

文章编号: 1000-0534(2006)02-0259-09

西北地区一次沙尘暴过程的诊断分析及地形影响的模拟试验

王建鹏^{1, 2}, 沈桐立¹, 刘小英², 李明³,
薛春芳², 孟小绒², 宁海文²

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 西安市气象局, 陕西 西安 710016;
3. 陕西省气象台, 陕西 西安 710014)

摘 要: 以实况资料作初始场, 利用改进的 MM4 中尺度模式对西北地区 2001 年 4 月 8~9 日强沙尘暴天气过程的位势涡度、涡度、垂直速度、螺旋度等热、动力物理量的水平和垂直分布特征进行了分析, 发现各物理量场在沙尘暴发展的不同时期有着很好的配置, 物理量量值及其分布特征的变化与沙尘暴天气的形成、发展、消弱的不同时期有着很好的对应。通过改变秦岭及河西走廊地形进行数值模拟试验, 发现秦岭地形对此次沙尘暴天气系统影响很弱, 而河西走廊地形对沙尘暴天气系统影响较大, 河西走廊狭窄的地形为沙尘暴形成提供了有利的地理环境。

关键词: 沙尘暴; 诊断分析; 地形; 数值模拟试验

中图分类号: P445⁺.4 **文献标识码:** A

1 引言

近年来一些学者利用中尺度数值模式对沙尘暴的研究取得了显著的成就^[1~4], 尤其在利用模式输出量对沙尘暴发生期间的天气系统及物理量场配置方面研究颇丰, 但在沙尘暴不同发展期的物理量分布特征及变化方面, 在揭示地形对沙尘暴天气影响方面研究较少。本文针对 2001 年 4 月 8~9 日发生在西北地区的一次强沙尘暴天气过程, 着重就可能导致这次沙尘暴形成的若干物理因子进行数值模拟及诊断分析, 研究其在沙尘暴不同发展期的变化特征, 同时通过改变模式地形参数, 研究特殊地形对沙尘暴天气系统的影响, 为沙尘暴天气的预报提供理论依据。

2 天气过程简述

2001 年是沙尘暴天气频繁发生的一年, 全年共发生 5 次强沙尘暴天气过程^[5]。2001 年 4 月 8~9 日, 受我国新疆及蒙古国强冷空气的影响, 在新疆东部、内蒙古、青海、甘肃、宁夏、陕西先后出现

了一次大范围的大风、浮尘及沙尘暴天气, 其中有 15 个测站出现强沙尘暴天气。地面强冷高压于 8 日 02:00(北京时, 下同)形成, 主体位于新疆西北部, 冷高压前部位于若羌—七角井及青海刚察一带有中尺度低压形成, 新疆东部、内蒙古、甘肃、宁夏部分地区开始出现沙尘天气; 8 日 14:00~20:00, 冷高压东移南下, 锋面加强, 风力加大, 西北地区大范围, 沙尘暴天气达到最强, 入夜后, 沙尘暴天气有所减弱, 降水天气开始加强; 至 9 日 20:00 冷高压主体控制西北地区, 沙尘暴天气过程结束。

3 模式及初始场选取

本文由于研究西北地区强对流天气之一的沙尘暴天气, 为分析其发生机制及中尺度特征, 将计算区域的中心点定为 108°E, 40°N, 模拟区域水平格点数为 51×51, 积分时间步长为 170 s, 以避免预报时出现溢出现象。水平格点为(Arakawa B)方案, 垂直方向分层为 10 层, 层顶取为 $P_{top} = 100$ hPa, 时间积分方案采用 Kuo—Anthes 方案, 考虑

收稿日期: 2004-07-20; 改回日期: 2004-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40075023)资助

作者简介: 王建鹏(1972—), 男, 陕西户县人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事天气预报和空气质量预报研究。E-mail: xawjp@163.com

万方数据

表 1 实况和模拟的地面沙尘暴特征比较

Table 1 Intercomparisons of the observed and simulated surface features of the dust storm

项目	时 间					
	08:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
实况高压强度/hPa	1017.5	1020.0	1022.5	1025.0	1025.0	1027.5
模拟高压强度/hPa	1015.0	1017.5	1025.0	1025.0	1025.0	1027.5
实况低压强度/hPa	1002.5	1000.0	997.5	1000.0	1002.5	1007.5
模拟低压强度/hPa	1002.5	1000.0	995.0	997.5	1000.0	1005.0
实况冷锋强度	15.0	20.0	25.0	25.0	22.5	20.0
模拟冷锋强度	12.5	17.5	30.0	27.5	25.0	22.5
模式积分时间	0~6 h		6~9 h	9~12 h		12~15 h
沙尘暴发展阶段	初期		爆发期	强盛期	减弱期	

了地表能量收支、水平扩散、垂直扩散和对流调整，模式地形采用 NCAR 的 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$ 地形资料。

选用 2001 年 4 月 8 日 08:00 的高空和地面资料，按模式前处理要求处理成模式初始场，还利用 4 月 9 日 08:00 高空资料与地面资料形成时变边界，起始时间为 8 日 08:00，模拟时段为 24 h，网格距选取 60 km，模式每 3 h 输出一次积分结果。

利用 8 日 08:00 至 9 日 08:00 每隔 3 h 的地面气压场、风场、温度场实况资料与模式输出资料对比分析，模拟结果与实况接近，并运用冷锋前地面中尺度气旋中心强度值的变化大小、环流特征、冷锋强度和不同时间段西北地区扬沙、沙尘暴出现的站数，把本次沙尘暴划分为 4 个时期，对应关系如表 1 所示。

