

文章编号:1006-7639(2004)-03-0017-05

## “2002.3”强沙尘暴过程的中尺度动力学诊断分析

王文<sup>1,2</sup>, 隆霄<sup>2</sup>, 李耀辉<sup>1</sup>, 钱莉<sup>3</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

2. 兰州大学大气科学系, 甘肃 兰州 730000; 3. 武威市气象局, 甘肃 武威 733000)

**摘要:**利用较成功模拟的一次强沙尘暴过程的MM5模式输出资料进行了动力学诊断研究, 计算了动量收支残差 $X$ , 结果表明, 3月19日高低层上, 最大 $X$ 矢量位于河西小槽的后部, 表明动量残差主要是加速西北气流的南下。 $X$ 矢量与风矢量 $\vec{V}$ 的夹角在槽后 $< 90^\circ$ , 这说明动量残差在槽后加速冷空气南下, 非常有利于小槽的发展和东进南下。300 hPa动能转换 $E$ 的带状分布非常清楚, 并且 $E$ 的大值中心分布在高空急流( $> 50$  m/s)的两侧, 这也表明高空急流在能量转换的过程中起到非常重要的作用。涡度、散度和位涡的分布特征与引发此次沙尘天气的河西小槽位置比较一致。轨迹分析表明, 在300 hPa高空主要是低压槽起引导作用, 500 hPa向东南方向移动, 而在700 hPa气块在高原北侧的绕流非常明显。将沙尘浓度和气块轨迹叠加在一起时, 可以确定沙尘的输送路径, 所以它有一定的预报实用性。

**关键词:**沙尘暴; 动力学诊断; 能量转换; 轨迹分析

**中图分类号:** P458.2

**文献标识码:** A

### 引言

我国西北地区为沙尘暴多发区, 属于中亚沙尘暴区。强沙尘暴是一种带有巨大破坏力的自然现象, 亘古以来就存在。在国外, Sutton<sup>[1]</sup>研究了出现在北非苏丹喀土穆地区的140次黑风个例, 发现黑风过境后一般伴有气压略升高、温度降低以及相对湿度增大等飏线特征。Idso<sup>[2]</sup>分析了美国亚利桑那州西北部强沙尘暴的天气特征, Brazel<sup>[3]</sup>进一步将该州多年来发生沙尘暴的天气类型归结为以下4种: 冷锋型、雷暴/对流型, 热带风暴型和高空切断低压型。我国自1970年代末, 徐国昌等<sup>[4]</sup>在研究1977年4月22日发生在甘肃省河西地区的一次特强沙尘暴时指出, 强沙尘暴过境时伴有风沙壁、风向突变、风速猛增和过境后气压涌升的气压鼻现象。后来, 许多学者都研究过1993年5月4~6日发生在新疆、甘肃、宁夏和内蒙部分地区的历史上罕见的特强黑风暴, 陈敏连等<sup>[5]</sup>指出, 与黑风暴相伴的强冷锋变压梯度最大达6 hPa/100 km, 黑风暴过境后的天气要素跃变具有明显的飏线特征。江吉喜<sup>[6]</sup>通过对卫星云图的分析发现, 该黑风暴主要是由冷锋

前部的中尺度对流系统(MCS)发展为飏线, 并移经浩瀚沙尘地表而造成的。程麟生等<sup>[7-8]</sup>用改进的MM4和高分辨PBL参数化控制模拟试验, 指出“93.5”黑风暴发展时段, 在PBL内与一个中尺度气旋性强涡旋相伴, 在对流层内与一个垂直涡柱相伴。

由此可见, 强和特强沙尘暴是在不同尺度天气系统相互作用下, 在特定的地理地表环境中而形成的中尺度灾害性强风暴。胡隐樵<sup>[9]</sup>指出, 沙源、强风和不稳定大气是黑风暴发生的3个必要条件。徐启运<sup>[10]</sup>在分析冷高压移动路径与沙尘暴天气分布的关系中发现, 西北地区形成强和特强沙尘暴天气的冷高压有3条路径, 即西北、北方和西方路径, 其中西北路径发生沙尘暴天气最多, 西方路径次之, 北方路径最少。

