

林彩燕, 朱江, 王自发. 2009. 沙尘输送模式的不确定性分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 232–240. Lin Caiyan, Zhu Jiang, Wang Zifa. 2009. Uncertainty analysis of a dust-transport model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 232–240.

沙尘输送模式的不确定性分析

林彩燕 朱江 王自发

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用一个远距离输送的沙尘模式估计了由于参数化过程(干沉降速度)和输入资料(源强和水平风场)的误差造成沙尘模拟的不确定性。通过对以上参数分别进行敏感性试验, 分析了模式对 2002 年 3 月 15~24 日期间中国东部地区两次主要沙尘过程模拟的不确定性。结果显示, 源区的潜在源强和气象水平风场的不确定性对模拟结果的影响最大, 而干沉降速度的影响相对较小。同时, 对不同区域[西部($<95^{\circ}\text{E}$)、中部($95^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$)和东部($>110^{\circ}\text{E}$)]的潜在源强和干沉降速度参数进行敏感性试验发现, 中部区域的参数设置对模拟结果的影响最大, 而西部和东部区域的参数变化对模拟结果的影响很小。此外, 不同高度的风场影响也不一样: 地面风速影响最大, 中层的影响较小, 而高层(约 6 km 高度以上)的风场几乎没有影响。

关键词 沙尘输送模式 不确定性 敏感性试验

文章编号 1006-9895(2009)02-0232-09

中图分类号 P404

文献标识码 A

Uncertainty Analysis of a Dust-Transport Model

LIN Caiyan, ZHU Jiang, and WANG Zifa

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This paper estimates the uncertainty in the outputs of a dust-transport model due to physical parameterizations (dry deposition) and input data (source intensity and wind fields). Sensitivity experiments are generated from a reference simulation in which one parameter is changed at a time. Comparisons of the simulations and observations allow us to access the impact of each process and the robustness of the model. The case study is a 10-day simulation of dust concentrations over East Asia during 15–24 March 2002. Results show that there is a higher uncertainty due to the input data (source intensity and wind fields) than the dry deposition velocity. Moreover, for this case, there is higher uncertainty due to the source intensity and the dry deposition velocity in the middle area ($95^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) than in other areas, and there is higher uncertainty due to surface wind fields than higher-level ones.

Key words dust-transport model, uncertainty, sensitivity experiments

1 引言

近年来中国北方的沙尘天气频繁发生。沙尘暴, 尤其是特强沙尘暴, 是一种危害极大的灾害性天气。沙尘气溶胶可影响光学特征、改变辐射平

衡、影响区域和全球气候, 在长距离输送过程中会夹带大量的污染物, 对周遭的空气质量乃至全球生物化学循环都有着重要的影响(Duce, 1995; 石广玉等, 2003)。因此, 需要建立准确的沙尘暴预报系统, 对沙尘暴来临前进行准确的预报, 为防灾减

收稿日期 2007-08-20, 2007-11-19 收修定稿

资助项目 中国科学院创新方向项目 KZCX2-YW-202、KZCX2-YW-205, 国家自然科学基金资助项目 40533017

作者简介 林彩燕, 女, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事沙尘暴集合资料同化研究。E-mail: cylin@mail.iap.ac.cn

灾提供服务。

关于沙尘暴的监测和数值模拟国内外已有较大的发展。国内外建立了不少观测网来研究沙尘气溶胶的物理化学特性 (Murayama et al., 2001; Sugimoto et al., 2002; Zhang et al., 2003)。观测能客观地记录真值,但其时空分布不规则,且观测数量仍相当有限。由于数值模拟可以得到规则时空分布的结果,而且其时空分布密度较大,因而成为不可替代的预报和研究的工具。许多国家也发展了各自的数值模式(包括区域尺度和洲际尺度的)研究沙尘的形成、输送、沉降等等 (Wang et al., 2000, 2001; Song et al., 2001; Uno et al., 2001; Shao, 2001; Gong et al., 2003; Park et al., 2003; Liu et al., 2003; Shao et al., 2003; Han et al., 2004; 邵亚平, 2004; 赵琳娜等, 2004; 孙建华等, 2004),部分模式已经投入到业务预报。然而,沙尘暴数值模式也存在自身的不足之处:由于对物理过程认识的偏差,模式预报仍然存在多方面的不确定性,如气象场、起沙和沉降的不确定性等。

近来,几个区域沙尘模式应用到 ACE-Asia 观测期间,试验结果 (Huebert et al., 2003) 发现:虽然各个模式从源区开始有着相似的输送形式,但是预报的地面沙尘浓度差别很大,有时可以差别两个量级以上;而起沙量也相差甚大。如此大的差异表明模式在以下方面存在很大的不确定性:起沙方案、干沉降方案、输入资料(陆面资料、源强、气象场等)和数值近似。另外,沙尘模式比较计划 (DMIP) (Uno et al., 2006) 的结果显示:源区的风速有很大的不确定性,起沙量区别很大,而模式的输送和清除过程对于中国下游(如日本)的沙尘预报影响比较大。此外,我们之前的沙尘资料同化研究表明,只是改进模式的初始场对沙尘的预报并没有太大影响,而主要的影响还是来源于模式的不确定性。因此,较准确估计沙尘模式的不确定性不仅对沙尘数值模式的发展,而且对沙尘资料同化的应用发展都至关重要,分析其来源则是准确估计不确定性的重要前提。

各个沙尘模式的不确定性来源有些相似之处,但是各主要过程的不确定性具体有多大,不同区域的不确定性的差异又是多少,这方面的研究相对较少,值得进一步探讨。由于沙尘模式主要包括起沙、输送和沉降这三个过程,本文利用王自发等

