

华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析*

孙建华¹⁾ 赵琳娜²⁾ 赵思雄¹⁾

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 首先对 2000~2002 年春季东亚沙尘天气进行了分析, 结果表明有明显日变化, 沙尘暴下午最多, 凌晨最少。然后, 采用集成的沙尘天气预测系统对 2001 年 4 月 6~10 日、2002 年 3 月 19~22 日发生的 2 次强沙尘暴过程进行了预测试验, 将沙尘浓度的模拟结果与实况观测进行了对比。对沙源和起沙过程的深入分析表明: 2 次过程主要的沙尘源地是蒙古国南部, 内蒙古中西部、河北北部、山西东北部、甘肃和青海北部等地区; 起沙中贡献最大是粒径为 2~11 μm 和 11~22 μm 的粒子, 华北北部的荒漠化地区 2~11 μm 和 11~22 μm 的起尘量相当, 而内蒙古西部和蒙古国南部沙地附近的起沙以 2~11 μm 为主, 总的起尘量中 2~11 μm 粒径组的贡献占 90% 以上。

关键词: 沙尘暴; 土壤风蚀; 起沙; 蒙古气旋

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0139-16 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

1 引言

我国北方属沙尘暴多发地区之一。根据 1954~2002 年 681 个气象站气象记录的最新研究表明^[1]: 20 世纪 50 年代的 7 年间共出现 49 次强沙尘暴, 平均每年 7 次, 60、70、80 年代平均每年 4.3~4.7 次, 90 年代平均每年 2.9 次。但 2000~2002 年的 3 年间出现了 15 次, 平均每年 5 次, 明显高于 20 世纪 90 年代的均值。近几年中国北方的沙尘暴发生频繁, 影响范围广, 给受害地区造成了严重的损失^[2]。因此, 定量预报沙尘天气的发生发展对沙尘暴灾害的预报预警都是十分重要的。

要定量模拟沙尘暴过程的全程, 在起沙、输送和沉降的各环节中, 起沙是关键问题。国内对沙尘传输的模拟已有不少工作^[3~5], 其中的起沙方案多采用参数化的方法。近几年, 具有风蚀微物理学基础的起沙方案逐渐发展起来^[6~8], 其中代表性的有 Marticorena 和 Bergametti 方案^[6], Shao 方案^[7]等。Shao 的起沙方案^[7]在澳大利亚沙尘天气的数值模拟中获得了很好的结果^[8]。

沙尘天气的出现除了与强烈的天气系统(冷锋、飑线和气旋等)有关, 还受其他物理过程以及它们之间相互作用的影响。要很好地预报大范围沙尘暴的发生发展, 就必须在能足够反映地表特征的高精度地理信息系统资料支持下, 把起沙方案、输送模式与大气预报模式耦合在一起。赵琳娜等^[9]和孙建华等^[10]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。

2004-01-08 收到, 2004-02-10 收到修改稿

* 国家财政部“西北地区土壤水分、风蚀和沙尘暴监测预测研究”项目(Y0101)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213 和中国科学院大气物理研究所知识创新工程共同资助

本文将首先对 2000~2002 年春季我国北方的沙尘暴过程进行分析, 然后采用孙建华等建立的沙尘天气预测系统^[10], 对 2001、2002 年春季的 2 次强沙尘暴天气过程进行模拟研究, 并采用模拟结果对它们的起沙过程进行分析。

2 2000~2002 年春季的沙尘天气过程

2.1 主要的沙尘天气过程

由于目前的常规观测中没有沙尘浓度, 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, 这种方法只能表征沙尘暴影响范围的相对大小。图 1 给出了 2000 年 4 月、2001 年 4 月、2002 年 3~4 月的地面每 3 h 观

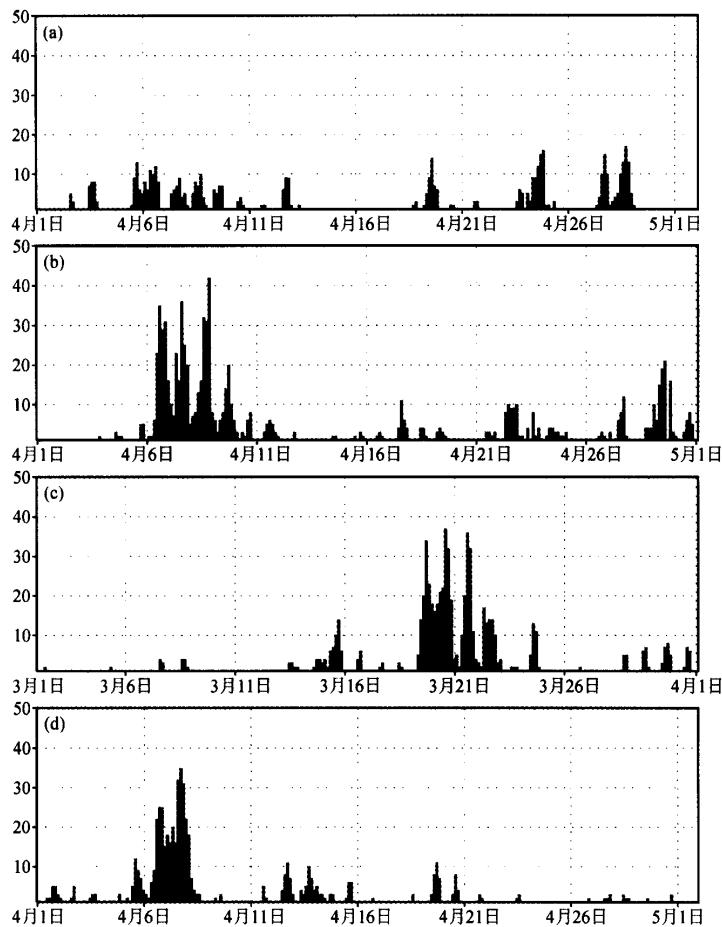


图 1 观测的沙尘暴站点数 (单位: 个)
(a) 2000 年 4 月; (b) 2001 年 4 月; (c) 2002 年 3 月; (d) 2002 年 4 月

测达到沙尘暴强度(包括沙尘暴和强沙尘暴)的站点数。该图显示这几个月中, 范围较大、持续时间最长的两次沙尘暴过程是2001年4月6~10日和2002年3月18~22日, 其次是2002年4月5~9日过程。根据定义, 这3次过程都属于强沙尘暴天气。

另外, 每天有8次地面观测, 基本可以反映日变化的特征。图2为2000年4月、2001年4月、2002年3~4月4个月观测到的浮尘、扬沙次数和沙尘暴、强沙尘暴次数的日变化。观测到沙尘暴天气的站点数除了2001年4月是14时最多, 其他3个月都是在17时最多, 05时最少, 也就是沙尘暴的最高频率出现在下午, 凌晨最少。观测到的浮尘、扬沙天气都是在14时最多, 23时最少, 但浮尘、扬沙天气在1天中有波动, 与沙尘暴天气白天逐渐增强, 晚上逐渐减弱的日变化不同。

