

# 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验

雷航<sup>1,2</sup> 林朝晖<sup>1</sup> 孙建华<sup>1</sup>

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 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要** 在中尺度气象模式最新版本 MM5V3.7 的基础上, 通过与一个起沙模式的耦合, 建立了一个新的中国科学院大气物理研究所 (IAP/CAS) 沙尘天气数值预测系统 (IAPS 2.0)。该系统与 IAP 原有的沙尘天气数值预测系统 (IAPS 1.0) 最主要的差异在于气象模式中陆面过程模式的改进。利用改进前后两个版本的预测系统对 2002 年 4 月发生在我国北方地区的两次较强沙尘 (暴) 过程进行了数值模拟, 并与观测实况进行了比较, 结果表明改进的系统对沙尘天气的预测能力比改进前的版本有显著的改进, 这主要是由于新的陆面模式改善了地表土壤湿度的模拟, 进而改进了决定起沙与否的关键因子临界摩擦速度的模拟, 从而提高了预测系统对起沙范围和强度的模拟效果。总的说来, 采用了更为先进的 Noah 陆面模式的 IAP 沙尘 (暴) 天气数值预测系统对中国北方春季沙尘 (暴) 天气过程具有更好的模拟能力。

**关键词** 沙尘暴 起沙机制 陆面模式 数值预测

**文章编号** 1006-9585 (2005) 03-0669-15 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

## An Improved Dust Storm Prediction System and Its Simulation Experiments

LEI Hang<sup>1,2</sup>, LIN Zhao-Hui<sup>1</sup>, and SUN Jian-Hua<sup>1</sup>

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

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

**Abstract** An improved IAP integrated dust-storm prediction system (IAPS 2.0) has been developed at the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, through the coupling of the latest version of meso-scale meteorological model (MM5V3.7) with a physical based wind erosion model. The main improvement of IAPS 2.0 over the original IAP dust-storm prediction system (IAPS 1.0) is the substitution of OSU Oregon State University land surface model with the improved Noah land surface model within MM5. Both versions of IAP dust-storm prediction system (IAPS 2.0 and IAPS 1.0) have all been employed to simulate the two typical dust-storm episodes occurred in North China during April 2002. Verification results show that the simulated dust-affected regions by IAPS 2.0 agree quite well with the observation, however, the dust-affected regions simulated by IAPS 1.0 are generally broader than the observation. Further analysis suggests that with the better representation of land surface processes, the simulation of soil moisture by IAPS 2.0 have been significantly improved, and this may lead to the improvement in simulating the threshold friction velocity, which is the key parameter for surface dust emission. In summary, with the incorporation of more advanced land surface model (Noah), the improved IAP dust-storm prediction

**收稿日期** 2005-08-10 收到, 2005-08-20 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金委资助项目 40233027、国家财政部“西北地区土壤水分、风蚀和沙尘监测研究”项目和中国科学院知识创新方向性项目 KZCX3-SW-221

**作者简介** 雷航, 男, 研究生, 主要从事沙尘暴起沙的物理和数值模拟、以及陆气相互作用的数值模拟研究。

E-mail: lh@mail.iap.ac.cn

system (IAPS 2.0) shows better capability in simulating the spring-time dust-storm activities over north part of China

**Key words** dust storm, dust emission mechanism, land surface model, numerical simulation

## 1 引言

沙尘暴作为一种严重的气象环境灾害,给我  
国国民经济和人民生命财产造成了很大的损失。  
沙尘暴天气多发于中国北方春季,与这一地区的  
气候和生态条件紧密相关。从西北经华北到东北  
的北方干旱、半干旱区域,共有沙漠、戈壁和沙  
漠化土地面积约为  $1.6513 \times 10^8 \text{ km}^2$ , 占国土总面  
积的 17.12%。广大的沙源地为我国的沙尘暴天气  
的发生提供了充足的条件<sup>[1]</sup>。每年的春季,由于  
土壤解冻,植被尚未完全恢复,大风天气多见,  
因而沙尘暴在这一地区频发。当强冷锋经过干燥  
无植被的地表时,伴随着热力不稳定,强风卷起  
大量沙尘,就会发生强沙尘暴现象。严重的可以  
造成人民生命财产的重大损失,在城市里还会严  
重影响社会和经济活动。

近年来,有关我国北方地区沙尘(暴)的研  
究已有许多。在对沙尘暴天气气候特征研究方面,  
如周自江等<sup>[1]</sup>利用我国台站沙尘天气观测资料研  
究了我国近 47 年来的沙尘暴气候特征,林朝晖  
等<sup>[2]</sup>分析研究了 2003 年我国春季沙尘暴天气异常  
的气候背景,范可等<sup>[3]</sup>用遥相关的方法来研究华  
北的沙尘暴与南极涛动的关系。在沙尘天气数值  
模拟研究方面,国内外不同学者也有很多重要工  
作。中国科学院大气物理研究所的王自发等<sup>[4]</sup>发  
展了一个用于模拟东亚地区沙尘输送的数值模式,  
澳大利亚的邵亚平等<sup>[5,6,7]</sup>则根据风洞实验的结果  
发展了具有清晰风蚀物理学基础的起沙模式和输  
送模式,并且进一步将其应用于东北亚沙尘天气  
的数值模拟,取得了良好的效果<sup>[8-11]</sup>。在此基  
础上通过结合卫星遥感反演的近年中国区域的植  
被和土壤特征参数场<sup>[12]</sup>,孙建华等<sup>[13,14]</sup>发展了中  
国科学院大气物理研究所的沙尘暴模拟和预测系  
统。事实上,对沙尘暴天气的模拟和预测涉及到很  
多问题,一般包括对下垫面起沙临界条件的确定,  
对影响沙尘过程的天气系统的模拟,以及对沙尘  
输送过程的模拟。对此国际上也开展了沙尘模式  
比较计划(DMIP),以期对现有国际上沙尘模式

进行比较,揭示其优缺点,最终提高模式对沙尘  
天气的模拟和预测能力。DMIP 的初步研究结果表  
明不同的模式对沙尘天气的模拟结果存在较大差  
异,最主要是由于其中起沙模式的不同引起的,  
不同的起沙参数化方案会对沙尘模式的模拟结果  
产生显著影响。

自中国科学院大气物理研究所沙尘预测模式  
建立以来,已经成功地应用于我国北方地区沙尘  
天气的数值模拟,证明该模式具有优良的性能。  
但该模式也存在着一定的不足之处,如在某些地  
方存在着虚假的起沙源地等。在现有的中国科学  
院大气物理研究所的沙尘预报模式中,采用的是  
邵亚平等<sup>[9,10]</sup>的起沙模式,其中临界摩擦速度场  
是判别起沙的标准,而它的计算主要取决于下垫  
面土壤湿度。在现有的沙尘模拟系统中,土壤湿  
度场是陆面模式的预报结果,陆面模式还通过模  
拟地气间的能量和物质的交换,影响着天气系统,  
进而影响到沙尘起沙的动力学条件,由此可见,  
沙尘预报模式中,陆面过程正确表述将对沙尘暴  
天气的模拟有着重要的影响。

为了提高现有的 IAP 集成沙尘预报系统对中  
国北方春季沙尘暴天气的模拟效果和预报能力,  
本研究选用了包含有更为先进的陆面模式(Noah  
LSM)的 MM5 系统通过与邵亚平发展的起沙模  
式和输送模式进行了耦合。建成了新的中国科学  
院大气物理研究所沙尘(暴)数值预测系统  
(IAPS 2.0)。

随后,利用改进前后的 IAP 沙尘集成预测系  
统(IAPS 1.0 和 IAPS 2.0)对 2002 年春季中国  
北方的两次沙尘暴天气过程进行了数值模拟,并  
对模拟试验结果进行了比较分析。以探讨陆面过  
程模式对我国北方地区沙尘天气过程模拟的影响。

## 2 IAP 沙尘天气预测系统及其改进

沙尘天气的模拟和预测除了需要模拟出天气  
系统的演变,而且需要正确反映下垫面参数的变  
化,以确定沙尘的起沙条件。一个完整的沙尘暴  
预测系统至少应该包括 5 个部分:天气模式、陆

面模式、起沙模式、输送模式和下垫面地理信息系统数据集 (GIS 数据集)。有关原有的 IAP 沙尘 (暴) 天气预测系统的详细介绍可见文献 [13] 和 [14]。本文建立的新一代 IAP 沙尘 (暴) 数值预测系统 (IAPS 2.0) 与原来的沙尘天气预测系统 (IAPS 1.0), 具有相同的框架结构, 主要改进在于引入了更为先进的陆面模式。

图 1 给出了 IAPS 2.0 的框架图, 该集成系统由各前处理模块、耦合模块、后处理模块组成。虚线框以内的大气模式、陆面模式、起沙模式和输送模式是耦合在一起进行积分的。在集成系统运行的开始, 前处理模块读入遥感的植被、地形资料和气象资料形成模式运行的初值和边值条件,

如图 1 中箭头所指方向, 各个模块读入所需的初值, 依次开始积分。下面我们简要介绍集成预测系统中各个主要模块。

### 2.1 模拟系统的输入资料

沙尘模拟系统气象资料的输入采用 MM5-V3 的资料读入方式, 这里不再详述。起沙模式需要的陆面参数为土壤类型、土地利用、植被类型、植被高度、叶面积指数和植被覆盖率。其中土壤类型和植被类型数据国外部分是取自美国地质勘察 (USGS) 资料, 国内部分取自 1:4 000 000 中国土壤图数据资料, 其他植被资料源自遥感数据。原始数据的分辨率为  $3 \times 3$ , 经过处理, 而得以适合于模式分辨率的数据。

