

华北地区一次强沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析

赵玉广¹ 沈桐立²

(1. 河北省气象台, 石家庄 050021; 2. 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘 要

利用 PSU/NCAR MM5 模式, 对华北地区“2002.3.20”强沙尘暴天气过程进行了数值模拟和诊断分析。结果表明: 斜压槽和蒙古气旋是触发这次强沙尘暴天气过程的重要的天气系统; 高空急流及其下方的 Ferrel 环流起到了高层动量下传和加强低层锋区的重要作用; 沙尘暴期间, 对流层高层大值位涡下传现象十分明显, 500hPa PV2 负值中心位置对沙尘暴的落区和爆发时间能起到一定的预示作用; 地形对比试验结果表明, 蒙古高原的地形有利于华北地区沙尘暴的发生发展。

关键词: 华北地区 沙尘暴 数值模拟 诊断分析 地形试验

Numerical Simulation and Diagnosis Analysis of the Severe

Sand-Dust Storm at the North China

Zhao Yuguang¹ Shen Tongli²

(1. Hebei Province Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021;

2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract

By using the PSU/NCAR MM5 model, we made a Numerical simulation about the severe sand-dust storm that occurred in the North China on 20 March in 2002. The result shows that: the tilted trough and Mongolia cyclone are the important weather systems that caused the severe sand-dust storm. high jet and Ferrel circulation are the main reason that momentum spreaded downward from higher level and frontal zone strengthened on lower level. During the sand-dust storm, the high PV spreads evidently downward from the upper troposphere. The negative PV2 center on the level of 500hPa is an important index for forecasting the sand-dust storm. The result of the terrain contrast test show: the Mongolia highland is of benefit to the development of cyclones

of upper air and ground. The cyclone is stronger, the effect is evident. Therefore, the Mongolia highland is of benefit to the occurrence and development of the sand-dust storm at the North China.

keywords: the North China the sand-dust storm Numerical Simulation
Diagnosis Analysis the terrain contrast test

1 引言

近年来我国西北和华北地区沙尘暴天气频繁发生, 沙尘暴已成为一种严重的气象灾害和生态环境问题。我国从二十世纪七十年代后期开始对沙尘暴天气进行系统的研究。王式功等^[1]通过对沙尘暴形成的宏观天气气候条件和下垫面状况的分析, 总结了西北地区沙尘暴发生的 5 个必要条件; 王劲松等^[2]用 MM5 模式对“2000. 4. 12”个例进行了数值模拟, 对输出的物理量进行了诊断分析; 刘景涛等^[3]通过对华北地区沙尘暴的研究发现, 内蒙古中西部是黑风暴的易发区和多发区。本文利用 MM5 中尺度数值模式, 对 2002 年发生在华北地区的一次强沙尘暴天气过程进行了模拟, 并对其形成的物理机制进行了探索分析, 以期提供一些对沙尘暴的预报依据。

2 “3. 20”强沙尘暴简述

2002 年 3 月 18 日至 22 日, 我国出现了近十年来强度最强、波及范围最广的一次强沙尘暴天气过程。沙尘袭击了西北、华北、东北、黄淮、江淮、汉水流域以及四川盆地、湖南等广大地区, 其中北方 11 个省区的 72 个测站都先后出现了沙尘暴, 24 个测站出现了强沙尘暴, 沙尘天气影响区域西北风为 5~7 级、局部地区达 8~9 级。这次强沙尘暴是在我国北方地区持续少雨高温干旱的气候背景下发生的。

3 模拟结果与诊断分析

我们使用 MM5 中尺度数值模式, 中心定在 115° E, 42° N, 格点 91×91, 格距为 60km。模拟资料用 T106 数值预报分析场作为初估场, 模式起报时间为 2002 年 3 月 19 日 20 时 (北京时间, 下同), 积分时间 48 小时, 时间步长 2 分钟, 每 3 小时输出一积分结果。

