

文章编号:1001-8166(2005)09-0999-13

# 基于 GRAPES 的西北地区沙尘暴数值预报模式及其应用研究<sup>\*</sup>

李耀辉<sup>1,2,3</sup>, 赵建华<sup>1,2</sup>, 薛纪善<sup>2</sup>, 陈德辉<sup>2</sup>, 沈学顺<sup>2</sup>, 王 红<sup>2</sup>, 陈 勇<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;  
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;  
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**介绍了中国气象局兰州干旱气象研究所和中国气象科学研究院数值预报研究中心合作研制的耦合于 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)的沙尘暴数值模式 GRAPES\_SDM。该模式包括沙尘的起沙、传输、吸湿增长、并合、干沉降与云下清洗等详细的物理过程, 可以对沙尘暴的起沙和空气中沙尘浓度进行模拟和预报。在此基础上形成了西北地区的沙尘暴数值预报模式系统, 并于 2005 年 4 月开始在兰州中心气象台试运行, 同时还将模式结果与卫星遥感资料反演的沙尘暴监测结果进行了对比验证。以 2005 年 4 月 17~19 日和 5 月 28~29 日发生在西北地区的 2 次强沙尘暴为例, 利用 GRAPES\_SDM 对这两次沙尘天气的起沙、传输、扩散直至消散进行了数值模拟。结果表明, 模式输出的沙尘时空分布与实况观测和卫星云图监测的沙尘分布范围基本一致, 说明该模式系统对西北地区沙尘暴天气的起沙、传输有较好的模拟和预报能力。

**关键词:**西北地区; GRAPES\_SDM; 沙尘暴数值预报; 应用

中图分类号:P425.5<sup>+</sup>5 文献标识码:A

## 0 引言

沙尘暴就是强风将地表沙尘吹起使空气很混浊, 水准能见度小于 1 km 的天气现象<sup>[1]</sup>。可见, 能否起沙, 进而形成沙尘暴, 主要决定于大风和丰富的沙尘这两个必要因素。如果没有足够的地表沙尘, 沙尘暴就不会发生。但是, 增加植被覆盖率, 改变地表覆盖状况, 使沙漠变绿洲, 荒漠变草场, 需要几代人长期不懈的努力。因此在相当长的时期内, 丰富的沙尘源依然存在, 沙尘暴的发生将不可避免。那么, 在这种情况下, 深入研究沙尘暴的起沙形成机理, 研发适合沙尘暴多发区的数值预报模式, 准确判断起沙与否, 从沙尘暴爆发初期就做出有效预警, 是减轻沙尘暴危害和不良影响、对防灾减灾具有重要

意义的现实性工作, 而且, 还有很高的科学价值。

据此, 要对沙尘暴进行准确预警预报, 首先要预报出大风天气, 然后落脚于对能否起沙的预报, 即预报这种大风天气能否在沙尘源地吹起沙尘粒子而形成沙尘暴。现阶段对大风天气的预报, 可以通过现代天气预报技术来实现; 而对于能否起沙的客观定量预报, 数值预报技术是一种十分有效的途径。目前, 我国对沙尘暴预报主要以定性推断为主, 而数值预报技术的研发和应用则相对滞后。没有沙尘暴数值技术, 对能否起沙、何时起沙、起沙以后能否形成沙尘暴、沙尘浓度如何、沙尘暴出现以后未来对下游地区的影响范围和强度如何等问题的客观、精细化的量化回答就难以实现。

\* 收稿日期: 2005-05-11; 修回日期: 2005-09-09.

\* 基金项目: 国家十五重点科技攻关项目“中国气象数值预报技术创新研究”(编号: 2001BA607B); 甘肃省气象局高性能计算机开发项目, 兰州区域气象中心开放实验室项目; 甘肃省气象局“十人计划项目”资助。

作者简介: 李耀辉(1961-), 男, 甘肃徽县人, 研究员, 在读博士生, 主要从事干旱气与环境变化研究. E-mail: li-yahui@163.com

已有一些沙尘模式研究方面的工作,如刘春涛<sup>[2]</sup>以及纪飞<sup>[6]</sup>等耦合 MM4 的沙尘模式,邵亚平等<sup>[3]</sup>的起沙数值模式,加拿大 Gong<sup>[4,5]</sup>开发的 NARCM 等。这些工作为今后的相关研究奠定了良好的基础,对起沙模式的进一步研发提供了经验。但是,仍然留有需要补充、完善之处,如起沙数值技术中的起沙机制需要进一步完善等。更为关键的是,以上这些研究,特别是国内的相关研究,其成果以发表论文居多,而应用于沙尘暴预报、预警实际业务的则基本没有。

西北地区是我国沙尘暴天气多发地区之一,有许多沙尘天气从这里向我国东部地区发展,形成沙尘暴灾害。因此,做好这一地区沙尘暴研究和定量预报、预警,某种程度上就抓住了我国沙尘暴准确预警、预报的关键。而目前的现状是,专门对西北地区沙尘暴数值模式的深入、系统的研究并应用于实际业务的尚不多见。

本文简要介绍了中国气象局兰州干旱气象研究所与中国气象科学研究院数值预报研究中心联合发展的沙尘暴数值模式系统——GRAPES\_SDM,然后以 2 次强沙尘暴为例,分析了该模式在 2005 年实际预报业务中的试用情况。

## 1 GRAPES\_SDM 模式系统简介

GRAPES\_SDM 是中国气象局兰州干旱气象研究所与中国气象科学研究院数值预报研究中心合作的科研成果——耦合于 GRAPES 的沙尘暴模式 (Sand and Dust Model) 系统,包括起沙、传输与沉降模式等过程。现简要介绍如下:

沙尘预报方程:将沙粒粒径谱分为 12 个档次,并给定每档的粒径  $d_i$  (表 2),设粒径为  $d_i$  的沙尘浓度  $C_i$  为预报量,其预报方程如下:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial C_i}{\partial t} \mid_{\text{transport}} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \mid_{\text{source}} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \mid_{\text{clear air}} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \mid_{\text{dry}} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \mid_{\text{below-clouds}} \quad (1)$$

其中,  $C_i$  为第  $i$  项的干沙粒质量比含量 (kg/kg)。其局地变化由动力 (传输)、源、晴空、干沉降以及云下清除 (降水湿沉降) 等过程构成。传输包括湍流扩散、对流以及气粒转化过程;源项包括沙源的排放;晴空过程 (clear sky process) 仅包括凝并。

### 1.1 传输 (Transport)

沙尘粒子的传输是由 GRAPES 模式采用半隐式、半 Lagrange 方法,由模式自己实现。

### 1.2 沙尘排放源项 (Source)

#### 1.2.1 光滑地表临界摩擦速度

起沙及沙尘输送过程涉及沙粒的受力问题。沙粒受到的力主要有重力、摩擦拖曳力、Saffman 力、Magnus 力、电场力与分子间的内聚力 (范德瓦耳斯力、静电力与毛细管力) 等。当沙粒受的净力有向上的分量时,沙粒就会上升;当沙粒上升足够多、足够高 (垂直输送) 又足够远 (水准输送) 时,就产生了沙尘天气。一般的研究往往只注重水准风速的影响,而忽视了由 Saffman 力、Magnus 力、电场力以及分子间的内聚力等的临界风速与摩擦速度求起沙通量。

