

文章编号:1000-694X(2007)01-0137-10

## 连续强沙尘天气的发展和时空演变 机制的数值模拟

张小玲<sup>1</sup>, 程丛兰<sup>1</sup>, 谢 璞<sup>2</sup>, 王迎春<sup>1</sup>, 徐晓峰<sup>1</sup>, 刘伟东<sup>1</sup>

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 北京市气象局, 北京 100089)

**摘 要:** 2002 年 4 月 6—8 日由蒙古气旋和地面冷锋引发了一次连续沙尘暴天气, 特别是内蒙古中东部、华北和东北大部分地区沙尘持续影响时间较长, 强度大。利用与非静力平衡中尺度气象模式完全耦合的区域沙尘数值模式, 模拟研究这次强沙尘天气过程中沙尘浓度的空间分布结构和时间演变趋势。模拟结果与地面天气观测、定点沙尘颗粒物浓度观测资料进行对比和检验。结果表明: 沙尘数值模式较逼真地刻画出这次连续强沙尘天气的形成、发展、移动、减弱的全过程; 客观地揭示了强沙尘天气过程的垂直分布结构和沙尘浓度的时空演变机制; 模拟的强沙尘以及输送至下游的浮尘天气范围、强度和出现时间与实况基本一致, 特别是对我国华北和东北沙尘的模拟相当成功。高时空分辨率的数值模式对研究沙尘的发生、发展机制和预报预警有重要意义。

**关键词:** 强沙尘天气; 发展结构; 沙尘浓度; 数值模拟

**中图分类号:** P445.4

**文献标识码:** A

沙尘天气是影响中国北方干旱半干旱区的一种严重的灾害性天气, 受大气环流场和季风气候影响, 我国北方地区冬、春盛吹西北风, 强劲而干燥, 3—5 月地表增温大, 是风力场和热力场极不稳定的季节, 地表容易发生蠕动, 产生沙尘天气。近年来, 特别是 2000—2002 年, 我国北方地区沙尘天气的频繁发生, 引起了国内外学者对沙尘暴及其影响因素的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。频繁发生的沙尘暴不仅给沙尘源区造成了重大的自然灾害, 而且也严重危害京津等地, 并波及到全国, 致使沙尘源地和下游地区气溶胶浓度增加、能见度降低、空气质量下降、影响人体健康、交通等生态环境。

在科学研究方面, 无论从外场观测、历史资料分析、遥感监测还是数值模拟等方面均有大量的研究成果, 特别是东亚沙尘暴的研究。Zhang<sup>[5]</sup>等在 2001 年 ACE-Asia 沙尘加强观测期间, 比较系统地给出了垂直沙尘通量粒径分布和沙尘气溶胶传输特征; 张仁健<sup>[6]</sup>、庄国顺<sup>[7]</sup>等通过观测研究分析了北京沙尘暴的组成、来源和粒径分布; 国内对沙尘粒子的空间结构观测试验在 20 世纪 90 年代利用飞机探测<sup>[8]</sup>和激光雷达<sup>[9]</sup>获取了一些沙尘垂直结构分布、沙尘气溶胶的物理光学特性及其远距离输送时的垂

直结构等。董治宝<sup>[10]</sup>总结了我国风蚀物理研究的历史, 表明我国在风沙物理领域的研究取得了重要进展和成果, 这些大量的外场观测实验和理论研究不仅揭示了沙尘暴发展和传输过程的某些特点和沙尘气溶胶物理化学特性, 也为沙尘暴数值模式的发展和改进提供了重要的观测事实和理论依据。但是, 我们很难获得大范围、多次沙尘过程的全部信息。发展沙尘数值模式, 定量模拟和研究沙尘的产生、传输、扩散和沉降等过程仍是非常重要的手段之一, 也是进一步提高沙尘天气数值预报的重要途径。

沙尘天气数值模式研究和模式试验始于 20 世纪 80 年代对 Sahara 沙漠沙尘暴天气的数值模拟<sup>[11]</sup>。国内对沙尘起沙和传输过程的模拟是在 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。但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>[12]</sup>、沙尘气溶胶的辐射效应<sup>[13]</sup>以及黄沙长距离输送过程<sup>[14]</sup>。随着沙尘物理机制的研究和一些新的观测事实的获取, 沙尘起沙和运动的数学物理模型的建立和风蚀沙尘微物理过程的描

收稿日期: 2005-08-08; 改回日期: 2006-02-16

基金项目: 科技部公益类项目(2001DIB20103); 国家自然科学基金项目(40275006); 国家重点基础研究发展规划项目(TG1999045700)共同资助

作者简介: 张小玲(1972—), 女(汉族), 甘肃西和人, 博士, 副研究员, 主要从事风沙天气的数值预报技术开发和城市环境气象研究等工作。

E-mail: xlzhang@ium.cn

述逐渐发展起来<sup>[15]</sup>。同时,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,沙尘起沙和传输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>[16-18]</sup>。Gong等<sup>[19]</sup>和Uno等<sup>[20]</sup>分别用区域气候气溶胶模式和区域化学天气预报系统对2001年春季亚洲沙尘天气进行了模拟和对比实验,Shao<sup>[21]</sup>利用建立的风蚀沙尘模拟系统对2002年春季东亚地区的沙尘天气进行了72 h的实时预报及检验,分析了大范围沙尘天气的形成及传输等特征。但是,由于沙尘过程的复杂性,不可能用模式把所有的过程描述的很准确,仍然有很多过程需要以参数化的形式表示。在建立沙尘模式的过程中,除了对沙尘起沙机制和物理过程描述详细外,选择预报能力强、物理过程全的天气动力模式是非常重要的。同时,为了尽可能刻画和研究沙尘形成、发展和传输、消亡的过程,需要发展与动力场完全耦合的沙尘数值模式。本文在程丛兰等<sup>[18]</sup>建立的与非静力中尺度气象模式相耦合的区域沙尘数值模式的基础上,在模式分辨率、下垫面特征以及气象资料同化等方面进一步改进该沙尘模式,模拟研究了2002年4月6-8日影响我国北方大部分地区的连续强沙尘天气的时空分布特征和演变过程,并与地面天气观测网资料、沙尘浓度的观测资料和卫星遥感监测图象进行对比分析和检验,揭示了连续强沙尘天气的强度和时空演变过程等特征。

