

沙尘暴(气体-颗粒)两相流及其并行数值模拟

王夕华¹ 张军¹ 王体健² 汤健平² 顾璠¹

(1. 东南大学洁净煤发电与燃烧技术教育部重点实验室, 江苏南京 210096;
2. 南京大学大气科学系, 江苏南京 210093)

摘要 本文利用有限区域中尺度动力模式 MM5 和沙尘暴传输扩散模式相耦合的基础上, 重点讨论在沙尘传输过程中, 热漂移应力对沙尘粒子的作用, 进行了气体-颗粒流动输送过程的并行数值模拟, 计算结果与我国今年 3 月 18 日至 3 月 21 日发生的强沙尘暴实况资料进行了对比, 获得了沙尘迁徙的规律。

关键词 沙尘暴; 数值模拟; 热漂移; 气体颗粒两相流; 并行计算

中图分类号: TB126 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2003)02-0255-04

DUST-STORM (GAS AND PARTICLE) TWO-PHASE FLOW NUMERICAL SIMULATION AND PARALLEL COMPUTING

WANG Xi-Hua¹ ZHANG Jun¹ WANG Ti-Jian² TANG Jian-Ping² GU-Fan¹

(1. The Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combusting Technology of the Ministry Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. The Department of Atmosphere Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract A model has been developed on the basis of the mesoscale dynamic model (MM5) coupling with a dust-transport model with a geographic information database to simulate the process of gas-particle transport, especially well-concerning the factor of the dust thermal drift and calculating on the parallel computers. Comparisons between observations of strong dust-storm eruption in March, 20 this year and model calculations indicate that the model is able to reproduce some key features of the dust transport.

Key words dust storm; numerical simulation; heat drift; gas-solid two phase flow; parallel computing

1 前言

沙尘暴是我国西北地区春季常发生的一总灾害性天气现象, 沙尘暴的防治与预测有重要的环保意义。沙尘暴的输送过程是一个典型的气固两相流过程。

有关沙尘暴的观测资料少和不全面, 并且对沙尘暴起动, 传输的分布特征了解的很少, 建立一个有效的模式来模拟就显得尤为的重要。80 年代以来, 一些学者开始采用数值模拟的方法研究沙尘气溶胶模式的长距离输送问题。Schutz^[1] 首先发展了一个二

维稳态沙尘输送模式, 研究了撒哈拉地区沙尘在赤道大西洋上空的远距离传输。Westphal^[2] 将 NCAR 的有限区域动力模式和 NASA 的气溶胶远距离传输模式相结合, 发展成二维动力沙尘输送模式, 真实地模拟了撒哈拉沙尘 SAL 在大气边界层中的许多特征。Westphal^[3] 在二维模式的基础上, 发展了三维动力学传输模式。

2 沙尘暴气体-颗粒两相流模型

2.1 气相中尺度动力模式 MM5^[4]

气相动力模式 MM5 是 NCAR/PUS 发展的一个

收稿日期: 2002-12-01; 修订日期: 2003-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助 (No.59995460)

作者简介: 王夕华 (1978-), 女, 江苏金坛人, 硕士, 主要从事多相流数值模拟的研究。

中尺度模拟系统。关于流体静力学与非流体静力学，根据地形来模拟的模型。是 σ 坐标系中的三维流体原始方程模式，变量在水平和垂直方向的配置均为跳点格式，采用 Brown-Campana 时间积分和 Asslin 时间过滤方案。模式中，对水平扩散，地面和边界层物理过程，水汽循环，边界条件和初始条件以及空间分辨率都作了精心的考虑，并具有多个物理参数可根据需要选用，是一个比较理想的中尺度动力模式，适合用于中尺度天气过程的试验。这个模型始于 NCAR/PENN 公司，现作为公共软件在各个大学，实验室得到运用和进一步发展。MM5 的模型方程组为：

用压力项表示的垂直 σ 坐标：

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (1)$$

式中， P_s ， P_t 分别表示地表气压和模顶气压， P_t 是常数

$$p^* = p_s - p_t \quad (2)$$

水平动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(p^* u)}{\partial t} &= -m^2 \frac{\partial(p^* uu/m)}{\partial x} + \frac{\partial(p^* vu/m)}{\partial y} \frac{\partial(p^* u\dot{\sigma})}{\partial \sigma} - \\ &mp^* \left[\frac{RT_V}{(p^* + p_t/\sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \\ &fp^* v + F_H u + F_v u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(p^* v)}{\partial t} &= -m^2 \frac{\partial(p^* uv/m)}{\partial x} + \frac{\partial(p^* vv/m)}{\partial y} - \frac{\partial(p^* v\dot{\sigma})}{\partial \sigma} - \\ &mp^* \left[\frac{RT_V}{(p^* + p_t/\sigma)} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] - \\ &fp^* u + F_H v + F_v v \end{aligned} \quad (4)$$

