

第一部分 获优秀报告奖的论文和总结

集成的沙尘天气数值预报系统及 2002 年春季沙尘天气的数值预报试验

宋振鑫

(中央气象台数值预报室, 北京 100081)

邵亚平

(香港城市大学)

提 要

本文介绍了集成的沙尘天气数值模拟系统的研究过程:(1)风蚀现象(wind erosion)的物理机制,风蚀的数值模拟涉及气象、流体力学、土壤物理学、表层土壤水文学以及生态学等诸多学科。(2)沙尘暴数值模拟的关键是准确描述风蚀现象的三个物理过程,也就是由于风切变引起的地面粒子的卷积过程;大气平流和湍流引起的沙尘粒子的输送过程;通过干、湿清除引起的粒子的沉降过程。(3)集成的沙尘暴数值模拟预报系统的特点和结构介绍,该系统主要包括大气数值模式、陆面过程模拟、起沙和沙尘传输、沉降模拟三部分。(4)数值模拟结果介绍,利用 T213 全球中期预报模式为集成的沙尘暴数值模拟预报系统提供背景场,在 2002 年春季进行了一些数值试验,结果表明该系统对沙尘暴有较好的预报能力,同时也指出了需要改进和完善的地方。

关键词:沙尘天气 数值模拟 浓度 干、湿沉降

1 引言

发生在中国北方及蒙古的沙尘天气称为东亚沙尘天气。最近一些年来东亚沙尘天气的频繁发生引起了社会各界的广泛关注。沙尘天气首先是一个自然现象,但人类活动所引起的气候变化和沙漠化无疑对沙尘天气的恶化有很大的影响。沙尘天气所产生的大量悬浮颗粒在下游地区造成了严重的空气污染。中国北方、蒙古南部、朝鲜半岛和日本深受其害。强沙尘暴对人民的生命安全及正常的社会、军事和经济活动都危害极大。

在对沙尘天气的研究中有许多棘手的问题,但最重要的是要深刻理解沙尘天气形成的物理机制,并在此基础上定量地描述和预报风沙分布、强度、输送与沉降。沙尘天气的形成是一个复杂的物理过程,涉及到大气运动与地表状况等诸多复杂因素^[1~4]。国内外对沙尘天气,特别是对起沙、输送与沉降等物理过程的深入分析和数值模拟都起步较晚^[5~6],用于沙尘天气的预报系统还处于发展初期。因此沙尘天气的模拟与预报在目前是一个有很大难度的课题。

国家气象中心引进和开发了集成的沙尘天气数值预报系统,目的是建立我国沙尘天气的数值模拟预报系统,提高这类灾害性天气的数值模拟和预报能力。我们使用并发展了以数值预报为核心、以卫星观测与地理信息系统为资料背景的沙尘天气集成预报系统,该系统成功地

2002年春季沙尘天气进行了实时预报。分析表明,该集成预报系统有能力短期预报沙尘天气的源地、大气中的沙尘浓度、沙尘的输送以及沉降。通过与地表观测和卫星云图的比较,可以肯定集成的预报系统对2002年的多次沙尘天气的预报都是成功的。

2 风蚀现象的物理机制

风蚀出现在世界上许多干旱、半干旱地区和农业区。它是一种环境现象,受到地质的和气候变化以及人类活动的影响。通常来说,风蚀导致农业区土地恶化且对空气质量有负面影响。由风蚀产生的沙尘爆发是大气中气溶胶最大的源,它直接或间接地影响大气辐射平衡,因此导致全球气候变化。强风蚀事件,例如剧烈的沙尘暴会威胁人类生活,导致物质经济损失。风蚀是指土壤粒子在风强迫下运动的一种过程。这个过程有三个不同的位相阶段,他们具有不同的物理机制,主要包括(1)由风切变引起的地面粒子的卷积;(2)由大气平流和湍流引起的粒子的传输;(3)通过干、湿清除引起的粒子的沉降。风蚀是许多物理过程相互作用的结果,受许多因子的制约。这些因子大致可以分为四类:大气条件(尤其是大气环流型、降水和湍流),土壤特征(包括土壤结构、土壤聚合度和土壤水分),陆面特性(包括气动粗糙度、植被分布、非腐蚀因素),实际应用中的地表分类。在一个风蚀事件中,来自不同类型的因子相互作用,在风蚀发展过程中,被风蚀的土壤表面特性也明显地改变了。

