

2004年春季一次较强沙尘暴的实时预报与特征分析

卢晶晶^{1 2 3} 赵琳娜² 杜秉玉¹

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 国家气象中心, 北京 100081

3 宁波市气象局, 宁波 315012

摘要 首先对2004年春季最强的一次沙尘天气过程进行了简要分析, 然后利用业务化的集成沙尘数值预报系统对其进行了数值预报试验, 并在检验了预测结果的可用性的基础上, 进一步分析了沙尘浓度、起沙量等模式输出结果的特征。结果表明: 该预测系统对沙尘天气的起沙和输送过程预报能力较好; 对沙尘天气的发生、发展和消亡过程有预报意义。这次过程的沙尘源地主要是蒙古国南部和中蒙边境沙地, 包括毛乌素沙地、腾格里沙漠和浑善达克沙地; 起沙和输送过程中各种粒子的贡献随着沙尘天气发生区域的不同而不同, 这次过程中起沙量贡献主要是粒径为 $2 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子, 在大气中长时间长距离输送的粒子主要是粒径小于 $11 \mu\text{m}$ 的粒子。

关键词 沙尘天气 数值预报 沙尘输送 沙尘源地

文章编号 1006-9585 (2007) 02-0188-11 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

The Real Time Numerical Prediction and Characteristics of A Severe Dust Storm Covers China in the Spring of 2004

LU Jing-Jing^{1 2}, ZHAO Lin-Na², and DU Bing-Yu¹

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044

2 *National Meteorological Center, Beijing* 100081

3 *Ningbo Municipal Meteorological Bureau* 315012

Abstract The strongest dust storms occurred in North China in the spring of 2004 were briefly analyzed, and then the quantitative 72-hour prediction of the dust event was been done by using an integrated operational dust numerical prediction system. The characteristics of the dust event were analyzed based on the validation and reliability of the predicted results, such as dust concentration and vertical dust emission. The results show that the modeling system has the better ability to predict the basic characteristics of the dust events and also offer the predictable information about the whole process, including origination, development and weakening of the dust episode. The dominating dust emission area is the southern part of Mongolia and boundary between Mongolia Gobi Desert and north part of China, including Mu Us Sandy Land, Tengger Desert and Onqin Daga Sandy Land. The particle-size of the particles which offers the biggest contribution to the dust emission is variant with the variety of land surface, but amount of particles with diameter from $2 \sim 22 \mu\text{m}$ is important. The particles with particle-size ($d < 11 \mu\text{m}$) can suspend long time and travel farther than others.

Key words dust numerical prediction; dust transport; dust resource

收稿日期 2006-01-17 收到, 2007-01-06 收到修定稿

资助项目 科技部科研院所社会公益研究专项“北京主要尘源性大气污染物研究”

作者简介 卢晶晶, 1980年出生, 硕士研究生, 主要从事中尺度气象与环境数值预报研究。E-mail: lujingjing116@yahoo.com.cn

1 引言

我国北方地区是中亚沙尘暴多发地区之一。自 20 世纪 50 年代以来，我国北方大部分地区的沙尘暴在减少；甘肃民勤与新疆和田两个强沙尘暴多发区 20 世纪 80 和 90 年代的强沙尘暴明显少于 50 和 70 年代；2000 年华北和西北东部部分地区的沙尘暴多于 90 年代均值。21 世纪初沙尘天气的发生呈现一个明显增多的趋势^[1]，特别是 2002 年 3 月 18 ~ 22 日发生了本世纪范围最大、持续时间长、强度强的沙尘暴过程，引起全球对亚洲沙尘天气事件的广泛关注。这期间，国内外许多学者对沙尘暴产生的天气背景、气候条件、

沙尘暴发生发展的机理进行了研究^[2,3]。2004 年 3 月 26 ~ 28 日，我国北方地区出现了继 2002 年 3 月 18 ~ 22 日以来强度最强的一次沙尘暴天气过程。其中 27 ~ 28 日，内蒙古和甘肃两省（区）共出现了 39 站（次）沙尘暴。内蒙古阿拉善盟的部分地方 27 日 14 时（北京时，下同）出现了能见度为 100 ~ 900 m 的强或中度沙尘暴，地震灾区的锡林郭勒盟出现了能见度仅为 10 ~ 60 m 的强沙尘暴（图 1b），此次大风、扬沙及沙尘暴天气出现在东乌旗境内发生 5.9 级地震后的第 3 天，30 多个小时的强沙尘暴导致该地区形成了比较严重的双重损害，是该地区近 30 年以来罕见的一次强沙尘暴天气过程，沙尘暴造成锡林郭勒盟 5 000 多只牲畜走失或死亡、损失 2 241 万元，造成内蒙