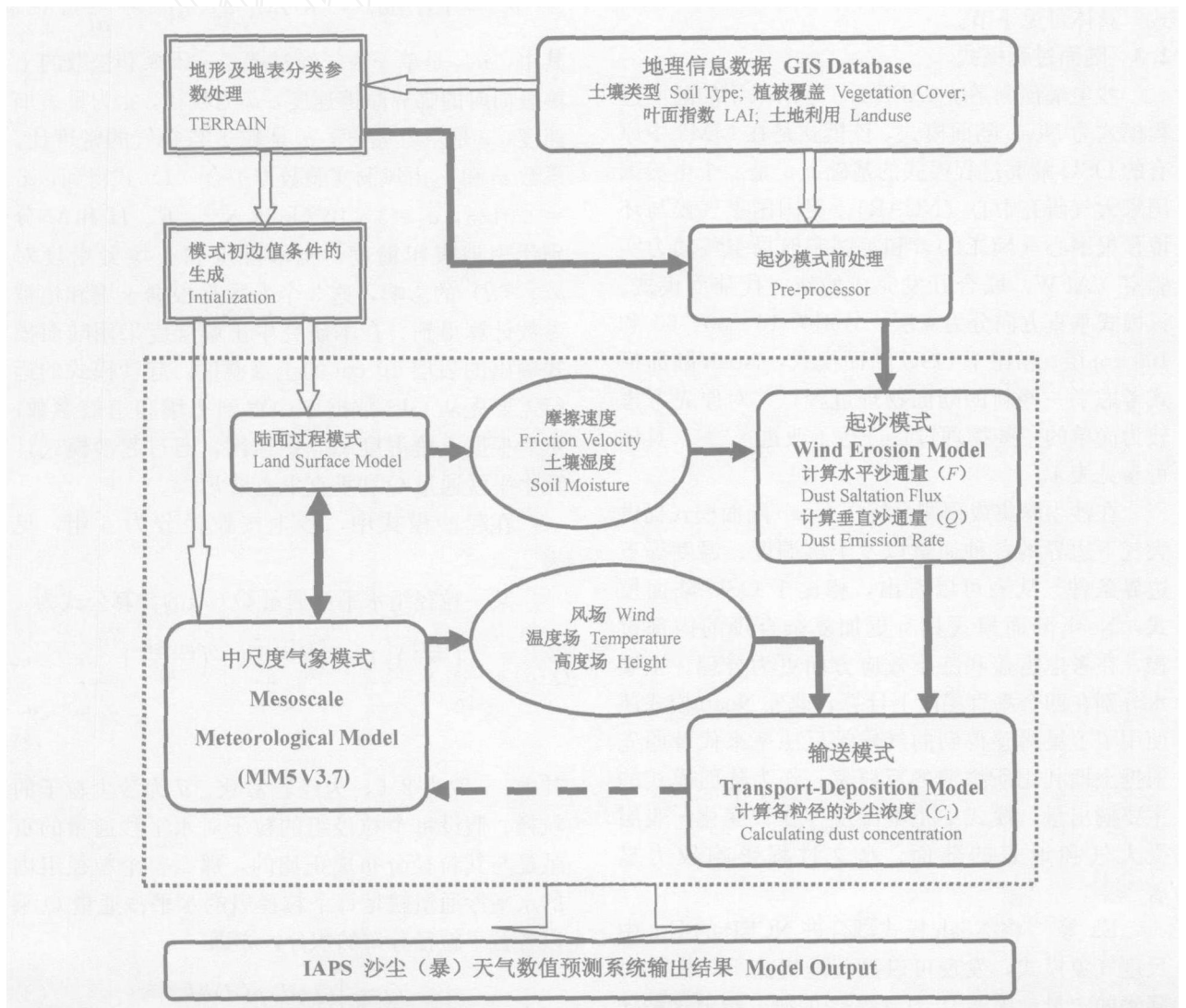


图 1 中国科学院大气物理研究所沙尘 (暴) 天气预测系统 IAPS 2.0 框架

Fig. 1 Framework of the integrated IAP dust-storm modeling and prediction system (IAPS 2.0)

## 2.2 中尺度气象模式简介

IAP 2.0 沙尘预测模式所应用的天气模式是最新版本的 MM5 中尺度气象模式 (MM5V3.7)。该模式具有非静力的动力框架,同时具有多重嵌套的能力,以及四维资料同化的能力。有关模式的详细说明可以参考模式的技术文档<sup>[15]</sup>。

IAPS 2.0 中,所采用的是 MM5 模式的非静力方案,边界层方案采用 MRF 方案 (NCAR Medium\_range Forecast model);水汽方案采用半隐式方案、积云对流方案用 Grell 方案、侧边界条件选用的是张弛流入流出边界条件、辐射方案选用简单辐射方案,具体可参考文献 [15]。而其中的陆面过程模式则为最新发展的 Noah 陆面过程模式,具体可见下节。

## 2.3 陆面过程模式

沙尘暴预测系统 IAPS 2.0 中所采用的陆面过程模式为 Noah 陆面模式,该模式是在 MM5 中原有的 OSU 陆面过程模式的基础上,是一个由美国国家大气研究中心 (NCAR)、美国国家气候与环境预报中心 (NCEP),和美国宇航局空气动力实验室 (AFW) 联合开发完成的新一代陆面模式。该模式垂直方向分为 4 层,分别为 10、30、60 和 100 cm 层。相比于 OSU 陆面模式, Noah 陆面模式考虑了一些新的陆面物理过程,并对原先考虑较为简单的一些物理过程进行了改进<sup>[16~21]</sup>,具体可参见表 1。

在沙尘暴集成预测系统中 Noah 陆面模式提供大气下边界的各种通量以及土壤湿度、温度等下边界条件。从表可以看出,相比于 OSU 陆面模式, Noah 陆面模式具有更加复杂合理的内部过程,在考虑雪盖和冻土效应方面更为合理。土壤水分别在四个垂直层次上计算,此外 Noah 模式还使用了卫星遥感得到的气候学反照率来代替原先根据土地利用所推演的反照率。作为陆面模式的主要输出量,模式中土壤湿度存在日变化,表层受大气和地表的陆面、水文过程影响较为显著<sup>[20]</sup>。

Ek 等<sup>[16]</sup>将 Noah 模式耦合进 NCEP 的 Eta 中尺度气象模式,发现可以显著地提高 Eta 模式对降水的定量预报能力。Lo 等<sup>[22]</sup>的研究指出这种陆面过程模拟提高了珠江三角洲地区中尺度系统的模拟。

## 2.4 起沙模式

IAPS 2.0 沙尘 (暴) 预测系统中采用的起沙和输送方案是取之于邵亚平发展的沙尘模式<sup>[9,10]</sup>,在该模式中临界摩擦速度具有重要的作用,是否起沙是通过比较摩擦速度 ( $u^*$ ) 和临界摩擦速度 ( $u_{*c}$ ) 的大小来决定的,当  $u^*$  大于  $u_{*c}$  可以起沙,当  $u^*$  小于  $u_{*c}$  则不能起沙。临界摩擦速度是一个表征土壤表面阻抗风蚀能力的物理量,它与土壤粒子的粒径、地表性质和土壤含水率等多种因素有关。

本研究中,临界摩擦速度的计算采用如下方法:

$$u_{*c}^* = RHM u_{*c}^0 = RHM \sqrt{a_1 \left( \rho_p g d + \frac{\alpha_2}{d} \right)}, \quad (1)$$

其中,  $u_{*c}^0$  是单一粒子经过裸露、干燥和松散的土壤表面时的临界摩擦速度,  $d$  为粒径,  $g$  为重力加速度,  $\rho$  是空气密度,  $\rho_p$  是粒子与空气的密度比。系数  $a_1$  和  $a_2$  由风洞实验数据拟合 (1) 式得到,  $a_1 = 0.0123$ ,  $a_2 = 3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$ 。  $R$ 、 $H$  和  $M$  分别代表地表粗糙度、土壤湿度和土壤紧密度对  $u_{*c}^0 (d)$  的影响,这 3 个参数是根据土壤和植被参数计算得到。在本研究中土壤湿度采用陆面模式输出的表层 10 cm 的土壤湿度。起沙模式的运行需要先 GIS 数据库中得到土壤和植被参数,然后根据土壤湿度和摩擦速度,通过起沙模式计算水平沙通量  $Q$  和垂直尘通量  $F$ 。

在起沙模式中,沙尘按粒径分为 6 组,见表 2。

某一粒径组水平沙通量  $Q_i (d)$  的计算公式为

$$Q_i (d) = \begin{cases} \left( \frac{c u_*^3}{g} \right) \left[ 1 - \frac{u_* (d)}{u_*} \right] \left[ 1 + \left( \frac{u_* (d)}{u_*} \right)^2 \right], & u_* > u_{*c} \\ 0, & u_* \leq u_{*c} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $c$  取为 2.6, 为经验常数,  $d$  为沙尘粒子的粒径。假设每个粒径组的粒子对水平沙通量的贡献是与其粒径分布成正比的,那么整个粒径组内的水平沙通量就是每个粒径组的水平沙通量  $Q_i$  乘以各粒子粒径分布的积分,亦即

$$Q = \int Q_i (d) p (d) d, \quad (3)$$

其中,  $p (d)$  是粒径为  $d$  粒子的密度函数。对于粒径特别大和特别小的粒子,因其临界摩擦速度

表 1 Noah 和 OSU 陆面过程模式中物理过程参数化方案的差异

Table 1 Differences of parameterization of physical processes between Noah and OSU land surface model

陆面物理过程 Physical Processes	Noah 陆面模式 Noah LSM	OSU 陆面模式 OSU LSM	参考文献 Reference
冻土的物理学 Frozen soil physics	考虑 Yes	未考虑 No	Koren et al. [17]
“碎”雪盖效应 Fractional snow cover	考虑 Yes	未考虑 No	Koren et al. [17]
雪密度随时间的变化 Time-varying snow density	考虑 Yes	未考虑 No	Koren et al. [17]
雪盖区域粗糙度的计算方法 Roughness length calculation over snow covered area	新的计算方案 New	旧方案 Old	F. Chen et al. [18]
雪盖下方的热通量 Heat flux Under snow pack	考虑 Yes	未考虑 No	Lunardini [19]
雪面返照率的计算方法 Snow albedo calculation	新的计算方案 New	旧方案 Old	Robinson and Kukla. [20]
土壤热传导率的计算 New soil thermal conductivity	新的计算方案 New	旧方案 Old	Peters-Lidard et al. [21]
植被对热通量的影响 Vegetation reduction of thermal condition	考虑 Yes	未考虑 No	Peters-Lidard et al. [21]
植物根的深度随植被类型的变化 Rooting depth dependent on vegetation types	考虑 Yes	未考虑 No	Peters-Lidard et al. [21]