在 GRAPES-SDM 中,除了考虑重力与拖曳力的影响外,还考虑了分子间内聚力的作用。其临界摩擦速度  $u^*$  采用 Iversen 等<sup>[9]</sup> 在 1982 年给出的结果:

$$u_{iS}^*(r_s) = \begin{cases} \frac{0.129K}{(1.928R_e^{0.092}-1)^{0.5}} & 0.03 < R_e \leq 10 \\ 0.129K\{1-0.0858\exp[-0.0617(R_e-10)]\} & R_e > 10 \end{cases} \quad (1)$$

其中,雷诺数  $R_e = aD_p^x + b$ ,  $a = 1.331\text{cm}^{-x}$ ,  $b = 0.38$ ,  $x = 1.56$ ,  $D_p$  为沙粒粒径,单位为 cm,  $K = \left(\frac{\rho_p g D_p}{\rho_a}\right)^{0.5} \cdot \left(1 + \frac{0.006}{\rho_p g D_p^{2.5}}\right)^{0.5}$ 。注意,(1)式中的系数 0.006 的单位是  $\text{cm}^{0.5}/\text{s}^2$ ;其余都是无量纲量。

#### 1.2.2 非光滑地表临界摩擦速度

对于非光滑地表,一方面,粗糙元的存在覆盖了部分地表而使得沙粒不易受风侵蚀;另一方面,粗糙元会吸收空气动能而使得沙粒不易启动。因此,需考虑粗糙元的影响<sup>[10]</sup>:

$$u_{iR}^*(D_p) = u_{iS}^* \left\{ 1 - \left[ \frac{\ln(Z_m/z_{as})}{\ln[0.35(10/z_{as})^{0.8}]} \right] \right\} \quad (2)$$

其中,  $Z_m$  (cm) 是初始不同土地覆盖类型的粗糙度长度,  $z_{as}$  ( $10^{-3}$  cm) 为裸地粗糙长度。

#### 1.2.3 土壤水分的影响

水分会在土壤粒子表面吸附成膜,在土壤粒子间毛细引力作用下形成水楔。在土壤水分未达到最大持水量之前,水分会增大沙尘粒子启动的临界摩擦速度。对此,采用 Fe'can 等<sup>[11]</sup> 在忽视形成水膜的分子作用力的条件下,提出的以下参数化方案<sup>[11]</sup>:

$$u_i^* = u_{iR}^* \begin{cases} 1 & \text{for } w \leq w \\ \left[1 + 1.21(w - w)\right]^{0.5} & \text{for } w > w \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $w$  与  $w$  是实际土壤的体积含水量 (土壤湿度)

与临界体积含水量,且:

$$\omega = 0.0014(\% \text{clay})^2 + 0.17(\% \text{clay})$$

#### 1.2.4 地面水平品质通量

Marticorena 等<sup>[10]</sup>在 White<sup>[12]</sup>工作的基础上加入品质与对数粒径的正态分布关系,而得到了跃移层水准品质通量与沙粒粒径的关系:

$$dF_h(D_p) = EC \frac{\rho_a}{g} u^* (1+R)(1-R^2) dS_{rel}(D_p) dD_p \quad (4)$$

其中,  $E$  是侵蚀地表占整个地表份额,  $C=2.61$  为比例常数,  $R=\frac{u^*}{u^*}$ ,  $\rho_a$  是空气密度,  $dS_{rel}(D_p)$  是单位地表中  $D_p \sim D_p + dD_p$  粒径之间的沙粒的覆盖率, 通过以下计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM(D_p)}{d\ln D_p} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_i} \exp\left(-\frac{(\ln D_p - \ln MMD_i)^2}{2\ln^2 \sigma_i}\right) \\ dS(D_p) = \frac{dM(D_p)}{\frac{2}{3} \rho_p dD_p} \\ S_{total} = \int_{D_p}^{\infty} dS(D_p) dD_p \\ dS_{rel} = \frac{dS(D_p)}{S_{total}} \end{array} \right. \quad (5)$$

其中,  $M(D_p)$  是  $D_p$  粒径粒子的品质,  $MMD_i$  为拟合对数正态分布函数集中第  $i$  个函数的中值粒径,  $\sigma_i$  为相应的标准差。

#### 1.2.5 地面垂直质量通量

垂直通量也叫沙通量,是由跃移沙粒中能悬移的沙粒产生。它表示在单位时间内单位水平面积上流过的品质。悬移—跃移层是由临界摩擦速度与下落末速度的比值决定。下落末速度是粒子重量与风拖曳力平衡时的速度,故而它是粒径与密度的函数。悬移—跃移层中的粒子粒径约  $50 \mu\text{m}$ 。低于此值的粒子,由于粒子间的聚合力使它们抱聚成团,故其临界摩擦速度将会递增。这意味着,为使这些粒子能够悬移,需要喷沙或冲击过程来瓦解其凝聚。由于沙粒的排放需要把跃移作为基础过程,故垂直通量常由其与水位通量的比值得到<sup>[9]</sup>。

采用 Alfaro 等<sup>[13]</sup>、Alfaro 等<sup>[14]</sup>以及 Shao<sup>[15]</sup>结果: 粒径在  $D_p \sim D_p + dD_p$  之间的跃移沙粒的垂直动能通量  $F_{kin}(D_p)$  为:

$$dF_{kin}(D_p) = \beta dF_h(D_p) \quad (6)$$

其中,  $\beta=16.300 \text{ cm/s}^2$ 。

跃移中通过喷沙破坏内聚力而能悬移的动能通量根据 Alfaro 等<sup>[16]</sup>的工作,可以用 3 个对数正态分布函数拟合。其相应的品质中值半径  $D_j$  为 1.99 cm、4.56 cm<sup>2</sup>、68 cm, 标准差为 0.96、0.62 及

0.21, 粘合能为 0.0453、0.0450 及 0.0447。在 3 个拟合中, 粒子的数浓度  $N_j$  与品质浓度  $F_{soil,j}$  相应为:

$$N_j = \frac{1}{e_j} \int_{D_p}^{\infty} p_j dF_{kin}(D_p) \quad (7)$$

$$F_{soil,j} = \frac{\pi \rho_p D_j^3}{6} N_j \quad (8)$$

总的输送沙粒(粒径  $D < 40 \mu\text{m}$ )的品质浓度  $F_{SD}$  为:

$$F_{SD} = \sum_{j=1}^3 F_{soil,j} \quad (9)$$

#### 1.3 垂直扩散

垂直扩散主要考虑对流与湍流扩散过程。对流扩散过程由 GRAPES 模式用半隐式一半 Lagrange 方法实现; 湍流扩散由下述方程求得:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} K_v C \quad (10)$$

