

2002 年 3 月 20 日沙尘暴天气的 影响系统、起沙和输送的数值模拟

赵琳娜¹ 孙建华² 赵思雄²

(1. 中国气象局国家气象中心 北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

提 要: 近年来, 东亚地区严重沙尘暴的频发趋势, 使沙尘暴成为当今社会广泛关注的重大生态和环境问题。本文利用一个以较高精度的地理信息数据为基础、具有清晰风蚀物理学概念的沙尘暴数值模式集成系统, 对 2002 年 3 月 19~ 22 日主要沙尘暴事件的气象背景条件、起沙源、起沙率以及沙尘输送进行了模拟和较为细致的数值分析, 并将结果与常规气象观测和卫星资料进行了对比。结果表明: 该模式对气象背景、沙尘源和沙尘输送的空间分布和时间演变有较好的模拟能力; 起沙区域主要是蒙古国的巴彦洪戈尔省南部、南戈壁、东戈壁省, 我国内蒙古阿拉善盟地区、锡林郭勒盟地区、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 $15\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$; 沙尘输送主要发生在对流层低层, 在垂直运动较强的地方可以向上输送到 500hPa。

关键词: 沙尘暴; 起沙源; 沙尘输送; 数值模拟

中图分类号: X43

文献标识码: A

1 引言

沙尘暴是当今社会广泛关注的重大生态和环境问题。近年来, 东亚地区严重沙尘暴的频发趋势, 引起了国际社会的广泛关注和重视。使东亚沙尘暴研究成为新的研究热点。据统计^[1- 6], 2000~ 2002 年仅 3、4 月我国共发生较大的沙尘暴过程分别为 12 次、13 次和 12 次。其中 2002 年 3 月 18 日~ 22 日发生的沙尘暴是 20 世纪 90 年代以来范围最大、强度最强、影响最严重、持续时间最长的沙尘暴过程。西北、华北、东北以及山东、河南、湖北、湖南西北部和四川东部等地先后出现了沙尘天气, 其中, 内蒙古、甘肃中部、宁夏北部、河北北部、北京、吉林西北部等地出现了强沙尘暴。甘肃鼎新、内蒙古乌拉特后旗能见度曾经为零米, 许多地区遭受大风灾害, 例如: 新疆吐鲁番地区遭受 7~ 10 级大风的袭击, 农作物受灾面积 800hm^2 , 直接经济损失达 460 多万元; 宁夏大部都受到大风袭击, 最大瞬时风力普遍有 8~ 9 级, 大武口瞬时极大风速达 33.3m s^{-1} 。惠农、陶乐等地 433hm^2 农田小麦麦种被风吹走或沙埋, 塑料大棚等农业设施损失严重, 全区直接经济损失 180 万元^[7]。

沙尘暴发生的气象(大风)条件、沙尘的起沙与输送、越境转移和沙尘气溶胶的气候效应等问题倍受关注, 政府间气候变化委员会第三次科学评估报告(IPCC 2001)也特别提出了矿物(沙尘)气溶胶对气候变化重要性。因此, 沙尘暴研究越来越吸引科学家和政治家的注意力。因此, 预报较大尺度的沙尘暴活动, 研究引发沙尘暴的气象背景(大风)条件以及起沙、输送规律成为我们的迫切任务。

概括起来, 沙尘暴天气的发生主要取决于两大方面的因素。一是地表丰富的松散干燥的沙尘; 二是足够强劲持久的风力。前者多与地表特征和前期降水等条件有关, 而后者取决于冷空气的活动, 它又常常涉及锋生或气旋发生发展的过程。因此, 沙尘暴的物理过程是一个包含大气、土壤和陆面相互作用的复杂过

* 收稿日期: 2003- 04- 22

基金项目: 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)、中国气象局国家气象中心项目(ZK2002A S2- 08 和 SCYJ- 01- 03)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3- SW- 213)资助。

作者简介: 赵琳娜(1966 7~), 博士学位。籍贯内蒙古。研究方向: 沙尘暴机理、预测及数值模拟研究。

加速度, ρ 是空气密度, ρ_p 是粒子与空气的密度比。系数 a_1 和 a_2 分别由风洞实验数据拟合上式得到: $a_1 = 0.0123$, $a_2 = 3 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-2}$ 。R、H 和 M 分别代表地表粗糙度、土壤水分和土壤紧密度(表达式略)对 u_{*t0} (d) 的影响。因为在自然土壤状态下, u_{*t} 不仅与粒径有关, 而且还与其他因子有关, 如地面粗糙(如岩石、卵石等)影响因子(R)、土壤水分(H)等都会扩大土壤抗风蚀的能力。

2.1.2 水平跃移沙通量

风洞实验和野外观测表明^[15-16], 风作用下的土壤颗粒依粒径 d 不同其运动方式有: 悬浮($d < 70 \mu\text{m}$)、跃移($70 < d < 1000 \mu\text{m}$)和蠕移($d > 1000 \mu\text{m}$)3 种。在风沙运动的 3 种基本形式中, 土壤颗粒运动以跃移运动为最重要, 跃移运动又与其它两种运动紧密相关。