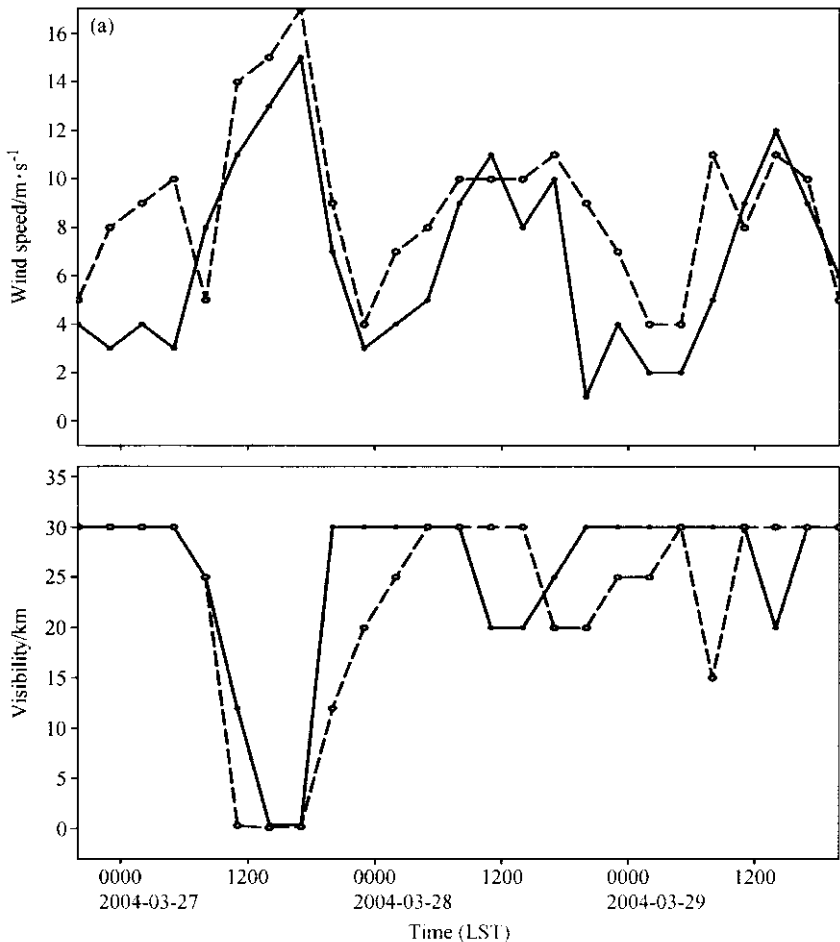


图 1 2004 年 3 月 26 ~ 29 日二连浩特站（实线）与朱日和站（虚线）逐日每 3 h 的（a）地面观测风速和（b）地面观测能见度
 Fig. 1 The observed surface wind speed and visibility at Erenhot (solid line) and Jurh (dashed line) during 26—29 Mar 2004 : (a) Observed surface wind speed ; (b) observed visibility

古经济损失总计超过 7 100 万元,同时,沙尘天气波及我国北方 14 个省市^[4]。

有研究表明,沙尘天气的出现除了与强烈的天气系统(冷锋、飕线和气旋等)有关,还受其他物理过程以及它们之间相互作用的影响^[5]。本文采用集成沙尘数值预报系统(包括中尺度气象模式、陆面模式、风蚀方案、沙尘传输模式、地理信息系统(GIS)数据集)对此次过程进行预测分析,在检验模式对沙尘暴模拟能力的基础上,给出该次沙尘暴发生发展过程的特征,包括源地强度,范围特征和各粒径粒子输送特征等。

2 2004 年沙尘天气概况以及影响系统

2004 年春季我国北方共出现了 15 次沙尘天气,3 月 26~28 日发生的沙尘暴天气过程是强度最强的一次(图 1),内蒙古朱日和和二连浩特在这次过程中最小能见度几乎为 0(朱日和站和二连浩特站 27 日 14 时的能见度分别为 0.1 和 0.4 km)。这次沙尘暴过程是由蒙古气旋东移引发地面大风造成。强沙尘暴区主要出现在南疆盆地、青海西北部、甘肃西部和内蒙古中西部等地(图 2)。紧接着 28~29 日又发生一次沙尘过程,内蒙古中西部、陕西北部和山西北部等地出现了沙尘暴或强沙尘暴。赵琳娜等^[6]对 2000 年 4 月 6 日引发中国北方大范围沙尘天气的蒙古气旋做了较深入的分析,本次沙尘天气的发生发展也与蒙古气旋密切相关:从地面天气图(图 2)上可以看出 27 日 08 时乌兰巴托附近有一低压中心,由于新疆北部有冷空气东移,地面上蒙古地区到河套形成一典型的锋面气旋,气旋南部开始出现大风及沙尘天气。27 日 14 时随着冷空气东移,气旋中心增强,冷锋过河套,气旋南部出现大范围偏西大风,并伴有沙尘暴生成,其范围延伸到我国内蒙古中部和山西北部地区。27 日 20 时地面低压气旋中心移至黑龙江西部,沙尘天气随之向东北移动,但范围缩小,基本出现在气旋南部的大风区。28 日此地面低压在东北稳定少动,新疆北部有高压东移。29 日 08 时高压前部的西北气流南下,与低压后部的西风气流汇合,在华北地区形

成新生冷锋,14 时冷锋过境,内蒙古中西部、山西北部、河北北部等地出现大风和沙尘天气。直到 30 日东北低气压才缓慢移出我国。可以看出在这次过程中地面一直受低气压控制,此低压后部大风造成 26~28 日沙尘天气,29 日此低压仍在东北,后面西北冷空气南下,新生冷锋取代先前冷锋,造成了 28~30 日的沙尘天气。由此看出这两次沙尘天气都受同一地面气旋影响。

3 系统简介

国家气象中心在前人工作^[2,7]的基础上建立了一个适用东亚地区的集成沙尘数值预报业务系统,该系统在中尺度气象模式 MM5V3(包含有陆面过程)中加进了 Lu 和 Shao^[8]发展的起沙模式和输送模式。此外,还有较高精度的地理信息系统资料提供地表和植被信息。另外土壤类型和植被类型数据国外部分取自美国地质勘察(USGS)资料,而国内部分取自中国 1:4000000 中国土壤图数据资料,共 57 种,其他植被资料是由遥感数据(例如 NDVI,归一化植被指数)转化而来。所有陆面数据的分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (约为 5.5 km)。在起沙模式中,结合大气中观测到沙尘粒径分布的实际,将沙尘按粒径 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)。起沙模式对每个粒径组都计算起沙率,总的沙尘浓度等于各粒径组的沙尘浓度之和。沙尘输送模式包括平流、扩散以及干沉降过程,在输送模式中对沙尘浓度的计算也分为 6 组,下边界条件中考虑沙尘粒子的干沉降过程。目前模式中还没有包括湿沉降过程以及化学过程和沙尘天气的反馈作用。

即该沙尘数值预报系统既能够预测风沙天气的气象场,也能描风沙源地的分布,大气中的沙尘含量输送状况等等。

利用上述系统对 2004 年 3 月 26~29 日发生在我国北方地区的较强沙尘暴天气过程的起沙和输送过程进行预报。模式水平分辨率为 50 km,中心点为(42°N , 105°E),预报的区域大致为($20 \sim 60^\circ\text{N}$, $70 \sim 140^\circ\text{E}$),气象模式的背景场和侧

