

文章编号:1000-694X(2003)06-0681-05

2001年4月8日强沙尘暴天气的数值模拟研究

康凤琴^{1,2}, 李耀辉², 吕世华¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 利用 MM5 中尺度气象模式对 2001 年 4 月 7~9 日发生在新疆南部、青海北部、甘肃大部、陕西北部、宁夏和内蒙古的大范围大风、强沙尘暴、寒潮和降雪天气过程进行模拟研究。结果表明:MM5 中尺度模式能够模拟出这次天气过程的系统变化,小网格尺度的模拟结果较大网格更能够反映出系统的特征;在地形、地貌相对稳定的情况下,特殊的天气环流形势造成的强而持久的大风和激烈的中尺度垂直对流是这次天气过程的主要原因;从空中槽脊形式的配合、发展趋势,地貌、地形特征,地面大风、降温、降压等特征综合分析,提前 24 h 就能预示出这次大范围的大风、寒潮和沙尘天气的出现。这次过程的特殊之处是:整个模拟过程中模拟区域内在 200 hPa 以上有弱的层结不稳定状态出现,对流层中、低层层结稳定;沙尘暴发生区域的主要上升气流出现在上午。

关键词: 沙尘暴; 中尺度气象模式 MM5; 稳定层结

中图分类号: P458.3

文献标识码: A

沙尘暴的发生发展既是一种加速土地荒漠化的重要过程,又是土地荒漠化发展到一定程度的具体表现。日益加剧的土地沙漠化,频繁发生的沙尘暴是中国面临的最严重的生态环境问题,严重制约了中国经济和社会可持续发展,威胁了国家生态安全,已经成为中华民族的心腹之患。中国政府和中国人民对沙尘暴的防治给予了高度的重视,自 20 世纪 70 年代开始,实施了世界上最大的生态工程——“三北防护林”的建设;2001 年 8 月,又通过了《中华人民共和国防沙治沙法》。对沙尘暴的研究开始于 20 世纪 70 年代,在沙尘暴天气的时空分布^[1,2]、气象要素场演变^[3]、卫星云图与光学特性^[4]、沙尘气溶胶物理化学及辐射特性^[5]等事实揭露方面已经做了大量的工作;在沙尘暴成因分析方面,涉及到了宏观天气气候条件和下垫面状况^[6,7];用数值模拟方法研究了沙尘暴天气个例和沙尘的输送^[8];这些工作取得了很多有益的结论。

沙尘暴的形成及其强度,直接取决于风力、气温、降水及与其相关的土壤表层状况。一般认为,沙尘暴发生需要强劲的风力、丰富的沙尘源和不稳定的空气层结 3 个条件。干燥裸露的地表富有松散沙尘,是沙尘暴形成的物质基础;足够强劲持久的风力和不稳定的空气层结是沙尘暴形成的必要气象动力和热力条件^[7]。2001 年 4 月 7~9 日发生在新疆南

部、青海北部、甘肃大部、陕西北部、宁夏和内蒙古的大范围的大风、强沙尘暴、寒潮和降雪天气过程中,200 hPa 以上有弱的层结不稳定状态出现,对流层中、低层层结稳定。本文从天气学角度出发,对此过程做一分析,试图对沙尘天气的成因、机理进行探索,为沙尘暴天气的预警、预报提供线索,为中国的沙尘暴形成、沙尘输送模式的建立和完善提供相关的天气背景。

1 天气事实

2001 年 4 月 6~7 日,特强沙尘暴横扫内蒙古自治区的二连浩特等 5 个城市,50 m 外不见人影。这就是俗称的“黑风”。内蒙古自治区 95% 的地区出现了沙尘暴,其中有 9 个地市出现了能见度在 500 m 以下的强沙尘暴。这次沙尘暴波及宁夏、甘肃和黑龙江、吉林,影响的国土面积达到 39×10^4 km²。4 月 7~9 日发生在新疆、甘肃等地的沙尘暴更为强劲。事实上,在 4 月 6 日甘肃省偏北地区就已经有扬沙、浮尘和沙尘暴天气出现,受西伯利亚强冷空气东移南下影响,4 月 7 日 20 时地面冷锋到达新疆哈密至天山一带,马鬃山出现沙尘暴天气,能见度为 600 m,23 时敦煌出现沙尘暴天气,4 月 8 日 02 时,敦煌、玉门镇能见度分别为 800 m 和 700 m,由于此时正处在夜间,整个大气层较白天稳定,沙尘天

