

# 北京地区沙尘暴天气分析及数值模拟

张小玲 王迎春

(北京市气象科学研究所,北京 100089)

**摘 要** 北京地区春季是风沙天气的多发季节,2000年春季冷空气活动频繁,我国西北、华北多次出现大范围的沙尘暴天气,给人民的生活生产、交通运输及国民经济都带来很大的危害,而且沙尘天气造成的空气污染严重影响人们的身体健康。本文主要对2000年4月6日沙尘暴过程进行了天气分析,并用非流体静力中尺度数值模式进行预报和模拟研究。结果表明:此次沙尘暴天气是高空小槽沿大槽后强西北气流东移时发展加深,引导一次强冷空气南下所致;数值模式对沙尘暴到达北京地区的时间、地面风速、风向的突变都做出了很好的预报;沙尘暴发生时中低空有很强的垂直上升运动和正涡度中心,其形成、发展和移动与沙尘暴的过境时间和移动方向基本一致。同时利用空气质点轨迹模拟与分析方法进行了沙尘暴过程空气质点轨迹分析,所得结果与实况及卫星监测轨迹基本一致。

**关键词** 沙尘暴 天气分析 数值模拟 轨迹分析

## 引 言

沙尘暴天气是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和某种天气系统发展所诱发的一种小概率、大危害的灾害性天气。沙尘暴天气除了造成直接的危害和损失外,由于它所引发的气候学效应对大气能见度、大气光学特性、地气辐射平衡等的影响,导致的自然生态环境的破坏,人们愈来愈认识到沙尘暴是不可忽视的大气和生态环境问题之一。

国外对沙尘暴的研究起步较早,从20世纪30年代,就开始了沙尘暴分布、形成、监测和对策的系统研究,70年代以来,对撒哈拉沙尘暴天气的研究更加深入和全面。80年代以来,Brazel<sup>[1]</sup>对发生在美国亚利桑那州的沙尘暴天气类型作了统计分类。Jauregui<sup>[2]</sup>对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究,并指出3月份沙尘暴出现的频率最大。Ott, S. T. 和 A. Ott<sup>[3]</sup>曾利用卫星和GATE资料对撒哈拉沙尘暴的爆发做过分析。Karyampudi 和 Carlson<sup>[4]</sup>以及 Westphal<sup>[5]</sup>进一步发展了对撒哈拉沙尘暴的三维数值模拟研究。美国、日本、韩国等国家都在进行有关沙尘的监测和预报技术研究。国内对沙尘暴的研究始于20世纪70年代末,徐国昌<sup>[6]</sup>、陈敏连<sup>[7]</sup>、程麟生<sup>[8]</sup>、刘春涛<sup>[9]</sup>等先后对发生在我国西北地区的几次典型特强沙尘暴个例做了分析和数值模拟研究。通过对西北地区沙尘暴的成因,沙尘暴的监测、预报方法以及沙尘暴天气的预警服务系统等方面的分析和研究,由方宗义、朱福康等编写了《中国沙尘暴研究》一书。我国从1993年开始研究使用气象卫星监测沙尘暴,目前初步掌握了对沙尘暴的监测方法,并对2000年部分沙尘暴发生、发展和移动进行了实时监测。2000年入春以来,我国北方地区天气晴朗、光照充足、气温偏高,冷空气活动十分频繁,风沙天气多次出现。其出现的时间之长、频率之高、范围之广、强度之强,为近50年来同期历史罕见。给人民的生活生产、交通运输及国民经济都带来很大的危害,而且沙尘天气造成的大气污染严重影响人们的身体健康。

