

王丽娟,赵琳娜,寿绍文,等. 2009 年 4 月北方一次强沙尘暴过程的特征分析和数值模拟[J]. 气象,2011,37(3):309-317.

# 2009 年 4 月北方一次强沙尘暴 过程的特征分析和数值模拟<sup>\*</sup>

王丽娟<sup>1</sup> 赵琳娜<sup>2</sup> 寿绍文<sup>1</sup> 王俊超<sup>3</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 国家气象中心, 北京 100081

3 武汉暴雨研究所, 武汉 430074

**提 要:** 利用观测资料对 2009 年春季 4 月 22—24 日强沙尘暴过程的近地面气象要素(气温、气压、风速)变化和  $PM_{10}$  进行分析。结果表明:蒙古气旋和冷锋是这次强沙尘暴的主要影响系统;沙尘暴过程前后温、压和风速有剧烈变化; $PM_{10}$  的强度能较好地反映沙尘暴强度。在观测资料分析基础上,利用沙尘暴数值预报系统对此次过程进行了模拟,采用模拟结果对地面沙尘浓度和起沙进行了分析。结果表明:模式能较好地模拟出这次沙尘天气的时间和空间演变特征,模拟沙尘浓度大值区与强沙尘暴的范围较为一致,比较白天早间和下午的沙尘浓度分布,发现其具有日变化;这次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是南疆塔里木盆地、甘肃、内蒙古的西部及蒙古国南部,垂直沙通量超过  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;沙尘浓度垂直输送的高度在 550 hPa 以下,起沙后的沙尘粒子主要靠对流层低层的大风长距离地输送;对不同地区起沙过程贡献最大的沙尘粒子的粒径不尽相同,但是对起沙量贡献最大的是粒径在  $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$  的沙尘粒子。

**关键词:** 沙尘暴, 诊断分析, 数值模拟,  $PM_{10}$

## Observation and Numerical Simulation Analysis of the Severe Sand Storm over Northern China in April of 2009

WANG Lijuan<sup>1</sup> ZHAO Linna<sup>2</sup> SHOU Shaowen<sup>1</sup> WNAG Junchao<sup>3</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorological Center, Beijing 100081

3 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

**Abstract:** A severe dust storm over northern China in April of 2009 (i. e. , 22—24 April) is studied. Firstly, the relationship between the meteorological variables at surface,  $PM_{10}$  and the intensity of dust storm on April 22, 2009 is analyzed. The results show that Mongolian cyclone and its cold front are the main system producing the strong dust storm. The temperature, surface pressure, wind and  $PM_{10}$  are closely related to the intensity of the dust storm. Secondly, an integrated dust storm modeling system is employed to simulate this process. The simulation results show that the modeling system is capable for better describing the main characteristics of dust storm. And the scope of simulated dust concentration value is consistent with the strong dust storm. Comparing with the morning and afternoon dust concentration distribution, we find it has daily change. The dust emission areas with vertical sand flux over  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  are Tarim Basin, Gansu Province, western Inner Mongolia and southern Mongolia. The vertical transportation of dust concentration is below 550 hPa, and the horizontal transportation of dust is driven by strong wind in middle-lower-level troposphere. The particle size which contributes significantly to the dust

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41005027,40875025,40875030,40775033)及气象灾害省部共建教育部重点实验室开放课题 KLME0905 资助  
2010 年 3 月 17 日收稿; 2010 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者:王丽娟,主要从事沙尘暴诊断分析和数值模拟. Email:piaoyi170@yahoo.com.cn

emission is different due to the variety of land, however, the quantities of particles with diameter from  $2\text{ }\mu\text{m} < d \leq 11\text{ }\mu\text{m}$  are predominated. The scope of simulated dust concentration value is consistent with the strong dust storm.

**Key words:** dust storm, diagnostic analysis, numerical simulation,  $\text{PM}_{10}$

## 引 言

沙尘暴是沙暴和尘暴两者的总称,是指强风把地表大量沙尘卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度低于  $1\text{ km}$  的天气现象,它是沙漠及其边缘等特殊下垫面条件下产生的一种灾害性天气。沙尘暴发生时的强风天气严重风蚀土壤,加剧土地荒漠化进程。由于我国北方地区气候干燥,植被稀疏,大风天气较多,所以也是沙尘暴天气的多发地。根据中国气象局的统计,从 2000 年 1 月到 2009 年 5 月<sup>[1]</sup>这 9 年多共有 147 次沙尘天气,其中 54 次强度达到沙尘暴,给受灾地区都带来了很大的危害。关于引发沙尘暴的天气系统已经有了一些研究,不同地区沙尘暴的影响系统也不相同<sup>[2-7]</sup>。王锡稳等<sup>[5]</sup>利用红外云图对我国西北地区强沙尘暴天气的成因做了分析,认为强沙尘暴是由一些中尺度强对流系统形成和发展而造成的。申红喜等<sup>[6]</sup>对比研究了蒙古气旋型和西风槽型沙尘天气,张志刚等<sup>[7]</sup>对 2006 年引发强沙尘暴快速发展的蒙古气旋进行研究。上述研究都指出了沙尘暴与蒙古气旋关系密切。

为了研究和实时预报沙尘天气的起沙和输送过程,孙建华等<sup>[8]</sup>将 shao 等<sup>[9]</sup>发展的起沙模式和输送模式与 PSU/NCAR 发展的中尺度模式 MM5V3 耦合,建立了一个适用于我国北方地区的沙尘天气预测系统(IAPS 1.0)。雷航等<sup>[10]</sup>在 IAPS 1.0 基础上选用了包含有更为先进的陆面模式(Noah LSM)MM5 系统与起沙模式和输送模式进行了耦合,发展了新的中国科学院大气物理研究所沙尘(暴)数值预测系统(IAPS 2.0)。孙建华等<sup>[11]</sup>利用该系统对 2006 年春季一次在华北地区发生强沉降的强沙尘暴过程进行了模拟研究,结果表明该沙尘天气预测系统对此次强沙尘暴过程的起沙和输送过程有较好的模拟能力,并且模拟出了沙尘受对流层中低层偏西风的作用输送到华北地区沉降的过程。