2002年3月19日白天到夜间, 甘肃省出现了一场大范围但区域性很强的沙尘暴过程, 伴随强降温 and 降水。河西5地市、白银、兰州、定西、临夏、平凉、庆阳、天水等地、州、市出现沙尘天气, 部分地方出现了沙尘暴。其中鼎新、金昌为特强沙尘暴, 山丹、永昌、武威、古浪、白银、皋兰、兰州等地出现了强沙尘暴天气。

收稿日期: 2004-05-28; 改回日期: 2004-06-21

作者简介: 王文(1957—), 男, 甘肃会宁人, 博士, 研究员, 主要从事气候诊断和中尺度动力学方面的研究. E-mail: wangwen@lzu.edu.cn

伴随着这次过程,甘肃省大部分地区出现了强降温和降水天气。20日08时,河西大部、河东出现降雪天气,其中河西山丹、安西中到大雪,玉门达到大雪,河东普降小雪(雨)。河西大部降温幅度大,其中19日17时,马鬃山、酒泉、玉门、安西等站气温与18日17时相比下降达20℃以上;河东的降温主要集中在20~21日。此次过程属于河西小槽型。地面无影响系统,高空风较大,河西地区西部有一位于新疆脊前很小的小短波槽,中亚地区为纬向环流。此种天气预报难度大,不易引起注意,很容易漏报。因此,对其进行数值模拟和动力学诊断研究,有其特殊的实用意义。

## 1 环流形势概述

过程前24h,欧亚中高纬度500hPa环流形势主要为2槽2脊型。欧洲平原为高压脊,西西伯利亚为槽,中西伯利亚到贝加尔湖为高压脊,东亚地区为一浅槽。冷空气中心在泰梅尔半岛,其中心高度达496dagpm,温度-44℃。西西伯利亚到巴尔喀什湖为低压槽控制,槽后强偏北风在乌拉尔山附近达到24~34m/s,最大风速44m/s。在萨彦岭到巴尔喀什湖附近形成密集的等高线,且等温线与等高线交角加大,形成一强风区。此时印度到青藏高原西部为暖高压脊控制。19日08时,乌拉尔山高压脊东移位于巴尔喀什湖到新疆西部,脊前新疆东部到甘肃形成等高线密集的锋区,一般风速在22~30m/s。在300hPa天气图上,新疆到甘肃也形成等高线密集的锋区,一般风速在36~50m/s;700hPa新疆到甘肃形成等高线密集的锋区,风速在18~20m/s。由于高空锋区及动量下传的共同作用,甘肃等地出现大风、沙尘暴和降温天气。过程前24h,地面冷高压主要在里海到咸海一带,中心达1035hPa。对应冷锋在巴尔喀什湖到新疆西部边境上,随着冷空气规律东移,其中心强度不断加强。19日05时,冷高压东移位于巴尔喀什湖中心达1040hPa,对应冷锋位于新疆东部到天山一带,蒙古有低压发展,中心达1000hPa。冷锋在东移过程中,影响甘肃区域性强沙尘暴、强降温和降水天气过程。

## 2 动力学诊断

本文利用一次较成功模拟“2002.3”强沙尘暴过程的MM5模式输出资料,对这次天气过程进行了动力学诊断研究。

### 2.1 对流动量输送的诊断分析

为了研究“2002.3”强沙尘暴的动力学机制,我们利用模式输出的高时空分辨率资料计算了动量收支残差 $\vec{X}$ ,采用Tong和Yania的公式:

$$\vec{X} \equiv \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla_p \vec{V} + \bar{\omega} \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} + \nabla_p \bar{\Phi} + f \vec{k} \wedge \vec{V} = -\nabla_p \cdot \vec{V} \vec{V} - \frac{\partial \vec{V} \cdot \bar{\omega}}{\partial p}$$