收稿日期:2002-05-13; 改回日期:2002-07-09

基金项目:科技部社会公益研究专项基金项目“西北干旱区沙尘暴预警、服务系统研究”资助

作者简介:康凤琴(1963—),女(汉族),山西闻喜人,硕士,副研究员,主要从事气象灾害的成因、预测研究。E-mail: fqkang@163.com

气不很强烈;4月8日05时,酒泉出现沙尘暴;6:30金昌开始吹风,到6:40最大风速达 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,能见度为 50 m;07:13 永昌最大风速达 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向为西北方向,能见度为 20 m,此时的金昌能见度也小于 50 m;08时,地面冷锋入侵至甘肃张掖出现沙尘暴,能见度为 100 m;随着冷锋的东移南下,甘肃自西向东依次出现了沙尘暴天气。14时乌鞘岭、白银出现沙尘暴;17时景泰、靖远、兰州、环县出现沙尘暴;4月9日凌晨地面冷锋移出甘肃,沙尘暴的天气过程基本结束;9~13日,甘肃受槽后梯度风及动量下传的影响仍有扬沙、浮尘天气,至14日,此过程才真正结束。在这次过程中,4月8日金昌出现瞬时最大风速 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风力 10 级,10 min 平均最大风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,8 级以上大风持续时间达 8 h,期间强沙尘暴最小能见度为 20 m。永昌出现 10 min 平均风速达到 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,打破了 40 a 的气象记录。8~11 日甘肃大部分地方连续出现浮尘和杨沙天气。

这次沙尘暴范围涉及新疆南部,内蒙古中西部,青海北部、东部,甘肃河西、中部、陇东,宁夏,陕西北部等地,受其影响,沙尘暴区周围几百公里,甚至上千公里的范围内都出现了扬沙、浮尘天气(图 1)。

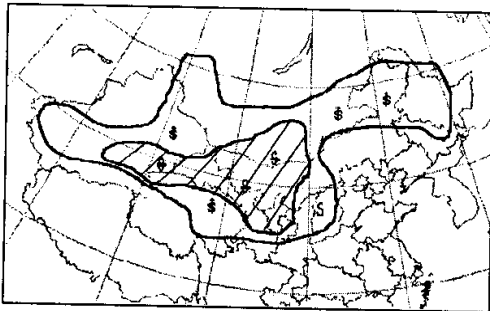


图 1 2001 年 4 月 7~8 日沙尘暴、扬沙范围示意图

Fig. 1 The sketch map of sandstorm and sand-blown range

2 模式设计

根据这次过程的实况特点,设计模式模拟区域,并将过程分为 3 个阶段进行分析讨论。7 日以前为预备阶段;7~8 日为沙尘、寒潮过程形成发展阶段;8 日以后为消亡阶段。

本文采用的模式是当今广泛使用的代表世界先进水平的中尺度数值模式——美国国家大气研究中心和宾州大学联合研制的 MM5V2 中尺度数值模拟系统。设计全物理过程方案。双向双重网格嵌套:

中心点($40^\circ \text{ N}, 100^\circ \text{ E}$),粗、细网格点数分别为 61×61 和 121×121 ,格距分别为 60 km、20 km。模式模拟区地形和范围见图 2。模式垂直方向为 σ 坐标,模拟中取 σ 为不等距的 23 层,分别为 1.0, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.8, 0.75, 0.7, 0.65, 0.6, 0.55, 0.5, 0.45, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.01, 0。初始条件采用目前国家气象中心业务运行的 t106L19 分析场由于缺少 4 日初始积分时间,从 2001 年 04 月 05 日 12 时开始,积分 96 h,每 3 h 输出一次模拟结果。云和降水物理过程选择混合云显示方案和积云对流参数化方案;对格距为 60 km 的大网格,选用 Betts-Miller 方案,即,假定层结不稳定时产生对流调整,调整的结果使层结在一给定时段内向实测的准平衡状态张弛逼近,确保模式中事实上受到对流强烈影响的局地垂直温湿结构是真实的;对格距为 20 km 的小网格,选用 Grell 方案,即,假定大尺度波动引起的不稳定化与对流的稳定化之间的准平衡,以上升和下沉通量和环境补偿运动来确定加热增湿廓线。行星边界层物理过程采用 Blackadar 高分辨 PBL 参数化。云辐射方案选用 Duhdia 长短波辐射方案,考虑云与大气之间的长波、短波辐射交互作用,既提供地面辐射通量,又影响大气温度趋势。地面温度由浅层模式和云效应的能量收支预报获得。地表特征取 13 类。