本文首先对 2009 年春季 4 月 23—24 日发生的一次强沙尘暴过程的影响系统、发生沙尘暴地区的气象要素以及沙尘浓度  $\text{PM}_{10}$  的变化进行分析,然后

利用集成沙尘暴数值预报系统(IAPS 2.0)对此次过程的沙尘浓度、起沙机制和输送过程进行模拟分析,研究结果可为沙尘暴天气的预报提供参考依据。

## 1 资料及过程概况

本文研究所用的资料包括:每天共 4 次  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 再分析资料;地面每 3 小时 1 次的观测资料;每小时 1 次的自动气象站资料。沙尘定量观测资料采用地面观测能见度,  $\text{PM}_{10}$  浓度以及卫星遥感监测图像。为方便叙述,文中的时间均采用北京时间。

2009 年 4 月 23—24 日,我国出现 2009 年的第 6 次,也是该年最强的一次沙尘天气过程。这次沙尘暴的特点是:强度大、范围广、持续时间长。4 月 23 日凌晨至 24 日早晨,内蒙古中西部、甘肃中西部、宁夏、陕西北部、山西中北部、新疆南疆盆地等地出现扬沙或沙尘暴,甘肃中西部、内蒙古中西部的局部地区出现了强沙尘暴,其中甘肃敦煌出现特强沙尘暴。24 日白天,沙尘影响的区域继续东移南下,河北中南部、山东北部、河南东北部及渤海湾等地上空都出现了浮尘或扬沙天气。这里主要分析的时段为 4 月 22 日 20 时至 24 日 20 时。

## 2 沙尘暴过程的天气形势和观测分析

### 2.1 高空环流形势

2009 年 4 月 23—24 日 500 hPa 高空环流形势(图 1)显示,22 日 00 时弱高压脊位于  $90^\circ\text{E}$  以西的新疆北部和哈萨克斯坦地区,贝加尔湖地区为一切断低压,其中心强度为 5400 gpm(图略)。22 日 20 时(图略)是两槽一脊的环流形势,贝加尔湖的切断低压中心南移到蒙古北部,中心高度为 5400 gpm 的冷涡( $50^\circ\text{N}$ 、 $105^\circ\text{E}$ )稳定维持,伴随有一  $-34^\circ\text{C}$  的冷中心;贝加尔湖以西的高压脊稳定少动,影响着新疆及其以北地区。23 日 02 时(图 1a),蒙古冷涡逐渐南压东移,贝加尔湖高压脊向东北移动,西西伯利亚冷低压略有北移;温度场落后于高度场,位于蒙古国西南部的槽后较强冷平流使得蒙古冷涡加强南压。

23 日 08 时蒙古冷涡中心高度为 5440 gpm,贝加尔湖高压脊继续北伸(图 1b)。高压脊不断向北发展,在 23 日 20 时(图略)开始分裂成两个主体,分别在西西伯利亚和贝加尔湖以东形成高压脊,24 日 02

时(图 1c)高压脊加强形成闭合中心,蒙古冷涡继续东移。在 24 日 08 时中心强度有所减弱(图 1d)。此次沙尘天气过程发生在槽前。正是这个不断南压的低压槽造成了本文讨论的沙尘天气过程。

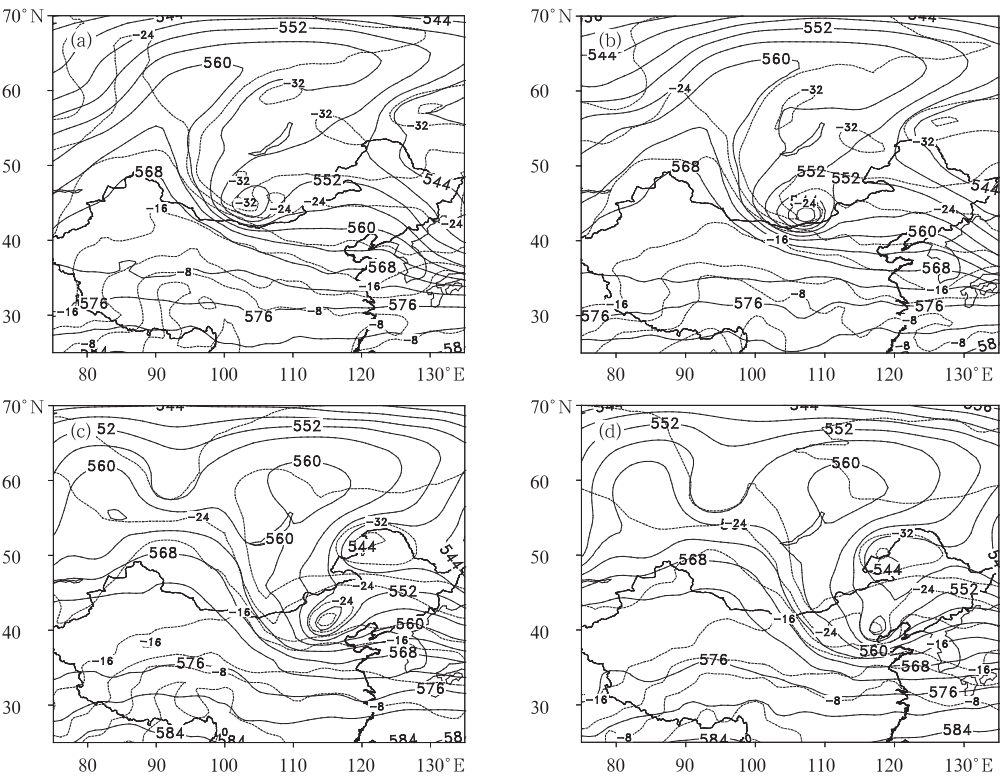


图 1 2009 年 4 月 23 日 02 时至 24 日 08 时 500 hPa 高度场  
(实线,单位:dagpm)和温度场(虚线,单位:℃)  
(a) 23 日 02 时;(b) 23 日 08 时;(c) 24 日 02 时;(d) 24 日 08 时  
Fig. 1 The geopotential height at 500 hPa (units:dagpm) from  
02:00 BT 23 to 08:00 BT 24 April 2009  
(a) 02:00 BT 23; (b) 08:00 BT 23; (c) 02:00 BT 24; (d) 08:00 BT 24