表 2 起沙模式中土壤粒径分类

Table 2 The category of soil particles in the dust model

土壤按粒径分类 Particle Size Category/ $\mu\text{m}$	名称 Name	主要起沙方式 Main Emission Mechanisms	是否可输送 Directly Transport
$d > 2$	黏土 Clay	空气拖曳力的夹卷起沙 Aerodynamic lift	是 Yes
$2 < d < 11$	细粉土 Tiny dust	粒子跃移碰撞起沙 Saltation bombardment	是 Yes
$11 < d < 22$	中粉土 Mid dust	粒子破裂破碎起沙 Aggregates disintegration	是 Yes
$22 < d < 52$	大粉土 Large dust	起沙微弱 Slight emission	否 No
$52 < d < 90$	细沙 Tiny Sand	起沙微弱 Slight emission	否 No
$90 < d < 125$	中沙 Mid Sand	起沙微弱 Slight emission	否 No

较大， $Q_i(d)$  为 0。考虑植被覆盖以及地面粗糙度对沙尘起沙的影响，水平沙通量  $Q_m$  可表示为  $Q_m = Q \times E_s \times E_v$ 。其中  $E_v$  扣除植被覆盖影响后的可风蚀总面积； $E_s$  为扣除地面粗糙度（如砂砾、卵石和岩石等）影响后的可风蚀总面积。在 IAPS 2.0 中，模式格点上的  $E_s$  和  $E_v$  由 GIS 数据在起沙模式的前处理中计算得到。

对于某个粒径组的粒子，其垂直尘通量  $F_i(d)$  可由水平沙通量  $Q_m$  计算而得，亦即

$$F_i(d) = \frac{C g f_b}{2 p} \left[ 0.24 + C u \cdot \sqrt{\frac{p}{N p}} \right] Q_m. \quad (4)$$

图 2 给出了沙尘模块的结构图，从图中可以清晰地看出陆面过程及其参数对沙尘起沙的重要影响。

起沙模式计算得到的垂直沙通量，在沙尘输送模式中从底层向上传输。

如表 2 所述，起沙模式中沙尘粒径分为 6 组，总的沙尘浓度等于各粒径组的沙尘浓度之和，即

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N C_i. \text{ 沙尘浓度的预报方程为下式。}$$

$$\frac{\partial p_s c_i}{\partial t} + \frac{\partial p_s u c_i}{\partial x} + \frac{\partial p_s v c_i}{\partial y} + \frac{\partial c_i}{\partial z} (p_s + g w_{ii}) = p_s \frac{\partial}{\partial x} K_{ph} \frac{\partial c_i / z}{\partial x} + p_s \frac{\partial}{\partial y} K_{ph} \frac{\partial c_i / z}{\partial y} + \frac{g^2}{p_s} \frac{\partial}{\partial z} K_{pz} \frac{\partial c_i / z}{\partial z}, \quad (5)$$

相应的下边界条件可见 (6) 及 (7) 式：

$$c_i (p_s + g w_{ii}) - \frac{g^2}{p_s} K_{pz} \frac{\partial c_i / z}{\partial z} = g (F_i + F_d), \quad (6)$$

$$\frac{\partial c_i / z}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

式 (5) ~ (7) 中， $K_{ph}$  和  $K_{pz}$  分别是水平和垂直方向的扩散系数，这里垂直扩散系数  $K_{pz}$  是粒径的

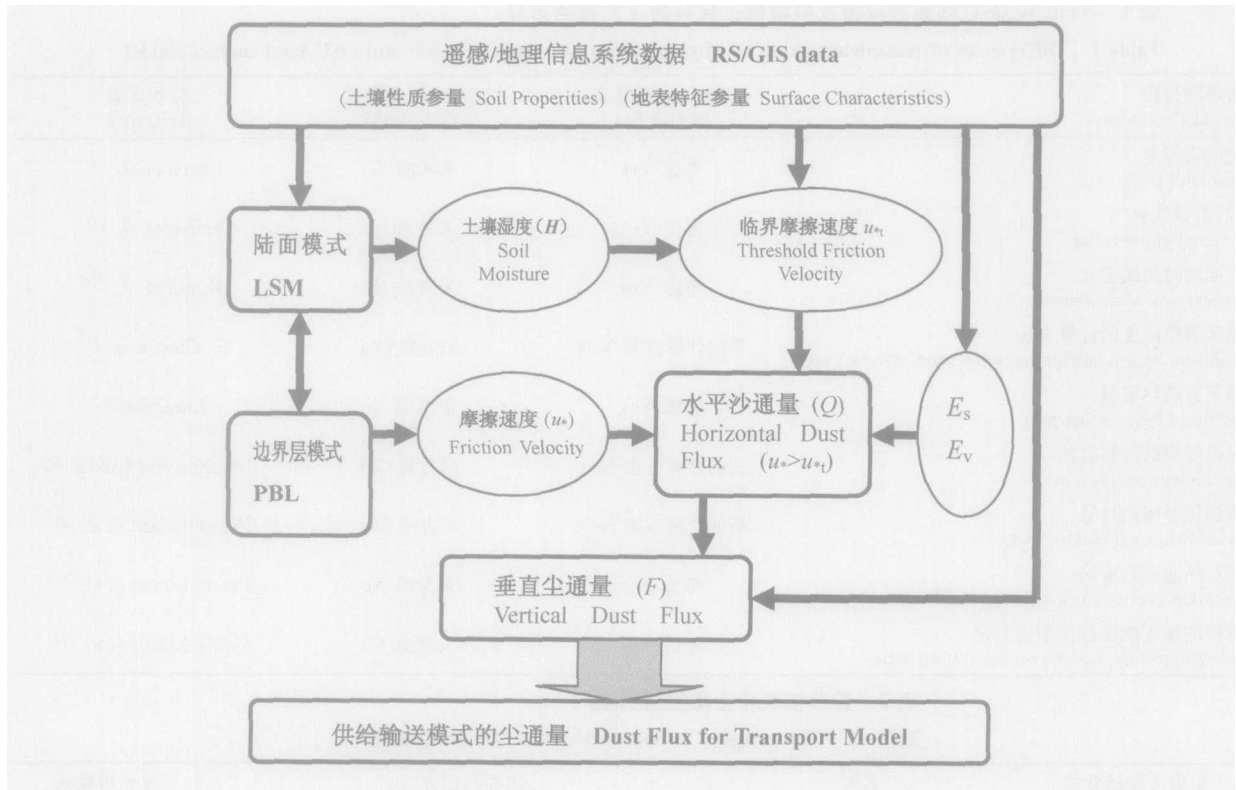


图2 IAPS 2.0 中的沙尘起沙模块示意图

Fig. 2 Schematic map for the Wind-erosion module for IAPS 2.0

函数;  $w_{ii}$  和  $F_i$  是各粒径的沉降速度和垂直尘通量,  $F_{di}$  则代表考虑沙尘粒子的干沉降通量。对于沙尘输送模式而言, 其主要的物理过程有平流、扩散以及干沉降过程<sup>[6-8]</sup>。

### 3 试验模拟方案

为了检验改进的 IAP 沙尘暴预测系统 (IAPS 2.0) 对我国北方春季沙尘暴天气的模拟能力, 我们选取 2002 年春季发生在中国北方地区的两次沙尘 (暴) 天气过程, 利用 IAPS 2.0 对其进行了模拟, 并与 IAPS 1.0 的结果进行了比较。

模式区域的中心都取在 (40°N, 115°E), 模式的水平分辨率为 45 km, 模式纬向共有 150 个格点, 经向有 120 个格点, 模式垂直方向为 23 层。模拟的范围主要包括蒙古国、内蒙古以及华北和东北地区。气象模式的初始场和边界场均取自 2.5°×2.5°的 NCEP 再分析资料。模式模拟过程每 6 h 更新一次侧边界场。在选取的两次过程中, 一次范围较大, 持续时间较长 (2002 年 4 月

5~9 日); 另一次, 范围较小、持续时间较短 (2002 年 4 月 19~20 日)。

### 4 模拟结果及其比较分析

2002 年春季, 沙尘 (暴) 天气在中国北方频繁发生, 气象记录显示不同类型的沙尘暴天气每 2~5 天就出现一次。有的强沙尘暴事件的影响范围可以达到覆盖整个北方地区, 有的则仅限于西北或东北地区。本文就前述两次沙尘天气过程进行数值模拟, 并进行比较分析。

#### 4.1 2002 年 4 月 5~9 日的沙尘 (暴) 天气过程

图 3 给出了 2002 年 4 月 5~9 日强沙尘暴天气过程的影响范围<sup>[23]</sup>。从图中可以发现, 在 2002 年 4 月 5~9 日期间, 我国新疆南部、内蒙古中西部和东部偏南地区、青海西北部、甘肃西北部、宁夏北部、陕西北部、河北北部、京津地区、黑龙江中部、辽宁大部等地出现扬沙天气。其中南疆盆地南部和东部、青海西北部、内蒙古中部和东部偏南地区、河北北部、辽宁中部出现了沙尘