式中 $\vec{V}$ 为水平速度, $\omega (= \frac{dp}{dt})$ 是垂直 $p$ 速度, $\Phi$ 是位势高度, $f$ 是科氏参数, $\nabla$ 为梯度算子;“—”表示对变量进行区域的水平滑动平均得到网格尺度量,“—”表示次网格尺度量。该式表明水平动量收支残差矢量 $\vec{X}$ 即是次网格尺度对流和其它不可分辨涡动的动量通量辐合对大尺度水平风场的加速度。

用 $\vec{V} \cdot$ 乘上式两端,则可得到大尺度系统动能方程及其大尺度与次网格尺度系统之间的动能转换:

$$\vec{V} \cdot \vec{X} \equiv \frac{\partial \bar{K}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla_h \bar{K} + \bar{\omega} \frac{\partial \bar{K}}{\partial p} + \vec{V} \cdot \nabla_h \bar{\Phi} + \vec{V} \cdot f \vec{k} \wedge \vec{V}$$

式中 $\bar{K} = (\vec{V} \cdot \vec{V})/2$ 表示大尺度的动能。定义 $E = -\vec{V} \cdot \vec{X}$ ,则可知: $E > 0$ 时表示能量是顺尺度(Downscale)转换,即是能量将从大尺度环境场转换到次网格尺度的涡旋能量; $E < 0$ 则表示逆尺度(Upscale)转换。

分析结果表明,3月19日从低空到高空各层上,最大矢量位于河西小槽的后部,说明动量残差的 $\vec{X}$ 主要作用是使西北气流加速南下。矢量与风矢

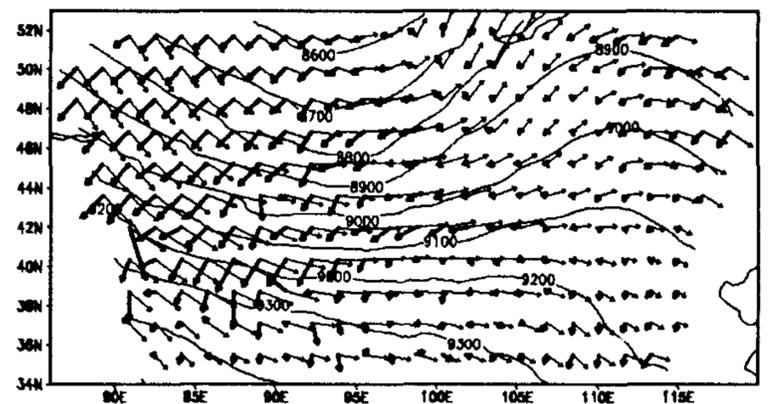


图1 2003年3月19日300hPa CMT天气尺度分析  
Fig. 1 The CMT synoptic scale analysis at the level of 300 hPa on 19 in March, 2003

量的夹角在槽后 $< 90^\circ$ (图1),这说明在槽后动量残差起着加速冷空气南下的作用,这种形势非常有利

于小槽的发展和东进南下。300 hPa 高空上动能转换项  $E$  的带状分布非常清楚,并且  $E$  的大值中心分布在高空急流( $>50\text{m/s}$ )的两侧(图 2),这也表明高空急流在能量转换过程中起到非常重要的作用。