其中,  $K_v$  是湍流扩散系数。

(10)式表示,当沙尘在地表被排放后,就会产生一定的浓度梯度; 在此梯度下,沙尘由湍流在一个时间步长里面扩散到高空。

#### 1.4 晴空过程

对于无云的晴空而言,仅考虑沙粒凝并过程,凝并过程也仅局限于沙尘粒子谱的各档之间。

所谓凝并,指粒子做运动时,轨迹相互交叉就会发生碰撞并合,其结果使得粒子数浓度减少,但总的品质浓度未改变。凝并方程为<sup>[18,19]</sup>:

$$\frac{dN_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} K_{i,k-i} N_i N_{k-i} - N_k \sum_{i=1}^{\infty} K_{k,j} N_i \quad (11)$$

其中, 核函数  $K_{i,j}$  是第  $i$  档与  $j$  档粒子之间并合概率, 由 Brownian 运动、湍流运动与惯性运动三者构成<sup>[18]</sup>;  $N_k$  是第  $k$  档的粒子数浓度。

#### 1.5 云下清除

在有云的情况下,粒子的云下清除指由于 Brownian 运动、惯性碰撞、湍流切变流、热漂移、扩散漂移以及电漂移等运动形式使得粒子向水汽凝结体运动而被捕获的过程。

根据 Slinn<sup>[20]</sup>单位体积的云下清除率可以写为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} \Big|_{\text{below-clouds}} = f_{\text{cld}} \Psi(r_i) C_i \quad (12)$$

其中,  $r_i$  是第  $i$  档的平均粒径,  $f_{\text{cld}}$  是云覆盖度,  $\Psi$  是清除率。清除率依赖于粒子与下落水汽凝结体两者的粒径<sup>[21]</sup>。

#### 1.6 干沉降

干沉降方案参见文献<sup>[22]</sup>, 沉降后的沙尘含量变化为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = C_i \cdot [\exp(-\frac{V_t}{\Delta z} \cdot \Delta t) - 1] \quad (13)$$

其中,等式右边的  $C_i$  为起沙、传输、晴空以及云下清洗等过程后的沙尘品质比含量。 $\Delta z$  与  $\Delta t$  为模式垂直分辨率和时间步长。粒子下落末速度  $V_t$  由重力沉降项  $V_g$  与考虑地表状况及天气稳定度的湍流项组成:

$$\begin{cases} V_t = V_g & \text{模式其余层} \\ V_t = V_g + \frac{1}{R_a + R_s} & \text{模式底层} \end{cases} \quad (14)$$

其中,重力沉降项  $V_g$  为:

$$V_g = C \cdot \frac{2}{9} \frac{g}{\mu} (\rho_s - \rho_a) r_s^2 \quad (15)$$

其中,  $r_s$  为粒子吸水后经 k $\&\&$ ler 方程得到的半径。Cunningham 修正系数  $C$  为:

$$\begin{cases} C = 1 - \frac{\lambda}{r_s} (1.257 + 0.4 \exp(-1.1 \frac{r_s}{\lambda})) \\ \lambda = 6.54 \times 10^{-8} \frac{\mu}{1.818 \times 10^{-5}} \frac{P_0}{P} \left( \frac{T}{293.15} \right)^{0.5} \\ P_0 = 1.013 \times 10^5 \\ \mu = 145.8 \times 10^{-8} \frac{T^{3/2}}{T + 110.4} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\mu$  是空气粘性系数,  $\lambda$  是分子自由程,  $P$ 、 $T$  是压强与温度。

湍流项考虑了空气动力阻抗  $R_a$  与地表阻抗  $R_s$ , 尚未考虑植被阻抗的影响。空气动力阻抗与大气稳定度、摩擦速度及表面粗糙度有关。地表阻抗与地表含水量、地面物种、分子扩散系数及亨利常数有关。植被阻抗与地表植被种类及生理状况(季节)有关。 $R_a$  与  $R_s$  如下(公式 17):

$u_*$  为摩擦速度,  $g$  为重力加速度,  $A_{est}$  和  $p_{lip}$  为与土地覆盖类型有关的量。

## 1.7 Land use 信息

由(1)~(9)式可知, 沙尘垂直通量依赖于地面风速、地面粗糙长度、土壤质地与土壤湿度等因子。沙尘天气发生的首要条件是要有沙源存在。因此, 下垫面的沙源分布与土壤质地是沙尘模式中沙粒启动的必要条件。

GRAPES-SDM 模式中采用的沙源分布与土壤质地数据来自加拿大 CAM(Canada Aerosol Model)模式。其沙粒在单位地表所占份额的中国分布见图 1。

东亚的沙源主要集中在塔里木盆地、准格尔盆地、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙漠以及蒙古国南部和西

北部地区。

$$\begin{cases} R_a = \frac{1}{ku_*} (0.74 \ln \frac{z}{z_0} + 4.7 \frac{z}{L}) & \text{when } \frac{z}{L} \geq 0 \\ R_a = \frac{0.74}{ku_*} (\ln \frac{z}{z_0} - 2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 - 9 \frac{z}{L}}}{2}) & \text{when } \frac{z}{L} < 0 \\ R_s = \frac{1}{3u_*} \frac{1}{E_{in} + E_{in}} \frac{1}{r_s} \\ E_{in} = (\frac{S_t}{S_t + A_{est}})^2 \\ E_{in} = (1000 \times 2 \times r_s / p_{lip})^2 / 2 \\ S_t = \begin{cases} \frac{V_g u_*^2}{gv} \\ 1000 \frac{V_g U u_*}{g \cdot p_{lip}} \end{cases} \\ v = \mu / p \end{cases} \quad (17)$$

为了求解粗糙度, 土地覆盖类型划分为 15 类<sup>[17]</sup>(表 1)。

表 1 SDM 中的 Landuse

Table 1 Land use in SDM

分类	土地覆盖类型	物理高度 $h$ (cm)
1	常绿针叶林	2000
2	常绿阔叶林	4000
3	季节性针叶林	2000
4	季节性阔叶林	2000
5	针阔叶混合林	3000
6	草	20
7	庄稼	20
8	沙漠	0.2
9	苔藓	0.2
10	灌木、片状林地	100
11	长植物的湿地	2
12	冰盖、冰河	0.01
13	内陆河	0.001
14	海洋	0.001
15	城镇	1000

## 1.8 粒径分布

仅考虑了可被“悬移”输送的粒径  $d \leq 40 \mu\text{m}$  沙粒。本模式把粒径在  $0.005 \sim 40 \mu\text{m}$  之间的干沙尘粒子按粒径下限依次倍增的规律, 分为 12 档(表 2)。

## 2 2005 年度 2 次沙尘天气过程模拟

### 2.1 模式方案与初始条件

(1) GRAPES-SDM 模式基本参数。水平分辨

表 2 SDM 中的粒径分布(粒径单位:  $\mu\text{m}$ )Table 2 Spectrum of sand particle size ( $\mu\text{m}$ ) in SDM

档数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
粒径下限	0.005	0.01	0.02	0.04	0.08	0.16	0.32	0.64	1.28	2.56	5.12	10.24~20.48

