

沙尘天气的数值预报*

邵亚平

(香港城市大学物理及材料科学系, 香港)

摘要 沙尘天气预报的核心问题是要理解沙尘天气形成的物理机制, 并定量地描述风沙的分布、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因素。作者介绍了一个以数值预报为核心、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, 特别是其中的起沙模式。作者运用该系统预报了2002年春季的沙尘天气, 并用天气观测和采样观测资料对预报效果进行了鉴定。分析表明, 预报系统不仅能定性预报沙尘天气的空间分布与时间演变, 而且能定量预报沙尘源地、大气中的沙尘浓度、沙尘的输送以及沉降。模式72 h的预报仍然有较高的可信度。另外讨论了存在的问题和今后的研究方向。

关键词: 沙尘天气; 数值预报; 起沙模式

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0127-12 **中图分类号** P456.7 **文献标识码** A

1 引言

沙尘天气的研究中有许多棘手的问题, 但最重要的是要理解沙尘天气形成的物理机制, 并定量预报风沙的分布、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因素。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, 用于沙尘天气的预报系统还处于发展初期。因此, 沙尘天气的预报在目前是一个有难度的课题。

沙尘天气预报中的一个突出问题是对沙源, 特别是对地表沙尘通量的定量预报。那么, 起沙模式的物理基础是什么? 近年来, 陆续有起沙模式的文章发表, 有些模式形式简单, 但物理含义不清楚, 缺乏一般性; 而有些模式则过于复杂, 不便于实际运用。

为了解决沙尘天气的预报问题, 我们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, 并对2002年春季的沙尘天气进行了预报。分析表明, 该预报系统有能力预报沙尘的源地, 大气中的沙尘浓度, 沙尘的输送以及沉降。与地表观测和卫星云图的比较表明, 预报系统对2002年的多次沙尘天气的预报是成功的。

本文将扼要地介绍沙尘天气集成预报系统, 特别是起沙模式的物理基础, 并讨论预报结果与地面观测的比较。最后, 文章将探讨存在的问题和今后的研究方向。

2004-01-08 收到, 2004-02-10 收到修改稿

* 国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目(Y0101)资助

2 沙尘天气集成预报系统

2.1 主要结构

沙尘天气集成预报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，也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、沉降与传输；地理信息系统提供土壤类型、植被覆盖、植被类型、叶面积指数等参数，为大气、陆面与风沙模式提供必须的输入参数。预报系统的结构如图 1 所示。

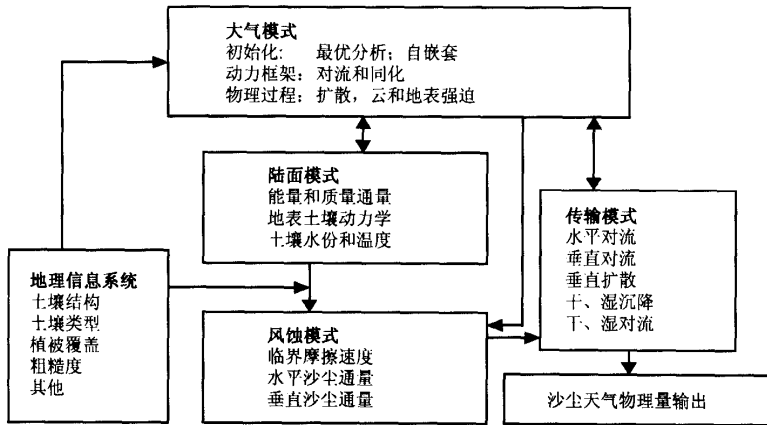


图 1 沙尘天气集成预报系统结构

2.2 起沙模式

沙尘颗粒大小不一，它们在空气中的运动与粒径有关。Bagnold^[1]指出，沙尘在空气中的运动形式可分为悬浮、跳跃与滚动。这些运动形式取决于颗粒在空气中所受的力，包括空气拖曳力和重力。小颗粒在空气中所受的重力较小，易于悬浮，因而可被大气环流远距离地输送。粒径小于 $60\ \mu\text{m}$ 的颗粒常称为尘，粒径大于 $60\ \mu\text{m}$ 的颗粒常称为沙。大颗粒在空气中所受的重力较大，它们的运动多为跳跃或滚动。起沙模式所需解决的问题是预报沙尘的垂直通量 F 。 F 的量纲是 $\text{M L}^{-2} \text{T}^{-1}$ 。

沙尘粒子在地表所受的力包括空气拖曳力 f_a 、重力 f_g 、及颗粒间的相互作用力 f_i 。这些力都与粒径大小有关。如 Shao^[2]所述，它们与粒径的关系可以简单地描述为

$$f_g \sim d^3, f_a \sim d^2, f_i \sim d,$$

由图 2 可见，当 d 大时， $f_g \gg f_a$ ，空气拖曳力无法将粒子从地表卷起。当 d 较小时， $f_i \gg f_a$ ，空气应力亦难将粒子从地表卷起。图 2 的另一种表达是临界摩擦速度 u_{*c} ，当 d 较大或 d 较小时， u_{*c} 都大于一般气象条件下的摩擦速度 u_* 。