2.2 地面天气系统

分析造成 2009 年 4 月 22—24 日沙尘暴的天气过程的地面影响系统,首先分析海平面气压场的演变。23 日 02 时(图 2a)中心位于 43°N、107°E 的蒙古气旋,中心气压达 1000 hPa。此时地面冷锋后出现大范围的大风区,最大风速达到 20 m·s<sup>-1</sup>。此时蒙古国南部的戈壁地区出现了强沙尘暴天气,对我国的影响很小。除了蒙古气旋造成的沙尘天气外,在南疆盆地的南部和西部也有沙尘天气,主要由蒙古气旋后部的冷空气进入盆地造成。23 日 08 时(图 2b),蒙古气旋东移到蒙古国的东南部,发展到最强,中心气压达 997.5 hPa。此时冷锋前后分别

有一 4 hPa 和+12 hPa 的 3 小时变压中心,较强的气压梯度,导致地面大风。此时地面沙尘观测我国共有 57 个站出现沙尘天气,其中 16 个站达到沙尘暴、强沙尘暴。其中敦煌能见度仅有 400 m,风速超过了 12 m·s<sup>-1</sup>。南疆盆地的沙尘天气也维持。23 日 14 时(图 2c),蒙古气旋受到高空冷涡的冷空气引导东移,气旋中心位于 43°N、113°E。冷锋东移,前后分别有一 5 hPa 和+10 hPa 的 3 小时变压中心,蒙古气旋西部出现 24 m·s<sup>-1</sup> 的风速大值。风速的增强和大范围大风区的形成使沙尘的范围加大,甘肃中部、宁夏、内蒙古中部和陕西北部大部分地区均出现沙尘天气,该时次地面沙尘观测我国共有 137 个站出现沙尘天气,其中 33 个站达到沙尘

暴、强沙尘暴。23 日 20 时(图 2d),蒙古气旋中心位于内蒙古苏尼特左旗附近,强度减弱为 1007.5 hPa。进入南疆盆地的冷空气强度也开始减弱,它所影响的南疆等地的沙尘天气也在减弱。同时次地面沙尘观测我国仅有 15 个站达到沙尘暴、强沙尘暴,大部分地区是浮尘、扬沙天气。24 日开始蒙古气旋逐渐消亡,沙尘暴逐渐消失。此次过程中强沙

尘暴主要出现在 23 日。上述分析表明:沙尘暴的强度,范围与蒙古气旋的发展和移动有着密切的关系,强沙尘暴主要出现在冷锋前后的强气压梯度区和平均风速超过  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的大风区,说明气压梯度造成的超地转偏差在大风的形成中起了很重要的作用,大风为此次沙尘暴提供了动力因子。

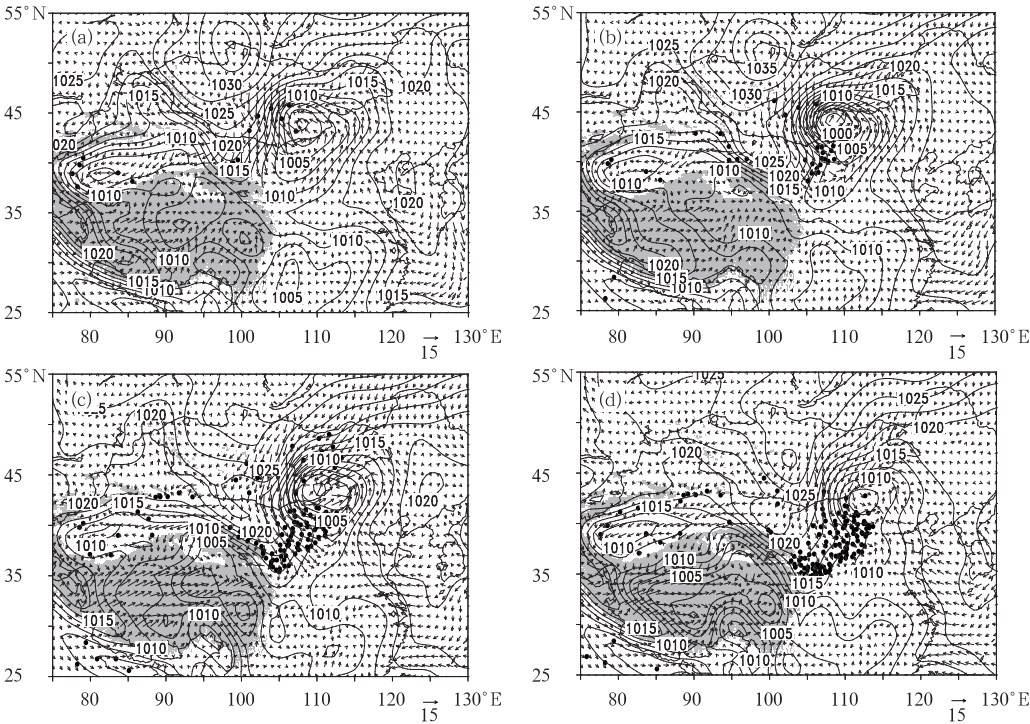


图 2 2009 年 4 月 23 日 02 时至 20 时海平面气压(单位: hPa)和地面风场

(a) 02 时; (b) 08 时; (c) 14 时; (d) 20 时

圆点为有沙尘天气(浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)出现的测站,阴影区域为地形高度大于 3000 m

