

## 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

孙建华<sup>1</sup> 赵琳娜<sup>2</sup> 赵思雄<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

**摘要** 2006年春季是我国北方地区2000年以来强沙尘暴过程最多的一年, 浮尘和扬沙天气更是频繁发生。尽管, 4月16~17日过程不是2006年春季最强的沙尘暴过程, 但其在华北地区引起了严重的沉降, 尤其对京津地区影响较大。这是一次由蒙古气旋引发的强沙尘暴过程。利用沙尘天气预测系统(IAPS 2.0)对该次强沙尘暴过程进行了模拟试验, 结果表明: 该系统对沙尘天气的起沙和输送过程有较好的模拟能力, 基本模拟出了这次强沙尘暴的发生和移动; 沙尘受对流层中低层偏西风的作用输送到华北地区, 并从山东半岛越过渤海湾向东输送; 主要的沙尘源地是蒙古国南部和我国西北的内蒙古、新疆西部、甘肃、陕西北部, 而起尘最大的地区在蒙古国和内蒙古的沙漠、戈壁地区; 沉降最严重的地区是沙尘源区及其附近, 可达到  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其他地区的总沉降量在  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  左右。

**关键词** 沙尘天气 起沙 沙尘沉降 沙尘输送

**文章编号** 1006-9585 (2007) 03-0339-11 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

## Numerical Simulation on a Dust Storm Producing Strong Deposition over North China in the Spring of 2006

SUN Jian-Hua<sup>1</sup>, ZHAO Lin-Na<sup>2</sup>, and ZHAO Si-Xiong<sup>1</sup>

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

**Abstract** The dust-storm events occurred frequently in the spring of 2006, and the dust-in-suspension and blowing dust appeared almost every day over north part of China. The dust storm event of 16—17 April is not the most severe case during the spring of 2006, but severe deposition happened over North China, which affect Beijing, the capital of China. Therefore, the study of the case was concentrated on. The weather system causing dust storm was a Mongolia cyclone. On the base of weather system analysis, an integrated dust storm numerical modeling system (IAPS 2.0) is employed to simulate the dust storm event. The results indicate the system is capable for predicting the dust emission rate from surface and dust concentration in the atmosphere of individual dust storm event. It is noticed that the dust emission and dust concentration in the air have been simulated successfully. Simulated dust concentration agrees very well with observational weather phenomena at surface and satellite images. Based on successful numerical simulations, the hourly simulation results were used to analyze the dust sources and deposition caused by the dust storm. The dust source places are in southern part of Mongolia, the middle and west part of Inner Mon-

收稿日期 2007-02-15 收到, 2007-03-06 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405008、科技部科研院所社会公益研究专项 2004DIB1J031 和国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目 (Y0101)

作者简介 孙建华, 女, 1972年出生, 研究员, 主要从事中尺度天气分析和数值模拟以及沙尘暴的研究。E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

golian Autonomous Region, west part of Xinjiang Autonomous Region, Gansu, and north part of Shaanxi provinces. The most severe dust emission area is the desert and Gobi of Mongolia and Inner Mongolia Autonomous Region, but the deposition area is significantly wider than emission area, which almost affect the whole of north China. It is found the total deposition amount of this event is about  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  near the dust sources area and about  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  over the other area, respectively.

**Key words** dust storm, dust emission, deposition, transportation of dust

## 1 引言

我国北方属东亚沙尘暴多发地区之一<sup>[1]</sup>。虽然20世纪90年代沙尘暴的发生有所减少,但21世纪以来,特别是2000~2002年的3年间发生频率又明显增加,显著高于20世纪90年代的均值<sup>[2]</sup>。2006年春季我国北方沙尘暴频繁发生,中央台定义有18次沙尘天气过程,其中强沙尘暴过程5次,沙尘暴过程6次,扬沙过程7次,是2000年以来出现强沙尘暴天气过程最多的一年。4月16~17日沙尘天气在18次过程中不是最强的,但在内蒙古中部出现了能见度只有200 m的

强沙尘暴,由于夜间沙尘在经过京津冀地区上空时,输送减缓,沉降严重,因而,成为2006年春季影响北京最严重的沙尘天气。据估计北京市平均降尘量达  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这次较强沙尘暴过程是在何种形势下,由何种天气系统所引发?其沙尘源地位于何处?沙尘大体沿何种路径输送?华北和北京地区沉降过程是何种原因所致?这些问题应该进行讨论。

为了研究和实时预报沙尘天气的起沙和输送过程,赵琳娜等<sup>[3]</sup>和孙建华等<sup>[4]</sup>将起沙和输送模式与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>[5]</sup>在IAPS 1.0基础