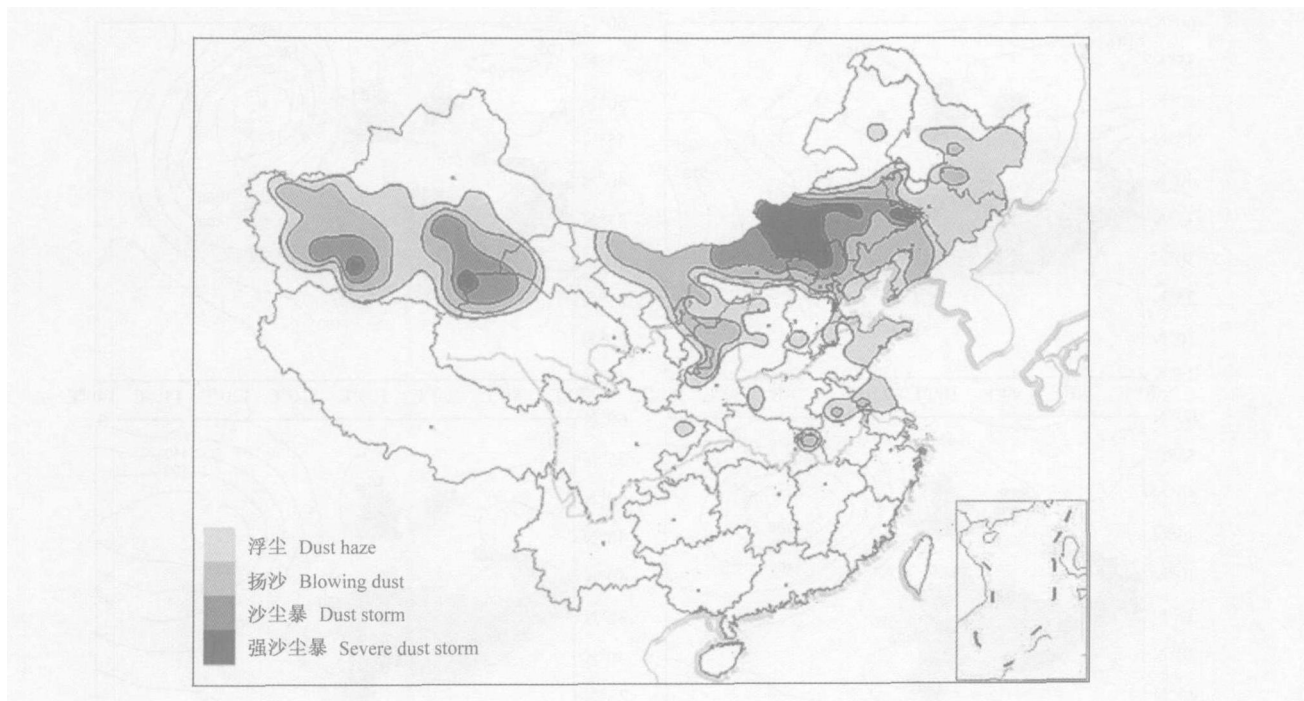


图3 2002年4月5~9日沙尘(暴)天气的影响范围<sup>[23]</sup> (其中阴影代表沙尘影响区域)  
Fig. 3 Dust effected areas during 5 - 9 April 2002<sup>[23]</sup>

暴或强沙尘暴。从图中还可以看到，这次沙尘过程的主要影响区域为我国华北，东北和新疆地区，而在西北的甘肃和青海东部地区，并没有明显的沙尘天气过程记录。

图4则给出了对应于此次沙尘过程天气系统的演变过程。从850 hPa高度场的演变可以看出，4月5日08时(图4)，气旋中心位于(50°N, 107°E)随着该系统东移发展，华北地区受气旋冷锋影响，产生沙尘过程。到6日(图4)，气旋系统中心已经东移至(49°N, 117°E)附近，并且发展到最强，这时我国华北大部分地区遭受强沙尘暴天气的影响，受此影响，我国北方大部分地区都出现了扬沙或浮尘，其中张家口、承德两市北部还出现了沙尘暴或强沙尘暴对应于图3，可以看到在河北北部和内蒙古中部地区有明显的沙尘观测记录，同时在新疆以北已经有一高压系统产生；随后到7日(图4)，气旋系统中心继续东移至(47°N, 121°E)附近，并呈现衰减趋势，新疆以北的高压系统已经加强并侵入我国新疆北部地区，内蒙古西部地区已经在高压脊控制之下，受此影响，在甘肃以北的内蒙西部地区发生了强沙尘暴天气。至8日气旋系统已经南移至(45°N,

125°E)附近(图3d)，强度大大衰减，西北的高压系统进一步加强，我国西北地区已经完全在高压系统的控制之下。至9日气旋系统进一步南移减弱，西北的高压系统也迅速减弱，预示着本次沙尘过程的结束。总体而言，这次沙尘暴过程的特点是影响的天气过程较为复杂，持续时间较长。

图5是IAPS 2.0模拟的2002年4月5~9日沙尘天气过程的平均沙尘沉降量。与图3的观测实况比较可知，IAPS 2.0较好地模拟出了本此沙尘天气过程的影响区域，如发生在我国华北的沙尘暴天气影响区域，但是新疆、内蒙古和甘肃的交界区域也出现了虚假的起沙现象。为比较起见，图6给出了IAPS 1.0模拟的2002年4月5~9日平均沙尘沉降量的分布，与图3的观测实况对比，可以发现，相对于IAPS 2.0而言，IAPS 1.0模拟的沙尘的强度和范围都有明显的偏大，尤其在西北地区有较大的误差，甘肃等一些地区出现了虚假的起沙模拟，而IAPS 2.0结果，在这一地区模拟的相对更为合理。

从图5和图6的比较可知，通过引入更为完善的Noah陆面过程模式，IAPS 2.0对2002年4



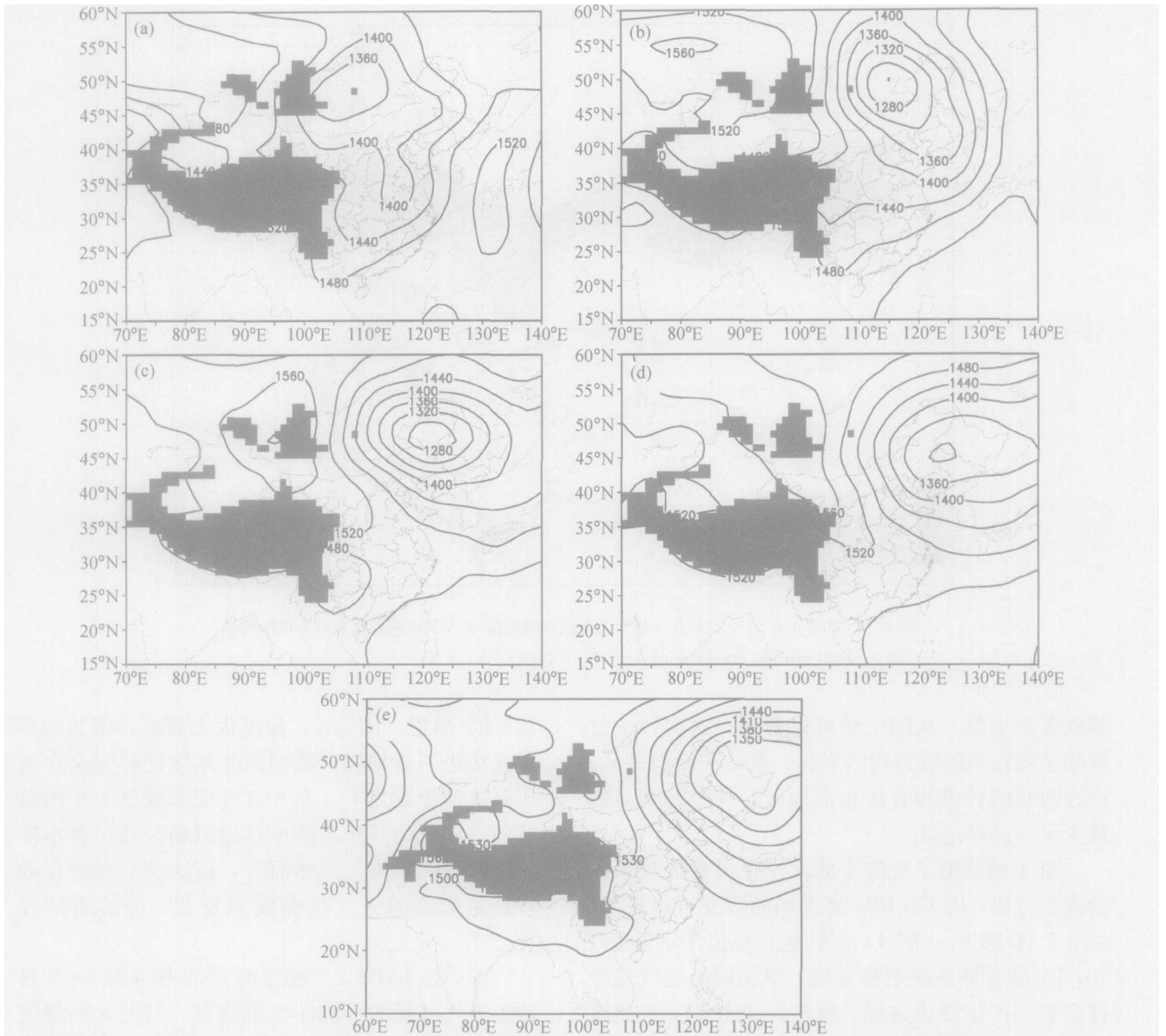


图4 NCEP再分析资料2002年4月5~8日850 hPa高度场(阴影部分代表地形高度>1 500 m,单位:gpm,北京时间)(a)5日08时;(b)6日08时;(c)7日08时;(d)8日08时;(e)9日08时

Fig. 4 850 hPa Geopotential at 5 - 8 April 2002 from NCEP reanalysis data (units: gpm) . (a) 0800 LST 5 April; (b) 0800 LST 6 April; (c) 0800 LST 7 April; (d) 0800 LST 8 April; (e) 0800 LST 9 April

月5~9日沙尘影响区域模拟有显著的提高。由2.4节可知, IAPS 2.0中沙尘起沙的判据取决于摩擦速度 $u^*$ 与临界摩擦速度的相对大小,只有当 $u^*$ 大于 $u_{*c}$ 时,才可能发生起沙过程,两者差异的大小也近似反映了起沙可能性的强弱。为了能反映两模式对起沙模拟的差异,定义变量 $K$ ,该变量大致上反映了IAPS 1.0和IAPS 2.0两模式所模拟的 $(u^* - u_{*c})$ 在扣除植被和地面粗糙度影响后,在可风蚀区域差异的空间分布情况。该变量