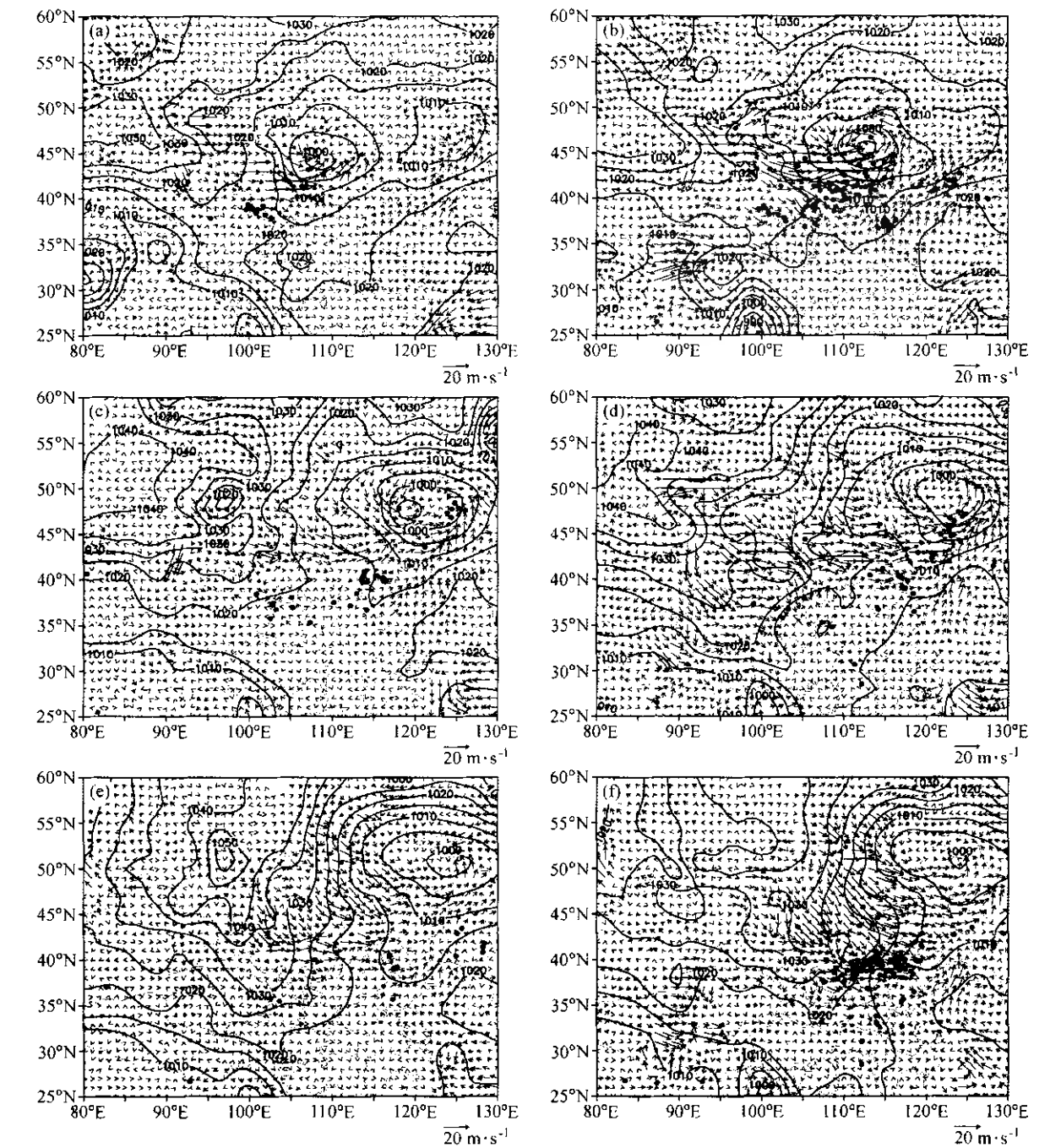


图2 2004年3月27~29日的地面天气图[等值线为海平面气压(单位:hPa),圆点为沙尘天气出现的站点,矢量箭头为风场]:(a) 27日08时;(b) 27日14时;(c) 28日08时;(d) 28日14时;(e) 29日08时;(f) 29日14时

Fig. 2 The surface weather map of 27—29 Mar 2004[solid lines are sea level pressure(hPa), circle dots are the station occurred dust weather , the arrows represent wind field]:(a) 0800 LST 27 Mar ;(b) 1400 LST 27 Mar ;(c) 0800 LST 28 Mar ;(d) 1400L ST 28 Mar ;(e) 0800 LST 29 Mar ;(f) 1400 LST 29 Mar

边界采用国家气象中心全球中期数值预报模式(T213L31) 0.5625°×0.5625°的格点资料,边界层方案采用MRF方案、陆面过程采用OSU方案,本文所用时间为北京时,预报起始时刻是2004年3月26日20时,积分72h,每3h输出一次结果。

4 结果分析

4.1 地面沙尘浓度的空间分布

首先我们采用地面天气现象观测与地面沙尘浓度的预测做定性比较。从每 3 h 输出的沙尘地面浓度与同时刻地面天气现象对比可知,模式较好地预报出了这次沙尘发生和发展过程。预报的 27 日沙尘暴最强(图 3),沙尘暴主要发生在蒙古国南部和内蒙古中西部,南疆盆地;28 日向东南移到青海西北部,内蒙古中部和东北南部地区;29 日甘肃西部,陕西北部,山西北部又出现了沙尘区。但与观测相比,29 日 14 时预报的沙尘系统移动比实际慢,29 日内蒙西部,宁夏北部等地并没有观测到沙尘天气。山西,河北等地观测有沙尘暴发生,模式没有预测出来。从整个强度演变来看,27 日强度最大,28 日有所减弱,29 日部分地区又一次爆发。内蒙古中部和蒙古国南部大部分地区地面沙尘浓度都在 $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。内蒙古阿拉善盟地区是沙尘浓度的高值区,最高的沙尘浓度中心位于阿拉善右旗,即巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠交界处。此外比较白天和夜晚的沙尘浓度分布,可以发现,白天强度强,范围大,夜晚强度弱,范围小,具有日变化。另外,从二连浩特站与朱日和站实测的地面风速(图 1a)与能见度分析(图 1b)可以看出,沙尘天气实况具有明显的日变化特征,但是能见度的最低值出现在地面风速加大以后。从该站预测的摩擦速度(图 4a)和预测的地面沙尘浓度的时间演变(图 4b)可以看出,预测的沙尘浓度的日变化与实际还是比较接近的,模式预测出了边界层的日变化特征:拿二连浩特站(图中实线)来说沙尘天气最强的一段时间 27 日 05~20 时来说,沙尘天气最强出现在 14 时附近,预测的沙尘强度最强也是出现在 14 时以后,预测正确。另外,白天预测的沙尘范围比实测大,夜晚的预报比实测小。似乎说明天气模式正确地预测了边界层的日变化,只是强度白天比实况大,夜晚比实况小,这可能与模式计算的摩擦速度白天偏大、夜晚偏小有关,以前的研究也有类似的结果^[7],这有待于进一步研究。 万方数据

