

“20010408”宁夏强沙尘暴天气中尺度系统分析

胡文东^{1,2}, 纪晓玲³, 李艳春³, 丁建军², 张智³

(1 南京气象学院, 江苏 南京, 210044, 2 宁夏气象防灾减灾重点实验室; 3 宁夏气象台, 宁夏 银川, 750002)

摘要: 针对 2001 年 4 月 8 日宁夏出现的一次强沙尘暴过程, 进行了天气背景及中尺度天气学分析。根据不同地区出现大风的时间差异, 讨论了地形对冷锋和沙尘暴运动的影响; 并利用 MM5 非静力平衡中尺度数值预报模式的导出量, 通过宁夏精细化预报物理量分析子系统, 计算、分析了这次过程中 Q 矢量、锋生函数及总温度的变化特征。结果表明: 由 MM5 数值模式输出产品与本次沙尘暴过程天气实况有较好的对应关系和预报指示意义。

关键词: 强沙尘暴; 中尺度; 分析

中图分类号: P445.5 文献标识码: A

沙尘暴是中国北方春季多发的灾害性天气, 往往造成重大损失。仅 1993 年 5 月 5 日的一次沙尘暴过程, 就袭击了 72 个县, 造成 300 多人伤亡, 直接经济损失为 7.25 亿元^[1]。随着经济的发展, 同等程度的沙尘暴所造成的损失也在增加。在较短的时段内, 沙尘暴加重了大气污染, 对公路、航空等许多部门带来直接经济损失。在较长的时期内, 沙尘暴不仅加剧了受灾区域的土壤沙漠化, 严重危害了当地的生态环境; 而且改变了大气中气溶胶的分布, 对全球气候产生不利影响。再者沙尘随大气环流运动在不同国家沉降, 从而形成国际性的外交问题。所以从诸多方面来讲, 对沙尘暴的分析研究具有相当重要的意义。

我国沙尘暴研究历史相对不长, 从 70 年代开始对沙尘暴个例进行研究^[2]。近些年来, 对沙尘暴天气过程的研究不断深入, 取得了丰硕的成果。这些研究涉及沙尘暴的天气气候特征^[3-6]、沙尘暴天气过程的物理机制分析与预报^[7-11]、使用卫星遥感技术监测沙尘暴的方法、以及产生沙尘暴过程的中尺度云团特征分析^[12-15]、沙尘暴预报系统研究开发^[16]等各个方面。近来在利用海冰资料进行沙尘暴气候预测研究方面也取得了成绩^[17]。

本文由观测事实出发, 对发生于 2001 年 4 月 8 日的一次强沙尘暴过程进行了天气学分析。根据宁夏的地形地貌特征, 讨论了锋面及沙尘暴运动发展的特点, 并利用非静力平衡中尺度数值模式进行了数值模拟, 利用预报模式的导出物理量产品, 对这次过程进行了合成诊断分析, 得到了有价值的结果。

1 天气实况

1.1 过程概述

概括地说, 这是一次集大风、降雪、降温、沙尘暴于一体的典型寒潮天气过程。2001 年 4 月 8 日白天到夜间, 受新疆附近较强冷空气快速东移南下的影响, 宁夏全区出现了 2001 年无论从范围和强度来说, 都是当年最强的一次沙尘暴天气, 部分地区出现了强沙尘暴。宁夏的石嘴山、吴忠及固原三市的局部地区最大瞬时风力达 9 级左右, 惠农 11 级。吹风过后, 气温骤降, 宁夏全区各站日平均气温普遍下降了 10 到 12℃。伴随降温, 8 日夜间至 9 日上午宁夏大部还出现了小到中雪天气, 南部山区局部地区降了大雪。其中, 沙尘暴主要出现在 8 日下午至傍晚前后。

地面气象观测规范规定^[18]: 沙尘暴是由于强风将地面大量尘沙吹起, 使空气相当混浊, 受中国气象局中尺度数值预报模式和预报产品释用技术在宁夏新一代天气预报业务技术中的推广应用课题与沙尘暴监测预警系统资助。

作者简介: 胡文东(1966-), 男, 北京人, 硕士, 首席, 高级工程师, 从事天气预报及方法研究。

水平能见度小于 1km 的天气现象。2001 年 4 月 8 日 8:00 到 9 日 8:00 宁夏各站最大瞬时风速及出现时间、最大平均风速、最低能见度、沙尘暴发生时间、各站降水量见表 1。