3.1 斜压槽和蒙古气旋

20 日 02 时 (模式积分 6 小时), 850、500 和 200hPa 高空图上 (图略), 温度槽 (脊) 明显落后于高度槽 (脊), 且等高线与等温线交角很大, 局部几乎呈 90°, 斜压性非常强, 伴随斜压槽有一支强锋区。可见, 高空槽前 (后) 有非常强的暖 (冷)

平流, 按照天气学原理^[4], 冷暖平流(热力因子)将促使高空系统发展, 而高空系统的发展, 又将促使涡度平流的加强。从该时次的涡度平流的垂直分布(图 1)来看, 在高空槽前地面蒙古气旋(气旋中心位于 116° E、47° N, 图略)的上空, 有非常强的正涡度平流, 最大正涡度平流中心位于 300hPa。按涡度方程, 槽前气旋性涡度增加, 这时流场与气压场就不适应, 在地转偏向力的作用下, 在这附加的气旋性流场中就有气流向外辐散, 使地面减压。模拟结果显示, 蒙古气旋前部和冷锋前部为负变压区, 最大 ΔP_3 (3 小时变压) 达到 -7 hPa, 蒙古气旋强烈发展, 其中心气压为 997.5hPa。而地面减压, 地面流场又要与气压场相适应, 引起气流向负变压区辐合。按质量守恒原理, 在高层辐散, 低层辐合区, 必然产生上升运动。通过上述分析可以看出: 由于高空槽的强斜压性促使涡度平流的加强, 从而促使了地面气旋的发展, 而气旋的发展必然伴有上升运动的发展, 强烈的上升运动将沙尘带入空中, 导致沙尘暴的形成。

3.2 高空急流与垂直环流

图 2 是模式积分 18 小时(20 日 14 时)沿 117° E 经过沙尘暴上空的 V 分量经向环流和垂直速度的纬度-高度垂直剖面图。从图中可以看到, 高空急流位于 300hPa, 中心在 44° N 附近, 风速达 $70\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。急流及以下, 北部为强盛的上升气流, 最大上升运动区域位于 42~ 48° N 之间; 40~ 42° N 之间是下沉气流, 因此在高空急流下方形成了一个北部上升, 南部下沉的反环流(Ferrel 环流), 环流中心位于急流以南约 3~4 个纬距, 高度在 550hPa 附近。有关文献^[5]提到, 高空急流下的反环流是与非地转热成风相联系的。

$$\text{热成风平衡式 } \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial v}{\partial \beta} \right) = f u_T, \text{ 其中 } u_T \text{ 表示非地转热成风。由公式可知,}$$

在急流下部, 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 $-f u_T < 0$, 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, 南部下沉增温作用, 导致南北水平

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。热成风平衡过程也就是环流加速制造动能的过程。

由模式积分 3 小时 (19 日 23 时) 和 15 小时 (20 日 11 时) 的高空急流沿 117°E 的纬度-高度垂直剖面图 (图略) 看出, 19 日 23 时, 高空急流中心位于 300hPa, 强度为 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 500hPa 风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 900hPa 及以下风力在 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。20 日 11 时, 急流中心强度急剧增强到 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 500hPa 风速增强到 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 900hPa 及以下风力也增强到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见, 高空动量下传非常明显。

另外, 由模拟的 500hPa 高空图 (图略) 可以看出, 随着高空急流的增强, 高空锋区也明显加强, 高空槽斜压性增大, 导致地面气旋发展, 垂直运动加剧, 进而促使沙尘暴的发展。

