

# 中国北方沙尘天气气象场的数值模拟

王雁鹏, 陈 岩, 殷惠民, 李玉武

(国家环境分析测试中心, 北京 100029)

**摘 要:** 利用 PSU/NCAR 的非静力中尺度气象预报模式 MM5 对北方地区气象场进行模拟, 通过对 2001 年 3 月 21 日发生并影响北京地区的沙尘过程的数值实验表明, 该模式能够较好地模拟和预测北方沙尘天气的时空演变特征。低值系统以及其低层辐合、高层辐散的垂直结构, 可以产生很强的上升气流, 形成地面起沙和沙尘上扬, 而强风是沙尘输送的动力条件。利用轨迹模式对空气质点轨迹进行了模拟研究, 可以较好地反映沙尘的发生源区和输送路径, 与卫星监测和天气系统分析是一致的。并编写软件用于演示气象场的动态效果。

**关键词:** 沙尘天气; 气象场; 数值模拟

**中图分类号:** P456.7

**文献标识码:** A

## 引 言

沙尘天气是中国北方地区常见的一种自然现象, 它的发生主要取决于 2 个方面的因素: 1 是地表有大量的松散干燥的沙尘, 2 是能够形成强劲持久风力的气象条件。风向、风速、气压、温度等气象条件的变化直接影响沙尘的输送、空间分布和沉降, 也是影响区域空气质量的主要因素。因此, 气象场的模拟在研究沙尘暴的发生、输送、沉降等各方面具有重要的作用。本文的目的在于利用中尺度数值模式 MM5 对形成沙尘暴的气象场进行准确模拟。模拟结果将结合沙尘源排放模型、地表资料、初始边界条件引入空气质量模型 CAM<sub>x</sub> 进行沙尘输送过程模拟 (另文讨论), 进而掌握沙尘暴的演变和移动特征, 最终实现对北京地区沙尘天气的空气质量状况进行预报。本文以 2001 年 3 月 21 日影响北京地区的沙尘暴事件为例, 对气象场的模拟结果与实况进行比较, 并对天气特征进行分析。

中尺度非静力气象模式 MM5 是由美国宾州大学 (PSU) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合开发的中尺度气象预报模式, 它包括地形资料处理、地面资料处理、探空资料处理、客观分析、初始化、数值预报、后处理等模块。该模式具有非静力平衡的动力框架, 具有云物理和行星边界层等多种物理过程, 并有多重

嵌套能力, 还可以利用 4 维资料同化技术限制模式误差的增长, 提高预报的效果。沙尘天气数值模式研究和模式试验始于 20 世纪 80 年代对撒哈拉沙漠沙尘暴天气的数值模拟<sup>[1]</sup>。国内对沙尘起沙和输送过程的模拟是在 20 世纪 90 年代西北地区特强沙尘暴造成严重损失和巨大影响后得到重视和发展。早期的研究多数基于中尺度静力平衡气象模式和沙尘起沙模式的单向嵌套或耦合, 利用相对简单的起沙方案基本研究了强沙尘暴的形成和输送过程<sup>[2]</sup>、沙尘气溶胶的辐散效应<sup>[3]</sup>以及沙尘长距离输送过程<sup>[4]</sup>。在非静力平衡中尺度气象模式的发展和高性能计算机以及并行数值计算方法的推动下, 沙尘起沙和输送的数值模式以非静力平衡气象模式和多档沙尘粒径谱为主来模拟研究沙尘天气过程<sup>[5]</sup>。目前 MM5 被广泛应用于国内外沙尘天气气象场的数值模拟。南威尔士大学利用 MM5 结合非参数化起沙模式, 对澳大利亚沙尘暴进行了成功的模拟和预测<sup>[6]</sup>, MM5 在中国以及东亚地区的沙尘过程模拟中也得到了广泛的应用<sup>[5,7]</sup>。但是, 由于沙尘过程的复杂性, 不可能用模式把所有的过程全描述准确, 仍然有很多过程需要以参数化的形式表示。本文选用 MM5 模拟中国北方地区沙尘暴发生期间的各种气象要素场, 对气象特征及其变化规律进行研究, 并将模拟结果作为输入数据驱动空气质量模式的运行。