能量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(p^* T)}{\partial t} &= -m^2 \left[\frac{\partial(p^* uT/m)}{\partial x} + \frac{\partial(p^* vT/m)}{\partial y} \right] - \frac{\partial(p^* T\dot{\sigma})}{\partial \sigma} + \\ &\frac{RT_V \omega}{c_{pm}(\sigma + p_t/p^*)} + \frac{p^* Q}{c_{pm}} + F_H T + F_V T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\omega = P^* \dot{\sigma} + \sigma \frac{dp^*}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial p^*}{\partial t} + m \left[u \frac{\partial p^*}{\partial x} + v \frac{\partial p^*}{\partial y} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln(\sigma + p_t/p^*)} = -RT_V \left[1 + \frac{q_c + q_v}{1 + q_v} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$T_V = T(1 + 0.608q_v), c_{pm} = c_p(1 + 0.8q_v)$$

2.2 沙尘颗粒输送模型

$$\begin{aligned} \frac{\partial[p^* \dot{\sigma} E(r)]}{\partial t} &= -m^2 \left\{ \frac{\partial[p^* uE(r)/m]}{\partial x} + \frac{\partial[p^* vE(r)/m]}{\partial y} \right\} - \\ &\frac{\partial[p^* \dot{\sigma} E(r)]}{\partial \sigma} + F_H E(r) + F_V E(r) + Q_{DEP} + Q_S + Q_T \end{aligned} \quad (9)$$

式中， r 为粒子半径， $E(r)$ 为半径为 r 的沙尘粒子浓度， $F_H v$ ， $F_H u$ ， $F_H T$ ， $F_H E(r)$ 分别表示动量，温度，粒子浓度的水平扩散， $F_V u$ ， $F_V T$ ， $F_V E(r)$ 分别表示动量，粒子浓度的垂直扩散， $F_V T$ 表示温度场的垂直混合和干对流调整。 u ， v ， $\dot{\sigma}$ 分别表示动力模式输出的三维风场， m 为地图放大因子。 Q_{DEP} 表示沉降引起的沙尘浓度场变化， Q_S 表示起沙粒子源项。 Q_T 表示热漂移源项。

2.3 粒子的热漂移

影响沙尘暴传输的因素很多，粒子在气体中的运动受扩散，气体运动，力场和热漂移等因素的作用。粒子在温度梯度中的热漂移是大气沙尘运动中不可忽视的重要因素。

粒子在热力场中的迁移，力作用粒子的通量为：
 $\vec{J} = \vec{C} \cdot E(r)$ ，所以，热力场作用粒子运输：
 $\left\{ \frac{\partial[p^* E(r)]}{\partial t} \right\}_T = -\nabla \cdot [\vec{C} \cdot E(r)]$ ，因此粒子在热力场的迁移归结为求 \vec{C} 。在有温度梯度存在的场中，对微粒子 ($d_p \gg l$)，粒子热漂移速度^[5] (Waldmann & Schmitt 分子运动论)：

$$\vec{C} = \frac{2\kappa\sigma}{2\kappa + \kappa_p p} \nabla T \quad (d_p \gg l) \quad (10)$$

式中， σ 调节系数本文取 0.2， κ 为气体的热导率。

2.4 粒子的沉降模型

本文沙尘暴在传输过程中仅考虑为干过程，未考虑降水的作用，采用采用气固两相流的颗粒沉降速度 V_d 来描述干沉降过程，根据阻力模式，粒子沉降速度^[5] 为：

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_a R_b V_g} + V_g \quad (11)$$

式中， V_g 表示粒子重力沉降速度， R_a ， R_b 分别代表空气动力学阻力，片流层阻力。

当颗粒的垂直沉降 $V_d > V_{gcn}$ ，式中 V_{gcn} 代表颗粒沉积临界速度，认为颗粒沉积地表，本文 V_{gcn} 取 0.002 m/s。

3 数值模拟过程

计算区域以 117°E，40°N 为中心， X ， Y 方向为网格 88×66，水平格距为 30 km，垂直方向分

为不等的 10 层, 相应的值 σ 为 0.075, 0.225, 0.375, 0.525, 0.675, 0.8, 0.89, 0.95, 0.98, 0.995, 1, 初始资料选用 2002 年 3 月 19 日 07 时 45 分, 预报时间 3 天。本模式在网络并行计算机系统 (16CPU, RAM 8G, 约 100 亿次 / 秒) 上计算, 积分 3 天, 计算耗用时间约为 30 分钟。