Fig. 2 Sea level pressure (units: hPa), observed dust storm records

(full circles) and surface wind in 02:00–20:00 BT 23 April 2009

(a) 02:00 BT; (b) 08:00 BT; (c) 14:00 BT; (d) 20:00 BT

The shaded indicated the topography higher than 3000 m

2.3 单站气象要素和观测 PM<sub>10</sub>

已有研究表明,沙尘暴过境时气象要素的变化较明显,但不同的天气系统其变化特征有较大不同,分析地面气象要素的变化对于判断沙尘暴的天气过程特征有重要意义。根据逐日 8 个时次的地面沙尘观测,23 日凌晨开始,甘肃省西北部出现沙尘暴天气,其中玉门、景泰、白银等地出现沙尘暴,民勤和敦煌达强沙尘暴。图 3 是 2009 年 4 月 22 日 12 时至 24 日 12 时民勤、额济纳旗两站气象要素演变。民勤的海平面气压在 23 日 05 时突然上升到 1010.7

hPa,此后气压一直不断升高,23 日 11 时达到 1020.7 hPa。强烈变压形成的变压风使地面风速增加,这一时段风速从  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  逐渐增加到  $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,大风是沙尘暴产生的主要原因之一。温度也由沙尘暴发生前的  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。额济纳旗从 22 日 22 时开始受到此次沙尘暴的影响,整个沙尘过程也有海平面气压上升、气温下降、风速增大的特点。可见这两站沙尘暴过境时气象要素具有气压跃升、风速猛增、气温降低等特征。张仁健等<sup>[13]</sup>分析 2000 年 4 月的一次沙尘暴,证实此次沙尘暴期间,北京近地层气象要素也有一些明显的变化。

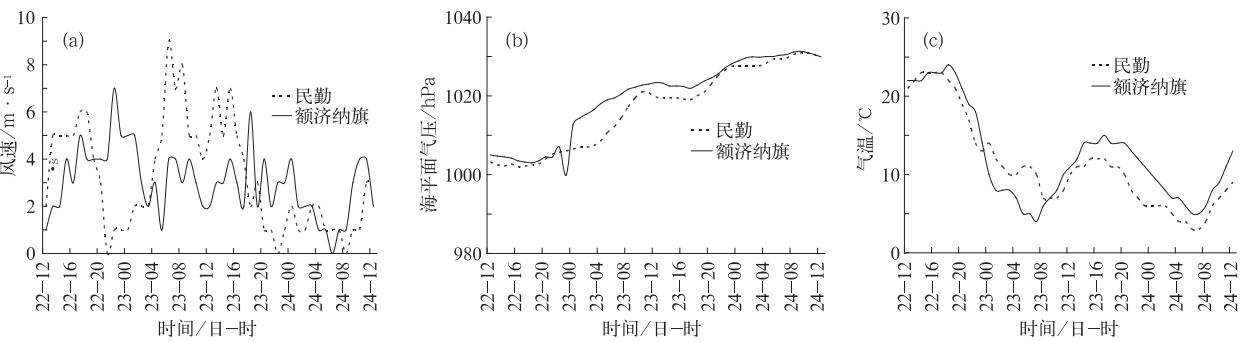


图 3 2009 年 4 月 22—24 日民勤、额济纳旗两站气象要素演变  
(a) 风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) 海平面气压(单位: hPa); (c) 气温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 3 The meteorological variables near the surface at Stations Minqin, Ejina Banner on 22—24 April 2009  
(a) wind speed (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) sea level pressure (units: hPa); and (c) temperature (units:  $^{\circ}\text{C}$ )

中国环境监测总站万本太等<sup>[14]</sup>参考国外有关标准,通过统计近年来我国沙尘天气过程中的颗粒物浓度,结合我国沙尘天气发生的情况和特点,提出了基于沙尘浓度的沙尘天气分级标准(表 1)。本文采用这种基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准来进行对比分析。图 4 给出了民勤、额济纳旗两个站的沙尘暴前后的  $\text{PM}_{10}$  的变化情况。民勤站在 22 日 20 时之前(图 4a),  $\text{PM}_{10}$  的值为  $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  左右, 23 日 04 时达到  $2063.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ,一直到 23 日 21 时,  $\text{PM}_{10}$  一直维持在  $2000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  以上,根据万本太的标准达到了沙尘暴级别。在这段时间额济纳旗记录的天气现象为强沙尘暴。24 日 02 时  $\text{PM}_{10}$  的值降低到了  $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  以下, 24 日 12 时以后  $\text{PM}_{10}$  又降低了很多,处于  $200 \sim 300 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  之间,25 日沙尘天气逐渐结束。从图 4b 可以看出:22 日 14 时之前内蒙古西部的额济纳旗站  $\text{PM}_{10}$  的值较小,22 日 16 时,  $\text{PM}_{10}$  为  $2025.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ , 22 日 22 时,额济纳旗  $\text{PM}_{10}$

值急剧增大到达  $2505.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ,一直到 23 日 15 时,  $\text{PM}_{10}$  的一直维持在  $2000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  以上,根据万本太的标准达到了沙尘暴级别。在这段时间额济纳旗记录的天气现象为沙尘暴。23 日 18 时  $\text{PM}_{10}$  的值降低到了  $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  以下,24 日 19 时开始,  $\text{PM}_{10}$  的值降低较多,均在  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  以下,沙尘天气逐渐结束。与图 3 比较分析得知,  $\text{PM}_{10}$  浓度峰值的出现较地面风速峰值出现的时间滞后,这与岳平等<sup>[15]</sup>的研究结果相近。还有研究<sup>[16-17]</sup>表明利用  $\text{PM}_{10}$  的监测可以准确判断沙尘暴前沿的到达时间。

表 1  $\text{PM}_{10}$  浓度与沙尘暴定义的关系(引自万本太等,2004)  
Table 1 The relation of  $\text{PM}_{10}$  concentration and dust storm (from Wan et al. 2004)

	$\text{PM}_{10}$ 浓度限值(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ )	持续时间
浮尘	$600 \leq \text{PM}_{10} < 1000$	$\geq 2$ 小时
扬沙	$1000 \leq \text{PM}_{10} < 2000$	$\geq 2$ 小时
沙尘暴	$2000 \leq \text{PM}_{10} < 4000$	$\geq 2$ 小时
强沙尘暴	$\geq 4000$	$\geq 1$ 小时