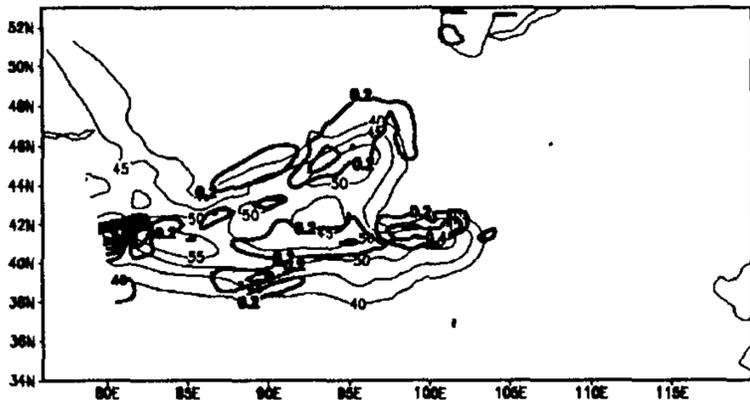


图 2 2002 年 3 月 19 日 300 hPa CMT 中尺度分析  
(细线为急流,粗线为动量转换)

Fig. 2 The CMT meso-scale analysis at the level of  
300 hPa on 19 in March, 2003

(Thin wind line in meters per second. Heavy solid lines  
represent the energy conversion)

## 2.2 涡度和散度的诊断分析

诊断分析表明<sup>[11]</sup>,对中- $\alpha$  尺度系统用涡度诊断其生成、发展和垂直结构及演变是适当的。P 坐标系中的涡度方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -m \left( u \frac{\partial \zeta_a}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta_a}{\partial y} \right) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - \zeta_a D$$

$$- m \left( \frac{\partial \omega \partial v}{\partial x \partial p} - \frac{\partial \omega \partial u}{\partial y \partial p} \right)$$

或

$$\zeta_s = \zeta_h + \zeta_v + \zeta_d + \zeta_c$$

其中,相对涡度  $\zeta = m^2 \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v}{m} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u}{m} \right) \right]$ ; 绝对涡度  $\zeta_a = \zeta + f$ ; 散度  $D = m^2 \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{m} \right) \right]$ ;  $\zeta_h$ 、 $\zeta_v$ 、 $\zeta_d$ 、 $\zeta_c$  分别表示水平绝对涡度平流项、垂直涡度输送项、散度项和扭转项,  $\zeta_s$  为总涡度变率,即总涡源;  $m$  是地图因子。

利用上述涡度变率方程,就可通过数值计算对“2002.3”强沙尘暴中尺度系统进行诊断。为了便于对沙尘暴过程中与强辐合线相联系的散度及其演变结构进行诊断和解释,须给出其相应的散度方程。P 坐标系中的运动方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + mu \frac{\partial u}{\partial x} + mv \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} - fv - F_u = -m \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + mu \frac{\partial v}{\partial x} + mv \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} + fu - F_v = -m \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

$F_u$  和  $F_v$  分别为  $u$  和  $v$  的水平及垂直扩散。由以上两式即可得到散度方程:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = m^2 \vec{V} \cdot \nabla D' - \omega \frac{\partial D}{\partial p} + f\zeta - m^2 \nabla^2 \phi -$$

$$\nabla \omega \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} + 2m^2 J(u, v) - m^2 (D')^2 - m\beta u$$

$$+ m^2 \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{F_u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{F_v}{m} \right) \right] \quad (6.4)$$

其中,  $\nabla$  为水平 Hamilton 算子,  $D = m^2 \nabla \cdot (\vec{V}/m)$ ,  $D' = \nabla \cdot \vec{V}$ ,  $F_u = -k \nabla_p^4 u$ ,  $F_v = -k \nabla_p^4 v$ 。  $m^2 \nabla^2 \phi - f\zeta$  为非地转涡度项,  $-m^2 [\vec{V} \cdot \nabla D' + (D')^2 - 2J(u, v)]$  为风速平流的散度项,它反映了惯性加速度不均匀造成的散度变化。  $-\omega \frac{\partial D}{\partial p}$  与  $-\nabla \omega \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial p}$  为与垂直速度有关的项,  $m^2 \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{F_u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{F_v}{m} \right) \right]$  为摩擦耗散项。

