吴成来,林朝晖. 2014. WRF/Chem 模式中两种起沙参数化方案对东亚地区一次强沙尘暴过程模拟的影响 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 419-436, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13041. Wu Chenglai, Lin Zhaohui. 2014. Impact of two different dust emission schemes on the simulation of a severe dust storm in East Asia using the WRF/Chem model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 419-436.

# WRF/Chem 模式中两种起沙参数化方案对东亚 地区一次强沙尘暴过程模拟的影响

# 吴成来 1,2 林朝晖 1

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029 2 中国科学院大学,北京 100049

**摘 要**利用耦合了 GOCART 和 Shao04 两种起沙参数化方案的 WRF/Chem 模式对 2002 年 3 月 19~22 日发生在 东亚地区的强沙尘暴过程进行模拟,着重考察了不同起沙方案对沙尘暴过程模拟的影响。结果表明,耦合了两种 不同方案的 WRF/Chem 总体上均能较合理地模拟出主要的起沙区域、起沙强度的变化以及沙尘浓度的时空演变特 征,模式对沙尘源地附近及下游地区地面沙尘浓度时间变化特征的模拟与站点观测结果也十分接近。但总体说来 Shao04 方案对沙尘起沙的发生以及强度变化过程具有更好的模拟能力,该方案模拟的沙尘浓度与观测更为一致, 整体性能要优于 GOCART 方案。进一步分析发现,由于 GOCART 方案中采用的临界起沙风速偏小,导致该方案 下模拟的沙尘分布范围偏大,另外该方案忽略了蒙古东南部和内蒙古中东部的潜在沙尘源地,从而使得耦合了 GOCART 方案的模式未能模拟出上述区域的起沙过程,使得该区域及下游地区模拟的沙尘浓度也偏小。但在塔里 木盆地,Shao04 方案计算的起沙通量偏小,这可能与 Shao04 方案未能考虑风速较小情况下空气拖曳力夹卷作用 对起沙的影响有关,也可能与该方案中采用的土壤质地数据不准确有关。

关键词 起沙参数化方案 强沙尘暴 WRF/Chem 模式 数值模拟 临界摩擦速度 下垫面状况
 文章编号 1006-9585 (2014) 04-0419-18 中图分类号 P435 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13041

## Impact of Two Different Dust Emission Schemes on the Simulation of a Severe Dust Storm in East Asia Using the WRF/Chem Model

WU Chenglai<sup>1, 2</sup> and LIN Zhaohui<sup>1</sup>

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract A severe dust event during 19–22 March 2002 over East Asia was simulated by using the Weather Research and Forecasting/Chemistry (WRF/Chem) model coupled with two different dust emission schemes (the GOCART and Shao04 schemes) to investigate the impact of dust emission schemes on model performance. A comparison with observational data shows that the main observed dust emission regions, the temporal variation of dust emission intensity, and the evolution of surface dust concentration are all quite well reproduced. Both near the dust source and in its downstream regions, the model-simulated temporal variation in surface dust concentration agrees closely with station

通讯作者 林朝晖, E-mail: lzh@mail.iap.ac.cn

收稿日期 2013-03-04 收到, 2013-06-25 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110200,国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421406,科技部国际科技合作与交流专项 2011DFG23450

作者简介 吴成来,男,1985年出生,博士研究生,主要从事沙尘气溶胶及其气候效应的数值模拟研究。E-mail:wuchenglai@mail.iap.ac.cn

420

observations. Generally, the WRF/Chem model with the Shao04 scheme shows better performance, especially in simulating the occurrence and intensity of dust emission and the surface dust concentration distribution. Further analysis shows that the dust emission regions simulated by the GOCART scheme are broader than those from observational data, which might be ascribed to the lower criteria value of the threshold wind velocity at the surface. In addition, the GOCART scheme could not resolve the potential dust source in the southeast of Mongolia and the middle–east of Inner Mongolia, which leads to the underestimation of dust concentration in this area and in downwind regions. However, the simulated dust emission flux in Taklimakan with the Shao04 scheme is lower compared with observations. This could be ascribed to the fact that the effect of aerodynamic lift in the dust emission is not considered in the Shao04 scheme. Moreover, the inaccurate parent soil texture for the Taklimakan Desert used in the Shao04 scheme might be another possible reason for the discrepancy.

Keywords Dust emission parameterization, Severe dust storm, WRF/Chem model, Numerical simulation, Threshold wind velocity, Land surface characteristic

# 1 引言

作为地球系统中的重要组成部分,沙尘气溶胶 通过吸收和散射大气中的长波和短波辐射,改变地 气系统能量收支,还通过改变云的微物理过程进而 改变云的光学特性、生命期和云量等,从而与气候 产生复杂的相互作用;此外,沉降至海洋的沙尘还 带来了丰富的矿物质而影响海洋生态系统,从而影 响生物地球化学循环过程(Shao et al., 2011)。另外, 大气中的沙尘会带来严重的环境污染,直接影响人 类的身体健康以及生存居住环境,形成严重的环境 问题(Bell et al., 2008)。

数值模式是模拟和预报沙尘过程、研究沙尘 循环及其影响的有力工具。自从 20 世纪 80 年代末 开始,许多人就致力于研究和发展可用于模拟全 球、区域和局地沙尘过程的模式。从 20 世纪 80 年 代末开始,已经发展一系列的模式,包括全球沙尘 输送模式 (Huneeus et al., 2011), 以及模拟区域沙 尘过程的模式系统如 IAPS (孙建华等, 2003; 雷航 等, 2005; Lin et al., 2012)、CUACE/Dust (Zhou et al., 2008)、CEMSYS (Shao et al., 2003) 等。总体 来讲,这些模式大都能模拟出全球或区域沙尘循环 过程的基本特征,但模式模拟结果仍存在较大的不 确定性 (Uno et al., 2006; Huneeus et al., 2011)。针 对东亚区域沙尘天气开展的沙尘模式比较计划的 结果表明,不同模式系统模拟的沙尘起沙量存在显著 的差异,最大和最小的起沙量相差可达 12 倍 (Uno et al., 2006); 而基于气溶胶模式比较计划(AeroCom) 的多模式比较结果表明,不同模式对全球沙尘收支 的模拟存在显著的差异,所有模式模拟的沙尘总起 沙量变化范围为 514~4313 Tg a<sup>-1</sup>,而不同模式模

拟的大气沙尘总量的变化范围为 6.8~29.5 Tg 之间 (Huneeus et al., 2011)。

模拟结果不确定性的关键原因之一就在于起 沙过程的模拟,这主要由于沙尘起沙过程不仅依赖 于近地面的大气状况,还受到植被覆盖、土壤特性 等陆面过程参数的影响,因而需要起沙参数化方案 能较好地考虑这些要素(Uno et al., 2006; Zhao et al., 2006; Kang et al., 2011)。目前,国内外已经发展了 一系列的沙尘起沙方案,根据不同的假设和简化方 式, Shao and Dong (2006) 将其分为 3 类: 经验性 方案、基于简化起沙物理过程的方案以及基于详细 起沙微物理过程的方案。由于起沙物理过程的简化 方式以及所需的输入参数均有不同,因而不同起沙 方案的模拟结果有所差别。Zhao et al. (2006)、Kang et al. (2011) 等研究发现,不同起沙方案对沙尘过 程模拟的影响显著,包括起沙量、沙尘浓度的空间 分布及量值均存在显著差异。尽管上述研究取得了 一些进展,但起沙方案对沙尘过程模拟的影响仍需 要更多的模拟研究,并采用观测资料进行验证,以 利于进一步改进模拟性能。

本文利用耦合了 GOCART 和 Shao04 两种起沙 参数化方案的 WRF/Chem (3.2 版本)模式系统, 对 2002 年 3 月 19~22 日东亚地区一次典型的强沙 尘暴过程进行模拟,重点关注两种不同起沙方案 下模式对起沙过程的模拟及其差异。2002 年 3 月 19~22 日的强沙尘暴过程是近年来强度强、影响范 围广的典型强沙尘暴过程之一,主要影响了我国长 江以北的广大地区,其中以我国西北、内蒙古和华 北北部的沙尘天气强度最强。此次沙尘暴过程的前 期,在蒙古国西南部、南部和东南部的大部分地区 也观测到沙尘暴过程;在其后期,伴随着天气系统 的移动,沙尘还传输到下游的韩国和日本地区。针 对此次沙尘暴过程的发生发展、沙尘的分布及其影响,很多学者利用不同的沙尘天气数值模拟和预测 系统,进行了一系列的模拟与预报研究(Shao et al., 2003;孙建华等,2003;Uno et al.,2006;Zhao et al., 2006)。值得指出的是,以往对沙尘天气过程的模 拟及比较研究,大都采用不同的气象模式,并耦合 了不同的起沙参数化方案进行数值模拟,难以区分 不同气象场和沙尘起沙方案影响的相对贡献。本文 研究的特点则在于采用了同一个中尺度气象模式 框架,但分别耦合了不同的沙尘起沙方案,从而保 证了在沙尘天气事件的模拟过程中,模式所用的气 象驱动和环流背景是相同的,进而就可以分析两种 不同的起沙方案对该沙尘天气过程模拟结果的异 同,及其可能的原因。