风蚀包含复杂的物理机制,迄今尚未完全理解风蚀的物理机制。它的研究需要多学科知识的综合,主要涉及大气科学(尤其是气候学、天气学、云物理学)、土壤物理学、表层动力学、胶体科学、生态学、也包括了农业科学和耕地管理。和风蚀相关的几乎所有的物理过程,从卷积、传输到沉降都依赖于粒子尺度。我们通常定义沙来描述 $60\sim 2000\ \mu\text{m}$ 之间的粒子,定义尘来描述小于 $60\ \mu\text{m}$ 的粒子。风蚀的发生是两类力作用的结果:气动力试图将粒子从地面吹起,然而,诸如重力、粒子间的粘性力阻止这种吹起过程。第一类力通过摩擦速度 U_* 来量化,由地表面的风切变来度量。第二类力由临界摩擦速度 U_{*c} 来度量, U_{*c} 定义了要出现风蚀事件所需要的最小摩擦速度。 U_* 与大气流动的条件及地表气动特性有关。 U_{*c} 与诸如土壤结构及植被覆盖等表层特性相关。对于干的、裸露的沙地土壤表层而言, U_{*c} 较小,风蚀事件容易发生。这两类力之间的平衡受到一系列复杂的环境因子的制约,通常来说,这些因子可分为五类,依次是(1)天气,包括风速、温度和降水;(2)土壤类型(指随时间缓慢变化的条件),包括影响土壤水文和植被生长的土壤结构和特性;(3)土壤状态(指随时间快速变化的条件);(4)表层微小条件,例如气动粗糙度和植被覆盖;(5)表层大尺度条件,例如陆地形状。因此,风蚀在空间尺度上是变化强烈,在时间尺度上断断续续。风蚀事件的这种零星特性,即使从定性的角度来说,对它做出模拟和预报也是一项艰巨的任务。

空气中粒子的运动有两个不同的模式,分别叫跳跃、悬浮,这依赖于粒子的尺度和大气流动的条件。跳跃是指沙子尺度的粒子沿着风方向的运动,然而悬浮指尘尺度的粒子在气流中的飘浮运动。通过跳跃大量的土壤粒子能够沿风方向被输送。和沙粒子相反,尘粒子一旦在空中,将能够在大气中悬浮一段时间,然后被湍流驱散到大气表层以外,进而被远距离输送。悬浮在大气中的沙尘最终通过干、湿沉降到达地表面。干沉降是指通过湍流和分子扩散及重力沉降作用,空气中的沙尘粒子从大气到达地面的传输过程。而湿沉降是指通过降雨作用导致的沙尘粒子的传输。这两个过程具有同等重要性。首先,干沉降是一个流体动力学问题,它通过接近沉降面的一薄层来处理粒子的扩散,同时也包括许多很难量化的物理过程,诸如静电变化,干沉

降研究的困难在于缺乏对接近沉降表面非常薄的一层的流场结构的详细认识。湿沉降包括雨滴捕获悬浮在空气中的沙尘粒子的过程,湿沉降的研究需要详细理解雨滴尺度的分布、粒子浓度和捕获机理。

3 沙尘天气的数值模拟

3.1 模式的主要结构

由于沙尘天气产生的物理机制复杂,影响其发生、发展的环境因素众多。我们对沙尘天气的预报主要基于沙尘天气集成预报系统。该系统包括区域大气模式、陆面过程模式、风沙模式(包括风蚀、输送和沉降模式)和地理信息系统。大气模式为风沙模式提供风速、降水等物理场;陆面模式预报土壤水分、摩擦速度等物理量的变化,同时为风蚀模式提供其他参数;风沙模式主要预报沙尘的源地、浓度与沉降传输;地理信息系统提供了土壤类型、植被覆盖、植被类型、叶面指数等参数,为大气、陆面与风沙模式提供必须的输入参数。该系统是一个比较完善的、具有国际先进水平的沙尘天气数值预报系统。结构如图 1 所示。