率:  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 约 50 km; 垂直分辨率: 模式顶 15 km, 不等距分为 31 层; 时间分辨率: 600 s; 水平中心 ( $110^\circ\text{E}, 40.25^\circ\text{N}$ ); 水平格点数  $161 \times 81$ ; 模式结果 3 h 输出一次。

(2) 初始和边界条件: GRAPES 输出结果, 每 6 h 输入一次边界条件。

(3) 侧边界方案: 采用 Davies 松弛边界方案。

(4) 模式时间积分采用: GRAPES 非静力半隐式—半 Lagrange 方案。

(5) 降水方案: 显式降水与隐式降水一起考虑, 其中显式降水为 NCEP-3 级简单冰方案。

(6) 辐射传输: Duhia 短波辐射方案与辐射快速传输方案(rrtm)。

(7) 近地面层: Monin-Obukhov 方案。

(8) 陆面过程: 热扩散模式。

(9) PBL: MRF 方案。

(10) 积云对流参数化: Kain-Fritsch 方案。

## 2.2 2005 年 4 月 17~19 日沙尘暴过程模拟

受强冷空气与蒙古气旋的共同作用, 2005 年 4 月 17~20 日在中国西部地区及中蒙边界区域爆发了一次强沙尘暴天气。4 月 17 日沙尘暴产生后向东南方向移动发展, 影响到了甘肃中西部、宁夏北部、内蒙古中西部等地区, 其中甘肃民勤能见度为 0 km。

由于缺乏沙尘浓度的观测资料, 因此, 用 3 h 气象观测记录和卫星遥感监测的沙尘信息对模式结果进行检验。

### 2.2.1 模拟结果与观测记录对比分析

模拟时间: 4 月 17 日 08 时开始到 29 日 08 时结束, 共积分 48 小时。

模拟结果(图 2 左)表明, 4 月 17~19 日的沙尘暴实际上包含 3 个阶段的演变过程。第一个阶段是 17 日从蒙古国西部、毛乌素沙漠等地先后出现了沙尘天气, 其中以蒙古国西部的较强。随后, 一直向东发展, 于 17 时左右达到最强, 18 日 02 时减弱到最弱。第二个阶段从 18 日 10 时开始, 在第一次沙尘背景下, 于蒙古国中部、西部, 内蒙中部、西部(巴丹吉林沙漠、毛乌素沙漠)以及甘肃河西走廊等地又出现了一次沙尘暴过程, 同时青海北部也出现了沙尘天气。这次过程重点分布在南(内蒙中西部)、北(蒙万方数据

古国中西部)2 个区域, 在蒙古气旋的影响下同时向东移动, 偏北区的沙尘暴移动较快, 偏南区沙尘暴东移减弱的过程中向南扩散; 19 日 03 时, 浓度达到最小。第三阶段与第二阶段类似, 也是在沙尘源地又有新的强沙尘暴中心出现, 不过这次沙尘中心范围较小, 仅位于毛乌素沙漠, 强度也比较弱。

从相应的观测记录(图 2 右)看到, 模拟的沙尘分布范围基本上与之相吻合, 且随时间的移动、演变也颇为一致。但发现, 模拟的浓度明显偏大, 沙尘中心浓度值最强时达到  $10000 \sim 50000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 这可能与模式本身性能有关。

### 2.2.2 沙尘暴卫星监测信息对模拟结果的验证

NOAA-16 气象卫星沙尘监测图片<sup>[23]</sup>也表明了这一点。4 月 17 日 15 时模拟沙尘分布正确显示了 14:55 的敦煌地区与蒙古西南的沙尘信息(图 3)。

### 2.2.3 沙尘浓度的时间演变特征

选取敦煌、民勤、兰州、银川、北京与西宁等 6 站的模拟地面沙尘浓度变化曲线(图 4), 图中显示了以下特点:

(1) 沙尘浓度的时间变化出现了 2~3 峰结构, 表明这次沙尘暴出现了 2~3 次发展过程。

(2) 从峰值强度看, 民勤的沙尘浓度最大, 接近  $40000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 实况为民勤出现黑风暴(能见度 0 m)。

(3) 最强峰值的出现与消失具有突变性, 说明沙尘暴具有突发性的特点; 峰值宽度较窄, 表明沙尘天气系统移动迅速。

(4) 浓度峰值呈现由西向东的传播顺序, 敦煌最早出现峰值, 北京最后, 说明沙尘天气系统由西向东的移动特征。

(5) 沙尘浓度峰值不相重合而先后相错, 若从引发沙尘暴的单一系统角度分析, 一方面说明沙尘天气系统的移动性, 另一方面也包含了沙尘移动中局地的沉降过程; 若从多系统角度而言, 则表明各系统爆发时间不一致、强度不同的特点。

## 2.3 2005 年 5 月 27~28 日沙尘天气过程(以甘肃境内沙尘演变为重点)

受新疆低涡(冷锋)东移南压的影响<sup>[24~26]</sup>, 28

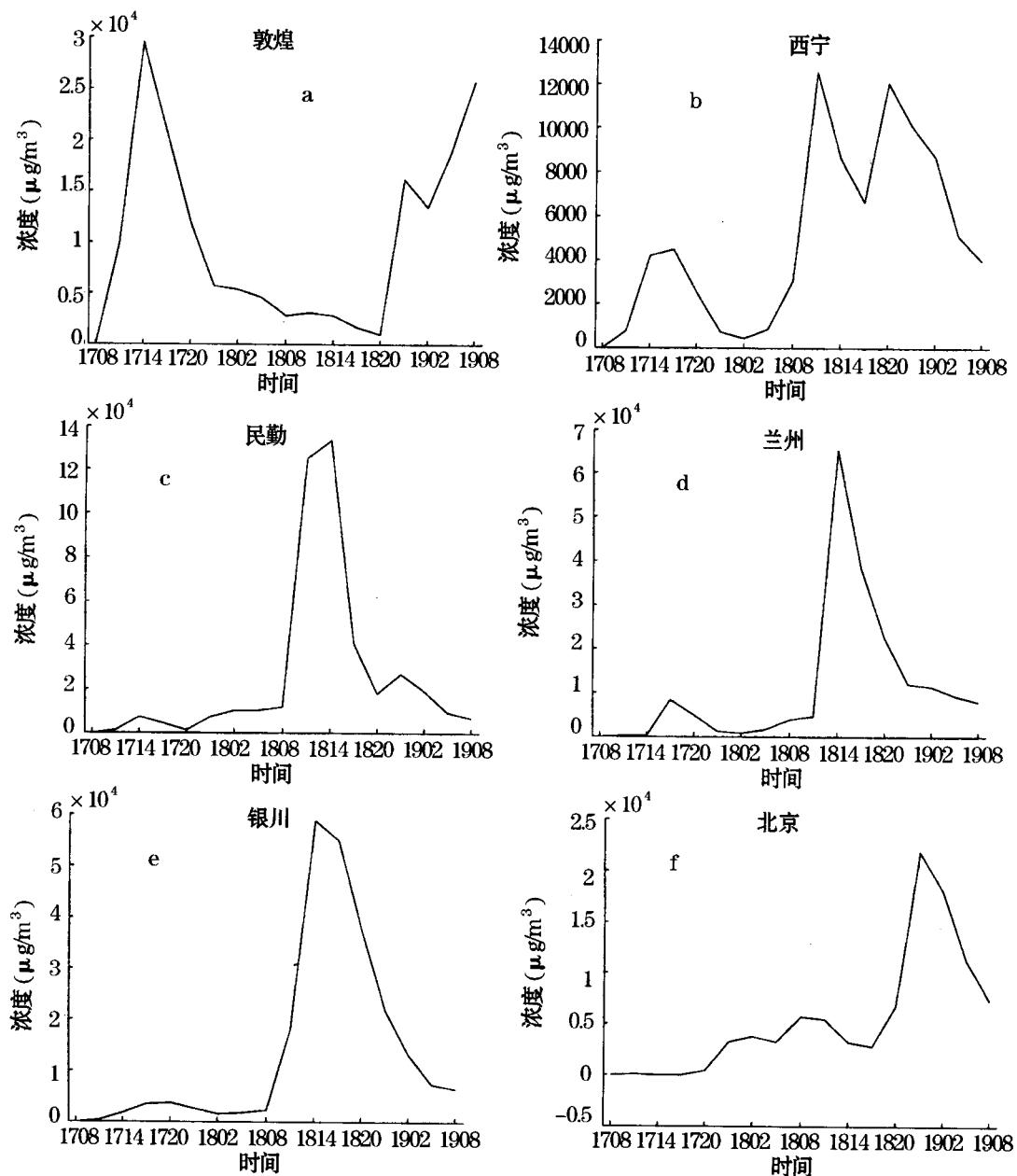
图 4 沙尘浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )时间演变曲线