## 2 模式介绍及试验设计

### 2.1 基于 WRF/Chem 的沙尘模式系统

WRF (Weather Research and Forecasting)模式 是新一代的中尺度模式,是一个研究和预报通用的 模式系统,现有 ARW (Advanced Research WRF) 和 NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model)两个版 本,其中本研究所用的版本是 ARW 版本(以下简 称 WRF)。WRF/Chem 是在 WRF 的基础上引进了 Chem 模块,并实现了气象-化学的全面在线耦合 (Grell et al., 2005)。

WRF/Chem 模式(3.0版本以来)已经考虑了 沙尘的起沙、传输和沉降过程,可用于沙尘的模拟 研究。模式中起沙过程所采用的参数化方案是基于 GOCART (Georgia Institute of Technology–Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model)的方案(Ginoux et al., 2004),以 下将其简称 GOCART 方案。模式的传输过程采用 了质量守恒和标量守恒传输方案,保持大气中沙尘 含量的守恒(Grell et al., 2005)。干沉降过程考虑了 湍流扩散和分子扩散产生的沉降以及重力沉降,沉 降速度分别采用阻力模拟(即空气动力学阻力,粘 滞层阻力和边界层阻力)和 Stokes 公式进行计算 (Grell et al., 2005)。由于湿沉降过程的相对复杂

性,模式中未考虑沙尘的湿沉降过程。

在原有起沙方案(Ginoux et al., 2004)的基础 上, Kang et al. (2011)在上述 WRF/Chem (3.0版 本)的基础上,引进了3种新起沙参数化方案,并 比较了这3种方案的模拟结果差异(但并没有将新 方案模拟结果与原起沙方案进行对比)。此后,我 们在上述版本的基础上进行了发展,在WRF/Chem (3.2版本)中耦合进去了Shao(2004)起沙方案 (以下简称Shao04方案)。以下将介绍GOCART 和Shao04两种起沙方案。

## 2.2 沙尘模块

GOCART 方案根据垂直沙尘通量和风速的经验公式,直接计算各个粒径的起沙通量,第*p*档沙尘粒子的起沙通量

$$F_{p} = C S s_{p} \times u_{10m}^{2} \left[ u_{10m} - u_{t}(d_{p}) \right], \quad u_{10m} > u_{t}(d_{p}), \quad (1)$$

其中, *C* 是常量,为 0.8 µg s<sup>2</sup> m<sup>-5</sup>; *S* 是起沙概率函数 (也称为风蚀度指数),表示一个模式网格内能起沙 的网格面积所占的比例; *s<sub>p</sub>* 是各档沙尘的质量比例;  $u_{10m}$  是地面 10 m 的水平风速;  $d_p \, \pi u_t(d_p)$  分别是第 *p* 档沙尘粒子的有效直径和其对应的地面 10 m 的临 界风速。Ginoux et al. (2004) 假设 $u_t(d_p) \approx u_{*t}(d_p)$ , 其中  $u_{*t}(d_p)$  为临界摩擦速度,采用 Marticorena and Bergametti (1995) 公式计算并考虑土壤湿度的 影响。

Shao04 方案则是基于起沙风蚀物理学理论,认为沙尘粒子的产生是因为跳跃起来的沙粒轰击土 壤表面的直接释放过程以及轰击粒子自身的分裂 作用,并给出由粒径为 *d*<sub>i</sub>的沙粒运动产生的粒径为 *d*<sub>i</sub>的沙尘通量如下式 (Shao, 2004):

$$F(d_{j},d_{i}) = c_{y}\eta_{fj} \left[ (1-\gamma) + \gamma \frac{p_{m}(d_{j})}{p_{f}(d_{j})} \right] \frac{Q(i)g}{u_{*}^{2}} (1+\sigma_{m}),$$
  
$$\sigma_{m} = 12u_{*}^{2} \frac{\rho_{b}}{p} \left( 1+14u_{*} \sqrt{\frac{\rho_{b}}{p}} \right), \qquad (2)$$

其中,  $c_y$  是比例系数,  $\eta_f$  是质量比例,  $\gamma$  是与粒径 分布有关的权重因子, g 是重力加速度,  $p_m(d_j)$  和  $p_f(d_j)$  分别为粒径的全分布和最小分布,  $\sigma_m$  是有 效轰击率,  $u_*$  是摩擦速度,  $\rho_b$  是土壤容重, p 是 土壤的塑性压力。Q(i) 为粒径为  $d_i$ 的轰击沙粒的通 量, 采用 White (1979) 给出的方案计算如公式 (3) 所示

$$Q(i) = c \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left[ 1 - \frac{u_{*t}(d_i)}{u_*} \right] \left[ 1 + \frac{u_{*t}^2(d_i)}{u_*^2} \right],$$
  
$$u_* > u_{*t}(d_i), \qquad (3)$$

其中, c 为常数,  $\rho_a$  为空气密度。 $u_{*t}$  是临界摩擦速度, 采用 Shao and Lu (2000) 方案计算且考虑了土

壤湿度和地面粗糙元的影响(Kang et al., 2011)。

GOCART 方案主要用于全球沙尘过程的模拟 (Ginoux et al., 2004; Huneeus et al., 2011),而 Shao04 方案已被应用到区域沙尘过程的模拟中,并 展现了不错的模拟能力(Kang et al., 2011)。两方案 的粒径范围均是 20 µm 以下,但粒径分档有所不 同,各粒径分布及相关参数如表1和表2所示。

# 表 1 GOCART 起沙参数化方案中的粒径分档及对应的相关参数

Table 1Physical parameters for the dust size bins inGOCART scheme

	粒径区	质量比	有效直径	密度 ρ <sub>P</sub> /	起沙量*/
分档	间/µm	例 sp	$d_{\rm p}/\mu{ m m}$	$\mathrm{kg}~\mathrm{m}^{-3}$	Tg
1	0.2~2	0.10	1.46	2560	0.61 (0.071)
2	$2 \sim 3.6$	0.25	2.8	2650	1.80 (0.210)
3	3.6~6	0.25	4.8	2650	2.07 (0.228)
4	6~12	0.25	9.0	2650	2.13 (0.242)
5	$12 \sim 20$	0.25	16	2650	2.32 (0.249)

\*代表 2002 年 3 月 18 日 20:00 (北京时间,下同)至 23 日 20:00 模拟的东亚地区总起沙量(括号内的值为其占所有粒径起沙量的比例)。

表 2 Shao04 起沙参数化方案中的粒径分档及对应的相关 参数

Table 2Physical parameters for the dust size bins inShao04 scheme

分档	粒径区间/µm	有效直径 $d_p/\mu m$	密度 $\rho_{\rm P}/{\rm kg}{\rm m}^{-3}$	起沙量*/Tg
1	1.95~2.5	2.25	2560	1.10 (0.063)
2	2.5~5	3.75	2650	2.52 (0.145)
3	5~10	7.5	2650	3.09 (0.178)
4	10~20	15	2650	10.66 (0.614)