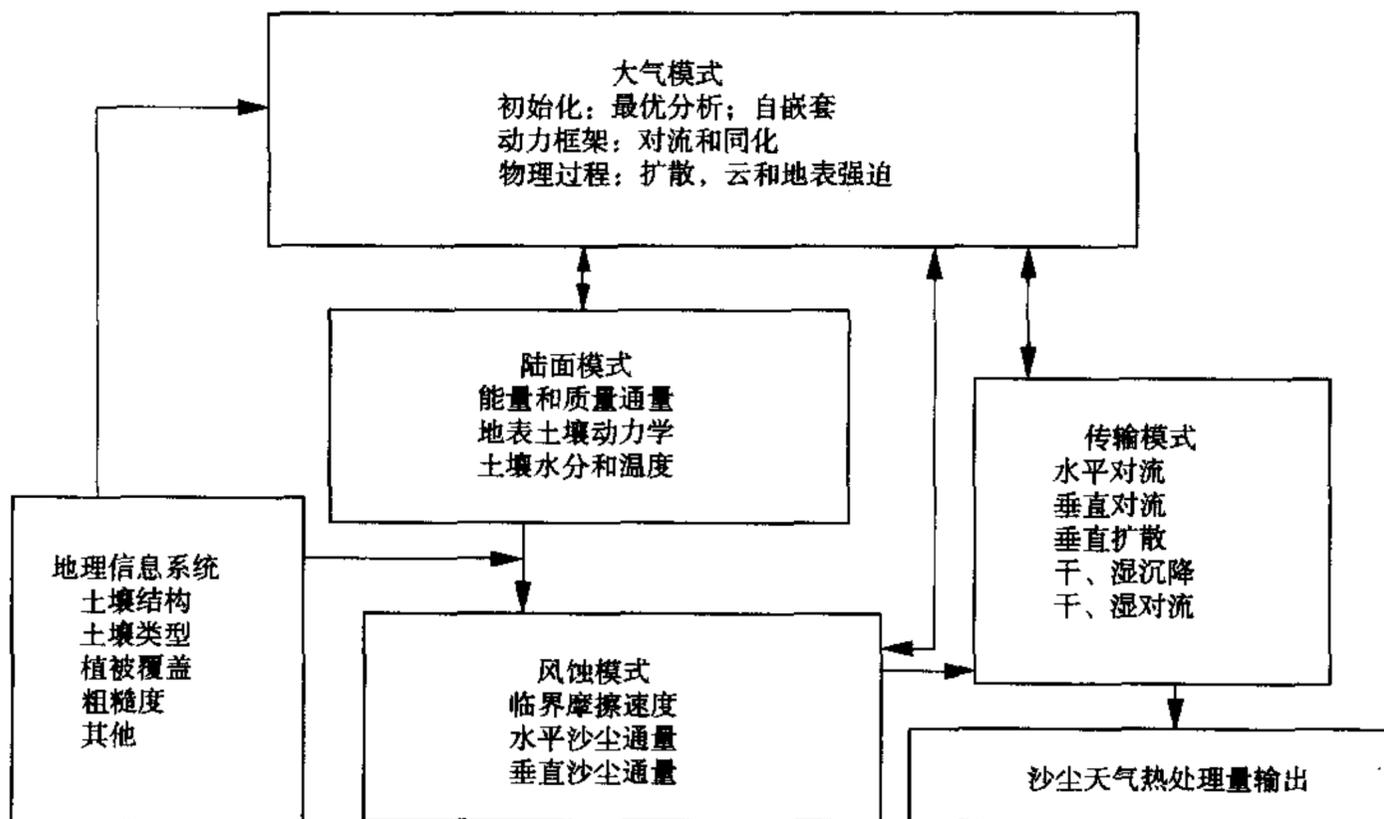


图 1 集成沙尘天气数值预报系统结构图

3.2 模式的输入和嵌套

集成沙尘天气数值预报系统和国家气象中心 T213 全球业务模式嵌套运行, T213 模式的分析和预报结果为沙尘天气数值预报系统提供初始场和侧边界资料。在 2002 年的试验中,我们发展了模式的前处理接口程序,其主要功能为读取 T213 模式的预报场库资料,并进行处理和格式转换。前处理程序首先将 T213 模式的输出水平插值到区域大气模式的预报范围内,再将其等压面的信息插值到区域大气模式的 σ 面上。

3.3 地理信息系统

模式的运行涉及到许多地面参数。它们包括:植被类型、植被叶面积指数(LAI)、植被高度、植被侧面积指数、植被反照率、植被覆盖率、植被最小气孔阻力、植物根系分布、地表粗糙

度、粗糙物侧面积指数、土壤质地类型以及陆地与海洋的分布。导出这些参数的最基本资料是土壤类型、植被类型与叶面积指数。

3.4 模式的输出

沙尘天气集成数值预报系统模拟风沙天气的全过程并预报关于大气、地表与风沙的物理量。这些物理量可以用于完整地描述风沙天气形成的天气系统、风沙源地的分布与强弱,大气中的沙尘含量、输送与沉降。由于输出的物理量众多,在此我们仅介绍一些描述沙尘天气的主要物理量。

3.4.1 沙尘源地

描述沙尘天气源地的物理量记为 F ,它是沙尘在地表面的垂直通量,其量纲为 $[ML^{-2}S^{-1}]$,即单位时间、单位面积的质量通量。例如,它可以用来表征每日、每平方公里面积上的起沙量为多少吨,有多少吨沙尘含量。 F 随时间与空间的变化,就是沙尘源地随时间与空间的变化。

3.4.2 大气中的沙尘含量

描述大气中沙尘含量的物理量是 C ,即单位体积中沙尘的质量。其量纲为 $[ML^{-3}]$,如 kg/m^3 。 C 越大,大气中的沙尘浓度就越高。浓度的变化是由质量守恒方程决定的,受平流与扩散等输送过程和风蚀与沉降过程的影响。因为这些物理过程都与沙尘粒子的大小有关,所以一般把沙尘的颗粒大小分成许多种,如 $d < 2 \mu m$ 、 $2 \leq d < 11 \mu m$ 、 $11 \leq d < 22 \mu m$,...等, d 是沙尘颗粒的直径,再对不同大小粒子在大气中的含量进行计算。图 2 给出了 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_t (总量)在近地层的含量。作为例子,我们选用了 2002 年 3 月 15 日强沙尘天气过程。

