

# 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<sup>\*</sup>

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** 将澳大利亚新南威尔士大学(UNSW)邵亚平发展的具有清晰风蚀物理学概念的起沙数值模式、输送模式与PSU/NCAR的中尺度气象预报模式MM5进行耦合, 以高精度中国区域的GIS(Geographic Information System)数据为基础, 建立了一个较完整的沙尘暴起沙和输送过程的预测系统。该预测系统可以预测地面起沙率和大气中沙尘浓度。在此基础上, 采用该系统对2002年3~4月3次影响我国北方大部分地区的沙尘(暴)天气的起沙和输送过程进行了模拟试验。试验结果表明模拟的沙尘浓度与地面天气现象及卫星云图的沙尘天气范围比较一致, 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。北方上述大范围沙尘天气的沙尘源地为蒙古国的南戈壁省、东戈壁省, 内蒙古中西部, 河北省北部, 山西省东北部, 甘肃和青海北部等地区。起沙中贡献最大的粒子粒径为2~11 μm和11~22 μm, 能够长时间、长距离输送的沙尘也是上述大小的粒子, 沙尘粒子的垂直输送高度一般在500 hPa以下。

**关键词:** 沙尘天气; 起沙机制; 沙尘输送

## 1 引言

在世界四大沙尘暴多发地区(中亚、北美、中非和澳大利亚)中, 我国北方属中亚沙尘暴多发地区, 沙尘天气已经成为我国北方显著的环境问题之一。而我国的土壤风蚀研究起步较晚, 多数集中在沙尘暴的天气、气候分析和灾害的评估, 对沙尘天气的数值模拟和预测研究较少。

沙尘(暴)天气数值模拟中的关键问题是起沙源的模拟, 而沙尘源区的范围、地表特征、起动粒子的通量以及粒子的尺度分布等都涉及到非常复杂的过程。国内对沙尘传输的模拟已有不少工作<sup>[1~4]</sup>, 对沙尘源的模拟工作尚不多见。在沙源的处理上一般多采用参数化方法, 难于满足实际应用的需要。为了更真实地反映起沙过程的特点, 本文采用了澳大利亚新南威尔士大学邵亚平发展的具有清晰风蚀物理学基础的起沙模式, 该模式对澳大利亚沙尘(暴)天气预测获得了很好的结果<sup>[5]</sup>。本研究以较高精度的GIS(Geographic Information System)数据为基础, 将具有清晰物理概念的起沙模式、输送模式与

2003-04-01 收到, 2003-04-07 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创新知识工程共同资助

中尺度天气模式 MM5 耦合, 建立了一个较完整的沙尘天气预测系统, 对 2002 年 3、4 月的 3 次沙尘天气进行了起沙和输送过程的模拟试验并对试验结果进行了分析。

## 2 预测系统的建立

沙尘天气的出现除了与强烈天气系统(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。预报沙尘天气不仅要正确预报大气状况, 而且要正确描述地面条件, 如土壤状态、地表植被覆盖以及土壤水分等影响因子。因此, 一个完整的沙尘天气预测系统应包括 5 个部分: 天气模式、陆面模式、起沙模式、输送模式以及 GIS 数据集。本文建立的沙尘天气预测系统(图 1)包括: GIS 数据, 起沙模式前处理, 有限区域中尺度模式 MM5V3(包含有陆面过程), 起沙模式和输送模式。图 1 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(MRF)和陆面模式(OSU/Eta)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。起沙模式提供垂直沙通量给输送模式, 输送模式还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。由于中尺度模式 MM5 是一个被广泛使用的模式, 不再赘述, 下面主要介绍起沙模式和输送模式。

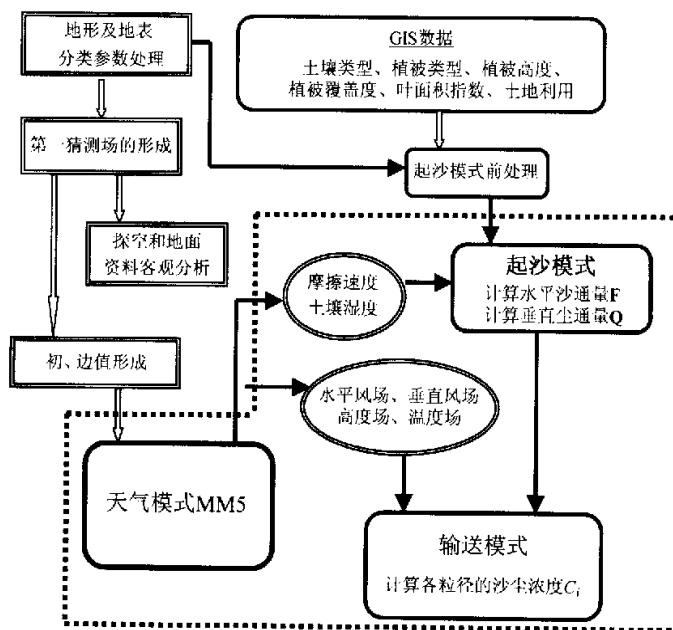


图 1 沙尘天气预测系统流程图

### 2.1 起沙模式

本文引入具有清晰风蚀物理学概念的起沙模式进行起沙率的计算, 未采用对沙尘

源、汇项参数化的办法。下面简要介绍起沙机制及主要物理量（临界摩擦速度及沙尘通量等）的计算。

### 2.1.1 临界摩擦速度

模式中是否起沙由摩擦速度 ( $u_*$ ) 和临界摩擦速度 ( $u_{*c}$ ) 的大小决定，当  $u_*$  大于  $u_{*c}$  可以起沙，当  $u_*$  小于  $u_{*c}$  则不能起沙。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。与土壤粒子的粒径、地表性质和土壤含水率等多种因素有关。

拜格诺<sup>[6]</sup>导出了理论上临界摩擦速度的表达式，得到在某一个粒径范围内临界摩擦速度与沙粒粒径的平方根成正比的关系。实验研究表明粒径在 75~100 μm 之间  $u_{*c}$  的值最小，说明该粒径范围的粒子容易起动。当粒径小于 75 μm，临界摩擦速度会随着粒径的减小而迅速增大，主要是由于颗粒之间微弱化学键内聚力增加，表面粗糙度较小等原因造成。植被覆盖、地表性质和土壤含水率对临界风速的影响表现为粗糙地表的摩擦阻力大，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：

$$u_{*c} = RHM u_{*o} = RHM \sqrt{a_1 (\sigma_p g d + \frac{a_2}{\rho d})}, \quad (1)$$

其中， $u_{*o}$  是单一粒子经过裸露、干燥和松散土壤表面时的临界摩擦速度， $d$  为粒径， $g$  为重力加速度， $\rho$  是空气密度， $\sigma_p$  是粒子与空气的密度比。系数  $a_1$  和  $a_2$  由风洞实验数据拟合（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  $u_{*o}$  ( $d$ ) 的影响，根据土壤和植被参数计算得到。起沙模式的运行需要先从 GIS 数据库中得到土壤和植被参数，然后由土壤水分和摩擦速度驱动起沙模式，计算水平沙通量  $Q$  及垂直尘通量  $F$ 。

### 2.1.2 顺流跃移沙通量 $Q_i$ 和垂直尘通量 $F_i$

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，大气中主要尘的粒径在 1~10 μm<sup>[7]</sup>，大气中沙粒径的下限定义为 20 μm，粒径为 60 μm 的沙粒在严重的土壤风蚀时才可能出现<sup>[8]</sup>。因而，在起沙模式中，沙尘按粒径分为 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），采取这种分组是根据大气中观测到的尘粒的粒径分布。

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<sup>[6,7,9]</sup>。起沙模式计算的主要物理量均针对上述 6 个粒径组，对某一粒径组来说，其水平跃移沙通量为  $Q_i$ （单位： $\text{mg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ），垂直尘通量为  $F_i$ （单位： $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）。