\*代表 2002 年 3 月 18 日 20:00 至 23 日 20:00 模拟的东亚地区总起沙量 (括号内的值为其占所有粒径起沙量的比例)。

#### 2.3 GIS 数据

Shao04 方案计算起沙通量的过程需要输入的 变量包括空气密度、土壤湿度、摩擦速度、叶面积 指数(或植被覆盖)、土壤质地、粒径分布数据等。 空气密度、土壤湿度、摩擦速度均由模式系统的其 他模块计算得到;粒径分布采用 Shao(2004)的数据。 土壤质地、植被覆盖则利用了与实际情况更为接近 的 GIS 数据集。所用的土壤质地则是张时煌等 (2004a)借助于 GIS 技术融合几份土壤分类资料 得到的,该资料符合美国农业部(USDA)土壤质 地分类标准。由于 WRF/Chem 模式中所用的是多年 统计得到的平均植被覆盖资料,考虑到植被覆盖存 在逐年的变化以及其对于沙尘起沙的影响(Xu et al., 2006),为了更好地实时模拟沙尘过程,我们利用 张时煌等(2004b)借助于 GIS 等技术,从遥感资料反演得到的植被覆盖。需要说明的是 Shao04 方案所用的土壤质地和植被覆盖资料已被成功应用于东亚地区沙尘暴过程的模拟(Shao et al., 2003;孙建华等,2003; 雷航等,2005)。GOCART 方案所需的空气密度、土壤湿度、10 m 风速也同样由模式系统的其它模块得到。

此外,为了限制沙尘源地的范围,两方案均 采用了风蚀度指数,用以指示潜在沙尘源地分 布。Shao04 方案应用了基于地形要素(不考虑高 山)、多年统计的沙尘浓度(由能见度估算得到)和 植被覆盖得到的风蚀度指数 Se (Shao, 2008)。当风 蚀度指数大于或等于1,可作为沙尘源地。GOCART 方案所考虑的风蚀度指数 Sf 是一个基于地形起伏变 化并结合陆面植被覆盖得到的定量化因子(而 Se 为 判断因子,不是定量化因子),代表潜在起沙能力 (Ginoux et al., 2004)。比较东亚地区这两种风蚀度 指数的差异(图1), Se和 Sf均基本抓住了东亚区域 的主要沙尘源地,包括我国西北、内蒙古西部地区及 其相邻的蒙古国地区、我国东北南部的科尔沁沙地, 但 S<sub>f</sub>并没有考虑内蒙古中东部和华北北部(包括浑 善达克沙地和河北北部的坝上草原)作为主要沙尘源 地,而这可能是重要的沙尘源地(叶笃正等,2000; Gong et al., 2003; Zhang et al., 2003).

#### 2.4 试验设计

采用上述介绍的沙尘模式系统,对 2002 年 3 月 19~22 日的强沙尘暴过程进行模拟。模拟的时 间是 2002 年 3 月 18 日 20:00 至 23 日 20:00, 共 5 d。 模拟区域(如图 1)的中心点是(35°N, 110℃), 空间有 220×160 个格点, 空间分辨率是 30 km。模 式垂直层为28层。物理过程参数化方案选择如表3 所示。每天4次、空间分辨率为1°(纬度)×1°(经 度)的 NCEP/FNL 分析资料提供了积分所需的初始 场和边界场。此外,积分时还采用 grid-nudging 四维 资料同化方法与 NCEP/FNL 分析资料逼近。我们分 别采用 Shao04 和 GOCART 起沙方案进行模拟,共 两组试验。试验中未考虑沙尘的反馈作用,因而两 组试验模拟结果的差异是由起沙方案的差异造成 的。在下一部分,我们首先分析沙尘暴过程对应的 环流系统及天气系统的演变,以及模式对它们的模 拟能力,接着重点分析两组试验模拟的沙尘浓度的 异同及与观测的偏差,然后通过分析这种差异和偏 差的原因,给出了两种起沙方案的合理性及其不足。

Table 3 F	Physical parameterizations	for the experiments
物理过程	参数化方案	参考文献
微物理过程	Single-Moment 5-class scheme	Hong et al. (2004)
积云对流参数	Grell 3d ensemble cumulus	Skamarock et al.
化	scheme	(2008)
长波辐射	RRTM scheme	Mlawer et al. (1997)
短波辐射	Goddard shortwave scheme	Chou and Suarez
		(1994)
行星边界层	Yonsei University scheme	Hong et al. (2006)
地面层	MM5 similarity	Skamarock et al.
		(2008)
陆面过程	Noah Land Surface Model	Chen et al. (1996)

#### 表 3 模拟试验中选定的物理过程参数化方案

## 3 模拟结果分析及验证

#### 3.1 资料介绍

由于缺少直接的垂直沙尘通量、沉降通量的直 接观测资料,一般采用地面观测的颗粒物浓度 [如 总悬浮颗粒物(TSP)、PM10浓度等]来定量比较 模式的模拟结果。由于沙尘的空间分布范围往往很 大,在一些缺少直接沙尘浓度观测的地方,可以利 用气象台站地面观测的能见度来间接反演地面沙尘 浓度,而且气象台站地面观测的沙尘天气记录(即



图 1 模拟试验中的区域范围(灰色区域)以及 Shao04 方案中的潜在沙尘源区(S<sub>e</sub>≥1, a 中深灰色区域,圆点为所用的东亚地区地面气象台站,共约 1000 个台站,其中中国区域有 800 多个台站),GOCART 方案中的风蚀度指数 S<sub>f</sub>(b 中深灰色区域)(方框为用于定量化比较的观测站点:1一塔中;2—额济纳旗;3—乌拉特中旗;4—锡林浩特;5—银川;6—呼和浩特;7—太原;8—北京;9—青岛;10—沈阳;11—Oki;12—Sado;13—Tappi;14—Rishiri)

Fig. 1 Model domain (gray area), the potential dust source area for Shao04 scheme ( $S_e \ge 1$ , dark gray in (a); the solid circles denote the SYNOP stations in East Asia: There are approximately 1000 stations, with more than 800 stations in China) and soil erodibility index  $S_f$  for GOCART scheme (dark gray in (b)) (14 selected stations are denoted by open squares: 1—Tazhong; 2—Ejin Qi; 3—Urad Zhongqi; 4—Xilinhot; 5—Yinchuang; 6—Hohhot; 7—Taiyuan; 8—Beijing; 9—Qingdao; 10—Shenyang; 11—Oki; 12—Sado; 13—Tappi; 14—Rishiri)

浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴)和卫星观测的图像也可用来定性分析沙尘天气的强度和空间范围。 尽管通过观测或反演的颗粒物浓度(如 PM10 或 TSP)包含空气中的自然或人类活动释放的所有气 溶胶,但在沙尘源地及邻近地区,它们还是在一定 程度上反映了沙尘浓度的相对大小,特别是沙尘暴 期间沙尘浓度急剧升高,使得 PM10 和 TSP 的浓度 也急剧升高。

沙尘浓度与能见度的关系已有一些研究(Shao et al., 2003; Wang et al., 2008)。尽管通过能见度估 算沙尘浓度的方法存在一些不确定性,但这仍不失 为一种可行的途径(Shao, 2008)。Shao et al.(2003) 提出了一个通过能见度推算 TSP 浓度的经验公式:

$$C_{\text{TSP}} = \begin{cases} 3802.9 D_v^{-0.84}, D_v < 3.5\\ \exp(-0.11 D_v + 7.62), D_v \ge 3.5 \end{cases}$$
(4)

其中, *C*<sub>TSP</sub> 是沙尘浓度 (单位: μg m<sup>-3</sup>), *D*<sub>v</sub> 是能见度 (单位: km), 该公式已被 Uno et al. (2006) 开 展的 DMIP 计划所采用。

本文中所利用的是中国气象局提供的东亚地 区地面气象台站观测数据,每3小时观测能见度等 气象要素,并记录包括浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙 尘暴以及烟尘等在内的天气现象。需要说明的是, 考虑到朝鲜观测的沙尘天气强度与上游的蒙古、中 国可能存在不一致,即强度偏强(孙建华等,2003), 为了更好地进行对比,在朝鲜观测的沙尘暴和强沙 尘暴天气均作为扬沙处理。

为了定量地进行对比,我们采用了中国环境保 护部提供的银川、呼和浩特、太原、北京、青岛和 沈阳的日平均 PM10 浓度,其中日平均的采样时间 为前一天的 12:00 至当天的 11:00。另外,本文还利 用到了由能见度根据公式(4)推算得到的塔中、 额济纳旗、乌拉特中旗和锡林浩特的沙尘浓度。除 了青岛位于沙尘源地的下游地区,其余站点均位于 源地及其附近地区。

在沙尘传输到的更遥远地区,本文利用了东亚酸 雨网(Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, EANET)观测的 Oki、Sado、Tappi 和 Rishiri 的逐小 时平均 PM10 浓度。另外 Oki 和 Rishiri 观测的逐小时 平均细颗粒物浓度也用于与模拟结果进行对比。这些 用于验证模式结果的观测站点分布如图 1 所示。