表 1 2001 年 4 月 8—9 日宁夏各站部分气象要素情况

Table 1. Some kinds of meteorological element in Ningxia on April 8-9 2001

序号	站号	站名	瞬时最大风速 (m/s)	瞬时最大风速出现时间	最大平均风速 (m/s)	最低能见度 (m)	沙尘暴发生时间	24h 降水量 (mm)
1	53517	石炭井	15.0	19:20	9.6	2000		
2	53519	惠农	30.6	18:59	21.6	200	13: 33-02: 08	
3	53518	大武口	17.9	18:36	10.6	300	13: 27-02: 17	
4	53611	平罗	16.9	18:42	7.6	200	13: 35-23: 31	0.0
5	53615	陶乐	24.8	17:30	15.0	200	16: 02-0: 26	0.3
6	53610	贺兰	13.3	15:09	8.7	300	14: 22-16: 08	4.9
7	53614	银川	16.3	14:14	9.9	300	13: 55-16: 17	2.4
8	53618	永宁	15.0	12:58	11.1	900	13: 08-18: 40	6.4
9	53619	灵武	19.2	13:44	14.1	600	13: 39-15: 43	2.5
10	53617	青铜峡	25.0	13:34	15.7	300	12: 23-22: 43	2.5
11	53612	吴忠	20.8	12:35	13.8	300	13: 36-22: 10	0.4
12	53723	盐池	21.3	17:05	12.6	300	09: 04-12: 36 14: 06-18: 31	5.4
13	53881	韦州	23.1	15:46	15.6	300	12: 58-20: 55	2.5
14	53704	中卫	21.9	10:57	16.0	600	10: 44-22: 37	0.6
15	53705	中宁	24.8	11:26	14.1	600	11: 38-20: 21	3.0
16	53727	麻黄山	24.0	19:53	19.0	0	14: 22-21: 37	7.2
17	53810	同心	19.8	18:14	11.5	400	12: 34-20: 45	7.8
18	53707	兴仁	20.4	19:16	15.2	800	12: 51-20: 26	1.9
19	53806	海原	19.4	13:18	13.5	400	15: 06-20: 00	5.4
20	53817	固原	16.7	19:13	9.3	700	16: 03-20: 25	4.8
21	53903	西吉	17.7	18:32	10.6	600	17: 28-20: 45	3.1
22	53910	六盘山	15.0	23:00	10.7	8000		9.5
23	53914	隆德	17.1	12:39	9.6	3000		7.7
24	53916	泾源	23.1	19:57	14.5	2000		4.8

注: 1、降水时段为 8 日 20:00 到 9 日 20:00; 2、盐池沙尘暴分两个时段, 其中前一时段为锋前增温偏南风引起, 后一时段为锋后强冷空气引起。

由表 1 可见, 这次过程的最大瞬时风速于 8 日 18:59 出现在惠农, 达 30.6m/s, 17 个站的平均风速超过 12m/s 或瞬时风速超过 7m/s, 达到大风标准。出现沙尘暴的 20 个站中, 有 13 个站的能见度降到 400m 以下, 其中, 麻黄山最低能见度观测记录值为 0。

1.2 沙尘暴发生前后气象要素变化情况

宁夏北部的银川和南部的固原是国家基准站, 可对诸多气象要素进行逐小时观测, 所以选取这两个站的气压、气温、相对湿度、能见度进行分析。2001 年 4 月 7 日 21:00 到 8 日 20:00 上述气象要素变化见图 1。

由图 1 可见, 沙尘暴发生前, 气温上升, 气压降低, 相对湿度下降, 风力逐渐增大; 在 8 日 13:00 和 15:00, 冷锋开始逼近银川和固原, 气压、相对湿度降到这一天中的谷底, 而气温上升至当日最高, 风速大增, 冷锋携带和大风卷起的沙尘使能见度急剧降低, 形成沙尘暴。