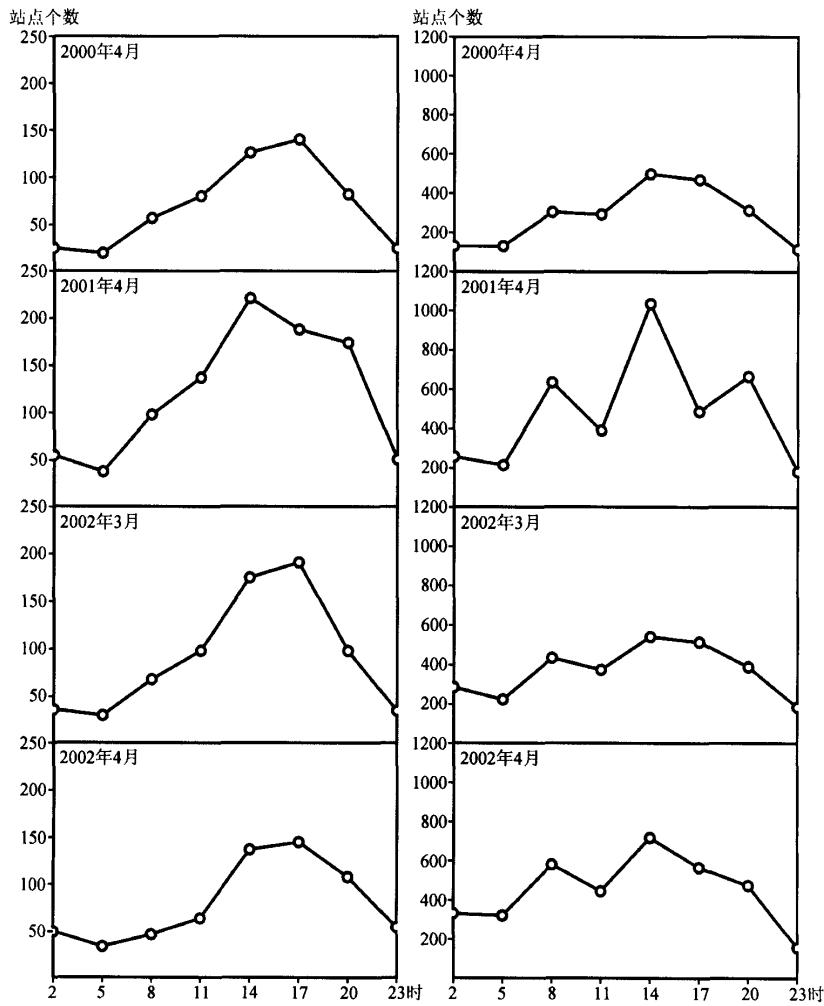


图2 地面观测的沙尘暴、强沙尘暴站数(左图)和浮尘、扬沙站数(右图)的日变化

以上分析显示, 沙尘天气的发生除与天气尺度系统的风速有关外, 边界层的日变化也有非常重要的影响。

2.2 影响天气系统

2000~2002年春季有多次强沙尘暴天气发生, 本文将主要分析2次过程, 2001年4月6~10日(个例1)和2002年3月18~21日(个例2)。应当指出, 上述两次过程都与蒙古气旋的发展东移有关。对于蒙古气旋的发生发展, 赵琳娜等^[2]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进行了较深入的分析。本文先回顾一下2次沙尘暴过程中蒙古气旋的影响。

2001年4月6~10日内蒙古、甘肃、华北北部、东北大部以及蒙古国南部出现了大范围的沙尘天气。该过程有2个蒙古气旋发展东移, 6日08时(北京时, 下同)有一低槽位于贝加尔湖(图3a); 7日08时第1个气旋在850 hPa高度上加深到1160 gpm, 中心位于中、蒙、俄边境处(图3b), 此后, 气旋很快减弱东移; 但同时, 在蒙古国中部又有1个气旋生成(图3c)沿同一路径自西向东移, 最强时850 hPa中心强度只有1320 gpm(图3d、e); 11日该气旋对我国的影响结束(图3f)。由于前1个气旋较强, 因此, 沙尘暴天气的范围和强度6~8日也较强。

2002年3月18~22日过程影响了西北、华北及东北大片区域, 是近年来影响北京最严重的一次沙尘暴天气。在这次严重的沙尘天气期间, 中国科学院大气物理研究所观测到的沙尘浓度高达 12.06 mg m^{-3} (观测时间为10:50~15:30, 地点为($39^{\circ}58'N, 116^{\circ}22'E$))^[1]。这次过程中可以清楚地看到1个较深的低槽从中亚(18日08时, 图略)东移到中国的东部沿海地区(22日08时)。由于18日的沙尘天气与蒙古气旋没有联系, 本文的模拟从19日08时开始。对应低层19日08时有一低槽位于贝加尔湖(图4a); 20日08时气旋中心位于蒙古国东部和内蒙古的东北部(图4b), 强度达到1240 gpm, 20日是此次过程中沙尘天气影响我国范围最大的一天; 21日气旋中心位于内蒙古北部(图4c); 22日移出我国东北(图4d)。与个例1相比, 个例2的气旋尺度较大, 这两个个例中, 发展最强的气旋是个例1中的第1个气旋。

3 沙尘天气预测系统

本文采用的沙尘天气预测系统(图5)^[10]包括: GIS(Geographic Information System)数据, 起沙模式前处理, 有限区域中尺度模式(包含有陆面过程), 起沙模式和输送模式。图5中虚线框内的天气模式、起沙模式和输送模式耦合在一起, 同步进行积分。边界层模式和陆面模式分别提供摩擦速度、表层土壤湿度给起沙模式, 起沙模式计算起沙率。起沙模式提供垂直尘通量给输送模式, 输送模式需要天气模式的水平风场、温度、垂直运动以及位势高度等变量的驱动, 输送模式计算每个格点的瞬时平均沙尘浓度。下面简单介绍预测系统的起沙机制及模式。

起沙模式主要计算3个物理量: 临界摩擦速度($u_{*,r}$)^[12], 顺流沙通量(Q), 垂直尘通量(F)^[7]。临界摩擦速度是一个表示土壤表面基本性质的物理量, 它能表征土壤表面阻抗风蚀的能力。是否起沙由摩擦速度(u_*)和临界摩擦速度($u_{*,r}$)的大小决定, 当 u_* 大于 $u_{*,r}$ 可以起沙, 当 u_* 小于 $u_{*,r}$ 则不能起沙。植被覆盖、地表性质和土壤