## 3.2 影响 2002 年 3 月 19~22 日强沙尘暴过程的天 气系统

沙尘过程的模拟一定程度上依赖于模式对于

气象场的模拟。其中,地面风场直接影响起沙量的 计算,大气环流场等会影响沙尘的传输路径和沉降 过程。为此我们首先来考察模式对 2002 年 3 月 19~ 22 日沙尘暴过程对应的东亚地区环流形势及天气 系统的模拟情况。

据孙建华等(2003)的分析,此次沙尘暴过程 的主要影响天气系统为自中亚向东移动并加强的 短波槽和低层的蒙古气旋及其伴随着的地面冷锋。 从图 2 中可以看到,3 月 19 日 08:00 500 hPa 高度 场上的低压槽位于新疆东部,至 20 日 08:00,低压 槽移动较快,移至蒙古东部,而且强度有所增加, 20 日 14:00 形成一闭合的低压中心,位势高度为 5160 gpm(图略),此后进一步加强并缓慢东移。 21 日 20:00 以后,500 hPa 高度场上的低压槽有所 减弱,并东移出海。伴随着低压槽的发展东移,蒙 古气旋自 19~20 日有显著加强,20~21 日气旋缓 慢东移,且强度变化较小,22 日以后东移出海。与 气旋相伴随的,地面冷锋后大片区域风速很大(达 6 级风,甚至大风以上),并观测到沙尘暴天气(图 3)。

从模拟的气象场来看,与分析资料相比,模式 很好地模拟出 500 hPa 高空环流的演变,很好地再 现了高空槽脊的移动及短波槽加深的特征(图略)。 对于天气系统的模拟,如图 3e-3h 所示,可以看出, 模式也较好地模拟出了蒙古气旋的移动过程,中心 的位置基本一致。高压和低压的强度虽然基本接 近,但存在着偏差,即模拟的高压偏低 2.5~5 hPa, 低压偏低 0~2.5 hPa。尽管如此,模式较好地模拟 出地面风场的特征,沙尘源区的风速大值区的分布 也比较接近。模式对于气象场(特别是环流场和地 面风场)的合理再现,可以更好地模拟沙尘起沙和 传输过程,从而有利于我们分析不同起沙方案对沙 尘过程模拟的影响。

## 3.3 地面沙尘浓度的空间分布

图4给出了WRF/Chem模拟的地面沙尘浓度及 其与地面观测沙尘天气事件的对比。总体上看,采 用 Shao04 和 GOCART 方案,模式模拟的沙尘分布 特征比较相似,均能基本抓住观测沙尘天气的时空 演变特征,即沙尘自源地向下游地区传输的特征, 其中蒙古南部、内蒙古及东北西部的沙尘向东南传 输,新疆南部地区沙尘向西传输,而且模拟的地面 沙尘浓度大值区也与观测的沙尘天气强度较强的 区域相互吻合。这说明两方案均能抓住了主要的沙



图 2 NCEP/FNL 资料得到的 2002 年 3 月 (a) 19 日 08:00、(b) 20 日 08:00、(c) 21 日 08:00、(d) 22 日 08:00 500 hPa 高度场 (实线,单位: dagpm) 和温度场 (虚线,单位: K) 的演变

Fig. 2 Evolution of geopotential height (solid line, units: dagpm) and temperature (dashed line, units: K) at 500 hPa at 0800 LST on (a) 19 Mar, (b) 20 Mar, (c) 21 Mar, and (d) 22 Mar 2002 from NCEP/FNL data

#### 尘源地及其起沙过程。

分析两组试验模拟结果的差别,从空间分布范 围来看,除了在蒙古东南部及内蒙古中东部地区范 围偏小之外,采用 GOCART 方案模拟的沙尘分布 范围更广。从量值上看, GOCART 方案下模拟的 沙尘浓度均在 5000 µg m<sup>-3</sup> 以下, 而 Shao04 方案下 模拟的沙尘浓度在部分地区高于 5000 µg m<sup>-3</sup>, 在局 地甚至可达 20000 μg m<sup>-3</sup> 以上。从不同区域的差别 来看,在塔克拉玛干沙漠的绝大部分地区,GOCART 方案下模拟的沙尘浓度更大;在蒙古南部和内蒙古 西部, 19 日 08:00, GOCART 方案下模拟的沙尘浓 度较大,但19日14:00至20:00,采用Shao04方案 模拟的沙尘浓度增加显著,在部分地区相比更大, 此后 20~22 日,则以 GOCART 方案下的模拟值更 大;在蒙古东南部和内蒙古中东部、华北北部等地 区,Shao04 方案下的结果则明显较大。两方案下模 拟的沙尘浓度不仅在源区有较大差别,而且在下游 也有明显差别,如渤海、黄海等(差异可达1000 µg m<sup>-3</sup>以上)。

对比台站观测资料,模拟偏差主要表现在以下 5个方面:1)两组试验均未能模拟出蒙古西北部观 测到的沙尘天气(其强度可达强沙尘暴,如图 4a1、 4a2),这可能与方案并不将此区域设为潜在沙尘源 地而未模拟出起沙过程有关; 2) 采用 GOCART 方 案模拟的沙尘浓度的空间分布范围比观测偏大,一 方面,19日在观测的沙尘分布区的边缘也有分布, 而采用 Shao04 方案模拟的沙尘分布范围在 19 日与 观测更为一致;另一方面,采用 GOCART 方案还 模拟出了 19 日观测未出现的东北西部和南部的沙 尘分布,其原因可能是 GOCART 方案模拟出了东 北西部的虚假起沙过程(如图 1b,此处为沙尘源 区); 3) 20~23 日, GOCART 方案下模拟的沙尘 在内蒙古西北部及中国一蒙古交界地区有虚假分 布,浓度较大,可达1000 μg m<sup>-3</sup>以上,而对应的, Shao04 方案下模拟的沙尘分布范围则较小, 与观测 较为接近; 4) 采用 Shao04 方案模式较好地模拟出 了 20 日 14:00 蒙古东部、内蒙古东部的沙尘分布带 (图 4d1), 而采用 GOCART 方案时未能抓住该特



图 3 NCEP/FNL 分析资料结果(左列,黑点为沙尘天气,从小到大依次为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)和模拟(右列)的2002年3月(a、b) 19日、(c、d)20日、(e、f)21日、(g、h)22日14:00海平面气压场(实线,单位:hPa)、地面10m风矢量场和风速大于4级的区域(填色) Fig. 3 Sea level pressure (soild line, units: hPa), wind vector at 10 m and its speed exceeding fourth level (at 5.5 m s<sup>-1</sup>, shaded) from NCEP/FNL data (left column, circles with the size indicating the intensity are the stations where the phenomena of dust are observed) and simulated results (right column) at 1400 LST on (a, b) 19 Mar, (c, d) 20 Mar, (e, f) 21 Mar, and (g, h) 22 Mar 2002

征(图 4d2),这可能与 GOCART 方案未能模拟出 该地区的起沙过程有关;5)采用 Shao04 方案模拟 的塔里木盆地的沙尘分布范围比观测偏小,而 GOCART 方案下模拟的沙尘分布范围与观测相当 接近。值得注意的是,在塔里木盆地,观测站点主 要沿其周边进行分布,在塔里木盆地东部观测站点



图 4 Shao04(左列)和 GOCART(中列)方案下模拟的(a1-a3)19日 08:00、(b1-b3)19日 14:00、(c1-c3)19日 20:00、(d1-d3)20日 14:00、(e1-e3)21日 14:00、(f1-f3)22日 14:00地面沙尘浓度及其差值(右列)以及观测的沙尘天气分布(黑点,同图 3)

Fig. 4 Simulated surface dust concentrations for Shao04 (left column) and GOCART (middle column) schemes and their difference (right column) at (a1–a3) 0800 LST 19 Mar, (b1–b3) 1400 LST 19 Mar, (c1–c3) 2000 LST 19 Mar, (d1–d3) 1400 LST 20 Mar, (e1–e3) 1400 LST 21 Mar, and (f1–f3) 1400 LST 22 Mar 2002 (the stations where the phenomena of dust events are observed as Fig. 3)

数目较少(图 1a),因而尚不能验证 GOCART 方案 下 19 日塔里木盆地东部的沙尘分布中心(浓度达 1000 μg m<sup>-3</sup>)是否合理。