4 物理量诊断分析

4.1 位势涡度

位势涡度是表示气块热力和动力属性特征的一个物理量。它将动力和热力两种不稳定机制有机地结合起来。 P 坐标系下的位涡表达式为^[6]

$$pv = -g(\xi + f)\frac{\partial\theta}{\partial y} + g\left(\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)$$
$$= PV1 + PV2,$$

(1)

式中 ξ 为 P 坐标中的垂直涡度，可见位涡可分解为与静力稳定度有关的 PV1 和与水平风速的垂直切变和位温的水平梯度有关的 PV2 两项，位涡的单位为 PVU($1PVU=10^{-6}m^2Ks^{-1}kg^{-1}$)。

4.1.1 位势涡度的水平分布

沙尘暴初期(图 1a1)，与地面中尺度气旋(图

1a2)相对应的是位涡大值区，并在南部 $30^{\circ}N$ 、北部 $45^{\circ}N$ 附近有闭合中心，南部的强度大于北部，中心强度为 $1.0PVU$ ；沙尘暴爆发时(图 1b1)，北部位涡中心消失，此时地面上该区域已被冷高压控制(图 1b2)，南部位涡中心略有东移，但强度增大到 $1.4PVU$ ；沙尘暴强盛时(图 1c)，位涡大值区域增大并东移南压，对应着地面上冷高压的东进及锋前中尺度气旋的东南退，强度达到最大为 $2.1PVU$ ；减弱时(图 1d)，随着地面中尺度气旋的减弱，其强度减弱为 $1.5PVU$ 。可见，与沙尘暴爆发相联系的中尺度气旋与位涡大值区对应；沙尘暴发展过程中，位涡大值中心强度经历了由弱到强再减弱的变化过程(图 2)。一般而言，沙尘暴位于位涡大值中心的西北偏西侧的正值区域内，而不是位于位涡大值中心。位涡的正值区反映了冷空气和气旋性环流的活动，这表明了地面冷空气和地面中尺度气旋辐合在沙尘暴天气形成中的重要作用。

850 hPa 等压面上，位涡正压项 PV1 和斜压项 PV2 的水平分布特征(图略)表现为 PV1 的水平分布与总位涡的水平分布非常相似，PV1 的大值中心位于强沙尘暴中心的东南偏东侧，强沙尘暴区中心仍处于正压项位涡的正值区内，但不位于正压项位涡的大值中心。在沙尘暴不同发展时期，PV1 的中心强度分别为 1.2, 1.6, 1.8 和 0.9 PVU，PV2 的水平分布与 PV1 不同，沙尘暴发生在零线所包的负值区域，沙尘暴不同时期 PV2 负值中心强度分别为 -2.5 , -2.5 , -3.0 和 -1.0 PVU(图 2)，且负值区范围也是由小到大再到小。可见 PV2 负值的增强和减弱与沙尘暴的爆发时间也有很好的对应