收稿日期: 2007 - 06 - 26; 改回日期: 2007 - 09 - 11

基金项目: 国家环境保护总局科技发展计划项目 (2002 - Z - 07) 资助。

作者简介: 王雁鹏 (1970 - ), 男, 工程师, 从事天气颗粒物和激光雷达监测研究。E - mail: xinpost@sina.com

## 1 模拟区域和模拟时段的选取

### 1.1 输送路线的选取

本文重点研究沙尘天气对北京的影响,根据国家环保总局地面监测网络数据以及卫星图片资料,确定了北路和西北路2条沙尘输送路线。北路输送路线从二连浩特、浑善达克沙地西部开始,经四子王旗、化德、张北、张家口、宣化,到达北京。西北输送路线由阿拉善的中蒙边境、乌拉特中后旗、河西走廊起,经贺兰山、毛乌素沙地、乌兰布和沙漠、呼和浩特、大同、张家口,到达北京。

### 1.2 模拟区域的选取

根据沙尘暴的源区、输送路线所涉及的地理区域,本模拟工作选取长方形区域为研究范围,该区域的西侧到达了新疆的东部地区,东边包括了朝鲜半岛,北部包括蒙古的绝大部分地区,向南则到达了长江流域。模拟区域包括了北部、西北部源区以及北路、西北路输送路线途经的各个地区。对这一区域的模拟能够完全反应出上述2个源区和输送路线上沙尘暴的发生、输送、沉降在空间上的分布和变化情况。

模拟区域采用 Lambert 投影坐标,2条真纬度分别是 30°N 和 60°N,坐标原点位于 40°N、110°E,模拟网格的大小为 36 km × 36 km,东西向网格数为 99,南北向网格数为 63,模拟区域范围为 3 564 km × 2 268 km。

### 1.3 模拟时段的选取

选取 3月16日 00时至 26日 00时段内包括北路、西北路在内的整个模拟范围内的沙尘暴事件进行三维空间的数值模拟研究,此次沙尘暴是影响我国大部分地区的典型沙尘暴天气过程。受贝加尔湖南部蒙古低涡影响,21日 02时蒙古国阿尔拜海赖发生沙尘暴,08时向东南移至沙音山德,14时受大气稳定度日变化及气旋发展影响,形成大规模风沙

天气,锡林浩特、朱日和发生沙尘暴,呼和浩特、北京、延安、济南等地出现大范围扬沙天气。这时气旋中心已移至彰武附近,发展为强大的东北气旋。20时,随冷锋东南移动到鲁新,承德发生沙尘暴,天津、太原、北京等地发生扬沙天气。22日 02时冷锋向东南方向移至丹东,大连、青岛、济南发生扬沙天气,首尔、釜山、福冈、屋久岛发生浮尘天气。本文以 3月 21日 02时和 14时为例分析模拟区域内气压场和高度场的模拟结果。

## 2 结果和讨论

### 2.1 气压场模拟结果

3月 21日 02时海平面气压场形势表明在蒙古境内大约 45°N、110°E 附近存在低压区,低值系统中心气压为 991 hPa (图 1);在 850 hPa 的高度场 (图 2) 对这一低压区同样有所反应,低值中心与地面情况一致。在上述低压区的西偏北地区 (大约 48°N、98°E 附近),地面气压场存在一个高压区,中心气压是 1 021 hPa。12 h 后 (图 3),地面的低压中心已经移动到内蒙古的赤峰地区,而上述高压中心也已移至与内蒙古锡林郭勒盟临接的蒙古地区;3月 21日 14时 850 hPa 的高度场见图 4。

低值中心所伴随的低层辐合高层辐散的垂直结构,容易产生很强的上升气流,致使途经地区地面起沙和沙尘上扬,形成沙尘天气<sup>[8]</sup>。可以看到,低值系统由蒙古东部经二连浩特地区入境,途经北部沙尘源区,沿北路输送路线移动。因此,上述源区和路线上的沙尘源均会对这次沙尘暴事件产生不同程度的贡献和影响。

