东南大学

硕士学位论文

沙尘暴气固两相流数值模拟的研究

姓名：王夕华

申请学位级别：硕士

专业：热能工程

指导教师：张军;顾璠

20030301

摘 要

沙尘暴天气是一种严重的灾害性天气。多发生在内陆沙漠地区，如非洲、中东、中亚、蒙古及我国西北地区和华北地区。沙尘暴来临时，会造成严重的风害、沙积害、风蚀、环境污染等灾害。严重影响当地工农业生产和人民生活。因此，已引起国内外学者和各国政府的关注。2000 年初，我国北京等地就多次出现沙尘暴天气，给我国人民的生产、生活带来了极大的不便，也造成了相当大的经济损失，引起了社会各界和科学研究机构的广泛关注。

沙尘暴过程本身是一个及其复杂的过程，其中的沙尘起源，扩散、传输、沉降等机制都是值得探索的问题。

有关沙尘暴的观测资料少和不全面，并且对沙尘暴起动，传输分布特征了解的很少，建立一个有效的模型来模拟就显得尤为的重要。早在 70 年代，沙尘暴的数值模拟一直是科学机构研究的方向，如何建立准确的沙尘传输模型来模拟预报沙尘暴，如何弄清沙尘传输、扩散机理以及如何制止沙尘暴的发生等都是很有研究价值和必要的。也是如今科学家们研究的方向。

沙尘暴天气是一种典型的大气多相流问题。本文在工程两相流的基础上建立了沙尘传输模型。在动力气象模型 MM5 驱动下，对 2002 年 3 月 18～21 日，我国北方大部分城市发生的强沙尘暴事件，进行了数值模拟，并且进行了机理分析研究，获得沙尘暴迁徙的路径和影响范围。

建模过程如下：

首先，建立一个三维欧拉型起沙/输送/沉降模型，其主要特点是模型中考虑了粒子热漂移作用。建立的沙尘传输模型与动力气象模型 MM5 很好的相耦合。整个数值计算在 Linux 平台上完成，其中 MM5 气象模型采用并行计算，并在我们自己研发的 PC 机网络并行计算系统上进行了测试。测试结果证明了并行计算是大型数值模拟的重要手段。

其次，通过对我国 2002 年，3 月 18～21 日的模拟，简单分析了三个主要天气气象场，（u, v, T 场），通过比较加上粒子热漂移源项和未加上粒子热漂移源项的两种不同工况的输出图形，得出了热漂移作用在粒子传输、扩散的过程中确实有不可忽视的贡献作用。

接着，本文进行了第二个算例，在模型中设置三个不同的沙尘源区，旨在模拟不同的沙尘源对我国城市沙尘暴爆发的影响作用。通过比较，沙尘在风力的携带下，均被输送到同一地区。表明多个沙尘源对我国城市沙尘暴的爆发具有叠加作用，这就增加了沙尘暴发生的可能性。这对我国城市土地荒漠化问题治理，防止本国城市边缘、干旱地区成为新的沙尘源头有重要意义。同时，本文还对粒子热漂移作用进行了不同的时间和空间对比分析，得出了规律分布曲线。

最后，本文提出了展望，进一步完善本模型。

本文模拟研究工作是一次初步探索性研究，模拟结果基本反应了颗粒的分布规律，取得了一些认识，对沙尘暴问题的研究以及多相流问题的探讨都有重要的参考价值。

为了说明模拟沙尘暴发展过程，以及沙尘中心浓度分布随时间演变的正确性，本文参考了沙尘暴网站资料，采用模拟计算结果与实测资料相比较，对比结果分析表明了本文建立的模型具有很好的模拟性，模拟结果能反映沙尘暴中心迁徙的路径与规律，Eular-Eular 气固两相流模型与 MM5 气象模型很好的模拟了大气沙尘传输过程，即 Eular-Eular 气固两相流模型对大气气固两相流的研究十分有价值。也反映了本文建模程序的正确性。