可见, 高空急流的加强促进了其下部反环流的发展, 反环流的形成与发展起到动量下传和加强锋区的作用, 是诱发华北地区大风和沙尘暴重要的动力和热力机制。

3.3 垂直速度

由模拟的垂直速度沿 42°N 的经度-高度垂直剖面图可以看出, 20 日 02 时 (图略), 垂直速度场由低层到模式层顶基本呈整层上升或下沉结构, 且以纬向间隔对称分布。 110°E 附近, 地面冷锋前为上升运动区, 上升中心位于 400hPa 附近, 中心值为 $20 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。锋后下沉运动中心有两个, 一个位于 200hPa, 另一个位于 500hPa, 中心值均为 $-15 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 沙尘暴区位于上升和下沉运动区内。14 时 (图略), 地面冷锋东移至 118°E , 上升或下沉运动区的范围明显扩大, 锋前上升运动急剧增强, 最大上升中心下降至 500hPa 附近, 强度达到 $40 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。锋后下沉运动中心合并成一个, 也位于 500hPa, 中心值基本未变, 但等速度线明显下伸。20 时 (图 3), 垂直运动继续增强。最大上升和下沉中心强度分别达到 $55 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-18 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见, 垂直速度区的变化与沙尘暴的发生区域有很好的对应关系。

3.4 位涡

沙尘暴的形成需要具备一定的动力和热力条件, 而位涡就是一个能表示气块动力和热力属性特征的物理量^[6]。P 坐标系下的位涡表达式为:

$$PV = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \text{ 其中 } \xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \text{ 为 P 坐标中的垂直}$$

涡度。令上式写为 $PV = PV1 + PV2$, 右端第一项 $PV1$ 为正压项, 定义为位涡的

垂直部分, 表示惯性稳定性 ($\xi + f$) 和对流稳定性 ($-g \frac{\partial \theta}{\partial p}$) 的作用, 它与静力

稳定度有关; 第二项 $PV2$ 为斜压项, 为位涡的水平部分, 它包含了斜压性 ($\nabla p \theta$) 和水平风垂直切变的贡献, 它与水平风速的垂直切变和位温的水平梯度有关。

由模拟的位涡沿 42°N 的经度-高度垂直剖面图可以看出, 20 日 02 时, 110°E 以西高层位涡大值区明显下沉, 1.5PVU 的等位涡线已经下伸到 450hPa 附近, 说明高层冷空气向下运动, 此时地面的沙尘暴区位于 110°E 附近, 与位涡下传区正好对应。14 时, 高层位涡等值线明显下伸, 1.5PVU 的等位涡线已经到 650hPa 附近, 在 118°E 附近高层等位涡线与低层等位涡线几乎打通相连, 呈现一个明显的“位涡柱”结构。高层位涡沿“位涡柱”向低层位涡下传, 使低层的气旋性涡度和斜压性加强, 导致低层气旋强烈发展, 垂直运动加强。20 时 (图 4a), “位涡柱”完全形成, 并且在 850hPa 低空出现一个 2.0PVU 的位涡大值中心, 与模拟的 850hPa 的正涡度中心 (图略) 正好对应。此时, 位涡下传达到最大, 而与之对应地面的沙尘暴也发展到极盛期。上述分析表明, 在沙尘暴的发展过程中, 高层位涡大值区明显下沉, 即位涡的下传十分明显。

位涡正压项 $PV1$ 和斜压项 $PV2$ 的垂直分布特征表现为: $PV1$ 的垂直分布与位涡的垂直分布非常相似 (图略), 但 $PV1$ 的等位涡线下伸比 PV 更低 (更快)。 $PV2$ 的垂直分布与 $PV1$ 不同。20 日 02 时, 在 500hPa 高空, 对应沙尘暴区域 (110°E 附近) 有一个 $PV2$ 的负值中心, 强度为 -0.3PVU。到 14 时, $PV2$ 的负值中心东移, 强度基本未变, 但 -0.2PVU 线明显下伸, 与低层 $PV2$ 的负值区打通相连。20 时 (图 4b), $PV2$ 中心强度增强到 -0.4PVU。 $PV2$ 负值中心的增强说明中低层大气斜压性加强, 利于地面气旋的发展和垂直运动的加强。上述分析表明, 500hPa $PV2$ 负值中心与地面强沙尘暴中心基本一致, 且 $PV2$ 的加强与沙尘暴的发展也有很好的对应关系, 它对沙尘暴的落区和爆发时间能起到一定的预示作用。