## 1 强沙尘天气过程概述

2002年我国长江以北的绝大部分地区都出现了沙尘天气,具有影响范围比较广,强度强的特点。对北京地区的影响也非常明显,统计分析<sup>[22]</sup>表明,2002年北京沙尘日数达到23 d,是近几年最多的。张平等<sup>[23]</sup>对2002年春季沙尘天气分布与物理量场的相关分析表明,2002年沙尘天气具有明显的区域特点,指出风是影响沙尘天气发生的最主要的气象要素。根据《沙尘天气年鉴》<sup>[24]</sup>,2002年,中国出现了17次沙尘天气过程,其中,春季(3-5月)出现了12次沙尘过程。春季强沙尘暴过程4次、沙尘暴过程7次、扬沙过程1次,每次强沙尘暴天气持续的时间一般2~3 d,最长的达4 d多。强度最强、波及范围最广、影响最为严重的是3月18-22日的强沙尘暴天气过程,使包括北京在内的北方大部分地区都遭受了严重的风沙灾害,并袭击影响了黄淮、江淮、汉水流域以及四川盆地、湖南等地。其次是4月

5-9日的强沙尘暴过程,沙尘主要影响新疆南部、青海西北部、甘肃西北部、内蒙古大部、宁夏北部、陕西北部、河北北部、京津地区、黑龙江、吉林、辽宁大部以及山东东部和江苏北部等地,其中国内16个测站为强沙尘暴。这两次沙尘暴天气对北京地区造成了严重的影响,但沙尘天气的形成和性质有所不同,3月20日强沙尘天气影响北京时主要表现为强浮尘天气;4月6-9日的沙尘天气以大风、扬沙天气为主,且连续有两股冷空气影响华北地区,北京地区地面10 min平均最大风速达到 $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,瞬时极大风速达到 $20.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沙尘期间的颗粒物浓度迅速增加。本文将主要分析和模拟研究4月6-9日影响华北和东北的强沙尘暴天气过程。

2002年4月6-9日的强沙尘暴天气过程是从4月5日在新疆南疆盆地发生,6日冷空气进入蒙古国南部和内蒙古中部,并造成大范围的沙尘天气。对华北和东北部分地区的影响主要是起源于6日南下东移的冷空气和途经沙地、戈壁及疏松的地表而产生的沙尘天气。因此,我们重点分析6-8日的天气系统和冷空气以及沙尘过程。6日08时空中槽越过蒙古国西部山地后发展,在蒙古国中部形成冷涡,冷涡南部存在明显的槽线,槽前鋒区较强,与之相对应,地面有蒙古气旋形成,并有较强的冷鋒配合,14时影响到华北大部分地区(图1a)。空中冷涡在东移过程中,由于槽后不断有冷空气补充,使得冷涡不断加强,并缓慢向东北境内移动。20时冷涡中心强度已达5240位势米,中心位于内蒙古的东北部,冷涡后有明显的风切变,并有冷中心配合(图1b),这意味着槽后还有小股冷空气甩下。由于冷空气势力相对偏北,地面冷鋒在7日主要影响华西北部及东北中南部。蒙古气旋强烈发展,形成锋面气旋,向东北旋转。

## 2 耦合的区域沙尘数值模式

### 2.1 模式简介

文献[18]中所发展的模式是利用中尺度天气预报和研究中广泛应用的美国PSU/NCAR发展的非静力中尺度模式MM5V3作为动力模式,并耦合了沙尘的起沙、扬沙、输送、干沉降、湿沉降的沙尘粒子分档模式,建立了区域沙尘数值预报和模拟系统。该模式中分档沙尘浓度的预报方程是:

$$\frac{\partial(P \cdot Q_d^K)}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial(P \cdot u \cdot Q_d^K/m)}{\partial x} + \frac{\partial(P \cdot v \cdot Q_d^K/m)}{\partial y} \right]$$

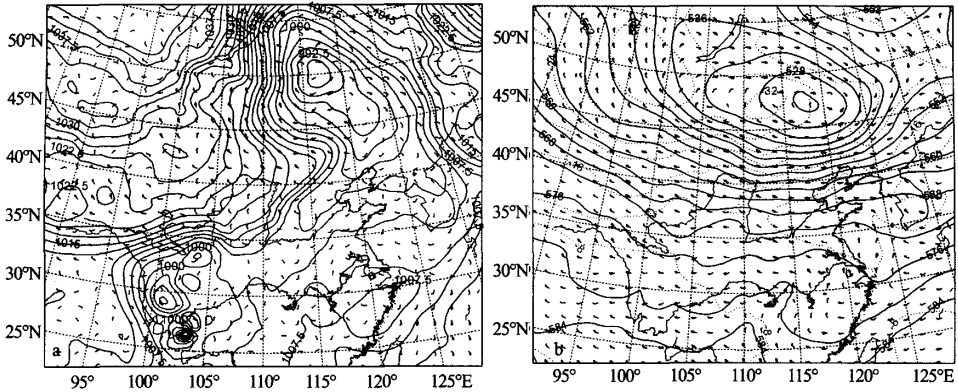


图 1 2002 年 4 月 6 日 14 时海平面气压和风场(a)和 20 时 500 hPa 等压面

高度场(实线)、温度场(点线)和风矢量场(b)