那么，沙尘天气中常见的大量尘埃是怎样产生的呢？Gillette^[3]意识到，产生尘埃

的主要机制可能是沙粒的跃动。Shao 等^[4]的风洞实验正说明了这一点。Shao 等^[4]提出了

$$F \propto \alpha Q \tag{1}$$

的表达式。式中， Q 是水平沙通量， α 为一系数。Shao 等^[4]同时提出了粘合能量 ψ (Binding Energy) 的概念，并指出 α 与 ψ 成反比。Marticorena 和 Bergametti^[5]、Shao 等^[6]以及 Alfaro 等^[7,8]随后提出了 α 的经验表达式。

式 (1) 的含义很清楚：尘埃的产生是因为沙粒的轰击 (Saltation Bombardment)。沙粒的临界摩擦速度小，容易被空气卷入大气边界层，产生跳跃运动。沙粒打击地表时克服小颗粒之间的相互作用力，将它们带入大气边界层，并由湍流将它们扩散到大气中。

观测显示， Q 与 u_*^3 成正比。Owen^[9]指出，

$$Q = \frac{c\rho}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*c}^2}{u_*^2}\right), \tag{2}$$

其中， c 为系数， ρ 为空气密度， g 为重力加速度。

何谓一粒沙子？何谓一粒尘埃？粒径的大小与颗粒在自然界中的存在形式有关。在自然条件下，小颗粒一般依附在沙粒上，或与其他小颗粒组合成较大的集合粒子。在风蚀的条件下，这些集合粒子又可分裂为小颗粒 (见图 3)。因此，我们引进两种极端条件小的粒径分布，分别记为， $p_f(d)$ 和 $p_m(d)$ ，即

$$\begin{aligned} p(d) &\rightarrow p_m(d), u_* \rightarrow u_{*c}, \\ p(d) &\rightarrow p_f(d), u_* \rightarrow \infty. \end{aligned} \tag{3}$$

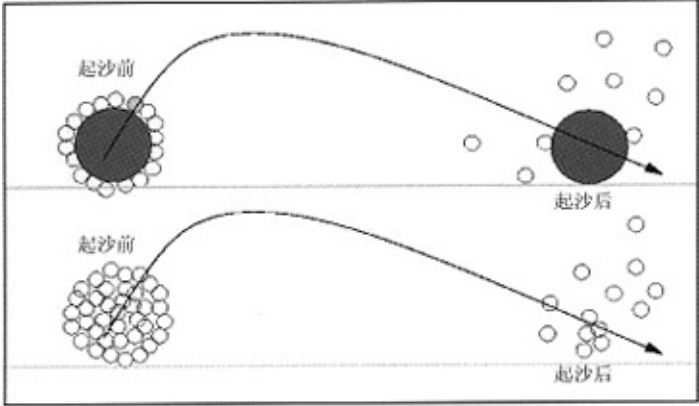


图 3 在自然条件下，小颗粒常依附在沙粒上或与其他颗粒组成较大的集合粒子。在风蚀的条件下，这些集合粒子可分裂为的粒子

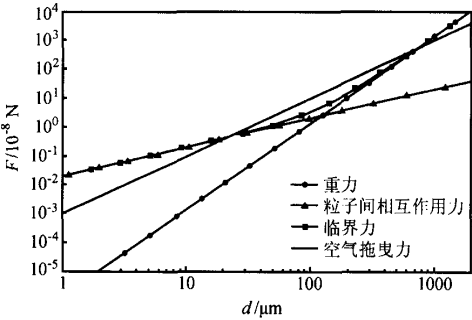


图 2 沙尘粒子在地表所受的力分为空气拖曳力、重力和粒子间的相互作用力与粒径的关系

在 Shao 等^[4,6]工作的基础上, Lu 和 Shao^[10]和 Shao^[11]发展了起沙谱模式,用于预报不同粒径的垂直通量。Shao^[11]认为,产生尘埃的机制有 3 种:(1) 空气拖曳力的夹卷;(2) 沙粒的轰击;(3) 集合粒子的分裂。由此,尘通量可表达为

$$F = F_a + F_b + F_c,$$

其中, F_a 、 F_b 和 F_c 分别为空气应力夹卷、沙粒轰击和集合粒子分裂所产生的尘通量。Shao^[11]给出了由粒径为 d_s 的沙粒运动产生的粒径为 d_i 尘通量的表达式:

$$F(d_i, d_s) = c_y \eta [(1 - \gamma) + \gamma \sigma_p] (1 + \sigma_m) \frac{Q_s g}{u_*^2}, \quad (4)$$

其中, c_y 为系数, η 是粒径为 d_i 的比质, Q_s 是粒径为 d_s 沙粒的水平通量, σ_p 和 σ_m 定义为

$$\sigma_p = \frac{p_m(d_i)}{p_f(d_i)}, \quad \sigma_m = \frac{m_a}{m}, \quad (5)$$