某一粒径组颗粒水平沙通量的计算公式为

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

其中， $c=2.6$ ，为经验常数。假设每个粒径组的粒子对水平沙通量的贡献是与其粒径分布成正比的，那么整个粒径组内水平沙通量就是每个粒径组的水平沙通量  $Q_i$  乘以各粒子粒径分布的积分：

$$Q = \int Q_i(d) p(d) d, \quad (3)$$

$p(d)$  是粒径  $d$  的粒子其粒径分布。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， $Q$  将乘以两个因子：扣除植被覆盖影响后的可风蚀总面积  $E_s$ ；扣除地面粗糙度（如沙砾、卵石和岩石等）影响后的可风蚀总面积  $E_v$ 。模式格点上的  $E_s$  和  $E_v$  由 GIS 数据在起沙模式的前处理中计算得到。考虑扣除地表非风蚀性因子后的水平沙通量为  $Q_m = Q \times E_s \times E_v$ 。

对于某个粒径组的粒子，其垂直沙通量为

$$F_i(d) = \frac{C_a g f \rho_b}{2p} \left( 0.24 + C_\beta u_* \sqrt{\frac{\rho_b}{p}} \right) Q_m, \quad (4)$$

其中， $f$  是下沉尘粒所占比例， $\rho_b$  是土壤体积密度， $\rho_b$  是土壤粒子密度， $u_*$  是摩擦速度， $p$  是粒子与土壤表面相互作用时粒子受到的土壤表面弹力， $C_a$  和  $C_\beta$  是量级为 1 的系数。对非可蚀性因子只在计算  $Q$  时考虑，土壤表面总的垂直尘通量为 (4) 式在整个粒径范围的积分。该起沙方案已经过野外观测、风洞实验和数值预报试验的验证<sup>[5]</sup>。由于  $p$  大于  $10^5 \text{ N m}^{-2}$ ，(4) 式可以简化为

$$F_i(d) = \frac{0.12 C_a g f \rho_b}{2p} Q_m.$$

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。所有数据的分辨率为  $3' \times 3'$ 。起沙模式中用到的土壤和植被类型分别见表 1 和表 2。

起沙模式的前处理过程一方面是将 GIS 数据插值到中尺度气象模式的水平格点上，另一方面计算起沙模式需要的地表参数。前处理过程要尽可能地减小陆面参数的信息损失，使模式次网格点中，对两个重要变量摩擦速度  $u_*$  和临界摩擦速度  $u_{**}$  的计算结果影响减至最小。

## 2.2 输送模式

起沙模式中沙尘粒径分为 6 组，在输送模式中对沙尘浓度的计算也分为 6 组，总的沙尘浓度等于各粒径组的沙尘浓度之和，即  $c_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N c_i$ 。浓度的预报方程为 (5) 式，上、下边界条件分别为方程 (6) 和 (7)。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p_s c_i}{\partial t} + \frac{\partial p_s u c_i}{\partial x} + \frac{\partial p_s u c_i}{\partial y} + \frac{\partial c_i}{\partial \sigma} (p_s \dot{\sigma} + g p w_u) \\ &= p_s \frac{\partial}{\partial x} K_{ph} \rho \frac{\partial c_i / \rho}{\partial x} + p_s \frac{\partial}{\partial y} K_{ph} \rho \frac{\partial c_i / \rho}{\partial y} + \frac{g^2}{p_s} \frac{\partial}{\partial \sigma} K_{pz} \rho^3 \frac{\partial c_i / \rho}{\partial \sigma}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$c_i (p_s \dot{\sigma} + g p w_u) - \frac{g^2}{p_s} K_{pz} \rho^3 \frac{\partial c_i / \rho}{\partial p} = g \rho (F_i + F_d), \quad (6)$$

$$\frac{\partial c_i / \rho}{\partial \sigma} = 0, \quad (7)$$

其中， $K_{ph}$  和  $K_{pz}$  分别是水平和垂直方向的扩散系数，垂直扩散系数是粒径的函数； $w_u$  和  $F_i$  是各粒径的沉降速度和垂直尘通量，下边界条件下考虑沙尘粒子的干沉降过程。

$F_{di}$ 。沙尘输送模式包括平流、扩散以及干沉降过程。当然，湿沉降过程也是非常重要的，但目前模式中还没有包括湿沉降过程。关于起沙模式和沙尘输送模式的具体细节问题，参见文献[5]。另外，目前的模式系统中没有考虑化学过程和沙尘浓度对天气模式的影响。

表 1 起沙模式中的土壤类型

编码	土壤类型	编码	土壤类型	编码	土壤类型
01	南方水稻土	21	褐土	41	碱土
02	鲜血水稻土	22	灰褐土	42	鳞质石灰土
03	北方水稻土	23	暗棕壤	43	石灰(岩)土
04	黄刚土	24	漂灰土	44	紫色土
05	黄壤土	25	灰色森林土(灰黑土)	45	龟裂土
06	黄垆土	26	黑土	46	风沙土
07	娄土	27	白浆土	47	山地草甸土
08	黑垆土	28	黑钙土	48	山地灌丛草原土
09	绵土	29	栗钙土	49	黑毡土(亚高山草甸土)
10	熟黑土	30	棕钙土	50	巴嘎土(亚高山草原土)
11	潮土	31	灰钙土	51	草毡土(高山草甸土)
12	灌淤土	32	灰漠土	52	莎嘎土(高山草原土)
13	绿洲土	33	灰棕漠土	53	高山漠土
14	砖红壤	34	棕漠土	54	寒漠土
15	赤红壤	35	暗色草甸土	71	冰川和雪被
16	红壤	36	灰色草甸土	72	盐壳
17	燥红土	37	沼泽土	90	湖泊
18	黄壤	38	滨海盐土		
19	黄棕壤	39	盐土		
20	棕壤	40	内陆盐土		

\*注：表1中带方框的数据类型为模式中可以起沙的土壤类型

表 2 起沙模式中的植被类型

编码	植被类型	编码	植被类型	编码	植被类型
11	不常绿寒带落叶林	17	常绿阔叶(密集)林地，常绿灌丛	23	高/中/低草地，10%~40%林木覆盖
12	旱生型森林和林地	18	常绿针叶/小叶(密集)灌木	24	高/中/低草地，<10%林木覆盖
13	常绿阔叶硬叶林地	19	旱地落叶(密集)灌木	25	高/中/低草地，灌木覆盖
14	常绿针叶林地	20	寒带落叶亚高山带/近极地带灌木(丛)	30	沙漠
15	热/亚热带旱地落叶林地	21	旱生性灌木(丛)	40	湖泊
16	寒带落叶林地	22	北极高山苔原苔生植物、沼泽地植物		

### 3 造成沙尘天气的天气系统

吴晓京等<sup>[16]</sup>对 2001 年春季沙尘天气分析后发现, 造成大范围沙尘天气的天气系统主要为 3 类: 高压前部偏东风造成的沙尘天气; 锋面过境造成的沙尘天气; 蒙古气旋东移造成的沙尘天气。而蒙古气旋造成的沙尘天气, 多发生在华北及东北西部地区。当气旋路径偏南时, 对华北影响大; 当气旋路径偏东时, 对东北影响较大。2002 年我国北方地区发生了 3 次较强的沙尘(暴)天气(3月 15~16 日、19~22 日和 4 月 6~9 日), 这 3 次过程都与蒙古气旋的发展东移有关。对蒙古气旋的发生发展, 赵琳娜等<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进行了较深入的分析, 本文只简单介绍系统的移动以及与沙尘天气的关系。