Fig. 1 (a) Sea level pressure and wind field at 14BLT 6 April 2002; (b) 500 hPa height (solid line), temperature(dotted line) and wind field at 20BLT 6 April 2002

$$-\frac{\partial(P^*Q_D^K\sigma)}{\partial\sigma}+Q_D^KDIV$$

$$-\frac{\partial(\rho gQ_D^KV_D^K)}{\partial\sigma}+P^*PQ_D^K+D_D^K$$

式中:  $P^* = p_s - p_t$ ,  $p_s$  和  $p_t$  分别为地面气压和模式顶层气压;  $u, v, w$  分别为水平风速  $u$  分量、 $v$  分量和垂直风速;  $x, y, \sigma$  为三维坐标(水平坐标和垂直坐标);  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为空气密度;  $Q_D^K$  为沙尘分档浓度;  $V_D^K$  为沙尘沉降速度, 下标  $D$  为沙尘, 上标  $K$  为沙尘粒子分档;  $m$  为地图放大因子;  $t$  为时间。

基本方程的各项物理意义:  $\frac{\partial(P^*Q_D^K)}{\partial t}$  沙尘变化倾向项,  $\left[\frac{\partial(P^*uQ_D^K/m)}{\partial x} + \frac{\partial(P^*vQ_D^K/m)}{\partial y}\right]$  气流水平平流作用项,  $\frac{\partial(P^*Q_D^K\sigma)}{\partial\sigma}$  气流垂直平流作用项,  $Q_D^KDIV$  由  $DIV$  引起的变化项(MM5 输出, 参看 MM5),  $\frac{\partial(\rho gQ_D^KV_D^K)}{\partial\sigma}$  沙尘的沉降项,  $P^*PQ_D^K$  沙尘源项,  $D_D^K$  次网格尺度的扩散和通量辐合项。

该耦合沙尘模式的特点: ①能够模拟和预报沙尘粒子谱分布, 模式中沙尘粒子谱分为 16 档, 沙尘粒径由  $0.25 \mu m$  到  $60.75 \mu m$ ; ②模式在起沙通量及源项的处理时以摩擦速度来参数化, 但引入了风阵性调整系数, 克服了以往模式中临界摩擦速度的局限; ③将地表特征、植被覆盖、土壤类型等多种信息综合考虑集中反映在风蚀沙尘系数的空间分布上, 有效地代表沙尘的源区和潜在的沙尘排放能力, 也是影响起沙通量的重要参数; ④在沙尘的沉降方面,

既考虑沙尘的干沉降, 也考虑沙尘的湿沉降, 沙尘粒子的湿沉降根据降水类型和模式网格分辨率分别有显式湿沉降和隐式湿沉降<sup>[18]</sup>。可以看出, 该模式对沙尘产生和运动的重要过程都有较细致的描述。

但是, 由于沙尘天气的复杂性, 不同源区地表特征、不同天气系统和影响路径均有可能对沙尘粒子谱分布和起沙通量产生影响。矫梅艳等<sup>[25]</sup>在分析沙尘天气影响因子中也指出沙尘源区地表特征的变化对沙尘天气的发生有重要影响。模拟结果的好坏受模式分辨率<sup>[26]</sup>、气象场模拟<sup>[27]</sup>等重要参数的影响。本文在文献[18]的模式基础上, 对沙尘粒子垂直分布、沙源、风蚀沙尘系数、模式分辨率等方面进行了较大的改进。主要的改进表现在: ①模拟区域内沙源分布的有效订正, 即将原来 13 类的地表分类改为 24 类地表分类(美国地质调查局 USGS 全球土地利用 10' 资料), 并利用中国 1 km 分辨率的土地利用栅格数据(中国科学院的“八·五”重大应用研究项目和国家“九·五”重中之重科技攻关项目的科技成果)对模式区域内中国区域的土地利用进行了订正。②土壤湿度的订正, 用前期的降水资料对土壤水分进行订正。③综合应用改进和订正后的土地利用、沙源、土壤湿度、土壤类型和植被覆盖计算出模拟区域内的风蚀沙尘系数(取值在 0~1 之间)分布(图 2)。④沙尘浓度的垂直分布改为非均一的递减垂直廓线。⑤模式水平分辨率由 45 km 提高到 30 km, 模拟时间由 36 h 延长到 48 h。⑥为了更好地预报气象场, 在模式中引入了资料同化方案, 对高空、地面气象要素进行资料同化, 以消除模式误

差。从多次及本文后面的模拟结果可以看出,在上述改进和调整,沙尘浓度的模拟效果大大改进,沙尘的时空分布和演变更接近于实况。

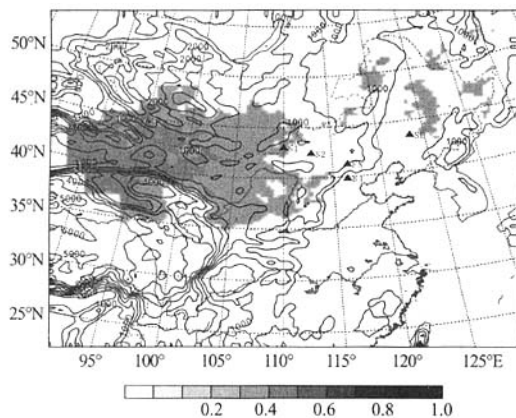


图 2 模拟区域风蚀沙尘系数分布及模式地形高度

(其中等值线为模式地形高度,填充图是风蚀沙尘系数分布,5个▲点分别表示这次沙尘过程的源区 S1 和主要影响地区的代表站:

