, 中心气压急剧下降了6 hPa, 移动缓慢, 只移动了100 km, 在锡林郭勒盟引发了最猛烈的沙尘暴, 二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗, 6日20时到7日02时能见度降为0 m。显然气旋爆发性发展使地面风迅速加大, 造成沙尘暴猛烈加强。7日08时气旋锢囚, 中心东移到(48.5°N, 118.5°E), 沙尘暴开始影响黑龙江省和吉林省。气旋中心加深到977 hPa(24 h内气旋中心加深了14 hPa)。这一记录是2001年1~5月18次蒙古气旋沙尘暴过程气旋中心气压的最低值。强沙尘暴和特强沙尘暴就发生在6日08时到7日08时这一时段。上述事实说明, 沙尘暴强度、范围与蒙古气旋爆发性发展和移动有着密切关系。7日14时蒙古气旋开始填塞, 20时消亡, 沙尘暴随之结束。沙尘暴自西向东历时40多个小时, 远较1993年5月5日沙尘暴过程持续时间长, 后者自5月5日10时左右开始, 20时后迅速减弱, 历时约10 h^[4,7]。显然这与形成这两次过程的天气尺度环流系统的生命期长短有着密切关系。另外, 两者沙尘暴鼎盛期出现的时间也不相同, 1993年5月5日沙尘暴鼎盛期(水平能见度<50 m)出现在5日14时~20时, 内蒙古阿拉善盟以20时最强(水平能见度接近0 m), 而本例沙尘暴鼎盛期出现在6日20时到7日02时, 即入夜以后。究其原因, 1993年5月5日黑风暴形成过程与“沙尘壁”前后辐射造成的热力反馈作用关系密切, 白天正反馈机制加大了冷锋前后温度梯度, 造成强烈的局地锋生, 风速加大, 沙尘暴加强; 入夜后负反馈机制使冷锋锋消, 风速减小, 沙尘暴也随之减弱。而本例沙尘暴的鼎盛期出现在蒙古气旋爆发性发展阶段, 辐射影响作用不大。

图2、图3分别是2001年4月6日14时NOAA-16和4月7日08时FY-1C气象卫星监测到的沙尘暴遥感图象。由图2可以看出有两条沙尘暴带, 分别与蒙古气旋冷锋和副冷锋相联系, 配合地面测站沙尘暴观测记录, 可以确定沙尘暴主要出现在地面冷锋和副冷锋之后, 与冷锋后大风带相吻合。显然大风是形成沙尘暴起沙的主要动力^[6]。在本例中由于气旋的猛烈发展, 冷锋后的大风为西风或西南风, 与通常是西北风或偏北风不同, 如大量研究指出造成1993年5月5日我国西北地区强沙尘暴的冷锋后是西北大风^[4,7], 它是典型的干飑线加冷锋的混合型沙尘暴过程^[5,7]。图2中位于蒙古国南部浓密的沙尘带14时后侵入中国内蒙古中部, 造成了偏北地区的特强沙尘暴。