## 3.4 地面沙尘浓度的时间变化

本节我们将利用站点观测的地面沙尘浓度的时间变化结果,考察耦合了不同起沙方案的 WRF/ Chem 模式的模拟性能。总体来看,两方案下模式 均能抓住基本的沙尘过程,合理地再现了各个站点 的浓度变化特征,但在个别站点也存在一定的偏 差。

在位于沙尘源地的塔中、额济纳旗、乌拉特中 旗及锡林浩特(图 5), Shao04 方案下模拟的沙尘 浓度与观测的相关系数均在 0.8 以上,通过了 99.9% 的信度检验,说明模式很好地模拟出 TSP 浓度的时 间变化特征。而 GOCART 方案下的模拟能力相对 偏低,该方案对塔中、额济纳旗、乌拉特中旗模拟



图 5 沙尘源地地区不同站点模拟与能见度推算的地面沙尘浓度的时间变化(*R* 为相关系数,下同) Fig. 5 Time variations of simulated and observed surface dust concentration at stations over the dust source area (*R* is the correlation coefficient between modeled and visibility-derived dust concentrations)

的沙尘浓度的相关系数分别为 0.71、0.72、0.90,超 过了 99.9%的信度检验,但 GOCART 方案对锡林浩 特站模拟的时间相关系数较低,仅为 0.35。

在塔中,19日11:00至17:00观测到浮尘天气 (表 4),能见度为 3~8 km,对应的沙尘浓度为 800~1500 μg m<sup>-3</sup>。采用 GOCART 方案时模拟的沙 尘浓度于19日00:00开始增加,19日12:00降至谷 值,然后再次增加,20日02:00达到第二个峰值, 其变化趋势与观测相反,而 Shao04 方案下模拟的 沙尘浓度增加缓慢,也未模拟出浮尘天气下的沙尘 浓度峰值,只模拟出20日00:00前后弱的沙尘过程 (模拟的沙尘浓度最大达 200 μg m<sup>-3</sup>);对于塔中 21日11:00至22日14:00的沙尘过程(最强为沙 尘暴天气),GOCART 方案下模拟的沙尘浓度的变 化与观测比较一致,而 Shao04 方案下模拟的沙尘 浓度虽然也显著增加,但减小更为迅速,至22 日 01:00降至 50 μg m<sup>-3</sup>以下。

在额济纳旗和乌拉特中旗,采用 GOCART 方 案时,尽管模式能抓住沙尘浓度的主要变化特征, 但 19~20 日模拟的额济纳旗的浓度峰值出现得偏 早 2~3 h,且沙尘过程持续得偏久,另外 21~22 日模式还模拟出了额济纳旗相对较弱(浓度最大为 1222 μg m<sup>-3</sup>)的沙尘天气事件(观测 TSP 浓度未明 显增加),即图 4 所显示的 20~22 日内蒙古西北部 的模拟偏差(见 3.3 节分析)。

在位于浑善达克沙地北部的锡林浩特,Shao04 方案下模式很好地模拟出观测的沙尘浓度变化特 征。但 GOCART 方案下,模拟的沙尘浓度只在沙 尘暴过程的前期(19日20:00至20日12:00)有所 增加,其强度偏小(模拟的沙尘浓度为823 μg m<sup>-3</sup>, 而观测的最强沙尘天气为沙尘暴,能见度仅为500 m,对应可估算得 TSP 浓度为6806 μg m<sup>-3</sup>),而且 模式也未能模拟出沙尘暴后期的沙尘浓度变化;前 期的沙尘浓度增加是因为有沙尘自上游地区(如蒙 古南部地区)传输而来,而后期未模拟出沙尘天气 则与模式未考虑蒙古国东南部和内蒙古中东部的 起沙有关,这与图4和3.3节的分析是相对应的。

需要指出的是,由于用能见度推算的 TSP 浓度

#### 表 4 不同站点观测到的沙尘过程持续时间及最强强度

Table 4Duration and intensity of dust storms recorded atten meteorological stations

站点	观测到沙尘天气的时间	最强沙尘天气及其出现的时刻
塔中	19日11:00至17:00	浮尘(19日11:00)
	21日11:00至22日14:00	沙尘暴(21 日 17:00)
额济纳旗	19日11:00至20:00	沙尘暴(19日14:00)
乌拉特中旗	19日17:00至20日05:00	沙尘暴(20日02:00)
锡林浩特	20日02:00至20:00	沙尘暴(20日11:00)
	21日14:00至17:00	扬沙(21日14:00)
银川	19日17:00至20日05:00	沙尘暴(19日17:00)
	21 日 17:00 至 20:00	扬沙(21日20:00)
呼和浩特	19日20:00至20日17:00	沙尘暴(20日05:00)
太原 <sup>a</sup>	20日05:00至23:00	扬沙(20日08:00)
北京	20日11:00至23:00	扬沙(20日14:00)
	21日11:00至22日02:00	扬沙 (21 日 23:00)
	23 日 11:00	扬沙
青岛	20日11:00至14:00	浮尘(20日14:00)
	21 日 08:00 至 20:00	浮尘 (21 日 11:00)
	22日08:00至11:00	浮尘(22日08:00)
	19 日 17:00, 23 日 08:00	浮尘
沈阳	21 日 05:00 至 11:00	浮尘(21日11:00) <sup>b</sup>
	21日20:00至22日05:00	烟尘°

注: 上标 a-19 日 08:00 至 19 日 11:00、21 日 08:00 至 21 日 11:00、23 日 08:00 观测到烟尘; 上标 b-其余时刻均为烟尘; 上标 c-所有时刻 均为烟尘。

包含大气中的所有粒子,所以模拟值应普遍低于推 算的 TSP 浓度,但考虑到能见度观测存在一定的主 观性,量值仍存在一些不确定性因素,因而我们更 关注的是能见度(及由其推算的沙尘浓度)随时间 的相对变化特征。

接下来,分析模拟与直接观测的沙尘浓度的对 比,并辅以气象台站的观测记录(表4)进行分析。 考虑到背景空气中的颗粒物对观测的 PM10 有所贡 献,而沙尘暴期间 PM10 主要由沙尘气溶胶组成, 因而重点分析沙尘暴期间的对比结果。

在银川(图 6a),模式能抓住 20 日和 22 日沙 尘天气下沙尘浓度增加的特征,但 GOCART 方案 下模拟的沙尘浓度分别为观测的 2.3 和 4.7 倍,而 Shao04 方案下模拟结果则与观测比较接近。在呼和 浩特(图 6b),两方案下模拟的 20 日沙尘浓度分别 为 902 μg m<sup>-3</sup>、1188 μg m<sup>-3</sup>,与观测的 1354 μg m<sup>-3</sup> 相比,量值相当,只是有所偏小。21 日观测的沙尘 浓度为 206 μg m<sup>-3</sup>,GOCART 方案下模拟的沙尘浓 度略有偏大,而 Shao04 方案下的模拟值则偏小。在 太原(图 6c),21~22 日两方案下模式均抓住了沙 尘浓度显著增加的特征,只是量值有所偏小;在其 它时段,气象台站观测到烟尘,这可能是由其它局 地污染物(如煤的颗粒、生物质燃烧等)或(和) 沙尘引起的。

此次沙尘天气在北京开始于 20 日 09:15, 此后 迅速加剧,并持续至22日,其中20日10:50至15:30 沙尘浓度高达 12060 µg m<sup>-3</sup> (张仁健等, 2002) (如 表 4)。与观测的分析表明,两方案下模拟的日平均 沙尘浓度的变化特征与观测均相当符合,但是在量 值上整体偏小,观测值为模拟值的 1~5 倍,其中 GOCART 方案下的结果偏小更多(图 6d)。在青岛 和沈阳,模拟的沙尘浓度在 21~22 日显著增加, 这与观测比较接近(日平均 PM10 浓度达 440 µg m<sup>-3</sup> 以上),但也存在着偏差,其中 Shao04 方案下模拟 的 21 日沙尘浓度分别为观测的 1.9 和 1.6 倍, 而 22 日两方案下模拟的沙尘浓度均偏小。值得一提的 是, 沈阳 19 日的平均沙尘浓度为 297 μg m<sup>-3</sup>, 由于 采样时间为18日12:00至19日11:00,而18日23:00 至 19 日 11:00 并未观测到沙尘天气,可见这是 18 日 12:00 至 18 日 20:00 这个时段内沙尘过程的影响 所导致的, 而根据地面气象台站资料, 该时段内辽 宁西部观测到了扬沙天气。虽然 GOCART 方案下 模拟的沙尘浓度与观测比较接近,但由于模拟时间 开始于18日20:00,可见这是虚假的沙尘浓度增加 过程(如图 4a2)。