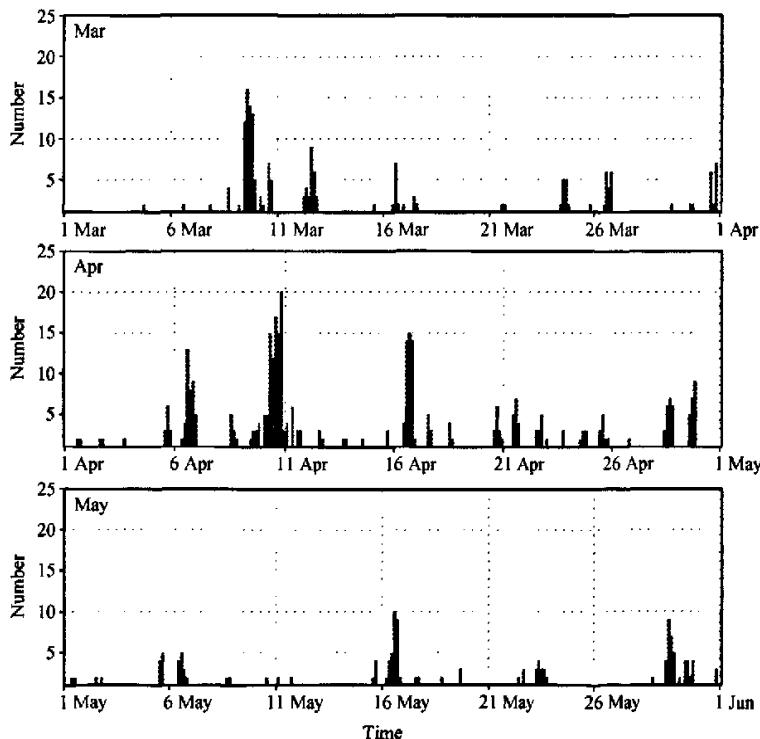


图1 2006年春季3~5月我国和蒙古国观测的逐日沙尘暴和强沙尘暴站数(单位:个)

Fig. 1 The daily station number of dust storm and severe dust storm in China and Mongolia from Mar to May 2006

上选用了包含有更为先进的陆面模式 (Noah LSM) MM5 系统与邵亚平发展的起沙模式和输送模式<sup>[6~10]</sup>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)。

本文将首先对 2006 年春季我国北方的沙尘暴过程进行分析, 然后, 采用新的沙尘天气预测系统 (IAPS 2.0), 对 2006 年春季 4 月 16~17 日在华北地区产生大范围沉降的沙尘天气过程进行模拟研究, 并采用模拟结果对它们的起沙和输送过程进行分析。

## 2 2006 年春季的沙尘过程

### 2.1 主要的沙尘过程

由于目前的常规观测中没有沙尘浓度的结果, 因此, 为了较为客观地分析每次沙尘暴天气的范围和强度, 我们采用了统计观测到沙尘暴天气的站点数来表征沙尘暴影响范围的相对大小。当然, 由于地面站的分布并不均匀, 这种方法只能大体

上表征沙尘暴影响范围的相对大小。图 1 给出了 2006 年 3、4、5 月地面每 3 h 观测达到沙尘暴强度 (包括强沙尘暴) 的站点数。可以看到影响范围较大的有 3 月 9~11 日、4 月 5~7 日、4 月 9~11 日、4 月 16~17 日等几次过程, 5 月虽然有 5 次沙尘暴过程, 但影响范围均没有 3、4 月沙尘暴过程的范围大。从图 1 还可以看出, 尽管 4 月 9~11 日的过程是 2006 年春季持续时间最长, 影响范围最大的沙尘暴过程, 但 4 月 16~17 日过程的影响范围也比较大。从浮尘和扬沙天气的分布 (图 2) 看, 3 月 10 日以后, 北方地区沙尘天气频繁发生, 一直到 4 月下旬以后, 发生频率和影响范围才开始减小, 5 月只有 15~18 日的过程影响范围较大。

为了更有针对性地研究华北地区的情况, 针对华北地区 ( $35\sim45^{\circ}\text{N}$ ,  $110\sim118^{\circ}\text{E}$ ) 做了专门的分析。图 3 给出了 2006 年 3、4、5 月华北地区地面每 3 h 观测的浮尘和扬沙站点数。可以看到, 该时段内华北地区发生沙尘天气的频率不算很高,

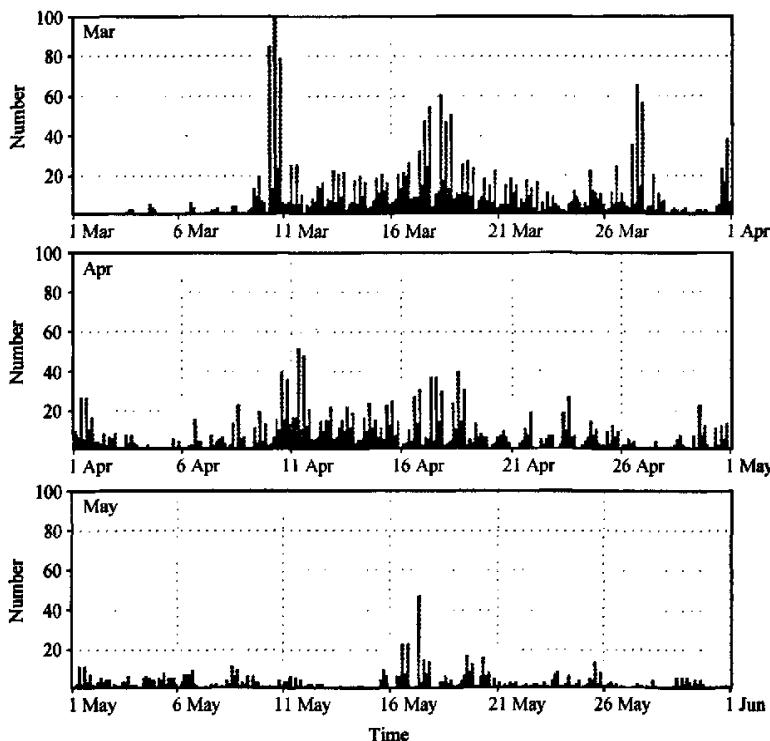


图 2 2006 年春季 3~5 月我国和蒙古国观测的逐日浮尘和扬沙站点数 (单位: 个)

Fig. 2 The daily station number of dust-in-suspension and blowing dust storm in China and Mongolia from Mar to May 2006