另外,从气压场模拟结果与实况的对比来看,模拟得到的气压场能够反映出上述演变特征,与实际气压场吻合较好。

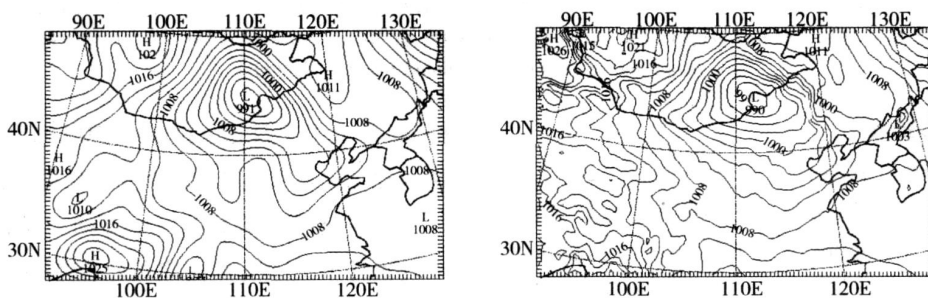


图 1 2001年 3月 21日 02时地面气压场 (单位: hPa;左图:客观分析结果;右图:MM5模拟结果)

Fig 1 Surface air pressure field at 02:00 on March 21, 2001 (The left for observed result, and the right for simulated result by MM5)

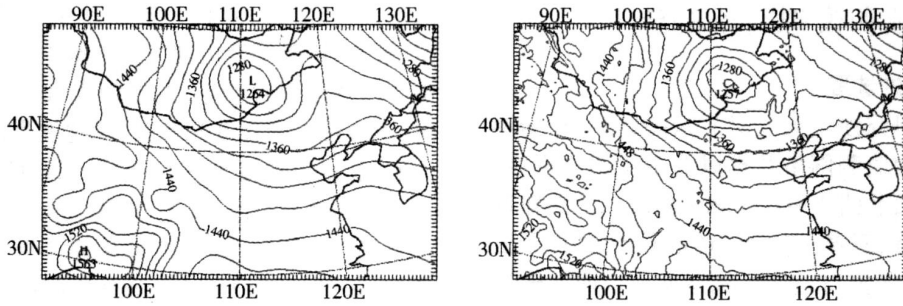


图2 2001年3月21日02时850 hPa高度场(单位:m;左图:客观分析结果;右图:MM5模拟结果)  
 Fig. 2 The 850 hPa geopotential height field at 02:00 on March 21, 2001 (The left for observed result and the right for simulated result by MM5)

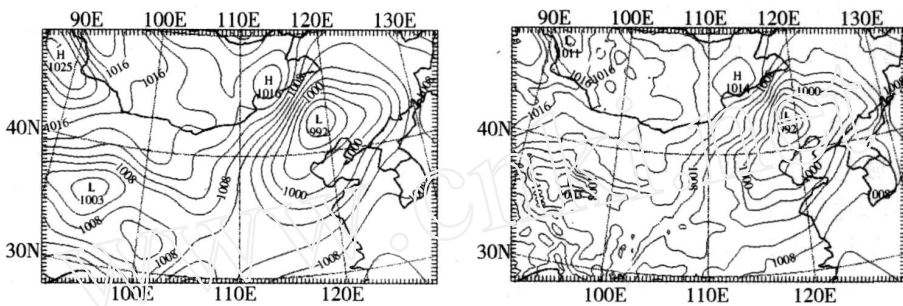


图3 2001年3月21日14时地面气压场(单位:hPa;左图:客观分析结果;右图:MM5模拟结果)  
 Fig. 3 Surface air pressure field at 14:00 on March 21, 2001 (The left for observed result and the right for simulated result by MM5)

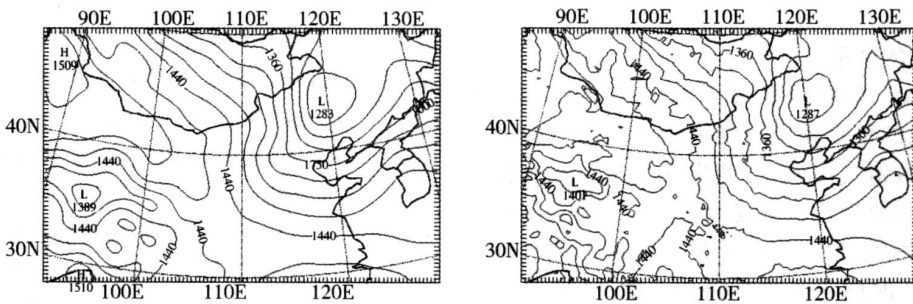


图4 2001年3月21日14时850 hPa高度场(单位:m;左图:客观分析结果;右图:MM5模拟结果)  
 Fig. 4 The 850 hPa geopotential height field at 14:00 on March 21, 2001 (The left for observed result and the right for simulated result by MM5)