在下游的日本地区(图7),除了 Rishiri 站外, Shao04 方案下模拟的沙尘浓度更大,与观测更为接 近。在 Oki 和 Sado 两个站,两方案下模拟的沙尘 浓度的主要时间变化特征基本相似,但量值上 Shao04 方案下模拟的沙尘浓度与观测比较接近,而 采用 GOCART 方案模拟的沙尘浓度则比采用 Shao04 方案的结果小(与图4对应),显著低于观 测结果。在 Tappi 站,观测的沙尘浓度最大值达 2210 µg m<sup>-3</sup> (22 日 00:00),这也是日本地区 4 个站点中 观测到的最大值,而且在 23 日 03:00 浓度还存在 另一峰值,达 1156 µg m<sup>-3</sup>;与观测相比,Shao04 方案下模式模拟出了 21~23 日的两个沙尘浓度峰 值,但其中第一个峰值的量值偏小,模拟值只有 739 µg m<sup>-3</sup>,而 GOCART 方案下只模拟出第一个浓度峰 值,且量值只有 323 µg m<sup>-3</sup>。

在 Rishiri 站,观测的沙尘浓度于 21 日 20:00 迅速增加,21 日 23:00 达到峰值后迅速减少,但 22 日 01:00 达到谷值后又迅速增加,至 22 日 04:00 达 到最大,此后才缓慢减少。相比而言,GOCART 方 案下模拟出了第一个浓度峰值,但浓度偏小 2~3



图 6 中国北方 6 个站点模拟地面沙尘浓度与观测 PM10 浓度的时间变化(GOCART 方案结果为第 1~4 个粒径区间即直径<12 μm 的总沙尘浓度) Fig. 6 Time variations of simulated surface dust concentration and observed PM10 concentration at six stations in the northern part of China (the total dust concentration in the first to fourth size bins, i.e., diameter smaller than 12 μm is compared with PM10 concentration for GOCART scheme)

倍,同时在第二个峰值前后,沙尘浓度增加较为缓 慢。另一方面,采用 Shao04 方案模拟的沙尘浓度 增加过程与观测较为一致,但未出现观测中 22 日 01:00 的低值,而且峰值后浓度减小更为迅速,从 而模拟的 22~23 日沙尘浓度偏小得多(图 7d 和 7f)。

#### 3.5 起沙过程对模拟偏差的影响

上面比较了两方案下模拟的地面沙尘浓度的 空间分布和时间变化的差异,并分析了存在的偏 差。由于两组试验的模拟结果差别是由起沙过程的 差别造成的(包括起沙总量和粒径分布的差异)。以 下我们将分析模拟偏差的原因。

图 8 给出了不同时刻两方案模拟的垂直沙尘通 量的空间分布图,对比可以看出:从整体的空间分 布范围来看,19 日 14:00 两方案模拟的起沙区域均 主要位于蒙古南部戈壁和内蒙古西部,差异较大的 区域位于新疆塔里木盆地中东部,GOCART 方 案 模拟的起沙通量达 10 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上。对于 20 日的 起沙过程,由于锋面系统经过东北、华北时,地面 冷锋后风速较强(图4b),Shao04 方案模拟的起沙 区域主要在蒙古东南部、内蒙古中东部和河北北部 等地区,而 GOCART 方案模拟的起沙区域则主要 位于蒙古南部戈壁、内蒙古西部和东北西部。21日 14:00,Shao04 方案和 GOCART 方案计算的起沙通 量分布与 20日 14:00 比较近似,只是在塔克拉玛干 沙漠地区均有所增强。22 日 14:00,两方案的模拟 结果与 20 日 14:00 的分布比较近似,但 Shao04 方 案的模拟结果在范围和强度上均有所减小,这与图 4d、4g 中地面风速相比减弱的特征是一致的。进一 步分析两方案模拟的垂直沙尘通量的空间分布特 征和量值差异,可以看出:

GOCART 方案模拟的起沙通量的空间分布更 为平滑,而 Shao04 方案模拟的起沙通量的局地特 征明显,存在局地极大值区。这种差别的原因在于 GOCART 中的风蚀度指数是基于 1°(纬度)×1.25° (经度)的分布得到的,而 Shao04 方案利用了 0.05° (纬度)×0.05°(经度)的高分辨率陆面数据(植 被覆盖、土壤质地和潜在源地分布)来计算起沙过



图 7 下游地区不同站点模拟地面沙尘浓度与观测 PM10 和细颗粒物浓度的时间变化(与细颗粒物浓度对比时,GOCART 方案结果为第 1 个粒径区 间即直径<2 µm 的沙尘浓度;与 PM10 浓度对比的粒径范围同图 6)

Fig. 7 Time variations of simulated surface dust concentrations and observed PM10/PM2.5 at the stations in the downstream area (the dust concentration in the first size bin, i.e., diameter smaller than 2  $\mu$ m, is compared with PM2.5 concentration for GOCART scheme; the size ranges for comparison with PM10 observation are the same as Fig. 6)

程。

从起沙通量的量值来看,GOCART 方案模拟的 起沙通量基本在 500  $\mu$ g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以下(如图 8a2,除 了 19 日 14:00,蒙古国的南部靠近中国一蒙古边境 的一局地地区,达 500~1000  $\mu$ g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>),大部分 区域则在 100  $\mu$ g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以下,而 Shao04 方案的起 沙通量在部分地区可达 1000  $\mu$ g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上,在局 地甚至达 5000  $\mu$ g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上。

总体来看,并结合 3.3 节和 3.4 节的分析,表 5 总结了不同源区两种方案的模拟结果。首先,两方 案均模拟出了 19 日蒙古南部和内蒙古西部的起沙 过程,起沙中心也比较接近,从而模式比较合理地 再现了 19~20 日该区域的沙尘分布,也均抓住了 额济纳旗和乌拉特中旗的沙尘浓度变化;其次, GOCART 方案未能模拟出蒙古东南部和内蒙古中 东部的起沙过程,从而模式未能抓住 20~21 日该 区域的沙尘分布特征,而 Shao04 方案模拟出了 20~ 21 日该区域强度达 1000 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上的起沙过 程,因而模式很好地抓住该区域的沙尘分布,也较 好地模拟出锡林浩特以及下游日本站点地面沙尘 浓度的量值变化(见 3.2 节和 3.3 节分析);再次, 18 日 21:00 至 19 日 10:00,GOCART 方案在东北 西部模拟有起沙过程,中心区域的起沙通量达 10~ 100 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(图略),导致 19 日东北西部和南部 模拟有虚假沙尘分布;最后,在塔克拉玛干沙漠, Shao04 方案模拟的起沙量偏小,而 GOCART 方案 则较为合理。此外,两方案均未能模拟出 19 日蒙 古西北部的起沙过程,因而模式未能抓住该区域观 测到的沙尘天气过程。

另一方面,GOCART 方案计算的起沙区域范围 变化较小,但随着天气系统的移动,Shao04 方案计 算的起沙区域也发生移动。从图 9 中满足起沙条件



图 8 Shao04(左列)和 GOCART 方案(中列)模拟的 2002 年 3 月(a1-a3) 19 日 14:00、(b1-b3) 20 日 14:00、(c1-c3) 21 日 14:00、(d1-d3) 22 日 14:00 地面垂直沙尘通量及其差值(右列)

Fig. 8 The simulated dust emission fluxes from Shao04 (left panel) and GOCART schemes (middle panel) and their difference (right panel) at (a1-a3) 1400 LST 19 Mar, (b1-b3) 1400 LST 20 Mar, (c1-c3) 1400 LST 21 Mar, and (d1-d3) 1400 LST 22 Mar 2002

#### 表 5 不同源区 Shao04 和 GOCART 方案的模拟结果对比

Table 5 Comparison of simulated res	sults in different sources f	from Shao04 and GOCART scheme
-------------------------------------	------------------------------	-------------------------------