S2、FN、BJ、SL,分别代表内蒙

古朱日和、河北省丰宁、北京

观象台和吉林省双辽)

Fig. 2 Wind erosion coefficient grades(color area) and terrain height (isoline) within simulation domain (five ▲ symbols are selected representing stations for detailed analysis)

## 2.2 模拟设计

模式模拟范围从  $21^{\circ}\text{N}$ 、 $91^{\circ}\text{E}$  到  $53^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\text{E}$ , 中心点位置  $40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\text{E}$ 。采用非静力平衡方案,水平分辨率和时间积分步长分别是 30 km 和 90 s。水平格点数为 N-S 向 121 个、W-E 向 131 个,垂直分辨率为 Sigma 分层 23 层,在边界层以下分辨率较高。模拟域范围和由 USGS 10' 地形资料形成的模式地形高度如图 2。动力场气象模式中物理过程的选取为: Grell 积云参数化方案和显式降水方案, Dudhia 云辐射方案,高分辨率边界层参数化方案,5 层土壤模式,侧向海绵边界条件。沙尘模式中包含沙尘预报方程中所有物理过程的处理。沙尘模式与气象模式完全耦合运行,即气象场和沙尘过程的计算同步进行,能够更好地模拟沙尘演变的全过程。耦合的区域沙尘数值模式初始场和边界条件由国家气象中心全球谱模式 T106 提供,模式初始积分时间为 2002 年 4 月 6 日 08 时,积分 48 h,每小时输出沙尘浓度和气象预报场。

## 3 模拟结果分析与检验

### 3.1 近地面沙尘浓度的空间分布和演变

图 3 中 a-f 分别是自 2002 年 4 月 6 日 08BLT 开始,模式模拟 6 h、12 h、24 h、30 h、36 h 和 48 h 的近地面沙尘质量浓度,并与对应时刻的地面气象站沙尘天气的实况比较。地面气象站的分布不均匀,如偏远和高原地区观测站比较稀疏等,对沙尘天气的实况记录和模式结果比较会带来一定的影响。但是,由于缺乏其他的观测资料,地面气象观测资料仍能够提供很好的沙尘天气的实际空间分布和时间演变情况,可以作为模式模拟和预报效果检验的重要依据之一。

模拟的近地面沙尘浓度分布和演变趋势分析表明,模式能够较好地模拟出沙尘天气的发生、发展和演变过程,模拟的沙尘浓度的空间分布和时间变化趋势与实际观测到的沙尘区域很一致。数值模式和地面实况观测均表明,影响这次华北和东北连续强沙尘天气主要来源于蒙古国南部和我国内蒙古中南部的沙尘暴天气。4 月 6 日 14BLT 时(图 3a),在蒙古国南部和内蒙古中部,有沙尘暴天气区发生,部分测站为强沙尘暴天气,在河套地区附近有扬沙天气,这些区域的沙尘天气模式结果与实况非常吻合。随着冷空气的东移南下,模拟的沙尘浓度逐渐向下游输送,向东南方向发展扩散,而沙尘源区的沙尘浓度逐渐减弱。到 7 日 08—14 时,由于受不断补充南下的冷空气影响,地面气旋强烈发展,在沙尘源区又形成强沙尘天气,模拟的沙尘浓度中心值为  $14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 3d),与观测到的强沙尘暴区域和中心相对应。此后,观测的沙尘区和模拟的沙尘浓度及中心带向东发展,并向东北输送扩散。到 8 日 08 时,沙尘区域(以浮尘天气为主)移到我国东北,朝鲜半岛也观测到大范围的浮尘天气,而模式模拟的地面沙尘浓度也向东北和偏东方向发展,空间分布与实况很一致。从模式模拟和地面观测可以看出此次范围大、强度强的沙尘天气在强冷空气的影响下,不断在沙尘源区产生大风、扬沙和沙尘暴天气,向下游不断输送。另外一个特点是我国  $40^{\circ}\text{N}$  以北主要是沙尘暴和扬沙天气,以南主要是浮尘天气,甚至在  $30^{\circ}\text{N}$  也观测到浮尘天气。可见,模式对 2002 年 4 月 6—8 日强沙尘区域和主要影响区域内沙尘的发生、发展、移动、减弱、消亡的演变过程和沙尘强度分布等模拟很成功,特别是对连续两股冷空气影响下造成