某一粒径的土壤粒子其水平跃移沙通量为:

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

其中, $c = 2.6$, 为经验常数。对于特别大和特别小的粒子, $Q_i(d)$ 为 0, 因为其临界摩擦速度较大^[15-16]。进一步考虑地表的非风蚀性因子后的水平沙通量为 $Q_m = Q_i \times E_s \times E_w$ 。

2.1.3 垂直沙通量

考虑到空气中沙粒运动的性质, 起沙模式中考虑了三种起沙机制^[12], 它们是:

(1) F_a : 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。理论上, 沙尘粒子可以被空气动力直接抬离地面, 对于较小粒子重力和空气动力的重要性相对减小, 而粒子间作用力变得相对重要, 沙尘粒子不易被风吹离地面, 因此直接由空气动力造成的起沙率一般很小。

(2) F_b : 由于粒子的跃移碰撞产生的起沙率。当跃移粒子(沙粒或尘聚集体)撞击地面时, 该撞击引起的局地冲击力足以使地面土壤粒子克服粒子间的束缚, 被跃移粒子冲击起沙。风洞实验表明, 这种机制引起的起沙率大大超过由空气直接夹带产生的起沙率。

(3) F_c : 粒子的破裂和聚集体破碎产生的起沙率。在自然条件下, 沙土中尘粒是以附着在沙粒表面或是以较高粘性聚集体的方式存在。弱风蚀时, 包裹着尘土的沙粒和尘土聚集体的行为方式类似单个沙粒, 细小的尘粒不会释放出来; 然而强风蚀发生时沙粒表面的尘土和尘土聚集体就会破碎, 释放出尘粒。 F_c 就是表示由粒子的破裂和聚集体的破碎产生的起沙率。

3 种起沙机制的总起沙率为 $F = F_a + F_b + F_c$ 。由于 3 种形式的起沙机制不同, 因而, 在起沙模式中对它们分别进行处理^[13]。得出垂直尘通量 F , 就可知该次沙尘暴天气的起沙源地、强度的空间分布、时间演变等。

在起沙模式中, 沙尘按粒径分为 6 组: $d \leq 2 \mu\text{m}$ (黏土), $2 < d \leq 11 \mu\text{m}$ (细粉土), $11 < d \leq 22 \mu\text{m}$ (中粉土), $22 < d \leq 52 \mu\text{m}$ (大粉土), $52 < d \leq 90 \mu\text{m}$ (细沙), $90 < d \leq 125 \mu\text{m}$ (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, 起沙模式对每个粒径组都计算起沙率。

2.2 输送模式

在起沙模式中沙尘分为六组, 因而在输送模式中对沙尘浓度的计算也分为六组, 总的沙尘浓度 C_{total} 等于各粒径组的沙尘浓度 c_i 之和, 即 $C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N C_i$ 。浓度的预报方程为 (3), 上、下边界条件分别为方程 (4) 和 (5)。

$$\frac{\partial \phi_s c_i}{\partial t} + \frac{\partial \phi_s u c_i}{\partial x} + \frac{\partial \phi_s v c_i}{\partial y} + \frac{\partial c_i}{\partial z} (p_s \sigma + g \rho w_{ti}) = p_s \frac{\partial}{\partial x} K_{ph} \rho \frac{\partial c_i / \rho}{\partial x} + p_s \frac{\partial}{\partial y} K_{ph} \rho \frac{\partial c_i / \rho}{\partial y} + \frac{g^2}{p_s} \frac{\partial}{\partial z} K_{pz} \rho^3 \frac{\partial c_i / \rho}{\partial z} \quad (3)$$

$$\text{地表处} \quad c_i (p_s \sigma + g \rho w_{ti}) - \frac{g^2}{p_s} K_{pz} \rho^3 \frac{\partial c_i / \rho}{\partial z} = g \rho (F_i + F_{di}) \quad (4)$$

$$\text{大气顶部} \quad \frac{\partial c_i / \rho}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

K_{ph} 和 K_{pz} 分别是水平和垂直方向的扩散系数, 扩散系数是粒径的函数。 w_{ti} 和 F_i 是各粒径组的沉降速度和垂直通量; u , v , σ 是风速; $\sigma = p/p_s$, p 是大气压力, p_s 是地面气压; g 是重力加速度; ρ 是空气密度。在下边界条件中考虑沙尘粒子的干沉降过程。本文中的沙尘输送模式包括水平平流、垂直平流、垂直扩散以及干沉降过程 F_{di} 。湿沉降过程也是非常重要的, 目前模式中还没有包括湿沉降过程, 另外, 目前的模式系统中不考虑化学过程, 也没有考虑沙尘浓度对天气模式的影响。