4.2 地面总沙尘浓度的时间演变

对于较大尺度的沙尘天气的验证,在时间和空间上能够表现大的沙尘天气活动的比较好的观测资料是每 3 h 一次的地面观测能见度。虽然能见度主要受大气中的水汽和气溶胶二者影响,但在沙尘天气过程期间,沙尘气溶胶成为影响能见度的决定性因子。Shao 等^[9]根据东亚地区的能见度与 TSP(总悬浮颗粒物)的取样观测数据,得到了能见度和 TSP 浓度的经验公式,并利用该公式对 2002 年的沙尘暴过程进行了分析。转换公式如下:

$$C_{\text{TSP}} = \begin{cases} 3802.29 D_v^{-0.84}, & D_v < 3.5 \\ \exp(-0.11 D_v + 7.62), & D_v \geq 3.5 \end{cases}$$

其中, D_v 是能见度,单位是 km; C_{TSP} 是 TSP 浓度,单位是 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

我们这里利用上式将地面观测的能见度转化为 TSP 浓度,并与模式预报的地面沙尘浓度对比来检验(见图 5),对两者进行相关分析,相关系数为 0.8587,通过了 $\alpha = 0.001$ 的信度检验(图 5b)。模式预报浓度与能见度反算的浓度虽然在数值上有一定差异,但随时间演变的趋势是一致的,预报沙尘浓度值大时,反算的能见度浓度也增大。(图 5a)。这说明了模式预报的沙尘浓度能够抓住主要的沙尘过程,模式能够预报出主要沙尘过程的开始结束时间,并且能够反映沙尘天气的强弱变化:27 日 14 时这次沙尘天气过程达到最强时刻;28 日 14 时和 29 日 14 时又分别有两次强度较弱的沙尘天气出现;图 5a 同时也反映出沙尘天气的日变化过程:沙尘天气中午最强,早晚相对较弱。

4.3 沙尘源地

模式预报的垂直起尘量表示沙尘从地面垂直向上释放的尘通量,它随时间和空间变化表示沙尘源地随时空变化。同孙建华等^[7]的做法类似,我们把模式每 3 h 中起沙大于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为一次起沙,用该起沙次数代表 2004 年 3 月 26 日 20 时~29 日 20 时过程中起沙的持续时间,用这段时间的垂直尘通量的时间平均代表起沙强度(图 6)。从图 3 可以看到主要的起尘区在蒙古国南部,新疆南部,内蒙古中、西部,山西北部 and 河北北部。起尘量最大的区域在蒙古国南部和

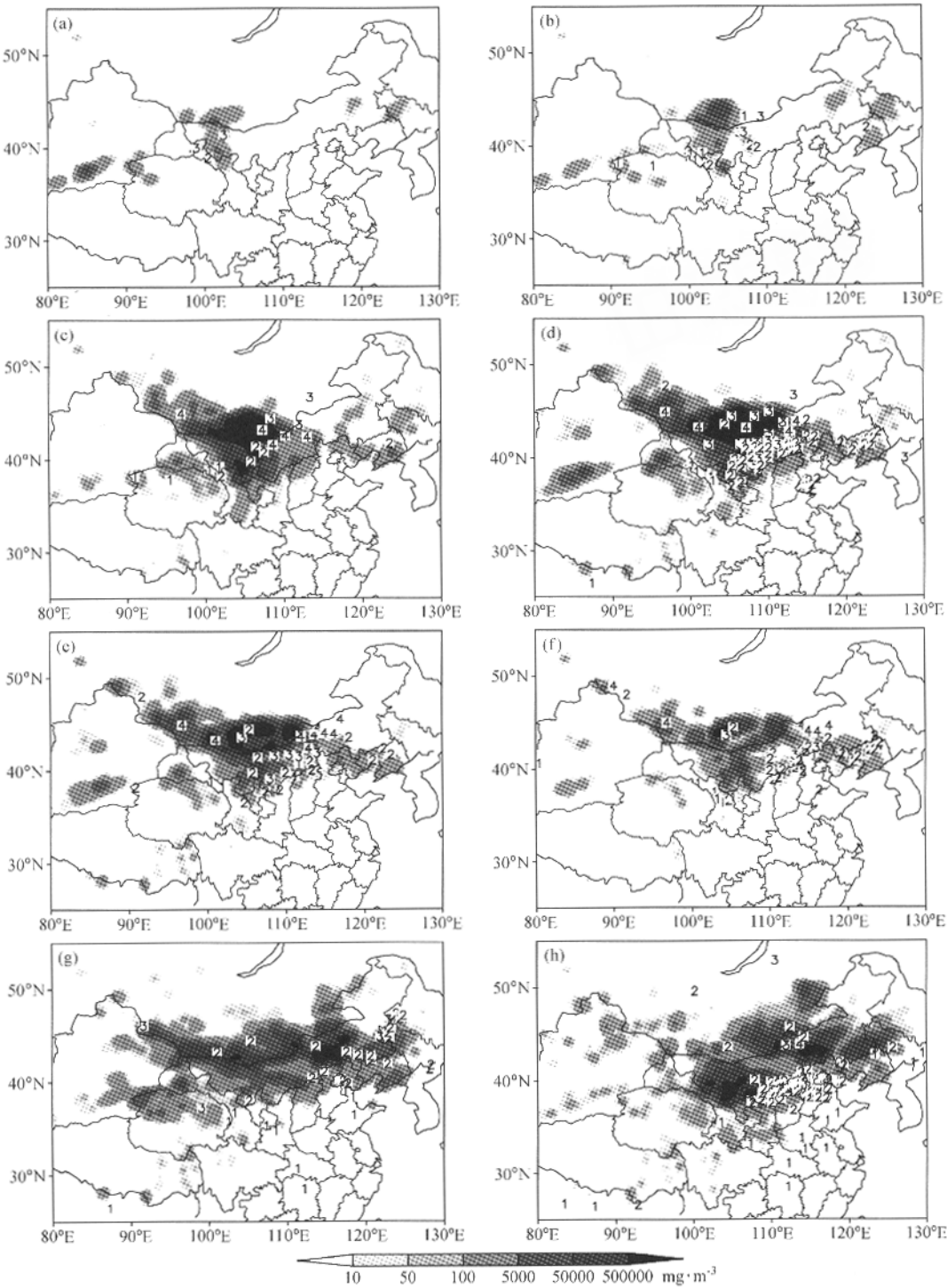


图3 2004年3月27~29日预报的地面沙尘浓度(阴影,单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)和地面观测现象(数字:1 浮尘,2 扬沙,3 沙尘暴,4 强沙尘暴):(a) 27日05时;(b) 27日08时;(c) 27日11时;(d) 27日14时;(e) 27日17时;(f) 27日20时;(g) 28日14时;(h) 29日14时