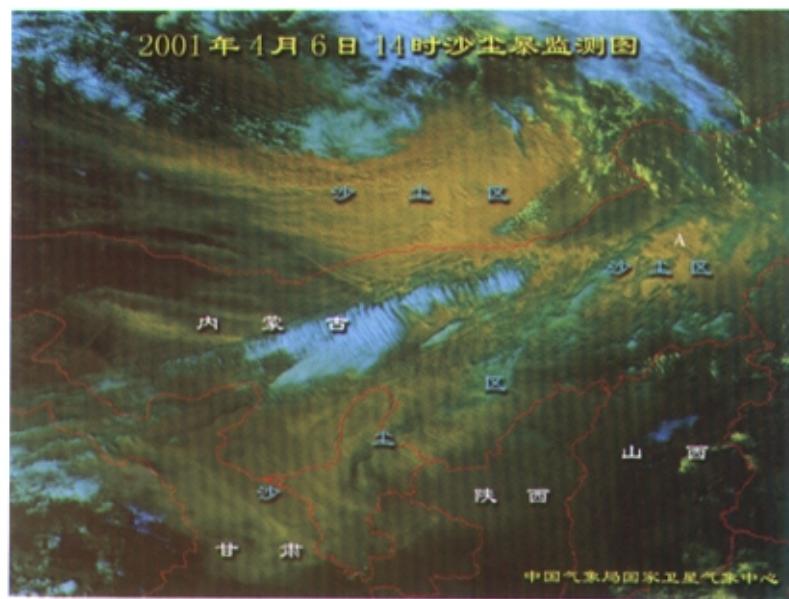


图2 2001年4月6日14时NOAA-16气象卫星监测到的沙尘暴（黄色区为沙尘区）

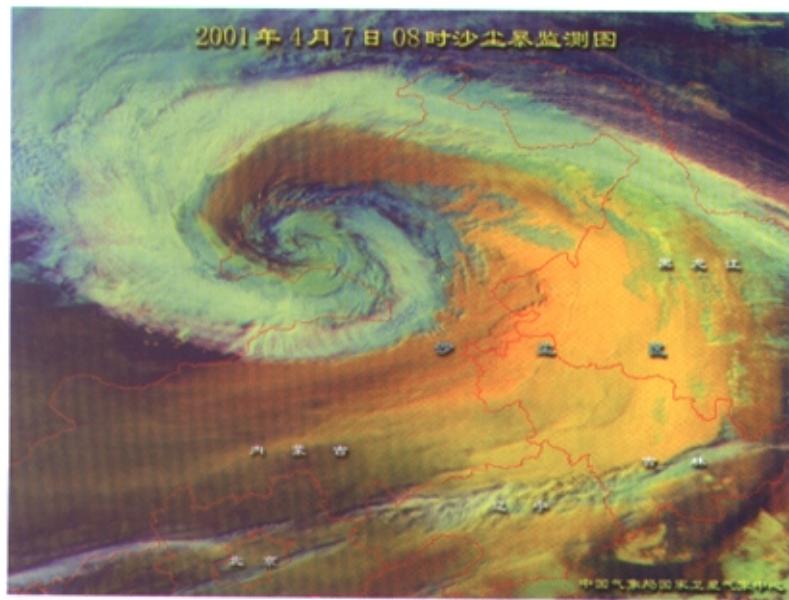


图3 2001年4月7日08时FY-1C气象卫星监测到的沙尘暴（黄色区为沙尘区）

另外在气旋暖区中(图2中A区)有一强沙尘暴区,水平尺度约300 km。这一中尺度强沙尘暴区位于内蒙古锡林郭勒盟西部的二连浩特和朱日和,水平能见度为200 m,是一中尺度气压场扰动造成的。由图3配合地面气旋分析,可以看出此时蒙古气旋已发展到鼎盛期,形成锢囚气旋,沙尘随涡旋气流旋入气旋中心。

5.2 中尺度气压场扰动和3 h变压场

图4是2001年4月6日14时地面气压形势图,图中蒙古气旋暖区中在二连浩特与化德之间有一中尺度气压梯度场扰动(图中框区),最大气压梯度达到7.5 hPa/60 km,其水平尺度约300 km。从图中可以清楚地看到气旋暖区中气压场的中尺度波状扰动和等压线挤度的变化。它的形成可能与强冷锋激发有关。这一中尺度气压梯度场扰动形成了二连浩特和朱日和的强风(朱日和6日14时平均风速 16 m s^{-1}),并形成强沙尘暴(图2中A区)。我们进一步分析了二连浩特和朱日和6日地面气压、气温、湿度和风的自记曲线,两端的气压变化没有气压“鼻”,空气干燥,没有Cb云发展和阵性雷雨等飑线的特征。但可以看到与上述中尺度低气压扰动相联系,6日15时到16时二连浩特气压、气温、相对湿度和风向风速自记曲线有明显的中尺度扰动演变特征(图5)。从气压、气温和相对湿度配置来看,这一中尺度低气压扰动的性质是暖而干燥的。从图5中各气象要素变化还可以看出在16点到17点之间气压升高、气温和湿度下降、风向转为西西北风,风速进一步加大,冷锋移过二连浩特。而1993年5月5日金昌黑风暴则首先是冷锋前的飑线触发造成的,随沙尘壁过境,气压先急升急降,即出现气压“鼻”,然后随冷锋过境再缓慢上升;而气温则急降然后缓慢下降;瞬时风速高达34