沙尘暴的发生更少, 华北地区大概有5次沙尘暴过程, 但观测到沙尘暴的站点数都小于10个(图略)。这是因为华北地区不是主要的沙尘源, 沙尘很难从源地大量输送到华北地区。

## 2.2 4月16~17日过程的影响天气系统

虽然, 2006年春季有多次强沙尘暴天气发生, 但我们的关注点是它引起的严重沉降, 尤其是对京津地区的影响。为此, 本文将主要研究4月16~17日个例。应当指出, 该次过程与一次新生的蒙古气旋的发展东移有关。对于蒙古气旋的发生发展, Zhao等<sup>[11]</sup>对2000年4月6日引起中国北方大范围沙尘天气的蒙古气旋已经进行了较深入的分析, 这里不再赘述, 只简单讨论一下沙尘暴过程中天气环流形势及影响天气系统的演变。

如前所述, 2006年4月16~17日蒙古国和我国内蒙古、华北北部出现了大范围的沙尘天气, 其中以16和17日下午的沙尘范围广、强度大。图4和5分别给出了500和850 hPa 15~18日的

形势场。15日0时(世界时, 下同), 500 hPa上一低槽位于巴尔喀什湖以北(图4a), 对应850 hPa有一气旋(图5a), 中心强度在850 hPa为1 280 gpm, 15日沙尘天气主要发生在蒙古国的北部和东部, 对我国的影响较小。16日0时, 500 hPa低槽位于贝加尔湖以西(图4b), 850 hPa上气旋中心东移到贝加尔湖以北, 加深到1 260 gpm(图5b), 但值得注意的是该气旋的南部在越过阿拉善高原后, 在河套地区形成一个低槽, 16日沙尘天气主要出现在蒙古国中部和我国内蒙古中西部。17日0时, 500 hPa上位于贝加尔湖北侧的低槽向东南方向发展, 并且分裂为两个中心(图4c), 850 hPa原位于贝加尔湖以北的气旋中心仍在原地, 但强度减弱, 而原气旋南部的低槽进一步加深, 并最后形成一个新的低压中心, 该新中心后来东移到蒙古国东部, 其强度已经超过在贝加尔湖附近原有的中心(图5c), 后者为新生蒙古气旋, 其西部和南部的西北或偏西大风对起沙和

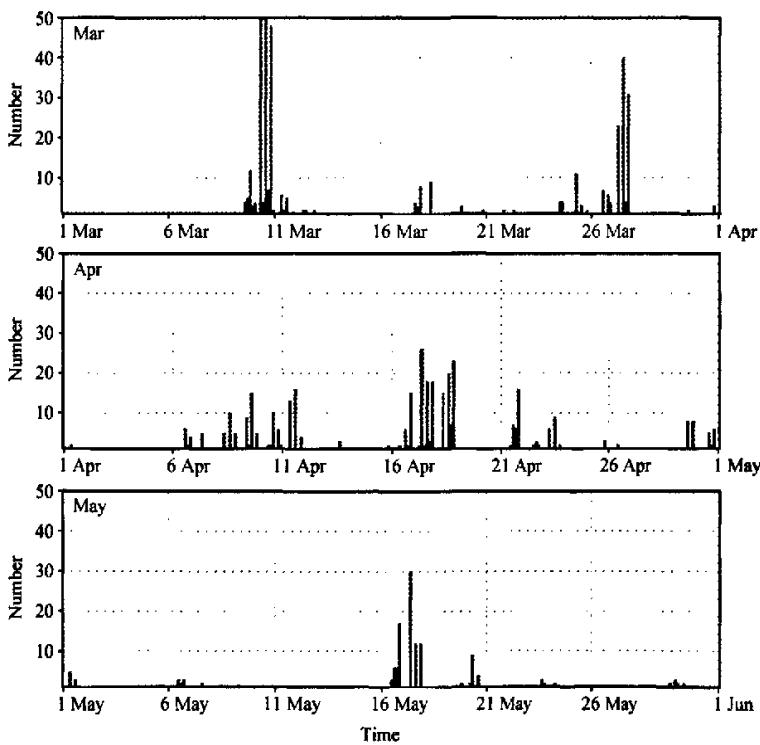


图3 2006年3~5月逐日华北地区(35°~45°N, 110°~118°E)浮尘和扬沙天气站点数

Fig. 3 The daily station number of dust-in-suspension and blowing dust storm in North China (35°~45°N, 110°~118°E) from Mar to May 2006