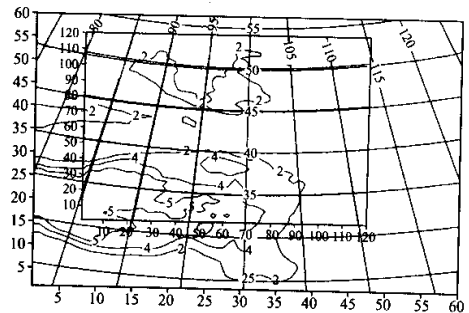


图 2 模式模拟区地形和范围(坐标为网格数)

Fig. 2 Terrain and range of the study region
(coordinates are grid counts)

3 模拟结果

3.1 地面要素分析

3.1.1 地面风场分析

分析模式在 σ 坐标下的输出。 $\sigma=1$ 的水平面上的风向、风速和温度场分布以及演变表明:沙尘天

气的前期,从 4 月 4 日 09 时开始,在新疆以北的阿勒泰地区和准噶尔盆地的古尔班通古特沙漠以西就已经出现了大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风,到 5 日 06 时, $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等风速线区域扩大并进入甘肃境内的河西走廊,风向偏西,从 5 日 15 时开始,经过准噶尔盆地沙漠区域的西南西风已经达到了 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,进入河西走廊时,在 2 000 m 地形高度线的中间,受到地形的影响,风速加大,风向转为西北风。6 日 03 时, 40° N 、 80° E 附近出现正北气流,在 45° N 附近,经过古尔班通古特沙漠,转为西风,进入甘肃,直到 6 日 09 时,在河西走廊以北处在正西风控制之下,甘肃偏北地区出现扬沙、浮尘和沙尘暴天气。7 日,沙尘暴在甘肃出现:7 日 03 ~ 09 时,河西走廊出现大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,并出现沙尘暴天气,逐渐扩散到甘肃大部地区。

σ 坐标下 $\sigma=1$ 的水平面上,纬度为 38° N 附近的水平风速(图 3)和垂直速度(略)的时间-经向分布显示:甘肃西部从 5 日下午就出现 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地面水平风速,6 日上午风速增大超过 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,7 日上午水平风速最大,达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;从 6 日上午开始,大于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速持续到 8 日 12 时。垂直上升速度的最大值中心和水平风速相对应,出现在 7 日上午。垂直上升速度中心大体上呈现出上午为上升,下午为下沉的周期性变化和水平风速极大值的中心相互对应,和一般情况下的下午对流发展、以上升气流为主的情形相反。

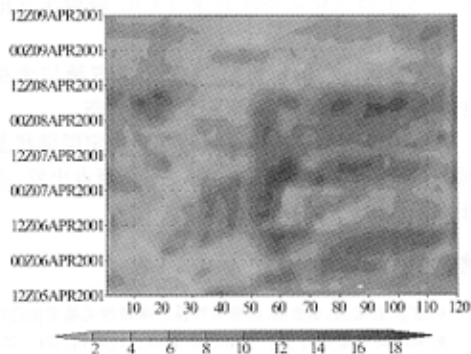


图 3 σ 坐标下 $\sigma=1$ 的水平面上水平风在纬度 $y=46$ 格点处的风速经向网格点-时间变化(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Distribution of horizontal wind speed with longitude and time at $y=46$ grid on $\sigma=1$ level under σ coordinate system

3.1.2 地面变温分析

从每 3 h 模式输出和前一天相同时刻的 24 h 温

度之差的演变图上可以发现:6 日有两个降温中心,其一沿着青藏高原北边缘海拔 2 000 m 高的地形向东移动,降温中心达 -8°C ;另一个降温中心来自新疆。7 日 03 时开始,降温出现在内蒙古、甘肃大范围地区,甘肃最大区域降温达 -9°C ;8 日降温区域向东移动。24 h 降温区域的变化表明了冷空气的移动受到青藏高原北边缘地形的影响,在高空槽脊移动的带动下,经过巴丹吉林沙漠东移。