2.2 风场模拟结果

由图 5至图 8(风速大小由箭头的长度表示,风向由箭头的方向表示)可见,在模拟区域北部,由于存在着较强的气压梯度,位于前述低压区和高压区之间的地区是模拟区域的大风区,这一地区 02时的地面最大风速为 13.5 m/s,出现在蒙古中部。14时的地面最大风速则为 19.9 m/s,位于内蒙古的锡林郭勒盟,在浑善达克沙地一带。与 02时的情况相比,内蒙古中部和华北北部 14时的地面风速普遍增

强,而且主要受西北风控制。850 hPa等压面上的风场与地面风场具有类似的特征,并且风速更大。

强风是沙尘暴发生的主要动力条件,在强对流天气条件下被上扬到高空的沙尘颗粒,在大风的输送作用下会影响下风地区的空气质量。上述风场特征也进一步促进了 21日沙尘暴事件的发生和发展。

对比模拟结果和实际情况,可以看到模拟得到的风场基本上反应出了实际风场的时空特征。

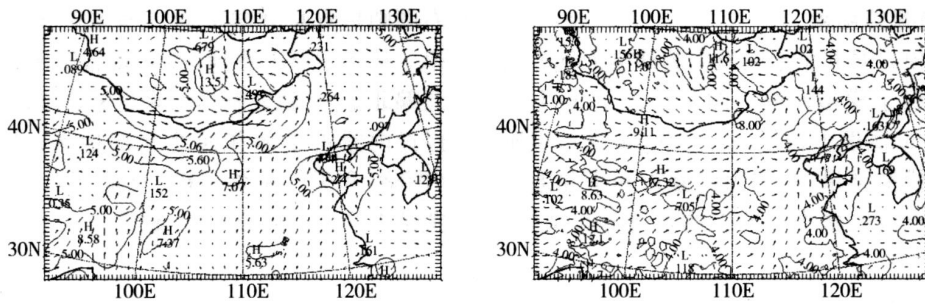


图 5 2001 年 3 月 21 日 02 时地面风场(单位:m/s;左图:客观分析结果;右图:MM5 模拟结果)

Fig. 5 Surface wind field at 02:00 on March 21, 2001

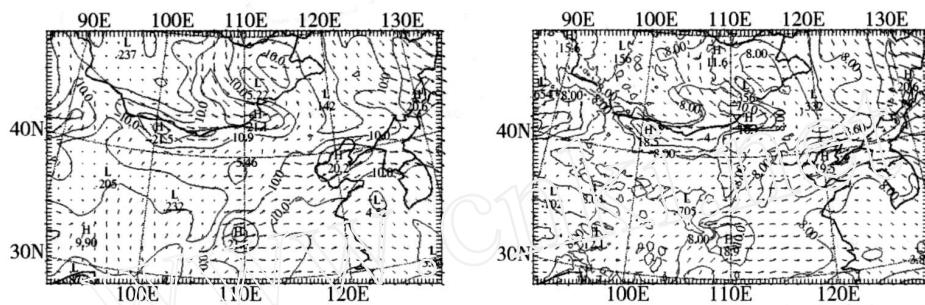


图 6 2001 年 3 月 21 日 02 时 850 hPa 风场(单位:m/s;左图:客观分析结果;右图:MM5 模拟结果)

Fig. 6 The 850 hPa wind field at 02:00 on March 21, 2001

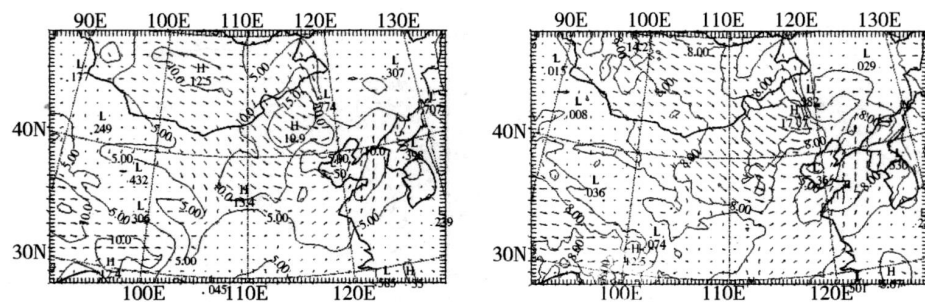


图 7 2001 年 3 月 21 日 14 时地面风场(单位:m/s;左图:客观分析结果;右图:MM5 模拟结果)