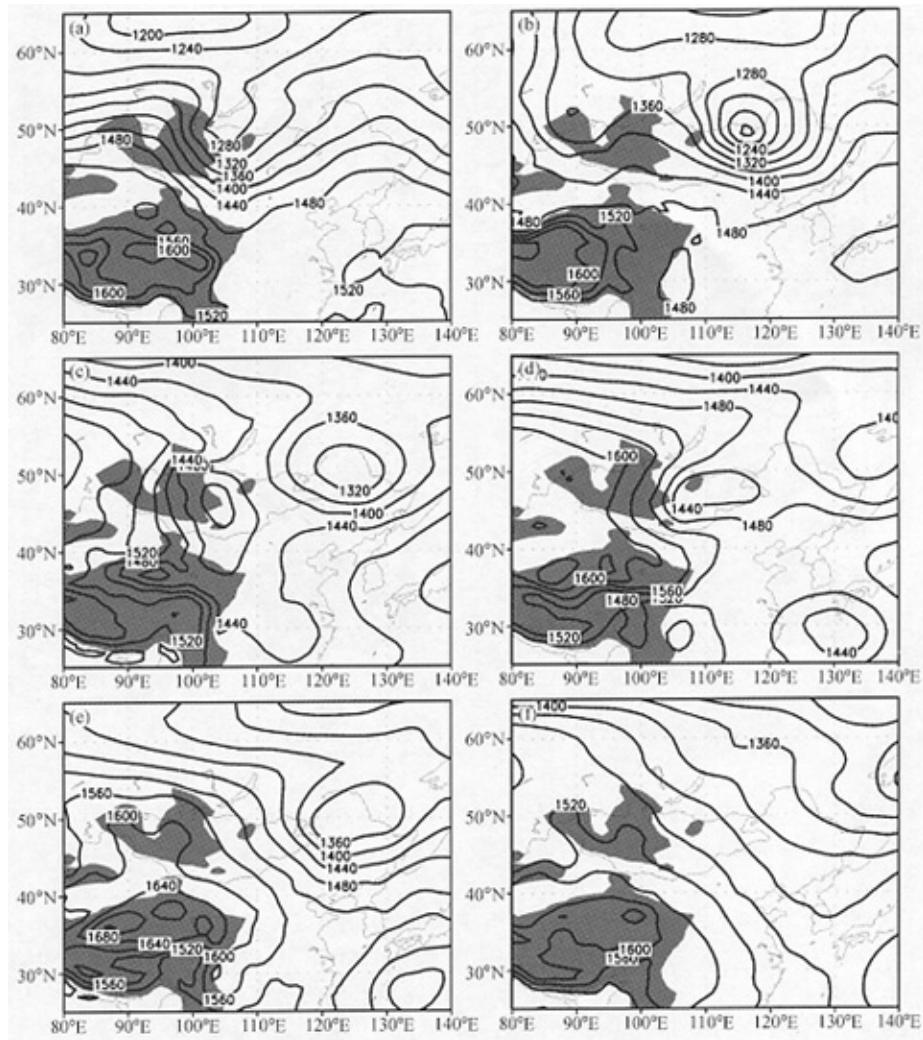


图 3 2001 年 4 月 6~11 日 850 hPa 高度场 (阴影: 地形高度大于 1 500 m)
 (a) 6 日 08 时; (b) 7 日 08 时; (c) 8 日 08 时; (d) 9 日 08 时; (e) 10 日 08 时; (f) 11 日 08 时

含水率对临界风速的影响表现为粗糙地表的摩擦阻力大。由于土壤湿度增大将增加粘滞性，加强土壤粒子的团聚作用，因而，植被覆盖、地表性质和土壤含水率等对临界摩擦速度的影响较大。本研究中，临界摩擦速度的计算采用如下方法：

$$u_{*,t} = RHM u_{*,0} = RHM \sqrt{a_1 \left(\sigma_p g d + \frac{a_2}{\rho d} \right)}, \quad (1)$$

式中， $u_{*,0}$ 是单一粒子经过裸露、干燥和松散的土壤表面时的临界摩擦速度， d 为粒径， g 为重力加速度， ρ 是空气密度， σ_p 是粒子与空气的密度比。系数 a_1 和 a_2 由风洞实

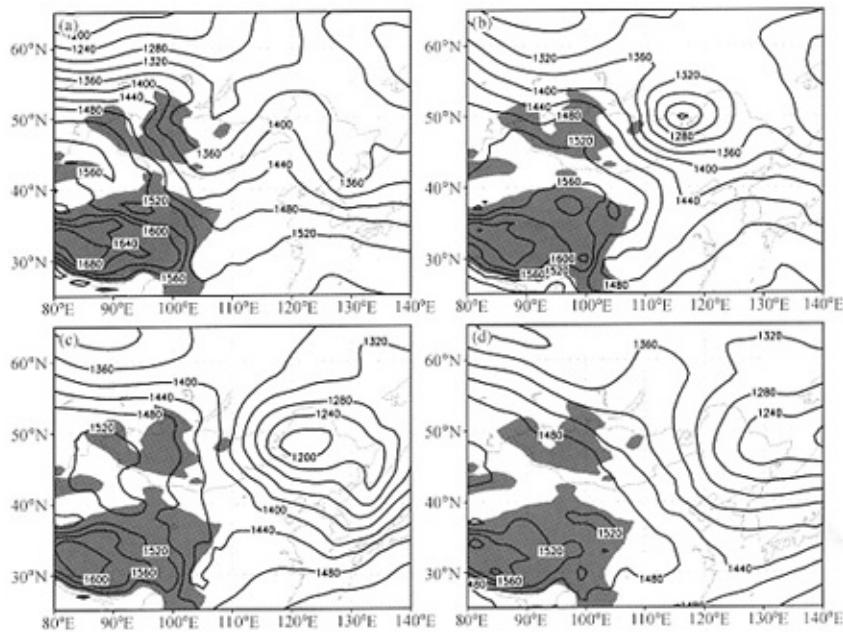


图 4 2002年3月19~22日850 hPa的高度场(阴影: 地形高度大于1500 m)

(a) 19日08时; (b) 20日08时; (c) 21日08时; (d) 22日08时

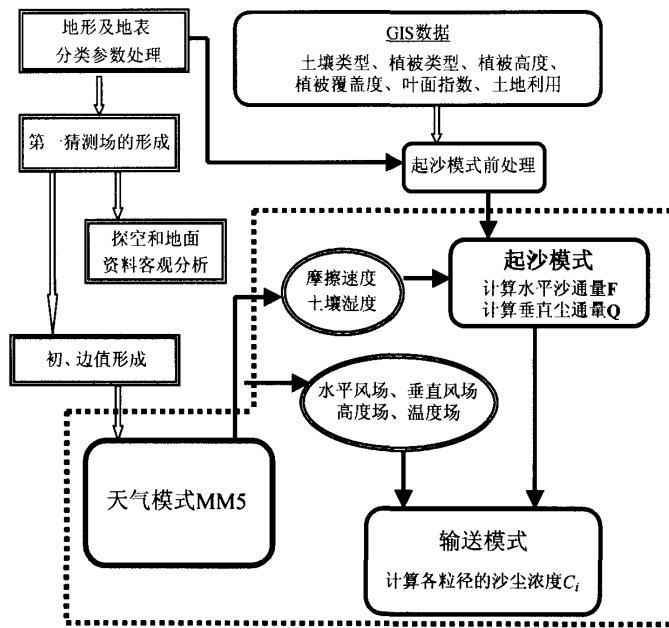
验数据拟合(1)式得到, $a_1=0.0123$, $a_2=3\times 10^{-4} \text{ kg s}^{-2}$ 。R、H和M分别代表地表粗糙度、土壤水分和土壤紧密度对 $u_{*,0}(d)$ 的影响, 这3个参数是根据土壤和植被参数计算得到的。

气象观测中将沙尘天气分为浮尘、扬沙和(强)沙尘暴, 若按尘土的颗粒大小分类, 实际上都是“尘”。据观测, 大气中主要的尘, 其粒径在 $1\sim 10 \mu\text{m}$ ^[13], 大气中沙粒径的下限定义为 $20 \mu\text{m}$, 粒径为 $60 \mu\text{m}$ 的沙粒在严重的土壤风蚀时才可能出现^[14]。因而, 在起沙模式中, 将沙尘分为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)。