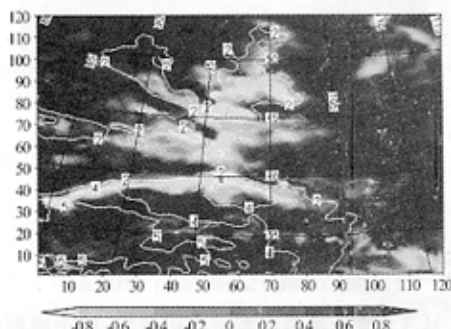


图 4 7 日以前小网格域内风速平均值与 24 h 地面变温场的时间相关系数

(等值线为地形高度,单位:1 000 m)

Fig. 4 Correlation coefficient between regional mean wind speed and 24 h surface temperature difference before 7, April (isoline is terrain height, unit: 1000 m)

模拟积分时间 $t=9$ 至 $t=13$ 阶段内(即 7 日以前),24 h 变温场和 $\sigma=1$ 的水平面上平均水平速度的负相关区域(图 4)除了有明显的地形特征外,还和沙尘天气区域有良好的对应关系。表明低层水平风速大的区域是 24 h 降温大的区域。此外,每 3 h 温差有同样的特征。

3.1.3 地面变压分析

从 24 h 变压动态分布上发现这次沙尘、降压过程分为两个阶段:7 日以前和 8 日以后。从 6 日 15 时开始到 7 日,处于 500 hPa 槽前的新疆天山及以北的古尔班通古特沙漠一带的地面降压区域向东移动,中心最大达到 -5 hPa ,到 6 日 21 时,降压中心移到疏勒河、嘉峪关一带逐渐消失。预示着在此之后的增压出现。7 日,500 hPa 槽线开始加深,并南压到 40° N 附近,受其影响,大部分区域出现正变压。从 8 日 00 时开始,古尔班通古特沙漠、塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地的沙漠地区,以及甘肃中、西部地区都普遍降压,一直持续到 9 日,表明前一天 24 h 的负变压对沙尘天气有很好的预示性。

7 日以前,24 h 变压场和平均水平速度的正相

关区域和沙尘天气区域有良好的对应关系(图5)。表明低层水平风速大的区域是24 h增压大的区域。

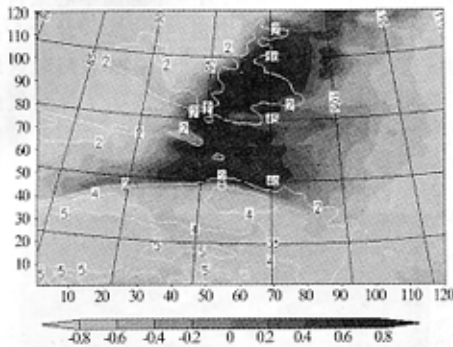


图5 7日以前小网格域内风速平均值与24 h地面变压场的相关系数(值线为地形高度,单位:1 000 m)

Fig. 5 Correlation coefficient between mean wind speed and 24 h surface pressure difference before 7, April
(isoline is terrain height, unit: 1 000 m)

从3 h变压动态分布上可以看出:整个模拟区域内冷暖空气活动交替频繁,天气变化剧烈。5日15时,地面3 h变压为正的区城紧靠500 hPa冷锋区域,其余区域出现大范围降压。预示着沙尘天气出现时的增压。

地面要素分析的结果是:沙尘暴前期的地面变温、变压和地面大风的变化能够很好地预示沙尘、寒潮天气发生和发展,从中空槽脊形式和甘肃上游出现的地面大风、降温相配合,考虑到地形作用,在沙尘天气出现前的24 h就可以预示出河西走廊的大风、降温天气出现。这次过程的特点是:主要上升气流发生在上午。其中地面风速和地面24 h变压、变温的相关系数对沙尘暴天气的出现有很好的指示意义。

3.2 速度、温度垂直分布

在模拟时段内,垂直位温分布是整个模拟场上高值下低值,属于稳定状态。湿度分布呈现上干下湿。

经过38° N附近的风速高度-经向分布动态图表明:整个模拟过程中,最大水平风速中心出现在400 hPa以上。最大垂直风速中心出现在高空最大水平风速中心下的对流层中下部;或者垂直风速最大中心出现在水平风速等值线倾斜度最大处。5日15时,在塔克拉玛干沙漠区域地面就存在上升气流,河西走廊一带400 hPa高空有水平200 km尺度的上升、下沉气流对,300 hPa高空有40 m·s⁻¹的