北京地处华北平原北部,燕山山脉自西向东,太行山脉自南向北构成环状,屏障在北京的西部和北部。北京地区春季是风沙天气的多发季节,据统计,1971~1998年,北京地区沙尘暴发生25次,扬尘355次,浮尘111次。2000年3~4月先后出现了8次沙尘天气,其中,4月6日的沙尘暴天气是北京近十年来强度最大的一次,这次过程影响到华北、东北及江淮、江南地区,并波及到朝鲜半岛及日本本土。以北京市而言,4月6日09时后风速突然由1~2级增至6~7级,最大时风力达8级,能见度也由6km多降到2km左右,小于1km(沙尘暴)也出现了2h以上,局地达6h以上(南苑机场),能见度最小时只有五六百米。造成人行困难,行车发生追尾,出入北京地区的航班取消、推迟、改降、备降达几十架。由于风大,使高空作业人员坠落、广告牌掉落,造成严重的危害和经济损失。同时这次沙尘天气造成北京地区空气严重污染,市环保监测站在4月6日10时监测的定陵空气沙尘浓度峰值超过 $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙尘天气频繁出现,引起了党中央、国务院和各级政府的高度重视。研究沙尘天气形成的机制,做好沙尘天气的预报、预警,进而为综合治理沙尘天气更好地服务,就为气象部门提出了更高的要求。因此,有必要对沙尘天气进行进一步地分析、研究,找出解决沙尘天气预报的最佳对策。本文主要对2000年4月6日出现的大范围沙尘暴过程进行天气学分析和数值模拟研究,同时对2000年春季两次和2001年1月份的两次沙尘天气进行轨迹模拟研究,以期研究影响北京地区的沙尘天气提供参考。

## 1 天气形势分析

2000年4月5日08时500hPa天气图(图1)欧亚形势为一槽一脊型,脊顶位于乌拉尔山附近,脊线呈西北-东南向,槽底位于沈阳、济南、郑州一线。俄罗斯、中西伯利亚、蒙古国及我国北方大部分地区处在槽后脊前强西北气流区。另在贝加尔湖西北部有一小槽,槽线呈NNE-SSW向。小槽后有一很强的温度槽,中心温度值为 $-44^{\circ}\text{C}$ ,此小槽发展加深,并沿大槽后、脊前强西北气流东南下。到4月6日08时的500hPa小槽已发展为较大的槽,槽线位于海拉尔—赤峰—太原,温度槽已基本赶上高度槽(图略)。700和850hPa槽线已位于乌兰浩特—北京—西安一线,槽后配合很强的温度槽,此时冷空气已影响到华北北部。地面形势为4月5日14时(图2),蒙古高压位于萨彦岭一带,中心气压1039hPa,蒙古气旋位于乌兰巴托以东。冷锋位于乌兰巴托—哈密,锋前3h变压为 $-4.6\text{hPa}$ ,锋后为 $+5.8\text{hPa}$ 。锋后蒙古国境内已有

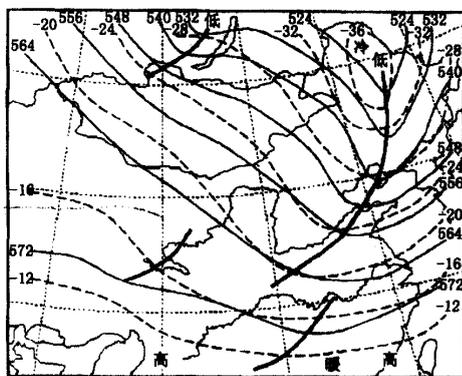


图1 2000年4月5日08时500hPa天气形势

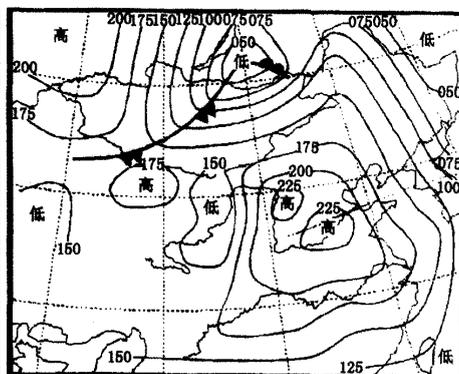


图2 2000年4月5日14时地面天气形势

大片沙尘暴天气。4月6日08时,蒙古高压南压至河套以北中蒙边境,蒙古气旋成熟后移入东北,冷锋位于乌兰浩特—北京—太原一线,沙尘暴天气已影响到北京。14时蒙古高压南压到内蒙古中部,冷锋此时已位于沈阳—济南—郑州一线,沙尘暴天气波及华北南部。