表达式为

$$K = \begin{cases} [(u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} - (u^* - u_{*c})_{IAPS2.0}] \cdot E_v \cdot E_s, & (u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} > 0, (u^* - u_{*c})_{IAPS2.0} > 0, \\ (u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} \cdot E_v \cdot E_s, & (u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} > 0, (u^* - u_{*c})_{IAPS2.0} < 0, \\ -(u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} \cdot E_v \cdot E_s, & (u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} < 0, (u^* - u_{*c})_{IAPS2.0} > 0, \\ 0, & (u^* - u_{*c})_{IAPS1.0} < 0, (u^* - u_{*c})_{IAPS2.0} < 0, \end{cases} \quad (8)$$



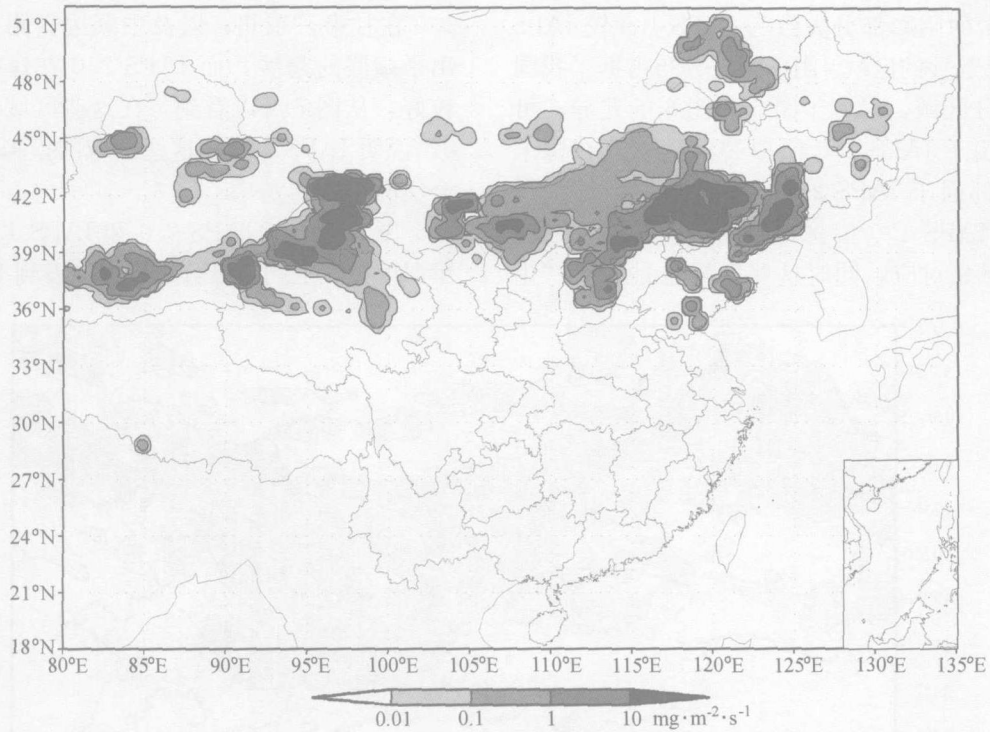


图5 模式 IAPS 2.0 模拟的 2002 年 4 月 5~9 日平均沙尘沉降量的分布 (图中阴影可以近似代表沙尘的影响区域)

Fig. 5 Distribution of averaged dust deposition during 5 - 9 April 2002, as simulated by the improved IAP dust-storm prediction system (IAPS 2.0) (with shaded areas indicating the dust-affected regions)

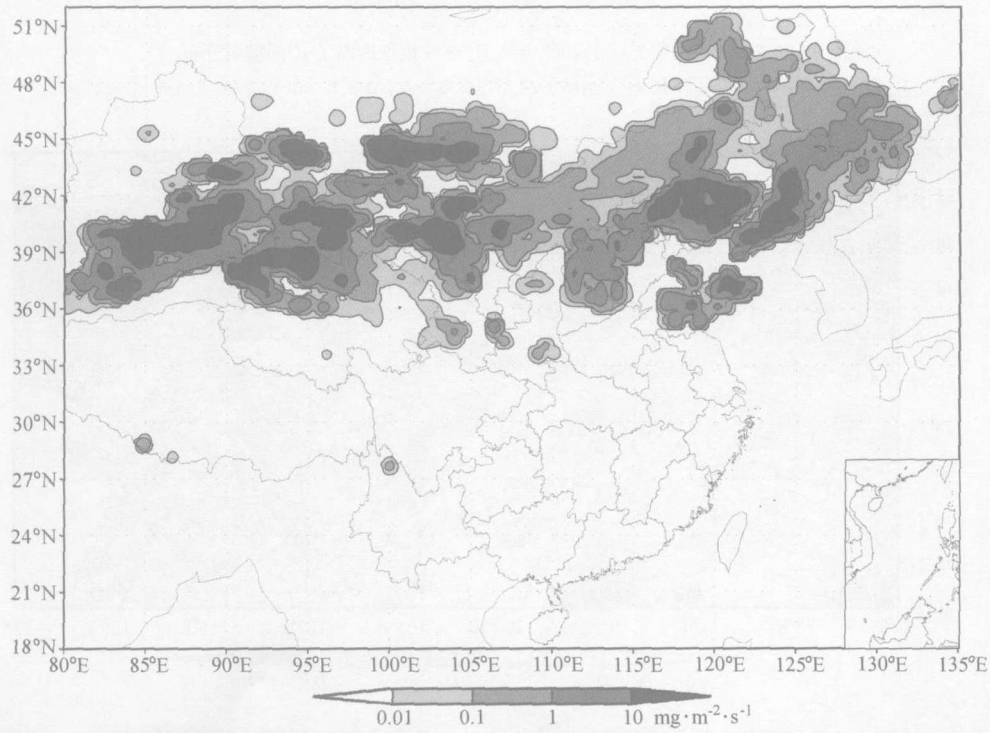


图6 模式 IAPS 1.0 模拟的 2002 年 4 月 5~9 日平均沙尘沉降量的分布 (图中阴影可以近似代表沙尘的影响区域)

Fig. 6 Distribution of averaged dust deposition during 5 - 9 April 2002, as simulated by the original IAP dust-storm prediction system (IAPS 1.0) (With shaded areas indicating the dust-affected regions)

图 7 给出了两模式可风蚀区域差异 ( $K$ ) 的分布, 图中的阴影部分大致为 IAPS 1.0 较 IAPS 2.0 更容易起沙的区域。阴影区域分布占据了我国北方大部分区域, 对应于图 5 和图 6 的差异, 可以看到, 由于 IAPS 1.0 模拟的沙尘天气在整个北方区域都强于 IAPS 2.0, 所以图 7 中的深色区域也与 IAPS 1.0 模拟的起沙区域强于 IAPS 2.0 的区域相对应, 同时这些区域也是主要产生

起沙异常的区域。对应于图 3, 可以看到, IAPS 1.0 在甘肃, 东北, 以及中蒙边界附近区域模拟出了虚假的起沙, 而 IAPS 2.0 在这些区域模拟较好, 从图 7 可以看到, 在这些区域  $K$  值都大于 0, 说明 IAPS 2.0 在这些区域的模拟上效果更符合实际。

图 8 给出了 IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 在表层土壤湿度模拟上的差异分布, 可以看到 IAPS 2.0 所

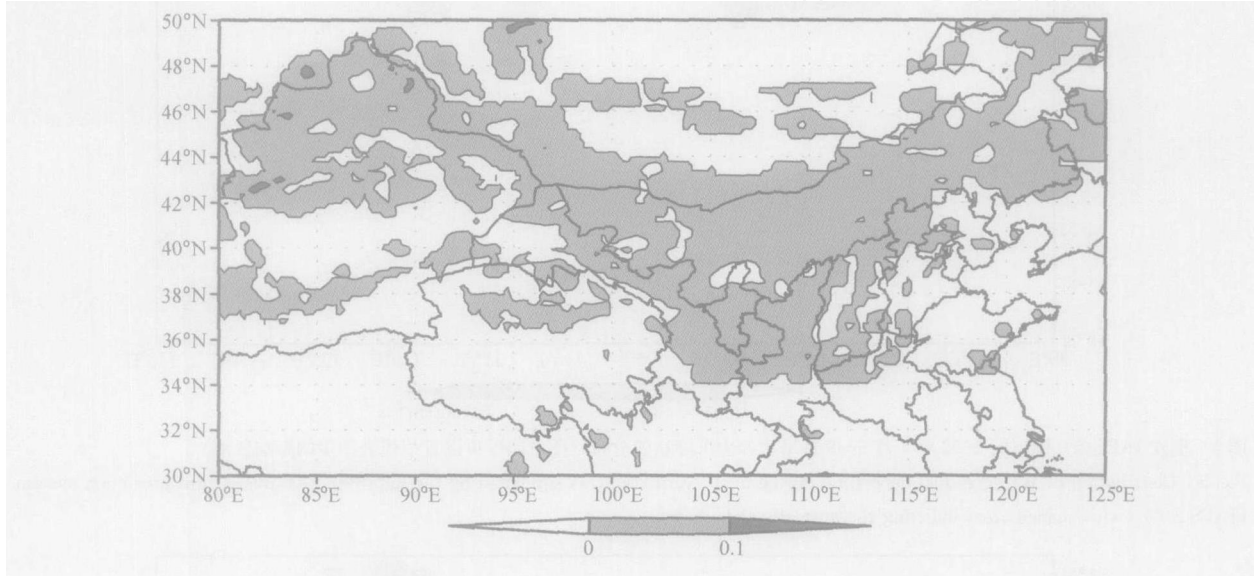


图 7 IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 在 2002 年 4 月 5~9 模拟的因子  $K$  的空间分布

Fig. 7 Distribution of  $K$  simulated by IAPS 2.0 and IAPS 1.0 during 5-9 April 2002