其中, m 是粒径为 d_s 沙粒的质量, m_a 是由于该沙粒的轰击而被卷入空气中的尘土质量; γ 为一权重使得

$$p(d) = \gamma p_m(d) + (1 - \gamma) p_f(d), \quad (6)$$

变量 σ_m 可理解为有效轰击率。根据文献 [10], σ_m 可以表达为

$$\sigma_m = 12 \zeta^2 (1 + 14 \zeta), \quad \zeta = u_* (\rho_b / p)^{1/2} \quad (7)$$

其中, ρ_b 为沙土的比重,常取为 $1\,000\text{ kg m}^{-3}$, p 为土壤的阻尼压力。我们可以比较上述起沙模式与 Gillette^[12]的观测资料。由图 3 可见,起沙模式较好地描述了观测的水平沙通量和垂直尘通量。在与 Gillette^[12]沙地资料比较时,我们选择了 $c_y = 3e^{-5}$ 和 $p = 1500\text{ Pa}$;而在与 Gillette^[12]壤地资料比较时,我们选择了 $c_y = 3e^{-5}$ 和 $p = 400\text{ Pa}$ (图 4)。

2.3 模式输入、嵌套和地理信息

沙尘天气集成预报系统和中国国家气象中心的 T213 全球模式嵌套运行。T213 模式的分析和预报结果为该预报系统提供初始场和侧边界资料。我们发展了一个前处理接口程序,用于读取 T213 的预报场库资料,并进行处理和格式转换。前处理程序将 T213 模式的输出水平插值到区域大气模式的预报范围内,并将其等压面的信息插值到区域大气模式的 σ 面上。

预报系统的运行涉及一些地面参数,包括植被类型、植被叶面积指数、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和海洋的分布。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。

在对地面参数的反演与准备过程中,我们使用了地理信息与遥感资料。土地利用、植被类型、土壤类型、土壤质地以及地形分布等资料由地理信息系统提供。地理信息系统的高效存储、空间可视化、综合分析、投影转换,能将大范围的地面资料转化为所需要的参数。地表植被资料,如叶面积指数,是通过气象卫星的遥感资料 (NOAA AVHRR) 或对地观测卫星的遥感资料 (MODIS) 归一化差异植被指数 (NDVI) 获得的。NDVI 与叶面积指数相对于某种植被存在着对应关系,我们用它来反演叶面积指数。

2.4 模式输出

沙尘天气集成预报系统模拟风沙天气的全过程并预报大气、地表与风沙的物理量,

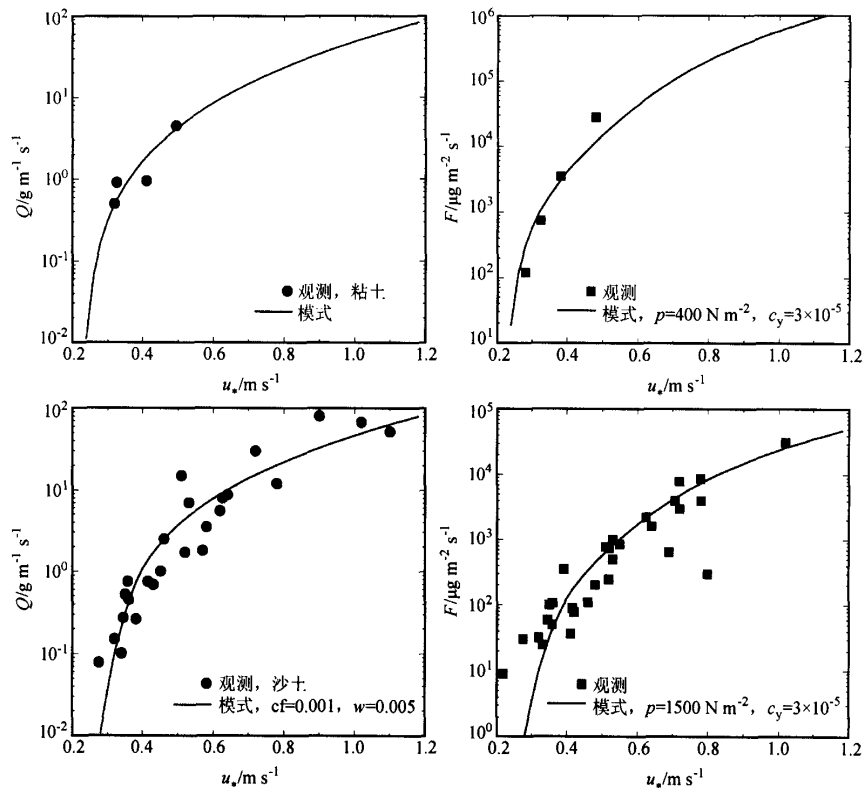


图 4 起沙模式预报的水平沙尘通量和垂直沙尘通量与 Gillette^[12] 的观测资料比较

以描述形成风沙天气的天气系统，风沙源地的分布与强弱，大气中的沙尘含量、输送与沉降。模式输出的物理量众多，在此，我们仅介绍一些描述沙尘天气的主要物理量。

沙尘源地：描述沙尘源地的主要物理量是沙尘在地表面的垂直通量 F ，其量纲为 $\text{M L}^{-2} \text{S}^{-1}$ ，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。 F 随时间与空间的变化即是沙尘源地随时间与空间的变化。