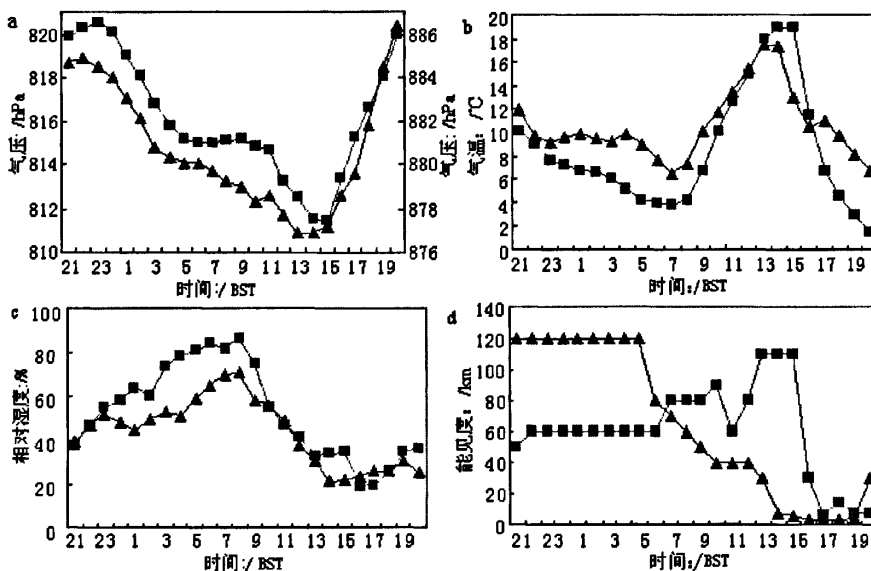


图1 银川、固原站气压(a)、气温(b)、相对湿度(c)、能见度(d)逐小时变化情况。横坐标时间以h为单位,起始时间为7日21:00(北京时)。三角符号曲线为银川站气象要素,方块符号曲线为固原站气象要素。
 Fig1. Hourly pressure, temperature, relative humidity and visibility in Guyuan and Yinchuan. Unit in abscissa is hour strating at 21:00BST on April 7. The lines with triangle represent the element of Yinchuan and those with square represent that of Guyuan.

1.3 沙尘暴天气风速时空分布特征分析

强冷空气活动时,与巨大气压梯度相伴随的大风,是其最为显著的特征之一,能够很好地反映出强冷空气的运动情况。宁夏北部和中部风速普遍较大,南部风速略小。最大风速于18:00出现在惠农,达20.3m/s,19:00为20.1m/s。20:00在麻黄山出现了20.0m/s的大风。

从时间分布上看,较高风速首先出现在宁夏最北部的石炭井和中部的中宁,在7:00和9:00风速超过8m/s分别达到8.4和11.1m/s。主要原因在于:一方面中宁的位置相对略为偏西;另一方面,这两站分别位于宁夏北部贺兰山的南、北两个山口,由于地形阻挡作用^[14],冷空气无法直接翻越贺兰山,而从两端的山口灌入,因狭管效应造成风速大增,从而使这两站最先遭受大风的袭击。冷空气从贺兰山南、北两端绕过,最终在背风面(东侧)的中段会合,所以该处的平罗、陶乐、贺兰等站大风出现时间相对较迟。

从风速地理区域分布可以看出,冷空气主要影响了兴仁以北的宁夏北部和中部地区,宁夏南部的冷空气活动与北部相比略为偏弱。结合表1,可以看到最南端的三站未出现沙尘暴,而且总体来看,南部各站的能见度情况较北部稍好。

2 沙尘暴天气成因分析

2.1 气候背景

2001年冬季(2000年12月至2001年2月),宁夏全区气温异常偏高,气温距平在2.0℃~3.9℃之间,大部分站平均气温达历史最高值或次高值,是自1987-1999年连续13a偏暖后又一个暖冬。宁夏中北部降水异常偏少,春季这种情况仍然维持。冬、春季持续高温、缺少降水造成土壤含水率低,土壤解冻的时间比往年提前。无明显雪盖,加速了土壤水分的蒸

发,大面积地表上层干燥、疏松;再加上拉尼娜年盛行东亚季风,北方地区多大风天气,为沙尘暴天气的发生提供了有利的气候背景。

2.2 天气背景

2.2.1 高空横槽和强锋区

过程初期,亚洲环流为两槽两脊形势,乌拉尔山以西、贝加尔湖到蒙古各为一暖脊,西西伯利亚为高空冷槽控制。东亚槽较偏东,主要冷空气来自新地岛附近。6日,新地岛以北的冷气团南下,在西西伯利亚堆积,形成一个东北—西南向的横槽。7日,乌拉尔山西部高压脊发展东移,环流经向度增大,脊前偏北风加强,冷空气在西西伯利亚横槽内聚集。08:00,横槽底部分裂小槽东移,槽前正涡度平流促使槽的东南方产生负变高,中亚地区高度场降低;20:00,高空锋区加强南压,进入新疆北部,在蒙古国中部形成一较强高空冷涡,冷中心强度达 -41°C 。8日08:00,高空冷涡继续加深并南下至北疆附近,锋区南压至新疆东部至河西西部,温度槽落后于高度槽,槽前温度场与高度场的交角增大。对应700hPa天气图上,内蒙古到新疆中部也有一冷低涡槽,冷中心为 -25°C ,新疆到河西为 $24\sim 28\text{m/s}$ 的西北风带。而河套及其以东有明显的暖舌向北伸展至贝加尔湖,冷暖中心之间温度等值线非常密集,温度场与高度场近于垂直分布,形成强力管。强冷空气翻越天山,灌入南疆盆地,在东移过程中使青海、甘肃河西、宁夏、陕西等地出现了大风、沙尘暴、强降温(寒潮)天气。8日20:00,高原东侧转为西南气流,河套地区湿度增大,银川以南为高湿区。受东移冷空气与偏南暖湿气流共同影响,河套地区自南向北出现降雪天气。