Fig. 4 Time evolution curves of sand concentration( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of Dunhuang(a), Xining(b), Minqin(c), Lanzhou(d), Yinchuan(e), Beijing(f)

日凌晨甘肃省河西大部出现沙尘天气了,02 时开始,甘肃河西出现了沙尘天气,酒泉、鼎新出现了扬沙;05~08 时,张掖、民勤先后出现了沙尘暴,能见度为 0.8km,永昌、武威为扬沙。同时,内蒙古西部的阿拉善右旗出现了扬沙天气,能见度为 8 km。

下午 16 时 44 分,受分裂南下冷空气的影响,民勤再次出现沙尘暴,能见度急剧恶化,仅 100 m,10 分钟平均风速 12.8 m/s,最大风速 18.8 m/s;16 时 50 分左右能见度下降到 50 m 以下,出现黑风,8 分钟后迅速发展为特强沙尘暴(黑风暴),能见度 0 m,最大风速 20.8 m/s。

### 2.3.1 模拟结果分析

图 5 给出了 GRAPES\_SDM 模拟的 28 日 02、08 及 17 时沙尘浓度的空间分布变化。比较清楚地显示出了这次沙尘暴与上述观测情况基本一致的发生、发展演变过程。

从模拟结果来看,28 日 02 时,新疆、华北以及蒙古国西部出现沙尘天气。在甘肃,河西走廊西部的鼎新附近有弱的沙尘天气出现;08 时,鼎新沙尘东移,范围有所扩大;17 时,沙尘天气强烈发展,甘肃民勤和蒙古国西部是两个沙尘暴中心,民勤的沙尘浓度达到  $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,实况也表明,此时民勤

出现黑风,能见度为 0 m。

### 2.3.2 与卫星监测结果的对比

5月 28 日 11 时 22 分的气象卫星沙尘监测图<sup>[27]</sup>(图 6a)显示,从甘肃省民勤到腾格里沙漠有一明显的沙尘区,与模式模拟的 11 时的结果(图 6b)一致。说明 GRAPES\_SDM 模式能够比较成功地模拟和预报出沙尘暴发生发展的主要信息。

## 3 问题与讨论

GRAPES\_SDM 模式系统主要由天气模式 GRAPES 与沙尘气溶胶模式 SDM 耦合而成,SDM 模式由模式 GRAPES 驱动并为之提供初始和边界条件。本文首先说明了 GRAPES\_SDM 模式系统的起沙机制,然后对发生在 2005 年 4 月 17~19 日、5 月 27~28 日的 2 次强沙尘暴进行了模拟。通过模拟结果与实况观测记录和卫星遥感监测信息的对比分析发现,模式模拟的沙尘分布、演变特征与实况沙尘暴的发生发展基本一致,说明 GRAPES\_SDM 模式具有较好的模拟、预报沙尘天气的能力。

同时,通过模拟也发现 GRAPES\_SDM 本身存在的一些问题:

(1) 背景模式 GRAPES 尚有进一步发展、完善的余地。

(2) 模拟的沙尘浓度量级明显偏大,这主要是由于目前的 GRAPES 模式中为 SDM 计算临界摩擦速度提供的土壤湿度不够准确所致,它简单地由近地面空气湿度代替。根据起沙原理,模式土壤湿润度与实际土壤湿度之间的较大误差,将使临界摩擦速度的计算不够准确,自然造成起沙浓度的较大偏差。

(3) 西北地区是我国主要沙尘源区,地表状况较为复杂。显然,模式中土地利用类型(landuse)的准确与否是影响沙尘预报精度的重要因子之一。而模式中的我国北方地区的 landuse 仍然有一些不尽准确的地方。

鉴于此,下一步我们试图将适当的陆面过程模式嵌套在 GRAPES 中,由陆面模式输出 SDM 所需的土壤湿度,以提高沙尘浓度的计算精度。同时,用 EOS/MODIS 卫星遥感资料反演沙尘暴多发区——我国西北地区的土地利用(landuse),加入 GRAPES\_SDM 中,提高模式对沙尘源分布的准确描述。

## 参考文献(References):

- [1] Gu Junxi, Zhang Jijia, Chao Jiping, et al. Atmospheric Science Dictionary [M]. Beijing: China Meteorological Press, 五方数据