受西伯利亚强冷空气东移影响, 2002 年 3 月 18 日到 21 日新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、吉林、黑龙江以及山东、河南、湖北、湖南西北部、四川东部等地的部分地区先后出现了大范围沙尘天气, 其中内蒙古、甘肃中部、宁夏北部、河北北部、北京、吉林西北部等地出现了强沙尘暴。沙尘暴天气过程移动路径、影响区域以及时段沙尘暴空间分布见图 1、图 2。



图 1 沙尘暴天气影响区域和移动路径示意图

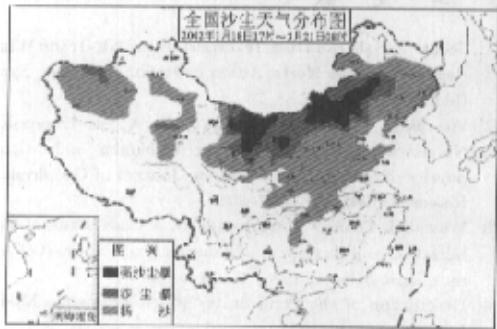


图 2 2002 年 3 月 21 日 08 时全国沙尘天气分布图

图 1,2 为实测资料, 我国沙尘起始于 3 月 18~21 日, 我国华北东部南部、东北地区东部出现大片扬沙天气。沙尘天气继续向东向南扩展并有减弱。

3.1 数值模拟结果与讨论

图 3 为模式输入的初始浓度场分布图。

图 4 为模式中温度场的变化, 积分 36 小时后, 温度场的中心向东南方向发展。

图 5 为 $r = 25.4 \mu\text{m}$ 粒子在 $\sigma = 0.995$ 层上的浓度演变。图中标出了中心浓度场的分布, 积分 36

h 后, 沙尘向东南方向传播, 我国境内城市中粒子的中心浓度最大达到 $(1.0 \sim 2.0) \text{ mg/m}^3$, 从图中可以看出热漂移项对沙尘粒子扩散的范围影响不是很大, 但它影响了沙尘浓度的大小。经初步模拟的结果得出: 加热漂移项沙尘粒子的中心浓度比未加上此项的值大 $(0.01 \sim 0.08)$ 倍。

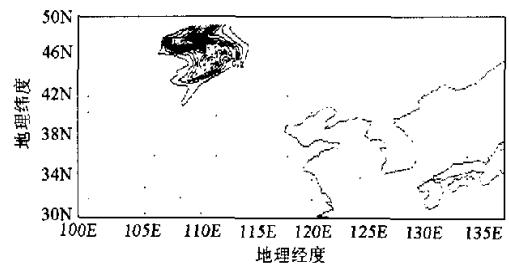
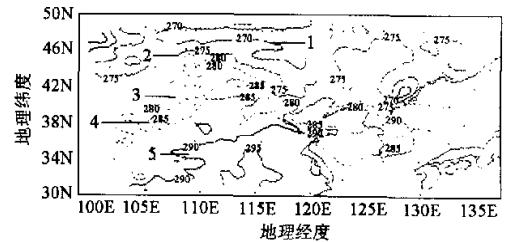
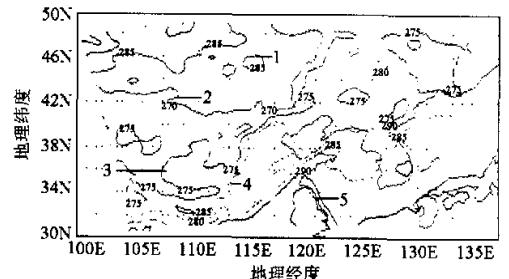


图 3 初始时刻浓度图

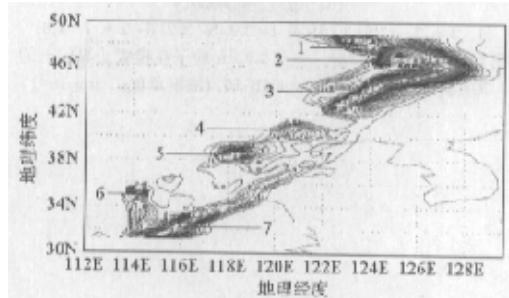


(a) 0 时刻 (1- 270, 2- 275, 3- 280, 4- 285, 5- 290)



(b) 积分 36 h 后 (1- 265, 2- 270, 3- 275, 4- 280, 5- 290)

图 4 温度场的变化 (单位: K)



(a) 未加上热漂移项

(1- 1.4, 2- 9.8, 3- 6.4, 4- 1.4, 5- 1.1, 6- 1.6, 7- 3.8)