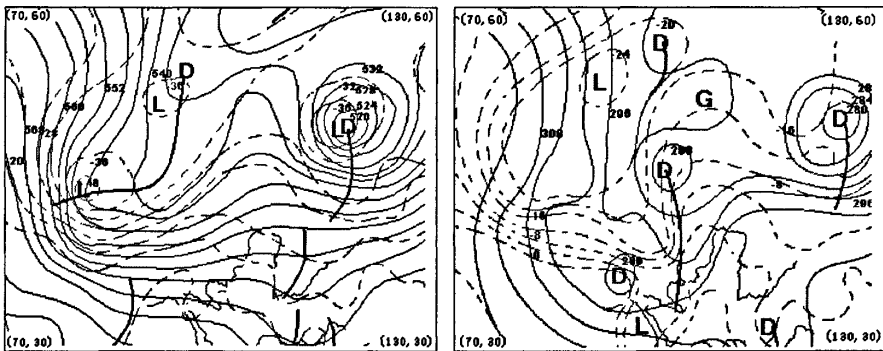


图2、2001年4月8日08:00, a: 500hPa、b: 700hPa 高空环流形势图。实线为高度场,虚线为温度场。

Fig2. Circulation of 500 and 700hPa at 8:00 April 8 2001. Solid lines are geopotential height and the dot ones are temperature.

2.2.2 地面冷锋和蒙古气旋

过程前期,新地岛以北的冷空气沿乌拉尔山以西脊南下,西西伯利亚冷高压形成并东移,地面冷锋位于巴尔喀什湖附近。7日08:00,冷高压东移加强,地面冷锋移至新疆西北部。冷锋前后,气压梯度加大。14:00冷高压中心在国境线附近进一步加强,其前部冷锋东移南下进入北疆。20:00,冷锋翻越天山移至蒙古及新疆一带,锋后气压梯度非常大,沿天山形成地形等压线,锋后伴有区域性大风沙尘暴、降水及明显的降温天气。此时在蒙古国境内有一气旋形成,中心气压为 999hPa 。8日08:00蒙古气旋发展东移,河套处于“热倒槽”中,开始升温、降压。同时,锋面也已移过河西走廊,逼近河套,冷锋前后气压梯度加强,锋后3h变压最大为 $+6.5\text{hPa}$,银川与酒泉温差高达 14°C 。14至20:00,冷锋快速移过河套,宁夏开始出现大风、沙尘(沙尘暴)天气。8日夜间,气旋及冷锋减弱东移,沙尘暴天气结束,气温骤降,

宁夏自南向北出现降雪。

2.3 MM5 中尺度预报模式形势场分析

图 3 是 MM5 输出的 2001 年 4 月 8 日 500hPa 位势高度场和温度场分布。

由图 3a 可看到,9:00, 宁夏位于高度槽前, 上游为温度脊。在宁夏区域, 尤其是南部地区有暖平流, 存在升温的趋势。而此时, 在蒙古、新疆一带有急流区形成。

15:00, 高空急流区东移南压至河套北部, 其底部已触及宁夏北段, 高度场和温度场等值线都非常密集, 且等温线与等高线有很大交角, 一些区域出现正交, 表明有强冷空气入侵宁夏, 宁夏全境为强烈的降温趋势。见图 3b。

23:00, 高空急流区东南移出宁夏, 宁夏被强西北气流控制, 而温度场落后于高度场, 温度槽呈东北—西南向穿过宁夏北部和中部, -31℃冷中心处于宁夏北段的石嘴山市附近, 高度场与温度场交角几乎达 90°, 表明高空槽后有强冷平流南压, 降温将持续(见图 3c)。以银川站为例, 8 日 9:00 到 23:00, 500hPa 气温从-15