(Wang et al., 2000) 开发的沙尘输送模块和国家环境保护部的 PM10 资料,主要分析了沙尘源强、干沉降速度以及风场的不确定性,并指出不同过程的不确定性对模式模拟结果的影响。

2 模式和资料介绍

2.1 模式介绍

模式是一个区域的沙尘输送模式,采用地形追随的球坐标方程,包括起沙、输送、扩散和清除过程,已经被成功应用于东亚大气示踪气体和颗粒物如沙尘、SO_x、O₃、酸雨等的研究 (Wang et al., 2000, 2002; Uematsu et al., 2003)。模式区域覆盖整个中国地区 (16°N~59°N, 75°E~145°E) (如图 1 所示),水平 1°×1°,垂直为 18 层的 σ 坐标:

$$\sigma(\theta, \varphi) = \frac{z - h(\theta, \varphi)}{H(\theta, \varphi) - h(\theta, \varphi)},$$

其中, $H(\theta, \varphi)$ 为对流层高度, $h(\theta, \varphi)$ 为松弛高度, z 是位势高度,底层高度相当于 30 m,顶层相当于 10 km 左右。详细部分请参见 Wang et al., (2000)。

2.1.1 起沙机制

模式中的起沙机制是通过详细分析中国北方约 300 个气象站的气象条件、地形和气候条件,设计的一个新机制 (黄美元等, 1998; Wang et al., 2000)。沙尘粒子分为 9 档进行模拟 [其粒径分布请参见 Wang et al. (2000) 表 5], 主要考虑了地表

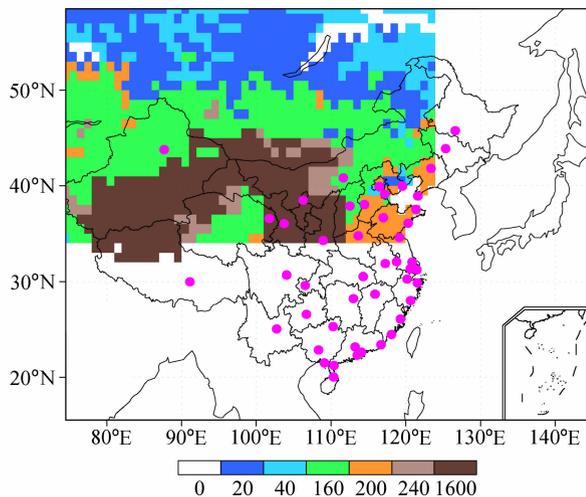


图 1 模式的区域及不同下垫面的沙尘权重因子(阴影)和国家环境保护部的 PM10 观测站(粉红色圆点)
Fig. 1 The model domain, the weighting factor (shaded) of dust loading for different land types and the stations of PM10 (pink dots)

摩擦速度、湿度的影响、天气系统如冷锋的影响,其沙尘释放强度 $Q_{i,j,l}$ 计算公式如下

$$Q_{i,j,l} = C_1 C_2 u_{i,j,l}^{*2} (1 - u_{0i,j,l}^*/u_{i,j,l}^*) W_{i,j,l} R_{i,j,l}, \quad (1)$$

其中, C_1 为不同植被类型下垫面对应的沙尘含量的权重因子, 相当于潜在沙源或源强 (如图 1 阴影所示), C_2 是经验常数 2.9×10^{-2} 。 $u_{i,j,l}^*$ 为瞬时摩擦速度, $u_{0i,j,l}^*$ 为临界摩擦速度 (0.4 m/s), $R_{i,j,l}$ 为第 L 档沙尘气溶胶在起沙量中所占比例, $W_{i,j,l}$ 为第 L 档沙尘气溶胶的湿度因子。而沙尘起沙时的抬升高度约为 505 m (相当于模式第 6 层)。

2.1.2 干沉降参数化方案

影响沙尘干沉降的因子主要有重力作用和湍流作用。湍流作用采用计算一般气溶胶的考虑地表状况及天气稳定度的干沉降速度的阻力模型, 重力作用则主要考虑下降末速度。

对于模式最底层和其他层, 沙尘粒子的干沉降速度可分别表示 (黄美元等 1998) 为

$$V_d = V_g + \frac{1}{r_a + r_b + r_c}, \quad \text{模式底层} \quad (2)$$

$$V_d = V_g, \quad \text{其他层} \quad (3)$$

其中, r_a 和 r_b 为阻力项,

$$r_a = \frac{\ln(z/z_0) - \Psi_c}{ku^*},$$

$$\Psi_c = \begin{cases} -\frac{5.0z}{L}, & (0 \leq z/L < 1) \\ e^{[0.598+0.21\ln(-z/L)]}, & (-1 \leq z/L < 0) \end{cases}$$

$$r_b = \frac{ASc^{2/3}}{u^*},$$

$$V_g = \frac{2(\rho_p - \rho)r^2g}{9\gamma},$$

z_0 为地面粗糙度, z 为模式最底层高度, L 为 Monin-Obukov 长度, u^* 是摩擦速度, k 是 von Karman 常数 (0.4), Sc 是 Schmit 数, A 为经验常数取为 5.0 (Wesley et al., 1997)。 r_c 是转换阻尼项 (r_c 在多数情况下观测表明数值很小, 一般忽略)。 V_g 为重力沉降速度, ρ_p 是粒子密度 (2.5 g/cm^3), ρ 空气密度, r 为粒子半径, γ 是大气粘性系数。