已有的研究表明土壤粒子的跃移运动是粒子起沙的主要原因^[7]。水平跃移沙通量 Q_i (单位: $\text{mg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)和垂直尘通量 F_i (单位: $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)均针对上述各粒径组。进行计算时, 对粒径为 d 的水平沙通量有公式:

$$Q_i(d)=\begin{cases} (c\rho u_*^3/g)[1-u_{*,i}(d)/u_*](1+[u_{*,i}(d)/u_*]^2), & \text{当 } u_* \geq u_{*,i} \\ 0, & \text{当 } u_* < u_{*,i} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $c=2.6$, 为经验常数。对于粒径特别大和特别小的粒子, 因其临界摩擦速度较大, $Q_i(d)$ 为0。考虑地面非风蚀因素影响, 要扣除植被覆盖影响和地面粗糙度(如砂砾、卵石和岩石等)影响后的可风蚀总面积 E_s 和 E_v 。格点上的 E_s 和 E_v 可从GIS数据

图 5 沙尘天气预测系统流程^[10]

计算得到, 于是水平沙通量为 $Q_m = Q \times E_s \times E_v$ 。

起沙方案中考虑 3 种起沙机制: (1) 由于空气的动力作用粒子直接脱离地面而悬浮在空中产生的起沙率 ($F_a(i)$); (2) 由于粒子的跃移碰撞产生的起沙率 ($F_b(i)$); (3) 粒子的破裂和聚集体破碎产生的起沙率 ($F_c(i)$), 在起沙模式中对它们要分别进行计算。总起沙率为

$$F(i) = F_a(i) + F_b(i) + F_c(i).$$

起沙模式需要的陆面参数为土壤类型、土地利用、植被类型、植被高度、叶面积指数和植被覆盖率。其中土壤类型和植被类型的数据, 国外部分是取自美国地质勘察(USGS) 资料, 国内部分取自中国 1 : 400 万中国土壤图数据资料, 其他植被资料是由遥感数据转化而来^[15,16]。所有数据的分辨率为 $3' \times 3'$, 起沙模式中用到的土壤类型以及起沙模式和沙尘输送模式详见文献 [8~10]。

4 模拟试验及结果分析

4.1 模拟试验方案

采用前面介绍的沙尘天气预测系统, 对 2001 年 4 月 6~10 日和 2002 年 3 月 19~22 日发生的 2 次较强沙尘天气的起沙及输送过程进行了数值预测。模式格距为 45 km, 预测区域大致为 $(25^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E})$, 中心点为 $(40^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E})$ 。气象模式的背景场采用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP 格点资料, 模拟时间为 2001 年 4 月 6 日 08 时~10 日 08 时和

2002 年 3 月 19 日 08 时~22 日 08 时。

4.2 模拟结果与观测对比

由于只有极少的一些点有沙尘浓度资料，而在常规观测中却没有，我们这里将模拟的地面沙尘浓度与 3 h 地面天气现象对比，虽然不是非常严格，但就定性而言，仍不失为一种对照检查的方法。

个例 1：2001 年 4 月 6 日在蒙古国和内蒙古中部（图 6a、b），模拟的强沙尘浓度区与观测基本一致，但河北北部和东北南部的模拟沙尘区，在实况中没有观测到，这可能是由于目前我们得到的陆面参数，特别是土壤类型与实际情况不完全相符所致。7 日模拟的沙尘区在内蒙古的中部、河北北部、东北南部与实况基本一致，只是内蒙古西部的模拟沙尘区观测中没有出现（图 6c、d），但 7 日模拟的最强沙尘区出现在内蒙古中东部与实况非常一致，6~7 日主要沙尘区的东移与蒙古气旋东移有关。8~9 日观测与模拟的主要沙尘区都在内蒙古西部（图 6e、f、g、h），这片沙尘区是由于另一个蒙古气旋的发生发展造成的。

个例 2：2002 年 3 月 19 日模拟的沙尘区在蒙古国南部、内蒙古西部、甘肃西部和青海北部地区与观测比较一致，特别是 14 时；华北的沙尘浓度在 1 mg m^{-3} 以下，但观测中没有出现沙尘天气（图 7a、b）。20 日沙尘暴影响华北大部分地区（图 7c、d），21 日影响华北北部、东北南部地区（图 7e、f）。这次过程中，3 月 20 日北京观测到最强的沙尘浓度为 12.06 mg m^{-3} ^[11]，模拟结果 20 日华北地区的沙尘浓度比实况偏低，这可能是由于 3 月 19 日夜间内蒙古地区模拟的起沙偏弱，致使 20 日白天的模拟沙尘浓度偏低。我们认为，尽管模拟结果存在一些不足，但模拟的地面沙尘浓度的量值和范围基本是合理的，因此有一定的参考价值。

卫星是目前监测沙尘天气范围和强度的主要工具之一，除了对云下沙尘区域不能分辨外，监测的沙尘区域是基本真实可信的。在我们以前的研究中，曾经将 2002 年几次强沙尘过程的模拟结果与卫星监测图像进行了对比^[10]，这里只对个例 1 的模拟结果进行比较。受蒙古气旋及冷锋的影响，2001 年 4 月 6 日 14 时内蒙古中部、甘肃东部、宁夏以及蒙古国南部出现了大范围的沙尘暴天气（图 8），其中，蒙古国南部和中蒙边界是主要的沙尘区，模拟结果也是在这些地区沙尘浓度最大（图 6b）。这从另一角度反映了模拟结果的可信程度。关于其他时次的卫星资料与模拟结果的对比，限于篇幅，这里不再详述。

预测系统对这 2 次过程沙尘天气的东移都模拟的较好，沙尘区域的东边界与实况较为一致，只是模拟的沙尘范围稍偏大。个例 2 朝鲜半岛在 3 月 21 日观测有沙尘天气，而模拟结果没有；21 日沙尘天气在东北东部较弱，而朝鲜半岛的观测却有大范围沙尘天气。这可能是由于他们的观测规范与中国不一致，是否还有其他原因，有待继续探讨。

综上所述，模拟的 2 次过程的沙尘范围与观测的沙尘天气范围比较一致，沙尘预测系统较好地反映了起沙和输送过程，较准确地模拟了 2 次过程的影响区域和时间，模拟的结果基本符合实际。因此，可以在此基础上，利用模拟结果对这 2 次过程的沙尘源地和起沙过程进行更多的分析。