沙尘含量：描述大气中沙尘含量的物理量是单位体积中沙尘的质量 C ，其量纲为 M L^{-3} ，如 kg m^{-3} 。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。因为这些物理过程与沙尘粒径有关，所以一般把沙尘颗粒按粒径大小分成许多种，如 $d < 2 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m} \leq d < 11 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m} \leq d < 22 \mu\text{m}$ ，…等，再对不同大小粒子在大气中的含量进行计算。

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

沙尘移动路径：集成预报系统可以分析各种天气形势下，沙尘的移动和路径。

沙尘空间分布:集成预报系统也可以用于分析沙尘在空间的分布结构,如在不同高度上的沙尘浓度分布。

3 模拟结果

2002年3~4月,东亚沙尘天气活动频繁,多数与蒙古气旋有关。我们用沙尘天气集成预报系统预报了2002年的沙尘天气过程。模拟区域为($5^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$),空间分辨率为50 km,数据分析区域为($5^{\circ}\sim 53^{\circ}\text{N}$, $72^{\circ}\sim 148^{\circ}\text{E}$)。下面,我们以2002年3月和4月的两次重大沙尘天气过程为例,对数值预报的结果进行讨论并与地面观测进行比较。所用地面资料为常规气象观测数据和9个位于中国和日本的站点采样观测。模拟的区域约有1200个常规气象观测站,其观测资料能较好地反映沙尘天气的空间结构和时间演变,适合用于鉴定系统的定性预报功能。

图5a、b、c分别为2002年3月19日24 h、48 h和72 h预报的地表沙尘含量。观测的沙尘浓度由能见度转换而来^[13]。图5显示,预报与观测的沙尘天气的空间分布和强度一致。例如,模式成功地预报了中蒙边界中心位于(105°E , 42°N)的强沙尘暴,24 h、48 h和72 h的预报也基本一致。

图6为2002年3月15日至24日连续10天的预报结果。以3月19日为例,在蒙古国南部、内蒙古、新疆、甘肃、北京出现了沙尘天气。3月20日,沙尘天气系统向东移动,范围扩大。北京地面在3月20日受到了强沙尘暴的袭击,其浓度达到了 1 mg m^{-3} 以上。比较图中观测和预报的地面沙尘浓度,可以看出,模式成功地预报了这次沙尘天气的全过程,预报的沙尘浓度分布范围与观测结果一致。图7给出了预报的地面风场。3月20日在蒙古国与内蒙古有一片大风区域,并形成了强烈的气旋环流。地面风速达 20 m s^{-1} 。模拟大风中心与实况一致,大风区也与模拟的高沙尘浓度的位置、范围一致。3月21日,大风区域出现在内蒙古和朝鲜半岛,在这两个地区分别形成了气旋环流系统,该系统与模拟的高沙尘浓度位置一致。图8为2002年4月6~15日连续10天的预报结果及其与地面观测结果的比较。由图5、6、8可见,集成沙尘天气预报系统具有预报沙尘天气及描述沙尘天气系统演变过程的能力。

图9比较了预报的地面沙尘浓度和在9个站点的采样观测。采样的站点位于中国的敦煌、沙坡头、北京、合肥、青岛和日本的福冈、名古屋、筑波、那哈。这些站点都位于东亚沙尘原地的下游^[14,15]。可见,预报与采样观测的定量比较也很好。

4 结论及存在的问题与研究方向

本文简要地介绍了一个沙尘天气集成预报系统,特别是系统中的起沙模式。我们用该系统预报了2002年的沙尘天气,并用地面天气观测和采样观测对预报效果进行了检验。结果表明,预报系统能定性预报沙尘天气的空间分布与时间演变,也能较好地定量预报沙尘含量。虽然模式的预报功能随时间的递增而减退,72 h的预报仍有较高的可信度。