最大水平风速中心;5日18时,地面垂直上升速度范围扩大到巴丹吉林沙漠区域;和350 hPa高空的最大水平风速中心相对应,在甘肃西部850~650 hPa高空存在最大垂直风速中心。沙尘天气过程中,中空水平200 km范围内的强烈中尺度对流,说明了即便是层结稳定状态下,对流仍然很强烈,从地面向空中输送沙尘的能力依然很强。9日,模拟区域地面仍然有薄层上升气流,但整个对流层内仍以下沉气流为主,中小尺度的对流活动基本结束。

垂直速度和地形有密切的关系。在500 hPa($x=35, x=50; y=40, y=90$)的格点区域里(甘肃河西走廊一带),6日以前、7~8日和9日的平均垂直速度分别是0.00369136、0.00828177和-0.00913154 m·s⁻¹;平均水平速度分别是21.0511、25.5773和16.6722 m·s⁻¹。表明了沙尘天气严重期间,平均运动特征最为激烈。

4 结论

(1) MM5中尺度模式能够用于模拟研究沙尘天气过程,小网格尺度的模拟结果较大网格更能够详尽地反映出系统的特征。

(2) 沙尘暴前期的地面大风和地面变温、变压有良好的相关性。配合分析三者的变化能够预示沙尘、寒潮天气发生和发展。

(3) 从中空槽脊形式和甘肃上游出现的地面大风、降温相配合,考虑到地形作用,在沙尘天气出现前的24 h就可以预示河西走廊的大风、降温天气出现。

(4) 这次过程的特点是:主要上升气流发生在上午。整个模拟过程都属于稳定层结状态。

(5) 考虑到整个沙尘暴过程都是稳定层结状态的特殊情况,有必要从动能的收支平衡观点出发,进一步揭示沙尘天气的动力因素。

参考文献(References):

- [1] 屈建军,孙宏义,李金贵. 腾格里沙漠东南缘沙尘暴变化趋势的Markov模型分析[J]. 中国沙漠,2001,21(增刊):71-75.
- [2] 王涛,陈广庭,钱正安,等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 中国沙漠,2001,12(4):321-327.
- [3] 何清,向鸣,唐淑娟. 塔克拉玛干沙漠腹地两次强沙尘暴天气分析[J]. 中国沙漠,1998,18(4):320-327.
- [4] 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(2):177-184.
- [5] 邱金桓,孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析[J]. 大气科学,1994,18(1):1-10.
- [6] 王式功,杨德保,金炯,等. 我国西北地区黑风暴的成因和对策

- [J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 19-30.
- [7] 夏训诚, 杨根生, 等. 中国西北地区沙尘暴灾害及防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 5-12.
- [8] 陈伟民, 王强, 牛志敏, 等. 中国西北部“4.5”沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟[J]. 中国沙漠, 1996, 16(2): 140-144.

Numerical Study on Strong Sandstorm in April 8th, 2001

KANG Feng-qin^{1,2}, LI Yao-hui², LU Shi-hua¹, CHAI Ya-ling³

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China; 3. Operation Department of Gansu Civil Aviation Bureau, Lanzhou 730087, China)

Abstract: By using MM5 mesoscale numerical model this paper simulated a meteorological event of strong sandstorm, gale, snowfall and cold wave that occurred in the southern part of Xinjiang, northern part of Qinghai, largely part of Gansu, northern part of Shaanxi, Ningxia and largely part of Neimeng on 7~9 April 2001. The results show that (1) MM5 can simulate this disaster weather event and on small domain it can depict finely; (2) the strong and lasting gale led by special circulation and drastic mesoscale vertical convection under stable terrain and landform are responsible for this event; (3) this event can be forecasted 24 hours before by syntheical analysis on trough and ridge assembling and developing at high levels, terrain, surface temperature and pressure etc; (4) the correlation coefficient of surface gale with 24 h temperature difference and also with 24 h pressure difference can forecast this disaster weather event; (5) the speciality of this event is that the unstable weak level over 200 hPa and the updraft occurred before noon.

Key words: sandstorm; MM5 mesoscale numerical model; stable level