3 月 15~16 日的过程中, 对流层中层蒙古国、新疆和内蒙受平直的西北气流影响, 期间在贝加尔湖的南侧蒙古国中部有一小扰动发展, 与小扰动发展相对应, 低层 850 hPa 蒙古国东部的杭爱山东侧有一气旋生成东移, 气旋西部的西北大风造成了沙尘天气。但此次过程气旋强度较弱, 沙尘天气主要影响华北和东北南部地区。4 月 6~9 日过程中, 5 日对流层中层低槽控制 80~110°E 的中纬度地区, 6 日低槽中有一闭合低压形成, 低层有一蒙古气旋发展东移, 此次沙尘天气过程主要影响蒙古国和内蒙古东部以及东北南部、东部。

3 月 19~22 日过程影响我国北方大部分地区, 是 2002 年影响范围最大的一次过程。此次过程对流层中层(500 hPa)可以清楚地看到一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, 图 2d, 北京时, 下同)。低槽东移较快, 19 日 08 时位于新疆东部(95°E, 图 2a), 20 日 08 时到达蒙古国东部(110°E, 图 2b), 1 天东移了近 2 000 km, 此后, 21~22 日东移速度较慢, 22 日 08 时低槽位于东亚沿岸地区(图 2d)。对应低层有一气旋于 19 日 08 时(图 3a)在蒙古中部生成, 扬沙和沙尘暴天气出现在蒙古中部(图 3e), 气旋生成于槽前。此后, 气旋随着高空槽的迅速东移而发展东移。20 日 08 时气旋中心位于蒙古国东部和内蒙古的东北部(图 3b), 气旋后部(地面冷锋后)的大风区有大范围的沙尘区, 中蒙边界有沙尘暴和强沙尘暴天气(图 3f), 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 3c), 22 日移出我国东北(图 3d), 21~22 日沙尘天气主要影响我国东北(图 3g、h)。

### 4 模拟结果分析

2000~2002 年春季中国北方多次出现大范围的沙尘天气, 其中以 2000 年 4 月 6 日和 2002 年 3 月 19~22 日的沙尘天气影响范围大, 强度较强。赵琳娜等<sup>[12]</sup>对 2000 年 4 月 6 日沙尘天气的起沙过程已进行了研究。2002 年 3 月 19~22 日过程影响了西北、华北、东北、黄淮以及汉水流域, 是近年来影响北京最严重的一次沙尘暴天气。3 月 20 日上午 9 时以后天空开始呈黄色, 中午(11~12 时)能见度最低(小于 200 m), 中国科学院大气物理研究所在这次沙尘天气期间观测到的沙尘浓度高达  $12.06 \text{ mg m}^{-3}$ (观

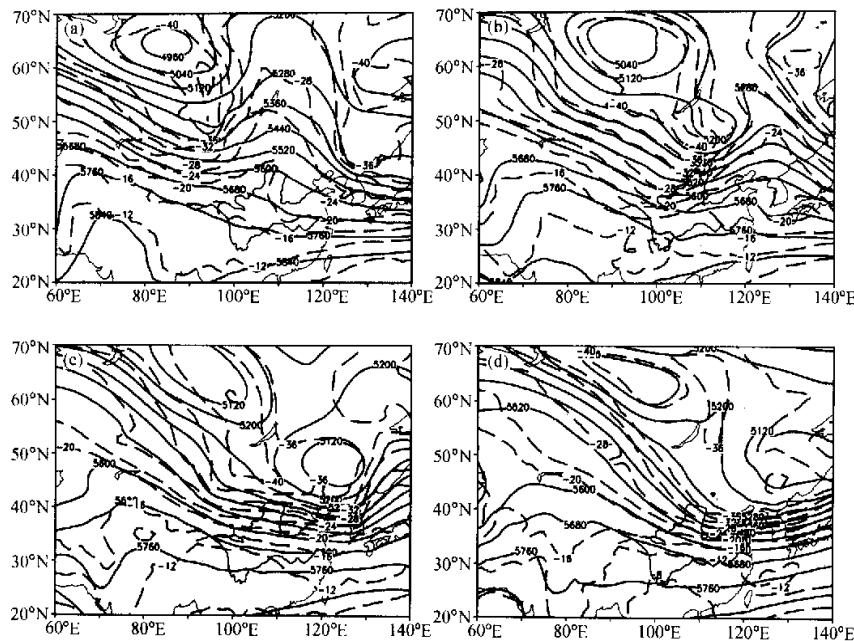


图2 2002年3月19日08时~22日08时500 hPa高度场(实线)和温度场(虚线)  
(a) 19日08时; (b) 20日08时; (c) 21日08时; (d) 22日08时

测时间10:50~15:30,地点( $39^{\circ}58'N, 116^{\circ}22'E$ )<sup>[13]</sup>。

为了检验新建立的沙尘天气预测系统(图1),我们采用该系统对2002年3月15~16日、19~22日及4月6~9日发生在我国北方地区的较强沙尘(暴)天气的起沙和输送过程进行了模拟试验,模拟结果的分析主要针对影响范围较大、强度较强的3月19~22日过程。

模拟试验中模式格距为45 km,模拟区域大致为( $25\sim60^{\circ}N, 80\sim140^{\circ}E$ ),中心点为( $40^{\circ}N, 115^{\circ}E$ )。分析范围主要包括蒙古国、内蒙古以及华北和东北地区。气象模式的背景场采用 $1^{\circ}\times1^{\circ}$ NCEP格点资料,模拟时间为2002年3月15日08时~17日08时、3月19日08时~22日08时和4月6日08时~9日08时,边界层方案采用MRF方案<sup>[14]</sup>,陆面过程采用OSU方案。下面首先将模拟结果与观测进行对比验证,然后在此基础上分析这3次过程的起沙范围和输送过程。

#### 4.1 模拟结果与观测现象

由于沙尘浓度没有常规的观测资料,只有一些点的观测数据,很难与模拟的沙尘范围作对比,因此,我们将3次过程模拟的地面沙尘浓度与3 h地面天气现象对比。模拟的沙尘天气区域3月19日在内蒙古、甘肃西部和青海北部地区(图4a、b),华北的沙尘浓度在 $1 \text{ mg m}^{-3}$ 以下;20日影响华北大部分地区(图4c、d);21日影响华北北部、东北南部地区(图4e、f)。从这次过程的72 h模拟看,预测系统模拟出了沙尘天气的东移过程,沙尘区域的东边界与实况较为一致,但20、21日模拟的白天西北地区