2.3 中尺度气象模式 MM 5

对于沙尘暴的模拟, 中尺度气象背景场的描写是非常重要的。模拟系统采用的中尺度气象模式是由美国宾州大学和美国国家大气研究中心(PSU/NCAR)发展的有限区域中尺度预报系统MM5V3。MM5已被广泛用于各种研究, 它较成功地模拟了北太平洋和北大西洋上的爆发气旋、高原涡旋、西南涡及其引发的暴雨、强风暴和中尺度对流辐合等^[17~19]。该模式的主要特点为: 1) 非静力平衡的动力框架; 2) 具有云物理和行星边界层等多种物理过程; 3) 具有多重嵌套能力; 4) 有四维资料同化的能力。MM5采用OSU/Eta 陆面过程模式, 它可预报 10、30、60、100cm 等 4 层上的土壤温度和湿度, 以及植被冠层水分和雪水当量, 另外还有地下和地表径流的累计值。该模式在处理土壤水分蒸发、蒸腾损失总量时使用了植被和土壤类型数据, 同时也考虑了土壤的传导率和重力作用对水分通量的影响。

3 结果分析

采用沙尘暴起沙模式、输送模式和天气模式的耦合模式系统对 2002 年 3 月 19~21 日发生在蒙古国、我国北方地区的严重沙尘暴进行模拟试验。

模拟中模式格距为 45km, 模式的中心点为 (40°N, 115°E), 模拟的区域大致为 (25~60°N, 80~140°E), 我们的分析主要范围包括外蒙和内蒙的中部、东部以及华北和东北地区。气象模式的背景场采用 1°×1°NCEP 格点资料, 模拟时间为 2002 年 3 月 19 日 08 时~22 日 08 时(北京时间), 边界层方案采用 MRF 方案, 陆面过程采用 OSU 方案^[20]。模拟结果每隔 1h 输出一次结果, 为方便叙述, 时间均采用北京时间。

3.1 蒙古气旋发生发展的模拟

该次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

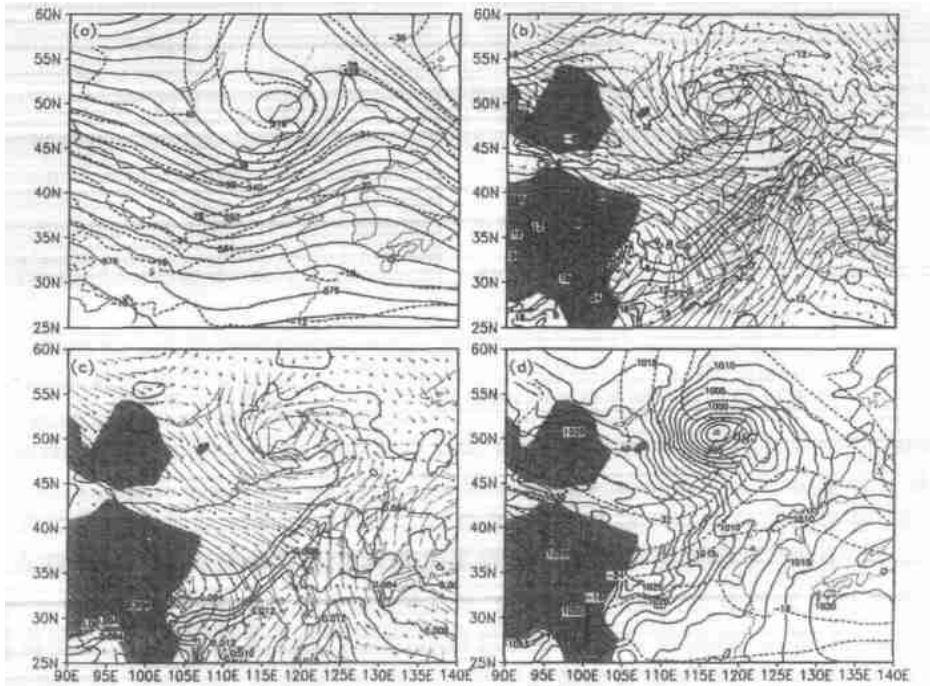


图 2 模式积分 24 小时(2002 年 3 月 20 日 14 时)天气形势(阴影: 地形高度大于 1500mm)

- (a) 500hPa 高度场(实线, 单位: 10gpm)及温度场(虚线, 单位: °C)
- (b) 850hPa 温度场(实线, 单位: °C)及风场(箭矢线, 单位: m)
- (c) 地面比湿场(实线, 单位: kg kg⁻¹)及风场(箭矢线, 单位: m)
- (d) 海平面气压场(实线, 单位: hPa)及地面温度场(虚线, 单位: °C)

(500hPa)可以清楚地看到 18 日 08 时(图略)一个较深的低槽从中亚于 22 日 08 时东移到中国的东部沿海地区。低槽东移较快, 19 日 08 时位于新疆东部(95°E), 20 日 08 时到达蒙古国东部(110°E), 1 天东移了近 2000km, 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。对应低层有一气旋于 19 日 08 时在蒙古中部生成, 扬沙和沙尘暴天气出现在蒙古中部, 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东部和内蒙古的东北部, 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,20日是此次过程中沙尘天气影响我国范围最大的一天(图6)。21日气旋中心位于内蒙北部,22日移出我国东北,21~22日沙尘天气主要影响我国东北。