因此,从天气形势来看,此次沙尘暴天气是高空小槽沿大槽后强西北气流东移时发展加深,引导一次强冷空气南下所致。

## 2 沙尘天气数值预报特点和数值试验

数值预报产品的广泛使用为天气预报提供了较客观的预报依据。欧洲中心的地面和500hPa的形势预报从环流形势上为沙尘天气的预报提供了依据;日本的高低空数值预报产品和诊断量为沙尘天气预报提供了较好的预报和诊断场,但是这些预报产品提供的时间分辨率和空间分辨率较粗。非静力中尺度数值预报模式(MM5)在北京地区这几年的预报经验表明,该模式具有较好的稳定性和可靠性,能够提供高时空分辨率的预报结果,而且效果也是可喜的。模式对北京地区的降水预报,温度预报和风向、风速的预报都取得了较好的效果,对2000年春季的几次沙尘天气也做出了较好地预报,模式预报的风速、风向的变化和大风的持续时间与实况基本一致,为预报员和各种特殊专业气象服务提供了很好的参考依据。

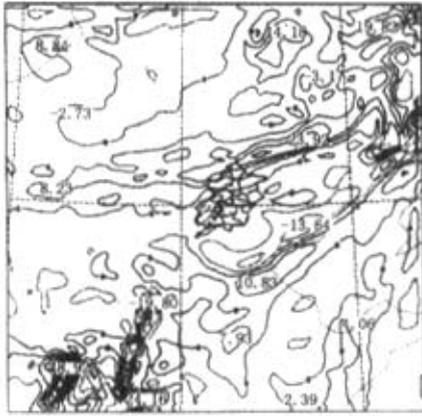
### 2.1 非静力中尺度数值模式(MM5)及试验设计

在计算机资源许可的条件下,我们引进了美国PSU/NCAR发展的非流体静力中尺度模式MM5 V2版,在清华同方集群计算机Tan Suo108和SGI Origin2000上建立了一天运行两次的中尺度数值预报业务系统。模式计算具体设计为:采用二重水平套网格非静力平衡动力框架,预报区域中心为(40°N,116°E)。水平格距分别为45和15km,水平网格数分别为101×101和103×103,垂直方向为 $\sigma$ 坐标,取23层。时间积分步长取120s,预报时效为36h,每3小时输出一次。主要物理过程为:GRELL积云对流参数化方案、BLACKADAR高分辨PBL方案、DUDHIA云辐射方案。采用流入流出侧边界条件,初估场资料采用了国家气象中心T106L19模式的分析及预报结果,实时观测资料则包括常规地面、探空资料及北京和周边地区地面加密观测资料。

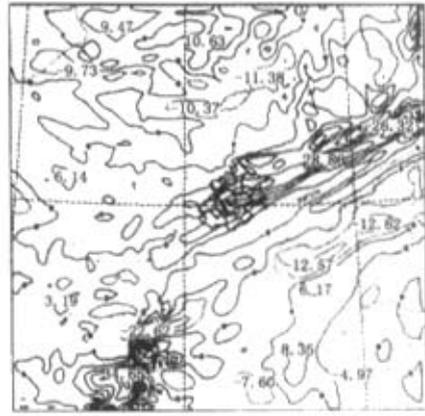
### 2.2 风场和中尺度系统模拟

中尺度模式2000年4月5日08时和20时的预报(时效为36h)均显示出有一较强冷锋伴随西北大风现象在6日早晨(8点左右)到达北京,6日11时北京地区整个出现西北大风天气,之后进一步加强并持续较长时间,期间表现为一致的偏北气流,预报的地面最大风速达12m/s。图3为4月5日08时预报6日08时和11时的地面风场,这些气象要素和天气系统的预报与实况基本一致,与沙尘暴到达北京地区的时间和持续时间基本一致(图略)。图4为北京城区自动站气象要素实况图。同时,沙尘过程期间中低空有较强的垂直上升运动,图5为模拟的垂直速度 $W$ 的东西向剖面图,可以看出,与沙尘暴相伴的垂直上升运动区逐渐移向北京,6日08时垂直速度中心强度达 $70 \times 10^{-2} \text{m/s}$ (图5(b)),风沙天气已接近北京城区(沙河出现浮尘)。与此同时,在700hPa等压面上有一正涡度区向北京移动(图6(a)),6日11时此正涡度区进一步发展加强并已达到北京,正涡度中心强度为 $25.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (图6(b)),这种低空辐合强上升运动有助于强风把地面沙尘吹起,并随高空气流向下游输送,从而造成大范围的沙尘天气。说明沙尘天气是由大风、中尺度涡旋结构、强的垂直上升运动以及有利的下垫面条件共同作用的结果。也说明中尺度数值预报模式对灾害性的强天气过程有较好的模拟和预报能力,可为预报员和决策层提供参考。