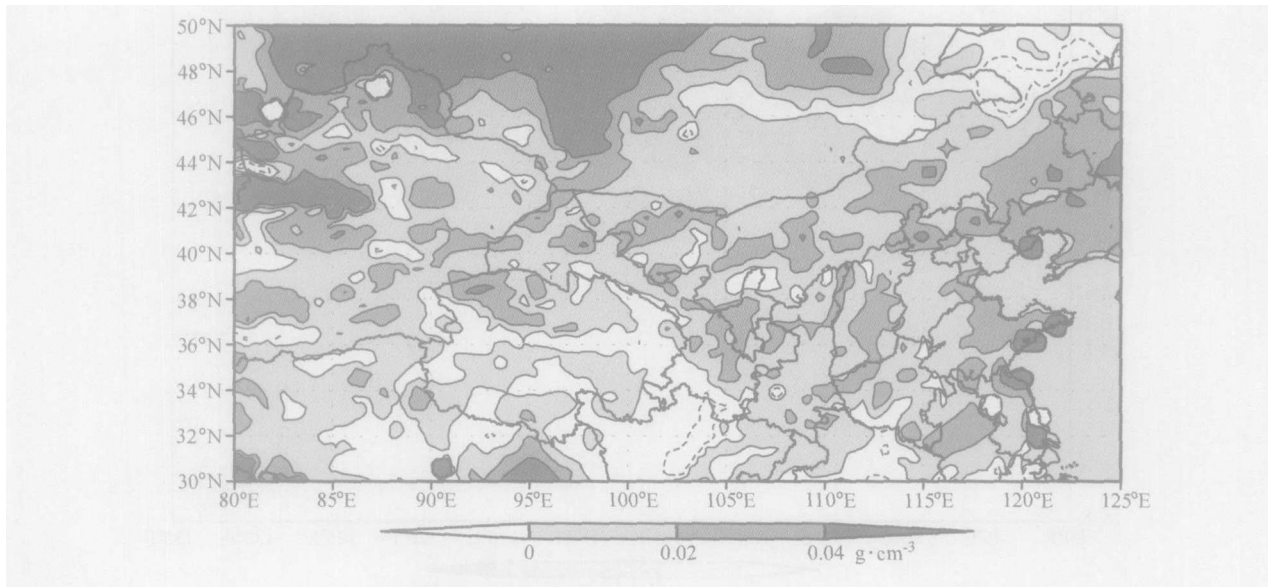


图 8 IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 在 2002 年 4 月 5~9 日模拟的平均 10 cm 土壤湿度差异 (IAPS 2.0 - IAPS 1.0)

Fig. 8 Difference of average soil moisture at the surface layer (10 cm) simulated by IAPS 2.0 and IAPS 1.0 during 5-9 April 2002 (IAPS 2.0 - IAPS 1.0)

模拟的表层土壤湿度在北方大部分区域都比 IAPS 1.0 更为湿润，对应于图 7 表现的  $K$  值空间分布可以很好地对应，由于表层土壤湿度是计算临界摩擦速度的决定性因子，这一点说明了 IAPS 2.0 沙尘天气影响范围模拟效果的提高，正是由于新的陆面过程模式为起沙模拟提供了更为准确的土壤湿度条件。

#### 4.2 2002 年 4 月 19 ~ 20 日的沙尘暴事件

图 9 给出了 2002 年 2002 年 4 月 19 ~ 20 日沙

尘暴天气过程的影响范围。从图中可以发现，在 2002 年 2002 年 4 月 19 ~ 20 日期间，我国南疆盆地北部、内蒙古中部偏东地区、甘肃西北部、吉林西部、辽宁西部等地出现扬沙。其中内蒙古中部偏东地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。可以看到，这次沙尘过程主要影响我国内蒙中部、新疆、华北和东北局部地区，而在其他大部分地区，都没有明显的沙尘天气过程

图 10 则给出了对应于此次沙尘过程天气系统

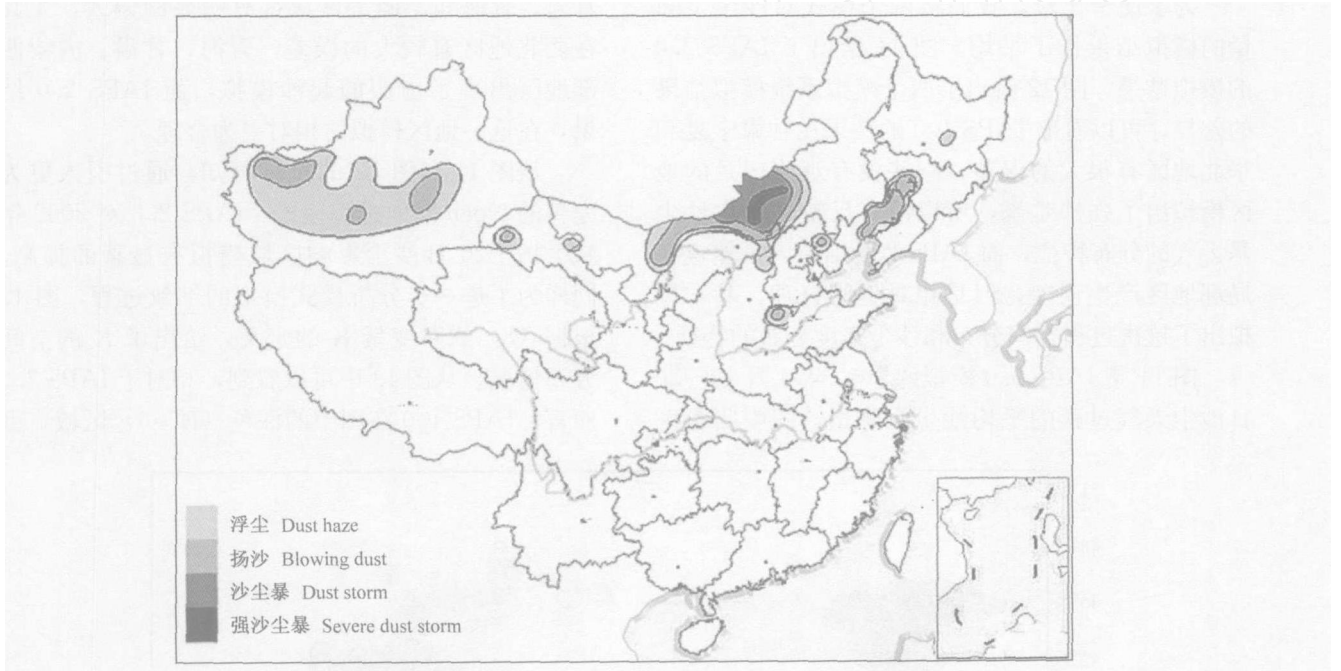


图 9 2002 年 4 月 19 ~ 20 日沙尘 (暴) 天气的影响范围<sup>[23]</sup> (其中阴影代表沙尘影响区域)

Fig. 9 Dust effected areas during 19 - 20 April 2002. (From "Sand&dust Weather Almanac 2002")

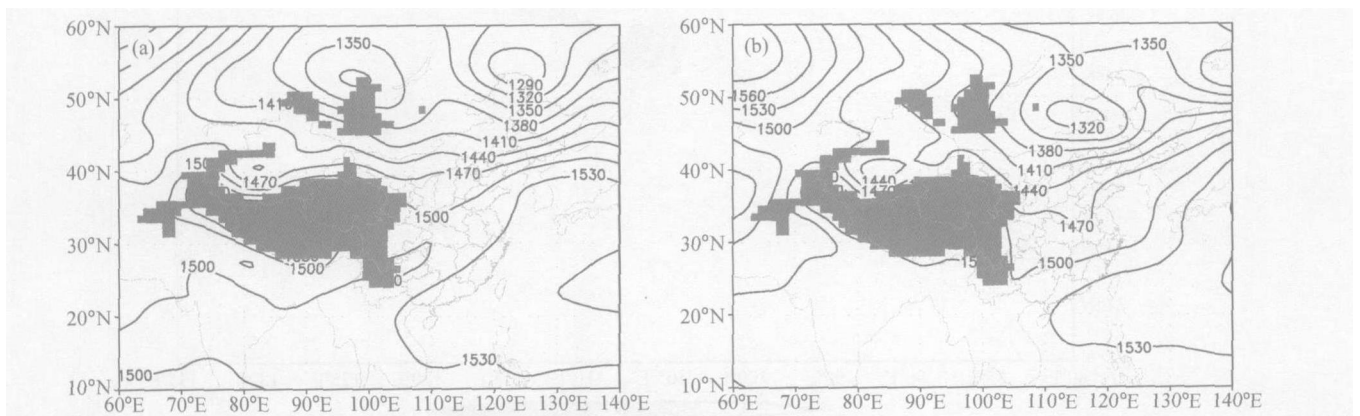


图 10 NCEP 再分析资料 2002 年 4 月 19 ~ 20 日北京时间 850 hPa 高度场 (阴影部分代表地形高度 > 1 500 m, 单位: gpm)。(a) 19 日 08 时; (b) 20 日 08 时

Fig. 10 Geopotential height on 850 hPa at 19—20 April 2002 from NCEP reanalysis data (units: gpm). (a) 0800 LST 19 April; (b) 0800 LST 20 April

的演变过程。从 850 hPa 高度场的演变可以看出，这次过程是一次典型的受气旋发展影响的过程。整个过程受两个气旋系统影响，但主要是 2002 年 4 月 19 日 08 时中心位于 (53°N, 97°E) 附近的气旋发展影响的结果。该气旋从贝加尔湖西侧向东南方向移动并迅速加强，气旋前端侵入内蒙古东部地区，从而引发强沙尘暴事件。另外在新疆南部地区，另有一低气压发展，也导致了新疆局部地区沙尘天气的发生。

为了便于比较，我们将两个模式对沙尘沉降量的模拟结果作了平均。图 11 给出了 IAPS 2.0 的模拟结果，图 12 给出了两个模拟系统模拟结果的差异。可以看出 IAPS 1.0 的结果在甘肃宁夏和华北地区有很大的误差，一些没有观测记录的地区模拟出了强沙尘暴，所以没有反映出这次沙尘暴天气的分布特征，而 IAPS 2.0 结果，虽然也在局部地区产生误差，但是相对更为合理，基本模拟出了这次过程空间分布和沙尘强度分布的特征。