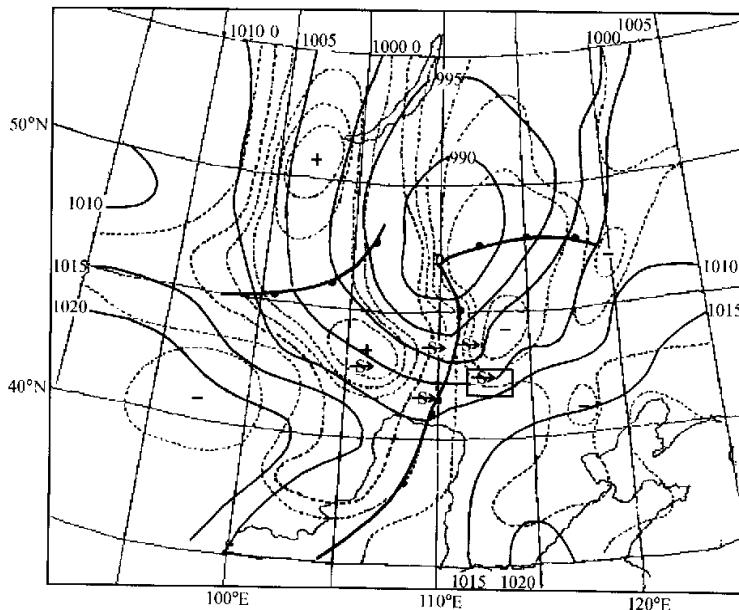


图4 2001年4月6日14时地面天气图
实线为等压线,虚线为3 h等变压线

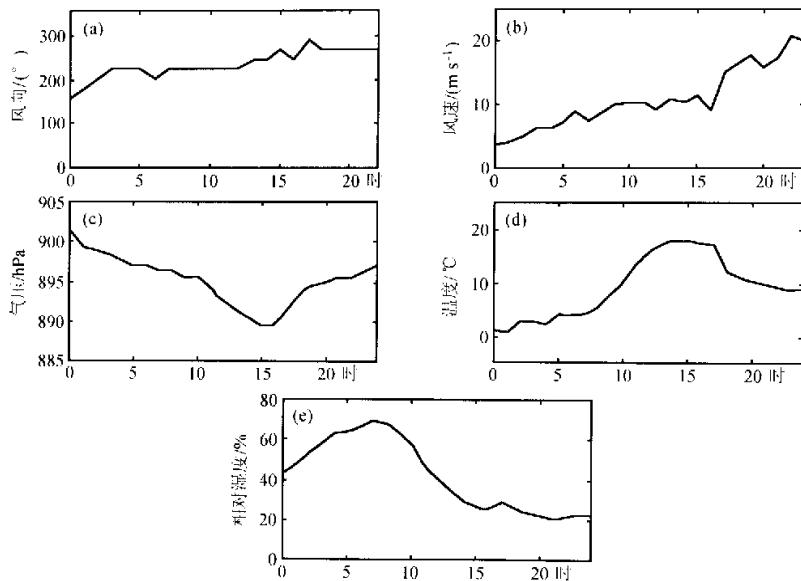


图 5 4月6日00时到7日00时二连浩特风向(a)、风速(b)、气压(c)、气温(d)和相对湿度(e)自记曲线

$m\ s^{-1}$; 有Cb云发展, 听到雷声, 并出现阵性降水。强对流特征更明显^[7]。需要指出中尺度气压梯度场扰动在强冷空气爆发时也存在于冷锋后天气尺度气压梯度场中, 在地面强冷高压脊反气旋曲率最大的地区更为多见, 这类地区往往在脊顶形成大风和强沙尘暴。

图4还给出了3 h变压分布和出现沙尘暴的部分测站。可以看出, 在气旋冷锋北段, 前后分别有-5.1 hPa和+3.2 hPa的3 h变压中心, 其间形成强变压梯度, 强沙尘暴出现在正负变压中心之间的强变压梯度区。满都拉庙6日14时平均风速为22 $m\ s^{-1}$, 水平能见度为0 m。显然变压梯度造成的超地转偏差风在大风形成中起了重要作用, 这是形成图1中特强沙尘暴中心的原因之一。王式功等人¹⁾曾指出强冷锋过境后强变压梯度可产生20~30 $m\ s^{-1}$ 的瞬时变压风, 此大风所经之地常导致沙尘暴的产生。在对1993年5月5日强沙尘暴研究中也强调了3 h变压的作用^[11]。