2.2 资料

模式的气象场输入资料来自 NCEP 的再分析资料。用于分析的资料是国家环境保护部提供的 2002 年 3 月 15~25 期间观测的地面 PM10 日均值资料 [前一天的 04 时 (国际协调时, 下同) 到当天

的 03 时的平均], 其站点分布如图 1 粉红色圆点所示。用于 PM10 观测质量控制的是 2002 年 3 月 15~24 日地面 3 小时的天气现象资料。

由于 PM10 观测可能来自于沙尘的贡献也可能来自于人为污染的贡献, 为此首先需要进行质量控制, 把那些主要贡献不是来自沙尘的 PM10 观测去掉, 以分析较大沙尘事件时模式的不确定性来源。根据中国气象局地面观测站 (记为观测站 A, 每 3 小时一次观测) 观测到的沙尘天气现象 (浮尘记为 1、扬沙为 2、沙尘暴为 3 和强沙尘暴为 4), 若 PM10 地面观测站 (记为观测站 B) 周围一个经纬度范围内至少有一个观测站 A 一天至少观测到三次浮尘, 或一次浮尘和一次扬沙, 或一次沙尘暴现象, 则该观测站的 PM10 日均值被认为主要是来自沙尘的贡献, 记为沙尘有效观测站, 否则全部剔除。经过控制以后有的天数没有观测, 如 3 月 15 日、19 日、24 日没有观测。以下分析模式不确定性时所用的 PM10 观测来自以上的有效观测站 (主要分布在中国东部)。

3 试验设计

由于影响我国的沙尘源区主要有境外的蒙古共和国东南部戈壁荒漠区和哈萨克斯坦东部沙漠区及我国西北地区的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、塔克拉玛干沙漠、乌兰布和沙漠和黄河河套的毛乌素沙地周围。尤其塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠是我国沙尘天气的主要沙尘源区。这些沙尘源区的源强和干沉降速度的参数设置对于沙尘的模式预报起着关键的作用: 沙尘源区的潜在源强 C_1 影响着起沙量的大小, 从而影响输送到下游的沙尘浓度; 而干沉降速度的大小影响着沙尘的沉降量, 尤其是上游沉降量的大小直接影响着能够被输送到下游的沙尘浓度。

因此, 我们首先根据张小曳等 (1996) 给出的中国北方沙漠的 3 个分区将模拟范围分为三个区域 (如图 2 所示), 然后比较不同区域的源强和干沉降速度的参数设置对预报的影响。这三个区域为西部区域 (简称 I): 95°E 以西, 主要包括古尔班通古特沙漠、塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠以及蒙古国南部戈壁荒漠; 中部区域 (简称 II): $95^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$, 主要包括巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和毛乌素沙漠; 东部区域 (简称 III): 110°E 以东, 主要包括浑

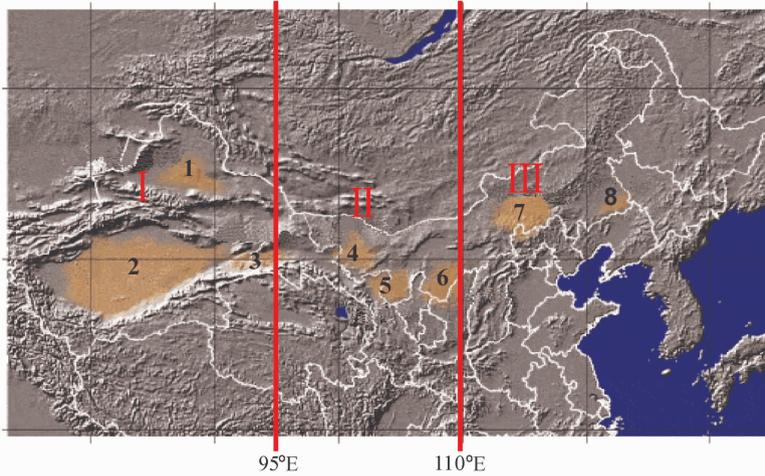


图 2 中国八大主要沙漠分布以及三个区域的划分。1: 古尔班通古特沙漠; 2: 塔克拉马干沙漠; 3: 库木塔格沙漠; 4: 巴丹吉林沙漠; 5: 腾格里沙漠; 6: 毛乌素沙漠; 7: 浑善达克沙地; 8: 科尔沁沙地

Fig. 2 Distribution of eight main deserts in China and the division of the three regions. 1: Gurbantunggüt Desert, 2: Taklimakan Desert, 3: Kumutage Desert, 4: Badain Jaran Desert, 5: Tengger Desert, 6: Mu Us Desert, 7: Hunshandak Sandy Land, 8: Horqin Sandy Land

表 1 沙尘源区潜在源强 C_1 的敏感性试验设置

Table 1 Configuration of the sensitivity experiments of source intensity C_1

	α		
	I	II	III
试验 11	$\alpha = \alpha_0$	$\alpha = \alpha_0$	$\alpha = \alpha_0$
试验 12	$\alpha = \alpha_1$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$
试验 13	$\alpha = 1$	$\alpha = \alpha_2$	$\alpha = 1$
试验 14	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$	$\alpha = \alpha_3$

表 2 干沉降速度 V_d 的敏感性试验设置

Table 2 Configuration of the sensitivity experiments of dry deposition velocity

	β		
	I	II	III
试验 21	$\beta = \beta_0$	$\beta = \beta_0$	$\beta = \beta_0$
试验 22	$\beta = \beta_1$	$\beta = 1$	$\beta = 1$
试验 23	$\beta = 1$	$\beta = \beta_2$	$\beta = 1$
试验 24	$\beta = 1$	$\beta = 1$	$\beta = \beta_3$