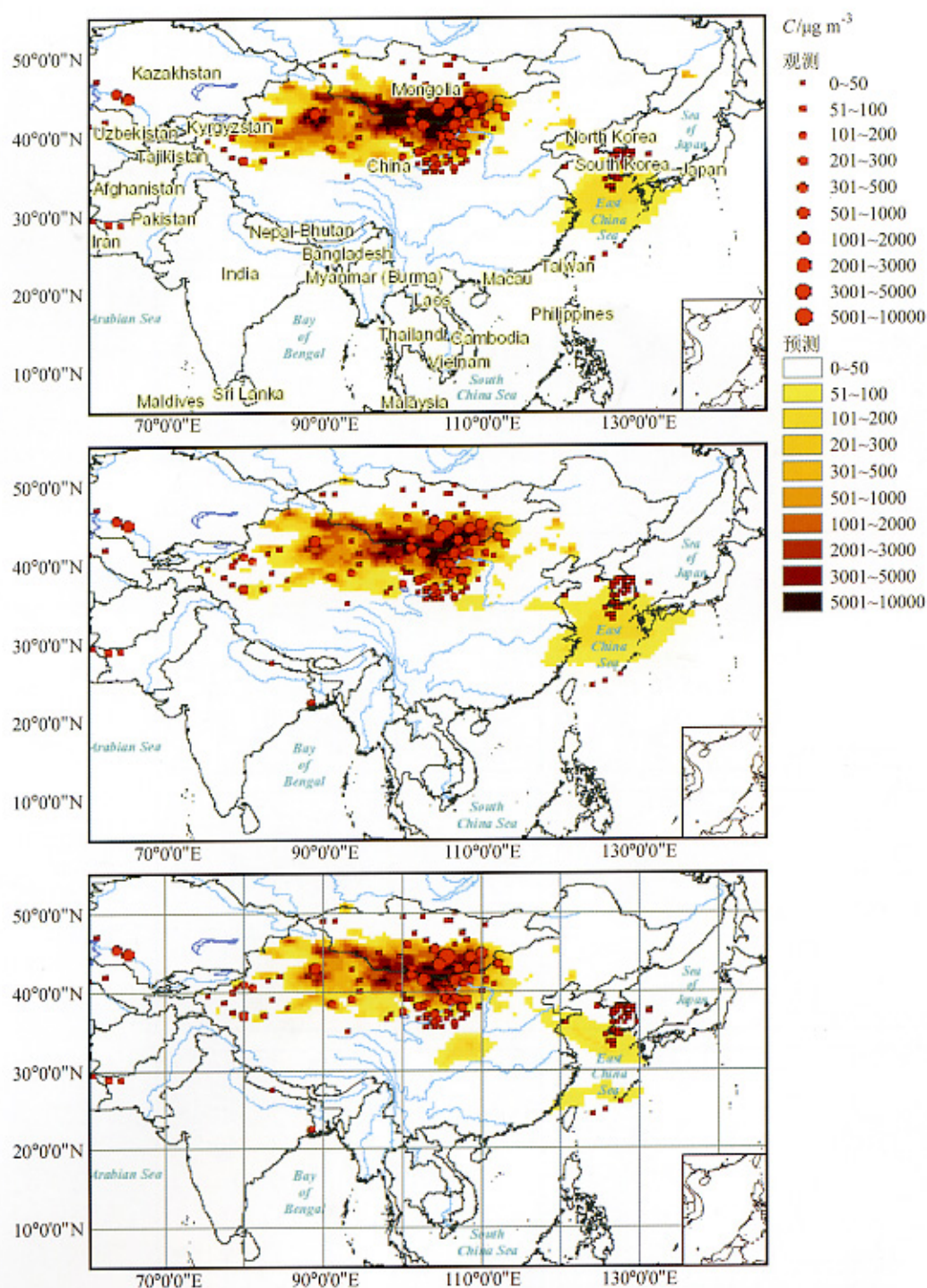


图5 2002年3月19日24 h、48 h和72 h预报的近地面沙尘含量与地面资料的比较(单位: $\mu\text{g m}^{-3}$)
颜色深浅表示预报的沙尘浓度强弱, 实圆点为地面观测结果, 圆点大小表示沙尘强弱

