

中国北方沙尘传输的数值模拟

王雁鹏, 陈 岩, 殷惠民, 李玉武

(国家环境分析测试中心, 北京 100029)

摘 要: 利用 PSU/NCAR 的非静力中尺度气象预报模式 MM5 和三维欧拉型区域空气质量模式 CAMx 建起一套完整的空气质量模拟系统, 对 2001 年春季北方地区的沙尘传输的数值模拟结果表明, 该模式对沙尘传输和沙尘浓度分布有较好的模拟能力, TSP 模拟值与激光雷达监测结果具有显著的相关性, 置信度水平 >99%。蒙古国和内蒙古自治区对北京的贡献率分别为 30% ~ 50% 和 30% ~ 60%, 河北省的贡献率最高可达 29%。

关键词: 沙尘暴; 传输模式; 数值模拟

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

引 言

沙尘暴是一种灾害性的天气现象, 是荒漠化的后果, 是人类不适当活动对自然环境干扰的结果, 也是影响大气环境质量的主要因素之一。

沙尘天气的数值模拟是沙尘暴研究以及预警预报的重要手段, 包括起沙过程模拟、传输过程模拟和沉降过程模拟 3 部分。数值模拟可以同时采用多种模式的耦合完成全过程模拟, 起沙机制分为参数化方案和非参数化方案 2 类。常用的模式有全球大气传输模式 (Model of Atmospheric Transport and Chemistry, MATCH) 和中尺度非静力气象模式 MM5 等^[1]。MATCH 和沙尘释放与沉降模式 DEAD 耦合曾被用于沙尘气候状况的模拟^[2], MM5 具有较强的气象场模拟能力, 被广泛应用于沙尘天气的模拟^[3]。但是已往的观测和模拟研究主要集中在沙尘暴个例的分析研究上, 对沙尘状态和时空变化的模拟研究相对较少, 采用的沙尘天气观测数据为区域时段均值以及卫星图片等宏观观测, 缺少特定地点的实时连续观测。

本文利用气象卫星观测信息接收系统和沙尘暴地面监测网络, 利用激光雷达观测仪、DDM-LD-3K 颗粒物实时测定仪等仪器对沙尘暴事件进行了实时监测, 对北京地区形成的沙尘天气的污染特征进行研究, 对 2002 年北京出现的沙尘次数和累计天数进行了统计, 并利用 DDM-LD-3K 颗粒物实时

测定仪对沙尘暴的起源及传输方向进行解析, 确定了影响北京大气颗粒物的沙尘暴发生源区和传输路径。并就沙尘暴在北京地区的水平传输量和沉降量进行测定和推算。

本文的目的在于以中尺度数值模式 MM5 和三维欧拉型区域空气质量模式 CAMx 为基础构建起一套完整的空气质量模拟系统, 对沙尘的传输过程进行准确模拟, 进而掌握沙尘暴的产生、传输过程的空间分布和时间变化特征, 以及不同源区对北京地区大气颗粒物的贡献率, 最终实现对北京的空气质量状况进行预报。选取 2001 年春季 (3 月、4 月) 发生在中国北方地区的 6 次沙尘暴事件为模拟对象, 具体模拟区域为 $96^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$; $35^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 的范围。模拟结果的计算机动态显示系统是以 Microsoft Visual Basic 6、MapEngine Gis、Microsoft Office 2000 等为工具自行开发研制的图形显示系统。

1 模式的建立及说明

1.1 中尺度非静力气象模式 MM5

中尺度非静力气象模式 MM5 是由美国宾州大学 (PSU) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合开发的中尺度气象预报模式, 包括地形资料处理、地面资料处理、探空资料处理、客观分析、初始化、数值预报、后处理等模块。该模式具有非静力平衡的动力框架, 具有云物理和行星边界层等多种物理过程, 具

收稿日期: 2007 - 06 - 26; 改回日期: 2007 - 08 - 20

基金项目: 国家环境保护总局科技发展计划项目 (2002 - Z - 07) 资助

作者简介: 王雁鹏 (1970 -), 男, 工程师, 从事天气颗粒物和激光雷达监测研究。E-mail: xinpost@sina.com

有多重嵌套能力,还可以利用四维资料同化技术限制模式误差的增长,提高预报的效果。MM5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体等^[4-5]。香港科技大学从1997年开始利用MM5对以香港为中心的华南地区进行业务预报,另外国内一些科研机构 and 部门运用MM5在中尺度暴雨的数值模拟试验、海平面气象要素场的预报等方面进行科学研究和业务预测。本文选用MM5模拟中国北方地区沙尘暴发生期间的各种气象要素场,对气象特征及其变化规律进行研究,并将模拟结果作为输入数据驱动空气质量模式的运行。

1.2 三维欧拉型区域空气质量模式 CAMx

CAMx (Comprehensive Air Quality Model with extensions)^[6]是美国 ENVIRON 公司近期开发的三维欧拉型区域空气质量模式,可应用于多尺度的、有关气体和颗粒物的大气污染的综合模拟研究。CAMx模式采用了高度模块化的编程结构,融入了当今许多空气质量模式的先进技术,如双向嵌套网格技术、次网格 PiG 技术、化学机理编译器 (CMC)、快速化学数值解法等;此外,CAMx模式还支持多种地图投影,提供多种水平平流解法和并行计算方式等。CAMx模式已经广泛应用于北美和欧洲各地,在我国的珠江三角洲地区和京津地区的综合空气质量模拟研究中也较好的应用。本工作选用该模式实现对区域尺度范围内颗粒物浓度三维时空变化的数值模拟和研究。