本文的研究工作还表明，发展微机网络并行系统是适合我国国情的、赶超国际先进水平的实现大规模高性计算的有效途径。并行计算机为本文模型计算提供了强有力的计算工具。

关键词：　沙尘暴　　气固两相流　　数值模拟　　MM5　　并行计算　　热漂移

Abstract

Dust-storm is a disastrous environmental phenomenon occurring frequently in the inland desert regions of the world , such as in Africa, Middle East, Middle Asia, Mongolia, Chinese Northwest and Huabei regions. When dust-storm is coming, it results in environmental problems of wind erosion , pollution and so on, which brings big loss to people's life and production. Therefore, the dust-storm problem is arousing attentions from the scholars and governments all over the world. In the beginning of the century, dust-storm is occurring frequently in Beijing, etc. It brings big economic loss to China and leads to inconvenient to people. Many research works have been developed around the dust-storm problem.

The whole process of dust-storm is complex, in which the mechanism of dust production、diffusion、transport and sink are all important for hunting.

Due to the limit of the measure devices, little knowledge is known about dust-storm characters of dust reduction and dust distribution. So it is necessary to develop a good model for simulation. In the early 70's, numerical simulation is the research direction. How to simulate a dust storm, how to make light of the mechanism of particles activity during the process of transport in the atmosphere and how to find a best method to prevent it are all as urgent as possible and attracting many researchers attentions.

Dust-storm is an atmosphere multi-phase flow process. This paper is based on the gas-solid flow theoretics. 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 dust evens of north China, in Mar. 18~21, 2002. The mechanism is analyzed and the modeling results reproduce some key features of the long-range dust transport Calculation results image the dust-storm pathway and the range of effected areas.

The modeling process is discussed as following:

Firstly , developing a 3-D Eular-Eular dust transport model. In the model, the source and sink of dust are considered, especially well-concerning the factor of the dust thermal drift. Also the dust transport model and the dynamic model MM5 is well coupled. The whole computing works is on the Linux system. And MM5 is running on Parallel computer system. Based on the PC network parallel computing system developed by ourselves, the computing results prove that the parallel computing provide a important and necessary computing instrument to achieve high numerical performance.

Secondly, this paper makes some analysis on the three main meteorologic fields, (u, v, T). Two output figures of dust distribution are compared with each other, one is considered of the particles thermal drift factor , the other is not. Conclusions are drawn that the thermal drift factor plays an important roll during the dust-storm process.

Thirdly, the second computing sample is running. Three different dust sources regions are respectively considered in the model at the aim of making light of the dust sources influence on dust-storm occurring in the cities. By comparing with the three computing results, it is showed that the dusts carried by wind are all transported to the same region. Conclusion is that the different dust sources in our country the effect of adding up the possibility of dust-storm eruption. It is important for people to realize the urgent for preventing the desertness and aridity in our country. In the following, we analyze the thermal drift factor distribution curves with three temporal and spatial layer and some new results are obtained.

Finally, there are still some work to further the model.

This paper is a groping research work and the research work is an interdisciplinary project. The simulation results truly imagine the dust distribution. It has the important referenced value for the later research work.

For the purpose of proving the reality of computing results in this model, we compare the output figures with

the real data from the Chinese Dust-storm Research Center. Comparisons between observations and model calculations indicate that the model is able to reproduce some key features of the long-range particle transport. The model, coupling a MM5 model and a dust-transport mode, well simulates the dust-storm process. Calculation results image the dust-storm pathway and the range of effected areas.

Still, this paper shows that the development of microcomputer network parallel system is an effective approach to achieve high performance parallel computing in our country. It is also an attempt and jumping-off point to further numerical study on complex dust-storm transport problem.