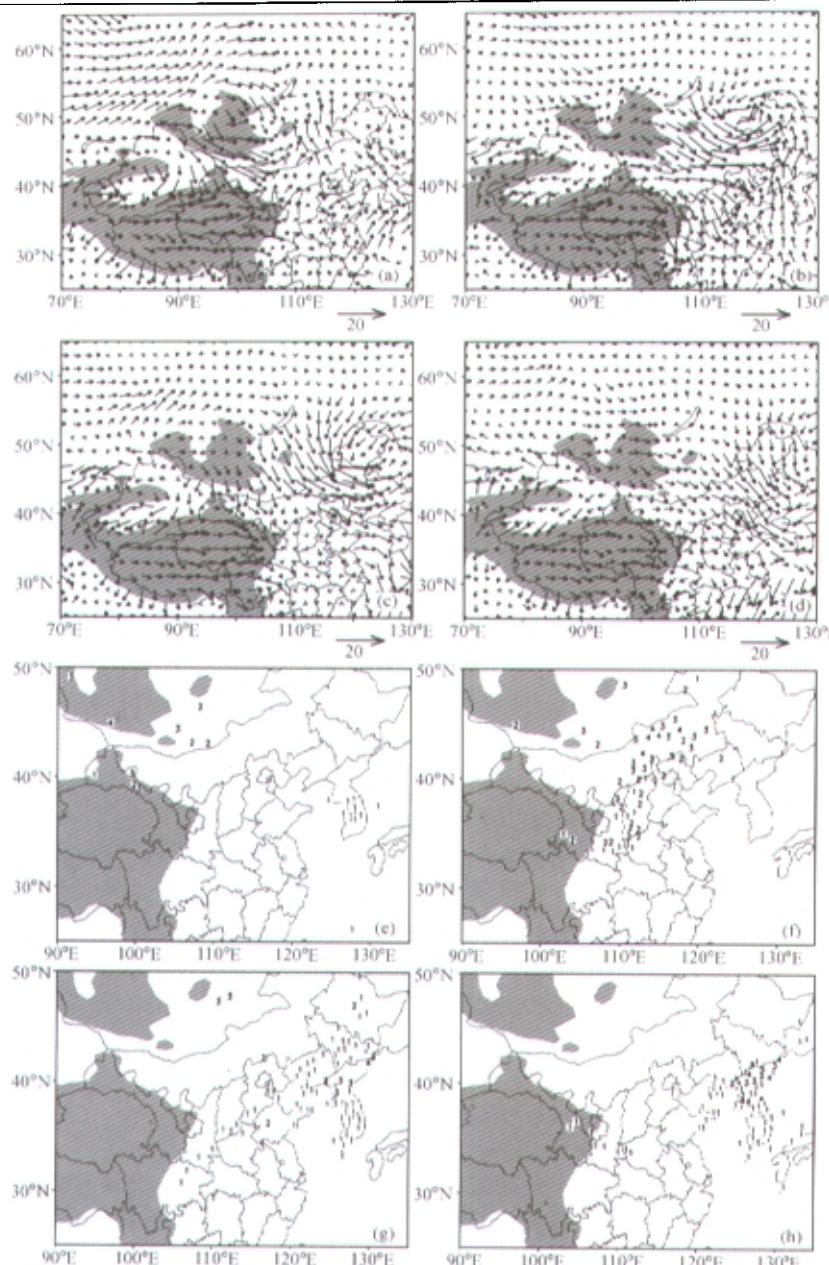


图3 2002年3月19日08时~22日08时地面风场（单位： $m\ s^{-1}$ ）和沙尘天气观测  
 (a)、(e) 19日08时；(b)、(f) 20日08时；(c)、(g) 21日08时；(d)、(h) 22日08时  
 阴影：地形大于1500 m；图中数字：1为浮尘，2为扬沙，3为沙尘暴，4为强沙尘暴

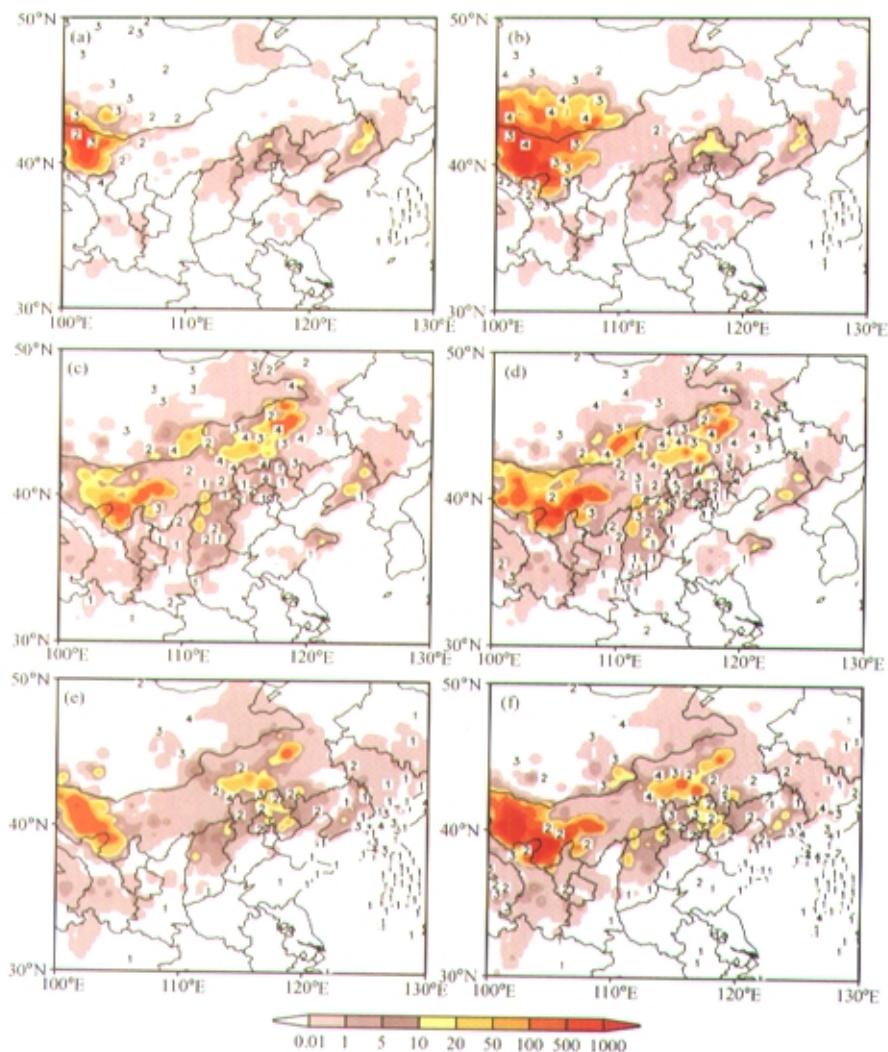


图4 2002年3月19~21日模拟的地面沙尘浓度(阴影, 单位:  $\text{mg m}^{-3}$ )和地面观测天气现象

(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

图中数字: 1为浮尘, 2为扬沙, 3为沙尘暴, 4为强沙尘暴

沙尘范围偏大。地面沙尘浓度一般在  $5 \text{ mg m}^{-3}$  以下, 强中心的浓度达到  $100 \text{ mg m}^{-3}$  以上。根据有关研究, 沙尘浓度达  $100 \text{ mg m}^{-3}$  以上相当于能见度为几米, 达到黑风暴的强度。图4中朝鲜半岛在19、21日观测有沙尘天气, 而模拟结果没有。19日在中国东北地区无沙尘天气, 21日沙尘天气在东北东部也较弱, 而朝鲜半岛的观测却有沙尘天气, 这可能是由于他们的观测规范与中国不一致造成。