图2给出了模式模拟的20日14时引发该次大范围严重沙尘暴地面大风的气象环境场。此时500hPa低涡位于蒙古国东方省和我国呼伦贝尔盟交界处。锋区位于内蒙古中部到四川附近(图2a),等高线和等温线的交角很大,说明该冷锋的斜压性很强,锋区冷暖平流的配置有利于冷锋的加强。850hPa图上我国北方大部地区处于冷锋及其后部强烈的西北大风控制下,冷锋前西南暖空气向东北方向爬升(图2b);由于高空冷空气的不断补充和有利的冷暖平流配置,地面气旋在此时达最强,中心位于蒙古国乔巴山附近,中心气压小于987hPa(图2d);我国北方地面均有大风出现,地面比湿的分布表明我国北方处在干冷空气的控制下(图2c)。从以上分析可以看出,该气旋是在有利的大尺度环境下,高空强冷平流和斜压性促使地面气旋强烈发展,造成地面大风的。

3.2 沙尘云模拟与卫星云图的对比

用整层的沙尘浓度与卫星监测图象做对比,以此来确认模拟结果的合理性。卫星是目前监测较大范围沙尘天气的强有利工具。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。另外需要说明的是,卫星云图判识沙尘云时所取阈值含有经验性,这是我们在使用卫星云图时需要注意之处。

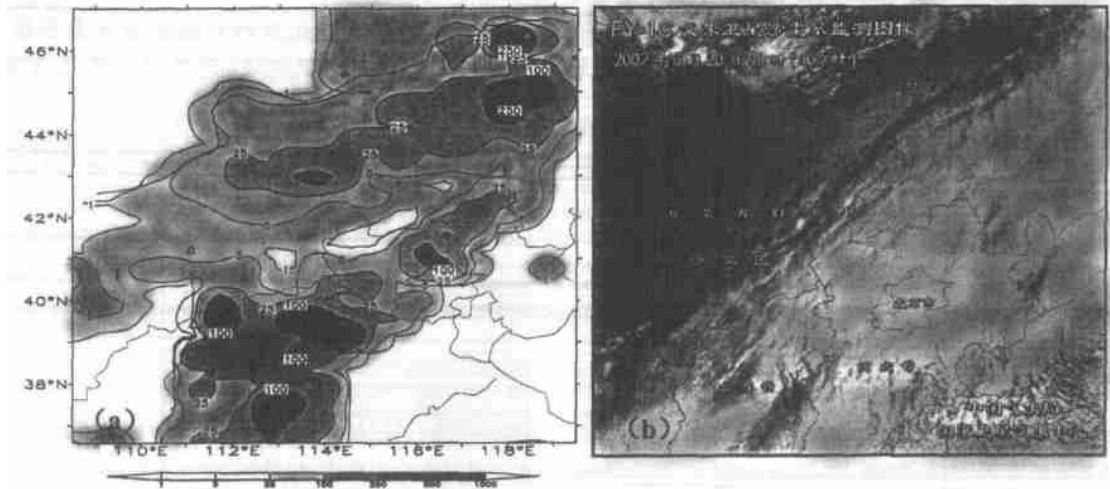


图3 2002年3月20日08时(a)整层各粒径沙尘浓度之和
(单位: mg m^{-2})的模拟与(b)对应时刻的FY-1C卫星沙尘监测图

图3是模拟的2002年3月20日08时整层各粒径沙尘浓度之和与对应时刻的卫星云图。对比图3(a)(b)可知,模拟显示出的沙尘浓度区域与卫星云图沙尘云区域非常接近,有两个主要的沙尘高浓度区:一个是内蒙古中部、东部地区沙尘浓度都很高,最高的沙尘浓度中心位于内蒙古的锡林郭勒盟的浑善达克沙地,达 250 mg m^{-2} 。另外,模拟的整层沙尘浓度与卫星监测沙尘云的走向也是一致的东北西南向。另一个是位于河北和山西境内的沙尘高浓度带。由于云层遮挡,无法在卫星监测云图上直接看到,但是可以从20日的地面观测(图6b)显示08时河北和山西已经出现沙尘和沙尘暴天气,说明模拟结果与实际观测的一致性。在此基础上,下面对起沙和输送结果作一分析。

3.3 起沙分析

3.3.1 起沙源分析

通过3.2节的分析,模式对该次过程起沙率的模拟是比较合理、可信的。3月19~22日的过程中起沙区域主要是蒙古国的巴彦洪戈尔省南部、南戈壁、东戈壁省,我国内蒙古阿拉善盟地区、锡林郭勒盟地区、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 $15 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。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,总的起沙量达 $7.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,其中 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的粒子为 $6.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,占该时刻总起沙量的87%。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(图略)。图4是20日的起沙分布图。从图4可以看出,起沙过程有明显的日变化:白天大夜晚小,正午前后出现最大值,这与边界层的湍流运动规律是一致的。

利用模式3小时一次输出的地面垂直沙通量,将整个积分时段内垂直沙通量大于 $0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的格