1.3 模拟区域和模拟时段的选取

本文重点研究沙尘天气对北京的影响,根据国家环保总局地面监测网络数据以及卫星图片资料,确定了北路和西北路2条沙尘传输路线。北路从二连浩特、浑善达克沙地西部开始,经四子王旗、化德、张北、张家口、宣化,到达北京;西北路由阿拉善的中蒙边境、乌拉特中后旗、河西走廊起,经贺兰山、毛乌素沙地、乌兰布和沙漠、呼和浩特、大同、张家口,到达北京。

模拟区域采用 Lambert 投影坐标,2条真纬度分别是 30°N 和 60°N,坐标原点位于 40°N、110°E,模拟网格的大小为 36 km × 36 km,东西向网格数为 99,南北向网格数为 63,模拟区域范围为 3 564 km × 2 268 km。

选取 2001年 3月 1日 00时至 3日 00时、16日 00时至 26日 00时、4月 27日 00时至 5月 2日 00时 3个时段内包括北路、西北路整个模拟范围内的沙尘暴事件进行三维空间的数值模拟研究,以期揭示沙尘暴在时间上的演变规律和特征。

2 源释放模型的建立

2.1 起沙机制

起沙是一个复杂的过程,涉及地表土壤特征、植被类型和地表风应力等诸多因素^[7]。本研究在起沙机制的建立上考虑了地面摩擦速度、不同地表类型和下垫面特征等因素。研究表明,当地面摩擦速度(或地面风速)超过某个临界数值(称为临界摩擦速度或临界风速)时,沙尘粒子才能启动;而临界摩擦速度或临界风速与地表土壤状况和粒子自身特性有关。根据中国地表土壤、植被分布数据以及蒙古境内的有关资料^[8-9],将地表类型分为 4类^[10]:沙漠区、风重侵蚀区(包括戈壁、荒原等)、风轻侵蚀区(包括春季的草原、旱地等)、非源区(包括水田、森林、绿洲、山地、冻土、海洋等)。图 1是模拟区域 4种地表类型的分布情况。不同类型的地表采用不同的临界摩擦速度,源区的临界摩擦速度取值范围在 0.3~1.0 m/s 之间。

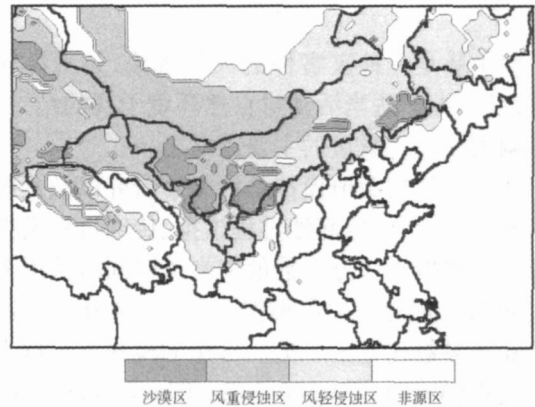


图 1 模拟区域 4种地表类型分布

Fig 1 The distribution of 4 land surface types in simulated region

源释放模型对垂直起沙通量的估算采用下面的公式^[11-15]:

$$F = C \cdot u_* \cdot (u_*^2 - u_{*c}^2) = C \cdot u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*c}^2}{u_*^2}\right) \quad (1)$$

式中, F 代表垂直起沙通量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), C 为起沙系数,取为 $5 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-5}$, u_* 和 u_{*c} 分别为摩擦速度和临界摩擦速度 (m/s)。

2.2 沙尘粒子尺度分布特征

由于不同粒径的沙尘粒子在源释放中所占的比重不同,而且沉降特征不同,因此,将沙尘的连续尺度谱分割为不同尺度段予以考虑。将空气动力学半径为 0.1~50 μm 的沙尘粒子分成 13个等对数间隔的尺度段^[10-11,16-18](表 1)。

表 1 沙尘粒子尺度谱

Tab 1 Size distribution of sand and dust particles

半径分段	空气动力学半径范围 / μm	半径中值 / μm
1	0.12 ~ 0.20	0.16
2	0.20 ~ 0.31	0.25
3	0.31 ~ 0.50	0.39
4	0.50 ~ 0.78	0.63
5	0.78 ~ 1.25	0.99
6	1.25 ~ 1.98	1.58
7	1.98 ~ 3.15	2.50
8	3.15 ~ 5.00	3.97
9	5.00 ~ 7.94	6.30
10	7.94 ~ 12.60	10.00
11	12.60 ~ 20.00	15.87
12	20.00 ~ 31.75	25.20
13	31.75 ~ 50.40	40.00

不同粒径的沙尘粒子在源释放中所占的比例不同,半径为 r 的粒子的源强分配因子采用如下的参数化方案^[10, 17-19]:

$$f(r) = \frac{r^{1.5}}{r^{1.5}} \quad (2)$$

2.3 源释放估算

在建立起上述起沙机制和沙尘颗粒的分谱特征后,利用中尺度气象模式 MMS 模拟得到的相关气象场资料,结合不同源区的下垫面特征,计算不同粒径沙尘颗粒的垂直起沙通量,并完成对起尘量在时间和空间的分配,从而建立起空气质量模式的源释放输入清单。沙尘源释放模型的输入输出结构如图 2。