1994. 541. [顾钧禧,章基嘉,巢纪平,等.《大气科学词典》[M].北京:气象出版社,1994. 541.]
- [2] Liu Chuntao, Cheng Linsheng. Parameterization of the formation and transportation for sand-dust of the black storm and meso-scale numerical experiments [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55 (6): 726-738. [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] Shao Y. A model for mineral dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 20239-20254.
- [4] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia, 1. Network Observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D9), doi: 10.1029/10042002JD002632.
- [5] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L. Model simulation and validation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(9):4262.
- [6] Ji Fei, Qin Yu. The numerical simulation on duststorm over east Asia (I) Model developing[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32 (3): 384-392. [纪飞,秦瑜.东亚沙尘暴的数值模拟(1)模式建立[J].北京大学学报(自然科学版),1996,32(3): 384-392.]
- [7] Huang Liping, Wu Xiangjun, Jin Zhiyan. Schemes and applications of grapes model standard initialization [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16 (3): 374-384. [黄丽萍,伍湘君,金之雁. GRAPES 模式标准初始化方案设计与实现[J].应用气象学报,2005,16(3):374-384.]
- [8] Zhang Wancheng, Xiao Ziniu, Zheng Jianmeng. The application of three-dimensional variational assimilation in a  $\eta$ -coordinate meso-scale model [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24 (1): 71-76. [张万诚,肖子牛,郑建萌.三维变分同化在一坐标中尺度模式预报中的应用[J].高原气象,2005,24(1):71-76.]
- [9] Iversen J D, White B R. Saltation threshold on Earth, Mars and Venus [J]. *Sedimentology*, 1982, 29: 111-119.
- [10] Marticorena B, Bergametti G, Aumont B. Modeling the atmospheric dust cycle: 2. Simulation of Saharan dust sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 4 387-4 404.
- [11] Fe can F, Marticorena B, Bergametti G. Parameterization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas[J]. *Annales de Geophysical*, 1999, 17: 149-157.
- [12] White B R. Soil transport by winds on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84: 4 643-4 651.
- [13] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Modeling the size

- distribution of a soil aerosol produced by sandblasting [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 11 239-11 249.
- [14] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distribution in source areas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 18 075-18 084.
- [15] Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. The effect of saltation bombardment on the environment of dust by wind [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 12 719-12 726.
- [16] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies[J]. *Geophysical Research Letter*, 1998, 25: 991-994.
- [17] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, 4262, doi: 10.1029/2002JD002633.
- [18] Gong S L, et al. Canadian Aerosol Module: A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models: 1. Module development [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D1), 4007, doi: 10.1029/2001JD002002: AAC 3 1-16.
- [19] Qin Yu, Zhao Chunsheng. Atmospheric Chemistry [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [秦瑜, 赵春生. 大气化学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [20] Slinn W G N. Precipitation scavenging[A]. In: Randerson D, ed. Atmospheric Science and Power Production [C]. Washington DC: Technique Information Central, Office of Science and Tech Information, US Deptment of Energy,
- Doc. DOE/TIC-27601, 1984. 466-532.
- [21] Gong S L, Barrie L A, Blanchet J-P. Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere, 1, Model development [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 3 805-3 818.
- [22] Giorgi F, Chameides W L. Rainout lifetimes of highly soluble aerosols and gases as inferred from simulations with a general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91: 14 367-14 376.
- [23] Sand and dust reports from meteorological satellite monitoring [EB/OL]. [http://218.22.199.46/qbzq/qbswebsite/qbsdata/zhpgpc/wxcp20050417\\_radCE9C6.htm](http://218.22.199.46/qbzq/qbswebsite/qbsdata/zhpgpc/wxcp20050417_radCE9C6.htm) 2005, No. 22. [气象卫星沙尘监测报告[EB/OL]. 全国气象情报与灾情信息网, 2005 年第 22 期.]
- [24] Dust storm appears in the west part of Gansu province this morning[EB/OL]. <http://www.duststorm.com/show.asp?ID=12591,2005>. [今晨甘肃西部出现沙尘暴天气[EB/OL]. 中国沙尘暴网, 2005.]
- [25] A severe dust storm occurs in Minqin, Gansu province [EB/OL]. <http://www.duststorm.com/show.asp?ID=12597,2005>. [甘肃民勤出现黑风暴[EB/OL]. 中国沙尘暴网, <http://www.duststorm.com/show.asp?ID=12597,2005>.]
- [26] Severe dust storm occurs again in Minqin, Gansu province [EB/OL]. <http://www.duststorm.com/show.asp?ID=12596,2005>. [民勤再次出现黑风[EB/OL]. 中国沙尘暴网, 2005.]
- [27] Reports of dust storm monitoring [EB/OL]. <http://www.chinaam.com.cn>, May, 2005. [沙尘监测报告[EB/OL]. 中国干旱气象网 遥感监测信息, 2005 年 5 月.]

## STUDY ON SAND-DUST NUMERICAL FORECASTING MODEL COUPLED WITH GRAPES AND ITS APPLICATION IN NORTHWEST CHINA

LI Yao-hui<sup>1, 2, 3</sup>, ZHAO Jian-hua<sup>1, 2</sup>, XUE Ji-shan<sup>2</sup>, CHEN De-hui<sup>2</sup>,  
SHEN Xue-shun<sup>2</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, CMA, Gansu Lanzhou 730020, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorology Sciences, Beijing, 100081, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou, 730000, China)

**Abstract:** A sand-dust numerical model coupled with GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)–GRAPES\_SDM is introduced. GRAPES\_SDM includes such detail physical

processes as dust emission, transport, dry deposition and clear sky process, which can simulate and forecast the initial and sand-dust concentration of sand and dust storm. Based on GRAPES\_SDM, a numerical model forecasting system is established in northwest China, and is applied to Lanzhou Center Meteorological Observatory for operational prediction of sand and dust storm from April, 2005. Two severe sand and dust storms occurred in 17-19, April, 2005 and 28-29, May, 2005 in northwest China are choosed to simulate there initial, transport, dust emission and disappear. The results show no difference for sand-dust spetial distribution between model outputs and remote sensing monitoring imageres, which indicates that the model system has the capability of forecasting sand and dust storm in northwest China.