善达克沙地和科尔沁沙地等。

沙尘源区潜在源强 C_1 的敏感性试验设置如表 1 所示, 在潜在源强 C_1 乘上一个系数 α , 得到一个新的源强 $C_{1, new} = \alpha C_1$ 。其中, 当 $\alpha = 1$ 时为控制试验, 而敏感性试验则是对整个区域以及三个不同区域分别进行。试验 11: 对整个区域取 $\alpha = \alpha_0$; 试验 12: 对西部区域取 $\alpha = \alpha_1$, 其他两个区域取 $\alpha = 1$; 试

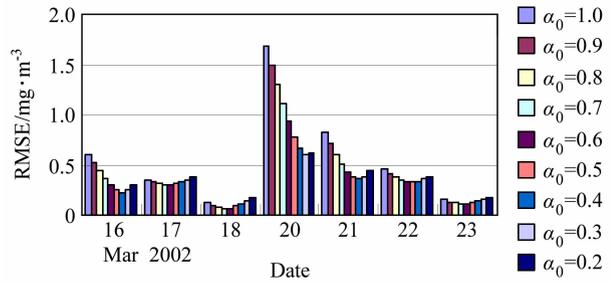


图 3 不同潜在源强 C_1 的模式预报结果与观测 PM10 的均方根误差 (RMSE)

Fig. 3 Root mean square errors (RMSEs) of simulations and observations for different source intensity C_1

验 13: 对中部区域取 $\alpha = \alpha_2$, 其他两个区域取 $\alpha = 1$; 试验 14: 对东部区域取 $\alpha = \alpha_3$, 其他两个区域取 $\alpha = 1$ 。对 α 不等于 1 的区域取 $\alpha > 1$ 或 $0 < \alpha < 1$ 。

对于干沉降速度的敏感性试验设置类似于源强 C_1 的试验设置, 在旧的干沉降速度基础上乘上一个系数 β , 得到新的干沉降速度 $V_{d, new} = \beta V_d$ (如表 2 所示)。其中, 当 $\beta = 1$ 时为控制试验, 而敏感性试验则是对整个区域以及三个不同区域分别进行。试验 21: 对整个区域取 $\beta = \beta_0$; 试验 22: 对西部区域取 $\beta = \beta_1$, 其他两个区域取 $\beta = 1$; 试验 23: 对中部区域取 $\beta = \beta_2$, 其他两个区域取 $\beta = 1$; 试验 24: 对东部区域取 $\beta = \beta_3$, 其他两个区域取 $\beta = 1$ 。对 β 不等于 1 的区域取 $\beta > 1$ 或 $0 < \beta < 1$ 。其中试验 22、试验 23 和试验 24 对不同区域的干沉降速度进行敏感

表 3 风场的敏感性试验设置

Table 3 Configuration of the sensitivity experiments of wind fields

	γ	
	地面	高层
试验 31	$\gamma=\gamma_0$	$\gamma=\gamma_0$
试验 32	$\gamma=\gamma_1$	$\gamma=1$
试验 33	$\gamma=1$	$\gamma=\gamma_2$

性试验时,不考虑重力沉降的改变,原因将在下一节的结果分析中具体说明。

由于中高层风场对于沙尘的输送起着引导作用,而地面风场直接影响摩擦速度的计算,从而影响到沙通量和干沉降速度。因此,对于风场的不确定性分析,分地面($k=1$)和中高层($k\geq 2$)考虑。试验设置如表 3 所示,其中,当 $\gamma=1$ 时为控制试验,即原来的风场,而敏感试验取 $\gamma>1$ 或者 $0<\gamma<1$ 。试验 31:对于整层风场取 $\gamma=\gamma_0$;试验 32:对地面风场取 $\gamma=\gamma_1$,中高层风场取 $\gamma=1$;试验 33:对中高层风场取 $\gamma=\gamma_2$,地面风场取 $\gamma=1$ 。

4 结果与讨论

4.1 源区潜在源强对预报的影响

对 2002 年 3 月 15~24 日期间的沙尘进行模拟,分析整个区域的源强影响时,发现当 $\alpha>1$ 时,模式预报的沙尘浓度日均值($d<10\ \mu\text{m}$,以下的模式预报结果均为 $d<10\ \mu\text{m}$)和观测的 PM10 日均值的均方根误差(RMSE)基本都是随着 α 的增大而增大的(图略);当 $\alpha<1$,RMSE 基本都是随着 α 的减小而减小的(如图 3 所示),即预报结果更接近观测,并且当 $\alpha=0.4$ 左右,整体 RMSE 最小,对于 3 月 20 日的强沙尘事件, RMSE 从原来的 $1.685\ \text{mg}/\text{m}^3$ 减小到 $0.668\ \text{mg}/\text{m}^3$ (减少了 60%左右)。

从上面的分析可知源强 C_1 增大时预报结果更远离观测,因此下面对不同区域的影响进行分析时就不考虑系数 α 大于 1 的情况。不同区域的试验发现西部的源强对于中国东部地面的沙尘预报结果没有什么影响(图 4a);东部的源强有一点影响,但是也很小, RMSE 有略微的减小(图 4c);而中部的影响很大,几乎包括源强的总体影响, RMSE 的减小量与图 3 的相当(如图 4b 所示)。