4.3 起尘源地和起尘过程分析

虽然 2001、2002 年的 2 次过程都是受蒙古气旋的发展东移影响，但是，由于两次

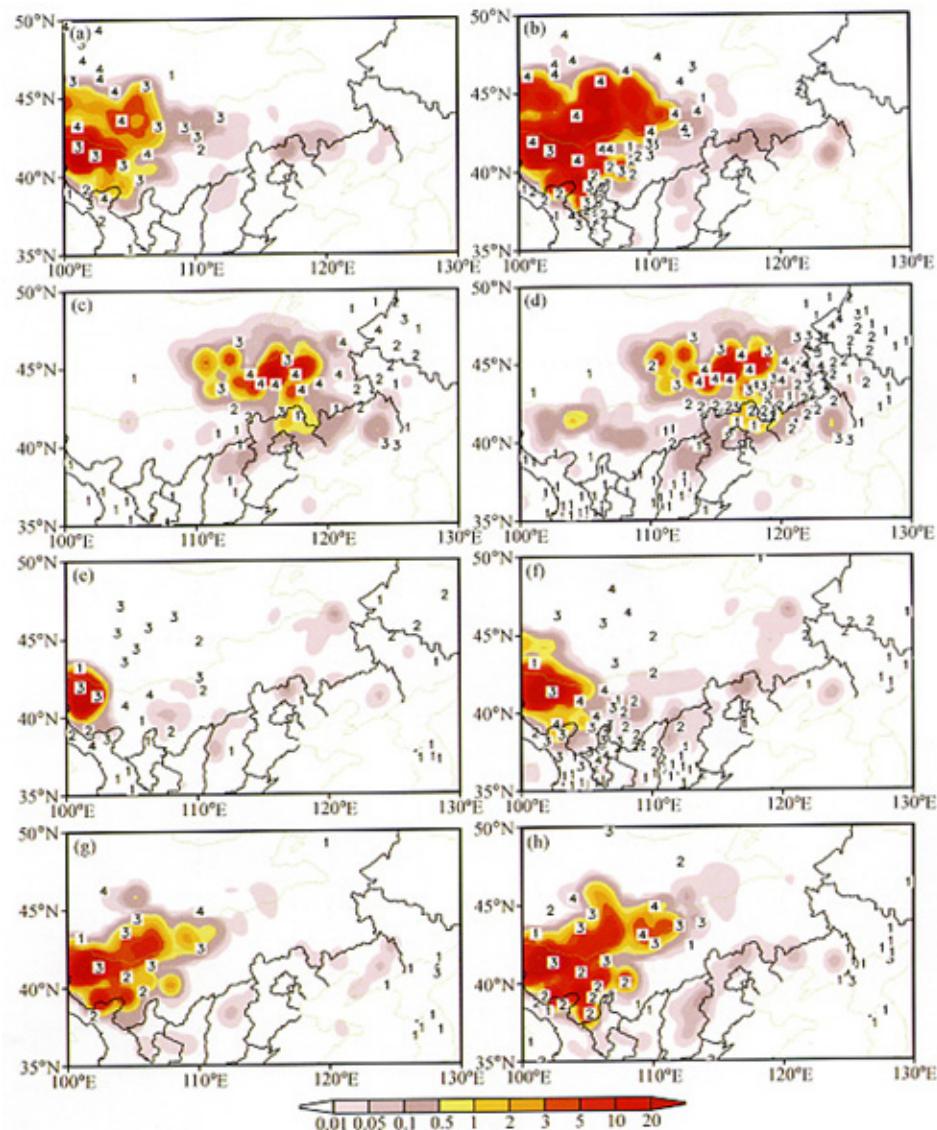


图 6 2001 年 4 月 6~9 日模拟的地面沙尘浓度 (阴影, 单位: mg m^{-3}) 和地面观测天气现象

(a) 6 日 11 时; (b) 6 日 14 时; (c) 7 日 11 时; (d) 7 日 14 时;

(e) 8 日 11 时; (f) 8 日 14 时; (g) 9 日 11 时; (h) 9 日 14 时

图中数字: 1 为浮尘, 2 为扬沙, 3 为沙尘暴, 4 为强沙尘暴

蒙古气旋造成的大风强度、气旋移动路径的差异以及大风影响区域地表状况、土壤水分的不同, 因此, 不同个例的起尘源地可能不同, 不同区域各粒径组粒子的起沙强度也可能不同。下面采用模式输出的每小时垂直尘通量来分析沙尘源地和不同粒径组粒

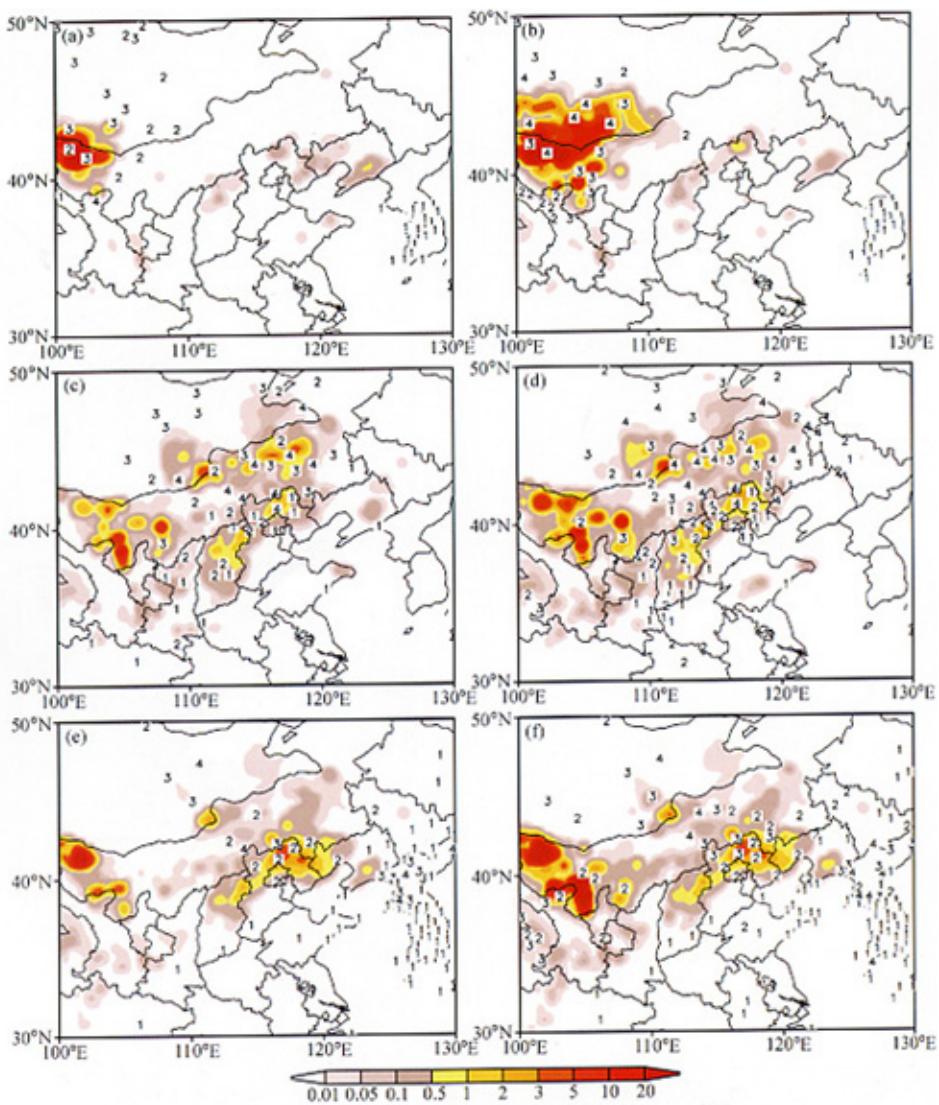


图7 同图6,但为2002年3月19~21日

(a) 19日11时; (b) 19日14时; (c) 20日11时; (d) 20日14时; (e) 21日11时; (f) 21日14时

子的起沙强度。

图9、10是2次过程的各粒径组粒子的平均垂直尘通量,由于粒径大于 $22\mu\text{m}$ 的粒子基本没有起尘,所以只给出粒径小于 $22\mu\text{m}$ 粒子的起尘量。个例1的起沙区域主要为蒙古国南部的戈壁和沙地、内蒙古中西部的沙地,此外,在青海西部和甘肃西部也有较强的起沙(图9a)。这次过程小于 $2\mu\text{m}$ 的粒子起尘量很小,在内蒙古中部和河北北部几乎没有贡献,但内蒙古西部的沙地附近有明显的起尘(图9b);甘肃、青海西