6 强烈的干对流——扬沙的动力机制

在强风力的作用下, 通过沙粒的相互碰撞, 沙粒获得巨大动量, 沙粒群开始起动^[12], 并通过下列机制向高空输送。

1) 王式功、董光荣、陈惠忠等, 我国沙尘暴特征、成因及防治对策, 中国气象学会, 西部大开发: 气象科技与可持续发展学术研讨会, 学术报告, 2000年9月。

6.1 湍流垂直输送

用下式计算了6日08时到7日20时间隔12 h 850~700 hPa和700~500 hPa大气层的Richardson^[13]:

$$Ri = -\frac{R_d \Delta P}{\bar{P}} \left(\Delta T_p - \frac{AR_d \bar{T}}{c_{pd}} \frac{\Delta P}{\bar{P}} \right) / (\Delta u_p^2 + \Delta v_p^2)$$

式中, R_d 为干空气比气体常数, ΔP 为两层气压差, \bar{P} 为两层平均气压, ΔT_p 为两层温度差 (°C), A 为功热当量, \bar{T} 为两层平均温度 (°K), c_{pd} 为干空气的定压比热, Δu_p 和 Δv_p 分别为两等压面之间的风速分量差。

计算结果指出, 6日08时到7日08时 850~700 hPa 我国北方大部分地区 Ri 均小于0.1 (图略), 说明对流层低层大气存在着强烈的湍流运动。人们看到的黑风墙中沙尘团随气流不规则的翻滚现象就是沙尘被湍流输送的观测事实。7日20时 850~700 hPa 除内蒙古东部和黑龙江省西部、吉林省西部 $Ri < 0.1$, 内蒙古中西部 Ri 转为 > 0.1 , 沙尘暴过程基本结束。 Ri 与沙尘暴有良好的关系。计算结果还指出, 6日08时到7日08时, 即在沙尘暴发展盛期 700~500 hPa Ri 值也 < 0.1 , 说明湍流运动的大气层深厚。沙尘暴减弱结束时 (7日20时) 700~500 hPa Ri 均变为 > 0.1 , 湍流运动在中层明显减弱。

湍流是大气低层和中层扬沙的主要动力机制。由上式不难看出 Ri 既包括了热力不稳定, 又包括了由于垂直风切变造成动力不稳定, Ri 比 $T - \ln p$ ^[14] 判定大气层结稳定状态更好。

6.2 干冷锋强迫抬升和锋面次级环流

造成这次强沙尘暴的冷锋没有出现降水, 低层坡度陡峭。6日02时到7日02时每6 h 移动300~400 km, 7日02时气旋爆发性发展后, 移速减慢, 到7日08时只移动了100 km, 后移入东北平原, 移速稍有加快。

干冷锋冲击造成的强对流上升气流是沙尘向上输送的重要动力。地面大风扬起的大量沙尘被锋面次级环流的上升气流携带向更高层输送^[4]。

6.3 高空急流出口区左侧辐散强迫

在本次强沙尘暴过程中, 高空强极锋西风急流非常活跃, 急流核与蒙古气旋和气旋冷锋相伴有规律的自西东移。图6是4月6日08时到7日20时300 hPa急流核移动路径图 (实线), 虚线是其间最小能见度出现地区和时间。图中还给出了6日08时到7日20时间隔6 h 蒙古气旋中心强度和移动路径。由图6可以看出:

(1) 6日08时高空急流核位于哈密上空, 中心最大风速为 46 m s^{-1} 。到6日20时, 移速较快, 东移到包头市北部, 移速为700 km, 中心风速明显加大。其间14时在其移动路径左侧出现了两个强沙尘暴中心: 一个在内蒙古阿拉善盟西北部的额济纳旗, 另一个在包头市北部的满都拉庙, 最小能见度均为0 m。