4 蒙古高原在华北沙尘暴形成中的作用的数值模拟

4.1 试验方案

控制试验使用真实地形并包含“全”物理过程, 地形试验将模式地形减为真实地形的 1/5, 即降到 200~300m 左右。以 3 月 19 日 20 时为初始时刻, 采用 T106 分析场和实况资料, 积分 24 小时, 对比两种地形方案下模式的高空风场和地面气旋中

心的变化。

4.2 试验结果对比分析

4.2.1 地面气压场对比

由模式积分 12 小时、18 小时和 24 小时的地面气压场的对比试验结果(图 5) 可以看到,三个时次蒙古气旋中心所在处的差值均为负值,而且随着气旋的加强其差值变大,说明地形降低以后气旋中心气压值升高。由此可以说明蒙古高原的存在有利于气旋的发展,气旋强度越强其影响越明显。

4.2.2 850hPa 高空风场对比

由模式积分 12 小时、18 小时、24 小时的 850hPa 高空风 u 分量对比试验结果(图略)可以看出,三个时次中,从低涡北侧到东北侧的差值均为负值,而低涡南侧到西南侧的差值均为正值,且随着低涡的加强其差值变大。说明地形高度降低后,低涡南侧的偏西风、北侧的偏东风都减弱。

同样,由 v 分量对比试验结果(图略)也可看出,三个时次中,低涡北侧的差值均为负值,低涡南侧的差值均为正值,随着低涡的加强其差值也变大。即低涡南侧的偏南风、北侧的偏北风都减弱。

以上分析表明,蒙古高原的存在有利于高空低涡和地面气旋的发展,涡旋强度越强其影响越明显。所以,蒙古高原的存在利于华北地区沙尘暴的发生发展。

5 结论

通过对“2002.3.20”强沙尘暴天气过程的模拟和诊断分析,我们对产生本次沙尘暴形成的物理机制有了一定的了解,并进行归纳总结。

(1) 斜压槽和蒙古气旋是触发这次强沙尘暴天气过程的重要的天气系统。斜压槽引起高低层的辐散(辐合),促使蒙古气旋强烈发展和冷锋加强,导致垂直上升(下沉)运动的发展。

(2) 高空急流的加强,促使其下部 Ferrel 环流的发展。Ferrel 环流起到了高层动量下传和加强低层锋区的作用。高空急流及其下部的 Ferrel 环流对沙尘暴的发生发展起到了重要作用。

(3) 在沙尘暴期间,高层位涡下传现象十分明显。500hPa $PV2$ 负值中心与地面强沙尘暴中心基本一致,它对沙尘暴的落区和爆发时间能起到一定的预示作用。

(4) 地形对比试验结果表明,蒙古高原的存在有利于高空低涡和地面气旋的发展,

涡旋强度越强其影响越明显。蒙古高原的存在利于华北地区沙尘暴的发生发展。

(5) 利用 MM5 模式能比较准确地模拟出高空和地面的天气系统及其演变情况,说明模式对预报沙尘暴天气的发生发展具有较好的指导作用。

参考文献

- 1 王式功, 杨德保, 金炯等. 我国西北地区沙尘暴时空分布及其成因分析 [A], 中国科协第二届青年学术年会论文集(资源与环境科学分册)[C], 北京, 中国科学技术出版社, 1995, 364~ 370。
- 2 王劲松, 李耀辉等. “4. 12” 沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析 [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, 2002, 45~55。
- 3 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。
- 4 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文等. 天气学原理与方法, 北京, 气象出版社, 2000, 123~124。
- 5 徐建芬, 孙兰东, 徐东培等. 西北地区一次斜压槽引发的强沙尘暴研究. 甘肃气象, 2000, 19 (2): 40~44。
- 6 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法, 北京, 科学出版社, 1989, 177~180。