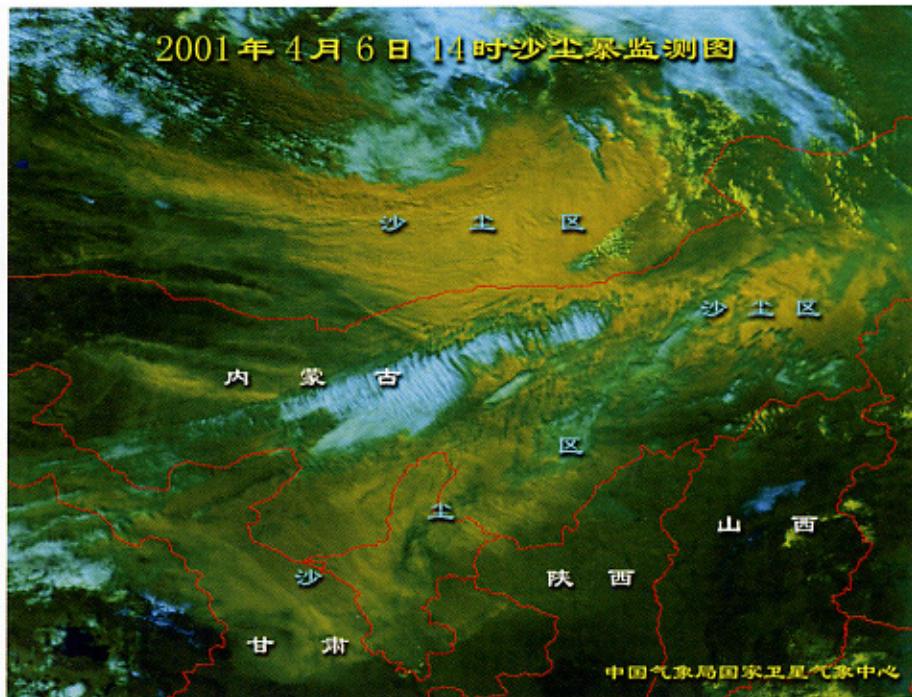


图8 2001年4月6日14时NOAA-16气象卫星监测到的沙尘遥感图像

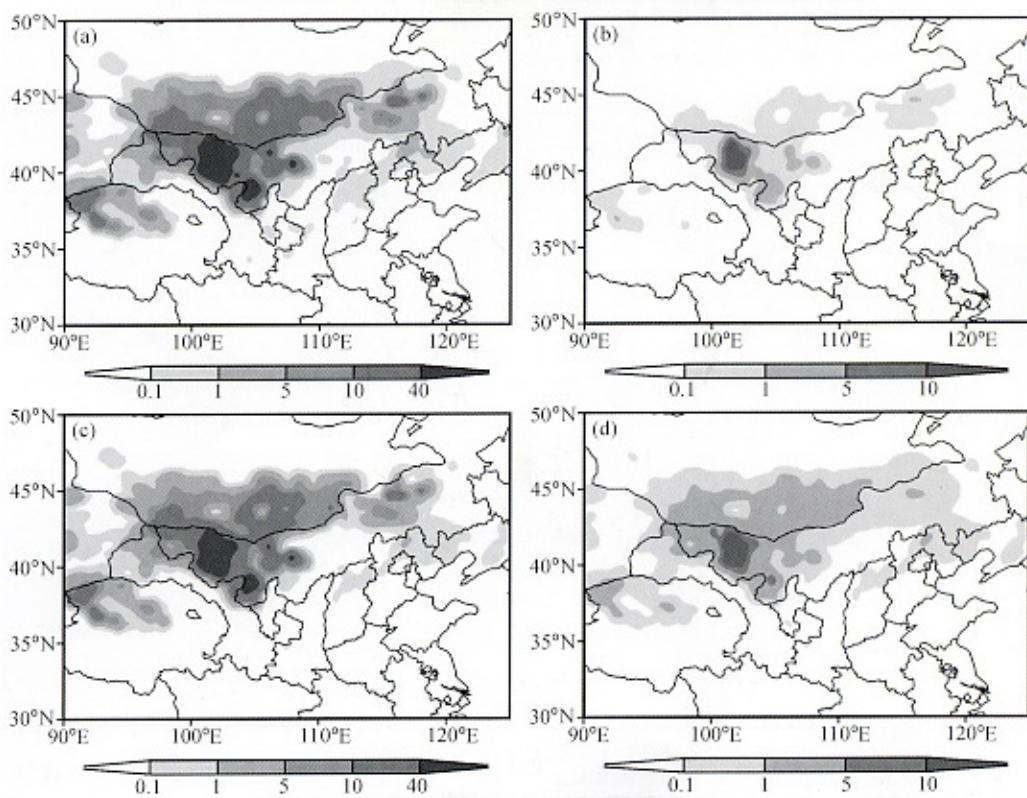


图9 模拟的2001年4月6日08时~10日08时的平均尘通量(单位: $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

(a) $d \leq 22 \mu\text{m}$; (b) $d \leq 2 \mu\text{m}$; (c) $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$; (d) $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$

部, 内蒙古中西部的沙尘源区 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子贡献最大(图9c); 河北北部的沙尘源区 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ 两组粒子的贡献相当。2002年3月19~21日的过程中, 起尘区域(图10a)主要是在蒙古国的南部、内蒙古阿拉善盟地区、甘肃北部和青海北部。河北省北部、山西省北部的垂直尘通量较小。在这次过程中, 内蒙古西部沙地小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子也有较大的垂直尘通量(图10b), 整个沙尘源区 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子都有明显的起尘(图10c、d), 但西部地区 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 粒子的垂直尘通量较强, 而东部的华北北部两种粒径粒子的起尘量差不多。这两次过程中, 起尘量最大的中心在内蒙古阿拉善盟地区的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠, 个例1的起沙范围比个例2稍大, 特别是在蒙古国南部, 起沙强度也较强。

由于不同地区的土壤类型和植被状况不同, 所以不同沙尘源地的起沙强度和各粒径大小的土壤颗粒在这些过程的起尘量中贡献也不同。前面已经对各粒径粒子在整个沙尘天气过程中平均的垂直尘通量作了分析, 但对他们的时间演变还未作讨论。因此, 我们取不同区域的各粒径组粒子, 计算其区域平均垂直尘通量随时间的演变(图11)。由于这两个个例的起沙范围相似, 可取两个区域, 即内蒙古西部($97\sim110^{\circ}\text{E}$, $38\sim45^{\circ}\text{N}$)和华北北部($112\sim122^{\circ}\text{E}$, $38\sim42^{\circ}\text{N}$)。两个区域的共同特点是: 起尘量表现出明显的日变化, 白天大, 晚上小, 最大值出现在午后, 这与观测的沙尘暴范围下午最大比较一致(图2)。在内蒙古西部, 起沙中贡献最大是 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子(细粉土), $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ 和小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子贡献比较小, 粒径大于 $22\text{ }\mu\text{m}$ 的尘土颗粒则几乎没有贡