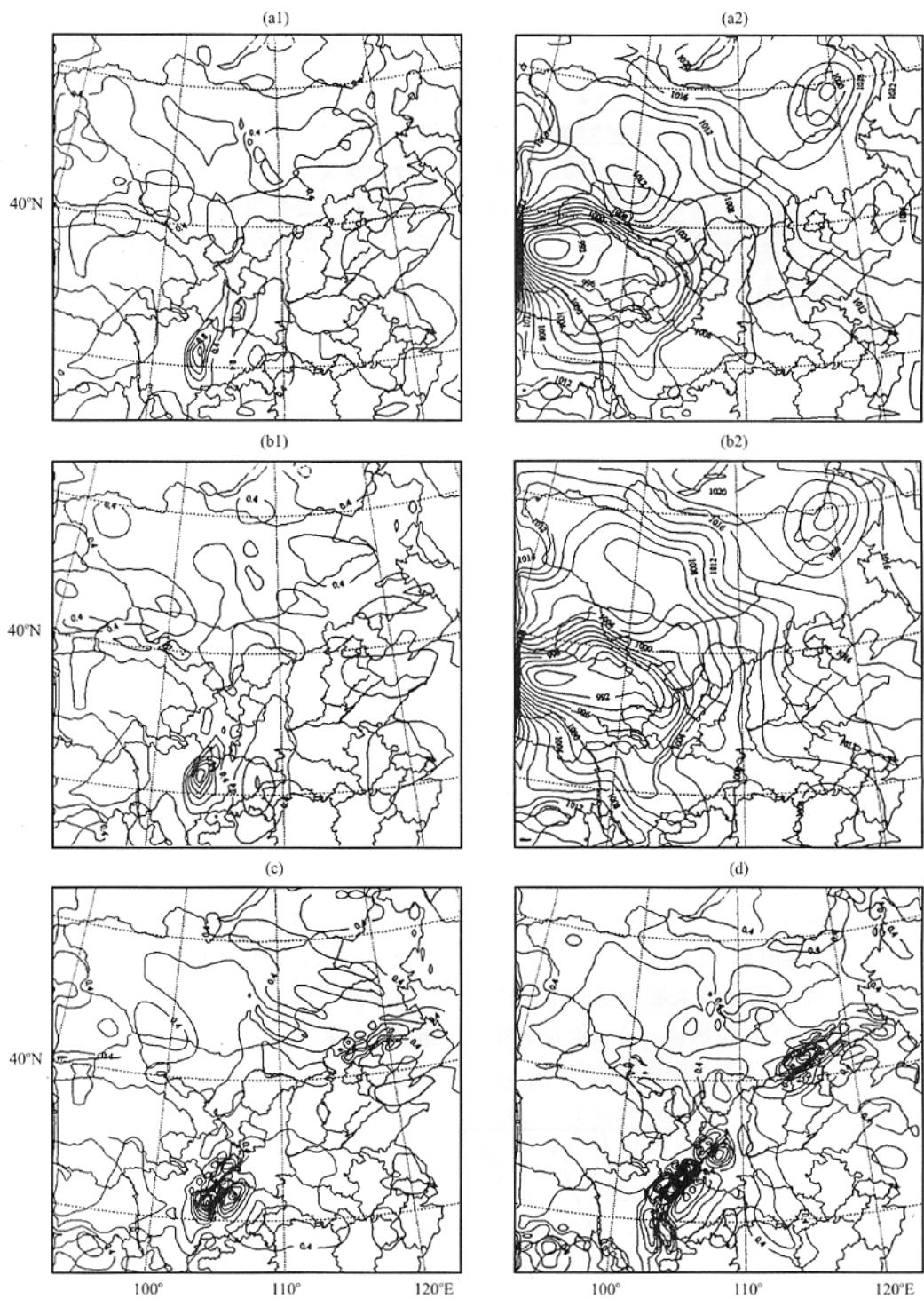


图 1 (a1), (b1), (c), (d)为模式积分 6, 9, 12 和 15 h 后对对流层低层 850 hPa 高度上的位涡分布和 (a2), (b2)为模式积分 6, 9 h 后的地面气压场

Fig. 1 (a1), (b1), (c) and (d) potential vorticity distribution of low-level troposphere on 850 hPa after integrating 6, 9, 12 and 15 h, (a2) and (b2) surface pressure field after integrating 6, 9 h

关系，在沙尘暴强盛期，PV2 的负值最大。一般而言，低空急流位于 700 hPa 高度上，则此高度以下有 $\frac{\partial u}{\partial p} < 0$ ，因此在 PV2 为负值区域一定存在 $\frac{\partial \theta}{\partial y} > 0$ ，即该地经向的斜压性较强。以上分析表明，位

涡的斜压项的负值主要是由风的垂直切变和大气的斜压性引起，它对沙尘暴的落区和爆发时间能起到一定的预示作用。

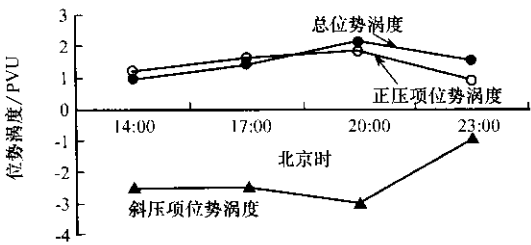


图 2 沙尘暴不同发展时期位势涡度中心强度值变化
Fig. 2 Changes of potential vorticity center value at different precesses of dust storm

4.1.2 位势涡度的垂直分布

通过分析位涡的垂直分布，进一步了解位涡在垂直方向上的结构特征与沙尘暴之间的关系。从沿 105°E 所作的位涡经向垂直剖面图可以看出(图略)：在沙尘暴初期 400 hPa 以下为正位涡，400~250 hPa 为负位涡，中心在 300 hPa 高度，在 32°N 附近 700 hPa 处为位涡大值中心，对应着地面的中尺度气旋；在沙尘暴爆发到强盛时期，位涡的分布发生了明显的变化，在 35°N 附近 500 hPa 处出现了位涡负值中心，强度由 -0.2 PVU 增大到 -0.6 PVU，原来 32°N 的 700 hPa 高度处的正位涡中心略有向低纬移动，但强度发展迅速，由 1.2 PVU 增大到 2.2 PVU，沙尘暴发生在正负位涡交接的位涡梯度最大处，即 34°~35°N 附近。另外一个显著变化特征是在沙尘暴强盛时期，30°N 以南的低纬度地区 400~200 hPa 的位涡由沙尘暴初期的小范围弱的正位涡发展为强大的正位涡区。这可能是引导沙尘暴前沿低层正位涡度发展增强南移的原因。

4.2 相对涡度

图 3a~b 分别为模式积分 9 h 和 12 h，实况为 17:00，20:00 沙尘暴天气爆发到强盛时期涡度场沿 35°N 的剖面图，图中 102°~105°E 区域实况为强沙尘暴天气发生区域。17:00(图 3a)103°E 有一个极强的气旋性涡柱由地面伸至 200 hPa，并向西倾斜，分别在 500，300 hPa 有两个正涡度中心，强度为 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ；在该涡柱的左右两侧分别有高度不同的负涡度柱，左侧达 400 hPa，右侧达 200 hPa，呈明显的不对称结构，中心强度为 $-1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ；而且还发现在 103°E 涡柱的上空为 $-1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的负涡度柱，中心高度在 300 hPa 左右。显然垂直涡柱的这种配置是特别值得注意的，因为这种涡柱结构的物理本质是：在低空有剧烈的辐合入流，并伴有强上升运动，在高空有强烈的辐散流出，并伴有非对称下沉运动，其结果是驱动整个涡柱内的强上升运动不断发展，而地面和低空水平风速持续增强；与此同时，沙尘暴外围下沉气流，特别是其后部(西侧)下沉气流将使地面冷高压进一步增强和发展，其前部(东侧)下沉气流使地面冷锋加强东移，锋前风速加大。由图 3b 可见，20:00 气旋性涡柱高度明显降低，原来 300 hPa 正涡度中心消失，正负涡柱的非对称结构减弱，对称性结构明显加强，虽然此时沙尘暴天气处于强盛时期，但垂直涡柱由非对称结构变为对称结构。这种对称结构的出现将使沙尘暴天气由极强开始减弱^[7]。