(2) 随着急流核风速加大 (6日20时急流核最大风速由 46 m s^{-1} 增大到 64 m s^{-1}) 移速减慢, 沙尘暴猛烈加强, 6日20时在急流出口区左侧, 东西200 km、南北150 km 中尺度范围内能见度降为0 m, 出现0 m能见度的测站为二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、朱日和 (参见图1)。

(3) 高空急流核沿 $42^{\circ}\text{--}43^{\circ}\text{N}$ 纬带东移, 与蒙古气旋移动方向一致。

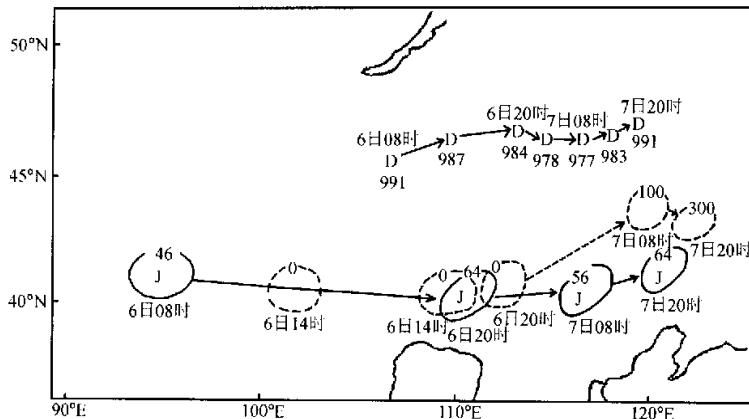


图 6 2001 年 4 月 6 日 08 时到 7 日 20 时 300 hPa 急流核(实线)、

最小能见度(虚线)和地面气旋中心移动路径

实线上方数字为急流核最大风速(单位: m s⁻¹), 虚线上方数字为最小能见度(单位: m),

气旋中心下方数字为强度(单位: hPa), 其他数字为时间

综上所述, 可得以下初步结论:

(1) 沙尘暴的最强中心出现在高空急流出口区左侧。高空急流核沿 42~43°N 纬带东移是造成本次强沙尘暴过程最小能见度呈准纬向分布的主要原因(参见图 1)。

(2) 高空急流核强度与沙尘暴强度有着密切的正相关关系。

(3) 蒙古气旋的移动路径和速度与高空急流核的移动路径和速度关系密切。其中心强度与气旋中心和急流核的相对位置也有着密切关系: 当蒙古气旋中心在高空急流出口区左侧距急流核较远时, 气旋处于加深阶段; 当与急流核基本处于同一经度位置时, 气旋加深到最强; 其后气旋中心位置较急流核偏西时, 气旋开始填塞。

业已证明, 高空急流出口区左侧气流在地转适应过程中发生强烈辐散, 形成对流性强上升气流(次级环流的上升支)。我们认为高空急流出口区左侧强烈的干对流上升气流是形成中小尺度强(特强)沙尘暴中心(如本例中能见度为 0 m 的地区)的主要动力机制, 是大量沙尘向高空输送的主要动力。

7 特强沙尘暴中心成因分析

本次大范围沙尘暴过程有两个水平能见度近 0 m 的特强沙尘暴中心, 一个位于阿拉善盟西北部额济纳旗, 范围较小; 另一个位于包头市北部的满都拉、锡林郭勒盟西部的二连浩特、朱日和、苏尼特左旗、阿巴嘎旗, 范围大, 约 60 000 km²。第一个中心出现在 6 日 8 点 25 分到 16 点 17 分。形成的主要原因是冷锋过境后出现长时间持续的西北大风(瞬时风速达 29 m s⁻¹), 且该地位于巴丹吉林沙漠西北边缘, 居延海干涸, 大片胡杨林死亡, 生态环境严重恶化, 是我国沙尘暴的三大源区之一。这个中心是在大风作用下, 以局地起沙为主形成的。第二个特强沙尘暴中心出现在 6 日 14 时到 7 日 02 时。其成因是: (1) 风速大。图 7 是 6 日 14 时到 7 日 02 时各测站定时观测到