Fig. 3 The predicted near surface dust concentration(shaded, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) and the surface meteorological record (Numbers 1 , 2 , 3 and 4 represent the WMO GTS codes for dust in suspension , blowing dust , dust storm and severe dust storm , respectively) during 27—29 Mar 2004 : (a) 0500 LST 27 Mar ; (b) 0800 LST 27Mar ; (c) 1100 LST 27 Mar ; (d) 1400 LST 27 Mar ; (e) 1700 LST 27 Mar ; (f) 2000 LST 27 Mar ; (g) 1400 LST 28 Mar ; (h) 1400 LST 29 Mar

万方数据

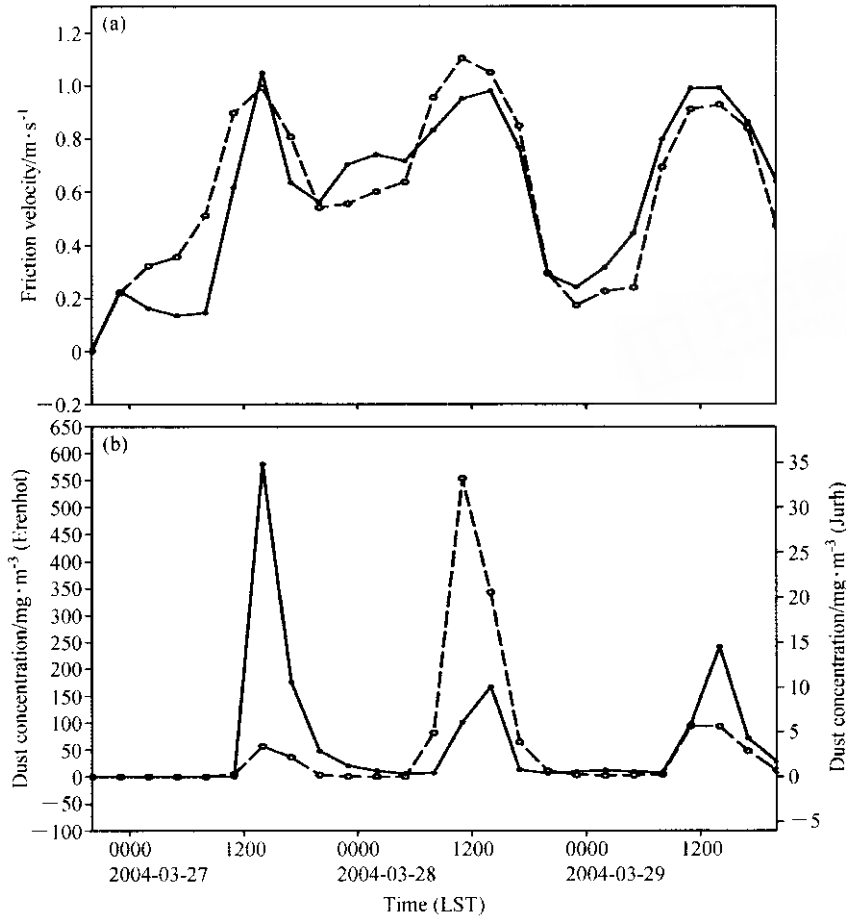


图4 2004年3月26~29日二连浩特站(实线)与朱日和站(虚线)逐日每3h的(a)模式预报的摩擦速度;(b)模式预报的地面沙尘浓度

Fig. 4 The predicted friction velocity and surface dust concentration at Erenhot (solid line) and Jurh (dashed line) during 26—29 Mar 2004 : (a) Predicted friction velocity ; (b) Predicted surface dust concentration

中蒙边境戈壁地区, 中国内蒙古毛乌素沙漠, 腾格里沙漠和浑善达克沙地。浑善达克沙地起沙时间最长, 起沙平均强度达到 $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。中蒙边境 ($42 \sim 45^\circ \text{N}$, $104 \sim 108^\circ \text{E}$) 是起沙强度最大的地区, 平均起沙量达到 $9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 起沙次数也在5次以上。

分析起沙量中各组粒径粒子的贡献发现, 各粒径粒子的贡献也不同。比较同次过程中南北两个地区: 内蒙古中东部 ($42 \sim 45^\circ \text{N}$, $115 \sim 119^\circ \text{E}$) 和华北北部 ($38 \sim 42^\circ \text{N}$, $115 \sim 119^\circ \text{E}$)。这两个地区是在相同经度范围内, 以 42°N 为界。对比图 7a、b, 内蒙古中东部的起尘量比华北北部大一个量级, 最大值都出现在 28 日 12 时, 这与此时地面气旋的东移造成的地面大风有关。内蒙古中东部在起沙过程中贡献最大的是 $2 \sim 11 \mu\text{m}$

的粒子(细粉土), 占总起沙量的 90%, 其次是 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子(中粉土), 粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 的尘土颗粒基本上没有贡献。华北北部的起尘 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的粒子和 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子起尘量差不多, 这一点与赵琳娜等^[2]对华北强沙尘暴的分析是一致的。另外, 通过选取该次过程两个不同地理位置的站点乌拉特中旗 (41.6°N , 118.5°E) 和拐子湖 (41.37°N , 102.37°E) 分析它们各组粒径的起沙量(图 7c 和 7d), 发现其具有不同沙尘粒子的起沙量差异: 其中乌拉特中旗站起沙贡献最大的是粒径在 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子, 占总起沙量的 99%; 拐子湖起沙贡献最大的是 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的粒子。原因是这两个站点所在地区的土壤类型不同, 拐子湖属于灰棕漠土, 乌拉特中旗属于棕壤, 它们对应模式中的土壤质地是不同的, 其中粉土