源地	Shao04 方案	GOCART 方案
蒙古南部和中国内	模拟出了 19 日的强起沙过程,较好地抓住了 19~20 日沙尘	模拟出了 19 日的强起沙过程,但 20~22 日有虚假起沙,强度可达
蒙古西部	天气过程的时空演变	$10 \sim 100 \ \mu g \ m^{-2} \ s^{-1}$
蒙古东南部和中国	模拟出了 20~21 日的强起沙过程;该区域及下游地区的沙尘	未模拟出 20~21 日的起沙过程, 未抓住该地区观测的沙尘天气过程,
内蒙古中东部	浓度结果与观测较为接近	且低估了下游日本站点的沙尘浓度
中国东北西部	起沙范围及强度较小,持续时间较短,更为合理	18日 21:00 至 19日 10:00 有虚假起沙, 起沙通量可达 10~100 $\mu gm^{-2}s^{-1}$
中国塔克拉玛干沙漠	起沙区域及强度均偏小,地面沙尘浓度分布范围及量值偏小	起沙区域及强度更为合理,沙尘浓度结果与观测较为接近
蒙古西北部	未模拟出起沙过程	未模拟出起沙过程

的区域可以看出,GOCART 方案由于临界风速普遍 比 10 m 风速小一个量级,起沙区域范围较大(虽 然随着天气系统的移动也会移动,但变化不大), 而 Shao04 方案采用的临界摩擦速度与摩擦速度量 级相当,只在摩擦速度相比较大(对应的 10 m 风 速也较大)的区域才能起沙,因而起沙区域随着风 速大值区的移动而发生移动,且起沙区域范围也相 对较小。

需要指出的是,与 Shao04 方案相比,GOCART 方案模拟的偏多的沙尘起沙区域,其垂直沙尘通量

普遍较小,在100 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以下,如19日14:00 位于塔里木盆地中西部以及20日14:00位于内蒙古 西北部的起沙区域(图8)。这主要是由于在这些区 域,摩擦速度较小,不满足 Shao04 方案起沙条件, 但依然满足 GOCART 方案中较小的临界风速条件, 因而发生起沙,但由于风速小,所以垂直沙尘通量 也较小。

进一步分析起沙过程风速相关因子的量值(图 9)。在沙尘源区附近, Shao04 方案的临界摩擦速度 为  $0.4\sim1.0 \text{ m s}^{-1}$ ,源地边缘可到  $1 \text{ m s}^{-1}$ 以上,



图 9 2002 年 3 月 20 日 14:00 Shao04 方案中 (a) 计算的临界摩擦速度  $u_{*t}$ 、(c) 输入的摩擦速度  $u_*$ 及 (e) 两者的差值 (只计算  $S_o \ge 1$  潜在沙源上的  $u_*$ ), 以及 GOCART 方案中 (b) 计算的 10 m 临界风速  $u_t$ 、(d) 输入的 10 m 风速  $u_{10m}$ 及 (f) 两者的差值 (只计算土壤饱和度小于 0.5 的区域上的  $u_t$ ) Fig. 9 (a) The threshold friction velocity  $u_{*t}$  (c) input friction velocity  $u_*$ , and (e) their difference ( $u_{*t}$  is calculated just over the source area  $S_o \ge 1$ ) for Shao04 scheme and (b) the threshold wind velocity at 10 m  $u_t$ , (d) input wind velocity at 10 m  $u_{10m}$ , and (f) their difference ( $u_t$  is calculated just over the source area where soil wetness is less than 0.5) from GOCART scheme at 1400 LST 20 Mar 2002

GOCART 方案的临界起沙风速在 10 m 高度上的值 为 0.4~0.8 m s<sup>-1</sup>。事实上,在东亚地区开展的站点 观测研究显示出: 塔克拉玛干沙漠 2 个站点 3~4 月的临界摩擦速度为 0.48 和 0.56 m s<sup>-1</sup> (Ishizuka et al., 2009), 戈壁地区春季的临界摩擦速度为 0.54~  $0.69 \text{ m s}^{-1}$  (Kimura and Shinoda, 2010),  $0.34 \sim 0.42$  $m s^{-1}$  (Li and Zhang, 2011),内蒙古浑善达克沙地、 科尔沁沙地的临界摩擦速度则分别为 $0.4 \text{ m s}^{-1}$ (张 宏升等, 2007)和 0.62 m s<sup>-1</sup> (李晓岚和张宏升, 2012); 而 Kurosaki and Mikami (2007) 基于气象 台站观测资料得到塔克拉玛干沙漠、戈壁地区、黄 土高原的临界起沙风速在塔克拉玛干沙漠为 4.4± 0.6 m s<sup>-1</sup>、8.9±2.2 m s<sup>-1</sup>、6.9±1.2 m s<sup>-1</sup>,野外观测 的结果则显示出临界起沙风速在戈壁地区为 8 m s<sup>-1</sup> (Park et al., 2010),在浑善达克沙地、科尔沁沙 地则分别为6ms<sup>-1</sup>(张宏升等, 2007)和9.5ms<sup>-1</sup> (李晓岚和张宏升, 2012)。尽管不同时期的临界 摩擦速度和临界起沙风速可能有所差别,但很明 显,GOCART 方案的临界起沙风速确实偏小,而 Shao04 方案的临界摩擦速度则基本合理。

总体说来, Shao04 方案模拟的起沙区域较为合

理,而 GOCART 方案模拟的起沙区域则偏大,存 在一些虚假起沙区域 (表 5)。如 GOCART 方案模 拟了 19~20 日东北西部持续的起沙过程,从而导 致了模式模拟的东北西部和南部存在虚假沙尘分 布;20 日内蒙古西北部的虚假起沙过程也造成了 模拟的地面沙尘浓度在内蒙古西部和河套地区持 续偏强 (模拟的沙尘浓度可达 500~1000 μg m<sup>-3</sup>之 间,而观测无沙尘天气记录)。

与起沙通量的空间分布特征类似,两方案均模 拟出了蒙古南部、中国内蒙古西部、河西走廊和河 套地区的起沙过程,差别主要在于:一是 GOCART 方案未模拟出蒙古东南部和中国内蒙古中东部的 起沙;二是在塔克拉玛干沙漠 Shao04 方案模拟的起 沙区域更小;三是 GOCART 方案在东北西部模拟的 起沙区域更大,强度更强(如图 10 所示)。GOCART 和 Shao04 方案模拟的 5 d 总起沙量分别为 8.56、 17.37 Tg(各粒径的起沙量及其占总起沙量的比例 可见表 1 和表 2),粒径越大的粒径档,比例也越大。 另外, Shao04 模拟的 10~20 µm 粒径区间起沙量 占的比例超过了一半,达 61.4%,而 GOCART 方案 模拟的总起沙量在 2.0~20.0 µm 4 个粒径区间较为



图 10 (a) Shao04 和 (b) GOCART 模拟的 2002 年 3 月 18 日 20:00 至 23 日 20:00 东亚地区的累积起沙量及 (c) 两者差值 Fig. 10 Cumulative dust emission fluxes from 2000 LST 18 Mar to 2000 LST 23 Mar 2002 from (a) Shao04 scheme, (b) GOCART scheme, and (c) their difference

均匀地分布,其中最大的占24.9%,最小的占18.0%, 这与质量比例的取值均为0.25有关。

## 4 结论与讨论

本文利用耦合了 GOCART 和 Shao04 两种起沙 参数化方案的 WRF/Chem 模式对 2002 年 3 月 19~ 22 日发生在东亚地区的强沙尘暴过程进行模拟,考 察耦合了不同起沙方案的 WRF/Chem 对此次沙尘 天气过程的模拟能力,并进一步分析了两种不同起 沙方案对模式模拟结果的影响及其可能原因。总体 来看,耦合了两种不同方案的 WRF/Chem 总体上均 能较合理地模拟出主要的起沙区域、起沙强度的变 化以及沙尘浓度的时空演变特征,模式对沙尘源地 附近及下游地区地面沙尘浓度时间变化特征的模 拟与站点观测结果也十分接近。但相对而言,不管 是对沙尘浓度的空间分布还是地面站点沙尘浓度 的时间变化,耦合了 Shao04 方案的 WRF/Chem 对 此次强沙尘暴过程的模拟结果要优于耦合了 GOCART 方案下的结果,这主要是由于 Shao04 方 案对沙尘起沙的物理过程有相对更好的描述,从而 使得 Shao04 方案模拟的起沙区域和垂直沙尘通量 更为合理。

与实际观测的资料进一步比较表明,耦合了两种不同方案的模式模拟结果与实测相比均存在一定的偏差,而这与不同起沙方案的物理机制紧密相关。就 GOCART 方案而言,由于该方案中采用的临界风速偏小,从而导致模式在一些区域模拟出虚假的起沙过程,虽然对应的起沙通量并不大(100  $\mu g$  m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以下)。另一方面,风蚀度指数是 GOCART