图 11 是 IAPS 2.0 模拟的 2002 年 4 月 19~20 日沙尘天气过程的平均沙尘沉降量，图中阴影区

域可以近似代表沙尘天气过程所影响的区域。与图 9 的观测实况比较可知，IAPS 2.0 基本模拟出了本此沙尘天气过程的影响区域，如发生在内蒙古中东部地区的沙尘暴天气影响区域，但是甘肃和陕西的交界区域也出现了虚假的起沙现象。为比较起见，图 12 给出了 IAPS 1.0 模拟的 2002 年 4 月 19~20 日平均沙尘沉降量的分布，与图 9 的观测实况对比，可以发现，相对于 IAPS 2.0 而言，IAPS 1.0 模拟的沙尘的强度和范围在华北、甘肃、青海和新疆等区域都有明显的偏大，尤其在西北地区有较大的误差，青海、甘肃、内蒙西部地区出现了虚假的起沙模拟，而 IAPS 2.0 结果，在这一地区模拟的相对更为合理。

从图 11 和图 12 的比较可知，通过引入更为完善的 Noah 陆面过程模式，IAPS 2.0 对 2002 年 4 月 19~20 日沙尘影响区域模拟有显著的提高。同样为了进一步分析模式模拟的细致过程，图 13 根据 (8) 式对变量  $K$  的定义，给出了  $K$  的空间分布情况。从图 13 中可以看到，相对于 IAPS 2.0 而言，IAPS 1.0 在图中的深色 ( $K > 0$ ) 区域，更

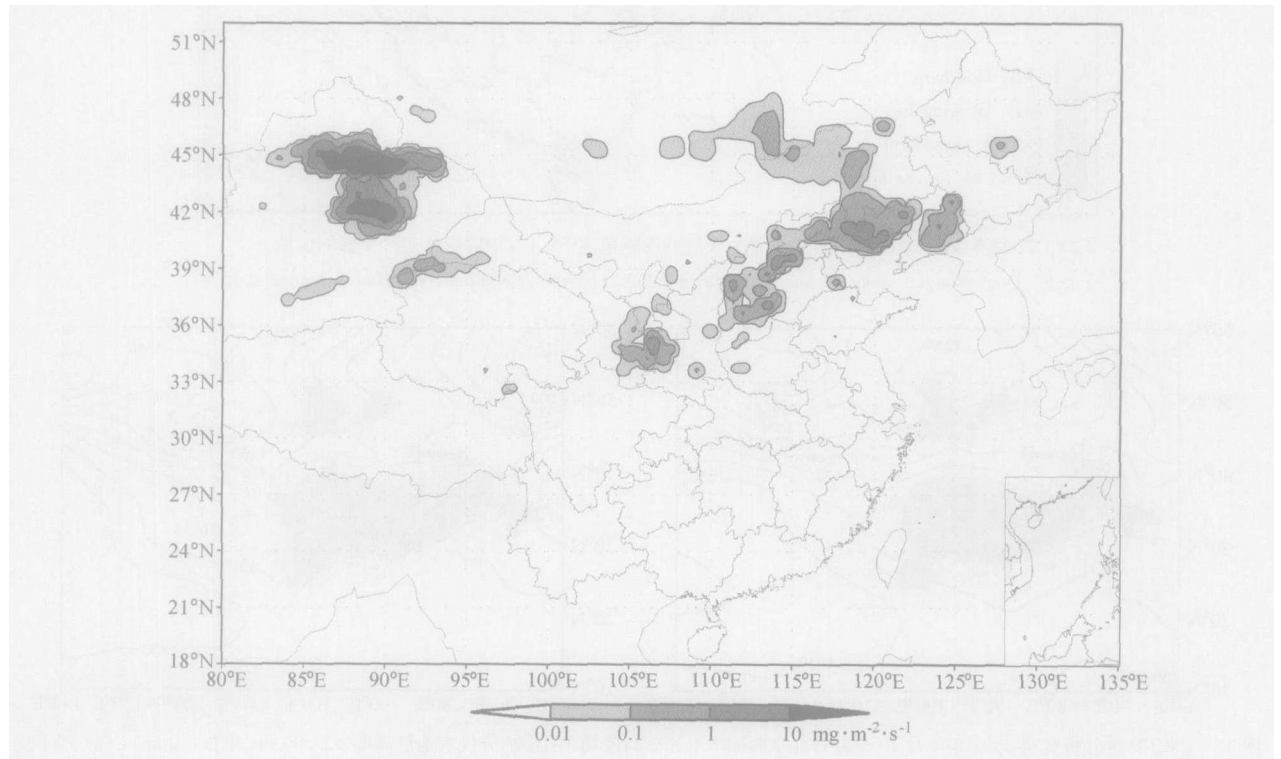


图 11 模式 IAPS 2.0 模拟的 2002 年 4 月 19~20 日平均沙尘沉降量的分布 (图中阴影可以近似代表沙尘的影响区域)

Fig. 11 Distribution of averaged dust deposition during 19 - 20 April 2002, as simulated by the improved IAP dust-storm prediction system (IAPS 2.0) (With shaded areas indicating the dust-affected regions)

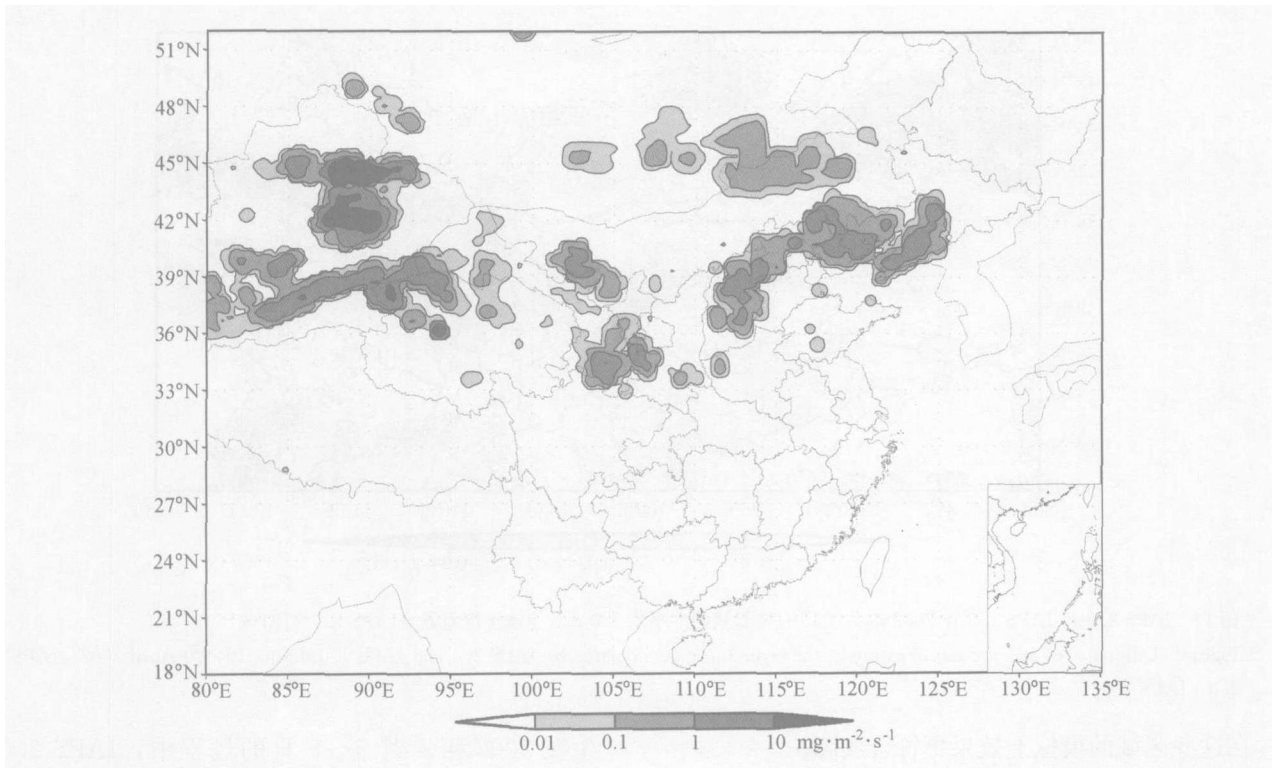


图 12 模式 IAPS 1.0 模拟的 2002 年 4 月 19 ~ 20 日平均沙尘沉降量的分布 (图中阴影可以近似代表沙尘的影响区域)  
Fig. 12 Distribution of averaged dust deposition during 19 - 20 April 2002, as simulated by the improved IAP dust-storm prediction system (IAPS 1.0) (With shaded areas indicating the dust-affected regions)

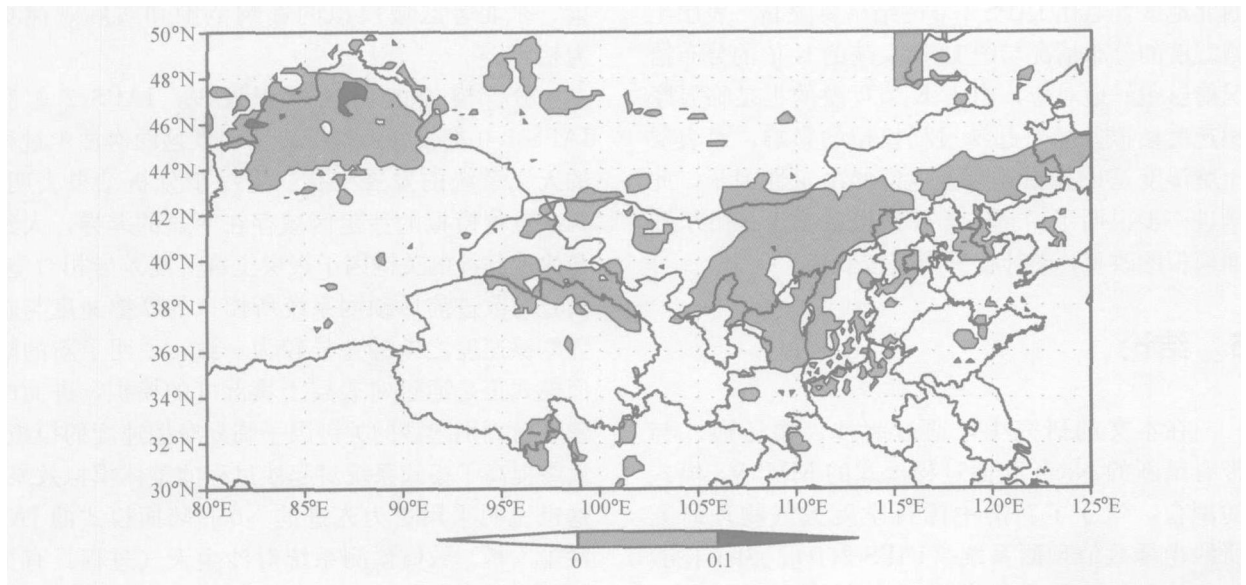


图 13 IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 在 2002 年 4 月 19 ~ 20 日模拟的因子  $K$  的空间分布  
Fig. 13 Distribution of  $K$  simulated by IAPS 2.0 and IAPS 1.0 during 19 - 20 April 2002