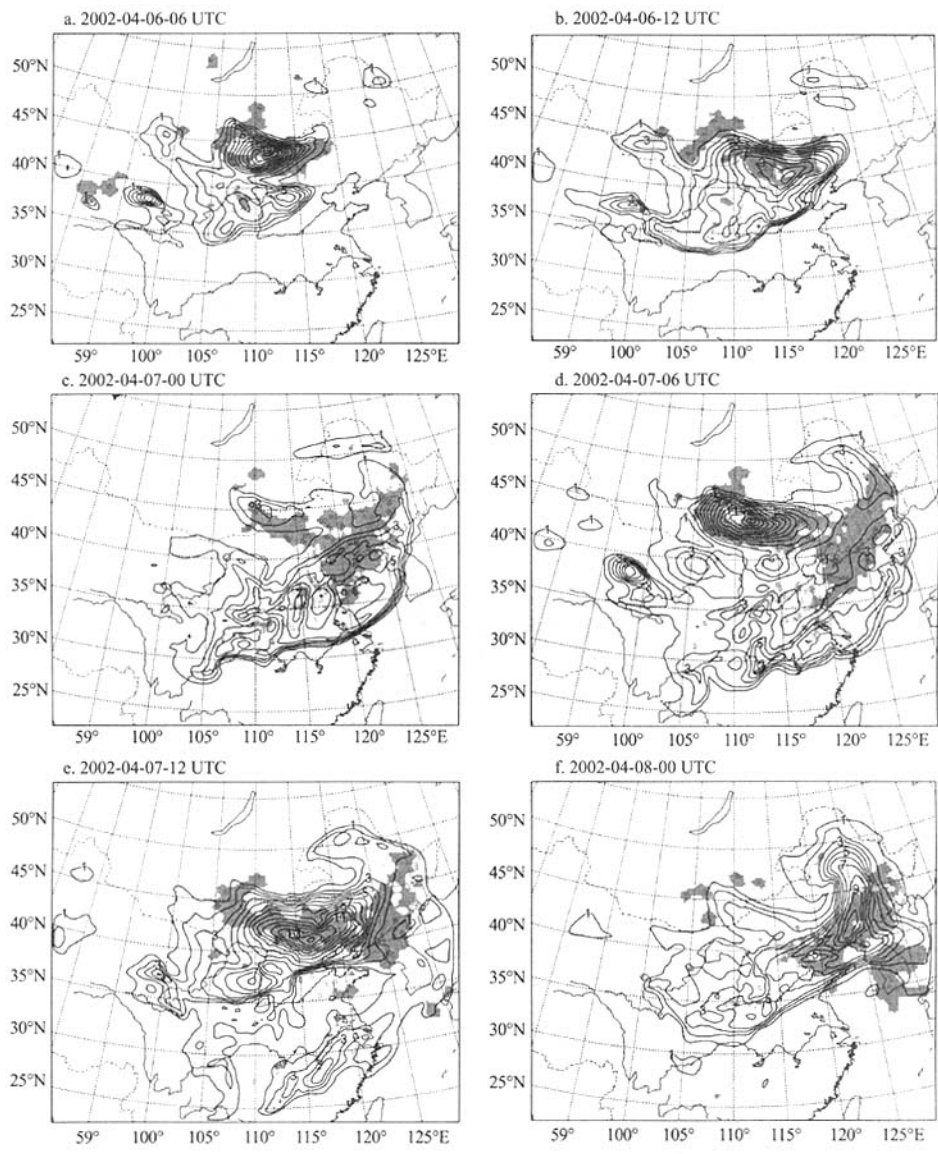


图 3 近地面沙尘浓度的模拟和检验

a-f 分别是模拟 6 h、12 h、24 h、30 h、36 h 和 48 h 的结果与对应的实况，其中等值线为模拟的沙尘浓度(单位： $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )，等值线间隔为 1；阴影区表示观测到的能见度 $<1 \text{ km}$ 的沙尘区域，沙尘天气实况以不同的符号表示：即 S、S、S 和 S 分别代表扬沙、浮尘、沙尘暴和强沙尘暴天气

Fig. 3 Distribution of simulated dust concentration (isoline) and sand-dust area from surface weather report

的沙尘源区沙尘暴和下游的浮尘天气在发生时间和影响范围上有很好的模拟。当然,由于复杂地形、下垫面特性、沙源分布、初始沙尘场等的影响,可能会对气象场的模拟和沙尘的强弱分布产生一些误差,观测站的不均匀性和偏远地区观测站相对较少也对模式结果检验带来一定的影响。但总体来说,利用与非静力平衡中尺度模式相耦合的区域沙尘数值模

式,能够较逼真地刻画出这次强沙尘天气时空分布和演变特征。

3.2 定点地面沙尘浓度模拟结果分析

为了进一步分析此次沙尘天气的影响和模式模拟效果,选取模式区域内的几个地面观测站,利用能获取到的颗粒物浓度观测资料进行验证,重点以北

京为例。图4是北京地区延庆(40°27' N, 115°58' E)和观象台(39°56' N, 116°17' E)以及北京市城近郊区平均、兰州(36°03' N, 103°53' E)、呼和浩特(40°49' N, 111°41' E)五个地点可吸入颗粒物PM10日平均浓度的模拟值和观测值。观测和模拟结果表明,4月6—7日的兰州PM10浓度较低,呼和浩特PM10浓度也比北京地区的低,而北京地区无论是处于西北部的延庆,还是城郊东南部的观象台以及市区PM10浓度均很高,延庆7日观测到的平均质量浓度高达 $1.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,远远超出空气质量二级标准。可见,模式对PM10日平均浓度的模拟与实况很接近,也说明了越接近沙尘源区,沙尘中的粗粒子占的比例越大,较细粒子在下游地区所占比例大的特点。为了进一步分析沙尘暴发生的不

同阶段对北京的影响,利用沙尘暴期间每6 h的外场观测资料和模拟结果进行比较。图5a是北京观象台PM10浓度的模拟值和观测值。可以看出,模拟结果非常好,最高浓度出现的时间、强度和变化特点与实际观测值相当一致。同时,表明从4月6—8日有两次较强沙尘天气影响北京,分别是在6日下午至7日凌晨和7日下午至8日凌晨。两次过程中6 h平均的PM10浓度质量分别是 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (模拟值为 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (模拟值为 $1.47 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),分别出现在6日和7日的前半夜。与PM10浓度模拟相比,模式对总沙尘浓度的模拟值偏大(图5b),但变化趋势还是很一致的。这反映出模式在处理沙尘粒子谱分布和各档粒子的分额分配时还需要进一步根据观测和理论来改进。