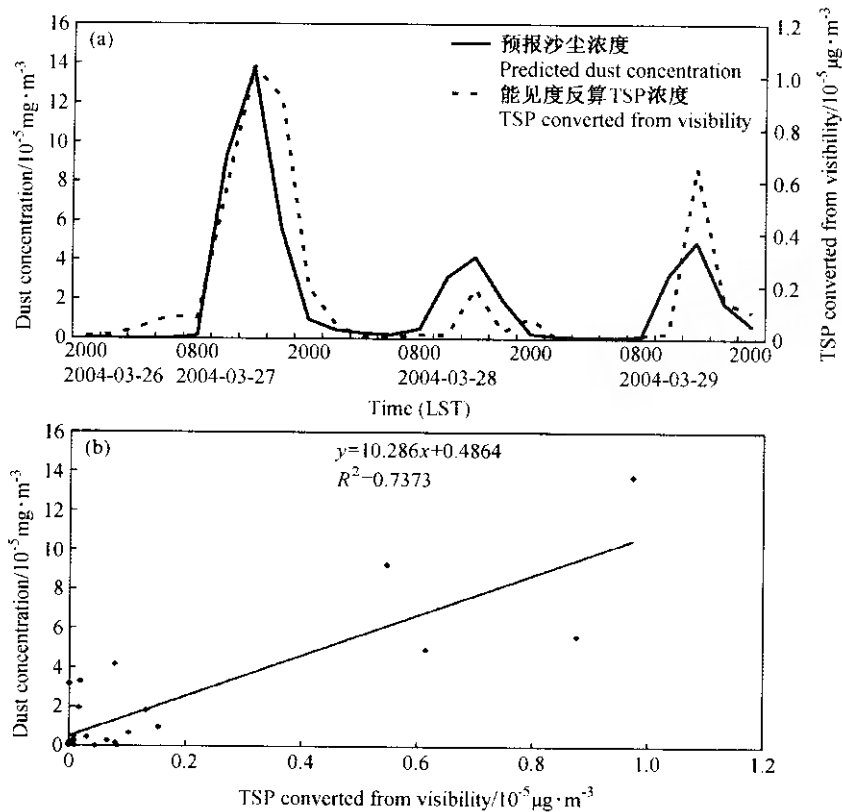


图5 2004 年 3 月 26 ~ 29 日在 (35 ~ 45°N , 90 ~ 120°E) 区域内地面沙尘浓度 : (a) 预报的地面沙尘浓度和能见度反算 TSP 浓度随时间演变 ; (b) 预报的地面沙尘浓度与能见度反算 TSP 浓度对比

Fig. 5 The near surface dust concentration during 26—29 Mar 2004 in (35—45°N , 90—120°E) : (a) The temporal evolution of predicted surface dust concentration and the TSP converted from visibility ; (b) a comparison of predicted and observed the near surface dust concentration

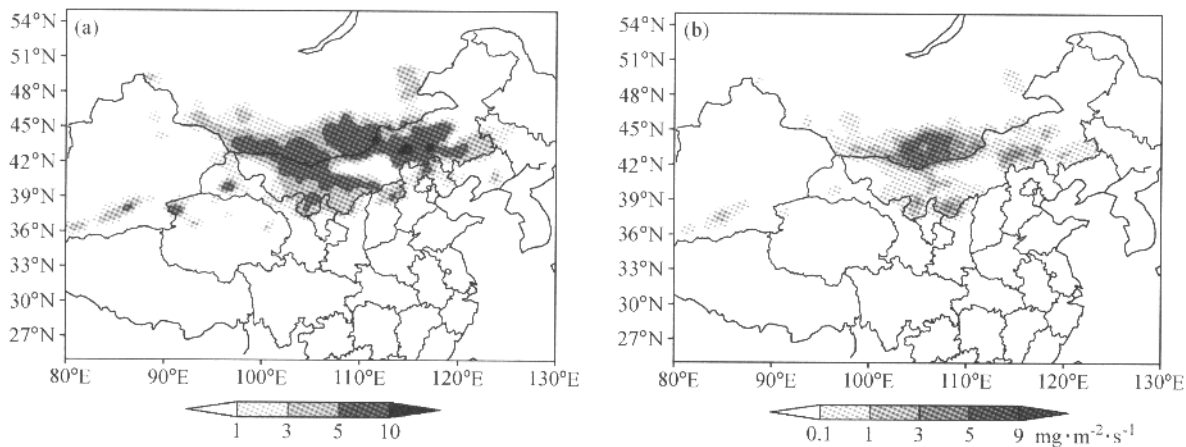


图6 2004 年 3 月 26 日 20 时 ~ 29 日 20 时沙尘过程的 (a) 起沙次数和 (b) 起沙强度

Fig. 6 The dust emission frequency (a) and intensity (b) during 2000 LST 26 Mar to 2000 LST 29 Mar 2004

(粒径在 $2 \sim 52 \mu\text{m}$ 的粒子) 的含量乌拉特中旗比拐子湖多。另外分析了两个单站的气象要素变化 (图略) , 2004 年 3 月 26 日 20 时两站都出现了沙尘暴天气。乌拉特中旗与拐子湖在该时刻摩擦速度差异不大, 但是前者的土壤温度和土壤湿度都比后者高, 地面气压和相对湿度比后者低, 这可能也是造成两站