涡度和散度分析表明,与此次沙尘暴过程相联系的涡度和散度中心不是非常明显,这可能是由于地面无影响系统所致,但从总的分布形式来看,涡度和散度中心的走向基本与影响此次过程的小槽一致。

## 2.3 轨迹分析

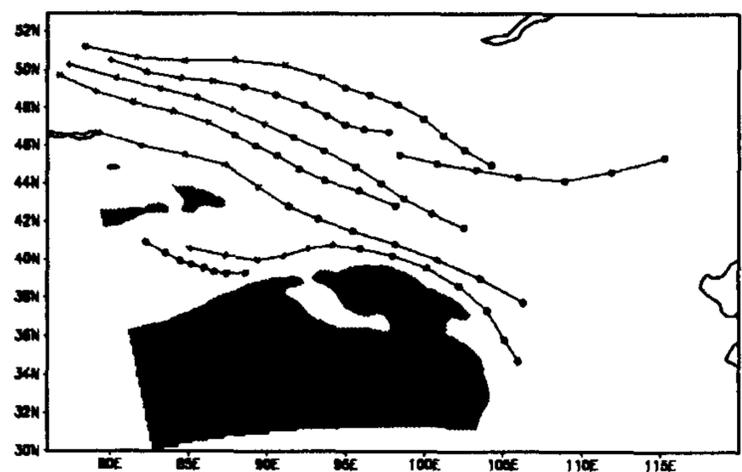


图 3 2003 年 3 月 19 日 700 hPa 轨迹分析

Fig. 3 Trajectory analysis at the level of 700 hPa  
on March 19, 2003

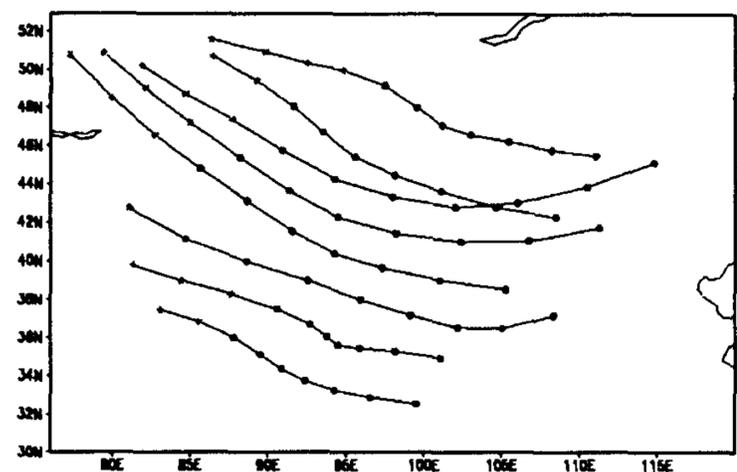


图 4 2003 年 3 月 19 日 500 hPa 轨迹分析

Fig. 4 Trajectory analysis at the level of 500 hPa  
on March 19, 2003

轨迹分析表明,在 300 hPa 高空主要是低压槽起引导作用,500 hPa 向东南方向移动(图 3),而在 700 hPa 气块在高原北侧的绕流非常明显(图 4)。将沙尘浓度和气块轨迹叠加在一起时,可以确定沙尘的输送路径。一般来说,轨迹的预报有一定的难度,但在河西走廊这种特殊情形下其移动路径主要由地形所决定,所以它具有一定的预报实用性。

### 3 小结

(1)利用较成功模拟近期一次强沙尘暴过程的 MMS 模式输出资料进行了动力学诊断研究,计算了动量收支残差  $\bar{X}$ ,结果表明,3月19日高低层上,最大  $\bar{X}$  矢量位于河西小槽的后部,表明动量残差  $\bar{X}$  主要是加速西北气流的南下。 $\bar{X}$  矢量与风矢量  $\bar{V}$  的夹角在槽后  $< 90^\circ$ ,这说明动量残差在槽后加速冷空气南下,非常有利于小槽的发展和东进南下。300 hPa 动能转换  $E$  的带状分布非常清楚,并且  $E$  的大值中心分布在高空急流 ( $> 50$  m/s) 的两侧,这也表明高空急流在能量转换的过程中起到非常重要的作用。涡度、散度和位涡的分布特征与引发此次沙尘天气的河西小槽位置比较一致。