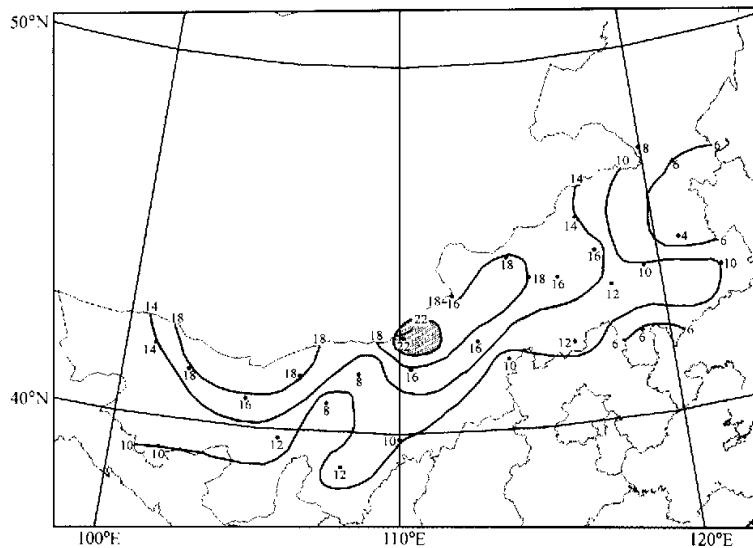


图7 4月6日14时到7日02时各测站定时极大风速等值线(单位: $m\ s^{-1}$)

的极大风速等值线图。图上有两个定时风速 $\geq 18\ m\ s^{-1}$ 的中心,一个位于蒙古国南部的达兰扎达加德,西风, $20\ m\ s^{-1}$ 。由这个强风速中心输送的沙尘是形成这个特强沙尘暴中心的原因之一。另一个最大风速中心位于包头市北部的满都拉,西风, $22\ m\ s^{-1}$ 。从这个风速最大中心向东东北伸展的 $18\ m\ s^{-1}$ 等风速线包围的地区基本上与能见度为 0 m 的地区吻合(参见图1)。(2) 地表裸露疏松, 沙尘物质丰富。第二个特强沙尘暴中心位于浑善达克沙地西部和西北部, 荒漠草原植被破坏严重, 风蚀沙化明显, 残存灌丛周围多小型沙丘, 这里是我国另一个沙尘暴源区, 且又与境外沙源蒙古国东戈壁省毗邻。而其东部、南部植被都相对较好, 沙化较轻。(3) 利于湍流发展。用该区及附近二连浩特、海流图、呼和浩特、锡林浩特 4 个高空测站 6 日 20 时探空资料计算地面到 $850\ hPa$ 大气层中理查森数 Ri , 其值分别是 0.010 、 0.016 、 0.076 、 0.009 , 非常有利于湍流发展。(4) 高空辐散强迫抽吸作用最强。由图 6 可以看出从 6 日 08 时到 6 日 20 时, $300\ hPa$ 极锋急流核风速迅速由 $46\ m\ s^{-1}$ 加大到 $64\ m\ s^{-1}$, 其出口区左侧高空辐散强迫抽吸作用强烈。7 日 08 时高空急流核风速减小到 $56\ m\ s^{-1}$, 辐散强迫作用减弱。虽然 7 日 20 时高空急流核风速又加大到 $64\ m\ s^{-1}$, 但此时地面蒙古气旋填塞消亡, 地面风速大大减小。概括而言, 第二个特强沙尘暴中心的形成既有境外蒙古国南部荒漠戈壁的沙尘输送, 又有局地起沙造成。

图 7 和图 1 比较, 两者图形非常相似, 说明大风风速与沙尘暴的强度关系极为密切, 是形成沙尘暴最关键的动力条件。

8 结论

通过对 2001 年 4 月 6~7 日本次中国北方强沙尘暴过程的分析, 得到以下初步结

论：

- (1) 位于我国内蒙古的巴丹吉林沙漠和浑善达克沙地西部沙化荒漠草原及蒙古国南部的荒漠、戈壁是本次强沙尘暴的主要沙尘源地。
- (2) 我国北方持续 2 年的干旱为本次强沙尘暴的形成提供了天气气候背景。
- (3) 蒙古气旋的爆发性发展和气旋冷锋后形成的大风是形成沙尘暴起沙的主要动力。
- (4) 在天气尺度气压梯度场和变压梯度场中，气压梯度和变压梯度分布是不均匀的，存在着中尺度气压梯度场和变压梯度场，它是形成沙尘暴的一类中尺度系统。
- (5) 特强沙尘暴是一种猛烈的挟带大量沙尘的干对流风暴，强烈的干对流上升气流是大量沙尘向高空输送的主要动力。高空急流出口区左侧辐散强迫与地面冷锋强迫抬升耦合是形成强上升气流的主要动力机制。中尺度特强沙尘暴中心主要是由高空急流出口区左侧强烈的干对流上升气流造成的。