Fig. 7 Surface wind field at 14:00 on March 21, 2001

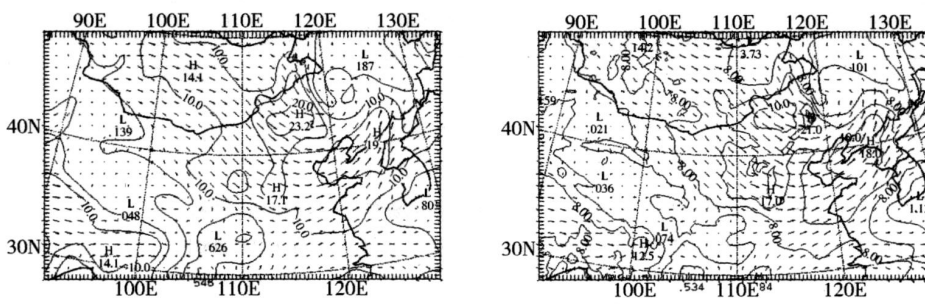


图 8 2001 年 3 月 21 日 14 时 850 hPa 风场(单位:m/s;左图:客观分析结果;右图:MM5 模拟结果)

Fig. 8 The 850 hPa wind field at 14:00 on March 21, 2001

### 2.3 输送轨迹模拟结果

利用轨迹模式对北京地区发生的沙尘天气的空气质点轨迹进行了模拟研究。图 9 给出了 3 月 21 日 14 时在 100 m 高度上粒径为 6 ~ 10 μm 的沙尘质点的后向轨迹模拟结果,左图为内蒙古和华北地区一些主要监测点位在水平方向上的轨迹分布情况,

右图则是垂直方向上北京地区后向轨迹的模拟结果。从图中可以看到,沙尘质点轨迹路径基本为西北偏北方向,轨迹基本均来自蒙古境内,大多数轨迹经过内蒙古中部和河北北部地区,这与卫星监测(图略)和天气系统分析(见前面对气压场、风场模拟结果的分析部分)是一致的。

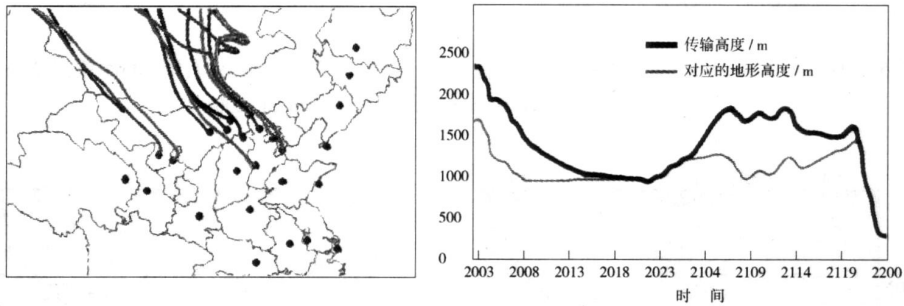


图 9 2001 年 3 月 21 日 14 时内蒙古和华北地区沙尘质点后向轨迹模拟结果

Fig 9 Simulated result of backward trajectory of sand - dust particle in innerMongolia and North China at 14: 00 on March 21, 2001

### 2.4 气象场模拟结果计算机动态显示

为了更加生动地显示模拟结果,实现结果表达清晰明朗和一目了然,本研究以 Microsoft Visual

Basic 6, MapEngine Gis, Microsoft Office 2000 等为工具自行开发研制了一套计算机图形显示系统。下面是高度场的部分动态显示效果图(图 10)。