℃剧烈下降到-31℃, 说明冷空气很强。

高空急流区的形成并加强南压, 使高层风速加大, 通过动量下传作用, 导致地面风速大增, 产生沙尘暴天气。

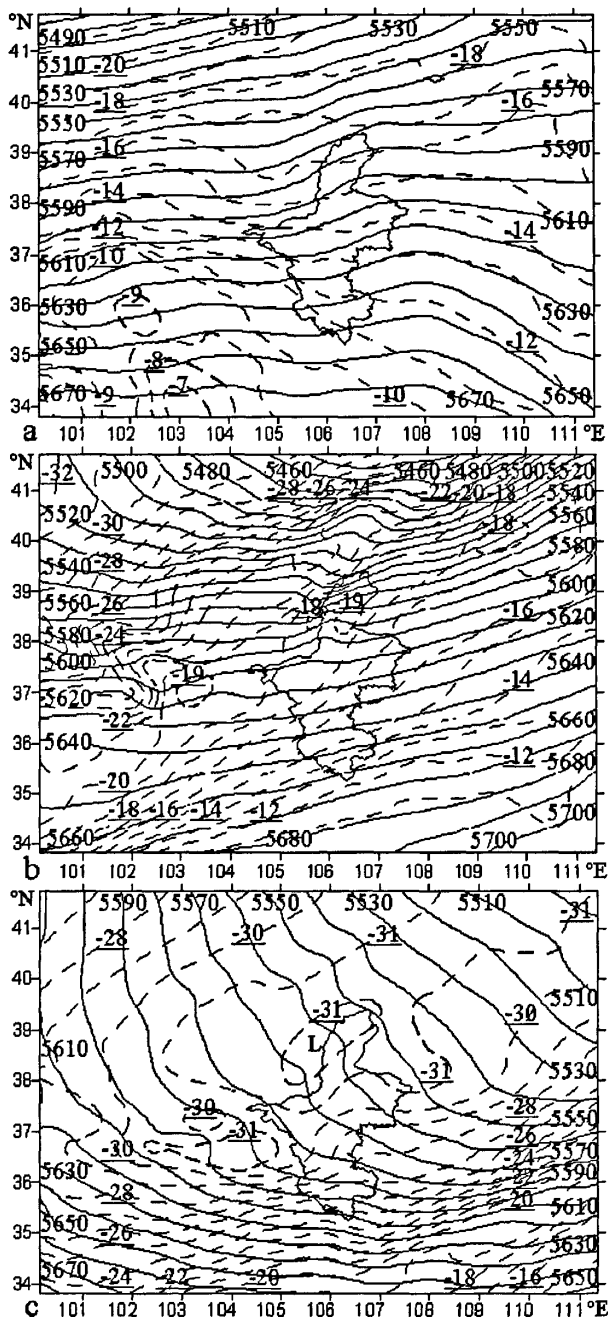


图 3 500hPa a:9、b:15、c:23 时中尺度形势, 等值线间隔: 高度场 10 位势米, 温度场 1℃。

Fig3. meso-scale situation at 500hPa on April 8 2001, a: 9h, b:15h, c:23h. interval of geopotential height is 10 gpm, and that of temperature is 1℃.

3 物理量诊断分析

本文所用的物理量均由宁夏精细化预报诊断分析子系统产生。为了日常业务显示方便,并为 MOS 预报子系统提供较高精度的量值,计算生成的物理量在转换为 MICAPS 格式时,统一扩大了一定倍数。

3.1 Q 矢量分析

$$\text{由非地转湿 } Q \text{ 矢量}^{[19-20]}: f \frac{\partial^2 \omega}{\partial P^2} + \nabla^2(\sigma \omega) = -2 \nabla \cdot \bar{Q}$$

可知,当 $\nabla \cdot \bar{Q} < 0$ 时, $\omega < 0$ 为上升运动,反之则为下沉运动。

图 4 为 2001 年 4 月 8 日宁夏区域 500hPa Q 矢量演变形势。图 4a, b, c 分别是 9:00, 15:00 和 23:00 的 Q 矢量场。

由图 4a 可以看到,在冷空气来临之前,除贺兰山北段外,宁夏区域无 Q 矢量辐合。最为明显的特征是:沿兴仁、六盘山到泾源存在一条强辐散带。宁夏全境几乎都被 Q 矢量强辐散所控制。由文献[19]可知,在其影响下宁夏为非地转下沉运动区域,天气形势稳定。

15:00 冷锋移近宁夏,从图 4b 上可以看到,在贺兰山的东、西两侧都出现了东北—西南走向的 Q 矢量辐合线。这表明由于冷空气的逼近,迫使其前方的较暖空气抬升,产生非地转上升运动。宁夏中部的西侧,也有 Q 矢量的辐合,但其强度与北段相比较弱。而宁夏南部区域不仅 Q 矢量线稀疏,而且没有一致性的明显辐合。所以由 500hPa 的 Q 矢量图上可以看出,在宁夏北部冷空气引起的强迫上升运动最为强烈,南部相对较弱。