致谢 本文承蒙陈受钩教授提出宝贵意见并承蒙黑龙江省气象局和吉林省气象局提供了本省 4 月 7 ~8 日沙尘暴资料，特致谢意。

参 考 文 献

- 1 方宗义、朱福康、江吉喜、钱正安，中国沙尘暴研究，北京：气象出版社，1997.
- 2 Brazel, A. J., The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona (1965~1980), *Journal of Climatology*, 1986, 6, 255~275.
- 3 徐国昌、陈敏连、吴国雄，甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析，气象学报，1979, 37 (4), 26~35.
- 4 刘景涛、杨耀芳、李运锦等，中国西北地区 1993 年 5 月 5 日黑风暴的机理探讨，应用气象学报，1996, 7 (3), 371~376.
- 5 胡隐樵、光田宇，强沙尘暴发展与干飑线—黑风暴形成的一个机理分析，高原气象，1996, 15 (2), 178~185.
- 6 刘景涛、郑明倩，华北北部黑风暴的气候学特征，气象，1998, 24 (2), 39~44.
- 7 钱正安、胡隐樵、龚乃虎等，“93. 5. 5”特强沙尘暴的调查报告及其分析，中国沙尘暴研究，北京：气象出版社，1997, 37~43.
- 8 任阵海，浅谈我国的生存环境问题，气候与环境研究，1999, 4 (1), 1~4.
- 9 宫德吉，内蒙古草原开发利用中的问题，气候与环境研究，1997, 2 (1), 92~95.
- 10 刘毅、任丽新、周乐义等，一次黄沙输送过程的数值模拟研究，大气科学，1998, 22 (6), 905~912.
- 11 许宝玉、钱正安、焦彦军，西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析与预报，中国沙尘暴研究，北京：气象出版社，1997, 44~51.
- 12 姚云峰、王林和、姚洪林等，沙漠学，呼和浩特：内蒙古人民出版社，1998, 20~34.
- 13 陈创买、郭英琼，气象常用参数和物理量查算表，北京：气象出版社，1980, 9~11.
- 14 赵光平、王凡、杨勤等，宁夏区域性强沙尘暴天气成因及其预报方法研究，中国沙尘暴研究，北京：气象出版社，1997, 52~58.

A Case Study of a Severe Dust Storm Resulted from a Explosive Mongolia Cyclone

Liu Jingtao¹⁾, Zhen Xinjiang²⁾, Kang Ling¹⁾,

Jiang Xuegong¹⁾, Qi Fuyu¹⁾, and Fang Xiang²⁾

1) (*Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051*)

2) (*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract On April 6 to 7 of 2001, a severe dust storm occurred in North China. A preliminary study was conducted on the sand-dust source, the formation of arid environment, the physical cause of Mongolia cyclone explosive development and the process that sand-dust were blown and raised. The study uncovered the close relationship between the dust storm, Mongolia cyclogenesis and the upper level jet. Results showed: the primary sand-dust sources came from Badain Jaran desert and Hunshandake desert in western and mid Inner Mongolia respectively; the weather without precipitation lasting a long period caused a dry climatic background of the severe dust storm; the explosive development of Mongolia cyclone and the strong surface wind caused by the cold front passage induced the dust storm; the physical cause of the upward transportation of large amount of sand-dust lay in factors as follows: the turbulent mixing resulted from both the dynamic and thermal instability in the planetary boundary layer, and the strong/ dry/ ascending motion formed by coupling the cold frontal lifting in the low atmosphere with the divergence forcing which located at the left side of the upper-level jet exit region in the upper atmosphere. The authors think that the severe dust storm is a strong/ dry /convective storm carrying a large amount of sand-dust.

Key words: duststorm; Mongolia cyclone; upper level jet.