(2)轨迹分析表明:在 300 hPa 高空主要是低压槽起引导作用,500 hPa 向东南方向移动,而在 700 hPa 在高原北侧的绕流非常明显。将沙尘浓度和气

块轨迹叠加在一起时,可以确定沙尘的输送路径。但由于轨迹的预报较难,然而在河西走廊这种特殊情形下其移动路径主要由地形所决定,所以它具有一定的预报实用性。

#### 参考文献:

- [1] Sutton I J. Haboob[J]. Q J Roy Meteor Soc, 1925, 51: 25 - 30.
- [2] Idso S B, Ingram R S, Pritchard J M. An American Haboob[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1972, 53: 930 - 935.
- [3] Brazel A J, Nicking W C. Relationship of weather types to dust storm generation in Arizona[J]. J Climate, 1986, 6: 255 - 275.
- [4] 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: 26 - 35.
- [5] 陈敏连, 郭清台, 徐建芬, 等. 黑风暴天气的研究和探讨[J]. 甘肃气象, 1993, 11: 16 - 27.
- [6] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6: 177 - 184.
- [7] Cheng L S, Ma Y, Liu C. Influence of mesoscale model resolution on the evolutive simulation of the “93.5” black storm[J]. WMO/TD, 1995, 699: 323 - 328.
- [8] 程麟生, 马艳. “93.5”黑风暴发展结构及不同模式分辨率的数值试验[J]. 应用气象学报, 1996, 7: 385 - 395.
- [9] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. 大气科学, 1997, 21: 581 - 588.
- [10] 徐启运, 胡敬松. 我国西北地区沙尘天气时空分布特征分析 [A]. 方宗义, 朱福康. 中国沙尘暴研究 [C]. 北京: 气象出版社, 1997. 134 - 141.
- [11] 张小玲. 中尺度数值模式中辐射和云微物理过程参数化及其数值试验研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 1999.

## Analysis of Mesoscale Dynamic Diagnosis of “2002.3” Sandstorm Process

WANG Wen<sup>1,2</sup>, LONG Xiao<sup>2</sup>, LI Yao-hui<sup>1</sup>, QIAN Li<sup>3</sup>

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China;

2. Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Wuwei Meteorology Bureau, wuwei 733000, China)

**Abstract:** A model simulation of “2002.3” sandstorm by nonhydrostatic mesoscale model MMS is analyzed in an effort to study the mechanism of the sandstorm. The diagnosis of convective momentum transport (CMT) shows that, at every level, the maximum budget residual  $\bar{X}$  of the horizontal momentum is located behind the trough, which  $\bar{X}$  strengthened the northwest cold air flow to south. The angle between  $\vec{X}$  and  $\vec{V}$  was smaller than  $90^\circ$  behind the trough, that means accelerated northwest cold air flow to south and it is in favor of deepening the trough and moves to southeast. At the level of 300hPa, kinetic energy transfer  $E$  had clear belt distribution, and the maximum centers of  $E$  was mainly located on the each side of upper Jet, that showed the upper Jet played a very important role in kinetic energy transfer. The distribution character of vorticity and divergency is consistent with the trough that triggered the sandstorm. Model trajectories analyses indicated that there was airstream in the trough at the upper level of 300hPa, and it flow to southeast at the level of 500hPa, there exist mountain - plain circulation to the north of the Plateau. The sand transport routing can be determined by superimposing the sand concentration over the trajectories, theoretically, but the forecasting of the trajectories is difficult at now.

**Key Words:** sandstorm; dynamic diagnosis; energy transfer; trajectories analysis