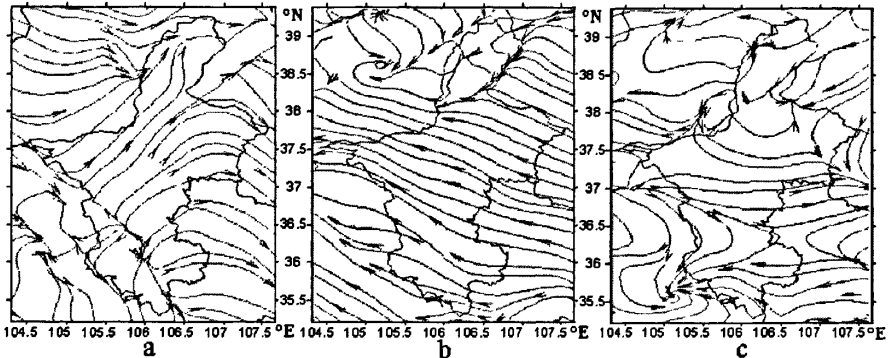


图 4 2001 年 4 月 8 日 500hPa Q 矢量演变, a: 09:00, b: 15:00, c: 23:00

Fig4. Q vector at 500 hPa on April 8 2001, a: 09:00, b: 15:00, c: 23:00.

由图 4c 可以看到,23:00 宁夏 Q 矢量场为大片辐散区,表明非地转下沉气流再次影响宁夏,宁夏北部和中部均在下沉冷空气的控制下,沙尘暴过程趋于结束。宁夏南部出现了 Q 矢量辐合,表明有上升运动。

从高低空配置看,在 300hPa 和 700hPa 上,都有与 500hPa 高度一致分布形势。即 9:00 冷锋移入之前,宁夏被强 Q 矢量辐散所控制。15:00 左右冷锋侵入宁夏中部和北部,在宁夏北部出现强 Q 矢量辐合。而 23:00 宁夏南部出现了与上升运动相伴随的 Q 矢量辐合,中部和北部为 Q 矢量辐散区,表明此区域被下沉运动控制。

对比不同层次 Q 矢量辐合与辐散区域的位置,可以发现:从低层到高层, Q 矢量相应系统明显向西偏移,表明系统向西倾斜。

3.2 锋生函数分析

$$\text{由非地转湿 } Q \text{ 矢量计算锋生函数}^{[19-20]}: F = \bar{Q} \cdot \nabla \theta = Q_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + Q_y \frac{\partial \theta}{\partial y}$$

可反映锋区加强或减弱,当 F 大于0时,出现锋生,温度水平梯度增大,反之锋消,天气转好。图5为由非地转湿 Q 矢量计算的500hPa锋生函数。

从高空锋生函数演变图可看出:高空锋区由西北地区向东南地区移动。由图5a可以发现,9:00宁夏区域最为显著的特点,是自兴仁到固原附近的负值区,中心显示值为-3000。其西南一侧虽有正值区,但数值不大。整体看,宁夏受负值的控制,尤其是北部和中部,锋消明显,天气晴朗。南部的固原邻近弱锋生区,由图1d可知,固原上午的能见度并不很好。

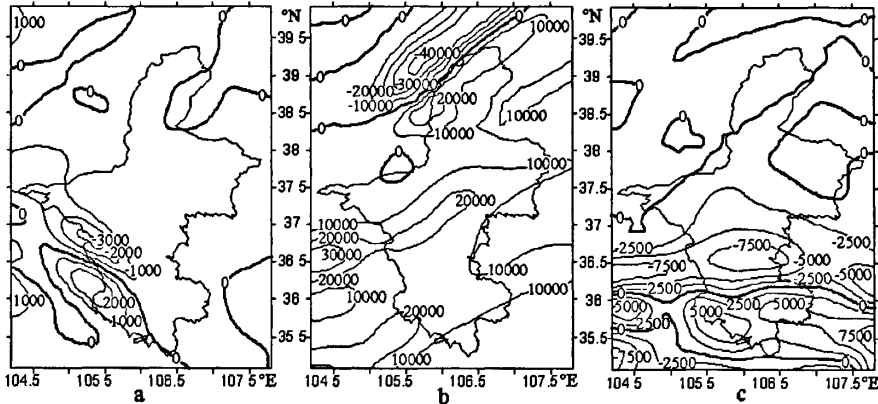


图5 2001年4月8日500hPa锋生函数演变, a: 09:00, b: 15:00, c: 23:00
Fig5. Frontogenesis at 500hPa on April 8 2001, a: 09:00, b: 15:00, c: 23:00.