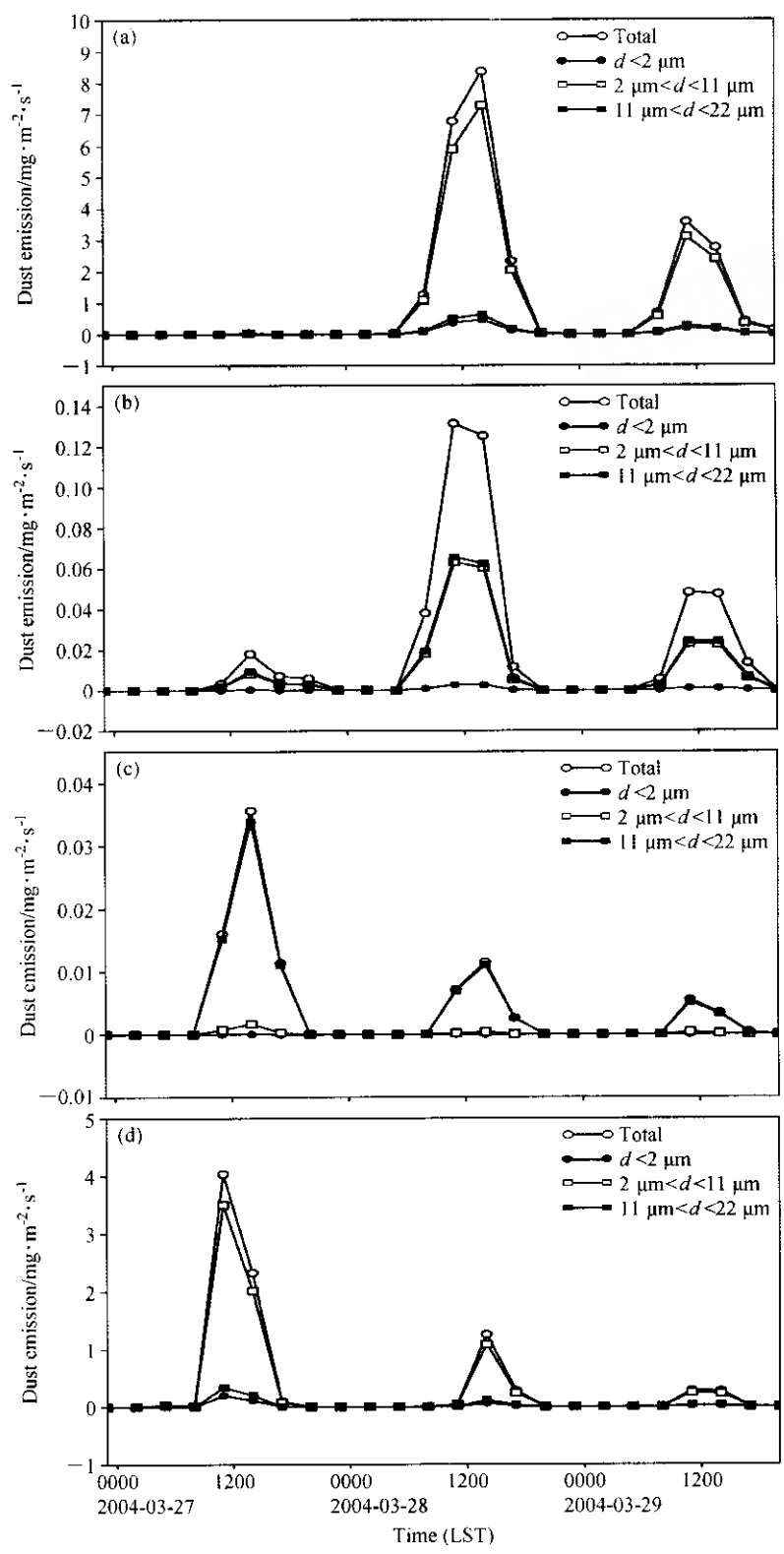


图7 2004年3月26~29日沙尘过程各粒径组平均起沙量随时间的演变:(a)内蒙古中东部;(b)华北北部;(c)乌拉特中旗;(d)拐子湖

Fig. 7 The temporal evolution of mean dust emission for each particle-size group during 26—29 Mar 2004 :(a) Middle and east part of the Inner Mongolia ;(b) North part of North China ;(c) Urad Zhongqi ;(d) Guaizi Hu

起沙贡献最大粒子粒径差异的原因。这些区域还存在的共同点是起沙量有明显的日变化，白天大，晚上小，最大值都出现在中午。因此无论从不同区域的分布还是从单站的分布都可以看出，不同的土壤类型，土壤湿度都可能造成起沙量的不同。以上分析说明起沙中贡献最大的粒子并不都是粒径为 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的粒子，在某些地区粒径为 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子也在起沙中占主要地位，所以起沙过程中贡献最大的主要是细粉土和中粉土。

4.4 沙尘粒子的输送特征

在图 2 和图 3 中可以看到 3 月 27~29 日沙尘区随天气系统的移动而自西向东运动。那么在沙尘运动过程中长时间、长距离输送的又是哪些范围的粒子呢？下面对各粒径组的平均沙尘浓度分布进行分析（图 8），从强度和范围上来看，粒径 d 在 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的粒子分布最广，浓度也大， $d < 2 \mu\text{m}$ 的粒子次之， d 在 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子浓度最小，范围也最小。而从起沙来看（图 6）， $11 \mu\text{m} < d < 22 \mu\text{m}$ 粒子的起沙量大于 $d < 2 \mu\text{m}$ 的粒子，但浓度小很多。这表明 $d > 11 \mu\text{m}$ 的粒子在大气中传播的时间不长，输送距离也不长，由于各种原因而沉降了。所以能在大气中长时间长距离传播的粒子是 $d < 11 \mu\text{m}$ 的粒子，这与 Shao 等^[9]得到结果是一致的。

5 结论

利用了沙尘天气预测系统包括了有限区域中尺度模式 MM5V3、起沙模式、输送模式和 GIS 数据集，其中天气模式、起沙模式和输送模式耦合在一起进行同步积分，能够较为合理的预报沙尘天气的发展过程。本研究利用此预测系统对 2004 年 3 月 26~29 日的较强沙尘暴过程进行了预报试验，结果表明预报的沙尘浓度从范围上和强度上与地面观测基本吻合，表明了该预测系统对沙尘天气起沙、输送和沉降的全过程有较好的预报能力。通过对 2004 年 3 月 27~29 日这次较强的沙尘天气过程进行的预报试验，结合以前的工作^[2,7]，初步得到如下结论：