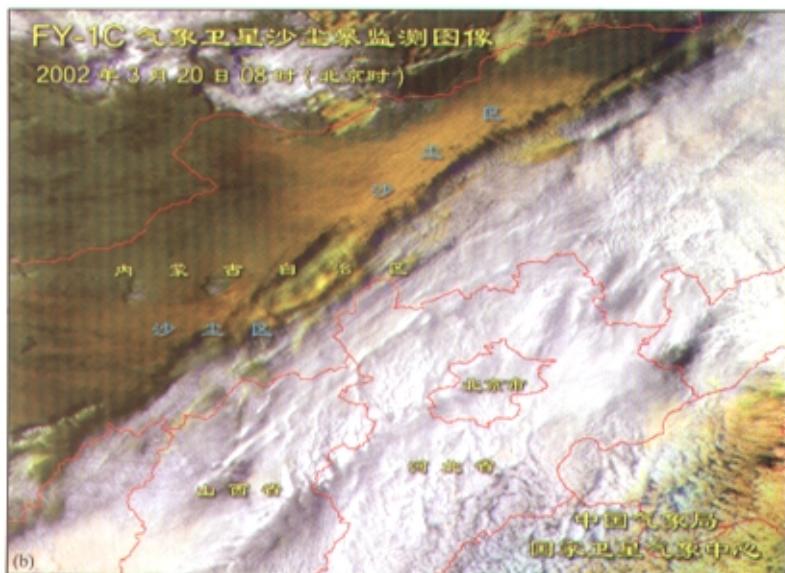
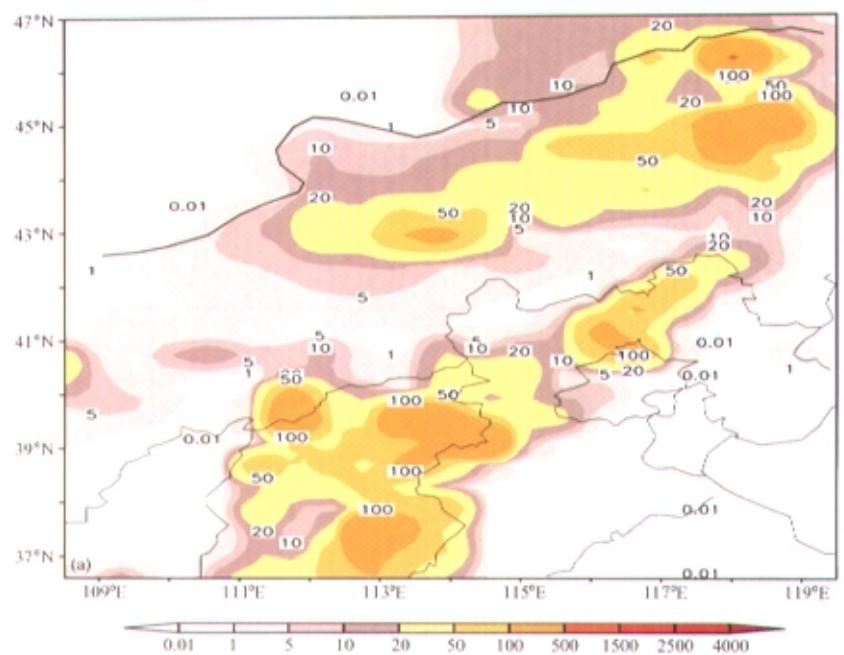


图 5 2002 年 3 月 20 日 08 时 (a) 模拟的整层积分沙尘浓度 (单位:  $\text{mg m}^{-3}$ ) 和  
(b) 风云—1C 卫星沙尘监测图

卫星是目前监测沙尘天气范围、强度的主要工具之一，除了对云下沙尘区域不能分辨外，监测的沙尘区域基本真实可信。图5是2002年3月20日08时模拟的和卫星监测的沙尘区对比。模拟的内蒙古沙尘区与云图上的沙尘区比较一致，而模拟的位于河北和山西的沙尘区，由于位于云层下，在云图上没有体现出来。但是，20日的地面观测（图3f）显示08时河北和山西已经出现沙尘和沙尘暴天气，说明了模拟结果与实际的一致性。其他两个个例的模拟结果与观测对比也比较一致，这里不再详细论述。

模拟的3次过程（共8天）的沙尘范围与观测的沙尘天气范围是比较一致的，特别是08时~17时之间的白天，模拟与观测范围基本一致，17时至第二天08时模拟的沙尘天气范围比实况偏小。虽然沙尘天气的强度有明显的日变化<sup>[15]</sup>，但模拟的日变化仍偏强。进一步的分析发现，模式中边界层过程的处理有一些问题，导致计算的夜间摩擦速度偏小，这个问题有待今后进一步改进。

中国科学院大气物理研究所（39°58'N, 116°22'E）对2002年几次影响北京的沙尘天气过程进行了监测。结果表明，2002年3月19日10时~20日10时45分的地面沙尘平均浓度为0.65 mg m<sup>-3</sup>，无明显沙尘天气；而3月20日10时50分~15时30分的

平均沙尘浓度达到12.06 mg m<sup>-3</sup>，能见度降到200 m左右，为沙尘暴天气。之后，大气中的沙尘浓度迅速减小，3月20日15时40分~21时的平均沙尘浓度为3.73 mg m<sup>-3</sup>，3月21日10时~22日10时为1.52 mg m<sup>-3</sup>，即从3月20日15时至22日10时北京地区都为沙尘天气。3月22日10时~23日10时沙尘浓度为0.83 mg m<sup>-3</sup>，沙尘天气影响结束。图6a为模拟的北京附近（40°N, 116°E）每小时地面沙尘浓度，模拟的地面沙尘浓度是21日13时左右最强达到4 mg m<sup>-3</sup>，20日13时只有3 mg m<sup>-3</sup>，比观

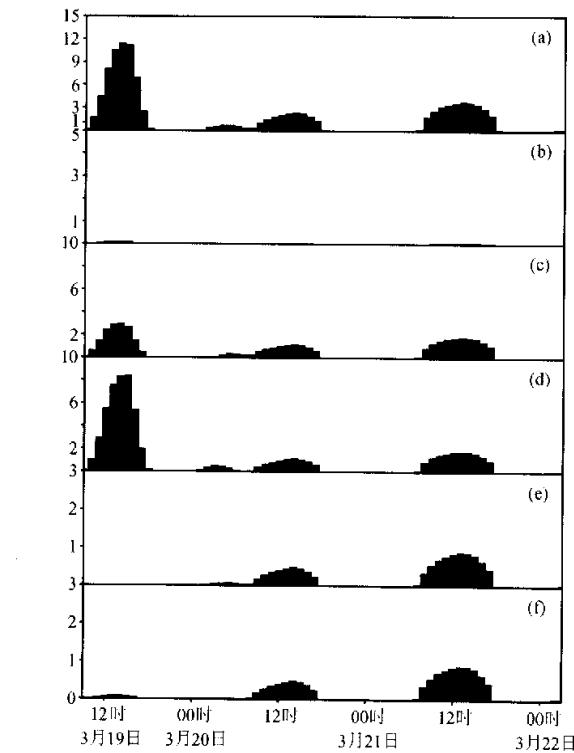


图6 模拟的2002年3月19日08时~22日08时沙尘状况  
 (a)地面总沙尘浓度；(b) $d \leq 2 \mu\text{m}$ 地面沙尘浓度；(c) $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$ 地面沙尘浓度；  
 (d) $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$ 地面沙尘浓度（单位： $\text{mg m}^{-3}$ ）；(e)沙尘的沉降  
 （单位： $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）；(f)垂直沙通量（单位： $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）

测弱的多, 20日模拟的沙尘浓度为什么较观测低? 分析发现是由于19日20时~20日05时蒙古和内蒙古中部有较强的沙尘暴和强沙尘暴发生, 而模式未能很好地模拟出夜间的起沙, 造成了20日白天沙尘浓度明显低于观测值。

起沙和输送模式中将沙尘粒子分为6组, 从模拟结果中发现能起沙被输送的粒子主要是第2组( $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ )和第3组( $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ )粒子, 较小(小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ )和较大(大于 $22\text{ }\mu\text{m}$ )的粒子起沙和输送都较小(图6b、c、d)。游来光等<sup>[16]</sup>1983年6月沙尘暴期间在阿拉善附近对沙尘含量的垂直分布观测表明, 沙尘含量大部分是 $2\sim32\text{ }\mu\text{m}$ 大小的粒子, 说明模拟的沙尘粒径大小也是合理的。19日模拟出了虚假的强沙尘浓度, 由于没有当地的沙源(图6f), 沙尘源地应在北京附近。沉降随时间的变化与垂直尘通量基本一致(图6e、f), 强度略小于垂直尘通量。