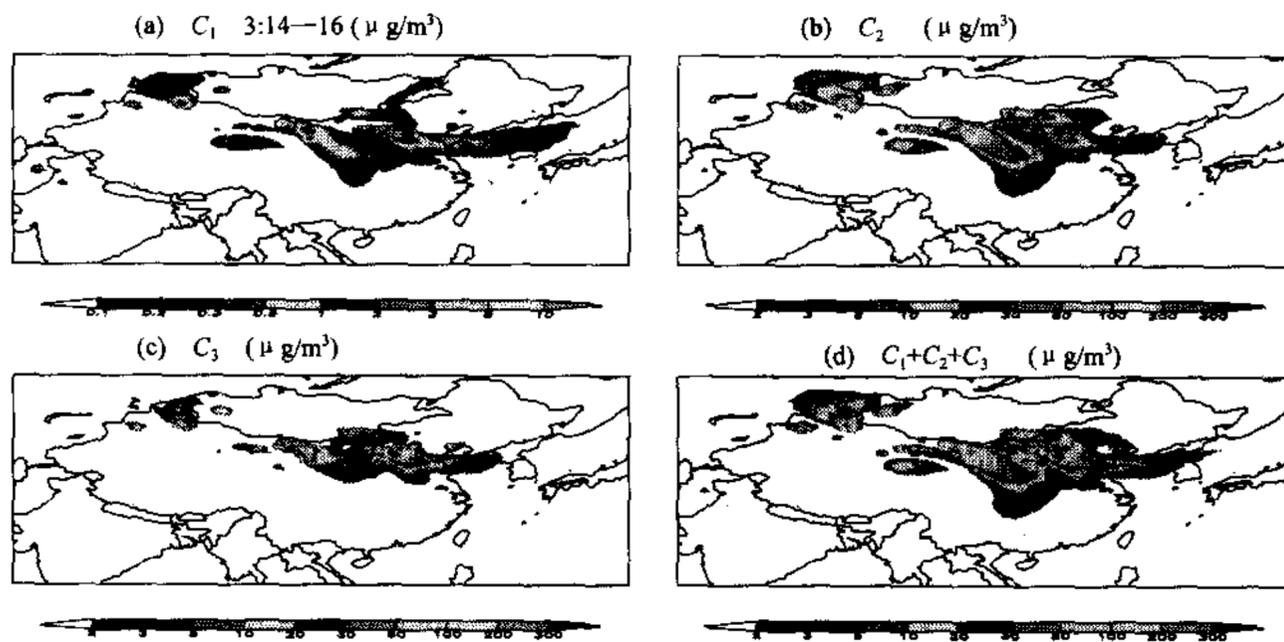


图 2 2002 年 3 月 15 日强沙尘天气的沙尘浓度的分布图

其中 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为直径 $d < 2 \mu m$ 、 $2 \leq d < 11 \mu m$ 、 $11 \leq d < 22 \mu m$ 的沙尘浓度

3.4.3 沙尘的沉降

描述沙尘沉降的物理量记为 D ,它是由于沉降作用所引起的沙尘在地表的垂直通量。与 F 一样,它的量纲为 $[ML^{-2}S^{-1}]$,即单位时间、单位面积的质量通量,如 $t/km^2/d$ 。

3.4.4 沙尘的移动与路径

集成预报系统可以方便、准确的分析各种天气形势下,沙尘的移动和路径。

3.4.5 沙尘的空间分布

集成预报系统也可以用于分析沙尘在空间的分布结构,可以模拟和预报不同高度上的沙

尘分布特征。

3.4.6 沙尘在大气柱中的含量

沙尘在单位面积大气柱中的含量可表述为 $M_t = \int C_t dz$ ，其量纲为 $[ML^{-2}]$ ，如 kg/km^2 。

4 沙尘天气数值模拟的结果

4.1 数值预报结果的改进

我们的数值试验有效地提高了集成预报系统的对东亚沙尘天气预报的可信度。通过对2002年春季东亚沙尘天气的逐日实时72小时预报，我们发现并逐步解决了预报系统本身和地理信息系统所存在的细节问题，从而使模式的预报效果得到了显著提高。修正前的预报存在一些偏差。如在中国的西南部出现了虚拟的沙尘区。主要的沙尘区也偏大、偏南。在数值试验的初期，业务预报人员和我们自己都注意到了这些问题。

4.2 数值预报与地面观测的比较

集成沙尘天气预报系统对2002年春季3~4月的所有沙尘天气过程都进行了实时的模拟预报。修正后的预报系统极为准确地预报了所有的重大沙尘天气过程。以下，我们以2002年3月20日的强沙尘天气过程为例，对数值预报的结果进行简要的讨论并与地面和卫星观测进行比较。2002年3月19~20日北京出现了历史上罕见的强沙尘暴，对人民生活、交通等诸多方面造成了严重影响，引起了社会的广泛关注。

图3(a)是3月20日08时和20时的实况观测，图3(b)为模式预报相应时段的地表沙尘含量，单位为 $\mu g/m^3$ 。可以看出，在20日08时蒙古国南部、内蒙古地区、新疆、甘肃、北京出现了沙尘天气。比较图3的地面观测和模式预报的地面浓度，可以清楚地看到，数值模式对这次沙尘天气出现的范围和强度预报很成功，预报的沙尘浓度分布范围与观测结果比较一致。