15:00宁夏均处在锋生函数正值区内,由图5b可看到,最强的锋生区在宁夏北部贺兰山区,为东北—西南走向,其最大显示值达32000。另一处强锋生在盐池到兴仁一线,也是东北—西南走向。在锋生区,锋生函数的梯度也非常大。贺兰山区的几十公里内,锋生函数显示值迅速从32000降到0,表明此区域中温度水平梯度比周围大得多,高空锋区在加强,锋生明显。锋生区中心东移造成宁夏局部地区出现强沙尘暴。

同时由图5b可知,冷空气运动到宁夏区域时,因地形作用,锋面主体分裂为两段。北段受山体阻挡,停滞在贺兰山区,而南段的前缘则推进到盐池附近。在锋面断裂处,南段锋区的位置较北段超前120—130km。在23:00冷锋移出宁夏北部和中部,这一带受锋生函数负值区控制。最大负值区在同心附近,最大显示值为-7500,而隆德则有正值区,表明此处有冷空气活动。见图5c。

3.3 总温度诊断分析

总温度是大气总能量(热能,位能,水汽潜热能和动能)的一种表示方式。在宁夏春季,水汽的贡献相对不大,这一指标可反映大气冷空气活动情况。

图6是500hPa宁夏区域总温度演变。由图6a可见,冷锋到来之前,宁夏总温度普遍较高,且等值线稀疏。

在图6b上可以看到,15:00总温度梯度大幅度增加,尤其是贺兰山北段,梯度增加更为明显,表明冷锋正在逼进。由311、312等位势线走向可看出,贺兰山北段处有一显著的向南弯曲,指示冷空气从北段绕过山体向南移动。312线西北和东南各存在一个总温度高梯度区,它们以贺兰山为界。这同样印证了山区地形阻挡,使东移冷锋分裂为南、北两段。

23:00,冷空气完全控制宁夏北部和中部,从兴仁到盐池一线向北,为总温度的均值区。在此线以南还存在高密度区,表明宁夏南部依然有冷空气活动。见图6c。

从9:00到23:00,受冷空气东移南下的影响,宁夏区域的总温度持续下降。以银川为例,由9:00的315.75K,降低为15h的312.64K,到23:00又进一步下降到297.15K。

在700hPa图上,9:00宁夏为总温度表现为强脊区,银川及宁夏最北端达310K。15:00,

宁夏总温度迅速下降,银川及宁夏最北端降到 288—289K。最强冷空气出现在贺兰山北段。23:00 宁夏为总温度均值场。

300hPa 图上,总温度在过程中为下降趋势,但下降幅度略小。与低层总温度场相比,系统表现显著滞后,23:00 才在宁夏西侧出现冷锋,而且不受低层地形影响,锋面系统完整。

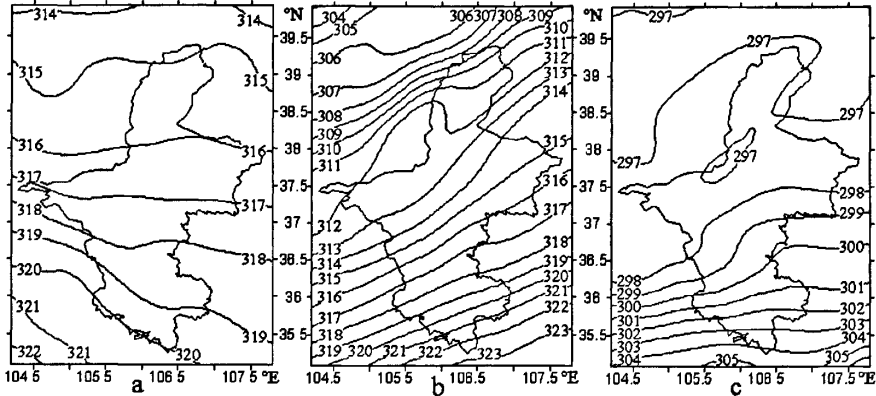


图6 2001年4月8日500hPa总温度演变, a: 09:00, b: 15:00, c: 23:00
Fig.6. Total temperature at 500hPa on April 8 2001, a: 09:00, b: 15:00, c: 23:00.