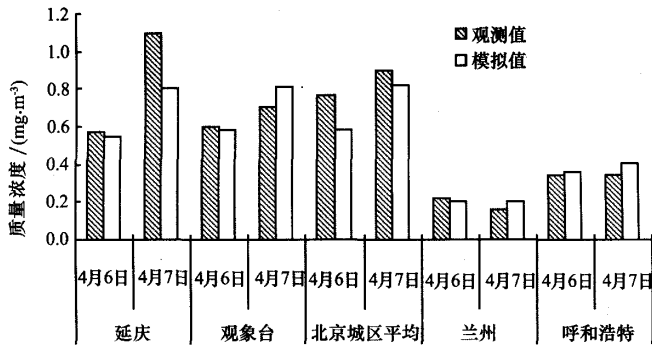


图4 2002年4月6—7日不同地点PM10日平均浓度模拟值与观测值

Fig. 4 Daily average PM10 concentration comparison between simulation and observation at different stations during April 6 to 7, 2002

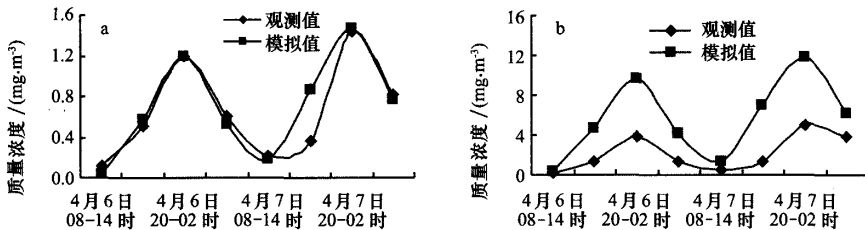


图5 4月6—8日北京观象台PM10(a)和TSP(b)每6 h平均浓度模拟与观测比较

Fig. 5 Every 6-hour average dust concentration of simulation and observation for PM10(a) and TSP(b) at Beijing Guanyangtai station

利用高时空分辨率的沙尘数值模式来更细致地了解沙尘暴源区和主要影响地区和路径上的沙尘天气的演变过程。主要选取沙尘源区(蒙古国和内蒙古交界的地区)、内蒙古朱日和、河北省丰宁、北京观象台和吉林省双辽为代表站,分析沙尘浓度的演变过

程。图6是模拟的PM10每小时浓度的时间序列演变情况,再次细致地反映出沙尘的演变过程,在48 h内各站均出现两次高浓度峰值和低浓度谷值,但各站出现的时间和强度不同。从强度看能够得到三个主要特征:①沙尘源区的最高浓度比其他各站大,

出现时间早,而且第二次过程比第一次要强;②由于主要是大风引起的扬沙和沙尘暴天气,沙尘浓度在短时间内迅速增加,高浓度持续2~3 h后,浓度逐渐降低;③吉林省双辽地区的沙尘浓度远低于其他上游地区,并且在两次高峰之间的最低浓度比较高,说明该站主要受浮尘天气影响。从时间演变规律得出:由北至南的四个站高浓度沙尘出现的时间相隔约2~3 h,各站之间的距离约为100~150 km,由此

也可以推算出此次沙尘天气约以每小时50 km的速度向南推进,向东移动速度更快。这些演变特征与地面气旋的发展和移动路径及速度是一致的。可见,模拟的不同地点逐时沙尘浓度的演变能够很好地刻画此次沙尘过程的发展、移动、输送以及强弱变化趋势,高时空分辨率的沙尘数值模式对分析沙尘的来源、形成机制和沙尘天气的预报预警有重要意义和应用前景。

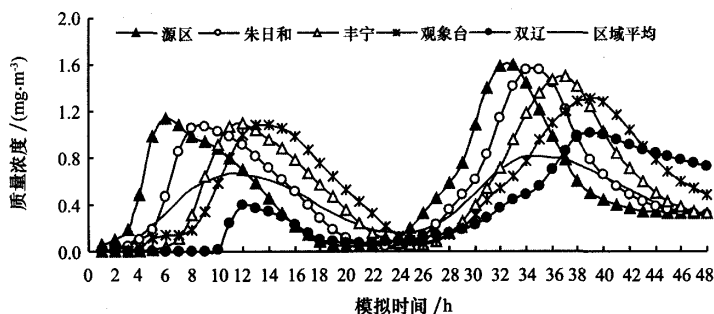


图6 模拟的4月6—8日不同地点PM10每小时浓度变化

其中:源区(43°N, 110°E)、朱日和(42°24' N, 112°54' E)、丰宁(41°13' N, 116°38' E)、北京观象台(39°56' N, 116°17' E)、双辽(43°30' N, 123°32' E)、区域平均(39°N—45°N和111°E—120°E),所选站点的相对位置在图2中已标出

Fig. 6 Simulated hourly PM10 concentration from April 6—8, 2002 at different stations

### 3.3 沙尘浓度垂直分布结构模拟

图7分别描述了北京观象台和内蒙古朱日和连续两次沙尘天气的发生、加强发展和减弱不同阶段的沙尘浓度垂直结构。由天气系统分析和地面观测表明这次沙尘天气是以大风扬沙为主,在开始产生(图7a、d)和发展阶段(图7b、e),近地面沙尘浓度很高,主要是粗大粒子的比重大且沉降快。在减弱阶段,能够看出在高空沙尘浓度也有较大的变化(图7c、f),由于垂直上升或下沉气流以及云和降水的湿清除引起沙尘浓度在垂直方向上的重新分配,造成各层沙尘浓度变化。在接近沙尘源区和沙尘下游的地方,沙尘高度均可到达6 km。近地面层朱日和沙尘天气先发展,浓度增大;随后,沙尘影响北京,并且北京和朱日和沙尘强度都很强;在沙尘过程结束阶段,北京的沙尘浓度比朱日和站的略高。