由图 3 可见，在沙尘暴发展的不同时期，涡度相对场有着明显的差异，正负垂直涡柱的结构变化同沙尘暴天气的发生、发展、减弱有着密切的关

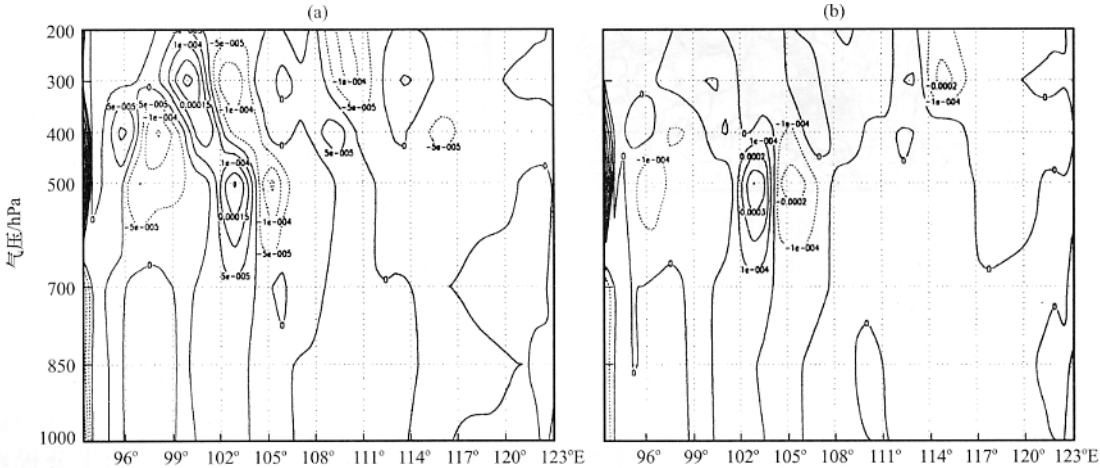


图 3 模式积分(a)9 h、(b)12 h 沿 35°N 的相对涡度场气压—经度剖面
Fig. 3 Pressure-longitude cross-section of relative vorticity field along 35°N

万方数据 after integrating 9 h(a), 12 h(b)

系。

4.3 垂直速度

从图 4 可以看出，高空西风急流与垂直速度有着很好的配合。在 40°N 附近，高空 200 hPa 有一

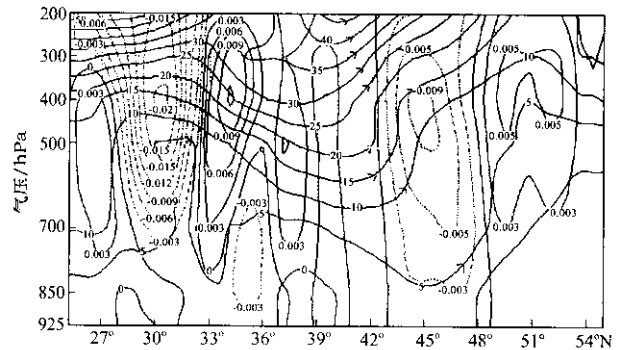


图 4 积分 6 h 后沿 105°E 剖面 u 分量风和垂直速度
带箭头线为 u 分量风
Fig. 4 u wind velocity and vertical velocity along 105°E after integrating 6 h. The isotach with arrow is u component

个西风急流中心。相对应的垂直速度场上，急流中心南北两侧分别有下沉及上升的垂直环流。这样在其下方形成了一个北部上升、南部下沉的反环流，环流中心位于急流中心以南约 2~3 个纬距，沙尘暴发生在西风急流下方的 38°~42°N 区域内。在沙尘暴的过程中，垂直环流对于沙尘暴的动力、热力的上下输送起着重要的作用，与沙尘暴直接联系的是高空西风急流下方的反环流(Ferrel 环流)。高空急流下的反环流是与非地转热成风相联系的。林永辉等^[8]曾对大气运动基本方程组进行量纲分析，略去小项后并进行线性化，得到：

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -fu - \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad (2)$$

式中对 P 求导，得：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial v}{\partial p} \right) = -fU_T, \quad (3)$$

其中 $U_T = \left(-\frac{\partial u}{\partial p} \right) - \frac{1}{f} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial p} \right)$ ，为非热成风， $\left(-\frac{\partial v}{\partial p} \right)$ 是 x 方向上涡度的一部分。

由(3)式可知，在急流的下部，流场上热成风大于温度场的热成风即 $U_T > 0$ 时，西风随高度的增大大于南北温差所对应的温度场上的热成风，则 $-fU_T < 0$ ，从而产生和加强高纬上升、低纬下沉的反环流。所以急流以下的反环流有两方面的作用：一方面调整高低空西风垂直切变，使西风随高度增