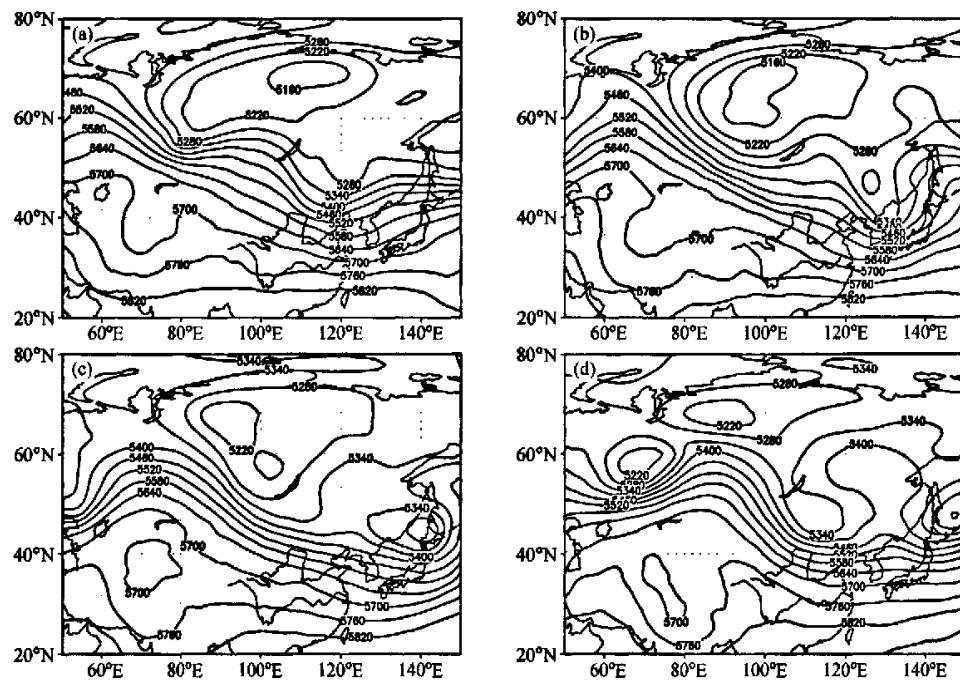


图 4 2006年4月15~18日500 hPa高度场(单位: gpm): (a) 15日0时; (b) 16日0时; (c) 17日0时; (d) 18日0时

Fig. 4 The geopotential height in gpm at 500 hPa from 15 to 18 Apr 2006; (a) 0000 UTC 15 Apr; (b) 0000 UTC 16 Apr; (c) 0000 UTC 17 Apr; (d) 0000 UTC 18 Apr

输送有非常重要的贡献, 虽然, 17日的沙尘天气范围和强度都较16日弱, 但17日的影响范围向南伸展, 影响到了华北北部地区。18日0时, 500 hPa贝加尔湖的低槽分裂为两部分, 北侧的中心仍在原地, 而南侧的低槽向南伸展到了河套地区(图4d), 850 hPa贝加尔湖的气旋中心已经减弱, 而蒙古国东部的气旋中心仍在原地维持少动(图5d), 继续造成影响, 因而18日的沙尘天气主要出现在我国华北地区, 一般为浮尘和扬沙天气。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 沙尘暴数值模式系统和模拟方案

为了提高赵琳娜等<sup>[3]</sup>和孙建华等<sup>[4]</sup>发展的集成沙尘预报系统对中国北方春季沙尘暴天气的模拟效果和预报能力, 雷航等<sup>[5]</sup>选用了包含有更为先进陆面模式(Noah LSM)的MM5系统与邵亚平发展的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)。IAPS 2.0中所采用的陆面过程模式为Noah模式, 该模式是在OSU陆面过程模式的基础上, 由美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家气候与环境预报中心(NCEP), 和美国宇航局空气动力学实验室(AFW)联合开发完成的新一代陆面模式。Noah陆面模式垂直方向分为4层, 分别为10、30、60和100 cm。相比于OSU陆面模式, Noah陆面模式考虑了一些新的陆面物理过程, 并对原先考虑较为简单的一些物理过程进行了改进。

采用沙尘天气预测系统IAPS 2.0, 对2006年4月16~17日发生的较强沙尘天气的起沙及输送过程进行了数值模拟。模式水平格距为45 km, 模拟区域大致为(25~60°N, 80~140°E), 中心点为(40°N, 115°E), 垂直方向为31层。气象模式的初始场和侧边界采用1°×1°NCEP再分析资料, 模拟时间为2006年4月16日0时~18日0时。

#### 3.2 模拟结果分析

由于只有极少的一些特殊观测点有沙尘浓度

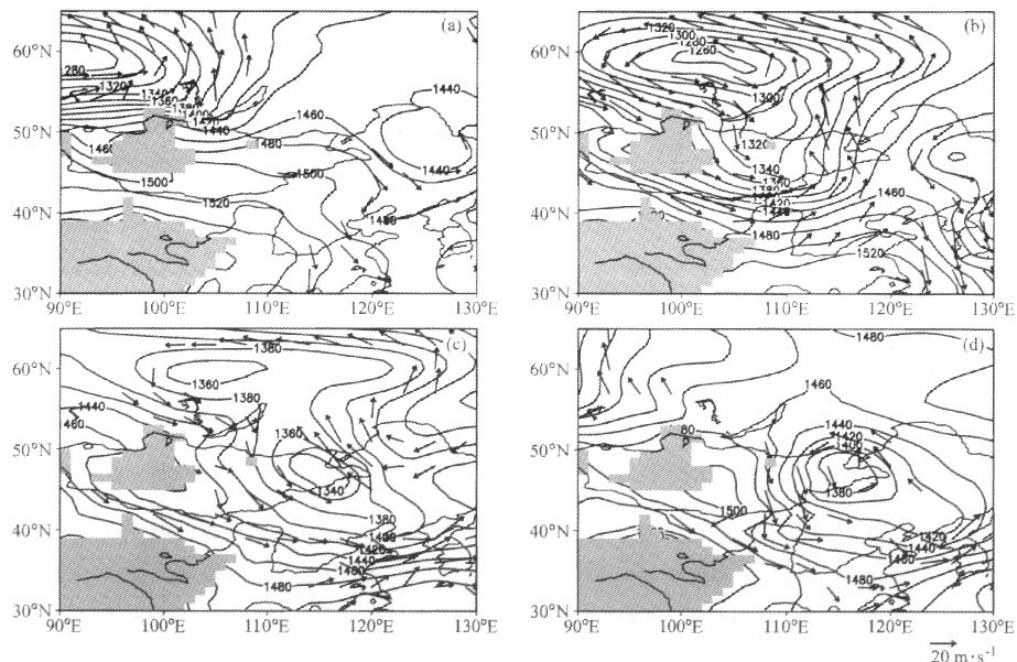


图 5 2006 年 4 月 15~18 日 850 hPa 高度场 (单位: gpm) 和风场 (箭头, 大于  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) 15 日 0 时; (b) 16 日 0 时; (c) 17 日 0 时; (d) 18 日 0 时。阴影为地形高度大于 1500 m 的区域