图8是模拟的沙尘浓度东-西向垂直剖面图,可以看出在沙尘暴开始形成阶段(图8a,对应北京时间4月6日15时),过内蒙古朱日和的沙尘暴结构是在源区及附近沙尘浓度很高,并且直接随很强的垂直上升气流向上输送,形成柱状分布;经过一段时间后,沙尘浓度的垂直结构在空间分布上发生了很

大的变化,到4月8日02时,由于上游沙尘的输送和本地扬沙共同作用下,沙尘的影响范围扩大,垂直结构更为复杂。图8b给出了沙尘暴前沿的结构和空间分布,即逐渐发展移动而来的沙尘暴前沿在中低空边界层内分布比较均匀,沙尘的输送高度比开始时抬高,这也是沙尘粒子随气流的输送和运动造成的。

## 4 结论

2002年4月6—8日由蒙古气旋和地面冷锋引发了一次连续沙尘暴天气,是当年我国第二个影响范围大、强度强、持续时间长的沙尘天气过程。从造成这次强沙尘天气过程的天气系统演变特点和沙尘数值模式模拟结果分析研究,得出以下几点结论:

1) 天气分析表明,开始在蒙古国中部有冷涡和地面气旋形成,冷涡后不断有冷空气补充,使得冷涡不断加强,蒙古气旋强烈发展,在东移过程中产生地面大风,配合有利的沙源和疏松地表等下垫面条件,形成扬沙和沙尘暴天气。

2) 区域沙尘数值模式中对影响起沙和输送的下垫面特征、沙源、土壤湿度以及气象场和模式分辨率等几个重要参数进行了改进和订正,使模式的模

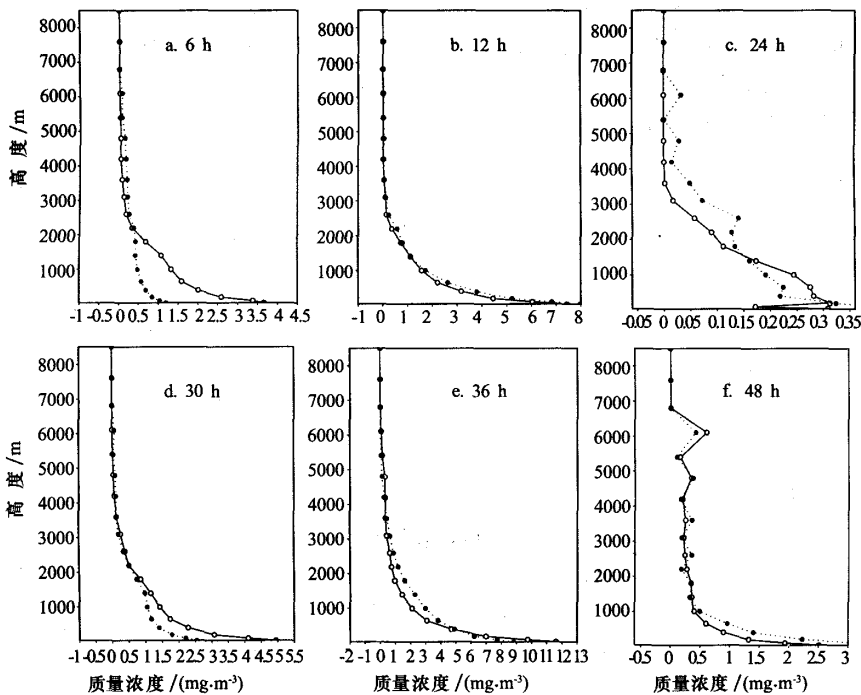


图 7 模拟的朱日和(实线)和北京观象台(虚线)不同发展阶段总沙尘浓度垂直廓线  
Fig. 7 Simulated dust vertical profiles for Zhurihe (solid line) and Beijing Guanxiangtai (dotted line) at different developing period during dust event

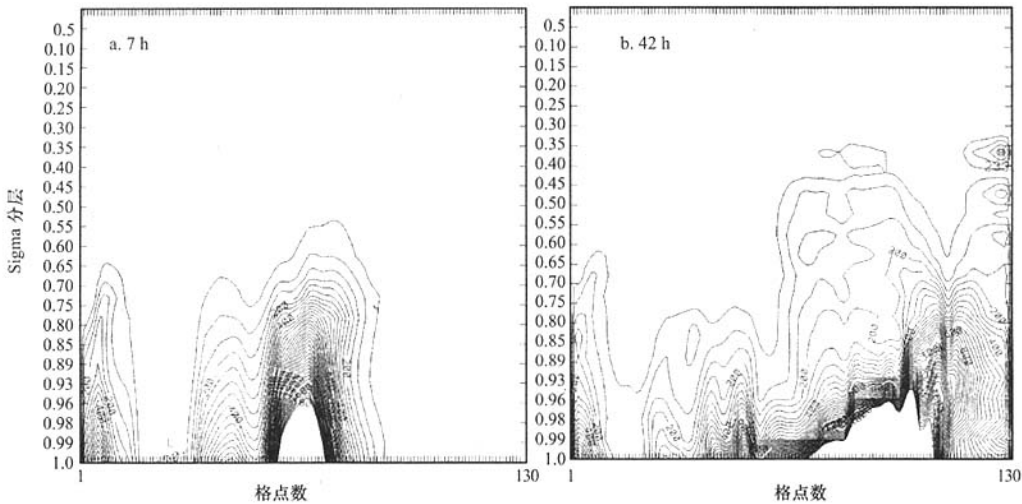


图 8 模拟 7 h 过朱日和(a)和 42 h 过北京地区北部(b)沙尘浓度的 W-E 向垂直剖面  
沙尘质量浓度单位  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 等值线间隔为  $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$   
Fig. 8 The W-E vertical cross section of simulated dust concentration for 7h simulated result crossing Zhurihe (a), and for 42 h simulated result crossing Beijing (b)