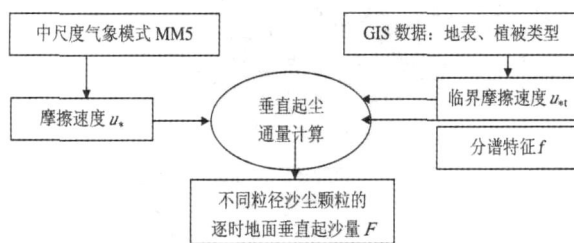


图 2 沙尘源释放模型的输入输出结构

Fig 2 Input and output structure of Sand - dust Source Emission Model

以 2001 年 3 月 21 日北京地区发生的沙尘暴事件为例,图 3 给出了 02、08、11、14、17、20 时次的地面摩擦速度和起尘量的模拟结果在模拟区域内的分布情况。02 时,摩擦速度的高值区域出现在蒙古国中部,处于蒙古境内的低气压区和高气压区之间的

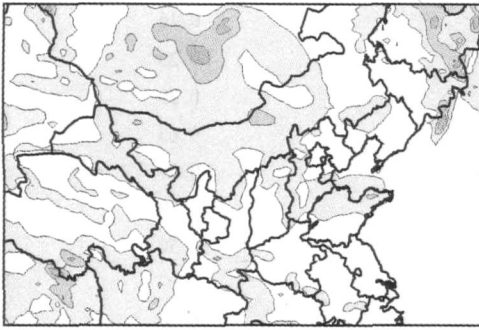
大风区,数值在 0.8 ~ 1.0 m/s,高值区的范围不大;结合不同沙尘源区类型的分布情况(图 1),此时整个模拟范围内的起尘量也很低。08 时,摩擦速度的高值区域向东南方向移动至蒙古东南地区以及相邻的内蒙古二连浩特地区,高值区域的范围有所扩大,由于这些地区分布着戈壁、沙地等,因此出现了右图所示的起尘分布情况,同时在内蒙古的毛乌素沙地地区也有一定的起尘量。中午前后(11 时和 14 时),在蒙古的中部及东南部地区、内蒙古中部及西部、黄土高原地区以及河北省北部的部分地区,均存在很高的摩擦速度,最大值在 1.2 m/s 以上,这一分布特征与气压场、风场的发展变化存在比较明显的对应关系,从而导致了在蒙古东南地区、内蒙古中部和西部的戈壁和沙漠地区以及河北北部的部分地区产生了高强度的沙尘排放。傍晚前后(17 时和 20 时),随着天气系统的发展变化,摩擦速度的高值继续向东移动,同时不断减小,因此,起尘的范围在随之向东移动的同时也不断减小、强度下降。可以看出,在这一天的沙尘起尘变化过程中,在二连浩特、浑善达克沙地及其周边的北部源区以及西北部源区都有较高的沙尘释放;由于天气系统的演变,使得北部源区的沙尘释放对北京地区的空气质量和颗粒物浓度产生重要影响。

另外,模拟区域西南部和东北部的一些地区也出现了一定高值的摩擦速度场,但由于地表类型的原因,这些地区未被划为沙尘源区,因此,没有沙尘释放。

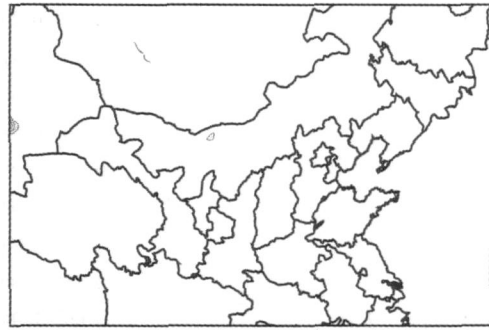
对中国北部地区沙尘释放的模拟研究表明,沙尘的释放与天气系统的发展变化、地表类型的分布