大的流场切变减小，高层动量向低层传递，低层风速增大；另一方面，由于北部上升绝热降温，南部下沉增温，导致南北温度梯度加大，锋区加强。两者共同作用的结果使非地转热成风向热成风平衡。由非热成风向热成风平衡的过程也就是环流加速制造动能的过程。因此，在沙尘暴期间，高空急流以下的反环流的形成与发展起到动量下传和加强锋区的作用^[9]，反环流是本次大风沙尘暴重要的动力和热力机制。

4.4 垂直螺旋度变化

螺旋度是强对流天气分析预报中的一个重要的物理量，螺旋度严格地定义为风速与涡度点积的体积分，螺旋度的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度，其单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，气压坐标系下的局地螺旋度可表示为

$$H = \iiint V \cdot (\nabla \times V) d\tau \\ = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) u + \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega, \quad (4)$$

上式右端 3 项分别是 i, j, k 方向的涡度和风速分量之积，文献^[6, 10]研究指出， k 螺旋度较之 i 螺旋度和 j 螺旋度有更为清楚和重要的意义。本文仅讨论 k 螺旋度(垂直螺旋度)，符合右手定则的螺旋度取正值，重新定义局地垂直螺旋度为

$$H_k = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega = -\xi \omega. \quad (5)$$

本文采用局地垂直螺旋度进行分析。对模式积分 9 h 后垂直螺旋度沿 35°N 的剖面图(图略)分析发现：在沙尘暴发生区域(102°~106°E)，450 hPa 以下为正的螺旋度，在同时间的涡度剖面图(图略)上以 104°E 为界，左右两侧 500 hPa 高度上分别有一正一负的两个涡度中心，对应的垂直速度剖面图上 500 hPa 以下该经度左右两侧对应应有下沉运动及上升运动，而此时地面冷锋位于 104°E 附近。可见，在地面冷锋西侧的高空正涡度是下传发展且沿冷锋前气流方向东移的，而地面冷锋东侧由于上升运动，气流的负涡度性是减弱的。这种作用不仅有利于冷锋的加强，而且十分有利于冷锋前次级环流的发展(图 5a)。同样，在沙尘暴发生区域 102°~106°E 的 450 hPa 以上为负的垂直螺旋度区。

以上分析表明，沙尘暴发生区上空螺旋度的垂直分布特点是在对流层中下层为正值区，对流层上层为负值区，这种垂直结构十分有利于对流系统的

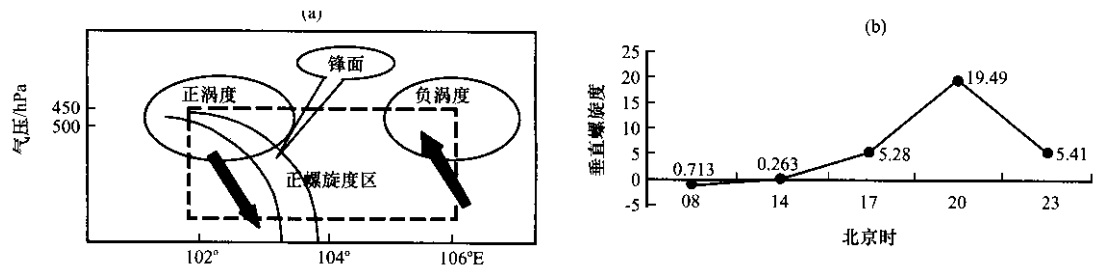


图 5 (a)冷锋附近螺旋度、涡度、垂直运动示意图和(b)沙尘暴发展不同时期 500 hPa 沿 35°N 平均垂直螺旋度变化

Fig. 5 (a) schematic diagram of moving trail of helicity, vortex, vertical motion near cold front system and (b) change of mean vertical helicity along 35°N on 500 hPa during different duststorm stages

发展。

从图 5b 上可看出，在沙尘暴初期平均螺旋度由负值变为正值，爆发期变幅明显增大，到了强盛期增长最快，在 20:00 达到极大为 $19.49 \times 10^{-7} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ ，之后降低，沙尘暴开始减弱。可见平均螺旋度的变化和沙尘暴的发展阶段有着很好的对应关系。

5 地形影响的模拟试验

徐国昌等^[11]对甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析中指出：影响西北地区沙尘暴的冷空气路径有三条：一是西北路径，二是北方路径，三是西方路径。沙尘暴多发生在西北、华北、东北部分地区，有一定的地域分布，尤其是强沙尘暴在一定区域内发生的频率较高，其中局地地形的作用也是一个不可忽略的因子。胡文东等^[12]对本次沙尘暴过程研究指出：地形对沙尘暴有明显影响，而且地形的尺度与走向，影响效果也不同。利用数值模式来研究地形效应是目前广为采用的方法^[13]，可以改变模式的地形参数资料来进行一些敏感性试验，以夸大地形因子在沙尘暴天气的作用，阐明某些特殊地形对沙尘暴天气系统的影响。

5.1 河西走廊地形的狭管效应

根据文献^[14]，当气流由开阔地带流入峡谷时，空气将加速流动，风速增大，这种地形的“狭管效应”在沙尘暴形成中起着重要的作用。当冷空气由新疆入侵经过塔克拉玛干等沙漠地带，一股冷空气先于主体沿河西走廊扩散南下，冷锋后的大风携带大量沙尘进入河西走廊，由于地形引起的狭管效应，使风力明显增大，在原模式地形情况下模拟出的地面风速图及风矢量图(图略)都明显地反映了这一特点。这是造成河西走廊常出现强沙尘暴天气的