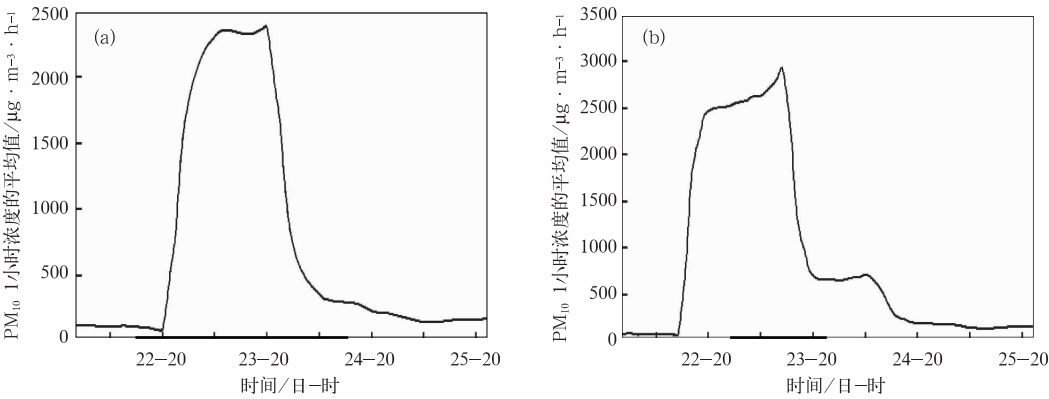


图 4 2009 年 4 月 22—24 日沙尘暴前后  $\text{PM}_{10}$ (单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 的变化特征  
(a) 民勤; (b) 额济纳旗(横坐标上加粗的部分表示沙尘出现的时间段)

Fig. 4 The evolution of  $\text{PM}_{10}$  before and after dust storms (units:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ )  
(the bold part on the abscissa represents the time of dust appearance) from 22—24 April 2009  
(a) Minqin; (b) Ejina Banner



3 沙尘过程模拟分析

3.1 模式介绍

本文的模拟采用雷航等<sup>[11]</sup>发展的中国科学院大气物理研究所的沙尘(暴)数值预测系统 IAPS 2.0, 选择模拟区域大致是(15°~65°N、75°~135°E), 中心点取为(40°N、105°E)。水平格距采用 45 km, 垂直分层 22 层。模拟时初值采用每隔 6 小时的水平分辨率为 1°×1°的 NCEP 再分析资料。模拟时间是 2006 年 4 月 22 日 20 时至 24 日 20 时, 积分 48 小时。模式中将起沙粒径( $d$ )分为 6 组: $d \leq 2 \mu\text{m}$  (黏土),  $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$  (细粉土),  $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$  (中粉土),  $22 \mu\text{m} < d \leq 52 \mu\text{m}$  (大粉土),  $52 \mu\text{m} < d \leq 90 \mu\text{m}$  (细沙),  $90 \mu\text{m} < d \leq 125 \mu\text{m}$  (中沙)。

3.2 地面沙尘浓度模拟与验证

由于目前常规的观测资料没有沙尘浓度和垂直沙通量的结果, 本文采用每 3 小时地面天气现象和模拟的地面沙尘浓度做定性比较, 用来检验模式在

范围、强度上对沙尘过程的模拟效果。地面观测天气现象是大气底层起沙、输送和沉降的综合效果, 采用地面天气观测现象与模拟沙尘浓度比较虽然不是很严格, 但是不失为一种检验模拟结果的方法<sup>[14]</sup>。图 5 是 2009 年 4 月 23 日模拟的沙尘浓度与同时刻地面沙尘天气现象对比。从地面沙尘记录看, 22 日沙尘暴发生在蒙古国西南部的阿尔泰山和杭爱山之间的戈壁, 然后东移南下影响我国的新疆、甘肃、内蒙古等地, 并在内蒙古中部加强(图略)。23 日 08—17 时, 蒙古国的南部戈壁部分地区仍有特强沙尘暴, 沙尘范围扩大到内蒙古中西部、甘肃中西部、宁夏、陕西北部以及山西中北部等地。其中在甘肃的敦煌、内蒙古西部局部地区出现了强沙尘暴。模拟的沙尘浓度大值区与强沙尘暴的范围较为一致, 玉门、敦煌等地区强沙尘暴也模拟出来了。比较白天早间和下午的沙尘浓度分布, 可以发现, 下午的强度和范围都要小一些, 具有日变化。沙尘暴的强度以及强度演变均与地面天气现象较为一致。从气象卫星沙尘监测图(图 6)中可以看到, 从内蒙古的中西部一直到蒙古国的南部, 有很长的沙尘带, 据国家卫星气象中

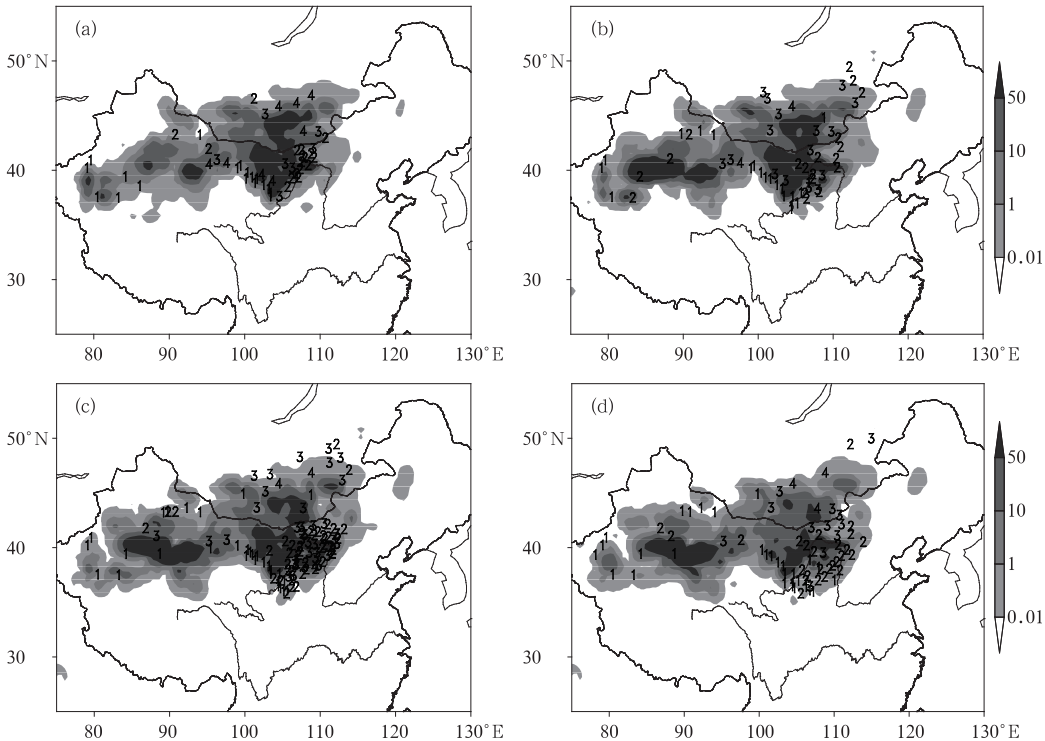


图 5 2009 年 4 月 23 日模拟的沙尘浓度(阴影, 单位:  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )和地面观测现象  
(a) 08 时; (b) 11 时; (c) 14 时; (d) 17 时