Keywords: Dust-storm Two-phase Flow Numerical Simulation MM5 Parallel computing Thermal drift

Y 561216

学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签　名：王为华　日　期：2003.3

关于学位论文使用授权的说明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

签　名：王为华　导师签名：张军　日　期：2003.3

主要符号表

英文字母

d	粒子直径
f	科里奥利参数
g	地球重力加速度
l	自由长度
m	地图放大因子
u	x 方向风速
v	y 方向风速
r	粒子半径
T	温度
P	压力
R	空气气体常数
c_p	空气等压比热
E(r)	粒子浓度
F_H	水平扩散
F_V	垂直扩散
Grd	传质葛拉晓夫数
L	长度
Q	热量单位
Q_{DEP}	沉降源项
Q_S	起沙源项
Q_T	热漂移源项
$\bar{c}$	热漂移速度
$\bar{J}$	粒子通量
u_*	摩擦速度
Ps	地表气压
Pt	顶层气压
q_c	积云混合率
q_r	降雨混合率
q_v	水蒸气混合率
V_d	干沉降速度
V_g	重力沉降速度

希腊字母

ω	地球自转角速度
$\dot{\sigma}$	垂直方向风速
σ	调节系数
σ	坐标
ρ_a	粒子密度
ρ_q	空气密度
η	空气动力粘性系数
ν	空气运动粘性系数
Ψc	稳定度修正函数
α	调节系数
κ	气体热导率
κ_p	粒子热导率
ϕ	重力位势
$\hat{\phi}$	变率系数

第一章 绪 论

§1.1 引 言

1.1.1 沙尘暴的危害[1]

沙尘暴是指强风从地面卷起大量沙尘，使空气浑浊，水平能见度小于 1000m 的灾害性天气现象。可造成房屋倒塌、交通供电受阻或中断、火灾、人畜伤亡等，污染自然环境，破坏农作物生长，给国民经济建设和人民生命财产安全造成严重的损失和极大的危害。沙尘暴危害主要在以下几方面：

1、生态环境恶化；

2、生产生活受影响；

3、生命财产损失；

4、交通安全（飞机、汽车等交通事故）。

本世纪近 20～30 年来我国沙尘暴爆发频繁，据有关部门提供的材料[1]，60 年代特大沙尘暴在我国发生过 8 次，70 年代发生过 13 次，80 年代发生过 14 次，而 90 年代至今已发生过 20 多次，并且波及范围越来越广，造成的损失愈来愈重。今年 4 月，１０年来最大的一次沙尘暴袭击了我国北方大部分地区。沙尘肆虐形势严峻，加快治理及预防刻不容缓。沙尘暴问题已成为举国上下关注的问题。科学界正积极研究沙尘暴的成因、效益和预报等。

1.1.2 沙尘暴的概念、规定和标准（中国沙尘暴网）

沙尘天气概念：

沙尘（暴）天气是我国北方（特别是西北地区）春季较为常见的一种灾害性天气现象。按水平能见度的大小，沙尘天气可划为浮尘、扬沙和沙尘暴三个等级。

(1) 浮尘：悬浮在大气中的沙或土壤粒子，使水平能见度小于 10 公里的天气现象；

(2) 扬沙：风将地面沙尘吹起，使空气相当混浊，水平能见度在 1－10 公里以内的天气现象；

(3) 沙尘暴：强风将地面尘沙吹起，使空气很混浊，水平能见度小于 1 公里的天气现象；当水平能见度小于 500 米时，为强沙尘暴。

区域性沙尘天气过程分类及其标准：

浮尘天气过程：（这儿不做分析）；

扬沙天气过程： 天气预报区域内在同一次冷空气过程中，至少有一个区域相邻 5 个或以上国家发报站同时出现了扬沙天气，称为一次扬沙天气过程；

沙尘暴天气过程： 天气预报区域内在同一次冷空气过程中，至少有一个区域相邻 3 个或以上国家发报站同时出现了沙尘暴天气，称为一次沙尘暴天气过程；

强沙尘暴天气过程： 天气预报区域内在同一次冷空气过程中，至少有一个区域相邻 3 个或以上国家发报站同时出现了沙尘暴天气，且其中有 3 个或以上的水平能见度小于 500 米，称为一次强沙尘暴天气过程。