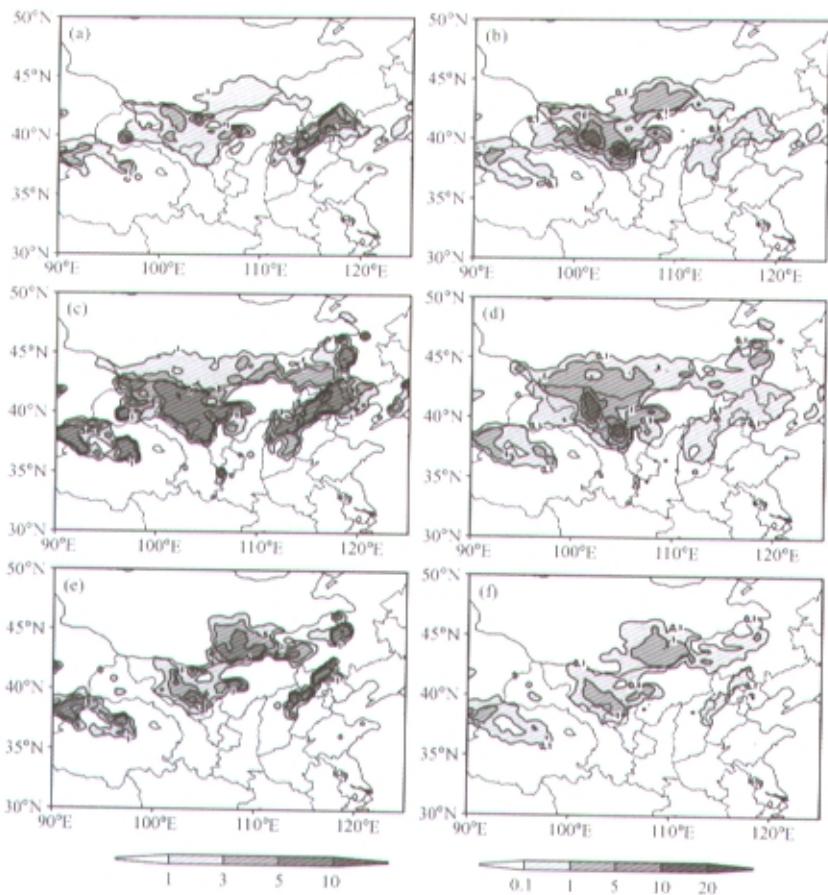
以上分析表明, 沙尘预测系统较好地反映了起沙和输送过程, 较准确地模拟了3次过程的影响区域和时间, 模拟结果是大体符合实际和可信的。

#### 4.2 沙尘源地和起沙分析

前面提到2002年的3次过程都是受蒙古气旋的发展东移影响, 随着天气系统的东移各个时段的沙尘源地是变化的。如果把每3 h的输出结果中起沙大于 $0.1\text{ mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 作为一次起沙, 起沙次数则代表过程中起沙的持续时间, 起沙时次的平均垂直尘通量代表平均的起沙强度。

图7是3次过程的起沙次数和平均垂直尘通量, 3月19~22日的过程中起沙区域(图7c、d)主要是在蒙古国的戈壁阿尔泰省南部、巴彦洪戈尔省南部、南戈壁和东戈壁省, 我国内蒙古阿拉善盟地区、甘肃北部和青海北部。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, 平均达 $15\text{ mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。河北省北部、山西省北部虽然起沙的次数较多, 但垂直尘通量较小。由于天气系统的强度和路径不同, 其他两次过程的沙尘源地与3月19~22日过程影响的区域和起沙强度有一些不同。3月15~16日过程中(7a、b), 起沙的区域主要是蒙古国的东戈壁和南戈壁省、内蒙古西部、河西走廊、青海北部、河北省西北部、山西省北部。起尘量最大的中心仍在内蒙古阿拉善盟地区的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠, 起沙区域比3月19~22日过程小。4月6~9日过程是这3次过程中起沙范围最小的(图7e、f), 起沙区域主要在蒙古国东戈壁省, 我国内蒙古中西部和青海北部, 起尘量最大中心在蒙古国东戈壁省和内蒙古阿拉善盟地区的腾格里沙漠。

由于不同地区土壤类型和植被状况不同, 每次过程的起沙区域和强度都有所不同, 各粒径大小的土壤颗粒在这些过程的起沙量中贡献也不同。因此, 不同个例我们取不同区域各粒径粒子的平均沙尘浓度分析(见图8)。3月15~17日取内蒙古西部( $100\sim106^{\circ}\text{E}$ ,  $37\sim43^{\circ}\text{N}$ ), 中蒙边境至内蒙古中部( $106\sim112^{\circ}\text{E}$ ,  $40\sim46^{\circ}\text{N}$ ), 3月19~22日取内蒙古西部( $100\sim106^{\circ}\text{E}$ ,  $37\sim43^{\circ}\text{N}$ ), 内蒙古中部( $113\sim119^{\circ}\text{E}$ ,  $39\sim45^{\circ}\text{N}$ ), 4月6~9日取蒙古国东戈壁省( $107\sim113^{\circ}\text{E}$ ,  $42\sim48^{\circ}\text{N}$ ), 青海省西北部( $90\sim96^{\circ}\text{E}$ ,  $35\sim41^{\circ}\text{N}$ )区域。这些区域的共同特点是: 起沙量表现出明显的日变化, 白天大, 晚上小, 最大值出现在正午前后; 起沙中贡献最大是 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子(细粉土), 其次是 $11\sim22\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子(中粉土), 粒径大于 $22\text{ }\mu\text{m}$ 的尘土颗粒则没有贡献。区域起沙量最大的是2002年3月21日08~20时内蒙古西部的沙尘暴过程(图8c), 总的起沙量达 $7.8\text{ mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 其中 $2\sim11\text{ }\mu\text{m}$

图 7 2002 年 3 次沙尘过程的起沙次数和平均地面沙尘浓度 (单位:  $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

3月 15 日 08 时~17 日 08 时 (a) 起沙次数, (b) 垂直尘通量;

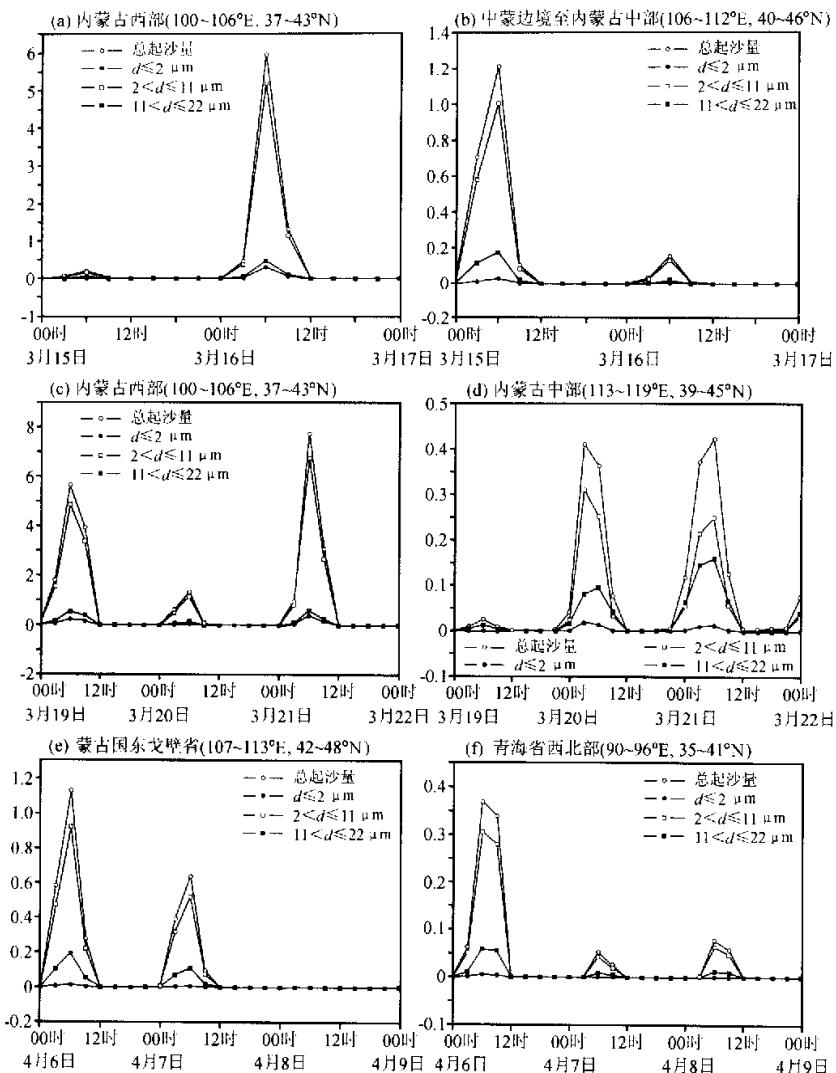
3月 19 日 08 时~22 日 08 时 (c) 起沙次数, (d) 垂直尘通量;