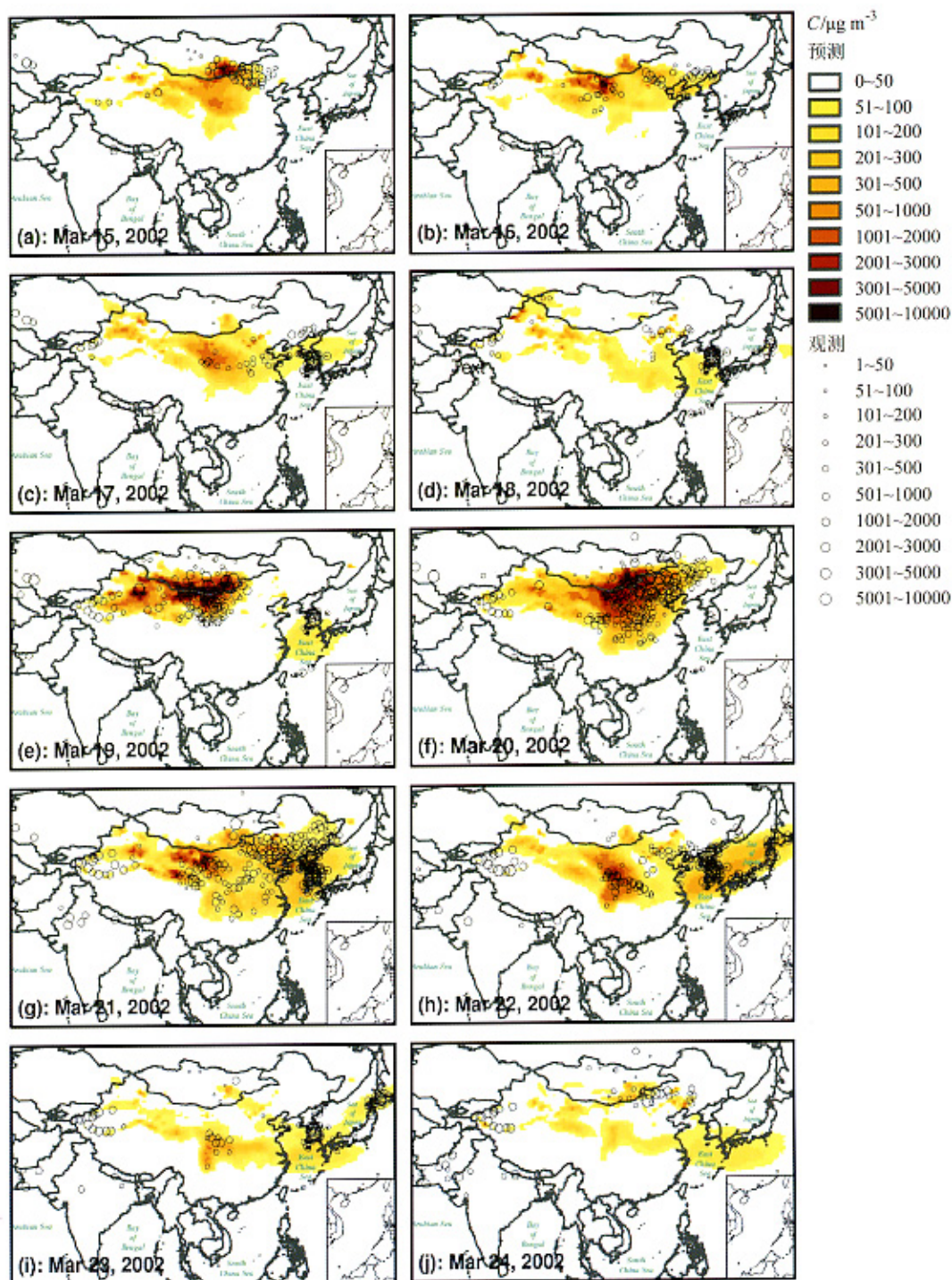


图6 2002年3月15~24日连续10天预报的近地面沙尘含量与地面观测的比较

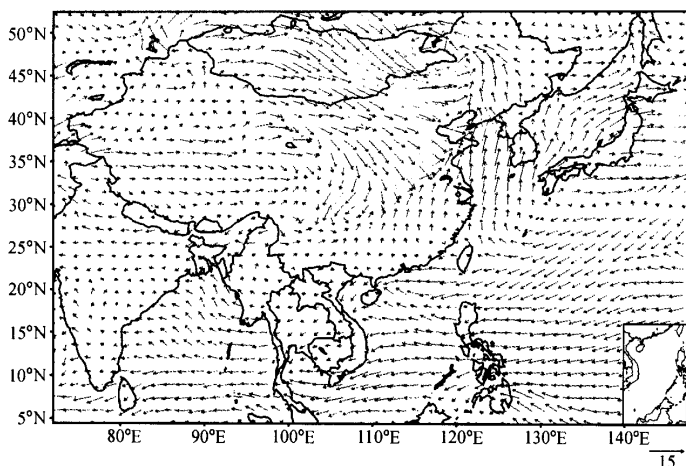


图7 3月20日08时(北京时间)沙尘天气地面风场的数值模拟结果(单位: m s^{-1})

由于产生沙尘天气的机制复杂以及集成预报系统是一种新的尝试, 尚待解决的问题很多, 主要的方面可以概括如下: 建立与完善地理信息系统; 数值沙尘预报的定量检验; 陆面过程的数值同化。

(1) GIS 资料: 目前我们使用的地表资料存在一些问题。地理信息资料的可信度对预报的准确性有较大的影响, 2002 年的研究证明了这一点。地理信息的物理量化, 即将描述性的信息和代码转化为模式所需要的物理量, 是有待解决的问题。例如给定土壤类型后, 土壤水文学参数应该怎样给定; 给定植被类型后, 叶面积指数应如何从遥感资料反演。诸如此类的例子很多, 发展一套完整的可用于地表和风沙模拟的地理信息系统是下一步工作要解决的问题之一。风沙模式中所需要的有些资料在国内外都不完整, 比如, 不同类型土壤粒径分布的资料在全球范围内几乎没有, 而该资料对预报大气中尘埃的粒径分布的影响很大。如能对沙源地区的土壤采样, 并对粒径分布完整的分析, 将有利于沙尘预报的准确性。