情况关系密切,受到两者的共同影响。在春季的沙
尘暴多发时期,位于蒙古南部和内蒙古中、西部的戈

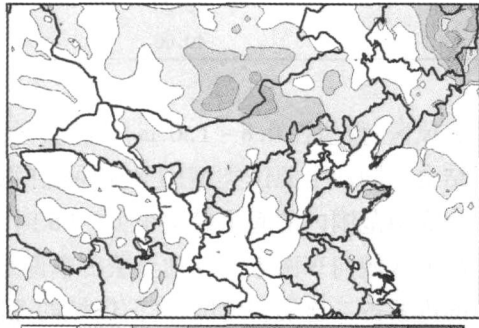
壁、沙漠是沙尘产生的重要源区,也是北京沙尘天气
颗粒物的重要来源。



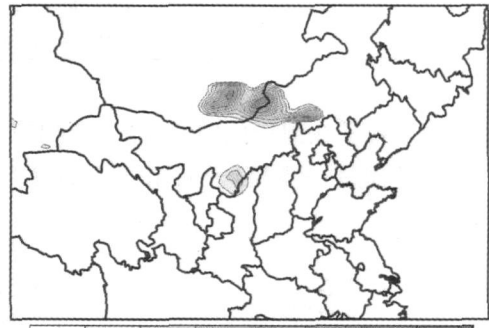
(a) 02 时摩擦速度



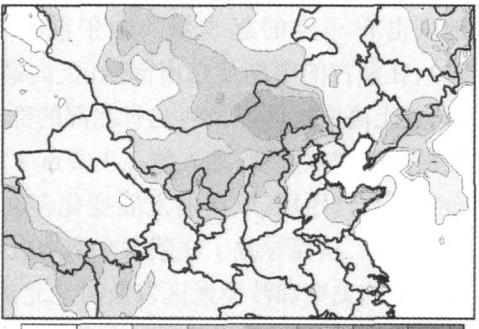
(b) 02 时起尘量



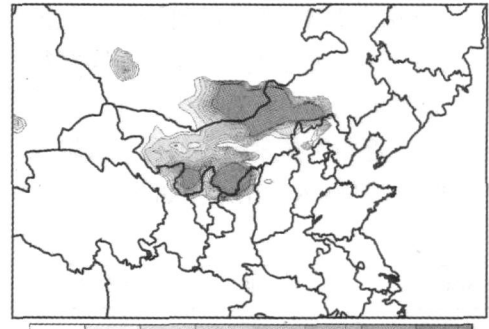
(c) 08 时摩擦速度



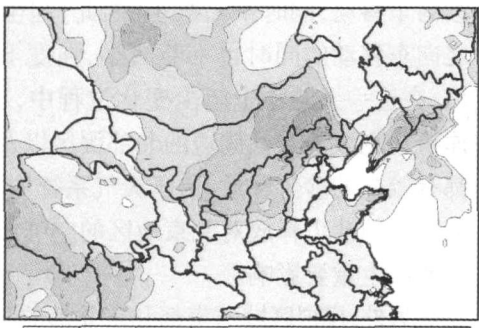
(d) 08 时起尘量



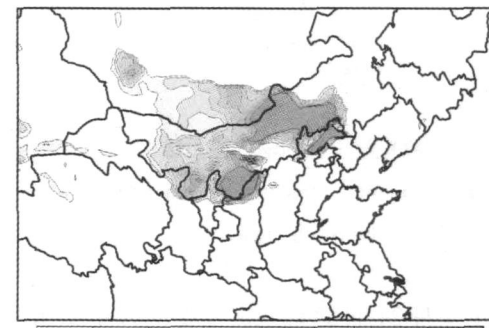
(e) 11 时摩擦速度



(f) 11 时起尘量



(g) 14 时摩擦速度



(h) 14 时起尘量

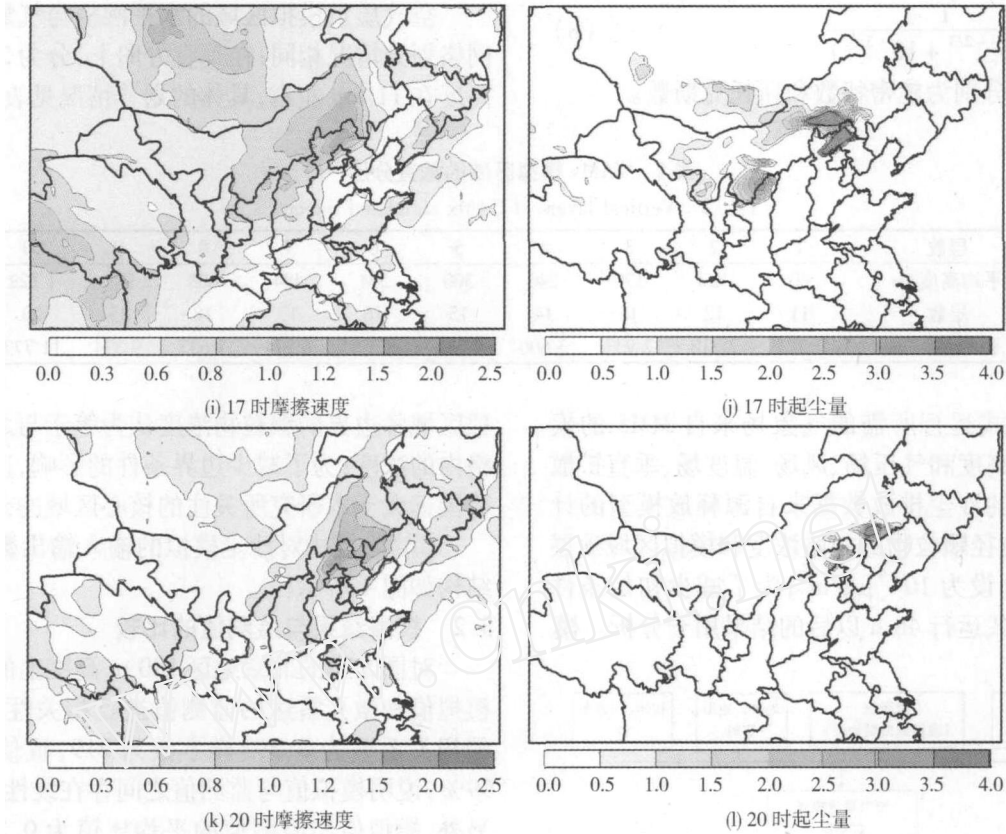


图 3 2001 年 3 月 21 日模拟区域内不同时刻的地面摩擦速度 (左图, 单位: m/s) 和起尘量分布图 [右图, 单位: $\times 10^3$ kg/(网格 · s)]

Fig 3 Distributions of surface friction velocity (left) and sand - dust amount (right) at different time in simulated region

3 沙尘输送过程模拟

3.1 沙尘输送模拟简介

对沙尘传输的模拟采用三维区域空气质量模式 CAM_x 进行, 模式使用的沙尘输送方程如下^[16]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = - (\nabla_H \cdot \vec{V}_H C_i) + \left[\frac{\partial(c_i)}{\partial z} - c_i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \right] + \nabla \cdot K \nabla \left(\frac{c_i}{t} \right) + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{\text{Emission}} + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{\text{Removal}} \quad (3)$$