Fig. 5 The geopotential height in gpm and wind vector ( $>8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa from 15 to 18 Apr 2006: (a) 0000 UTC 15 Apr; (b) 0000 UTC 16 Apr; (c) 0000 UTC 17 Apr; (d) 0000 UTC 18 Apr. The shaded indicated the topography higher than 1500 m

资料, 而在常规观测中却没有, 因此, 我们这里将模拟的地面沙尘浓度与 3 h 地面天气现象做定性对比, 虽然不是非常严格, 但仍不失为一种可用的对照检查方法。总体而言, IAPS2.0 较为成功地模拟了该次沙尘暴的起尘和输送过程。模拟所得的沙尘天气区域, 2006 年 4 月 16 日在蒙古国和我国内蒙古中西部 (图 6a、b、c), 模拟的强沙尘浓度区与观测基本一致; 但甘肃、新疆西部和青海北部的模拟沙尘区, 在实况中没有观测到, 即模拟的沙尘范围比观测的大, 这也许是此区域观测站少, 缺乏观测资料所致。16 日在蒙古国和我国内蒙古中部地区都出现了沙尘暴和强沙尘暴天气, 模拟的地面沙尘浓度在该区域也达到了  $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  以上。17 日对华北地区的浮尘和扬沙天气模拟也比较好, 但在西部地区模拟的范围偏大偏强 (图 6d、e、f)。

为了检查模拟结果, 我们又采用了卫星云图做一比较。4 月 17 日中午以后在山东半岛和韩国

的西部也观测到了浮尘天气, 卫星图像显示 17 日早上浮尘已经到达山东和渤海湾附近 (图 7)。模拟的地面沙尘浓度 (图 6e、f) 显示, 17 日下午沙尘天气没有影响到山东和渤海湾, 但 850 hPa 的沙尘浓度分布显示 (图 8), 沙尘已经从空中输送到山东, 并越过渤海湾影响到朝鲜半岛的西部。17 日 06 时沿  $37^\circ\text{N}$  的垂直剖面显示沙尘主要是在  $800\sim500 \text{ hPa}$  之间向东输送越过渤海湾的 (图 9a), 浓度达到了  $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上。逐时的垂直剖面分析可以看到沙尘的源地在  $115^\circ\text{E}$  以西,  $120^\circ\text{E}$  以西大部分沙尘都沉降到了地面。中层风速在西部较小 (图 9a), 一般在  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下, 因此, 大量沙尘没有能够长距离输送, 而是在源地附近沉降了; 在东部, 中低层的风速逐渐增大,  $120^\circ\text{E}$  以西中层风速都在  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上, 使沙尘未能大量沉降而有可能迅速向东输送。与图 5 的气旋和大风区对比发现, 17 日气旋中心在蒙古国东部, 而沙尘天气主要出现在我国华北, 因为气