拟能力和效果进一步提高。模式模拟出此次影响华北和东北的沙尘天气主要起源于蒙古国南部和内蒙古中南部,沙尘随天气系统和冷空气路径向下游发

展移动。对连续两股冷空气影响下造成的沙尘源区沙尘暴和下游的浮尘天气在发生时间、强度和影响范围上的模拟与实况很一致。



3) 地面沙尘浓度的定点、定量模拟与观测结果在空间分布和时间演变上趋于一致。逐时沙尘浓度的模拟很好地刻画了不同地区连续两次沙尘天气的形成、发展、减弱的演变过程。沙尘浓度的空间结构和变化特点表明, 近地层沙尘浓度高, 沙尘可向垂直方向输送到 6 km 以上的高空。

4) 高时空分辨率的数值模式较逼真地刻画连续强沙尘天气的形成、发展、移动、减弱的全过程, 客观地揭示了强沙尘天气过程的垂直分布结构和沙尘浓度的时空演变特征, 对研究沙尘暴的发生、发展机制和预报预警有重要意义。

### 参考文献(References):

- [1] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513—521.
- [2] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106—111.
- [3] 陈广庭. 北京强沙尘暴史和周围生态环境变化[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 210—213.
- [4] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954—2002 年)[J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1224—1228.
- [5] Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. Characterization of soil dust distributions in China and its Transport during ACE-ASIA 1. Net Work Measurements[J]. J Geophy Res, 2003, 108 (D9), doi: 10. 1029/2002JD002632, 4261.
- [6] 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 259—266.
- [7] 庄国顺, 郭敬华, 袁惠, 等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 191—197.
- [8] 游来光, 马培民, 陈君寒, 等. 沙尘天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构[J]. 应用气象学报, 1991, 2(1): 13—21.
- [9] 邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感分析[J]. 大气科学, 1994, 18(1): 1—10.
- [10] 董治宝. 中国风蚀物理研究五十年(I)[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 293—305.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Shao Y P, Leslie L M. Wind erosion prediction over Australian continent[J]. J Geophy Res, 1997, 102(D25): 30091—30105.
- [16] 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.
- [17] Liu M, Westphal D L, Wang S G, et al. A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001[J]. J Geophy Res, 2003, 108 (D23), doi: 10. 1029/2002JD003178, 8653.
- [18] 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.
- [19] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia 2. Model simulation and validation[J]. J Geophy Res, 2003, 108(D9), doi: 10. 1029/2002JD002633, 4262.
- [20] Uno I, Carmichael G R, Streets D G, et al. Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment[J]. J Geophy Res, 2003, 108(D23), doi: 10. 1029/2002JD002845, 8668.
- [21] Shao Y P, Yang Y, Wang J J, et al. Northeast Asian dust storms: real-time numerical prediction and validation [J]. J Geophy Res, 2003, 108 (D22), doi: 10. 1029/2003JD003667, 4691.
- [22] 张小玲, 李青春, 谢璞, 等. 近年来北京沙尘天气特征及成因分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 417—421.
- [23] 张平, 杨德保, 尚可政, 等. 2002 年春季中国沙尘天气与物理量场的相关分析[J]. 中国沙漠, 2003, 25(6): 675—680.
- [24] 中国气象局. 《沙尘天气年鉴 2002 年》[Z]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [25] 矫梅艳, 牛若芸, 赵琳娜, 等. 沙尘天气影响因子的对比分析[J]. 中国沙漠, 2004, 26(6): 696—700.
- [26] Liu M, Westphal D L. A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution [J]. J Geophy Res, 2001, 106(D16): 18099—18112.
- [27] Luo C, Mahowald N M, Corral J. Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution[J]. J Geophy Res, 2003, 108(D15), 4447, doi: 10. 1029/2003JD003483.

## Simulation on Development and Evolution Mechanism of a Continuous Strong Dust Weather Event

ZHANG Xiao-ling<sup>1</sup>, CHENG Cong-lan<sup>1</sup>, XIE Pu<sup>2</sup>, WANG Ying-chun<sup>1</sup>,  
XU Xiao-feng<sup>1</sup>, LIU Wei-dong<sup>1</sup>

(1. *Beijing Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*; 2. *Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China*)

**Abstract:** A continuous strong dust weather occurred from April 6 to 8 in 2002 in most part of China, especially in middle and east Inner Mongolia, north and north-east China. This long time dust weather event was induced by Mongolian cyclone and surface cold front. The spatial and temporal distribution and development of dust concentration and structure were simulated by a coupled dust model with non-hydrostatic mesoscale model. The modeling results were validated with surface weather reports and observed dust particle concentration as well as satellite remote sensing image for dust. The results showed that the coupled dust model could depict the full processes of continuous dust weather's formation, development, movement and weakening. The model reasonably revealed the vertical structure and the spatial-temporal evolution of dust concentration during strong sand-dust weather. The dust development and its strength and range from the model were in good agreement with the real observations. High resolution dust model could be a good method for mechanism study of dust weather's occurrence, development and transport and for dust forecasting and warning in operation.

**Keywords:** strong dust weather; development structure; dust concentration; numerical simulation