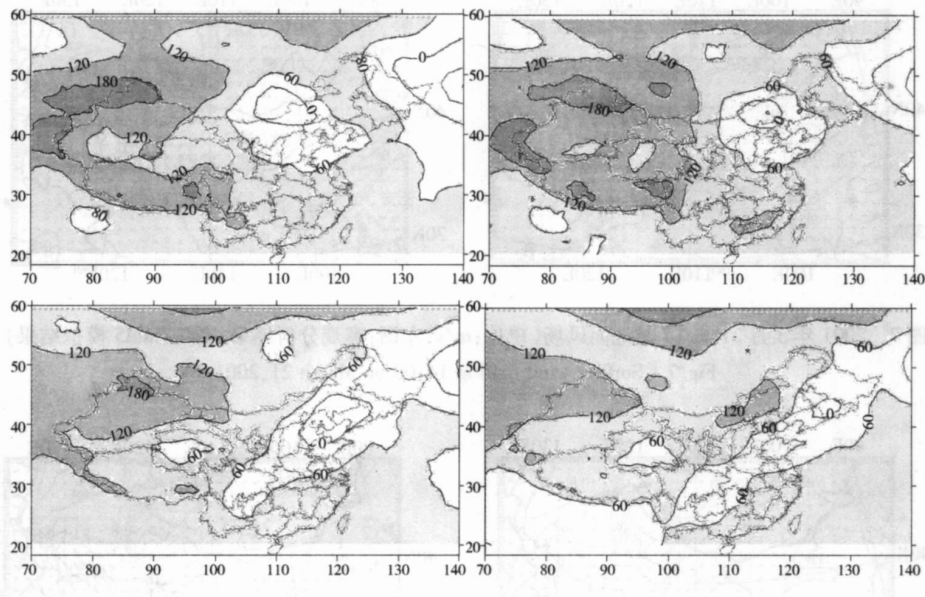


图 10 2001 年 3 月 21 日 1 000 hPa 高度场变化 (各图时间间隔 6 h)

Fig 10 1 000 hPa geopotential height field on March 21, 2001

## 3 结论

低值系统以及其低层辐合高层辐散的垂直结构

会产生很强的上升气流,造成了地面起沙和沙尘上扬的有利条件;而强风是沙尘暴输送的动力条件。在上述天气条件下,再结合有利的地表沙尘源,容易

产生沙尘天气,严重情况下会爆发沙尘暴。

(1)用中尺度气象模式 MM5 对气象场进行模拟,与实际情况比较吻合,能够较好地反映沙尘暴发生时的天气演变特征,从而保证对沙尘暴事件的空气质量模拟能够顺利进行。

(2)中尺度气象模式的模拟结果和轨迹模式模拟的沙尘质点后向轨迹路径,结合卫星监测图像,可以较好地反映沙尘的发生源区和输送路径。

#### 参考文献:

- [1] Westphal D L, Toon O B, Carlson T N. A case study of mobilization and Transport of Saharan dust [J]. *J Atmos Sci*, 1988, 45 (15): 2145 - 2175.
- [2] 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 [J]. *气象学报*, 1997, 55 (6): 726 - 738.
- [3] Zhang X L, Cheng L S, Chung Y S. Development of a severe sand dust storm model and its application to Northwest China [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2003, 3 (2): 173 - 190.
- [4] 黄美元,王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计 [J]. *大气科学*, 1998, 22 (4): 625 - 637.
- [5] 赵琳娜,孙建华,赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 2002, 7(3): 279 - 294.
- [6] Lu H, Shao Y P. Toward quantitative prediction of dust storm: an integrated wind erosion modeling system and its applications [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2001 (16): 233 - 249.
- [7] 程丛兰,王迎春,刘伟东,等. 与动力场相耦合的区域沙尘分档模式及个例模拟 [J]. *科学通报*, 2004, 49 (19): 2007 - 2013.
- [8] 王可丽,江灏,吴虹. 2001年春节中国北方沙尘暴的环流动力结构分析 [J]. *高原气象*, 2002, 21 (3): 303 - 308.

## Numerical Simulation of Meteorological Fields of Dust Weather in Northern China

WANG Yanpeng, CHEN Yan, YIN Huimin, LI Yuwu

(National Research Center for Environmental Analysis and Measurements, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The fifth generation PSU/NCAR's non-hydrostatic mesoscale model (MM5) is applied to simulate meteorological fields of the dust weather affecting Beijing in North China on 21 March 2001. The results show the model is capable for simulating and predicting spatial and temporal variations of dust weather in Northern China. Low-pressure system and its vertical structure of high-level divergence and low-level convergence resulted in strong updraft causing dust emission, and strong wind was dynamic condition for transmission of sand dust. The trajectory model is applied to simulate the air particle trajectory, which commendably reflects source area and transmission trajectory of sand dust. The predicted area of dust storms is in good agreement with those of meteorological observation and satellite images. The software is programmed to demonstrate dynamic process of the meteorological fields.

**Key words:** dust weather; meteorological fields; numerical simulation