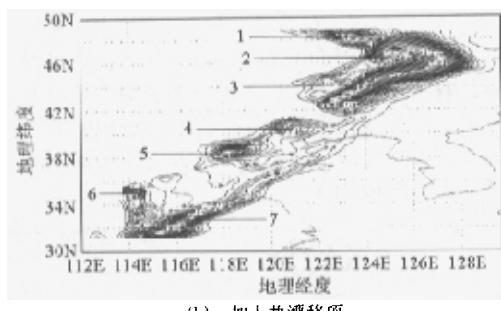
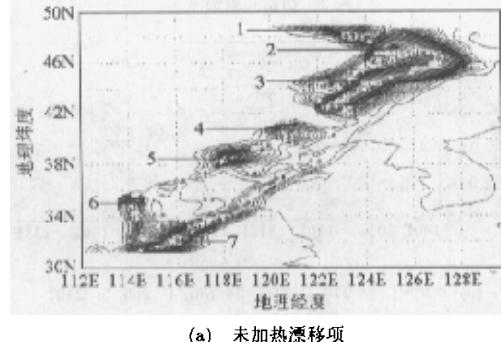
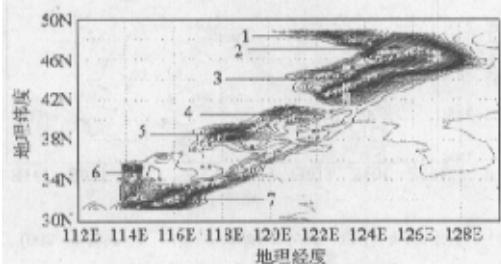


图 5 积分 36 小时后, $r = 25.4 \mu\text{m}$ 粒子在模式边界层上的浓度演变, Stokes 数: $2.4\text{E-}13$ (粒子浓度单位: mg/m^3)
(1- 1.0, 2- 10.4, 3- 6.8, 4- 1.6, 5- 2.2, 6- 1.8, 7- 4.0)

图 6 为 $r = 2 \mu\text{m}$ 粒子在 $\sigma = 0.995$ 层上的浓度



(a) 未加热漂移项
(1- 2.3, 2- 13.2, 3- 9.6, 4- 1.8, 5- 3.0, 6- 2.2, 7- 4.6)



(b) 加上热漂移项
(1- 2.3, 2- 13.6, 3- 10.4, 4- 2.2, 5- 3.2, 6- 2.4, 7- 4.6)
图 6 积分 36 小时后, $r = 2.0 \mu\text{m}$ 粒子在模式边界层上的浓度演变, Stokes 数: $1.4\text{E-}15$, (浓度单位: mg/m^3)

演变, 积分 36 h 后, 沙尘向东南方向传播, 沙尘粒子在我国区域内, 中心浓度达到 $3.2 \text{ mg}/\text{m}^3$, 表明较小粒子在空中维持的时间较长。加热漂移项沙尘粒子的中心浓度比未加上此项的值大 (0.01~0.08) 倍。大小粒子中心浓度分布特征表明: 热漂移源项对颗粒的影响与粒子的大小无关, 其作用均有利于沙尘暴的发生。

4 结 论

本文首先建立了一个三维欧拉型起沙 / 输送 / 沉降的沙尘模式。模式的主要特色是重点考虑了粒子热漂移的作用, 并且对粒子的沉降进行了精心的考虑。进一步利用中尺度气相模式 MM5 和欧拉输送模式模拟了中国北方地区沙尘暴发生地沙尘浓度的时空分布。由模拟输出结果初步得出以下结论:

(1) 运用气相 MM5 与颗粒输送方程很好的模拟了大气沙尘暴过程, 即 Euler-Euler 气固两相流模型对大气气固两相流的研究十分有价值。计算结果反映了沙尘暴迁徙的路径与影响范围。

(2) 沙尘暴中颗粒受大气温度分布不均而引起的热漂移对颗粒的影响较大, 有 8% 左右的贡献作用。

(3) 并行计算机型是大气气固两相流数值模拟的必要条件。

参 考 文 献

- [1] Schutz L. Saharan Dust Transport in the NE-Trade Wind Region Over the North Atlantic Ocean. In: Proc. Sym. Radiat. 1977, 1: 68-70
- [2] Westphal, Toon O B, Carlson T N. A Two-Dimension Numerical Investigation of the Dynamics and Micro-physics of Saharan Dust Storms. Journal of Geophysical Research, 1987, 92: 3027-3049
- [3] Westphal, Toon O B, Carlson T N. A Case Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust. Journal of Atmospheric Science, 1988, 45: 2145-2175
- [4] Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version. NCAR, 1994
- [5] S K Friedlander. Smoke, Dust and Haze(Fundamentals of Aerosol Behavior), John. Wiley. & Sons., 1977
- [6] 王体健, 李宗恺. 一种污染物的区域干沉积速度分布的计算方法. 南京大学学报, 1994, 30(4): 745-752