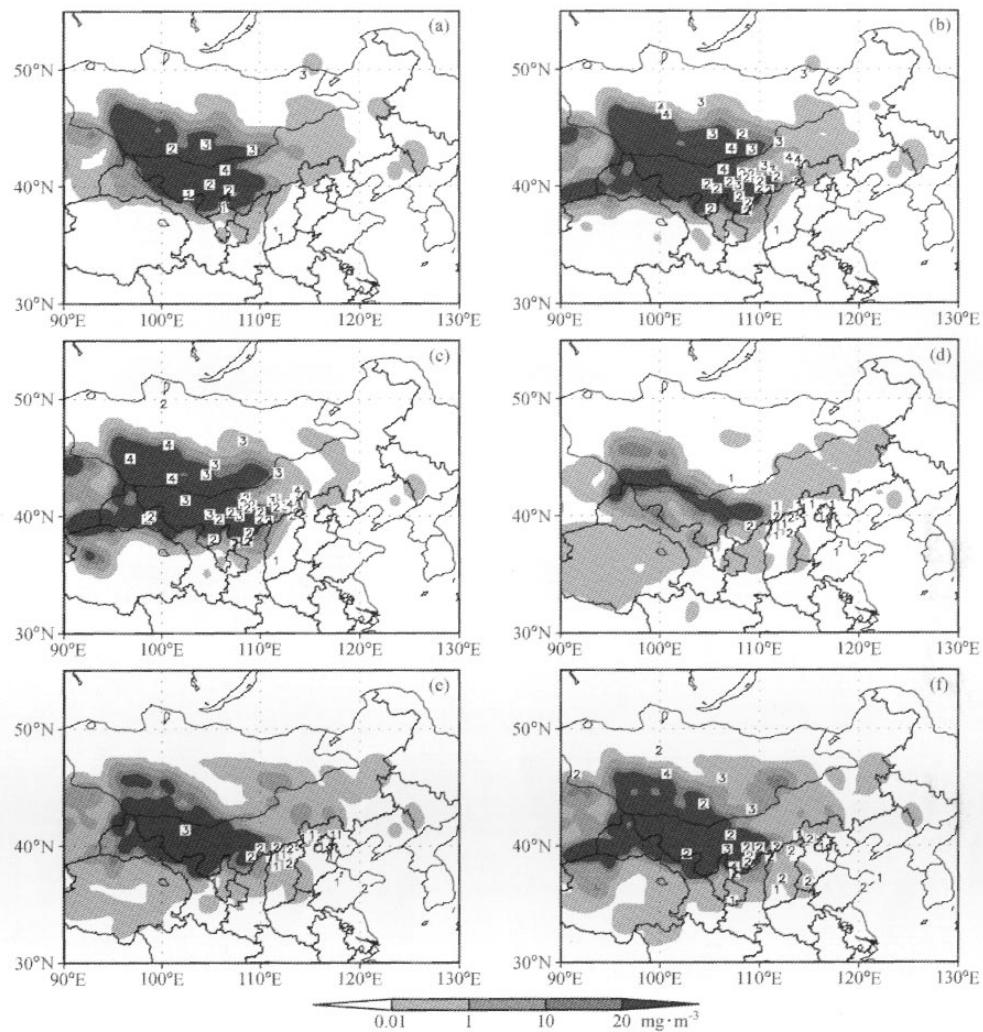


图 6 2006年4月16~17日模拟的地面沙尘浓度(数字: 1为浮尘, 2为扬沙, 3为沙尘暴, 4为强沙尘暴)和地面观测的天气现象: (a) 16日03时; (b) 16日06时; (c) 16日09时; (d) 17日0时; (e) 17日03时; (f) 17日06时

Fig. 6 A composition of simulated surface dust concentration and observed weather phenomena at surface (1, 2, 3, 4 representing dust-in-suspension, blowing dust, dust storm and severe dust storm, respectively): (a) 0300 UTC 16 Apr; (b) 0600 UTC 16 Apr; (c) 0900 UTC 16 Apr; (d) 0000 UTC 17 Apr; (e) 0300 UTC 17 Apr; (f) 0600 UTC 17 Apr

旋西部的西北气流到达气旋南部后分为两支, 一支为东南气流, 另一支为偏西气流, 正是偏西气流将沙尘带到华北地区, 并越过渤海湾。

这次过程在华北产生了大量的沉降, 特别是对京津地区影响较大。从模拟结果(图6)看, 17日确实影响到了华北北部。这里选取北京附近的沙尘浓度时间-高度剖面看沙尘输送到京津地区的

时间和影响(图9b), 由该图可见, 沙尘对北京的影响从16日21时一直持续到18日0时, 500 hPa以下都达到 $0.01 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 在17日09~12时还有增强, 达到 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从风速的演变看, 低层风速有白天减弱, 夜间增强的明显日变化, 白天风速的减弱使沙尘在北京上空积聚, 傍晚时浓度达到最大, 之后, 随着风速的增加, 沙尘向

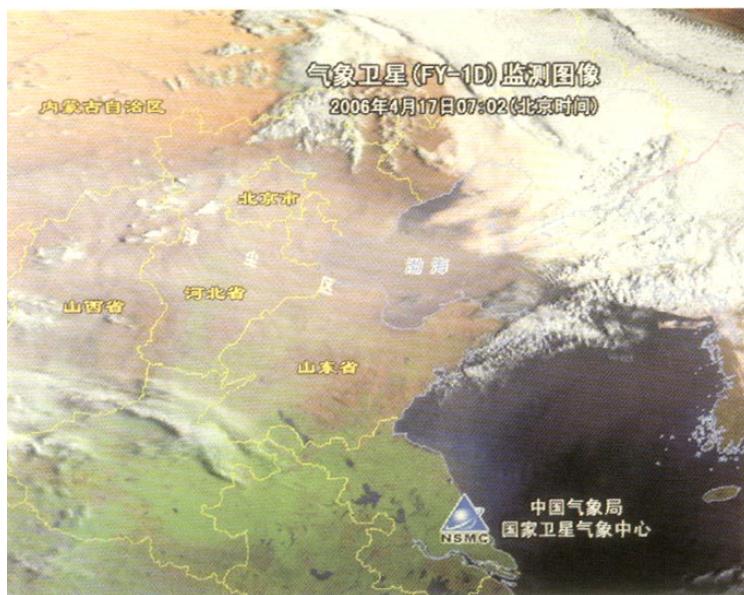


图 7 2006年4月17日07时(北京时间, 16日2300 UTC) FY-1D 监测图(引自国家卫星气象中心)

Fig. 7 The satellite images of FY-1D at 2300 UTC 16 Apr 2006 (from National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration)

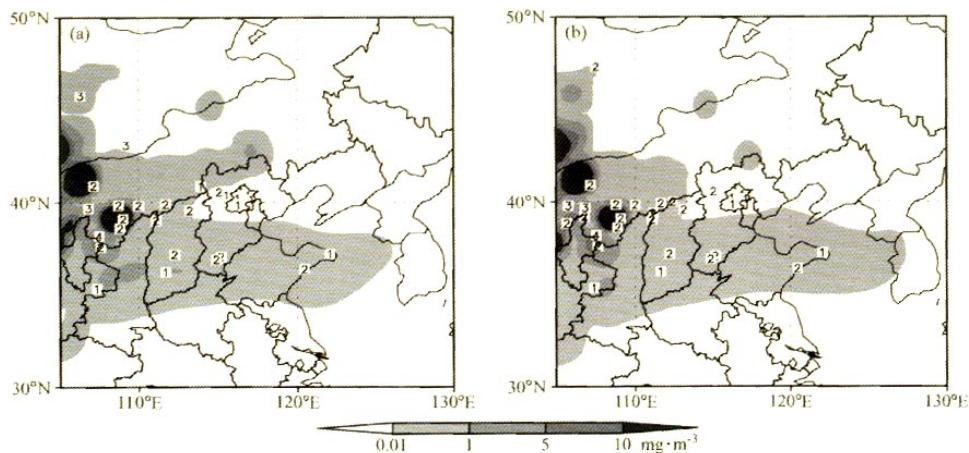


图 8 2006年4月17日模拟的850 hPa沙尘浓度(数字: 1为浮尘, 2为扬沙, 3为沙尘暴, 4为强沙尘暴)和地面观测天气现象: (a) 17日06时; (b) 17日09时