由于北京是人们比较关注的非源区的点,并且

在这两次沙尘过程中都受到较大影响,因此以下的单点分析均选北京为例。图 5 是北京观测的 PM10 和试验 13 模式模拟结果的对比。可以看出控制试验的模拟结果(黑色粗实线)比观测的(红色的实心圆点)基本都有偏大的倾向。当潜在源强 C_1 减小到原来的 0.4 倍左右(蓝色粗实线),模拟的结果总体上更接近于观测。另外,从图 5 中还可以看出,中部区域不同的源强所得到的模式预报结果的离散度是比较大的,沙尘越强时越大。

因此,模式对于中国东部的沙尘模拟的不确定性,一部分主要来自源区潜在源强的不确定性,且是源强的高估,其中中部的影响最大。这是由于潜在源强在模式中是估计的固定值,而事实上,一次沙尘过后源区的很多沙子已被吹走,对于紧跟其后的沙尘过程,源区的源强也应有相应的改变。另外,由于这次沙尘过程主要是通过西北路径影响中国东部的,因此中部源区的影响会最大。

4.2 干沉降速度对预报的影响

模式模拟期间同样为 2002 年 3 月 15~24 日,从对整个区域的敏感试验分析结果中发现,当 $\beta<1$ 时,模式预报与观测 PM10 的 RMSE 基本都是随着 β 的减小而增大的(图略);而当 $\beta>1$ 时, RMSE 基本都是随着 β 的增大而减小的,并且当 $\beta>1.8$ 以上 RMSE 的减小量就很小了(如图 6 所示)。并且,与图 3 的结果相比发现干沉降速度的影响要比源强的影响小得多:如 3 月 20 日,减小源强为原来的 0.4 时, RMSE 从原来的 $1.685\ \text{mg}/\text{m}^3$ 减小到 $0.668\ \text{mg}/\text{m}^3$ (减少了 60%左右),而把干沉降系数增大到 1.8 倍时 RMSE 才减小到 $1.212\ \text{mg}/\text{m}^3$ (减少了 28%左右)。另外,当分别考虑重力作用和湍流作用(以下简称湍流沉降)的影响时,发现对于较强沙尘暴时重力沉降对模式底层预报的影响比较小,大约占干沉降总影响的 25%(图略)。

由于重力沉降主要跟粒子大小有关,并且前面的分析结果也显示重力沉降的影响比较小,因此在进一步考虑不同区域干沉降速度的影响时不改变重力沉降,只是改变湍流沉降。

从图 7a 和图 7c 的结果可以看出,改变西部和东部的湍流干沉降速度对中国东部的地面沙尘模拟结果并没有多大改变,尤其是西部的干沉降速度对结果几乎没有影响。而增大中部的湍流沉降显然对预报有明显的改善(如图 7b 所示),使得 RMSE 减

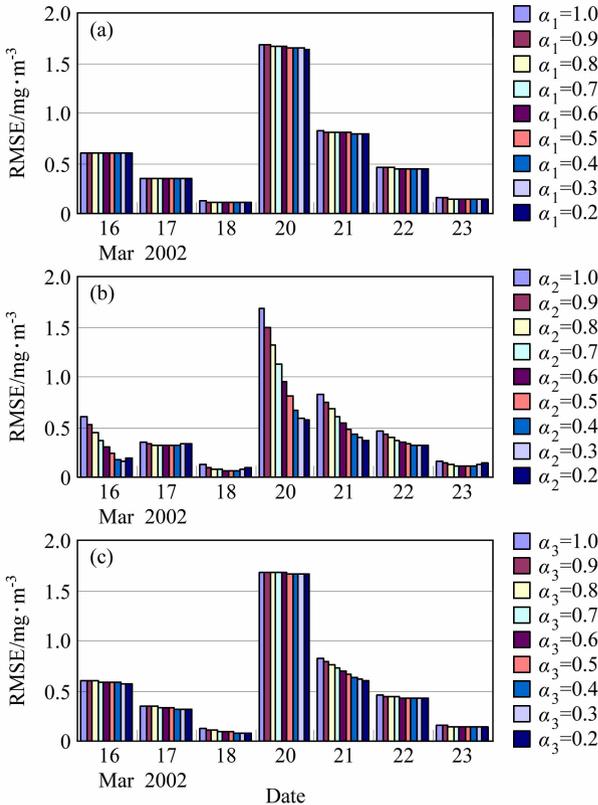


图 4 同图 3, 但为不同区域: (a) 区域 I; (b) 区域 II; (c) 区域 III
Fig. 4 As in Fig. 3, but for different regions: (a) Region I; (b) region II; (c) region III

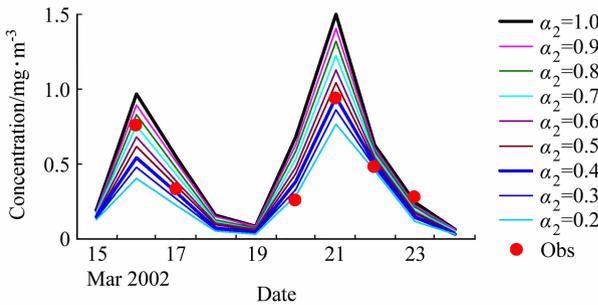


图 5 试验 13 中北京的观测 PM10 (红色实心圆点) 和不同源强 C_1 的模式模拟结果 (彩色实线) 的对比
Fig. 5 Comparison of simulations (colorful solid lines) for different source intensity in area II with the observation (red dots) in Beijing

小, 尤其是对于沙尘比较强的时候 (如 3 月 20 日)。而且, 与图 6 相比可以发现, 增大中部的湍流沉降使得 RMSE 的减小量和考虑整个区域的干沉降 (图 6) 所减小的 RMSE 相差不太大, 说明中部的干沉降尤其是由湍流作用引起的干沉降对于下游的