点数统计后,得到这次沙尘暴过程地面起沙频次综合图(图略)。其中高频区为蒙古国的南戈壁省东部和东戈壁省;内蒙古西部到河西走廊一带(巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠);青海西北部;浑善达克沙地和科尔沁沙地和河北省东北部。所以说,主要的沙源位于沙漠和沙地以及农、牧、草过渡带。

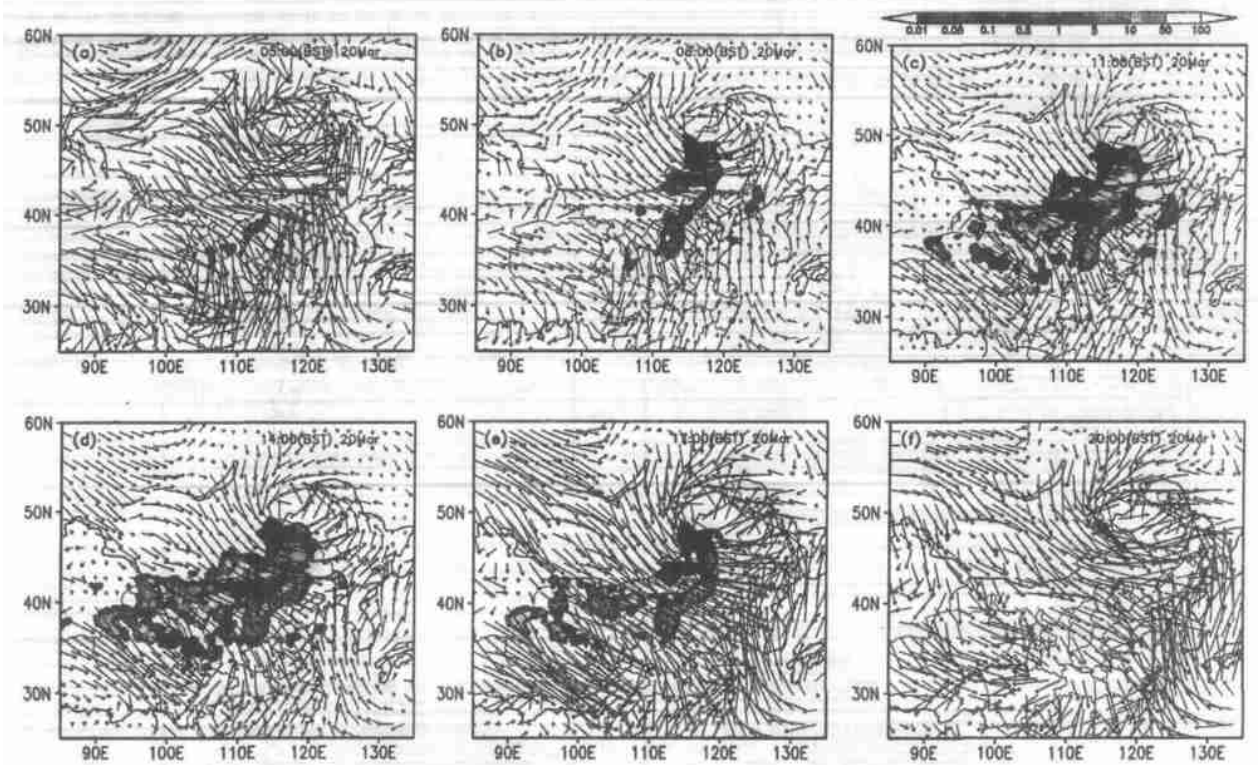


图 4 2002 年 3 月 20 日模拟的地面起沙率(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)

3.3.2 起沙源中各粒径粒子的起沙状况及起沙条件分析

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。在不同区域取代表站分析各粒径粒子的起沙量。选取 3 月 19 日 08 时~ 22 日 08 时过程内蒙古西部和东部代表站额济纳旗(42°N , 101°E)和朱日和(42°N , 112°E),分析和比较两站的起沙率、土壤水分、摩擦速度、临界摩擦速度以及地面风速(图 5)。比较图 5a 和图 5b,显然额济纳旗的起沙率大于朱日和的起沙率,而且是西部先出现起沙的。说明天气系统的移动对起沙率的影响时间不同,但起沙率为什么不同?首先分析两者的临界摩擦速度(图 5g 和图 5h),临界摩擦速度是反映地表植被状况、土壤性质等阻碍土壤粒子起动的综合因素,而从图 5g 和图 5h 得知额济纳旗的临界摩擦速度小于朱日和的临界摩擦速度,说明额济纳旗比朱日和容易起沙;另外,其它两个因素:额济纳旗土壤水分比朱日和的土壤水分小;地面风速比朱日和的大,这些条件都是有利于额济纳旗起沙的,两个地区起沙率的不同也就不足为奇了。另外一个共同特点是: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 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的