上式中, C_i 是第 i 个粒径尺度的沙尘浓度, \vec{V}_H 是水平风速矢量, $\frac{\partial h}{\partial t}$ 是净的垂直卷夹速率, h 是层高, ρ 是大气密度, K 是湍流交换系数, t 是时间, z 是垂直高度。

沙尘输送方程的最后一项代表沙尘在大气中的去除过程; 由于模拟区域在模拟时段内基本没有降水过程, 所以沙尘颗粒在大气中的去除过程主要为干沉降。模式对干沉降的处理考虑了重力作用和湍流作用 2 部分, 其中, 重力作用主要考虑沙尘颗粒的下降末速度, 而湍流作用则采用干沉降速度的阻力模型。

在模式最底层, 沙尘颗粒的干沉降通过扩散、碰撞、重力沉降等途径进行, 粒径尺度是控制这些过程

的主要因素。CAM_x 采用干沉降的阻力模型, 对于某个粒径的沙尘颗粒在模式最底层的干沉降速率^[20]是:

$$d = v_{\text{sed}} + \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_{\text{sed}}} \quad (4)$$

式中, v_{sed} 是颗粒物的重力沉降速度, 与颗粒物的粒径和密度有关:

$$v_{\text{sed}} = \frac{D^2 g C}{18} \quad (5)$$

其中 D 是颗粒物直径, ρ 是颗粒物密度, g 代表重力加速度, μ 是空气粘性系数, 校正系数 C 由下式确定:

$$C = 1 + \frac{2}{D} \left[1.257 + 0.4 \exp \left(-\frac{0.55D}{\lambda} \right) \right] \quad (6)$$

其中 λ 为气体的平均自由程。

(4) 式中的阻力项 r_a 由下式确定:

$$r_a = \frac{1}{k u_*} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - h \right] \quad (7)$$

u_* 代表摩擦速度, k 是卡曼常数, z 和 z_0 分别代表参考高度和地面粗糙度, h 是稳定校正项。

(4) 式中的阻力项 r_b 是:

$$r_b = \frac{1}{u_* (S_c^{-2/3} + 10^{-3/S_r})} \quad (8)$$

式中 S_c 和 S_r 分别为施密特数和斯托克斯数。

空气质量模拟区域的水平网格与气象场模拟的网格划分情况相同;在垂直方向上,分为 20 层,顶层高度在 11 km 左右,具体的划分情况见表 2。

表 2 CAMx 模拟区域的垂直分层

Tab 2 Vertical layers of CAMx simulated region

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平均高度 /m	60	120	179	240	300	361	484	608	910	1 222
层数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
平均高度 /m	1 737	2 318	2 937	3 600	4 315	5 272	6 374	7 637	9 334	11 777

CAMx 模式运行所需的气象场来自 MM5 的模拟结果,包括高度和气压场、风场、温度场、垂直扩散系数等;逐时的沙尘排放数据来自源释放模型的计算结果。各粒径颗粒物的初始浓度和模拟区域顶层以上的浓度均设为 $10^{-9} \mu\text{g}/\text{m}^3$;为了减少初始条件的影响,将模式运行 48 h 以后的结果用于分析。模

拟区域各边界的颗粒物浓度认为等于与之相邻的网格内的浓度;为了减少边界条件的影响,选定的模拟范围远大于本研究所关注的核心区域的范围。

CAMx 模式对沙尘模拟的输入输出数据和模拟结构如图 4 所示。

3.2 模拟结果与监测值的比较

对图 5 中的北京地区 180 m 高度上的 TSP 浓度模拟值和激光雷达的监测值进行相关性检验,两者的相关系数为 0.59,样本数为 219,置信度水平 $> 99\%$,说明模拟值与监测值之间存在线性相关关系。另外,模拟值与监测值的平均比值为 0.77,表明模拟结果略低于监测结果,其中一个可能的原因是由于在模拟中对北京本地的沙尘源分辨较粗、估计不足。

对北京地区沙尘暴发生期间不同高度上 TSP 的模拟值与激光雷达监测值(图 6)的相关性检验表明,每小时的平均相关系数为 0.68,每小时的样本数为 19,模拟值与监测值存在相关性的置信度水平在 99% 以上。