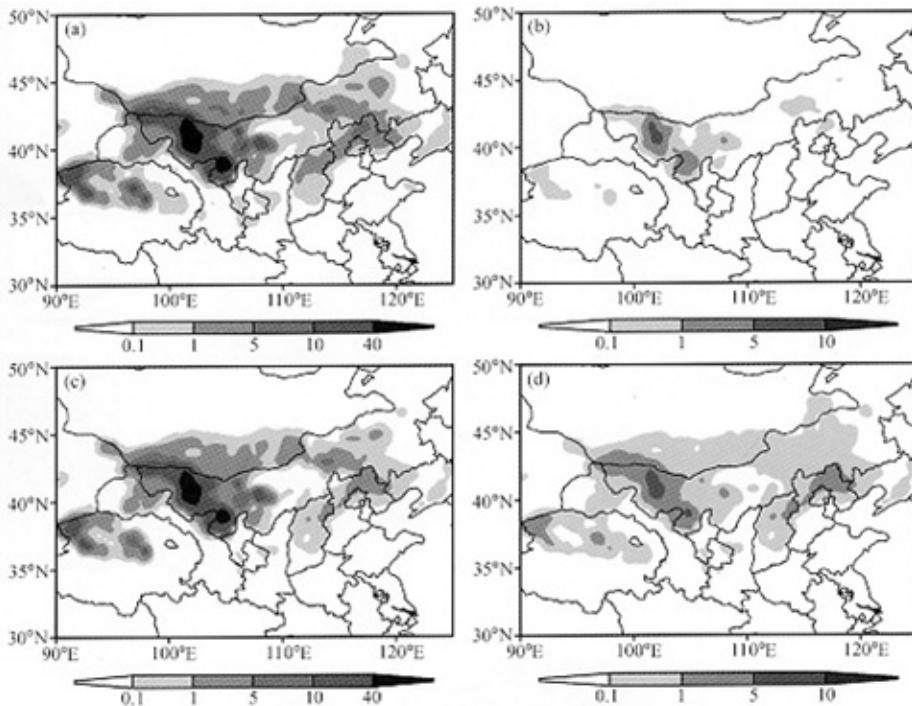


图10 同图9, 但为2002年3月19日08时~22日08时的平均尘通量

献。区域平均起尘量最大的是2001年4月6日,达 $7.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (图11a),其中 $2\sim11 \mu\text{m}$ 的粒子为 $6.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$;7日由于气旋的东移,该地区起尘量很小;8、9日该区域的起尘量基本相当。而华北地区的起尘量比内蒙古西部小一个量级(图11b),该区域在7日起尘量最大,这与此次过程中第1个气旋东移有关,其他3天起尘量差别不大。另外,华北地区的 $2\sim11 \mu\text{m}$ 和 $11\sim22 \mu\text{m}$ 粒子的起尘量差不多,这与内蒙古西部的起尘主要是 $2\sim11 \mu\text{m}$ 的粒子不同。

2002年3月19~22日过程,内蒙古西部的起尘最强在19、21日下午,总的起尘量达 $3.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,其中 $2\sim11 \mu\text{m}$ 的粒子为 $3.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,占该时刻总起尘量的88%,而20日起尘量较小(图11c)。与个例1相似,个例2内蒙古沙地的起尘主要来自 $2\sim11 \mu\text{m}$ 粒子,而华北北部总起尘量中 $2\sim11 \mu\text{m}$ 和 $11\sim22 \mu\text{m}$ 粒子各占50%左右(图11d)。另外,个例2中华北地区的起尘量比个例1强。

以上分析使我们对这2次过程沙尘源地各粒径粒子的起沙强度、空间分布和时间演变有了一定的了解,为了进一步分析这2次过程的起尘量,对模拟区域总的尘通量

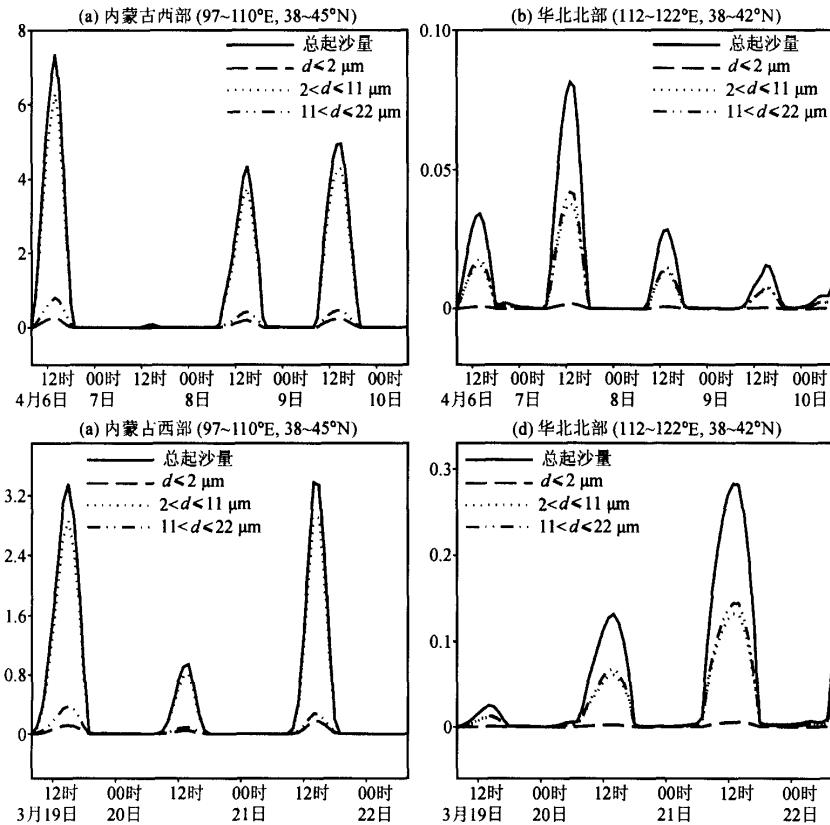


图11 沙尘过程各粒径组区域平均起尘量随时间演变(单位: $\text{mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

(a)、(b) 2000年4月6日08时~10日08时; (c)、(d) 2002年3月19日08时~22日08时

进行了计算, 计算公式如下:

$$F_{\text{DOM}}(t) = \sum_{i=1,j=1}^{I,J} F_t(i,j,t) \Delta x \Delta y,$$

其中, Δx 和 Δy 为 x 、 y 方向的格距, 为 45 km; I 、 J 为 x 、 y 方向的格点数。图 12 为整个模拟区域 (以 (115°E, 40°N) 为中心的 6 750 km × 5 400 km 范围) 各粒径组粒子的总起尘量随时间的演变。个例 1 的最大每小时起尘量为 2001 年 4 月 6 日的 23 Mt h^{-1} , 而个例 2 的最大起尘量为 2002 年 3 月 21 日的 10 Mt h^{-1} , 个例 1 的最大起尘量是个例 2 的 2 倍。前面的分析表明, 个例 1 在蒙古国南部和内蒙古西部 2001 年 4 月 6 日的起尘范围和强度都较个例 2 强, 这可能是个例 1 的最大起尘量较大的主要原因。2 个个例在总的起尘量中 $2\sim11 \mu\text{m}$ 粒径组的贡献占了 90% 以上, 其他粒径组的贡献较小。