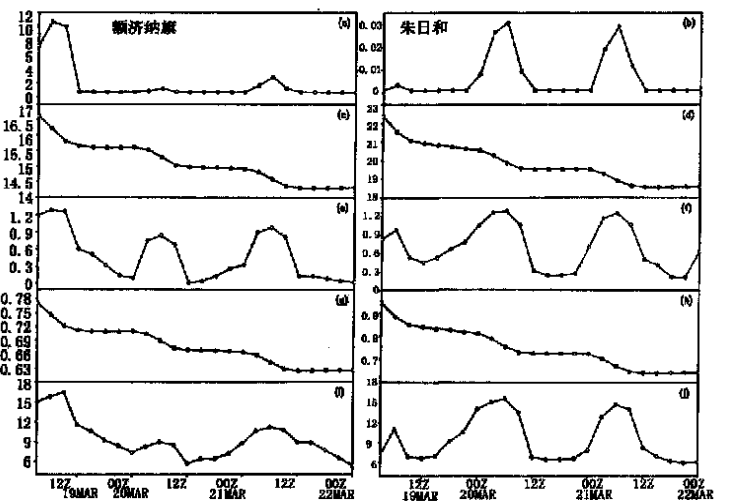


图 5 2002 年 3 月 19 日 08 时~ 22 日 08 时内蒙古额济纳旗(42°N , 101°E)和朱日和(42°N , 112°E)各要素时间演变
(a)、(b)起尘量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); (c)、(d)土壤湿度($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); (e)、(f)摩擦速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (g)、(h)临界摩擦速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (i)、(j)地面风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

粒子(细粉土), 其次是 $11\sim 22\mu\text{m}$ 的粒子(中粉土), 粒径大于 $22\mu\text{m}$ 的尘土颗粒则没有贡献。图 5 还反映出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、土壤湿度的不同外, 影响该地区的天气系统不同(风力等), 起沙量也不同。

3.4 沙尘输送

目前尚没有常规的沙尘浓度观测资料, 只有一些点的观测数据, 很难与模拟大范围的沙尘浓度作对比, 因此, 我们将该次过程模拟的地面沙尘浓度与 3h 地面天气现象^[21]对比。模拟的沙尘天气区域 3 月 19