Fig. 8 A composition of simulated dust concentration at 850 hPa and observed surface weather phenomena (1, 2, 3, 4 representing dust-in-suspension, blowing dust, dust storm and severe dust storm, respectively); (a) 0600 UTC 17 Apr; (b) 0900 UTC 17 Apr

东输送加快, 浓度降低。从北京的观测探空分析发现, 从16日开始, 北京的低层有一逆温层, 层结非常稳定, 并且从16~17日逆温层逐渐降低和

增强, 逆温层在17日0时达到最强(图10), 在900 hPa附近其温度增加7 °C, 同时风速在逆温层以上迅速增强, 从 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

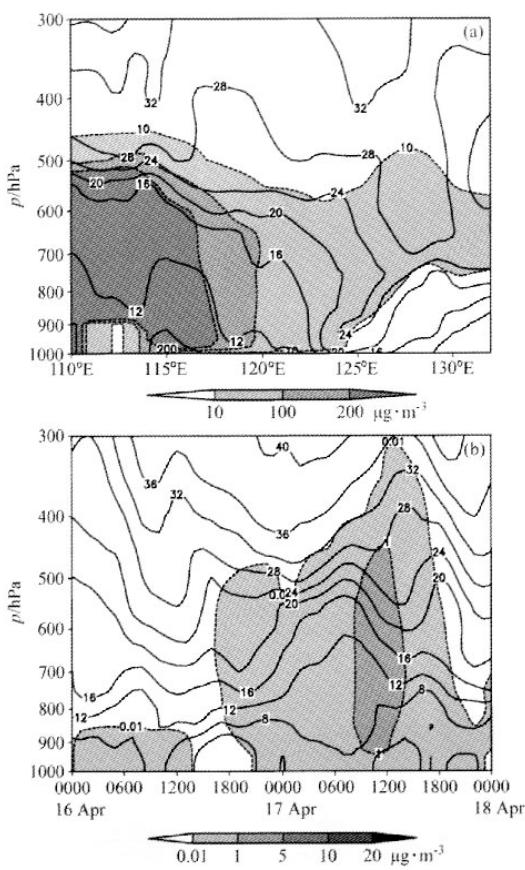


图9 (a) 2006年4月17日06时模拟的沿37°N的沙尘浓度(阴影)和风速(实线, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ )的纬向-高度剖面以及(b) 2006年4月16日0时~18日0时模拟的北京附近(40.5°N, 116°E)沙尘浓度和风速的时间-高度剖面

Fig. 9 (a) The latitude-height vertical cross section along 37°N of simulated dust concentration (shaded, units:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and wind speed (solid, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 0600 UTC 17 Apr, 2006; (b) the time-height vertical cross section of simulated dust concentration (shaded, units:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and wind speed (solid, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) near Beijing (40.5°N, 116°E) from 0000 UTC 16 Apr to 0000 UTC 18 Apr 2006

北京的稳定层结和低层的弱风非常有利于中层输送到此的沙尘在低层沉降。

综上所述, 2006年4月16~17日过程的模拟沙尘范围与观测的沙尘天气范围比较一致, 沙尘预测系统(IAPS 2.0)较好地反映了起沙和输送过程, 较准确地模拟了该次过程的影响区域和时间, 模拟的结果大体符合实际。因此, 可以在此

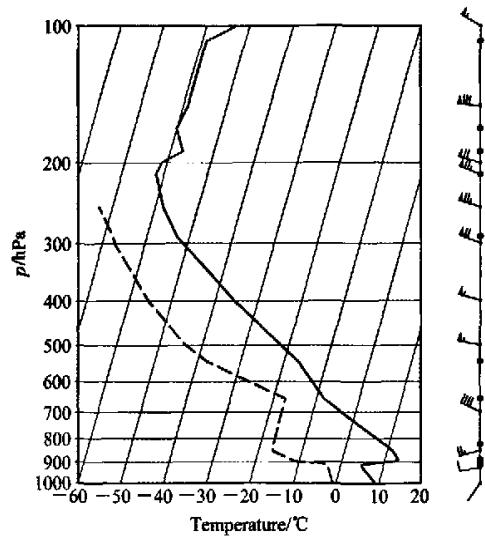


图10 2006年4月17日0时北京的探空曲线(粗实线: 温度, 虚线: 露点)

Fig. 10 Composite sounding on skew T-log $p$  diagrams on 0000 UTC 17 Apr 2006 at Beijing, bold solid line denotes temperature, dashed line denotes dew-point