4 小结

本文针对发生于2001年4月8日的一次强沙尘暴过程,依据常规天气资料进行了天气背景分析,并利用中尺度MM5数值预报模式输出产品,进行了中尺度天气学分析。结果表明:

(1) 沙尘暴发生前后,地面气象要素有很明显的变化。午后地面增温最强时段,大气层结不稳定度显著增大,有利于高空动量下传产生大风,为沙尘天气的发生提供了动力和热力条件。

(2) 地形的阻挡作用对冷锋和沙尘暴的移动有较大的影响。

(3) 此次过程属于西北路径冷锋后西北大风引起的沙尘暴天气。高空横槽与强锋区是激发这次沙尘暴的重要动力机制,高空急流区的形成是产生大风、沙尘暴天气的必要条件,蒙古气旋和地面冷锋是造成这次沙尘暴的主要影响天气系统。

通过利用非地转平衡的MM5中尺度数值预报模式进行数值模拟,并利用宁夏精细化预报物理量计算分析子系统,计算了非地转Q矢量、锋生函数和总温度。诊断分析显示:

(1) 上述物理量对这次强沙尘暴过程具有较好的指示意义,场分布与冷锋运动状况、地形影响特征、冷空气主要活动区域都有明确的对应关系。

(2) 500hPaQ矢量辐合区、锋生函数正值区和总温度高梯度区与冷空气活动密切相关。地形作用对锋面的影响在物理量场分布上也有明显的反应。

(3) 冷锋影响前和锋面过后,宁夏Q矢量为辐散区,锋生函数为负值区,总温度梯度较低。冷锋到达时,Q矢量为辐合区,锋生函数为正,总温度梯度很大。变化情况与锋面运动相一致。

(4) 通过积累相关经验,就能够利用宁夏精细化预报物理量计算分析系统输出产品,在时间、空间和强度上对沙尘暴进行更为精细化的预报。

参考文献:

- [1] 徐启运. 我国西北地区沙尘暴天气减灾对策[J]. 中国减灾, 1995, 5 (1): 50-52.
- [2] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报,

- 1979, 37(4):26-35.
- [3] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章, 等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[C]. 中国沙尘暴研究, 北京:气象出版社, 1997:1-11.
- [4] 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[M]. 中国沙尘暴研究, 北京:气象出版社, 1997:37-43.
- [5] 赵光平, 郑广芬, 王卫东. 宁夏特强沙尘暴气候背景及其成灾规律研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 420-427.
- [6] 刘晓春, 曾燕, 邱新法, 等. 影响北京的沙尘暴[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1):118-123.
- [7] 冯霞, 程麟生. “93.5”黑风暴发展期中尺度期热量和水汽收支诊断[J]. 气象, 1997, 23(3): 8-14.
- [8] 孙军, 姚秀萍. 一次沙尘暴过程锋生函数和地表热通量的数值诊断[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 488-494.
- [9] 许东蓓, 康凤琴, 郑新江. 1998年“4.18”强沙尘暴分析及数值模拟[J]. 气象, 1998, 28(8): 9-14.
- [10] 刘毅, 张华, 周明煜. 一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(4):511-517.
- [11] 王锡稳, 李宗义, 王宝鉴. “4.12”强沙尘暴中小尺度天气分析[J]. 甘肃气象, 2001, 19(2): 27-30.
- [12] 郑新江, 刘诚, 陆文杰, 等. 沙尘暴监测方法研究[C]. 中国沙尘暴研究, 北京:气象出版社, 1997:82-87.
- [13] 郑新江, 赵亚民, 罗敬宁. 中国沙尘暴天气云图特征[J]. 气象, 1995, 21(2):46-49.
- [14] 胡文东, 高晓清. 2001.4.6宁夏沙尘暴过程气象卫星云图分析[J]. 高原气象, 2003, 22(6):590-596.
- [15] 许东蓓, 黄玉霞, 祖永安, 等. “4.12”强沙尘暴卫星云图特征[J]. 甘肃气象, 2001, 19(2): 34-35.
- [16] 赵光平, 王连喜, 杨淑萍. 宁夏区域性强沙尘暴天气短期预报系统[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 175-181.
- [17] 杨建玲, 何金海, 赵光平. 宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间的遥相关关系[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 296-307.
- [18] 中国气象局编, 地面气象观测规范[S], 北京:气象出版社, 2003. 11: 23
- [19] 姚秀萍, 于玉斌. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 436-446.
- [20] 张元箴. 天气学教程[M]. 北京:气象出版社, 1992:116-117.

Meso-scale Analysis on a Severe Dust Storm

HU Wen-dong^{1,2} JI Xiao-ling³ LI Yan-chun³ DING Jian-jun² ZHANG Zhi³

(1Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044 China;

2Ningxia Key Laboratory of Preventing and Reducing Meteorological Disaster;

3Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan, 750002 China.)

Abstract: The circulation and meso-scale synoptic analysis was conducted on a severe dust storm event on April 8 2001. The topographic effect on the cold front and the features of dust storm movement were discussed. Using MM5 products, non-geostrophic Q vector, frontogenesis and total temperature were calculated and analyzed, the results show that all the indices above had notable relation with the observation during this dust storm.

Key words: severe dust storm; meso-scale; analysis