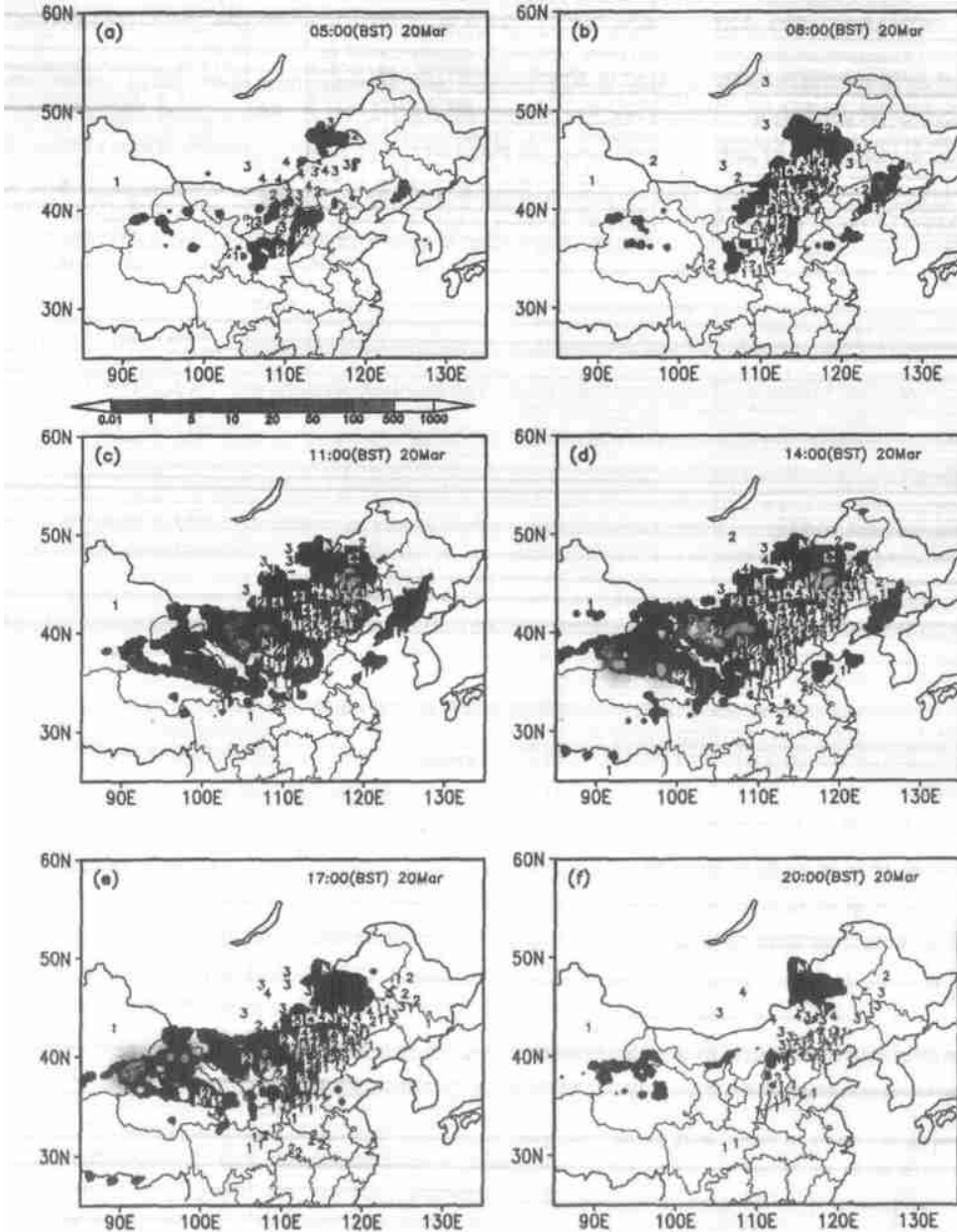


图 6 2002 年 3 月 20 日模拟的地面沙尘浓度(阴影, 单位: mg m^{-3})和地面观测天气现象(数字)

图中数字: 1 为浮尘, 2 为扬尘, 3 为沙尘暴, 4 为强沙尘暴

日在内蒙古、甘肃西部和青海北部地区(图略), 华北的沙尘浓度在 1 mg m^{-3} 以下。20 日影响华北大部分地区(图 6); 21 日影响华北北部、东北南部地区(图略)。从这次过程的 72 h 模拟看, 模拟出了沙尘天气的东移及浓度变化过程, 沙尘区域的东边界与实况较为一致, 地面观测显示, 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, 这与模拟结果是一致的。而朝鲜半岛在 19、21 日地面气象观测有沙尘天气(主要是浮尘), 这是由于他们的观测标准与中国不一致造成。

能够起沙的区域是低层风速比较大的地区, 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(见图 3 和图 4); 从 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偏北向东偏南移动的。沙尘的垂直输送主要是靠气流一定的上升运动来决定。图 7 是沿 40°N 的沙尘浓度和垂直速度的垂直剖面, 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 800hPa 以下, 局部地区能达到 500hPa, 因此, 沙尘被垂直输送的高度一般在 500hPa 以下。白天上升运动是逐渐增强的, 下午到达最强, 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 600hPa 左右, 而东部地区上升运动相对较弱, 只到达 800hPa, 沙尘被垂直输送的高度也较低。

4 结论

本文利用一个较完整的沙尘天气预测系统对 2002 年 3 月 19 日~ 22 日发生在我国北方地区较强的沙尘天气过程的气象条件、起沙和输送进行了定量的模拟, 模拟结果显示与气象观测和卫星云图良好的一致性, 结果是合理可信的。在此基础上, 对这次过程的气象条件、起沙和输送过程进行了定量分析研究, 对这次大范围的严重沙尘暴事件获得如下认识:

(1) 蒙古气旋是导致这次沙尘暴大风的主要影响系统, 气旋后部的强气压梯度力是造成地面大风的直接原因, 也是沙尘输送的动力。高空的干冷空气和高空锋区的强烈斜压性是气旋强烈发展和维持少动的有利条件。

(2) 该次过程主要的起沙区域为蒙古国的巴彦洪戈尔省南部、南戈壁省东部和东戈壁省; 内蒙古西部到河西走廊一带(巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠); 青海西北部; 浑善达克沙地和科尔沁沙地和河北省东北部。在 3 月 19~ 22 日的沙尘暴天气中西北地区的起沙量大于内蒙古中部的起沙量; 两个区域起沙量高峰值出现的时间比较一致, 同时起沙量表现出一些日变化的特征: 白天大, 晚上小; 最大值出现在正午前后。两个区域起沙量中贡献最大是 2~ 11 μm 的粒子(细粉土), 其次是 11~ 22 μm 的粒子(中粉土), 粒径大于 22 μm 的尘土颗粒则没有贡献。单站比较分析表明, 地表条件、土壤类型和大风是起沙率的主要决定因素。

(3) 沙尘输送主要发生在对流层低层, 在垂直运动较强的地方可以向上输送到 500hPa。

致谢 澳大利亚新南威尔士大学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 资料在此一并致谢。

参考文献

- [1] 刘震坤 蒙古气旋肆虐北方 南方持续低温阴雨—2000 年 3 月 2000, 气象, 26(6): 58- 61.
- [2] 周庆亮 北方风沙多华南降雨大—2000 年 4 月 气象, 2000, 26(7): 58- 61.
- [3] 张金艳 全国大部降水偏少北方多风沙天气—2001 年 3 月 气象, 2001, 27(6): 58- 61.
- [4] 刘震坤 北方风沙肆虐南方阴雨连绵—2001 年 4 月 气象, 2001, 27(7): 58- 61.
- [5] 乔林, 薛建军 北方出现强沙尘暴南方阴雨天气多—2002 年 3 月 气象, 2002, 28(6): 58- 61.
- [6] 崔绚 北方风沙多南方降水大—2002 年 4 月 气象, 2002, 28(7): 58- 61.
- [7] 邹旭恺 全国大部气温偏高北方风沙多干旱重—2002 年 3 月 气象, 2002, 28(6): 62- 63.
- [8] 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.
- [9] 刘毅, 任丽新, 周乐义, 周明煜 高原, 一次黄沙输送过程的数值模拟研究 大气科学, 1998, 22(6): 905~ 912.