4月 6 日 08 时~9 日 08 时 (e) 起沙次数, (f) 垂直尘通量

的粒子为  $6.8 \text{ mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 占该时刻总起沙量的 87%。

在同一次沙尘天气过程中, 除了不同地区的地表覆盖类型、土壤类型、土壤湿度不同外, 影响该地区的天气系统不同 (风力等), 起沙量也不同。3月 15~17 日过程内蒙古西部的起沙量 (图 8a) 大于中蒙边境至内蒙古中部地区 (图 8b); 3月 19~22 日过程同样是内蒙古西部的起沙量 (图 8c) 大于内蒙古中部地区 (图 8d); 4月 6~9 日过程蒙古东戈壁省的起沙量 (图 8e) 大于青海省西北地区 (图 8f)。

为了分析起沙与各种气象条件、陆面状况的关系, 在上述 6 个区域内分别选取: 内蒙古拐子湖 ( $102.37^\circ\text{E}, 41.37^\circ\text{N}$ )、蒙古国的扎兰扎达嘎德 ( $104.42^\circ\text{E}, 43.58^\circ\text{N}$ )、内蒙古额济纳旗 ( $101.07^\circ\text{E}, 41.95^\circ\text{N}$ )、内蒙古朱日和 ( $112.90^\circ\text{E}, 42.40^\circ\text{N}$ )、蒙古

图 8 2002 年 3、4 月沙尘过程各粒径组平均起尘量随时间的演变 (单位:  $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

(a)、(b) 2002 年 3 月 15~17 日; (c)、(d) 2002 年 3 月 19~22 日;

(e)、(f) 2002 年 4 月 6~9 日

国的朝格特车齐 ( $105.32^{\circ}\text{E}, 44.42^{\circ}\text{N}$ ) 和青海省冷湖 ( $93.40^{\circ}\text{E}, 38.75^{\circ}\text{N}$ ) 6 个代表站, 分析模拟各代表站的地面垂直沙通量、土壤水分、摩擦速度、临界摩擦速度、地面风速、地面气温和降水量随时间的演变, 可以看到起沙过程气象要素的一些细节变化。地面风速、地面气温以及摩擦速度的变化表现十分明显。图 9 是内蒙古朱日和站各要素的演变, 在此期间由于气旋的移动, 地面风速较大造成两次严重的起沙过程,

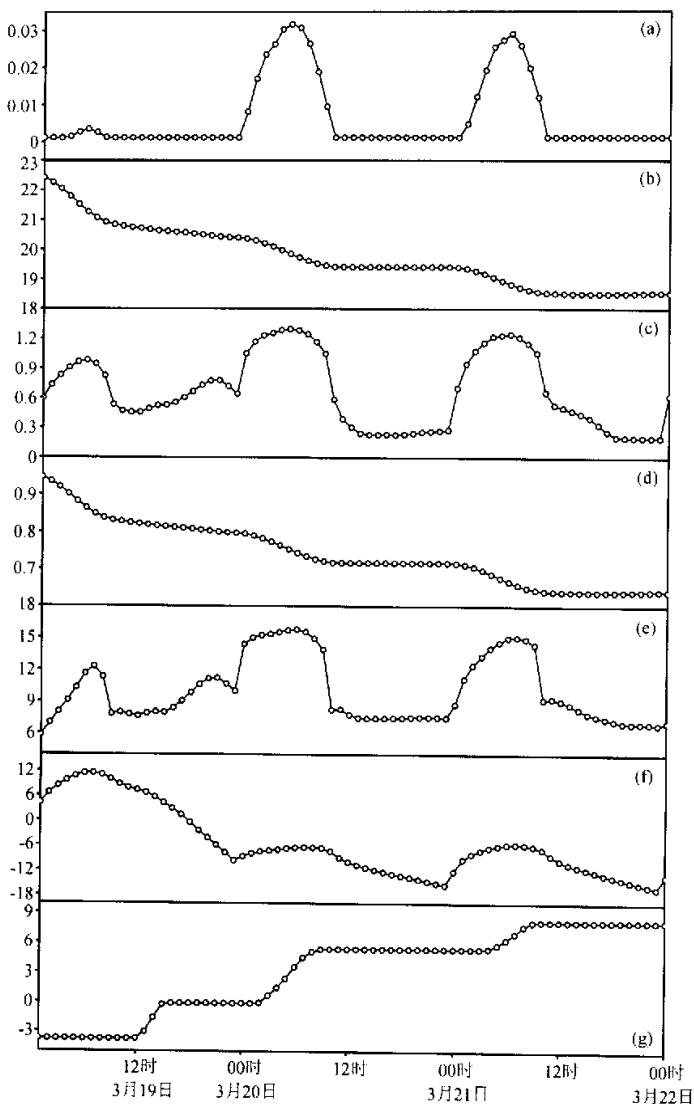


图9 2002年3月19日08时~22日08时朱日和(112.90°E, 42.40°N)各要素时间的演变  
(a) 起尘量(单位:  $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); (b) 土壤湿度(单位:  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); (c) 摩擦速度(单位:  $\text{m s}^{-1}$ );  
(d) 临界摩擦速度(单位:  $\text{m s}^{-1}$ ); (e) 地面风速(单位:  $\text{m s}^{-1}$ );  
(f) 地面温度(单位: °C); (g) 降水量(单位:  $10^{-3}\text{mm}$ )

第一次在3月20日08时,朱日和站的地面气温为-10 °C,风速为14.0  $\text{m s}^{-1}$ ,摩擦速度为1.0  $\text{m s}^{-1}$ ,临界摩擦速度为0.86  $\text{m s}^{-1}$ ,达到了起沙的条件,起沙量于20日13时达到高峰,峰值为0.03  $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,结束于20日18时。第二个起沙的高峰在21日14时,峰值为0.028  $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。在两次起沙过程中,由于降水量较少,土壤水分

较低, 该站所在的区域植被覆盖率只有 15%, 土壤类型为绵土, 充分说明起沙与否是与地表性质和风力紧密相关。另外, 与内蒙古西部的额济纳旗站的气象要素变化(图略)相比, 除了地表性质不同外, 由于地面风速较大, 摩擦速度也较大, 土壤水分也较小, 起沙更强, 起沙量的峰值达  $13 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

#### 4.3 沙尘输送过程分析

根据沙尘影响中国东部地区的差异来划分, 沙尘输送路径有北路、中路和南路3条, 北路主要影响东北地区, 中路主要影响华北地区, 南路主要影响华中、华东地区<sup>[17]</sup>。2002年3月19~22日的沙尘天气过程影响了西北、华北、东北、黄淮以及汉水流域, 而且强度较强。为什么这次过程的影响范围如此大, 沙尘是如何从源地输送到这些地方的? 下面将作一简单分析。