(a) 6日 08时



(b) 6日 11时

图 6 700hPa 等压面上涡度场结构(单位: $1 \times 10^{-5}/s$ )

### 2.3 轨迹模拟与分析

用中尺度模式对 2000 年 4 月 6 日北京地区出现的沙尘天气的空气质点轨迹进行模拟分析,可以看出,4 月 6 日北京地区 100 和 1000m 高度空气质点路径呈西北路径(图 7),沿途经过地区主要是蒙古国中部、内蒙古中部及河北北部地区。由于途经地区前期干旱少雨、植被稀少、土壤疏松,因而在强风条件下极易产生沙尘天气。另外,对 2000 年 3 月 27 日的沙尘天气也进行了空气质点轨迹模拟分析,如图 8 所示。可以看出 3 月 27 日到达北京的空气质点是沿西北偏北路径移动的。这与卫星监测和天气系统分析结果是一致的。进一步分析这两次过程对北京地区所造成的影响,发现源地和路径不同对北京地区造成的影响也有差异。

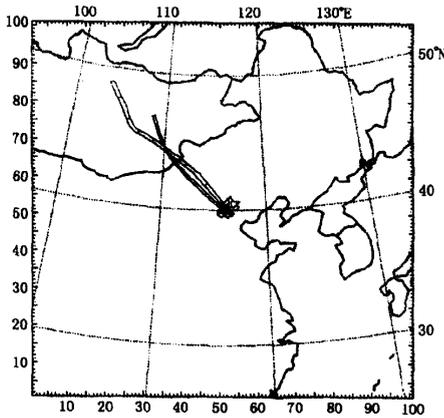


图 7 4 月 6 日 14 时北京 100 和 1000m 高度 24h 空气质点后向轨迹

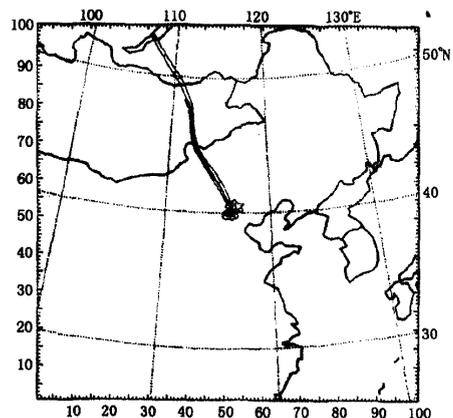


图 8 3 月 27 日 20 时北京 100 和 1000m 高度 24h 空气质点后向轨迹

在此,我们也对 2001 年 1 月 1 日和 1 月 31 日出现的风沙天气进行了轨迹模拟分析。由图

9 和图 10 可见,这两次过程冷空气和空气质点路径基本相似(后者稍偏北),虽然上游地区都发生了不同程度的沙尘暴天气(内蒙古、河西走廊一带部分地区出现沙尘暴天气),但对北京地区造成的影响有较大的差异。2001 年 1 月 1 日北京出现了扬沙、浮尘天气,部分自动站观测到大于 20m/s 的风速。1 月 31 日北京也出现了大于 20m/s 的风速,但未出现沙尘天气。分析其原因,除了两次过程的冷空气路径略有差异外,地表状况和 1 月份的降雪有很重要的作用。据统计,1 月份蒙古国东部、内蒙古东部、华北北部出现大范围的降水过程(降雪量为常年的 3~5 倍),积雪较深,掩盖了沙源下垫面。而 2001 年 1 月 1 日以前,2000 年 12 月份蒙古国中西部、内蒙古中西部、华北北部降水量较少。这充分说明了下垫面(沙源、干燥土壤)对沙尘暴贡献的重要性。