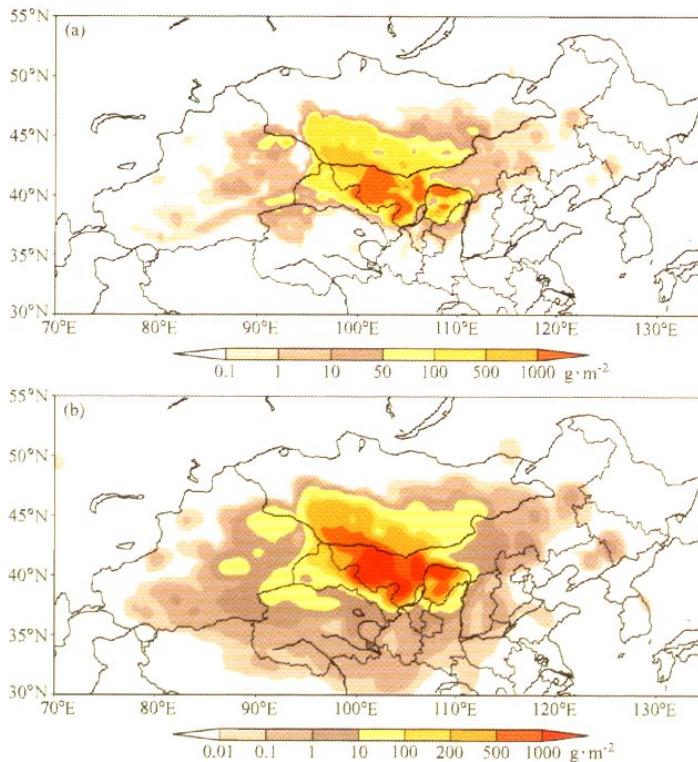
基础上, 利用模拟结果对这次过程的沙尘源地和沉降过程进行更多的分析。

### 3.3 起尘和沉降过程分析

前面已经提到这次过程虽然在2006年春季的强沙尘暴过程中强度不是最大, 但其影响严重, 沙尘输送到华北地区后, 大量沉降, 估计北京市平均降尘量达 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。我们利用模拟结果计算了从16日0时到18日0时共2天的起尘和沉降量(图11)。起尘区主要在蒙古国南部和我国的内蒙古、新疆西部、甘肃、陕西北部, 起尘最大的地区在蒙古国和内蒙古的沙漠、戈壁地区, 强度达 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 其他区域一般在 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。沉降区域比起尘范围大的多, 除了东北三省以外的北方地区, 都有明显的沉降, 沉降最严重的地区是沙尘源区及其附近, 其他地区的总沉降量在 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。北京附近的模拟总沉降量也在 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。

## 4 结论和讨论

本文首先对2006年春季的沙尘天气进行了分析, 2006年春季是我国北方地区2000年以来强沙

图 11 模拟的 2006 年 4 月 16 日 0 时~18 日 0 时的 (a) 总起沙量和 (b) 总沉降量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )Fig. 11 The simulated (a) total dust emission and (b) total deposition in  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  from 0000 UTC 16 Apr to 0000 UTC 18 Apr 2006

尘暴过程最多的一年,浮尘和扬沙天气更是频繁发生;华北地区浮尘和扬沙发生频率相对较少。

4月16~17日过程虽然不是2006年春季最强的过程,但其在华北地区产生了严重的沉降,对京津地区影响较大,因此,利用较完整的集成沙尘天气预测系统(IAPS 2.0)对4月16~17日的强沙尘暴过程进行了模拟试验,并采用模拟结果进一步分析了沙尘过程的起沙、输送和沉降。模拟结果显示,IAPS 2.0预测系统对沙尘天气的起沙和输送过程有较好的模拟能力,大体复制出了该次强沙尘暴的发生和移动。在模拟结果与实况观测基本一致的情况下,本文还对这次强沙尘暴的起沙和输送过程进行了深入的分析研究,发现:模拟结果较好地再现了沙尘输送过程,即沙尘在对流层中低层偏西风的作用下输送到华北地区,并从山东半岛越过渤海湾的过程;主要的沙尘源地是蒙古国南部和我国内蒙古、新疆西部、甘肃、陕西北部,起尘最大的地区在蒙古国和内蒙古的

沙漠、戈壁地区;沉降最严重的地区是沙尘源区及其附近,其他地区的总沉降量在  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  左右。这在一定程度上可定性说明此次强沙尘暴过程出现强沉降的可能成因。

应当指出,2006年春季发生的强沙尘暴过程比较多,值得研究的个例不少,本文只是对其中一例做了研究。此外,模式的模拟效果也并不完美,特别是在蒙古国和我国内蒙古地区是有一些虚报情况,还需要对起沙模式做进一步改进。

### 参考文献 (References)

- [1] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 千里黄云—东亚沙尘暴研究. 北京: 科学出版社, 2006. 228pp  
Zeng Qingcun, Dong Chaohua, Peng Gongbing, et al. *Gigantic Yellow Cloud—Dust Storms in East Asia* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006. 228pp
- [2] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. 应用气象学报, 2002, 13 (2): 193~200

- Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in chinese), 2002, 13 (2): 193~200
- [3] 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. 气候与环境研究, 2002, 7 (3): 279~294
- Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of dust emission in North China. *Climatic and Environmental Research* (in chinese), 2002, 7 (3): 279~294
- [4] 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. 气候与环境研究, 2003, 8 (2): 125~142
- Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. An integrated modeling system of dust storm suitable to North China and applications. *Climatic and Environmental Research* (in chinese), 2003, 8 (2): 125~142
- [5] 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. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 669~683
- Lei Hang, Lin Zhaohui, Sun Jianhua. An improved dust storm prediction system and its simulation experiments. *Climatic and Environmental Research* (in chinese), 2005, 10 (3): 669~683
- [6] Shao Y. A model for mineral dust emission. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 20239~20254
- [7] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 22437~22443
- [8] Lu H, Shao Y. A new model for dust emission by saltation bombardment. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 16827~16842 V
- [9] Lu H, Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modeling system and its applications. *Environ. Modell. Software*, 2001, 16: 233~249
- [10] Shao Y, Jung E J, Leslie L M. Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107: 4814~4836
- [11] Zhao Linna, Zhao Sixiong. Diagnosis and simulation of a rapidly developing cyclone related to a severe dust storm in East Asia. *Glob. Planet. Change.*, 2006, 52: 105~120