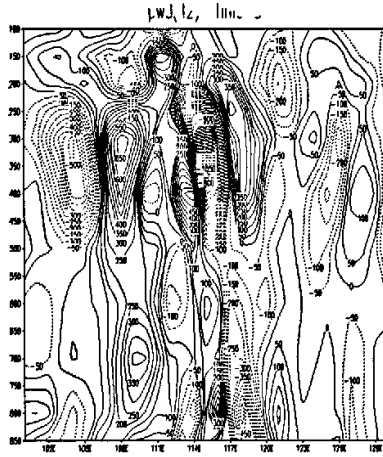


图 1 20 日 02 时涡度平流沿 42° N 的经度-高度垂直剖面图(单位: $10^{-4} s^{-2}$)

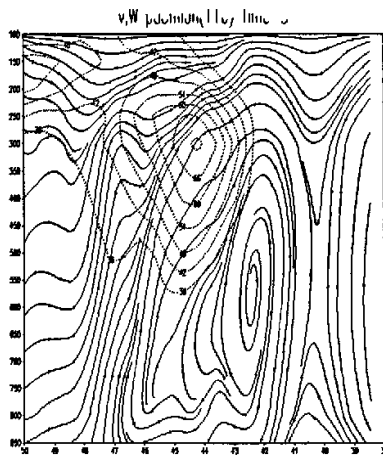


图 2 20 日 14 时沿 117° E 的经向垂直环流分布图(虚线为全风速, 即高空急流, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

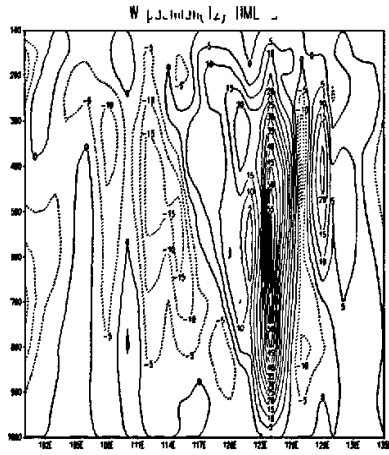


图3 20日20时垂直速度沿42°N的经度-高度垂直剖面图(单位: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

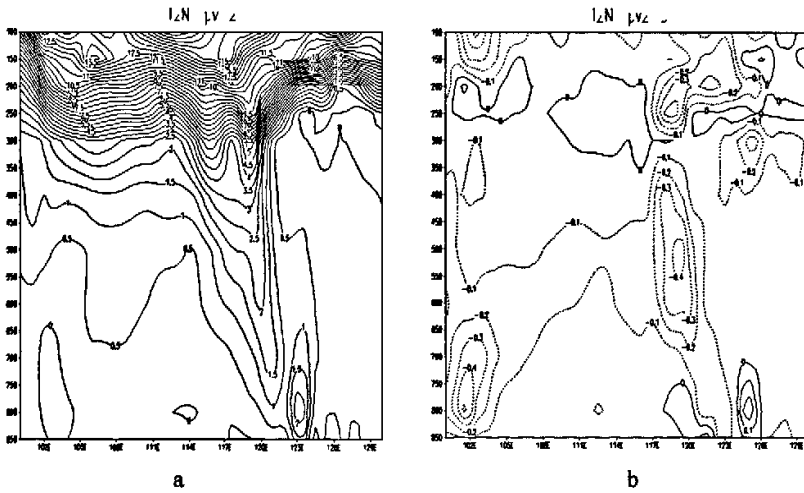


图4 20日20时位涡(a)和位涡斜压项(b)沿42°N的经度-高度垂直剖面图

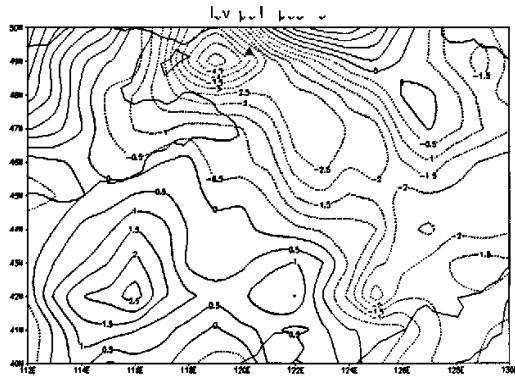


图 5 20 日 20 时控制试验减地形试验地面气压的差值场 (▲为气旋中心位置)