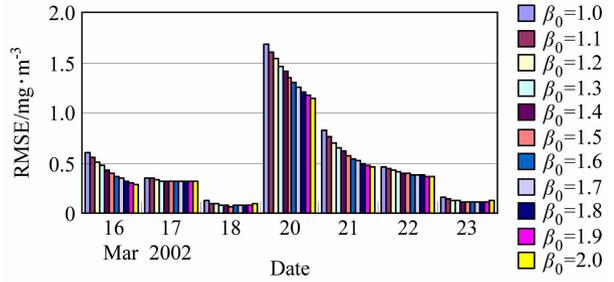


图 6 不同干沉降速度的模式预报结果与观测 PM10 的均方根误差 (RMSE)
Fig. 6 RMSEs of simulations and observations for different dry deposition velocity

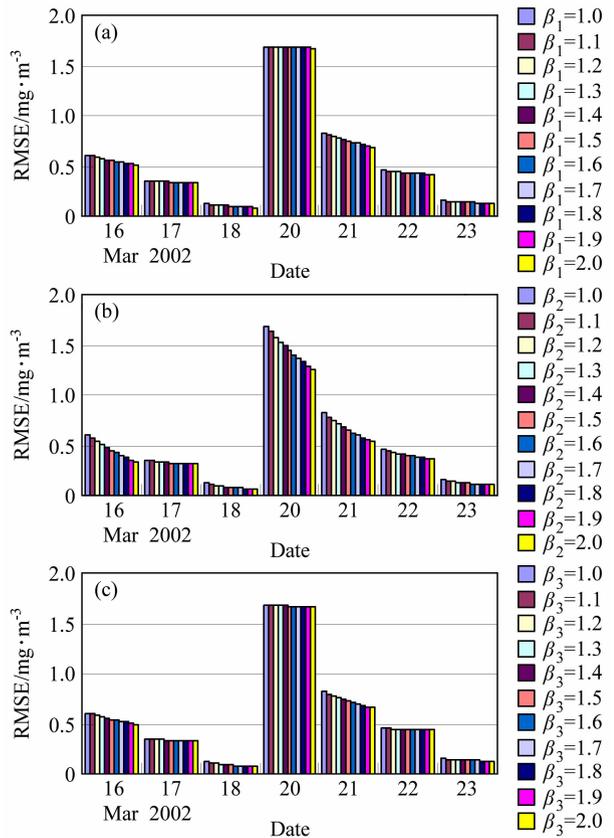


图 7 不同区域的湍流沉降的模式预报结果与观测 PM10 的均方根误差 (RMSE): (a) 区域 I; (b) 区域 II; (c) 区域 III
Fig. 7 RMSEs of simulations and observations for different dry deposition velocity: (a) Region I; (b) region II; (c) region III

地面沙尘预报起着重要的作用。

图 8 是北京观测的 PM10 和试验 23 模式模拟结果的对比。可以看出增大干沉降时, 模式模拟的结果有向观测靠近, 但是靠近的程度很小, 远不如试验 13 的结果 (图 5)。另外, 从图 8 中还可以看出不同的湍流沉降所得到的模式预报结果的离散度

很小，观测都在这些结果之外。

4.3 风场对预报的影响

从对整层风场的简单比较试验发现，当 $\gamma > 1$ 时，模式预报结果与观测的 PM10 的均方根误差 (RMSE) 均迅速增大，当 $\gamma = 1.2$ 时，3 月 20 日的均方根误差已从原来的 1.685 mg/m^3 增大到 2.925 mg/m^3 图略；而当 $\gamma < 1$ 时 RMSE 迅速减小，且当 $\gamma = 0.7$ 左右，RMSE 减小到最小，3 月 20 日减小到 0.683 mg/m^3 (减小了 60% 左右) (如图 9 所示)。

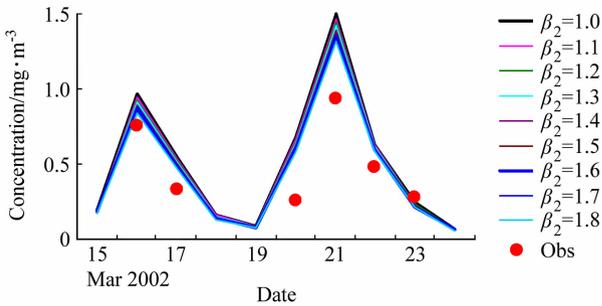


图 8 试验 23 中北京的观测 PM10 (红色圆点) 和不同湍流沉降的模式模拟结果 (彩色实线) 的对比

Fig. 8 Comparison of simulations (colorful solid lines) for different dry deposition velocity in area II with the observation (red dots) in Beijing

同时对不同高度层的试验结果分析发现地面风速的影响最大 (如图 10a 所示)，当 $\gamma < 1$ 时 RMSE 迅速减小， $\gamma = 0.7$ 左右 RMSE 减小到最小，3 月 20 日 RMSE 减小到 0.643 mg/m^3 (减小了 62% 左右)，比考虑整层风速影响时的 RMSE 减小量还要大一点。而中高层 (即除了最底层以上的层次) 风速的影响比较小，且与地面风速的影响相反 (如图 10b 所示)，当 $\gamma > 1$ 时 RMSE 减小，这也说明了为何只考虑地面风速影响时的 RMSE 减小量比考虑整层的要小一些。其可能的原因是地面风速偏大，使得干沉降速度偏小，起沙通量过大，从而下游预