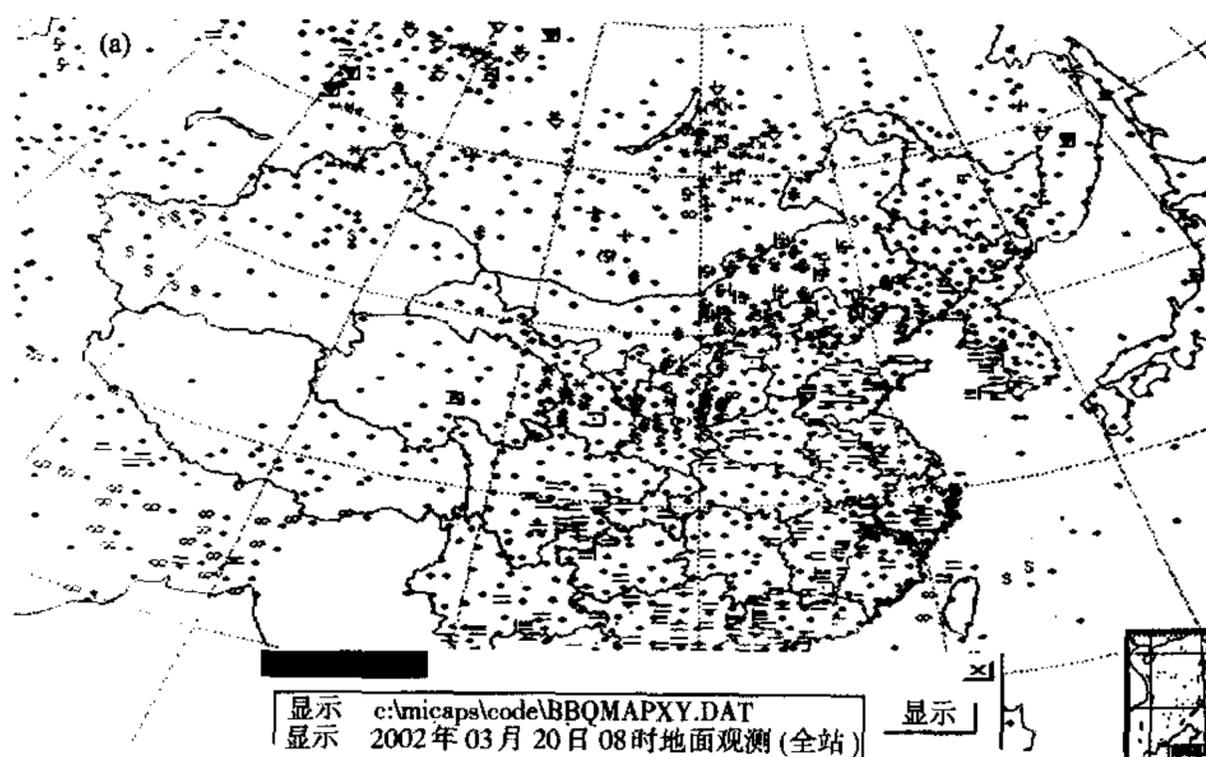


图3 2002年3月20日08北京时沙尘天气地面实况观测(a)和模式预报3月20日08时的地面沙尘浓度(b)