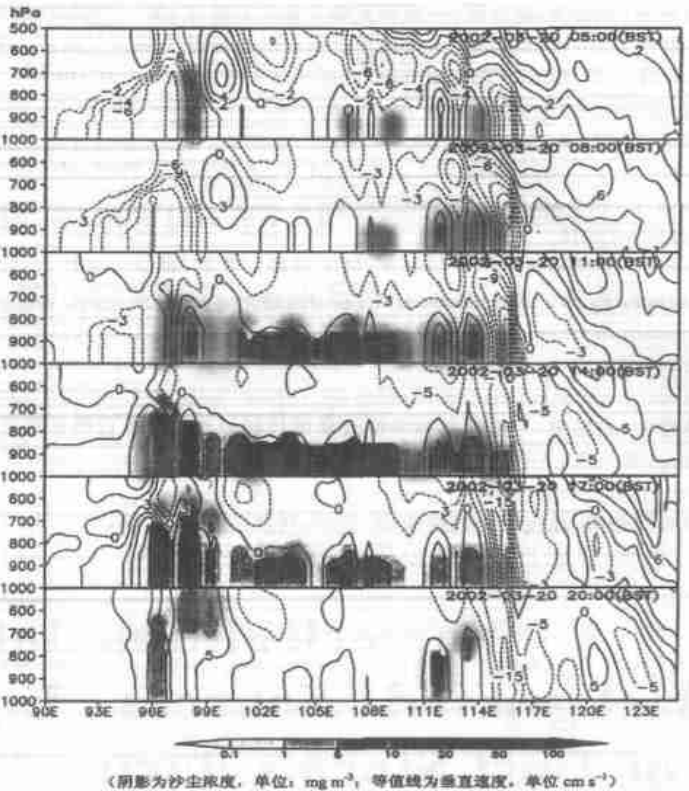


图 7 2002 年 3 月 20 日沿 40°N 沙尘浓度和垂直速度的垂直剖面
(阴影为沙尘浓度, 单位: mg m^{-3} ; 等值线为垂直速度, 单位: cm s^{-1})

- [10] 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
- [11] 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
- [12] Lu, H., Y. Shao. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. Environmental Modeling & Software, 2001, 16: 233~ 249
- [13] Shao, Y. P. A model for mineral dust emission. J. Geophys. Res., 2001, 106(D17): 20239~ 20254
- [14] Shao, Y. P. Physics and Modelling of Wind Erosion. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000, 139~ 142
- [15] Shao Y. P., M. R. Raupach. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. J. Geophys. Res., 1993, 98(D7): 12719~ 12726
- [16] 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
- [17] Anthes, R. A., Y. - H. Kuo, S. G. Benjamin and Y. - F. Li. The evolution of the mesoscale environment of severe local storms: Preliminary modeling results. Mon. Wea. Rev., 1982, 110(9): 1187~ 1213
- [18] Zhang, D.- L. and J. M. Fritsch, Numerical simulation of meso- β scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part I: Model description and verification, J. Atmos. Sci., 1986, 43(18): 1913~ 1943
- [19] 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究. 大气科学, 2000, 24(3): 381~ 392
- [20] 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
- [21] 中央气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1979: 21~ 27.

Numerical Simulation of Synoptic Background, Sources, Emissions and Transport of Dust Storms during 20 Mar, 2002 in China

ZHAO Lin-na¹ SUN Jian-hua² ZHAO Si-xiong²

(1. National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 China)

Abstract

In the past few years increase in frequency and intensity of dust storms were remarkable in east Asia. Dust storms has become one of the most outstanding ecological and environmental problems in north China, attracting much attention both domestically and internationally. In this paper, an integrated wind-erosion modeling system which couples a physically based wind-erosion scheme, the fifth Generation PSU/NCAR's mesoscale model (MM5) and a dust transport model with a high-resolution geographic information database were applied to analyze the dust storm of 19-22 May, 2002. The results showed that the predicted area of dust storms is in good agreement with those of meteorological observation and satellite images. The results showed the coupled system is capable of simulating and predicting of spatial and temporal variations of dust emission sources and transport. The main area of dust emission sources are the south of Bajanchongor, the Omnogov and the Dornogov of Mongolia; Badain Jaran Desert; Tengger Desert; Ulan Buh Desert; Hexi Corridor; western to northern of Qinghai province; Hunshandake sandy land; Horqin sandy land and Hebei province of China. Badain Jaran Desert and Tengger Desert are the main sources of dust emission, the averaged emission intensity is $15 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. It is also found that the dust could be transported vertically up to low-level troposphere generally.

Key words: dust storm; source of dust; transport of dust; numerical simulation