1 代表地面观测的浮尘, 2 代表扬尘, 3 代表沙尘暴, 4 代表强沙尘暴

Fig. 5 A comparison of the simulated surface dust concentration (shaded, units:  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and observed dust storm records

(a) 08:00 BT; (b) 11:00 BT; (c) 14:00 BT; (d) 17:00 BT on 23 April 2009  
(1, 2, 3, 4 represents floating dust, blowing dust, dust storm and severe dust storm, respectively)

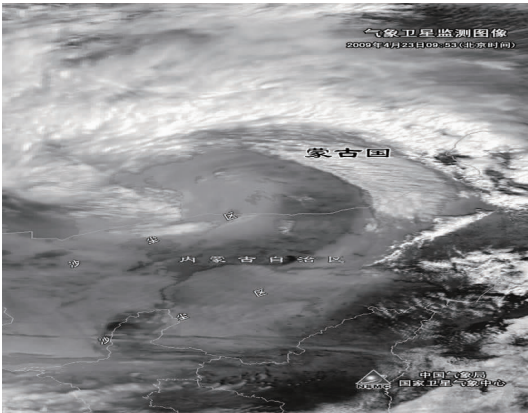


图 6 2009 年 4 月 23 日 09:53 卫星  
沙尘监测图(引自国家卫星气象中心)  
Fig. 6 The satellite images on 09:53 BT 23 April  
2009 (from National Satellite Meteorological Center)

心<sup>[18]</sup>估算沙尘的影响范围有  $23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

上述检验表明,模式模拟沙尘的范围和强度(定性的)的时间和空间变化与实况比较一致,模式具有较高的合理性和可用性。但是可以看到模拟的区域比观测的偏大一些。

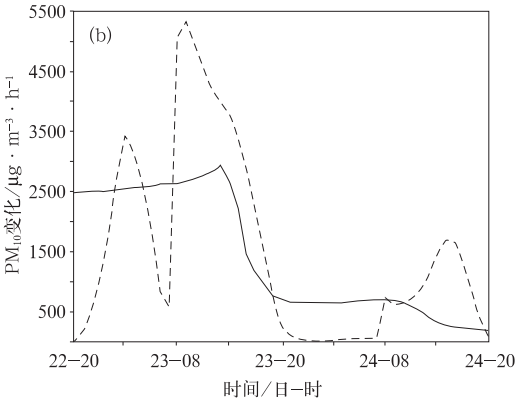
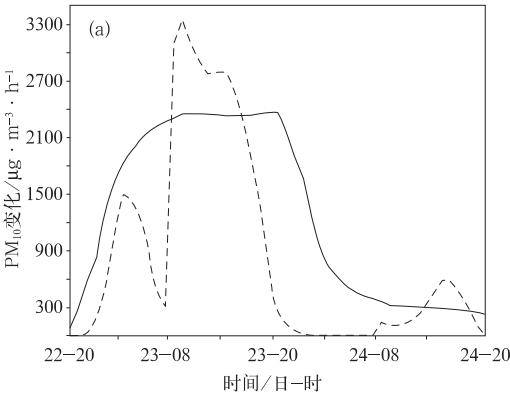


图 7 2009 年 4 月 22 日 20 时至 24 日 20 时模拟和观测  $\text{PM}_{10}$   
(单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 的演变(实线:观测;虚线:模拟)  
(a) 民勤; (b) 额济纳旗

Fig. 7 The evolution in simulated and observed  $\text{PM}_{10}$  (units:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ) from 20:00  
BT 22 to 20:00 BT 24 April 2009 (solid: observation; dashed: simulation)  
(a) Minqin; (b) Ejina Banner

3.4 起沙机制的分析

本文采用模式输出的每小时垂直沙通量来分析起沙源地以及起沙强度。图 8 是模拟的 4 月 23 日 08 时至 24 日 08 时总的地面起沙量,可以看到这次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是我国南疆盆地、甘肃、内蒙古的西部以及蒙古国南部。从起沙的量来看,在内蒙古巴彦淖尔盟附近的起沙量超过了  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,塔里木盆地地区也有一个超过  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的大值中心。其次在新疆东部、甘肃北部、蒙古国南部也出现了超过  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$

3.3 模拟的地面  $\text{PM}_{10}$  与观测的比较

为了进一步对地面沙尘浓度的模拟效果进行检验,本文利用 1 小时平均的  $\text{PM}_{10}$  的观测资料与模式模拟的粒径在  $11 \mu\text{m}$  以下的沙尘浓度进行单站检验,选取民勤(代表河西走廊)、额济纳旗(代表内蒙古西部地区)为代表站。从图 7 可以看出,民勤地区沙尘天气观测的最强值出现在 23 日 06—20 时左右,模拟的沙尘强度最强值也出现在 07—17 时这一时段,相对观测沙尘天气持续的时间要短一些。额济纳旗地区观测的沙尘浓度最大值出现在 23 日 13 时,模拟的  $\text{PM}_{10}$  浓度的较大值出现的时间要早一些,出现在 23 日 10 时左右,但是  $\text{PM}_{10}$  总的变化趋势是基本一致的。模拟结果与单站观测资料的对比表明,模式能比较好地再现出沙尘浓度随时间的演变趋势,但由于模拟的沙尘浓度是瞬时值,而观测是每小时的平均,因此,模拟的沙尘浓度比观测值明显偏大。

•  $\text{s}^{-1}$  的小中心。从图 8 各粒径的起沙可以看出,起沙过程贡献最大的沙尘粒子的粒径不尽相同,但是明显看出起沙量贡献最大的是粒径在  $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$  的沙尘粒子(图 8b)。