**Key words:** Northwest China; GRAPES\_SDM; Operational application

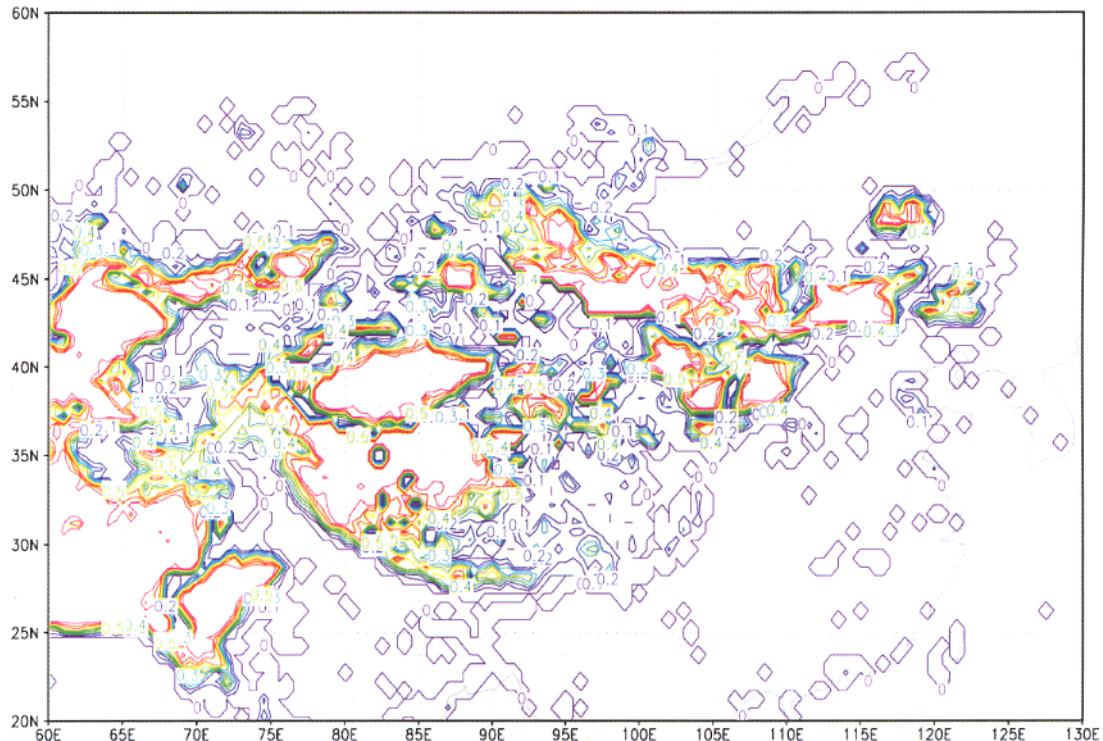


图 1 全球与中国的沙粒分布  
Fig. 1 Distribution of Sand particle in China

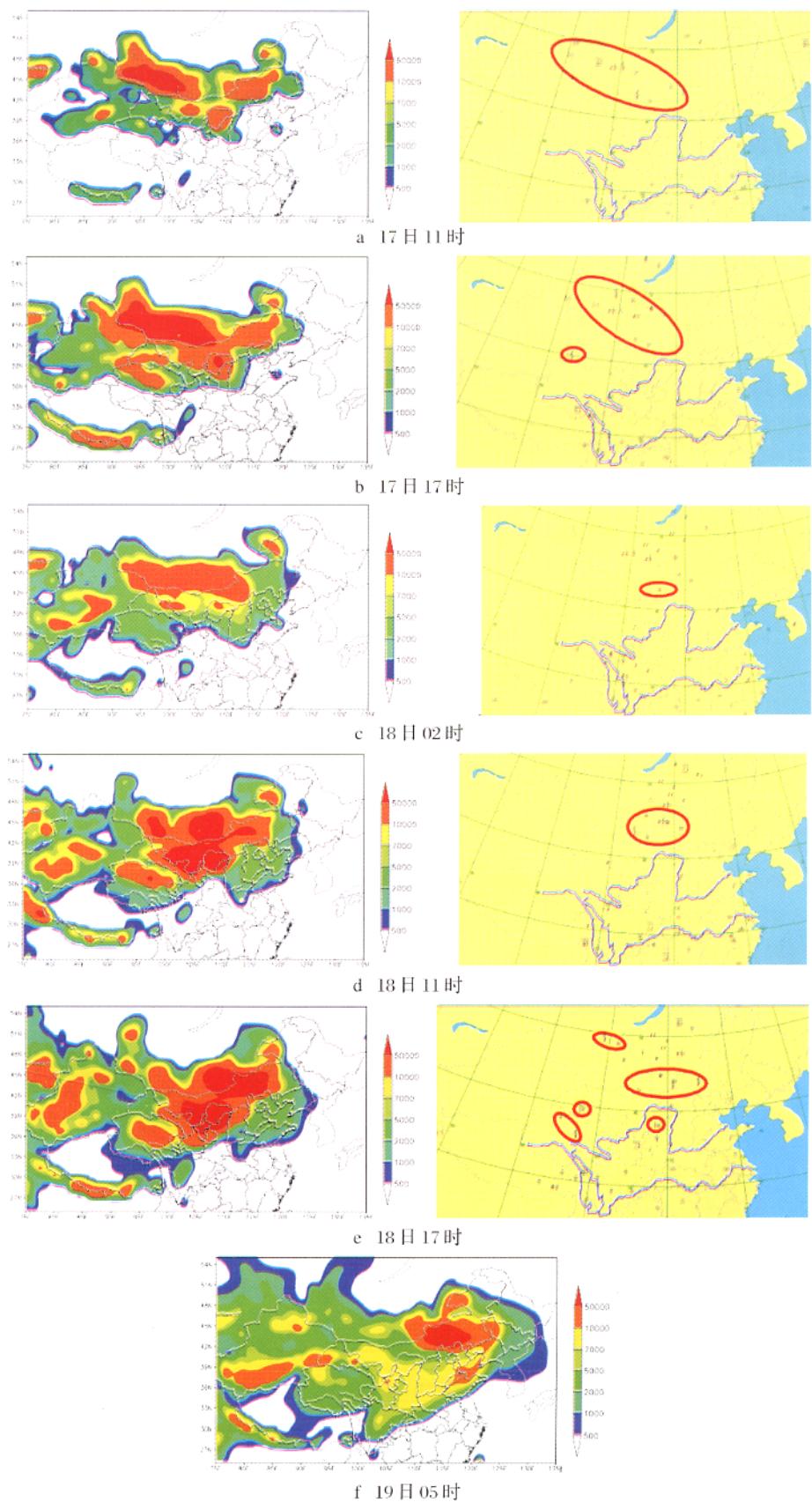


图 2 4月 17~19 日模拟沙尘浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )分布(左)与观测记录(右)

Fig. 2 Distribution of sand concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) at 17~19, April, 2005, Simulated (left) and observed (right)

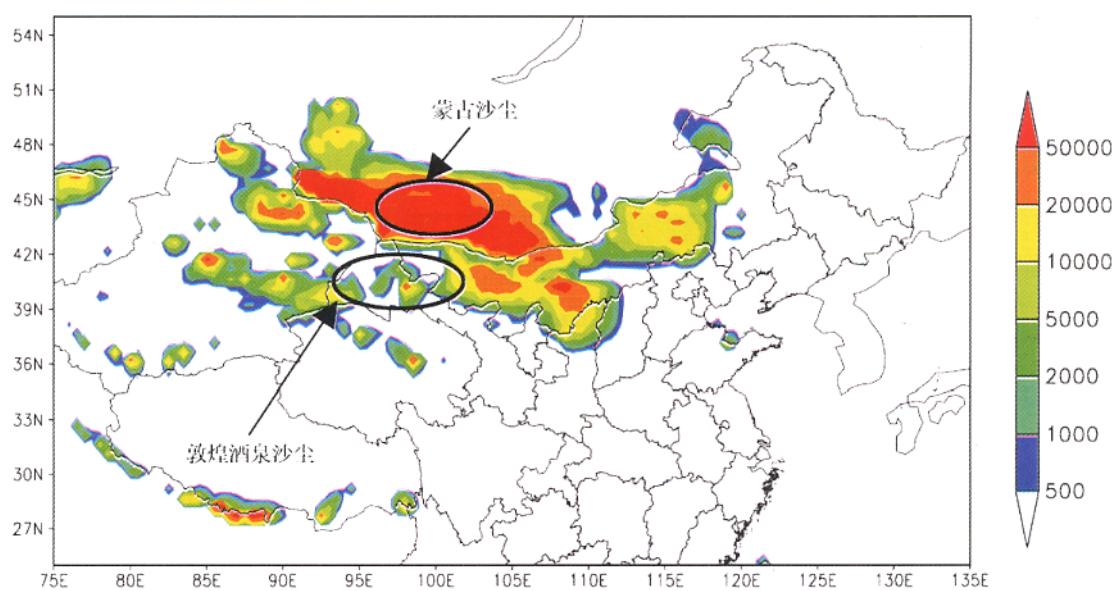


图 3 卫星监测沙尘信息(a. 4月 17 日 14:55)与模拟结果(b. 4月 17 日 15:00, 单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig. 3 Sand and dust information from remote sensing monitoring (a. 14:55 pm, 17, April, 2005) and from model output (b. 15:00 pm, 17, April, 2005,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