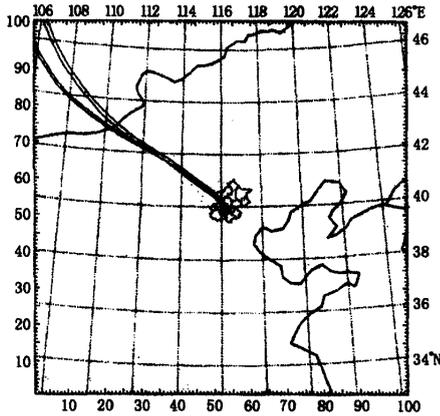


图 9 2001 年 1 月 1 日 14 时北京 1000 和 1000m 高度 24h 空气质点后向轨迹

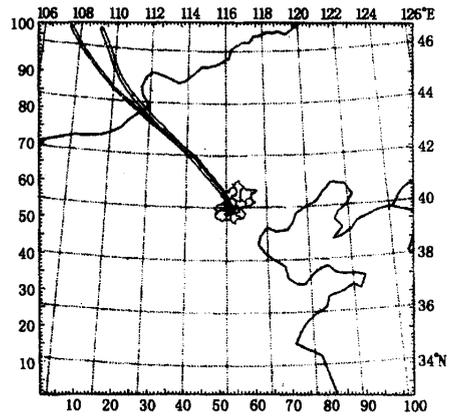


图 10 2001 年 1 月 31 日 14 时北京 1000 和 1000m 高度 24h 空气质点后向轨迹

### 3 总结与讨论

从以上分析可以得出如下几点结论:

(1) 从天气形势来看,2000 年 4 月 6 日影响北京的沙尘暴天气是高空小槽沿大槽后强西北气流东移时发展加深,引导一次强冷空气南下所致。

(2) 中尺度数值预报模式对此次沙尘暴过程的中尺度系统和垂直上升运动以及到达北京地区的时间、风速、风向的突变都做出了很好的模拟,可作为沙尘暴发生发展机理研究的一种方法和预报参考依据。

(3) 用中尺度模式和轨迹分析模式模拟的沙尘过程空气质点路径,结合卫星监测图像,可以较好地演示沙尘的发生源地、移动方向,对预报和分析有重要作用。

(4) 沙尘暴的形成和发展是受综合因素影响的,除了强风和强的上升运动外,地表状况也是很重要的因子。

尽管对沙尘暴的研究和预报技术与方法已取得了很大进展和经验,但是,目前对沙尘天气中尺度系统的监测和沙尘天气形成机理、沙尘的来源和属性研究仍比较薄弱。因此,要最大限度地减少沙尘天气造成的损失,认识沙尘天气的形成机制,首先必须提高和建立沙尘天气的监

测手段和监测系统,深入研究沙尘天气发生发展的机制,分析沙尘粒子的时空分布,在此基础上研究沙尘天气的预测、预警方法并建立预警系统,从而提高沙尘天气的实时监测和短期预报、预警能力。在沙尘天气的监测、预警方面,要重视和利用新一代监测系统(气象卫星、天气雷达、风廓线、自动站),针对地方特点建立沙尘天气的预报概念模型和数值预报系统,发展沙尘抬升输送模式,在中尺度数值预报模式中耦合一个沙尘的抬升、输送模式,来模拟和预报沙尘天气过程中沙尘的形成、发展和演变过程以及沙尘浓度的变化情况,结合空气质点轨迹分析,分析沙尘形成的源地和传输过程。这样同时考虑大的环流形势、中尺度系统、植被状况、土壤水分等因素,做好沙尘暴的综合分析、预报、预警和对外服务。

## 参 考 文 献

- [1] Brazel, A. J. and W. C. Nicking, The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona, *J. Climatology*, 1986, **6**(3):255-275
- [2] Jauregui, E., The dust storms of Mexico City, *Inter. J. Climatology*, 1989, **9**(2):169-180
- [3] Ott, S. T. and A. Ott, Analysis of a Trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data, *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**(8):1832-1850
- [4] Karyampudi, V. M. and T. N. Carlson, Analysis and numerical simulations of the Saharan air layer and its effect on easterly wave disturbances, *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**:3102-3106
- [5] Westphal, D. L., O. B. Toon and T. N. Carlson, A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, *J. Geophys. Res.*, 1987, **192**:3027-3049
- [6] 徐国昌、陈敏连、吴国雄, 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析, *气象学报*, 1979, **37**(4):26-35
- [7] 陈敏连、郭清台、徐建芬等, 黑风暴天气的研究和探讨, *甘肃气象*, 1993, **11**(3):16-27
- [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, *应用气象学报*, 1996, **7**:385-395
- [9] 刘春涛、程麟生, 黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验, *气象学报*, 1997, **55**:726-739