（1）该预测系统能够抓住这次沙尘天气过程的主要时间演变特征：27 日沙尘强度最强，28 日 14 时和 29 日 08 时又分别有两次强度较弱的沙尘

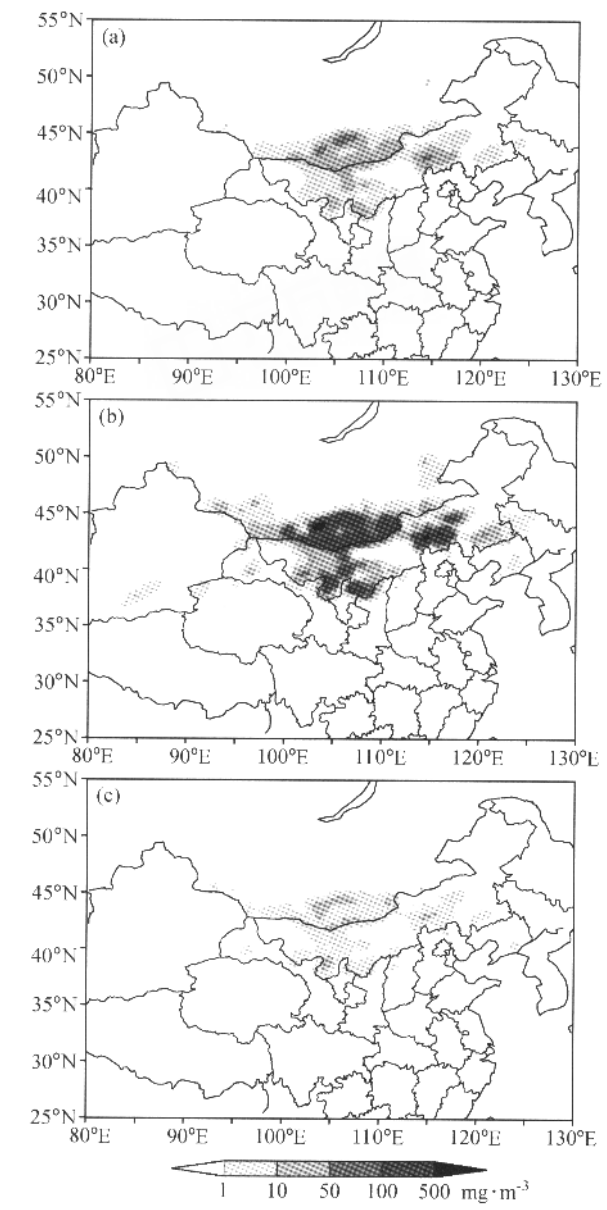


图 8 2004 年 3 月 26~29 日各粒径组平均地面沙尘浓度分布：(a) $d < 2 \mu\text{m}$ ；(b) $2 \mu\text{m} < d < 11 \mu\text{m}$ ；(c) $11 \mu\text{m} < d < 22 \mu\text{m}$
Fig. 8 Mean surface dust concentration distribution for each particle-size group during 26—29 March, 2004 : (a) dust concentration with particle diameter $< 2 \mu\text{m}$; (b) dust concentration with particle diameter between $2\text{—}11 \mu\text{m}$; (c) dust concentration with particle diameter between $11\text{—}22 \mu\text{m}$

天气出现。说明预测系统能够给出沙尘发生、结束的时间以及（在较大范围的）强度变化。

（2）这次过程的沙尘源地主要是蒙古国南部的戈壁和中蒙边境沙地、毛乌素沙地、腾格里沙漠和浑善达克沙地。

（3）沙尘天气普遍存在日变化，模式的预测

结果也很好的体现出了此项特征：起沙强度和沙尘浓度与地面观测相比都存在明显的日变化，预测的白天基本吻合，但强度偏强，夜晚则范围偏小，强度偏弱。

(4) 不同的土壤类型、土壤湿度都可能造成起沙量的不同。随着沙尘天气发生区域的不同，在起沙过程中贡献最大的粒子粒径也有不同，但主要是粒径为 $2 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子，在大气中输送长时间长距离传播的粒子是 $d < 11 \mu\text{m}$ 的粒子。

此外，沙尘数值预报模式有待于进一步改进。申绍华和陈受钧^[10]研究表明，沙尘气溶胶的辐射强迫能够使对流层中的沙尘层形成等熵层结（混合层）。沙尘气溶胶在白天将削弱地面接收的太阳辐射（削弱地面加热），同时加热（长波辐射）地面上方的沙尘层大气；夜间则削弱地面的辐射冷，却同时冷却（长波辐射）地面上方的沙尘层大气。因此，产生的结果是在白天削弱热力不稳定层结，使层结变为等熵混合层；夜间则削弱逆温稳定层同样导致混合层出现。因此沙尘天气发生以后引起的辐射作用对大气模式的反馈问题非常重要，目前在我们的沙尘数值预报系统中还没有考虑该过程。这也许是造成沙尘模式预报的起沙过程的日变化比实际观测显著，沙尘浓度预报结果有时存在白天起沙范围偏大、强度偏强、夜间偏弱的一个原因。另外，摩擦速度的计算准确性也是一个可能因素^[7]。此外，应该指出的是土壤湿度的初始场对预报起沙、传输过程尤为重要，目前土壤湿度、湿度的背景场来自于全球模式 T213L31 的预报场，它的预报效果将直接影响起沙和传输过程。此外，模式中也未考虑湿沉降，沙尘暴虽然大多发生在春季少雨期间，但有些沙尘过程是伴有降水的，今后需要进一步改进模式，提高精度和准确度。

参考文献 (References)

[1] 周自江, 王锡稳, 牛若云. 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. *Journal of Ap-*

plied Meteorological Science (in Chinese), 2002, **13** (2): 193 ~ 200

[2] 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预测研究. 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

[3] 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. 第四纪研究, 2002, **22** (4): 374 ~ 379
Zhang Renjian, Han Zhiwei, Wang Mingxing, et al. Dust storm weather in china: new characteristics and origins. *Quaternary sciences* (in Chinese), 2002, **22** (4): 374 ~ 379

[4] 叶殿秀, 降水偏少部分地区有旱情北方沙尘天气过程频繁, 气象, 2004, **30** (6): 62 ~ 63
Ye Dianxiu. Less Rainfall and Dryness in Some Areas Frequent Sandy weather in the North. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2004, **30** (6): 62 ~ 63

[5] Brazel, A J, and Nicking, W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona. *J. Climatol.*, 1986, **6** (3): 255 ~ 275

[6] 赵琳娜, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘天气的快速发展气旋的诊断研究. 大气科学, 2004, **28** (5): 722 ~ 734
Zhao Linna, Zhao Sixiong. A diagnostic study of rapid developing cyclone in North China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (5): 722 ~ 734

[7] 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试验. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 125 ~ 142
Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to North china and its applications. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (2): 125 ~ 142

[8] Lu H, Shao Y P. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. *Environmental Modeling & Software*, 2001, **16**: 233 ~ 249

[9] Shao Y P, Yang Y, Wang J J, et al. Northeast Asian dust storms: real-time numerical prediction and validation. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D22): 4691 ~ 4724

[10] 申绍华, 陈受钧. 沙尘暴辐射强迫的锋生过程分析. 气象学报, 1993, **51** (4): 425 ~ 433
Shen Shaohua, Chen Shoujun. The analysis of frontogenesis process forced by dust radiative heating. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1993, **51** (4): 425 ~ 433