原因之一。

5.2 地形的阻挡、抬升、绕流作用

为了揭示西北地区青藏高原北侧、河西走廊及秦岭对本次沙尘暴天气系统的影响，本文设计了以下两种方案来进行数值模拟。

方案 1：在原地形高度资料中去掉秦岭所在区域的地形高度，并设定为 0 m 海拔高度。

方案 2：在方案 1 的基础上，抬升河西走廊区域的海拔高度。

5.2.1 改变秦岭地形后的地面气压场及风场

在原模式地形情况下，秦岭区域(106°~110°E, 31°~34°N)的地形高度为 400~1100 m，采用方案 1，模式的其它参数不变进行数值模拟输出。通过地面气压场及风场对比分析，发现在本次沙尘暴发展的不同时期，地面气压场与风场改变较小。仅 14:00 及 20:00 地面气旋东南侧秦岭所在的小区域内稍有变化。可见秦岭地形对这次沙尘暴天气地面天气系统影响较弱。

5.2.2 改变河西走廊及秦岭地形后的地面气压场及风场

在方案 1 的基础上，抬升河西走廊地形高度进行数值模拟试验。改变河西走廊狭窄地形高度的做法如下：由于河西走廊呈西北—东南向，所以在地形高度具体设定时以 100°E 为界分为西东两个区域，西部区域高度设为 2800 m 海拔高度，东部区域设为 2500 m 海拔高度。这样做一方面满足我国西高东低的基本地形特点；另一方面使得抬升后河西走廊的地形高度与其南北山地的高度大体相当。

采用方案 2 后模式输出的 8 日 08:00(图略)，14:00，20:00 及 23:00 的地面气压场(图 6a~c)与改变前的地面气压场(图 6d~f)比较可以看出：8 日 08:00 两者的气压场的高低压分布及强度没有多

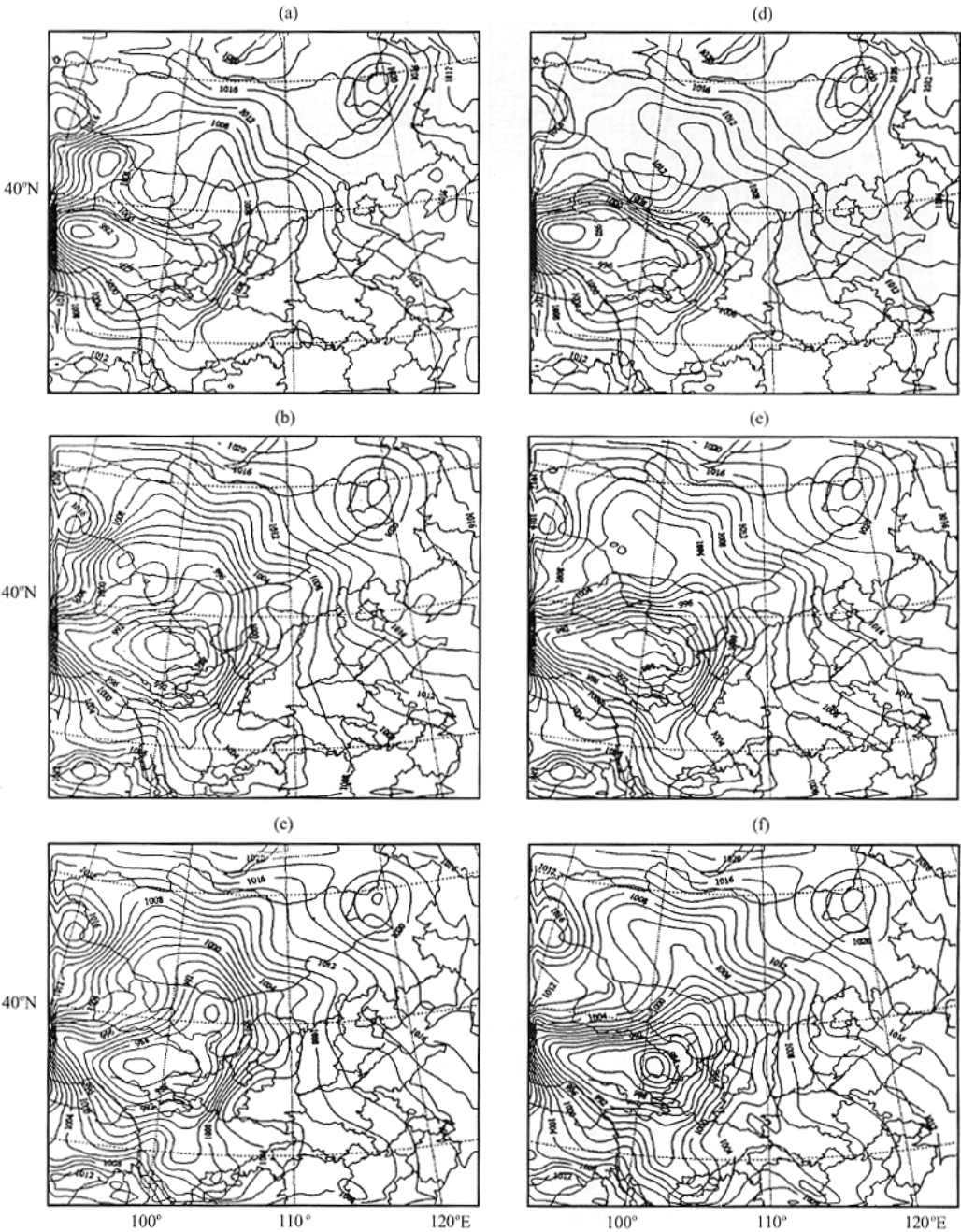


图 6 (a)~(c)为采用方案 2 后模式输出的 14:00, 20:00, 23:00 地面气压场, (d)~(f)为未改变地形参数前模式输出的 14:00, 20:00, 23:00 地面气压场