3.5 沙尘输送分析

沙尘的垂直输送主要是靠气流一定的上升运动和中低层大气流场决定的。为了解沙尘高低空差异和沙尘输送机制,我们分析沙尘浓度垂直剖面图。23 日 08 时(图 9a),蒙古气旋发展最强,纬向分布来看,三个区域的沙尘浓度大于  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,从地面

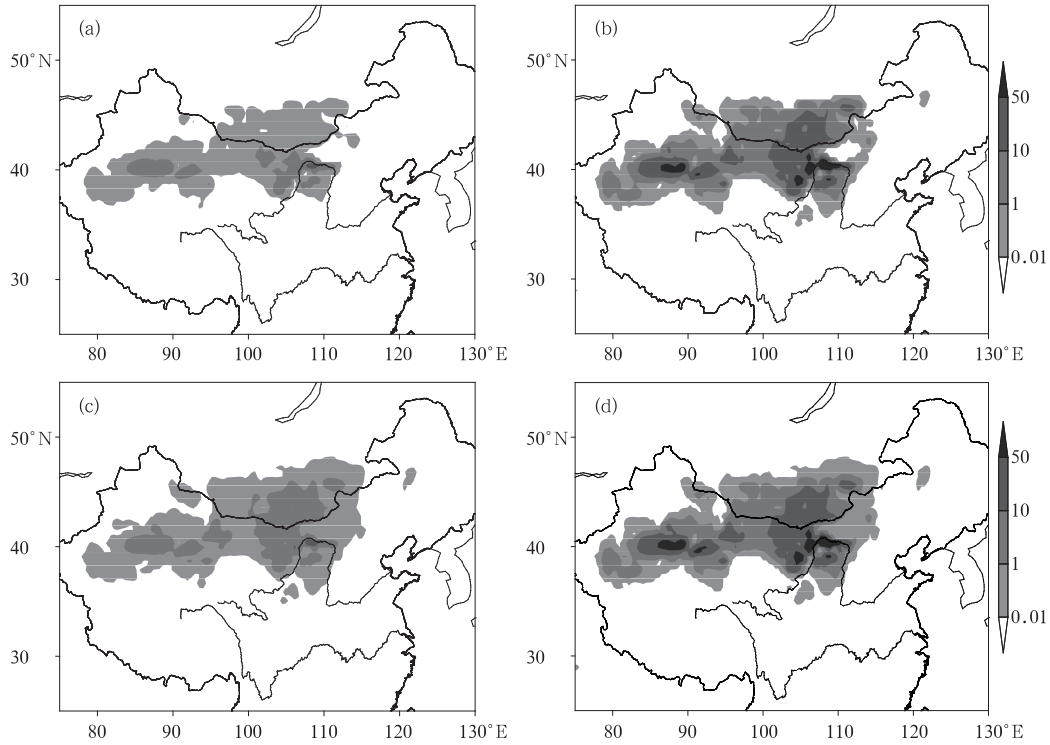


图 8 2009 年 4 月 23 日 08 时至 24 日 08 时地面瞬时的起沙量(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a)  $d \leq 2 \mu\text{m}$ ; (b)  $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$ ; (c)  $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$ ; (d) 总和  
Fig. 8 The simulated instant dust emission flux for different particulate size group  
(unit: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 April 2009  
(a)  $d \leq 2 \mu\text{m}$ ; (b)  $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$ ; (c)  $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$ ; (d) total

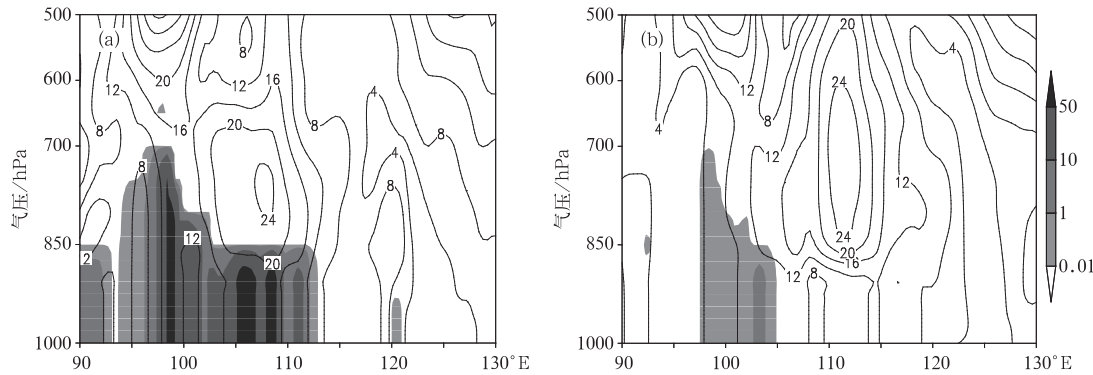


图 9 沿着  $45^\circ\text{N}$  的沙尘浓度垂直剖面图(阴影,单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )和  
风速大小(实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a) 2009 年 4 月 23 日 08 时; (b) 23 日 20 时

Fig. 9 The latitude-height vertical cross section along  $45^\circ\text{N}$  of simulated dust concentration  
(shaded,units: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and wind speed (solid,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a) 08:00 BT 23 April 2009; (b) 20:00 BT 23 April 2009

到 700 hPa 之间。此时  $105^\circ \sim 110^\circ\text{E}$  之间低层风速增大,超过  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沙尘向东输送。23 日 11 时(图略),沙尘暴发展最强,沙尘浓度垂直输送从地面到 550 hPa 附近, $110^\circ \sim 115^\circ\text{E}$  之间,低层风速超过  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沙尘继续向东输送。23 日 20 时(图 9b)开始,沙尘浓度减小, $97^\circ \sim 105^\circ\text{E}$  之间沙尘浓度均小于  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,沙尘垂直输送的高度在 700 hPa 附近,较前几个时段垂直输送的高度下降。一直到

24 日又出现了比较大范围的沙尘浓度区域,低层风速减小到  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沙尘不再被大风向东输送。这些变化与地面观测天气现象的变化趋势是一致的。综合分析整个沙尘浓度的垂直变化,可以发现:此次沙尘过程中,沙尘垂直输送的高度在 550 hPa 以下,沙尘输送白天强于晚上,起沙后的沙尘粒子的输送主要靠对流层低层的大风来输送,大风能将沙尘远距离地输送。