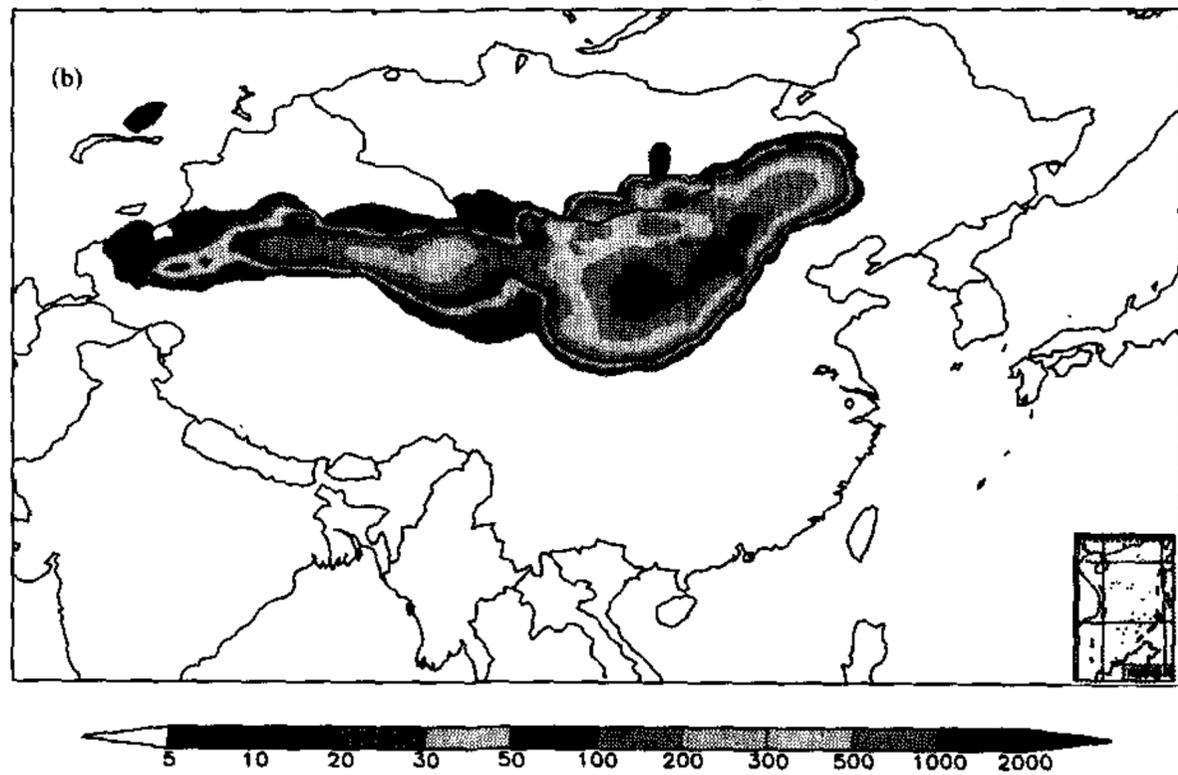


图3 (续)

5 小结

(1) 2002 年的研究表明,集成预报系统对沙尘天气的定性预报,即风沙产生的源地、时间、空间结构以及输送路径的可信度很大,可以用于业务预报。

(2) 在对沙尘天气形成的物理机制的研究中,集成预报系统有难以取代的作用。

(3) 集成预报系统的定量预报也有一定的可信度,但目前没有充分的观测数据用于预报效果的评估。

(4) 由于产生沙尘天气的物理机制复杂以及集成预报系统是一种新的尝试,有待解决的问题还很多,主要的方面可以概括如下:建立与完善地理信息系统、数值沙尘预报与卫星监测的定量检验、陆面过程的数值同化、沙尘集成预报系统的业务化。

参考文献

- [1] Bagnold, G. A. (1937). The transport of sand by wind. *Geogr. J.*, 89:409-438
- [2] Bagnold, G. A. (1938). The measurement of sand storms. In *Proc. R. Soc.*, 167, p. 282-291, London, Ser. A
- [3] Bagnold, R. A. (1911). The physics of Blown Sand and Desert DUNes. Methuen, London
- [4] Chepil, W. S. and Woodruff, N. P. (1963). The physics of wind erosion and its control. *Adv. Agon.*, 211-302
- [5] Shao, Y. and Leslie, L. M. (1997). Wind erosion prediction over Australian continent. *J. Geophys. Res.*, 102:300091-30105
- [6] Shao, Y. and Li, A. (1999). Numerical modeling of saltation in atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 91:199-225