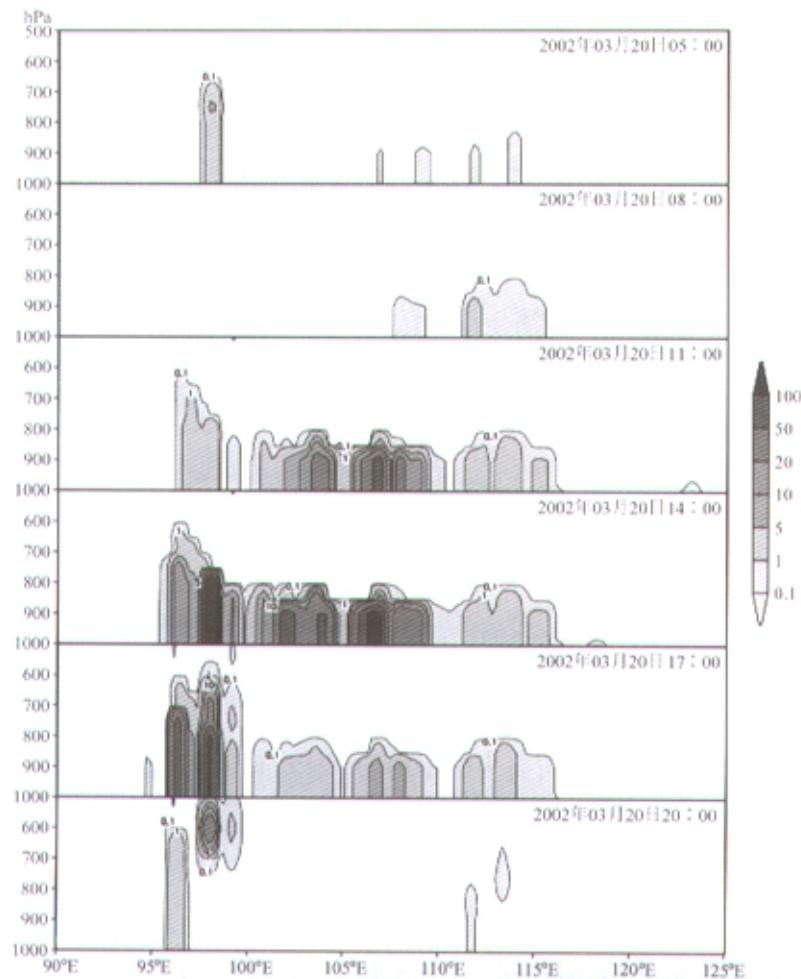


图 10 2002 年 3 月 20 日沿 40°N 的沙尘浓度垂直剖面(阴影, 单位:  $\text{mg m}^{-3}$ )

由于地面风速达到临界摩擦速度才会起沙，能够起沙的区域是低层风速比较大的地区，因而，起沙后沙粒的水平输送主要是对流层低层的大风造成的（图3），19日08时~22日08时主要的沙尘区是随着天气系统的移动而自西向东移动。图10是沿40°N的沙尘浓度垂直剖面，沙尘的垂直输送主要是由垂直运动决定的。分析表明，气旋后部的大风区一般不存在大范围深厚的上升运动，上升运动一般在800 hPa以下，局部地区能达到500 hPa，因此，沙尘被垂直输送的高度一般在500 hPa以下。白天上升运动是逐渐增强的，下午达到最强，有利于沙尘的向上输送，20日西部地区的垂直运动较强，将沙尘输送到了600 hPa左右，而东部地区上升运动相对较弱，只到达800 hPa，沙尘被垂直输送的高度也较低。

## 5 结论和讨论

本文首先建立了一个较完整的沙尘天气预测系统，该系统主要包括5部分：GIS数据，起沙模式前处理，有限区域中尺度模式MM5V3（包含有陆面过程），起沙模式和输送模式。其中天气模式、起沙模式和输送模式耦合在一起，同步进行积分。并利用该模式系统对2002年3~4月发生在我国北方地区的3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。

在模拟结果与实况观测基本一致的情况下，对这3次过程的起沙与输送过程进行了深入分析研究：（1）蒙古气旋的发展东移造成了这几次北方大范围沙尘天气，气旋后部西北大风是造成起沙的主要原因，同时也是沙尘输送的主要动力；（2）这3次过程主要的沙尘源地是蒙古国南戈壁省、东戈壁省，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。（3）起沙中贡献最大的是粒径为2~11 μm和11~22 μm的粒子，能够长时间、长距离输送的沙尘也是上述大小的粒子；（4）沙尘粒子的垂直输送高度一般在500 hPa以下。

当然，该系统目前还有一些不足之处，有待今后的改进，如：摩擦速度的计算在夜间偏弱，导致夜间的起沙较实况弱；土壤湿度的初值问题来源等。另外，还需要说明的是，在将该模式应用于东亚沙尘暴的模拟过程中，所用的不同类型土壤的粒径分布资料比较缺乏，而该资料对起沙模式模拟起尘率是非常重要的，因此，也对沙尘起沙和输送的模拟有影响。

**致 谢** 澳大利亚新南威尔士大学（UNSW）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；曾庆存院士对本项研究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 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.
- 2 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.
- 3 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.

- 4 Li Xingsheng, Zhou Jianqiang, Li Zhe et al, A numerical simulation of "5.5" super-duststorm in northern China, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, **15** (1), 63~73.
- 5 Lu, H., Y. P. Shao, Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications, *Environmental Modeling & Software*, 2001, **16**, 233~249.
- 6 拜格诺, 风沙和荒漠沙丘物理学, 钱宁等译, 北京: 科学出版社, 1959, 28~85.
- 7 Shao Yaping, *Physics and Modelling of Wind Erosion*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2000, 139~142.
- 8 庄国顺、郭敬华、袁惠等, 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.
- 9 Shao Yaoping, M. R. Raupach, and J. F. Leys, A model for predicting Aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region, *Aust. J. Soil. Res.*, 1996, **34**, 309~342.
- 10 吴晓京、陆均天、张晓虎等, 2001年春季沙尘天气分析, *国土资源遥感*, 2001, **49**, 8~10.
- 11 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, 30~73.
- 12 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.
- 13 张仁健、韩伟伟、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.
- 14 Hong, S. Y., and H. L. Pan, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium range forecast model, *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**, 2322~2339.
- 15 牛生杰、孙继明、桑建人, 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势, *中国沙漠*, 2000, **20** (1), 55~58.
- 16 游来光、马培民、陈君寒等, 沙暴天气下大气中沙尘粒子空间分布特征及其微结构, *应用气象学报*, 1991, **2** (1), 13~21.
- 17 延昊、王长耀、牛铮等, 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究, *地理科学进展*, 2002, **21** (1), 90~94.

## An Integrated Numerical Modeling System of Dust Storm Suitable to North China and Its Applications

Sun Jianhua<sup>1)</sup>, Zhao Linna<sup>2)</sup>, and Zhao Sixiong<sup>1)</sup>

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

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

**Abstract** An integrated duststorm numerical modeling system has been developed in which a physical based wind erosion scheme, a dust transportation model and mesoscale model (MM5) with a geographic information database were coupled. This system could predict the dust emission rate from surface and dust concentration in the atmosphere of individual duststorm event. Based on these, the numerical simulations have been conducted. The results show that the dust emission and dust concentration in the air of the three duststorm events in the spring of 2002 have been predicted successfully. Predicted dust concentration agrees very well with observational surface weather phenomena and satellite monitoring image. It is shown that the integrated system is capable for detecting dust source and dust transportation. The dust sources of three events are south part of Mongolia, the middle and west part of Inner Mongolian autonomous region, north part of Gansu, Qinghai, Hebei, and Shanxi provinces. It is found that the size of the dominant dust particles were 2~11, 11~22  $\mu\text{m}$ , which also could be transported in long distance. It is also noticed that the dust could be transported vertically up to 500 hPa generally.

**Key words:** dust storm; wind erosion; dust transportation