方案表征潜在沙尘源地的重要指标,由于 GOCART 方案中未将蒙古东南部、中国内蒙古中东部等地区 考虑作为潜在沙尘源地,因此模式也未能模拟出该 区域的起沙过程,导致模式对该区域沙尘浓度的模 拟存在偏差,尤其在下游的日本站点,模式模拟的 沙尘浓度也偏小。

就 Shao04 方案而言,该方案下模拟的塔克拉 玛干沙漠的沙尘范围与观测相比偏小, 且沙尘浓度 也偏小,与观测偏差较大。塔里木盆地地区在沙尘 过程期间,风速相比其他区域更小,而在未发生轰 击作用的情况, 空气拖曳力的夹卷作用对起沙过程 的影响是不可忽视的。已有研究指出,空气拖曳力 的夹卷作用产生的塔里木盆地起沙通量能到 30~ 50 µg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,相对应的底层沙尘浓度可到 150~  $300 \mu g m^{-3}$  (Klose and Shao, 2012), 因此 Shao04 方案模拟结果偏低的可能原因之一,是 Shao04 方案 中未能考虑空气拖曳力的夹卷作用对沙尘起沙的可 能贡献。此外,鉴于土壤特性资料的缺乏,Shao04 方案中用到的土壤粒径分布的不准确,可能也是影 响模式模拟性能的重要指标之一。因此广泛收集整 理沙尘起沙参数化方案所需要的相关地表 GIS 信 息,也是提高沙尘模拟与预测的重要途径之一。

**致谢** 感谢德国科隆大学邵亚平教授提供了沙尘起沙模式 以及对本研究工作的帮助。感谢中国气象局提供了观测的地 面台站数据,中国环保局、东亚酸雨网(EANET)提供了 站点观测的 PM10 和细颗粒物浓度。

#### 参考文献(References)

- Bell M L, Levy J K, Lin Z. 2008. The effect of sandstorms and air pollution on cause-specific hospital admissions in Taipei, Taiwan [J]. Occupational and Environmental Medicine, 65 (2): 104–111.
- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations [J]. J. Geophys. Res., 101 (D3): 7251–7268.
- Chou M D, Suarez M J. 1994. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models [R]. NASA Tech Memo. 85.
- Ginoux P, Prospero J M, Torres O, et al. 2004. Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation [J]. Environmental Modelling & Software, 19 (2): 113–128.
- 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.

- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. Atmos. Environ., 39: 6957–6975.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 103–120.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon. Wea. Rev., 134: 2318–2341.
- Huneeus N, Schulz M, Balkanski Y, et al. 2011. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 7781–7816.
- Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. 2009. Threshold friction velocities of saltation sand particles for different soil moisture conditions in the Taklimakan Desert [J]. SOLA, 5: 184–187.
- Kang J Y, Yoon S C, Shao Y P, et al. 2011. Comparison of vertical dust flux by implementing three dust emission schemes in WRF/Chem [J]. J. Geophys. Res., 116(D9): D09202, doi:10.1029/2010jd014649.
- Kimura R, Shinoda M. 2010. Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia [J]. Geomorphology, 114: 319–325.
- Klose M, Shao Y. 2012. Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12: 7309–7320.
- Kurosaki Y, Mikami M. 2007. Threshold wind speed for dust emission in East Asia and its seasonal variations [J]. J. Geophys. Res., 112 (D17): D17202, doi:10.1029/2006jd007988.
- 雷航,林朝晖,孙建华. 2005. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其 模拟试验 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 669-683. Lei Hang, Lin Zhaohui, Sun Jianhua. 2005. An improved dust storm prediction system and its simulation experiments [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 669-683.
- Li X L, Zhang H S. 2011. Research on threshold friction velocities during dust events over the Gobi Desert in northwest China [J]. J. Geophys. Res., 116 (D20): D20210, doi:10.1029/2010jd015572.
- 李晓岚, 张宏升. 2012. 内蒙古科尔沁沙地起沙近地层动力学阈值的试 验研究 [J]. 高原气象, 31 (1): 38-46. Li Xiaolang, Zhang Hongsheng. 2012. Study on the threshold friction velocity of dust emission in Horqin Sand Land Area in the Inner Mongolia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (1): 38-46.
- Lin Z H, Levy J K, Lei H, et al. 2012. Advances in disaster modeling, simulation and visualization for sandstorm risk management in North China [J]. Remote Sensing, 4: 1337–1354.
- Marticorena B, Bergametti G. 1995. Modeling the atmospheric dust cycle. 1. Design of a soil-derived dust emission scheme [J]. J. Geophys. Res., 100 (D8): 16415–16430.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. J. Geophys. Res., 102 (D14): 16663–16682.
- Park S U, Park M S, Chun Y. 2010. Asian dust events observed by a 20-m monitoring tower in Mongolia during 2009 [J]. Atmos. Environ., 44: 4964–4972.
- Shao Y P. 2004. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data [J]. J. Geophys. Res., 109(D10): D10202, doi:10.1029/

2003jd004372.

- Shao Y P. 2008. Physics and Modelling of Wind Erosion [M]. Dordrecht: Springer, 467pp.
- Shao Y P, Dong C H. 2006. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring [J]. Global and Planetary Change, 52: 1–22.
- Shao Y P, Lu H. 2000. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity [J]. J. Geophys. Res., 105 (D17): 22437–22443.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note. NCAR/TN-475+STR, 113.
- Shao Y P, Yang Y, Wang J J, et al. 2003. Northeast Asian dust storms: Realtime numerical prediction and validation [J]. J. Geophys. Res., 108 (D22): 4691, doi:10.1029/2003jd003667.
- Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science [J]. Aeolian Research, 2 (4): 181–204.
- 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2003. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数 值预测系统及其应用试验 [J]. 气候与环境研究, 8 (2): 125-142. Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2003. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to North China and its applications [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (2): 125-142.
- Uno I, Wang Z, Chiba M, et al. 2006. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview [J]. J. Geophys. Res., 111 (D12): D12213, doi:10.1029/2005jd006575.
- Wang Y Q, Zhang X Y, Gong S L, et al. 2008. Surface observation of sand and dust storm in East Asia and its application in CUACE/Dust [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8: 545–553.
- White B R. 1979. Soil transport by winds on Mars [J]. J. Geophys. Res., 84 (B9): 4643-4651.
- Xu X K, Levy J K, Lin Z H, et al. 2006. An investigation of sand-dust storm events and land surface characteristics in China using NOAA NDVI data [J]. Global and Planetary Change, 52 (1–4): 182–196.
- 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 2000. 关于我国华北沙尘天气的成因与治 理对策 [J]. 地理学报, 55 (5): 513-521. Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu

Jiyuan, et al. 2000. Causes of sand-stormy weather in Northern China and contral measures [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (5): 513–521.

- 张宏升,朱好,彭艳,等. 2007. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获 取与分析研究 [J]. 气象学报,65 (5): 744-752. Zhang Hongsheng, Zhu Hao, Peng Yan, et al. 2007. Experiment on dust flux during dust storm periods over sand desert area [J]. Acta Meterologica Sinica (in Chinese), 65 (5): 744-752.
- 张仁健,石广玉,金井豊,等. 2002. 北京 2002 年春季沙尘暴天气的 TSP 质量浓度和数浓度谱分布 [J]. 过程工程学报,2 (增刊): 289-292. Zhang Renjian, Shi Guangyu, Yutaka Kanai, et al. 2000. TSP mass concentration and number concentration of particles in dust storm weather in 2002 spring of Beijing [J]. The Chinese Journal of Process Engineering (in Chinese), 2 (Suppl.): 289-292.
- 张时煌, 彭公炳, 黄攻. 2004a. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类 特征提取与数据融合 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 65-79. Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. 2004a. The feature extraction and data fusion of regional soil textures based on GIS techniques [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 65-79.
- 张时煌, 彭公炳, 黄攻. 2004b. 基于遥感与地理信息系统支持下的地表 植被特征参数反演 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 80-91. Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. 2004b. Derivation of earth surface parameters in vegetation properties supported by GIS techniques [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 80-91.
- 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:
  1. Network observations [J]. J. Geophys. Res., 108 (D9): 4261, doi:10.1029/2002JD002632.
- Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al. 2006. An assessment of dust emission schemes in modeling East Asian dust storms [J]. J. Geophys. Res., 111 (D5): D05S90, doi:10.1029/2004jd005746.
- Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al. 2008. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8 (4): 787-798.