Fig. 6 Surface pressures at 14:00, 20:00, 23:00 through scheme 2 (a)~(c) and before changing topography parameter (d)~(f)

大变化, 14:00 地面场发生较为明显的变化, 有两个变化特征: 一是除中心位于 96°E , 39°N 的地面气旋范围东扩外, 在河西走廊西段区域 ($96^{\circ}\sim 99^{\circ}\text{E}$, $42^{\circ}\sim 46^{\circ}\text{N}$) 出现了 1000 hPa 的低压中心; 二是在 93°E , 45°N 附近的高压加强, 中心强度由 1017.5 hPa 加强至 1020.0 hPa. 20:00 (图 6b), 在抬升后的河西走廊西段的低压中心进一步加强, 中

心强度为 997.5 hPa. 图 6e 上反映沿河西走廊扩散冷空气形成的 1005 hPa 高压区已不存在, 同时位于 93°E , 45°N 附近的高压范围扩大, 在 $92^{\circ}\sim 99^{\circ}\text{E}$, $42^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}$ 出现了一个强于图 6e 的东北—西南向锋区. 23:00 地面气旋范围进一步扩大, 但高压前部的锋区基本未东移, 但是在图 6f 上此时冷锋已明显东移南下, 压至 39°N 附近, 基本呈东西走

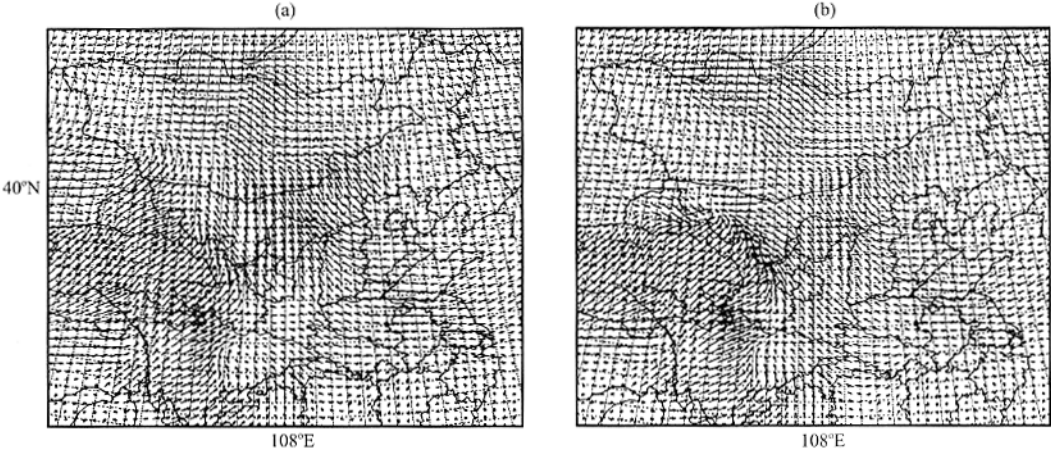


图 7 20:00 模式地形参数改变后(a)、前(b)的风矢量

Fig. 7 Wind vector with (a) and without (b) changing topography parameters at 20:00

向。

采用方案 2 后，模式输出的 8 日 08:00(图略)、14:00(图略)及 20:00 的地面风场与地形参数改变前相应时次地面风场对比分析，可以看出：8 日 08:00 在抬升的河西走廊中心区域风场基本是辐散的，在抬升区域的西北侧边缘(96°~99°E, 42°N)附近有南北风的辐合，在抬升区域的东南侧风场上西北风与西南风之间的辐合更为强烈。14:00 出现的明显变化特征是在抬升地形的河西走廊东段区域内，风场上风速加大，而且风向由西风转为西南风，并且在抬升地形区域的东北侧与东南风辐合。图 7a~b 分别为 20:00 模式地形参数改变后、前的风矢量图，发现两者有着最为明显的差别，其一是整个风场的风速强度明显加强；其二是图 7a 在 93°E, 46°N 出现风的气旋性辐合，比图 7b 位置偏西，强度偏强；其三是大体上以抬升的河西走廊为界，其西南部西南风加强，北部西风加强，东北侧东南气流加强。

造成地面气压场和风场明显变化的根本原因有以下几点：

- (1) 由于模式采用的是 σ 坐标系，可以较为有效地反映下垫面地形特征。
- (2) 由于方案 2 抬升了河西走廊区域的地形高度，使得它与其北部的山地及其西南部青藏高原连成一片，等效于把青藏高原范围向东北方向扩展，在西北侧同北部蒙古高原相连，在新疆东部与甘肃接壤处形成新的喇叭口地形，这样由于河西走廊地形已被抬升，对其西部气流形成阻挡，冷空气不能沿河西走廊扩散南下，从而造成 14:00 地面气