加容易起沙。我国华北、西北、新疆以及内蒙古东部出现了较为明显的深色区域，对应于图 11 和图 12 的差异，可以看到，图 13 中  $K$  值大于 0 的

深色区域也与 IAPS 1.0 模拟的起沙区域强于 IAPS 2.0 的区域能够很好地对应，同时这些区域也是主要产生起沙异常的区域。这说明 IAPS 2.0



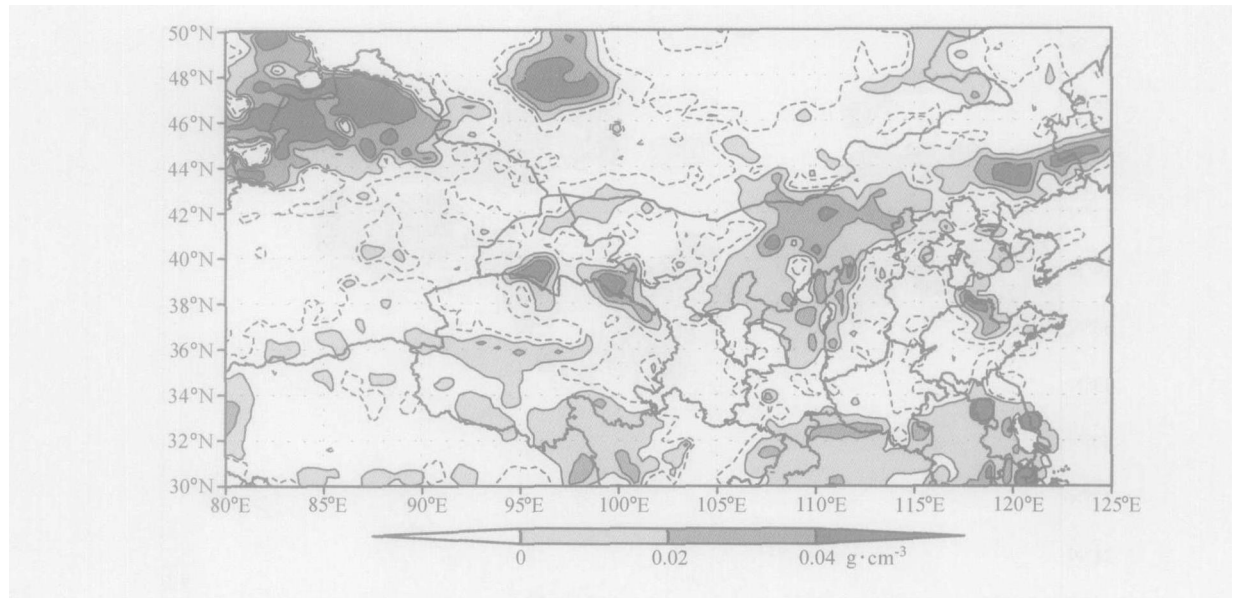


图 14 IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 在 2002 年 4 月 19~20 日模拟的平均 100 mm 土壤湿度差异 (IAPS 2.0 - IAPS 1.0)

Fig. 14 Difference of average soil moisture at the layer 100 mm simulated by IAPS 2.0 and IAPS 1.0 during 19—20 April 2002 (IAPS 2.0 - IAPS 1.0)

在这些区域的模拟上效果更符合实际。

为了更进一步比较,图 14 给出了 IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 两个模式对表层土壤湿度模拟的差异。可以看到 IAPS 2.0 模拟的土壤湿度在华北、西北地区普遍比 IAPS 1.0 的结果要湿润。表层土壤湿度的分布情况与图 13 所反映的  $K$  值的分布情况能够很好地对应,由于  $K$  值反映的正是临界摩擦速度模拟差异对起沙过程模拟的影响,而表层土壤湿度是计算临界摩擦速度的决定性因子,此例进一步说明了,新的集成预报系统正是由于陆面模拟的改善,整体提升了模拟效果。

## 5 结论

在本文的研究中,通过起沙、输送模式与带有最新的 Noah 陆面过程模式的 MM5V3 模式的耦合,建立了新的中国科学院大气物理研究所沙尘暴数值预测系统 (IAPS 2.0)。为了检验新系统的效果,本文选取发生在 2002 年 4 月 5~9 日的以及发生在 2002 年 4 月 19~20 日的两次沙尘天气过程,利用改进前后的预测系统分别进行了模拟试验,并与观测结果进行了对比。比较结果表明,在模拟的沙尘过程影响范围上, IAPS 2.0 较 IAPS 1.0 有明显的改进,对于发

生在 2002 年 4 月 5~9 日的过程中, IAPS 2.0 较好地模拟出影响我国甘肃、东北等区域的沙尘过程,而 IAPS 1.0 则模拟出虚假的起沙。在 4 月 19~20 日的过程中, IAPS 2.0 对新疆、甘肃、东北等区域模拟的影响范围和实际观测更为接近。

分析模拟的天气过程发现, IAPS 2.0 和 IAPS 1.0 都较好地模拟出了引发这两次沙尘过程的天气系统的发展变化。进一步分析结果表明,两次过程模拟的沙尘区域存在明显的差异,大致与决定起沙的关键因子表层土壤湿度差异相对应,而且与改进前后预测系统所模拟的摩擦速度与临界摩擦速度之差的差异较为一致,说明了新的陆面模式正是通过对表层土壤湿度的模拟,进而改善了对判别起沙的关键因子临界摩擦速度的模拟,最终提高了模式系统对起沙过程的整体模拟效果。这也说明采用更为先进的 Noah 陆面模式的 IAP 沙尘(暴)数值预测系统对沙尘天气过程具有更好的模拟能力。

当然,改进的 IAP 沙尘(暴)天气数值预测系统还存在一些不足之处。在某些区域模拟出了虚假的起沙过程。这说明该预测系统还有待进一步的改进和改善,如进一步改进沙尘起沙过程的参数化方案,以及利用更为精确准确的下垫面地

理信息系统资料等。

致 谢 香港城市大学的邵亚平教授提供了起沙和输送模式, 在此致谢。

### 参考文献

- [1] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. 应用气象学报, 2002, **13** (2): 193~200  
Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. Climate Characteristics of sandstorm in China in recent 47 years. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2002, **13** (2): 193~200
- [2] 林朝晖, 陈红, 张时煌. 2003 年春季中国沙尘天气异常的气候及环境背景. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 191~202  
Lin Zhaohui, Chen Hong, Zhang Shihuang, et al. Climatic and environmental background for the anomalous spring sandstorms over the Northern China During 2003. *Climatic and Environmental Research*, 2004, **9** (1): 191~202
- [3] Fan Ke, Wang Huijun. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L10201, doi: 10.1029/2004GL019465
- [4] Wang Zifa, Ueda, Huang Meiyuan. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D22): 26, 947~26, 960
- [5] Shao Y. A model for mineral dust emission, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 20239~20254
- [6] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 22437~22443
- [7] Lu H, Y. Shao. A new model for dust emission by saltation bombardment. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 16827~16842
- [8] Lu H, Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications. *Environ. Modell. Software*, 2001, **16**: 233~249
- [9] Shao Y, Jung E J, Leslie L M. Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: 4814~4836
- [10] 邵亚平. 沙尘天气的数值模拟. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 127~138  
Shao Yaping, Numerical prediction of dust weather, *Climatic and Environmental Research*. 2004, **9** (1): 127~138
- [11] Shao Y., et al., Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D22): 4691, doi: 10.1029/2003JD003667
- [12] 张时煌, 彭公炳, 黄玫. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取和数据融合. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 65~79  
Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. The Feature extraction and data fusion of regional soil textures based on GIS techniques. *Climatic and Environmental Research*. 2004, **9** (1): 65~79
- [13] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 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实验. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 125~142  
Sun Jianhua, Zhao Linna, and Zhao Sixiong. An integrated modeling system of dust storm suitable to North China and applications. *Climatic and Environmental Research*. 2003, **8** (2): 125~142
- [14] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 139~154  
Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong, A numerical simulation on severe dust storm events in North China and their dust sources. *Climatic and Environmental Research*. 2004, **9** (1): 139~154
- [15] MM5 User's guide. [http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/MM5\\_tut\\_Web\\_notes/MM5/mm5.htm](http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/MM5_tut_Web_notes/MM5/mm5.htm)
- [16] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Tarpley. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, **108** (D22): 8851, doi: 10.1029/2002JD003296, 2003
- [17] Koren V, Schaake J C, Mitchell K E, et al. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 19569~19585
- [18] Chen F, Janjić Z, Mitchell K E. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. *Bound. - Layer Meteor.*, 1997, **85**: 391~421
- [19] Lunardini V J, *Heat Transfer in Cold Climates*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1981. 731 pp
- [20] Robinson D A, Kukla G. Maximum surface albedo of seasonally snow covered lands in the Northern Hemisphere. *J. Climate. Appl. Meteor.*, 1985, **24**: 402~411
- [21] Peters-Lidard C D, Blackburn E, Liang X, Wood E F. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 1209~1224
- [22] Lo Chun-Fung Jeff, Chen F. Impact of Land Surface Process in MM5 over Hong Kong and Pearl River Delta. The 5th WRF/14th MM5 Users' Workshop NCAR, 22-25 June 2004
- [23] 矫海燕, 吴小京, 牛若芸. 沙尘暴年鉴 2002, 北京: 气象出版社, 2004. 78 pp  
Jiao Meiyuan, Wu Xiaojing, Niu Ruoyun. *Sand & Dust Weather Almanac* 2002. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 78 pp