(2) 定量分析: 沙尘天气数值预报的定量问题有待进一步的改进。数值模拟的定量问题是要通过与卫星观测和地表观测的比较, 对模式的某些参数进行调整, 以提高预报的精度。需要指出的是, 数值模式与卫星监测的有机结合不仅仅是风沙研究的一个重要课题, 而且也将会在解决许多其他环境问题时发挥重要作用, 它将成为一种重要的研究手段。在风沙研究中, 数值模式与卫星监测的比较主要是通过各光学物理量, 光学厚度与能见度等的比较来实现。我们的预报系统有较好的模拟辐射的能力, 但是在 2002 年的研究中, 尚未将模式计算与卫星监测所获得的光学物理量进行比较。使用卫星资料对一些光学物理量的反演计算, 如大气光学厚度, 也还需要进一步的理论研究。

(3) 同化问题: 数值天气预报中使用的同化技术提高了数值天气预报的成功率。目前, 海洋模式中也开始使用同化技术。但在陆面模式中, 同化问题还没有得到解决。

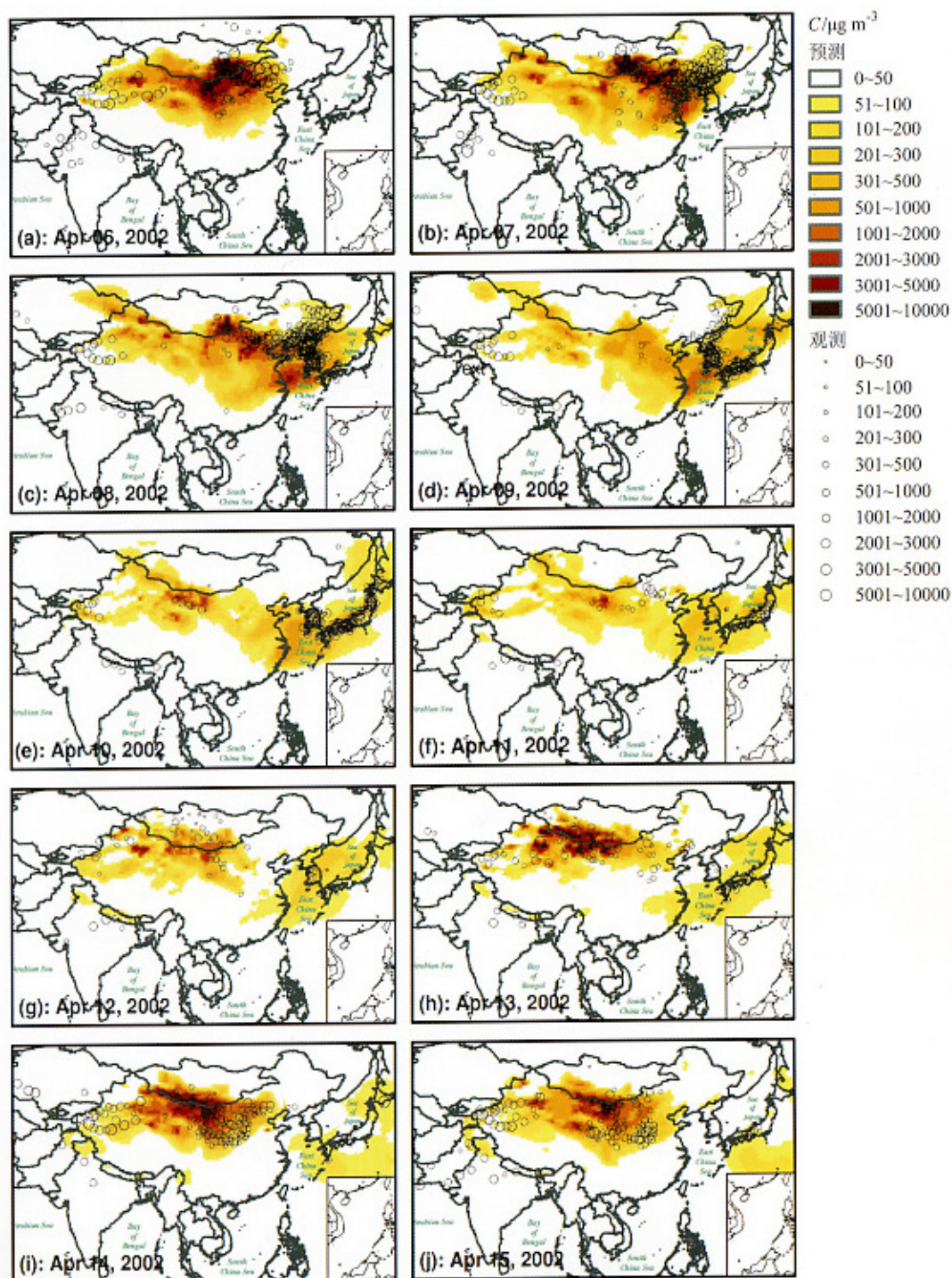


图8 2002年4月6~15日连续10天预报的近地面沙尘含量与地面观测的比较

集成预报系统中的风沙模式是陆面模式的一部分。与天气预报中使用的同化技术不同的是陆面模式的同化问题所需要的是遥感资料, 因为, 地面观测的陆面资料在空间中的差分比较困难。这也进一步说明了卫星监测与数值模拟相互配合的重要性。在下一步的研究中, 我们希望对陆面模式的同化问题(包括风沙模拟的同化问题)进行方法论方面的研究, 并以地面辐射温度、沙尘的空间分布与光学厚度为切入点, 对陆面过程的同化问题进行数值试验。