## 4 结论与讨论

本文对2009年春季4月22—24日一次由蒙古气旋系统造成的强沙尘暴过程进行了分析,给出此次过程中几个观测站的气象要素和 $PM_{10}$ 的演变与沙尘暴的关系,在分析的基础上采用沙尘数值模拟系统对此次过程进行了模拟研究,主要结论如下:

(1) 此次强沙尘暴天气是蒙古气旋引导冷空气东移南下,在南下过程中经过南疆盆地、内蒙古中西部、甘肃等地均出现沙尘天气,从观测资料分析沙尘暴的强度我们得到,范围与蒙古气旋的发展和移动有着密切的关系。地面冷锋入侵是沙尘暴爆发的重要动力机制。锋区前后存在强变压梯度,在梯度偏差风的作用下,使近地层风速陡升,掀起地表沙尘,形成沙尘暴或强沙尘暴天气。沙尘暴经过前后地面的温、压和风速有剧烈变化:沙尘暴天气来临前,地面空气呈干热状态,处于低气压控制之下,而在沙尘暴过境时,地面气温显得相对较低,地面气压急剧上升,处于高压控制之下,地面风速骤增,卷起大量沙尘。沙尘暴或强沙尘暴期间, $PM_{10}$ 一直维持在 $2000 \mu g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ 以上,当 $PM_{10}$ 等于或小于 $200 \mu g \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ ,沙尘暴天气趋于结束。 $PM_{10}$ 浓度峰值的出现较地面风速峰值出现的时间滞后,可见观测的 $PM_{10}$ 与沙尘暴强度有较好的对应关系。

(2) 沙尘数值预报系统对该次强沙尘暴过程的模拟表明,其结果能较好地反映出这次沙尘过程的主要时间和演变特征,模拟的沙尘浓度大值区与观测到的强沙尘暴的范围较为一致,比较白天早间和下午的沙尘浓度分布发现,下午的强度和范围都要小一些,具有日变化。为进一步验证模式效果,在此基础上利用 $PM_{10}$ 的观测资料和模拟的粒径在 $11 \mu m$ 以下的沙尘浓度进行单站检验,模式也能比较好地再现出沙尘浓度随时间的演变趋势。这次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是南疆塔里木盆地、甘肃、内蒙古的西部及蒙古国南部,起沙量均超过 $50 mg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。对不同地区起沙过程贡献最大的沙尘粒子的粒径不尽相同,但是对起沙量贡献最大的是粒径在 $2 \mu m < d \leq 11 \mu m$ 的沙尘粒子。

(3) 此次强沙尘暴,沙尘垂直输送的高度在550 hPa以下,白天沙尘输送强于晚上,这可能是由于白天的上升运动较强,而白天大气的层结稳定度低于晚上导致的。起沙后的沙尘粒子主要靠对流层低层的大风长距离输送。这次沙尘暴与赵琳娜等<sup>[19]</sup>研究2002年3月一次强沙尘暴的输送情况相似,沙尘输送都发生在对流层低层,但沙尘输送的高度要低一些。孙建华等<sup>[12]</sup>分析2006年春季一次强沉降沙

尘暴发现,这次过程是在对流层中低层偏西风作用下输送到华北等地。由此可以从一定程度上总结出沙尘暴过程输送的一些相似特征。

应当指出,近年来发生的强沙尘暴过程不是很多,本文只是对2009年的个例做了研究。此外,模式模拟的结果比实际观测沙尘暴出现站点范围要大一些,存在虚报,模式还有待于改进。

## 参考文献

- [1] 中国气象局. 沙尘天气年鉴(2000—2009)[M]. 北京:气象出版社.
- [2] 钱莉,杨永龙,殷玉春,等. 一次飑线引发的大风强沙尘暴诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(3):42-48.
- [3] 张金艳,李勇,蔡芎宁,等. 2006年春季我国沙尘天气特征及成因分析[J]. 气象, 2010, 36(1):59-65.
- [4] 王益柏,费建芳,黄小刚. 应用 Models-3/CMAQ 模式对华北地区一次强沙尘天气的研究初探[J]. 气象, 2009, 35(6):46-53.
- [5] 王锡稳,刘治国,黄玉霞,等. 河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析[J]. 气象, 2006, 32(7):102-109.
- [6] 申红喜,李秀连,石步鸿. 北京地区两次沙尘暴天气过程对比分析[J]. 气象, 2004, 30(2):12-16.
- [7] 张志刚,赵琳娜,矫梅燕,等. 一次引发强沙尘天气的快速发展的蒙古气旋的诊断分析[J]. 气象, 2007, 33(5):28-35.
- [8] 薛建军,刘月巍,牛若芸,等. 2002年3月18—22日强沙尘暴分析[J]. 气象, 2004, 30(9):39-44.
- [9] 孙建华,赵琳娜,赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用实验[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(2):125-142.
- [10] Shao Y R, E Jung, and L M Leslie. Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system[J]. J. Geophys. Res, 2002, 107:4814-4836.
- [11] 雷航,林朝晖,孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3):669-683.
- [12] 孙建华,赵琳娜,赵思雄. 2006年春季一次引起华北地区强沉降的沙尘暴过程的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(3):339-349.
- [13] 张仁健,徐永福,韩志伟. 北京春季沙尘暴的近地面特征[J]. 气象, 2005, 31(2):9-10.
- [14] 万本太,康晓风,张建辉,等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3):9-9.
- [15] 岳平,牛生杰,沈建国,等. 一次特强沙尘暴的微气象要素及 $PM_{10}$ 观测分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1):122-123.
- [16] 杨民,王式功,李文莉,等. 沙尘暴天气对兰州市环境影响的个例分析[J]. 气象, 2004, 30(4):47-50.
- [17] 赵琳娜,孙建华,王超,等. 2006年春季最强沙尘暴的数值分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(3):314-316.
- [18] 中国气象局国家卫星气象中心. 气象卫星沙尘监测报告[M]. 北京:气象出版社, 2009, 14:1-1.
- [19] 赵琳娜,孙建华,赵思雄. 2002年3月20日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1):73-79.