压场上冷空气在此的堆积；随着冷空气的堆积，20:00 在此区域形成更为强大的冷高压，至 23:00 达到最强，而在不抬升河西走廊地形高度抬升的地面气压场上，冷空气前锋已到达河套地区东部。所以，河西走廊地形抬升后，冷高压及其前部的冷锋移动明显偏慢，说明了大地形的阻挡作用，反过来证明了河西走廊狭管地形有利于冷空气扩散南下的特征。

图 7a 上河西走廊西段出现的西南风就体现了地形对西风气流的绕流作用，抬升的河西走廊的东北侧东南气流加强同样说明地形对东风气流的抬升和绕流作用，体现了大地形使地面风加强外，对气流还有强迫绕流作用，在高原周围地形梯度较大地区加大了绕流分量，消弱了原来河西走廊狭窄地形加大的西北风分量。

6 结论

本文利用中尺度模式对发生在西北地区的一次强沙尘暴天气过程作了诊断分析和地形模拟试验，初步得出以下结论：

- (1) 本次沙尘暴天气过程是一次典型的西北路径冷空气沿河西走廊南下影响过程。
- (2) 位势涡度的水平分布特征及强弱变化与沙尘暴发展有着很好的对应，对沙尘暴的出现时间和落区有一定的指示意义。
- (3) 在沙尘暴发展的不同时期，相对涡度场同样有着明显的差异，正负垂直涡柱由非对称结构变为对称结构同沙尘暴天气发生发展、减弱有着密切的关系。

(4) 在沙尘暴期间，高空急流以下的反环流的形成与发展起到动量下传和加强锋区的作用，反环流是西北地区大风沙尘暴重要的动力和热力机制。

(5) 螺旋度量值的演变与沙尘暴的出现有一定的对应关系，分析位涡和螺旋度的特征，可以进一步判断沙尘暴的爆发时间、持续过程和移动路径，为准确预报沙尘暴提供参考依据。

(6) 河西走廊地形的狭管效应及青藏高原、祁连山等地形的阻挡、抬升、绕流作用为沙尘暴形成提供了有利的地理环境。模式对地形高度改变的响应是敏感的，模式的输出量能够较好地反映地形影响特征：秦岭区域地形高度的降低对西北路径沙尘暴地面天气系统的影响很微弱；河西走廊地形高度的改变对沙尘暴地面天气系统的影响作用明显，河西走廊特殊的地形在西北路沙尘暴天气起着有利于冷空气扩散南下及使低层风速加强等重要作用。

参考文献

[1] 康凤琴, 李耀辉, 吕世华. 一次强沙尘暴过程中尺度平均动能变率诊断[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 204—211

[2] 李艳春, 赵光平, 胡文东等. 宁夏中北部沙尘暴过程中气象要素变化特征及成因分析[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 212—217

[3] 江灏, 吴虹, 尹宪志等. 河西走廊沙尘暴的时空变化特征与其

环流背景[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 548—552

[4] 汤绪, 俞亚勋, 李耀辉等. 甘肃河西走廊春季强沙尘暴与低空气流[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 840—846

[5] 王可丽, 江灏, 吴虹. 2001年春季北方沙尘暴的环流动力结构分析[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 303—308

[6] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴. “4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 89—95

[7] 程麟生, 马艳. “93.5黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值实验”[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 385—395

[8] 林永辉, 廖清海, 王鹏云. 低空急流形成发展的一种可能机制：—重力波的惯性不稳定[J]. 气象学报, 2003, 61(3): 374—378

[9] 郑新江, 徐建芬, 罗敬宁等. 1998年4月14~15日强沙尘暴过程分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 180—185

[10] 孙兰东, 徐建芬. 西北地区东部3次暴雨天气的螺旋度分析[M]. 西北重要天气成因及数值预报方法研究. 北京: 气象出版社, 181—184

[11] 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

[12] 胡文东, 高晓清. “2001.4.6”宁夏沙尘暴过程卫星云图分析[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 590—596

[13] 钱永甫, 颜宏, 王谦谦. 有地形数值模式中的若干问题[M]. 行星大气中地形效应的数值研究. 北京: 科学出版社, 1988. 3—6

[14] 杨德保, 尚可政, 王式功. 影响沙尘暴的中小尺度系统[C]. 沙尘暴. 北京: 气象出版社, 2003. 79—81

Diagnosing Analyses and Topography Simulation
of a Sand-Dust Storm Event in Northwest China

WANG Jian-peng^{1, 2}, SHEN Tong-li¹, LIU Xiao-ying², LI Ming³,
XUE Chun-fang², MENG Xiao-rong², NING Hai-wen²

(1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Xi'an Meteorology
Bureau, Xi'an 710016, China; 3. Shaanxi Meteorology Station, Xi'an 710014, China)

Abstract: Using the observed initial field, the improved mesoscale model MM4 was employed to simulate the sand-dust storm over Northwest China from 8 to 9 April 2001, its simulated results were analyzed. The simulations revealed that these parameters were good collaboration each other, their values and spatial distributions were well-corresponding to the forming, developing and decaying of dust event. The sensitivity experiments of topography showed that the impacts of Qinling mountain on this dust event was ignorable, but Hexi corridor was important, indicating that the narrow lane of Hexi corridor provide an available topography condition for dust storm processing.

Key words: Sand-dust storm; Diagnosing analysis; Topography; Numerical simulation