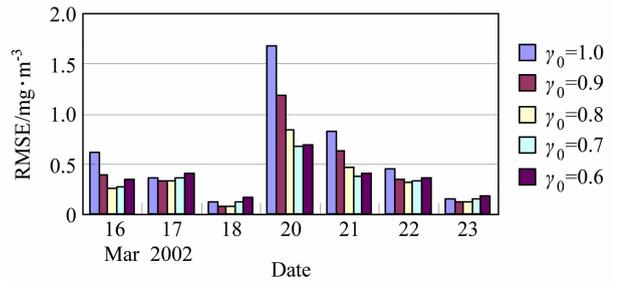


图 9 不同水平风速的模式预报结果与观测 PM10 的均方根误差 (RMSE)

Fig. 9 RMSEs of simulations and observations for different wind fields

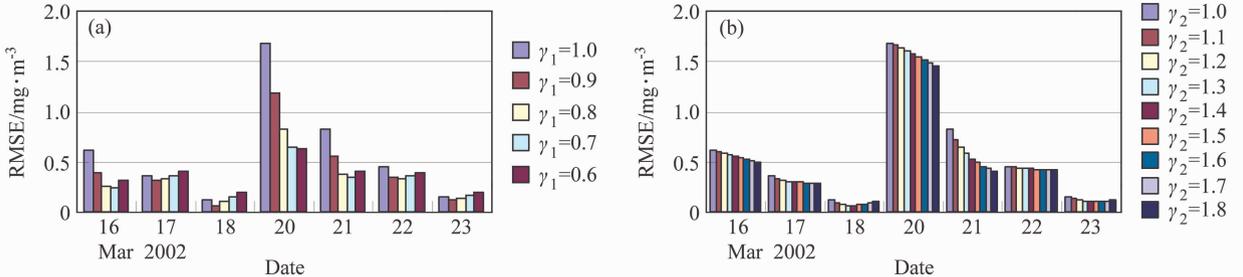


图 10 不同高度的水平风速的模式预报结果与观测 PM10 的均方根误差 (RMSE): (a) 地面; (b) 中高层
Fig. 10 RMSEs of simulations and observations for the (a) surface and (b) mid-high-level wind fields

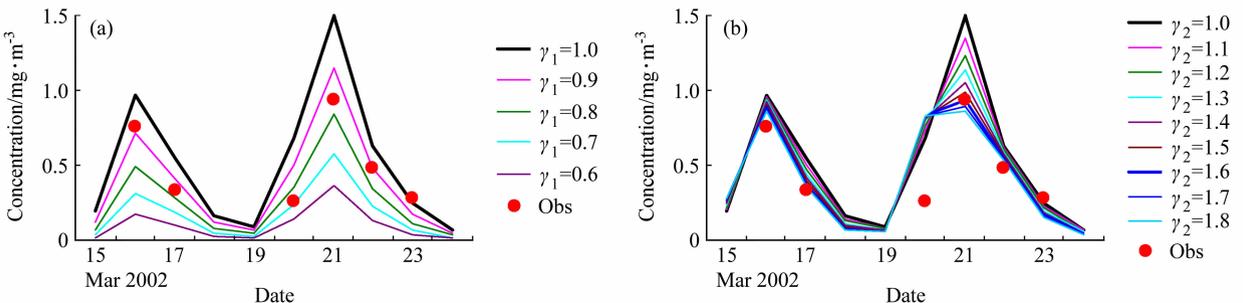


图 11 北京观测的 PM10 (红色实心圆点) 和试验 32 (a)、试验 33 (b) 不同风速的模式模拟结果 (彩色实线) 的对比
Fig. 11 Comparison of simulations (colorful solid lines) for different wind fields at (a) the surface level and (b) the mid-high levels with the observation (red dots) in Beijing

报的沙尘浓度偏大; 而中高层的风场主要是起着输送作用, 风速偏小就不利于当地沙尘气溶胶输送出去, 也会导致当地预报的浓度过大。另外, 进一步对中高层不同层次风速影响进行分析发现高层风速 ($k > 15$, 相当于 6 km 以上) 对于中国东部的沙尘模拟结果几乎没有影响 (图略)。

图 11 是地面风速减小或者中高层风速增大时, 模式模拟北京地区的沙尘浓度和观测的 PM10 的对比, 可以看出当地面风速减小或者中高层风速增大时, 模拟的结果更接近观测。另外, 从图 11 中还可以看出不同地面风速所得到的模式预报结果的离散度很大, 沙尘越强时离散度越大, 说明地面风速的不确定性很大; 而中高层不同风速对预报结果的离散度较小, 即不确定性较小。

5 结论

通过对 2002 年 3 月 15~24 日的沙尘模拟的不确定性研究发现:

(1) 中国东部沙尘的不确定性一部分主要来源于对中部区域的源强 C_1 和干沉降的估计, 而其他两个区域影响比较小, 这可能与这段时期的沙尘过程主要是通过西北路径影响中国东部地区有关。并且, 该不确定性主要来源于对中部区域源强 C_1 的高估或干沉降的低估, 同时发现对于强沙尘时 (如 3 月 20 日) 源强 C_1 高估的影响要比干沉降低估的影响大一倍左右。另外, 从北京的单点分析也可以看出, 源强的不确定性要远大于干沉降的不确定性 (前者的离散度大)。

(2) 对水平风速的比较试验可以发现, 地面风速影响最大, 中高层风速的影响很小, 而且与地面风速的影响相反, 高层 (6 km 以上) 的几乎没有影响。这主要是由于两者的作用不同: 地面风速直接影响干沉降速度和起沙通量; 而中高层的风场主要是对沙尘起输送作用。同时, 当地面风速减小为原来的 0.7 倍时, RMSE 整体上减小到最小, 并且减小量与源强减小到原来的 0.4 倍时的 RMSE 减小量相当。单点分析结果显示地面风速的不确定性要远大于中高层风速的不确定性, 同时也比源强的不确定性大一些。这说明地面风速的不确定性是沙尘模式不确定性的另一大主要来源。

从前面比较试验分析可以看出, 沙尘模式对参数化方案 (干沉降) 以及输入资料的源强和风场很

敏感, 尤其是源强和风场的不确定性影响最大。当沙尘越强时不确定性越大, 并且不同源区的源强和干沉降、不同高度的风速的不确定大小也各不一样。另外, 分析结果也显示了模式对中国东部地区的沙尘模拟有高估的系统偏差。用类似以上的方法, 试验还可以研究模式其他的不确定性来源, 如起沙机制中的摩擦速度临界值的估计、各档的权重因子等。

虽然这只是个例分析, 模式对不同个例的不确定性的相对大小、来源会有所区别, 但分析结果反映了模式确实存在较大的不确定性, 且不同过程、不同区域、不同高度的贡献不一样。该个例的分析结果与引言中叙述的模式比较计划中所指示的结果 (Huebert et al., 2003; Uno et al., 2006) 相吻合, 这就说明了本文的结果对于其他沙尘模式不确定性具有指示意义。因此, 下一步我们就需要用较为系统的方法 (同时这种系统的方法应该是比较容易扩展到其他模式) 估计这些模式的不确定性, 并且应用到模式模拟中, 提高预报水平。

参考文献 (References)

- Duce R A. 1995. Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate [C]. *Aerosol Forcing of Climate*. John Wiley, New York, 43-72.
- Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. 2003. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia; 2. Model simulation and validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9), 4262, doi: 10.1029/2002JD002633.
- Han Z W, Ueda H, Matsuda K, et al. 2004. Model study on particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002 [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D19205, doi: 10.1029/2004JD004920.
- 黄美元, 王自发. 1998. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计 [J]. *大气科学*, 22 (4): 625-637. Huang M Y, Wang Z F. A model for long-range transport of yellow-sand in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, 22 (4): 625-637.
- Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. 2003. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D23): 8633, doi: 10.1029/2003JD003550.
- Liu M L, Westphal D L, Wang S G, et al. 2003. A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D23): 8653, doi: 10.1029/2002JD003178.
- Murayama T, Sugimoto N, Uno I, et al. 2001. Ground-based net-

- work observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 18345–18359.
- Park S U, In H J. 2003. Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D19): 4618, doi: 10.1029/2003JD003484.
- Shao Y P. 2001. A model of mineral dust emission [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 20239–20254.
- Shao Y P, Yang Y, Wang J J, et al. 2003. Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D22): 4691, doi: 10.1029/2003JD003667.
- 邵亚平. 2004. 沙尘天气的数值预报 [J]. *气候与环境研究*, 9 (1): 127–138. Shao Yaping. 2004. Numerical prediction of dust weather [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (1): 127–138.
- 石广玉, 赵思雄. 2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题 [J]. *大气科学*, 27 (4): 591–606. Shi Guangyu, Zhao Sixiong. 2003. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 591–606.
- Song C H, Carmichael G R. 2001. A three-dimensional modeling investigation of the evolution processes of dust and sea-salt particles in East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 18131–18154.
- Sugimoto N. 2002. Network observations of Asian dust and anthropogenic aerosols with dual-polarization Mie-scattering lidars [C]. *Proc. Int. Laser Radar Conf.*, 269–271.
- 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2004. 华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析 [J]. *气候与环境研究*, 9 (1): 139–154. Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2004. A numerical simulation on severe dust storm events in North China and their dust sources [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (1): 139–154.
- Uematsu M, Wang Z, Uno I. 2003. Atmospheric input of mineral dust to the western North Pacific region based on direct measurements and a regional chemical transport model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (6): 1342, doi: 10.1029/2002GL016645.
- Uno I, Amano H, Emori S, et al. 2001. Transpacific yellow sand transport observed in April 1998 [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 18331–18344.
- Uno I, Wang Z F, Chiba M, et al. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: D12213, doi: 10.1029/2005JD006575.
- Wang Z F, Ueda H, Huang M Y. 2000. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D22): 26947–26958.
- Wang Z F, Maeda T, Hayashi M, et al. 2001. A nested air quality prediction modeling system for urban and regional scales: Application for high-ozone episode in Taiwan [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 130: 391–396.
- Wang Z, Akimoto H, Uno I. 2002. Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: Observations and model results [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D19): 4389, doi: 10.1029/2001JD001040.
- Wesely M L, Hicks B B, Dannevik W P. 1977. An eddy correlation measurement of particulate deposition from the atmosphere [J]. *Atmos. Environ.*, 11: 561–563.
- Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. 2003. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-ASIA: Network observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9): 4261, doi: 10.1029/2002JD002632.
- 张小曳, 张光宇, 朱光华, 等. 1996. 中国源区粉尘的元素示踪 [J]. *中国科学 (D辑)*, 26 (5): 423–430. Zhang X Y, Zhang G Y, Zhu G H, et al. 1996. Elemental tracers for Chinese source dust [J]. *Sci. China (Ser. D) (in Chinese)*, 26 (5): 423–430.
- 赵琳娜, 赵思雄. 2004. 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 9 (1): 116–126. Zhao Linna, Zhao Sixiong. Simulation of rapid developing cyclone associated with strong dust storm in north China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2004, 9 (1): 116–126.