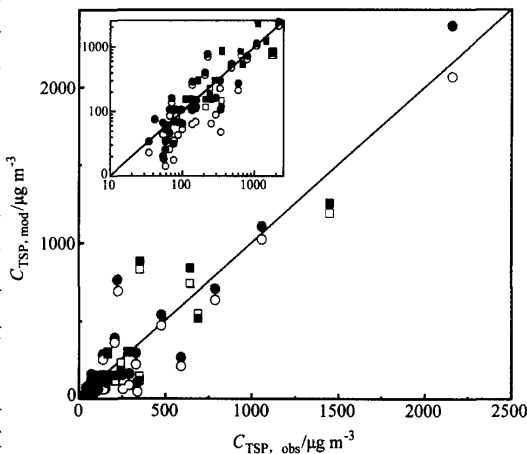


图9 预报的地面沙尘浓度和站点采样观测的比较

致 谢 本文的部分工作是与中国国家气象局、国家卫星气象中心、中国科学院大气物理研究所和地理研究所的同行合作完成的。作者感谢曾庆存院士、彭公炳、董超华、李黄、张国材、方宗义、赵思雄等教授的指导和鼓励。国家气象局的王建捷、宋振鑫参与了沙尘模式与 T213 的嵌套, 卢来孟、杨忠东、马岚、蔡素英、王炜、林朝晖、孙建华、赵琳娜参与了项目的讨论。图 9 中的观测资料由日本同行矢吹代子博士和金井丰博士提供。作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Bagnold, R. A., *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London, 1941.
- 2 Shao, Y., *Physics and Modelling of Wind Erosion*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- 3 Gillette, D. A., Production of dust that may be carried great distances, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 1981, **186**, 11~26.
- 4 Shao, Y., M. R. Raupach, P. A. Findlater, The effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind, *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**, 12719~12726.
- 5 Marticorena, B., G. Bergametti, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 16, 415~30.
- 6 Shao, Y., M. R. Raupach, 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.
- 7 Alfaro, S. C., A. Gaudichet, L. Gomes et al, Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sand-blasting, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 11239~11249.
- 8 Alfaro, S. C., A. Gaudichet, L. Gomes et al, Mineral aerosol production by wind erosion; aerosol particle sizes and binding energies, *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**, 991~994.
- 9 Owen, R. P., Saltation of uniform grains in air, *J. Fluid Mech.*, 1964, **20**, 225~242.
- 10 Lu, H., and Y. Shao, A new model for dust emission by saltation bombardment, *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 16827~16842.
- 11 Shao, Y., A model for mineral dust emission, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**, 20239~20254.
- 12 Gillette, D. A., Fine particulate emissions due to wind erosion, *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 1977, **20**, 890~987.

- 13 Shao, Y., Y. Yang, J. J. Wang et al, Real-time Numerical Prediction of Northeast Asian Dust Storms Using an Integrated Modeling System, *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**, 4691~4709.
- 14 Yabuki, S., S. Kanayama, F. F. Fu et al, Physical and chemical characteristics of aeolian dust collected over Asian dust source regions in China — Comparison with atmospheric aerosols in an urban area at Wako, Japan. *J. Arid Land Studies*, 2002, **11**, 273~289.
- 15 Kanai, Y., A. Ohta, H. Kamioka, et al, Preliminary study on the grain-size distribution and concentration of aeolian dust collected in Japan. *J. Arid Land Studies*, 2002, **11**, 307~314.

Numerical Prediction of Dust Weather

Shao Yaping

(*Department of Physics and Materials Sciences, City University of Hong Kong, Hong Kong*)

Abstract The core problem to the prediction of dust weather is comprehension of the physical mechanism behind such phenomenon, as well as quantitative description of the dust distribution, intensity, transport, and deposition. Occurrence of dust weather is a complicated physical process involving elements of air motion, surface conditions and so on. A numerical-prediction-centered integral forecasting system that uses satellite observation and GPS as basic information background is presented, with dust emission model as the highlight. The system was used to forecast dust weathers in the spring of 2002. Synoptic measurements and data sampling were used to validate the predication result. Analysis shows that the system not only can quantitatively predicate the spatial distribution and temporal change of the dust, but also the source, density in the air, transfer and deposition. 72 hours prediction of the model is still with quite high credibility. The remaining problem and the direction of future research are also discussed.

Key words: dust storm; numerical prediction; dust emission model