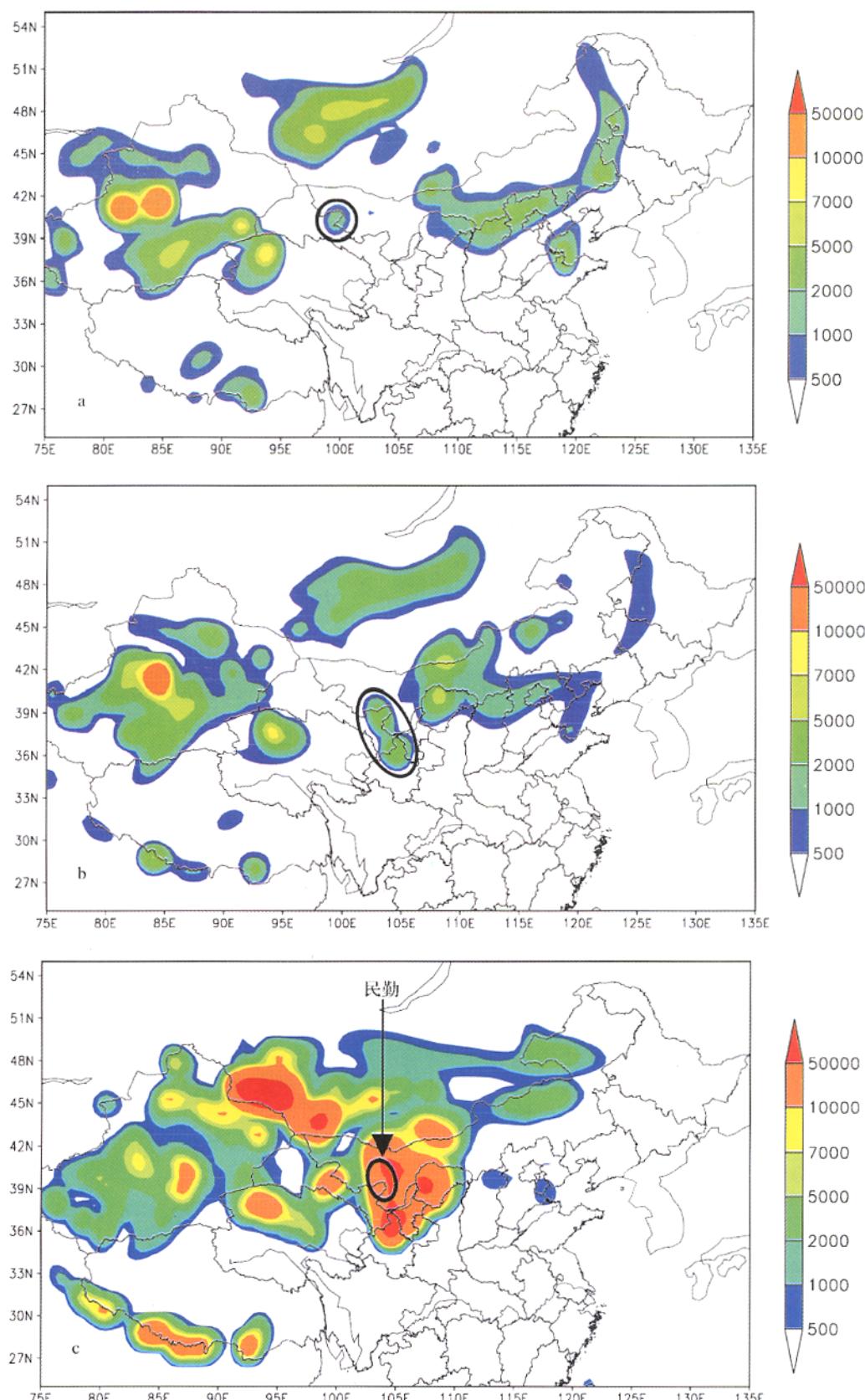


图 5 5月 28 日模拟沙尘浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 分布

(a. 02 时; b. 08 时; c. 17 时)

Fig. 5 Simulated sand concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) at 02:00 am(a), 08:00 am(b) and 17:00 pm(c), 28, May, 2005  
万方数据

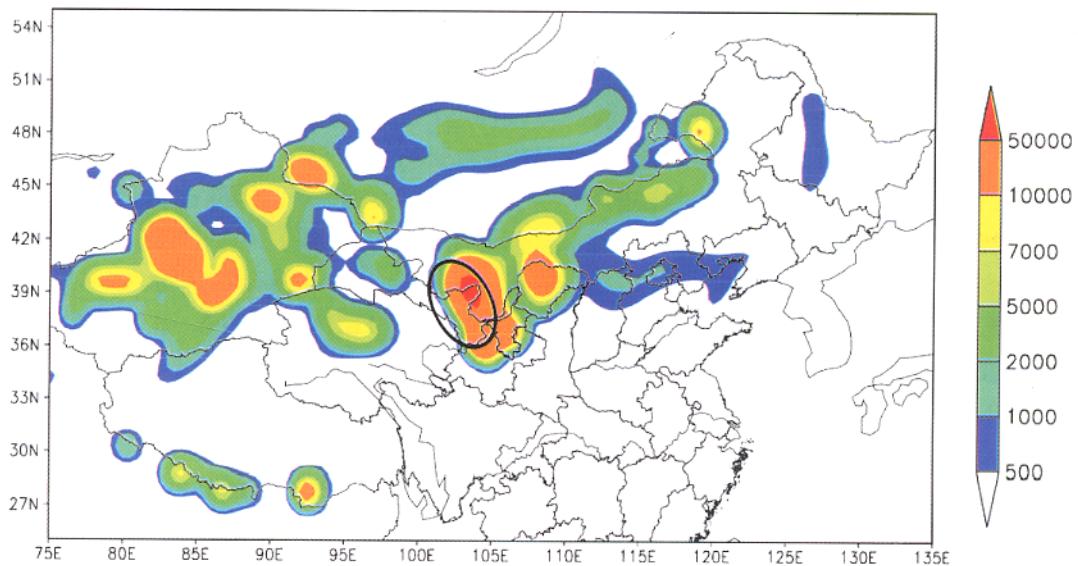


图 6 卫星监测沙尘信息(a. 5月 28 日 11:20)与模拟结果(b. 5月 28 日 11:00, 单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig. 6 Sand and dust information from remote sensing monitoring(a. 11:20 am, 28, May, 2005) and from model output (b. 11:00 am, 28, May, 2005,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )