

CUACE/Dust: 亚洲沙尘暴计算机业务预报系统

龚山陵^{1,2}, 张小曳¹

(1. 中国气象科学研究院中国气象局大气成分观测与服务中心, 中国, 北京, 100081; 2. 加拿大环境部科技司空气质量研究处, 加拿大, 多伦多, 4905 Dufferin Street)

摘要: CUACE/Dust (中国沙尘暴大气化学环境系统) 为一综合性的沙尘暴预报系统。该系统由以下两部分组成: (1) 包含沙尘起沙及干/湿沉降等其他大气动力过程的大气气溶胶模块; (2) 建立在中国气象局的观测资料以及中国风云二号地球静止卫星反演资料上的资料同化系统。这是第一次通过资料同化系统成功地将地面观测台站的数据与卫星的沙尘气溶胶反演资料结合起来, 并用于东亚地区的实时业务预报。在预报 2006 年东亚地区的沙尘暴过程中, 该业务系统捕捉到了 31 次大型沙尘暴事件, 而这些事件均被地面台站和卫星所观测到。分析结果显示, 在有资料同化系统参与的情况下, 2006 年春季东亚地区 0~24 小时季节平均预报技术得分从 0.22 上升至 0.31, 实现了 41% 的增长。同时还将一些具有代表性的台站在整个 2006 年春季所预报的沙尘浓度的时间序列与地面 PM10 监测数据进行了比对。比对结果显示, 所预报的沙尘浓度的时间序列与出现大量沙尘气溶胶的近地表地区的沙尘暴的发生时间及强度吻合。大气化学和物理学杂志为该预报系统的研发及应用结果专门出了一期特刊, 而本文则为该特刊的总结性报告。

关键词: 沙尘暴; 业务预报

中图分类号: TP 183

文献标识码: A

文章编号: 1001-4160(2008)09-1061-1067

CUACE/Dust-an integrated system for operational dust forecasting in Asia

Gong Shanling^{1,2} and Zhang Xiaoye¹

(1. Centre for Atmosphere Watch and Services of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081, China; 2. Air Quality Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, 4905 Dufferin Street, Toronto, Ontario, M3H 5T4 Canada)

Abstract: An integrated sand and dust storm (SDS) forecasting system-CUACE/Dust (Chinese Unified Atmospheric Chemistry Environment for Dust) has been developed, which consists of a comprehensive dust aerosol module with emission, dry/wet depositions and other atmospheric dynamic processes, and a data assimilation system (DAS) using observational data from the CMA (China Meteorological Administration) ground dust monitoring network and retrieved dust information from a Chinese geostationary satellite-FY-2C. This is the first time that a combination of surface network observations and satellite retrievals of the dust aerosol has been successfully used in the real time operational forecasts in East Asia through a DAS. During its application for the operational SDS forecasts in East Asia for spring 2006, this system captured the major 31 SDS episodes observed by both surface and satellite observations. Analysis shows that the seasonal mean threat score (TS) for 0~24 hr forecast over the East Asia in spring 2006 increased from 0.22 to 0.31 by using the DAS, a 41% enhancement. The time series of the forecasted dust concentrations for a number of representative stations for the whole spring 2006 were also evaluated against the surface PM10 monitoring data, showing a very good agreement in terms of the SDS timing and magnitudes near source regions where dust aerosols dominate. This is a summary paper for a special issue of ACP featuring the development and results of the forecasting system.

Key words: sand and dust storm, operational forecasts

Gong SL and Zhang XY. CUACE/Dust-an integrated system for operational dust forecasting in Asia. Computers and Applied Chemistry, 2008, 25(9):1061-1067.

1 引言

每年春季, 沙尘暴给人们的财产及身体健康带来了严重的损害。在全球气候变化的大背景下, 以及在亚洲沙尘暴源

头地区的气象条件及人类活动造成的沙漠化的影响下 (Zhang et al., 2003b), 亚洲沙尘暴源头地区的沙尘量已达到了每年 8 亿吨的水平。这些沙尘的时空分布, 每年亦有很

收稿日期: 2008-03-30; 修回日期: 2008-04-30

基金资助: 中国科技部基金资助项目 (2004D1B3J115); 中国国家基础研究计划 (973) 资助项目 (2006CB403703; 2006CB403701)。

大的差别(Gong et al., 2006a)。近年来,人们对沙尘气溶胶的形成和传输,以及沙尘气溶胶对地球-气候系统的影响,特别是对大气中能够成灾的沙尘气溶胶的影响,即沙尘暴的影响,有了更多的关注。由于沙尘暴能够给经济和社会带来影响,所以,了解沙尘暴源头沙尘的强度、传输及沉降,并在世界范围内建立起沙尘暴预报和预警系统,对于减少沙尘暴的影响都是至关重要的。为此,世界气象组织目前正在积极筹备建立一个全球性的沙尘暴预报和预警系统,以提高全球沙尘暴的预报能力。

目前,一些机构已开发出若干个沙尘暴业务预报系统,包括为地中海地区提供 72 小时预报的区域大气沙尘暴模式(DREAM, Nickovic et al., 2001),可以提供全球沙尘暴预报的海军气溶胶分析和预报系统(NAAPS, Christensen, 1997),为亚洲地区提供沙尘暴预报的化学天气预报模式系统(CFORS Uno et al., 2003),以及亚洲沙尘气溶胶模式(ADAM Park and In, 2003)。一些研究结果显示,现有的沙尘暴预报模式对预报亚洲沙尘暴事件的大概情况具有一定的能力(Unos et al., 2006),但在预报具体细节方面有很大的差异。造成这种差异的原因之一是很难准确确定沙尘暴的源头,同时也缺少沙尘暴的近实时观测资料,从而无法验证这些模式的起沙参数。人们采用了各种方法提高沙尘暴模式所做预报的准确性。例如,Alpert et al. (2002)将 TOMS 卫星资料做为初始场,并发现基于 TOMS 资料的初始化对成功预报沙尘暴有着显著的积极影响。

与此同时,在根据以往的研究成果,建立起中国自己的沙尘暴综合预报系统方面,最近也取得了新的进展。自 2004 年以来,中国的 CUACE/Dust 系统已从一个研究模式转变成为一个业务预报系统。该系统由以下部分组成:研究沙尘起沙及干/湿沉降等其他大气动力过程的综合性沙尘气溶胶模块,以及建立在中国气象局地面沙尘暴监测网的观测资料以及中国风云二号地球静止卫星所收集到的沙尘反演资料上的资料同化系统。通过将该预报系统的预报结果与实际观测结果相比,人们对沙尘暴的可预报性有了更深刻的了解。这种了解将有助于该系统的进一步改进。

2 CUACE/Dust 的结构

CUACE 是中国为研究空气质量预报及气候所新开发出来的一个系统。该系统含有 4 个功能模块,分别处理气溶胶、气相化学、排放源以及资料同化方面的问题。该系统的接口性设计,使其可以与任何一个气象模式,如区域空气质量模式,或气候模式,结合在一起使用。而 CUACE/Dust 则是 CUACE 在沙尘气溶胶预报方面的一个应用,它将一个多粒径多组成的气溶胶模式(Gong et al., 2003a)和一个三维资料同化系统与 2 个业务天气预报模式融为一体(图 1)。

该沙尘暴模式(Gong et al., 2003b, 2006b)已被用于亚洲气溶胶特性实验研究期间的沙尘气溶胶预报,并在各种地面观测数据(Zhang et al., 2003a)和空中观测数据之间建立起了一定的关联。2006 年春季,2 个气象系统,即 MM5

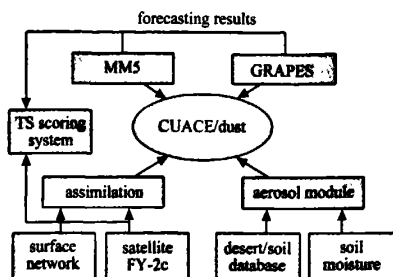


Fig. 1 The structure of CUACE/Dust under two weather forecasting models: MM5 and GRAPES.

图 1 2 个天气预报模式(MM5 和 GRAPES)下的 CUACE/Dust 系统

(Zhou et al., 2008) 和最新一代的中国天气预报模式 GRAPES (全球区域同化预报系统)(Xue, 2004)均引入了 CUACE/Dust 系统。该系统的水平分辨率分别为 108 公里和 50 公里。MM5 和 GRAPES 利用 CUACE/Dust 系统为亚洲地区提供一日 2 次 24 小时、48 小时以及 72 小时的沙尘暴预报。有关 MM5 运作 CUACE/Dust 系统的具体详情及相应的评价请见 Zhou et al. (2008) 所写的有关论文。GRAPES 运作 CUACE/Dust 系统的具体详情将会发表在其他刊物上。

在 CUACE/Dust 系统里,资料同化是一个关键部分。它需要地面台站的近实时沙尘气溶胶的观测资料(浓度及能见度),以及卫星激光雷达和遥感仪器所获得的垂直廓线资料。Hu 等人(2008)的文章详述了如何利用气象学的原理从中国风云二号地球静止卫星所获得的数据中反演出沙尘暴的强度,并利用地面观测台站的资料进行修正。Niu 等人(2007)则将卫星观测数据与地面台站的观测资料结合起来,在 CUACE/Dust 系统里创建了一个沙尘资料同化模块,从而为研究卫星所无法探测到的云下沙尘情况提供了一个方法。

最后,我们在地球信息系统的框架下建立了预报评分系统,综合所有的观测资料,评估预报结果(Wang et al., 2008)。该评分系统采用了与评估常规降水预报结果相同的原理来计算整个模式或部分模式的沙尘暴预报的技术得分、漏报率、误报率、误差率以及准确率。

3 主要结果及发现

3.1 2006 年沙尘暴的天气特征

在亚洲,2006 年春季为一最频繁发生沙尘暴的季节之一(Yang et al., 2008)。东亚地区共报告有 31 起沙尘暴事件。天气情况的分析结果显示,在 2005 年冬季向 2006 年春季的过渡期间,对流层上部和环极涡旋处出现了迅速发展的高压中心。该高压中心迫使环极涡旋的控制区向中纬度地区迁移。此外,在亚洲中高纬度地区上空的对流层中部,以及在环极涡旋的右侧形成了明显的异常西风急流(Yang et al., 2008)。这两种条件均有利于沙尘暴的产生及传输。

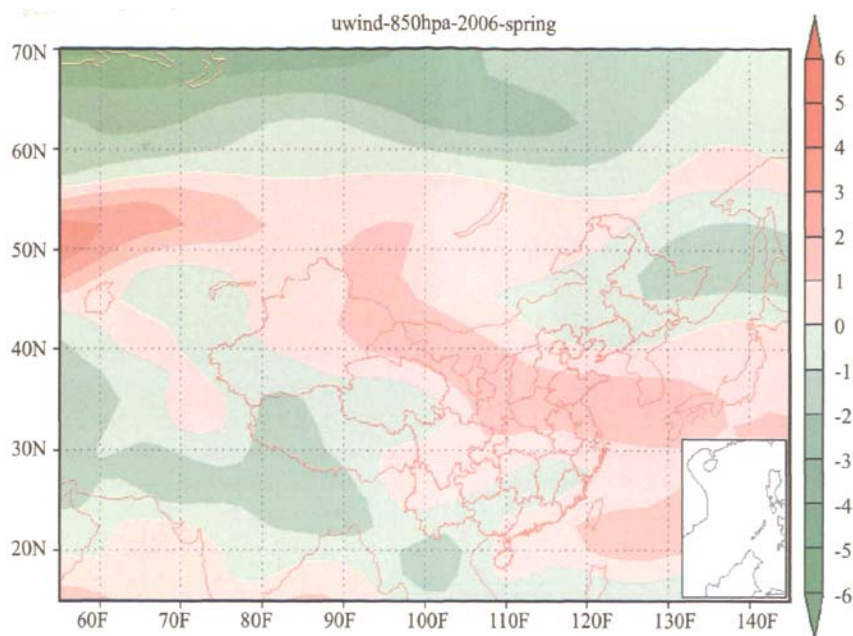


Fig.2 Zonal wind anomalies at 850 hPa for spring 2006 showing the systematic positive anomalies over most of the source regions in Asia.

图2 2006年春季850百帕位势高度的纬向风距平显示，
亚洲大部分沙尘源头区出现了系统的正距平

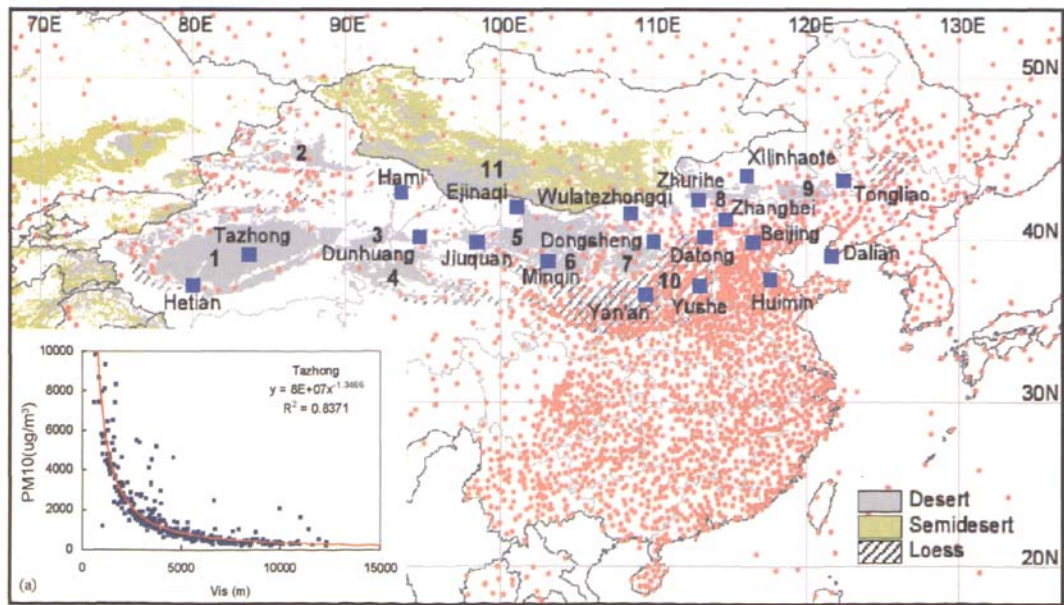


Fig.4 SDS observation stations by the CMA. The red dots are meteorological stations with visual visibility measurements and the blue squares are SDS observation stations with PM10 and instrumental visibility measurements. Insert: Relationship between hourly-averaged PM10 concentration and visibility during SDS events in the springtime at Tazhong station.

图4 中国气象局的沙尘暴观测台站
红点为有目测能见度观测的气象台站，蓝色方块为有PM10和仪器能见度观测的沙尘暴观测台站
插入箭头: Tazhong站，春季沙尘暴事件发生期间逐小时平均的PM10浓度与能见度之间的关系

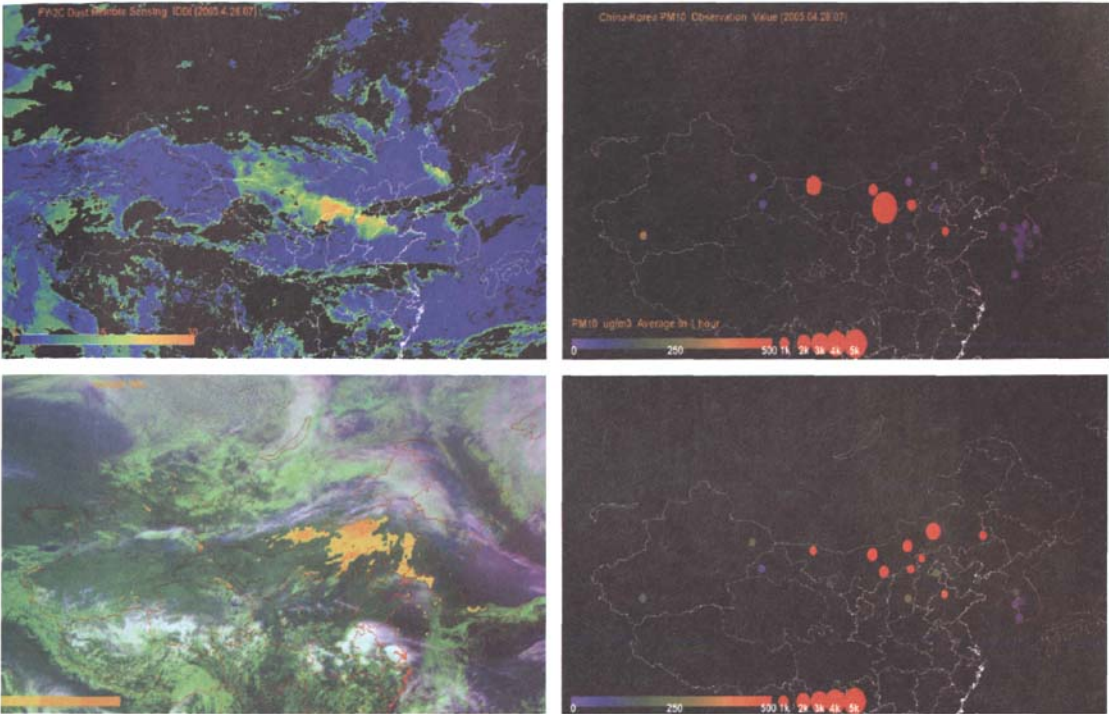


Fig.5 FY-2C IDDI comparison with PM10 values on April 28-29, 2005.
The plots at the left hand side show the satellite retrieved SDS distributions and the right hand side plots show the PM measurements at the same time.
图5 风云二号卫星的红外差分沙尘指数与PM10数值的比较（2005年4月28-29日）
左图为卫星反演的沙尘暴分布，右图为同一时间PM的观测数据

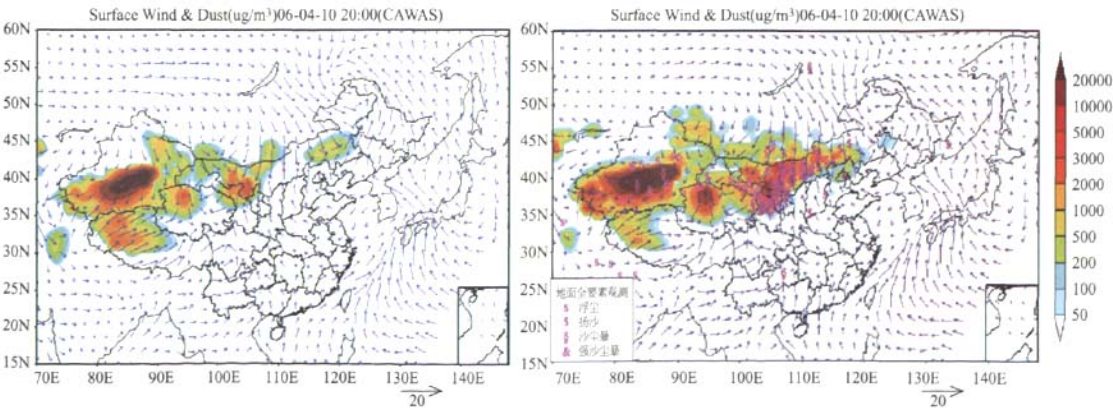


Fig.6 Comparisons of CUACE/Dust forecasting results for April 10, 2006 with and without data assimilation.
The symbols of “S”, “\$”, “\$”, “&” indicate floating dust, blowing dust, SDS, severe SDS, respectively, obtained from surface meteorological stations by CAWAS (Centre for Atmosphere Watch and Services, CMA).
图6 在有资料同化和没有资料同化的情况下，CUACE/Dust的预报结果比较（2006年4月10日）
符号“S”，“\$”，“\$”，“&”分别代表浮尘、扬尘、沙尘暴以及严重沙尘暴
(资料来源：中国气象局大气成分观测与服务的地面气象台站)

图2清楚地显示,2006年春季,在850百帕位势高度出现了纬向风距平。显然,中国和蒙古国大部分的沙尘源头区有一个较2003年(过去7年中沙尘暴事件出现最少的一年)要大得多的正风距平。Yang等人(2008)对这些特征做了具体分析。这篇文章的一个特点是,介绍了沙尘暴过程的定义,并根据天气环流特点,将发生在某一时期内和某一区域内的沙尘暴事件定义为一过程。这种分析既将沙尘暴的地面观测数据与造成这种沙尘暴发生的大气环流结合在一起考虑,同时也为分析沙尘暴及其影响提供了一个系统方法。例如,研究人员在中国沙尘暴过程时间序列与IMPROVE网的北美洲PM10地面观测资料之间建立起了一个很好的相关(见图3)。这说明,中国沙尘暴过程序列对于北美洲西部的背景过程序列的变化具有显著的控制影响。Zhao等人(2007)在一篇文章中对IMPROVE的若干台站进行了详细分析。

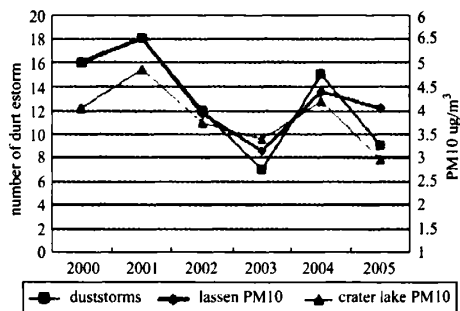


Fig. 3 Relationship between the annual spring (March – May) mean PM10 concentration at 2 sites in the western US and SDS process numbers in China from 2000 to 2005.

The 2 sites are Lassen, CA; Crater Lake, OR;

图3 2000年~2005年,美国西部两处(加利福尼亚的Lassen和俄勒冈的Crater Lake)与中国沙尘暴过程编号在春季(三月~五月)平均PM10浓度方面的关系

3.2 CUACE/Dust 观测资料的输入

2006年春季,沙尘暴监测网测量了中国国内沙尘暴源头和沙尘暴污染区的PM10浓度和能见度(Wang et al., 2008)。图4显示了在沙尘暴发生期间,提供在线PM10和3小时目测能见度观测数据的地面观测台站的分布。Wang等人(2008)揭示了2001年~2006年春季东亚地区发生沙尘暴的3个源头中心,即中国西部源头,蒙古国源头以及中国北方源头。人们根据2004年~2006年春季中国北方的观测资料反演出PM10的特征及其与能见度之间的关系。这些特征及关系显示,在沙尘暴事件的发生期间,每个地面台站均出现了幂函数关系,源头地区的R2大约在0.8左右(图4)。PM10和能见度之间的关联使得人们可将沙尘暴发生期间的大量能见度监测数据转换成PM10数值,以此来评估沙尘暴模式的准确性,并为沙尘暴资料同化系统提供所需的数据。

与此同时,中国风云二号地球静止卫星提供了东北亚地区(包括中国北部、蒙古国、韩国以及日本)沙尘暴分布的反演资料,涵盖了70°E~140°E和25°N~60°N地区。沙尘暴分布的反演资料以及地面PM10观测资料的对比请见图5。该图显示了在沙尘暴分布之间相当合理的对应关系。Hu等人(2008)讨论了具体的反演方法以及验证过程。沙尘暴的分布情况则是根据每日每小时的观测结果做出。在有关资料同化的文章里(Niu et al., 2007),作者讨论了对来自不同观测平台的数据进行同化的方案,以及相应的评估方法。

3.3 资料同化系统

在CUACE/Dust系统里,沙尘暴资料同化系统对于2006年春季取得良好的预报结果有着重要影响。该系统的基础是三维变分系统(3D-Var),并大量采用了中国风云二号地球静止卫星所提供PM10,地面能见度,以及沙尘量反演资料(见3.2节)。这是第一次通过资料同化系统成功地将地面观测台站的数据与卫星的沙尘气溶胶反演资料结合起来,并用于东亚地区的实时业务预报。对于风云二号地球静止卫星的沙尘气溶胶反演资料,研究人员开发出了一种有效的算法,以确定东亚地区不同地方的尘埃云情况,以及反演的沙尘强度(红外差分沙尘指数SDS-IDD1)与地面能见度观测资料之间的关系(Hu et al., 2008; Niu et al., 2007)。这种做法使得卫星观测资料能与地面观测资料结合在一起,为该资料同化系统提供一整套的沙尘暴数据。图6示4月10日在有资料同化系统的情况下,和在没有资料同化系统的情况下,沙尘暴预报结果的差别。在本专刊中,Niu等人(2007)对此还报告了更多的结果。

预报结果显示,由于采用了资料同化系统,2006年春季东亚地区0~14小时预报的季节平均技术得分从0.22上升至0.31,增长了42%(Niu et al., 2007)。对某些沙尘暴过程的预报,技术得分可高达0.55(Zhou et al., 2008)。

3.4 2006年春季的预报结果

为了进一步评估CUACE/Dust系统的预报能力,我们在3月8日至12日模式所做的预报与地面台站的观测数据以及激光雷达的观测数据之间做了一详细的比对。比对结果显示,该系统具有良好的预报能力(Zhou et al., 2008)。沙尘暴的模式预报与地面PM10观测资料之间的比对请见图7(一个靠近中国东北部沙尘暴源头地区的台站,三次预报时间,非常合理的关联)。同时,人们还根据地面PM10的观测资料,对一些具有代表性的台站在2006年整个春季预报的沙尘浓度的时间序列进行了评估,无论在沙尘暴发生的时间上,还是在近沙尘气溶胶源头地区的沙尘规模上,均有很好的吻合(Zhou et al., 2008)。2006年整个春季24小时、48小时以及72小时的技术得分分别为0.31, 0.23以及0.21。此外,经与实际观测资料相比,这三次时间的预报准确率高达0.88。

4 未来沙尘暴预报面临的挑战

一个准确的沙尘暴预报系统有赖于一整套经严格设计

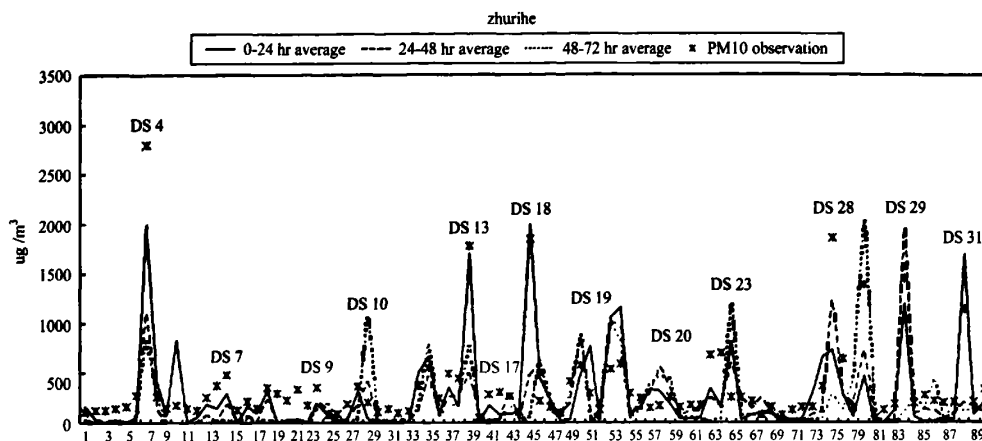


Fig. 7 Comparisons of the surface 24-hr mean SDS concentration by 0-24 hr (FT1), 24-48 hr (FT2) and 48 hr-72 hr (FT3) forecasts and the surface PM10 observation for the entire spring from March 3 to May 31 for Zhurihe [42.40°N, 112.90°E], a station in the west of Onqin Daga sandy areas.

图7 0 h~24 h (FT1), 24 h~48 h (FT2) 和 48 h~72 h (FT3) 预报的

地面 24 h 平均沙尘暴浓度与地面 PM10 的观测结果比较

(Onqin Daga 沙地西部的一个叫作 Zhurihe 的台站, 42.40°N, 112.90°E, 3 月 3 日至 5 月 31 日整个春季)

的分系统, 包括一个强有力的气象模式, 一个性能良好的沙尘气溶胶微物理学和大气动力学模式, 以及一个能够对大气沙尘气溶胶进行及时观测的地面、高空及空间网络系统。模式为计算沙尘气溶胶的产生、传输以及消除提供了关键的要素。所预报的气象参数, 如地面风速、降水、边界层湍流, 对流层的对流情况, 以及西风急流等, 均对沙尘暴时空分布预报的准确性有影响。因此, 研发具有良好性能的气象模式对于建立一个成功的沙尘暴预报系统至关重要。为了应对 21 世纪天气领域里的挑战, 提高一日至两周的高影响性天气预报的准确性, 世界气象组织已发起了全球观测系统研究与可预报性试验 (THORPEX), 这将大大有助于沙尘暴的预报。

拥有一个有效的气象模式仅仅是沙尘暴预报系统的一个开始。用气象要素预报来模拟起沙和沉淀的沙尘气溶胶模式不仅应包含必要的地理资料, 同时也需要有实际的起沙和沉淀模块。首先, 对于某些关键地区来讲, 准确更新全球或区域的沙漠分布或沙尘源头地区的分布, 特别是那些因沙漠化或逆转过程而发生变化的地区, 仍为一挑战。卫星能够提供沙漠分布的全球情况, 但是却未能捕捉到中国的一些沙尘源头地区 (Gong et al., 2003b)。人们急需高分辨的全球沙漠分布资料, 以及土壤质地特性资料。这对于了解沙尘气溶胶辐射强迫的特点也很重要 (Sokolik et al., 2001)。

这些资料被输入进能够计算起沙通量 (地面特质函数) 和气象条件 (如 10 米风速, 雪盖及土壤湿度) 的起沙模块。目前, 已有一些起沙模块, 从简单的风速函数, 或摩擦速度函数, 到具体的模拟, 如沙尘模式对比项目 (DMIP, Uno et al., 2006)。然而, 大部分的具体模拟需要了解某些关键参数的全球分布情况 (Zhao et al., 2006)。风蚀过程的现场观测资料显示, 移动沙尘垂直直线的规模明显取决于高度及跃移通

量, 而临界起沙风速则取决于土壤的含水量。研究人员还证明, 跃移通量在很大程度上取决于沙漠表面原土壤规模的分布情况 (Uno et al., 2006)。为了校准模式的参数, 需要把沙尘通量, 准确/更新的土地使用信息以及土壤表面特性当作全球各地地表风速的函数来处理。

一个强有力的沙尘气溶胶模式应能准确地将沙尘和干沉淀模拟成粒度的函数。该函数决定了沙尘气溶胶在大气中的寿命以及浓度。非常有限的干湿通量观测资料对于评估模式的性能是一个挑战, 同时也影响到干湿沉淀模块的微调 (Slinn 和 Slinn, 1981a, b; Zhang et al., 1993)。

为了使 CUACE/Dust 能够做出准确的沙尘暴预报, 需要建立一个沙尘气溶胶综合监测网。有了这样一个至关重要的部分后, 才谈得上有一个很好的沙尘暴预报系统。首先, 沙尘暴的观测资料为验证模式的性能和改进模式参数提供了实际的观测情况。除此之外, 在预报沙尘暴的过程中, 近实时的台站观测资料有利于在业务预报中使用资料同化系统。但是, 现有的资料缺乏所需的时空覆盖。横向方面, 台站的密度仍不足以揭示完整的沙尘暴情况, 如在中国 (Wang et al., 2008)。此外, 现有的沙尘暴监测网并不实时收集直接的沙尘气溶胶的观测数据。PM10 和能见度资料能够用来替代沙尘气溶胶的资料, 但是只有在沙尘暴的源头区才用得比较理想。卫星观测数据提供了水平覆盖, 但只是一个柱负荷, 而且在反演明亮陆地表面上的沙尘暴时会出现一些问题。缺少沙尘暴的垂直结构这一问题已被世界各地的地面激光雷达网, 如欧洲激光雷达网和亚洲沙尘暴网, 所解决。这些激光雷达网开始提供沙尘暴的近实时垂直结构资料。就观测而言, 最终的目标是要建立起一个能够将各种沙尘暴观测资料 (天气能见度、PM10、卫星沙尘强度反演数据、光学

深度以及激光雷达垂直结构)融为一体,便于沙尘暴资料同化系统及时进行处理。CUACE/Dust 已将这种概念落实到资料同化系统的资料处理中(Hu et al., 2008; Niu et al., 2007)。然而,要想建立起一个区域的,甚至是全球的,既能验证模式,又能进行实时预报的沙尘暴观测系统,则需要做更多的科研工作以及区域性合作。

致谢: 本文作者感谢中国科技部(2004DIB3J115)以及中国国家基础研究计划(973)(2006CB403703 和 2006CB403701)对本项目的资助。

References

- Alpert P, Krichak SO, Tsidulko M, Shafir H and Joseph JH. A dust prediction system with TOMS initialization. *Mon Weather Rev*, 2002, 130:2335–2345.
- Christensen JH. The danish eulerian hemispheric model a three-dimensional air pollution model used for the Arctic. *Atmos Environ*, 1997, 31:4169–4191.
- Gong SL, Barrie LA, Blanchet J-P, Salzen KV, Lohmann U, Lesins G, Spacek L, Zhang LM, Girard E, Lin H, Leaitch R, Leighton H, Chylek P and Huang P. Canadian Aerosol Module: a size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 1. Module development. *J Geophys Res*, 2003a, 108, 4007, doi:10.1029/2001JD002002.
- Gong SL, Zhang XY, Zhao TL, McKendry IG, Jaffe DA and Lu NM. Characterization of soil dust distributions in China and its transport during ACE-ASIA 2. model simulation and validation. *J Geophys Res*, 2003b, 108, 4262, doi:10.1029/2002JD002633.
- Gong SL, Zhang XY, Zhao TL, Zhang XB, Barrie LA, McKendry IG and Zhao CS. A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-pacific transport. Part II: Interannual variability and climate connections. *J Climate*, 2006a, 19: 104–122.
- Gong SL, Zhang XY, Zhao TL, Zhang XB, Barrie LA, McKendry IG and Zhao CS. A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-pacific transport. Part II: Interannual variability and climate connections. *J Climate*, 2006b, 19:104–122.
- Hu XQ, Lu NM, Niu T and Zhang P. Operational retrieval of Asian sand and dust storm from FY-2C geostationary meteorological satellite and its application to real time forecast in Asia. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8:1649–1659.
- <http://www.atmos-chem-phys.net/8/1649/2008/>.
- Malm WC, Sisler JF, Huffman D, Eldred RA and Cahill TA. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States. *J Geophys Res*, 1994, 99:1347–1370.
- Nickovic S, Kallos G, Papadopoulos A and Kalaliagou O. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *J Geophys Res*, 2001:106, 18113–18129.
- Niu T, Gong SL, Zhu CF, Liu HL, Hu XQ, Zhou CH and Wang YQ. Data assimilation of dust aerosol observations for CUACE/Dust forecasting system. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2007, 7:8309–8332.
- <http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/7/8309/2007/>.
- Park SU and In H-J. Parameterization of dust emission for the simulation of the Yellow Sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea. *J Geophys Res*, 108(D19), 4618, doi:10.1029/2003.2003JD003484.
- Slinn SA and Slinn WGN. Modeling of atmospheric particulate deposition to natural water. In: *Atmospheric Pollutants in Natural Waters*. edited by: Eisenreich, SJ. Ann Arbor Science, Michigan, 1981a:23–53.
- Slinn SA and Slinn WGN. Modeling of atmospheric particulate deposition to natural waters. *Atmospheric Pollutants in Natural Waters*, Ann Arbor Sci, Ann Arbor, Michigan, 1981b:23–53. 16 Sokolik IN, Winker DM, Bergametti G, Gillette DA, Carmichael G, Kaufman Y, Gomes L, Schuetz L and Penner JE. Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust. *J Geophys Res*, 2001, 106:18015–18028.
- Uno I, Carmichael GR, Streets DG, Tang Y, Yienger JJ, Satake S, Wang Z, Woo J-H, Guttikunda S, Uematsu M, Matsumoto K, Tanimoto H, Yoshioka K and Iida T. Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. *J Geophys Res*, 2003:108(D23), 8668, doi:10.1029/2002JD002845.
- Uno I, Wang Z, Chiba M, Chun YS, Gong SL, Hara Y, Jung E, Lee S-S, Liu M, Mikami M, Music S, Nickovic S, Satake S, Shao Y, Song Z, Sugimoto N, Tanaka T and Westphal DL. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview. *J Geophys Res*, 111, D12213, doi:2006:10.1029/2005JD006575.
- Wang YQ, Zhang XY, Gong SL, Zhou CH, Hu XQ, Liu HL, Niu T and Yang YQ. Surface observation of sand www.atmos-chem-phys.net/8/2333/2008/. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8:2333–2340.
- Gong SL and Zhang XY. An operational Asian dust forecasting system and dust storm in East Asia and its application in CUACE/Dust. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8:545–553.
- <http://www.atmos-chem-phys.net/8/545/2008/>.
- Xue J. Progresses of researches on numerical weather prediction in China:1999–2002. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(3):467–474.
- Yang YQ, Hou Q, Zhou CH, Liu HL, Wang YQ and Niu T. Sand/dust storm processes in northeast Asia and associated large-scale circulations. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8:25–33.
- <http://www.atmos-chem-phys.net/8/25/2008/>. 25 Zhang X, Arimoto R, An Z, Chen T, Zhu G and Wang X. Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: Concentrations, sources and atmospheric deposition on the Loess Plateau. *Atmos Environ*, 1993, 27:2051–2067.
- Zhang XY, Arimoto R and An ZS. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *J Geophys Res*, 1997, 102:28041–28047.
- Zhang XY, Gong SL, Shen ZX, Mei FM, Xi XX, Liu LC, Zhou ZJ, Wang D, Wang YQ and Cheng Y. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport/distribution during 2001 ACE-Asia. 1. Network Observations. *J Geophys Res*, 108(D9), 4261, doi:2003a:10.1029/2002JD002632.
- Zhang XY, Gong SL, Zhao TL, Arimoto R, Wang YQ and Zhou ZJ. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophys Res Lett*, 30, 2272, doi:2003b:10.1029/2003GL018206.
- Zhao TL, Gong SL, Zhang XY, Abdel-Mawgoud A and Shao YP. An assessment of dust emission schemes in modeling East Asian dust storms. *J Geophys Res*, 2006:111, D05S90, doi:10.1029/2004JD005746.
- Zhao TL, Gong SL, Zhang XY and Jaffe DA. Asian dust storm influence on North American ambient PM levels: observational evidence and controlling factors. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2007, 7:9663–9686.
- <http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/7/9663/2007/>.
- Zhou CH, Gong SL, Zhang XY, Wang YQ, Niu T, Liu HL, Zhao TL, Yang YQ and Hou Q. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8:787–798.
- <http://www.atmos-chem-phys.net/8/787/2008/>. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8:2333–2340.
- www.atmos-chem-phys.net/8/2333/2008/.