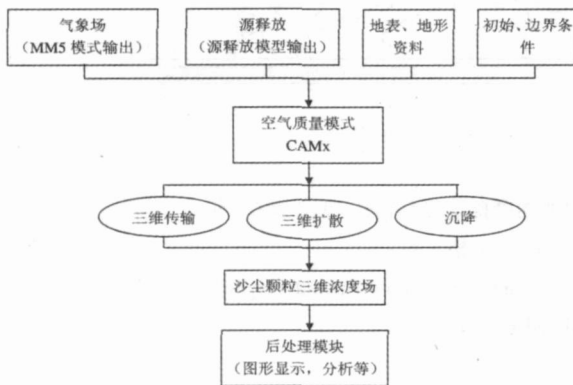


图 4 CAMx 模式的模拟结构示意图

Fig 4 Simulated structure of CAMx Model

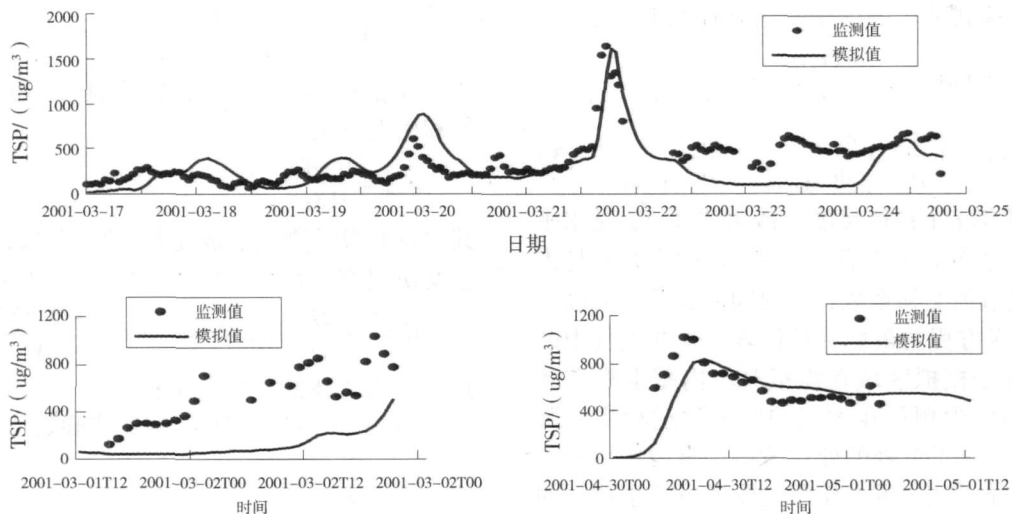


图 5 2001 年春季北京地区 TSP 浓度的模拟值与激光雷达观测值的比较

Fig 5 Comparison of simulated value and Lidar monitoring value of TSP in spring of 2001 in Beijing

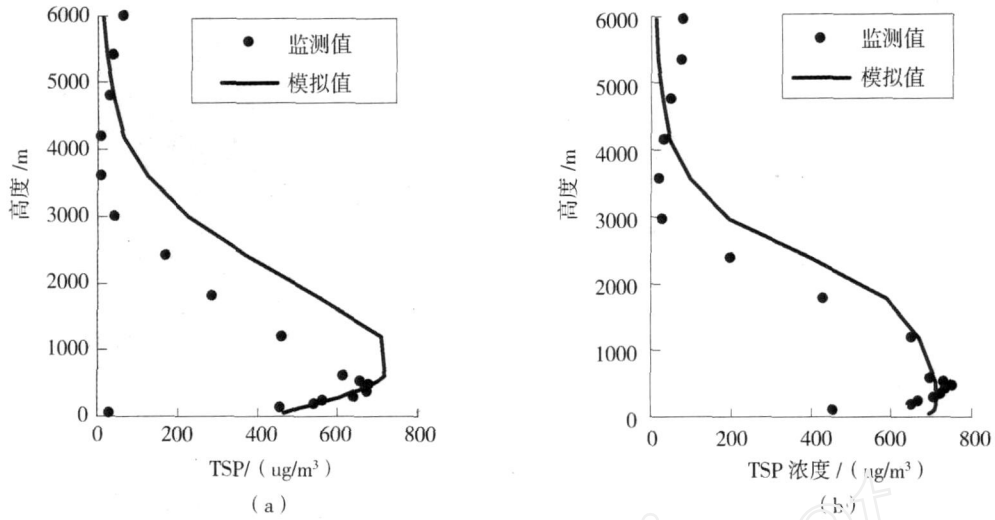


图 6 TSP浓度随高度的变化 ((a): 3月 24日 08时; (b): 4月 30日 13时)

Fig 6 Relationship between TSP concentrations and height ((a) for 08:00 March 24; (b) for 13:00 April 30)

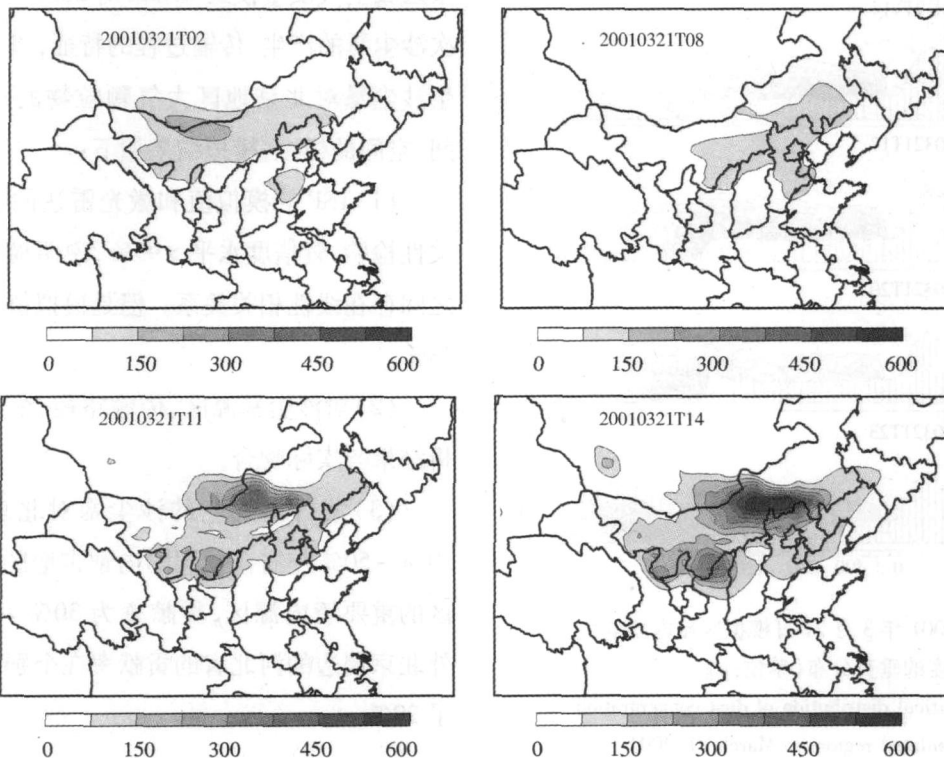
3.3 沙尘传输的区域特征分析

以北京地区 2001 年 3 月 21 日发生的沙尘暴事件为例进行分析。

2001 年地面监测网络和气象数据分析结果表明: 2001 年 3 月 21 日 02 时至 3 月 23 日 20 时境外蒙古国曼达赖、沙音山图地区和内蒙古锡林郭勒、多伦、朱日和、榆林、四子王旗发生强沙尘暴, 并沿北路和西北路传输。模式模拟结果 (图 7 和图 8) 显示主要来自北部源区并经由北路传输影响北京。

3.4 不同源区对北京地区沙尘浓度的贡献

由于本模式将北京市作为非源区处理, 且对本地尘的估计不足, 因此表 3 中北京市本地尘的贡献率很低。蒙古国和内蒙古自治区是影响北京地区的重要源区, 总贡献率达到 85% 以上, 因此对该地区进行生态治理迫在眉睫。但也有个别情况显示北京周边的影响也不可忽视, 如: 2001 年 3 月 21 日, 河北省的沙尘对北京的影响达到了 29%。



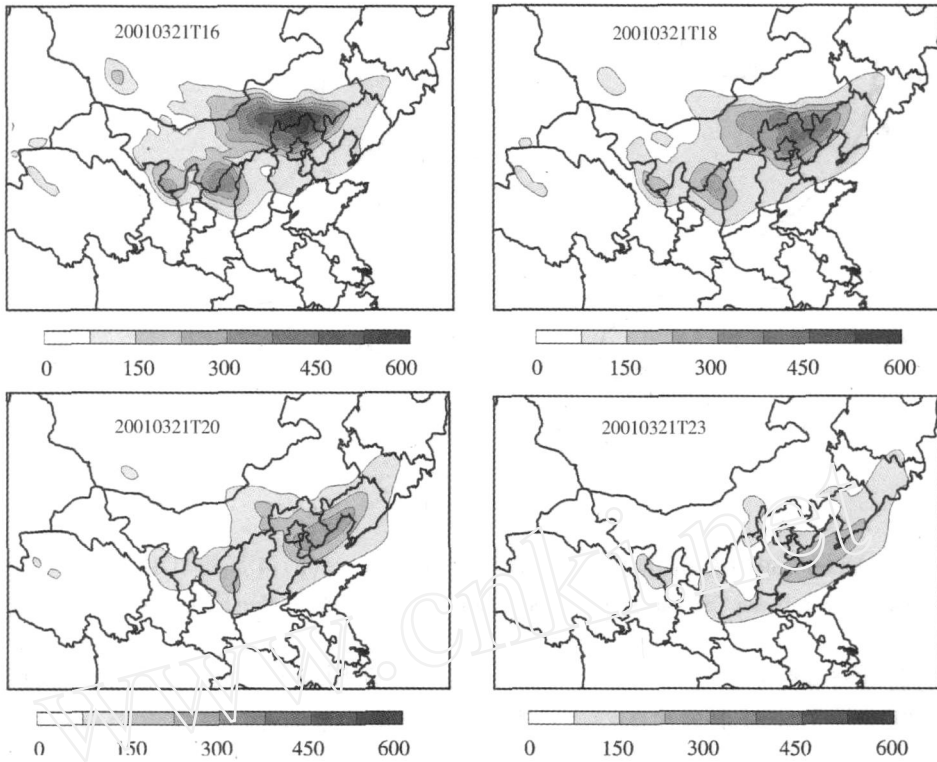


图 7 2001年 3月 21日模拟区域内沙尘垂直平均浓度的水平分布 (单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fig 7 Horizontal distribution of vertical average concentration of dust in simulated region on March 21, 2001

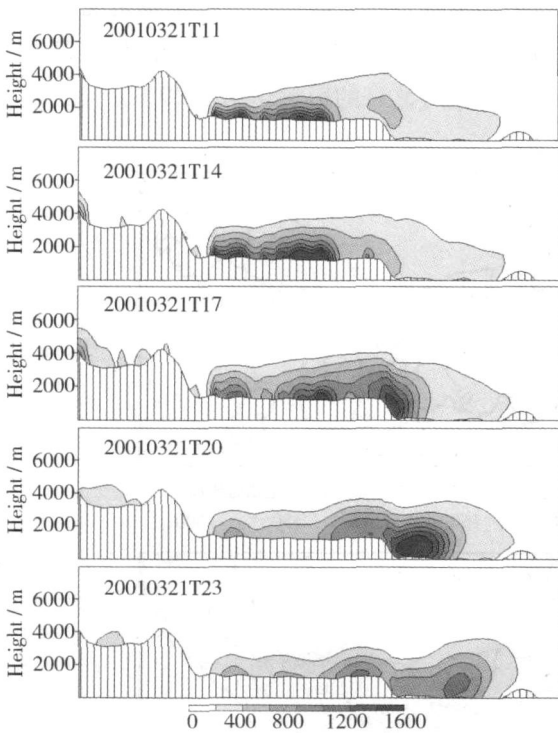


图 8 2001年 3月 21日模拟区域内沙尘浓度的垂直分布 (单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fig 8 Vertical distribution of dust concentration in simulated region on March 21, 2001

4 结论

利用中尺度非静力气象模式 MM5和三维欧拉型区域空气质量模式 CAMx对 2001年影响北京的 6次沙尘暴的产生、传输过程的特征,以及不同源区发生沙尘暴对北京地区大气颗粒物的贡献率进行时间、空间的模拟,模拟结果如下:

(1) TSP的模拟值和激光雷达的监测值进行相关性检验,置信度水平 $>99\%$,说明模拟值与监测值之间存在线性相关关系。但是模拟值比监测值偏低 23%。

(2)对沙尘暴源区、传输路径、浓度分布特征分析结果与实际吻合。

(3)蒙古国发生的沙尘暴对北京的贡献率在 30% ~ 50%左右。我国的内蒙古地区是影响北京地区的重要境内源区,贡献率为 30% ~ 60%以上,另外北京周边的河北省的贡献率在个别情况下亦达到了 29%。

表 3 不同源区对北京地区沙尘浓度的贡献率 (单位: %)

Tab 3 The distribution rates to dust concentration in Beijing from different sand - dust sources

源 区	北京市	河北省	内蒙古中东部	内蒙古		其它地区	合计
				西 部	蒙 古		
3月 2日	0.0	9.5	13.9	27.2	43.4	6.0	100.0
3月 19~20日	0.0	1.3	34.7	32.2	31.0	0.9	100.0
3月 21日	0.4	29.0	44.4	6.8	18.2	1.3	100.0
3月 24日	0.0	3.9	3.2	50.7	34.4	7.7	100.0
4月 30日	0.0	0.4	0.2	36.9	51.3	11.2	100.0
平均	0.1	8.8	19.3	30.8	35.7	5.4	100.0

参考文献:

- [1] Rasch P J, Mahowald N M, Eaton B E, et al Representations of transport, convection, and the hydrologic cycle in chemical transport models: Implication for the modeling of short - lived and soluble species[J]. J Geophys Res, 1997, 102 (D23): 28127 - 28138.
- [2] Zender C S, Bian H, Newman D. The Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) Model: Description and 1990 's dust climatology[J]. J Geophys Res, 2003, 108 (D14): 4416 - 4425.
- [3] 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[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(3): 279 - 294.
- [4] Anthes R A, Kuo Y H, Benjamin S G, et al The evolution of the mesoscale environment of severe local storms: Preliminary modeling results[J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(9): 1187 - 1213.
- [5] Zhang D L, Fritsch J M. Numerical simulation of meso - b scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood, Part I Model description and verification[J]. J Atmos Sci, 1986, 43(18): 1913 - 1943.
- [6] ENVIRON. User 's guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx). ENVIRON International Corporation, 2002, Novato, CA.
- [7] 周秀骥. 2000年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 2000, 32(4): 327 - 334.
- [8] 刘光明. 中国自然地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1998.
- [9] 穆尔札也夫. 蒙古人民共和国(自然地理)[M]. 北京: 三联书店, 1958.
- [10] 纪飞,秦瑜. 东亚沙尘暴的数值模拟(D模式建立)[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 32(3): 384 - 392.
- [11] Wang Z F, Ueda H, Huang M Y. A deflation module for use in modeling long - range transport of yellow sand over east Asia[J]. JGR, 2000, 105 (D22): 26947 - 26959.
- [12] Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind[J]. JGR, 1993, 98 (D7): 12719 - 12726.
- [13] Gillette D A, Fryrear D W, Gill T E, et al Relation of vertical flux of particles smaller than 10 μm to total aeolian horizontal mass flux at Owens Lake[J]. JGR, 1997, 102 (D22): 26009 - 26015.
- [14] Uno I, Amano H, Emori S, et al, Trans - Pacific yellow sand transport observed in april 1998: A numerical simulation [J]. JGR, 2001, 106 (D16): 18331 - 18344.
- [15] Liu M, Westphal D L. A study of the sensitivity of simulated mineral dust production to model resolution [J]. JGR, 2001, 106 (D16): 18099 - 18112.
- [16] 黄美元,王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 625 - 637.
- [17] 刘毅,张华,周明煜. 一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(4): 511 - 517.
- [18] In H J, Park S U. A simulation of long - range transport of yellow sand observed in April 1998 in Korea[J]. JGR, 2002, 36 (D4): 4173 - 4187.
- [19] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas[J]. JGR, 2001, 106 (D16): 18075 - 18084.
- [20] Westphal D L, Toon O B, Carlson T N, et al A two - dimensional investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms[J]. JGR, 1987, 92 (D3): 3027 - 3049.

Numerical Simulation of Sand - dust Transmission in North China

WANG Yanpeng, CHEN Yan, YN Huimin, LI Yuwu

(National Research Center for Environmental Analysis and Measurements, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the fifth generation PSU/NCAR 's non - hydrostatic mesoscale model (MM5) and comprehensive air quality model with extensions (CAMx, a 3 - D Eulerian regional air quality model) a air quality simulation system has been completed, which is applied to simulate sandstorm transmission affecting Beijing in North China in spring 2001. The results show the system is capable for simulating and predicting sandstorm transmission and concentration distribution in North China. Significant correlation was found between simulation value of TSP and Lidar observation, which confidence level was above 99%. The contribution rate of Mongolia, Inner Mongolia and Hebei to dust concentration in Beijing are 30% - 50%, 30% - 60% and under 29%, respectively.

Key words: sandstorm; transport model; numerical simulation