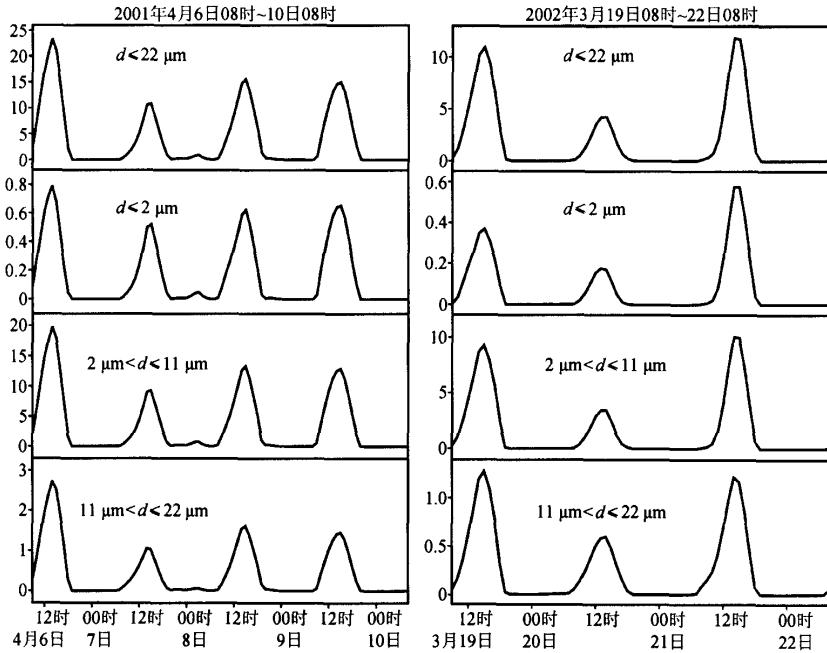


图 12 模拟区域不同粒径粒子的每小时起尘量随时间的演变 (单位: Mt h^{-1})

5 结论和讨论

本文首先对 2000~2002 年春季的沙尘天气进行了分析, 共有 3 次持续时间长和强度较强的沙尘暴过程, 它们分别是 2001 年 4 月 6~10 日、2002 年 3 月 18~22 日和 4 月 5~9 日。沙尘天气有明显的日变化, 沙尘暴一般是在下午最多, 凌晨最少。利用较完整的集成沙尘天气预测系统, 对 2001、2002 年春季发生在我国北方地区的 2 次较强沙尘天气过程进行了模拟试验, 结果表明, 该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, 大体复制出了这 2 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，对这2次强沙尘暴的起沙过程进行了深入的分析研究，发现：主要的沙尘源地是蒙古国的南部，内蒙古中西部，河北省北部，山西省东北部，甘肃和青海北部等；个例1的起沙范围比个例2大，特别是在蒙古国南部，起沙强度也较强；起沙中贡献最大的是粒径为 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子，华北北部的荒漠化地区 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ （细粉土）和 $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ （中粉土）起尘量相当，而内蒙古西部和蒙古国南部沙地附近的起沙以 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ （细粉土）为主；2个个例在总的起尘量中 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 粒径组的贡献占了90%以上，其他粒径组的贡献较小。

应当指出，近年来发生在华北和东北的强沙尘暴天气多与蒙古气旋有关，而西北地区沙尘暴的影响天气系统显然与华北、东北地区有所不同，因此，今后还应对更多类型的沙尘暴天气，尤其是西北地区沙尘暴天气开展深入的研究。

致 谢 邵亚平博士提供了起沙和输送模式，并提出了宝贵的意见和建议；曾庆存院士给予了热情指导和大力支持；国家卫星中心提供了卫星监测资料；中国科学院地理科学与资源研究所提供了GIS资料；中国科学院大气物理研究所张仁健博士提供了沙尘浓度观测资料，在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 周自江、章国材，中国北方的强典型沙尘暴事件，科学通报，2003，**48**（11），1224~1228.
- 2 赵琳娜，沙尘（暴）发生发展的机理及起沙机制的数值模拟，中国科学院大气物理研究所博士学位论文，2002，3~6.
- 3 刘春涛、程麟生，黑风暴沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验，气象学报，1997，**55**（6），726~738.
- 4 刘毅、任丽新、周乐义等，一次黄沙输送过程的数值模拟研究，大气科学，1998，**22**（6），905~912.
- 5 黄美元、王自发，东亚地区黄沙长距离输送模式的设计，大气科学，1998，**22**（4），625~637.
- 6 Marticorena, B., and G. Bergametti, Modeling the atmospheric dust cycle. II:, Design of a soil—derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 16415~16430.
- 7 Shao Yaping, A model for mineral dust emission, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D17), 20239~20254.
- 8 Lu Hua, and Shao Yaping, Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications, *Environmental Modeling & Software*, 2001, **16**, 233~249.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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），374~380.
- 12 Shao Yaping, , and Lu Hua, 2000; A simple expression for wind erosion threshold friction, *J. Geophys. Res.*, **105** (D17), 22437~22443.
- 13 Shao Yaping, *Physics and Modelling of Wind Erosion*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2000, 139 ~142.
- 14 庄国顺、郭敬华、袁蕙等，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，科学通报，2001，**46**（3），191~197.
- 15 张时煌、彭公炳、黄政，基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取与数据融合，气候与环境研究，2004，**9**（1），65~79.
- 16 张时煌、彭公炳、黄政，基于遥感与地理信息系统支持下的地表植被特征参数反演，气候与环境研究，2004，**9**（1），80~91.

A Numerical Simulation on Severe Dust Storm Events in North China and Their Dust Sources

Sun Jianhua¹⁾, Zhao Linna²⁾, and Zhao Sixiong¹⁾

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 in the spring of 2000~2002 are analyzed firstly. It is found that the intensity of dust storms has obvious diurnal variation with most severe dust storm occurring in the afternoon and weakness at dawn. Afterwards, an integrated dust storm numerical modeling system is employed to simulate the dust storm events of 6~10 April 2001 and 19~22 March 2002, respectively. This 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 of two dust-storm events have been simulated successfully. Simulated dust concentration agrees very well with observational surface weather phenomena and satellite images. Based on successful numerical simulations, the hourly simulation results are used to analyze the dust sources of these events. The dust sources of two events are the southern part of Mongolia, the middle and western parts of Inner Mongolian autonomous region, northern part of Gansu, Qinghai, Hebei, and Shanxi provinces. It is found that the size of the dominant dust particles were 2~11, 11~22 μm . However, the dominant dust particles over western part of Inner Mongolian autonomous region and Mongolia are 2~11 μm , and 2~11 and 11~22 μm over North China. Dust particles of 2~11 μm has 90% contribution of total dust emission.

Key words: dust storm; wind erosion; dust emission; Mongolian cyclone