1.1.3 沙尘暴天气成因

有利于产生大风或强风的天气形势，有利的沙、尘源分布和有利的空气不稳定条件是沙尘暴或强沙尘

暴形成的主要原因。强风是沙尘暴产生的动力，沙、尘源是沙尘暴物质基础，不稳定的热力条件是利于风力加大、强对流发展，从而夹带更多的沙尘，并卷扬得更高。

除此之外，前期干旱少雨，天气变暖，气温回升，是沙尘暴形成的特殊的天气气候背景；地面冷锋前对流单体发展成云团或飑线是有利于沙尘暴发展并加强的中小尺度系统；有利于风速加大的地形条件即狭管作用，是沙尘暴形成的有利条件之一。

1.1.4 沙尘暴形成的物理机制

在极有利的大尺度环境、高空干冷急流和强垂直风速、风向切变及热力不稳定层结条件下，引起锋区附近中小尺度系统生成、发展，加剧了锋区前后的气压、温度梯度，形成了锋区前后的巨大压温梯度。在动量下传和梯度偏差风的共同作用下，使近地层风速陡升，掀起地表沙尘，形成沙尘暴或强沙尘暴天气。

沙尘暴是伴随人类活动破坏生态平衡而产生的。如 1934 年 5 月美国发生了震惊世界的西部沙尘暴,前苏联也曾多次出现了沙尘暴，中国在 1933 年至 1996 年间，西部地区也曾连续 4 年出现了沙尘暴，并有逐步扩大的趋势。事实证明，这些现象都是由于破坏自然生态的平衡而导致的结果。

§1.2 沙尘暴数值模拟的发展及应用

数值计算是一种非常有效的预报沙尘暴的手段，建立有效的模式来模拟沙尘暴过程一直是科学机构研究的方向。国外对沙尘暴的研究起步较早，从 30 年代就开始了对沙尘暴分布、形成、监测和对策的系统研究，70 年代以来，对撒哈拉沙尘暴天气的研究更加深入和全面。80 年代以来, Brazel[2]对发生在美国亚利桑那州的沙尘暴天气类型作了统计分类。Schutz[3]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[4]将 NCAR 的有限区域模式和 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[5]等在二维模式基础上，发展了三维动力学传输模式。近年来，Ta-Hsiung Lin [6](2001)发展了三维长距离输送模型，Lu, Hua, Shao.Yaping [7](2001) 建立了风蚀模拟系统，预报分析沙尘暴输送过程。国外更多的工作研究大气中沙尘粒子的组成及化学特性(Zhang , Daizhou,1999)[8], (Gomes, Laurent; 1993)[9], (Ma, Chang-Jin; 2001)[10]。

中国与国际上的沙尘暴研究相比，起步较晚，我国从本世纪 70 年代才开始对沙尘暴进行研究。当时对 1977 年 4 月 22 日西北强沙尘暴天气过程进行了较详尽的研究，初步揭示了沙尘暴的大尺度成因及其发生、输送、沉降和辐射效应等，提出了“黑风暴”的定义标准[11]。 徐国昌[12]等，对我国西北地区的几次典型特强沙尘暴做了分析和数值模拟研究。刘春涛等[13]，还利用改进的ＭＭ4 和高分辨行星边界层(ＰＢＬ)参数化及 40ｋｍ细网格控制试验能基本上模拟出“93.5”黑风暴。迄今为止，我国已经发展了几种模式方案用来预报，分析沙尘暴。它们在某方面确能很好的预报沙尘暴，并且有的已经投入业务运行。但是预报分析和实测结果还是有偏差的，下面分别介绍各个模式的预报原理：

模式 （一） 采用归类判别分析预报的模式[14]：

该模式是在大量分析某地区多年来发生的典型沙尘暴的基础上，总结归纳其大气环流特征，并将他们划分 4 个环流类型。参考 SaatyT.L. 提出的综合优选的方法，建立判别矩阵和优先关系矩阵，然后计算归类判别函数，根据判别函数数值判断实时待判样本的归属。再参照归属类历史沙尘暴的天气形势和实况出现的范围以及强度作出沙尘暴天气预报。具体模式框架见下图 1－1：

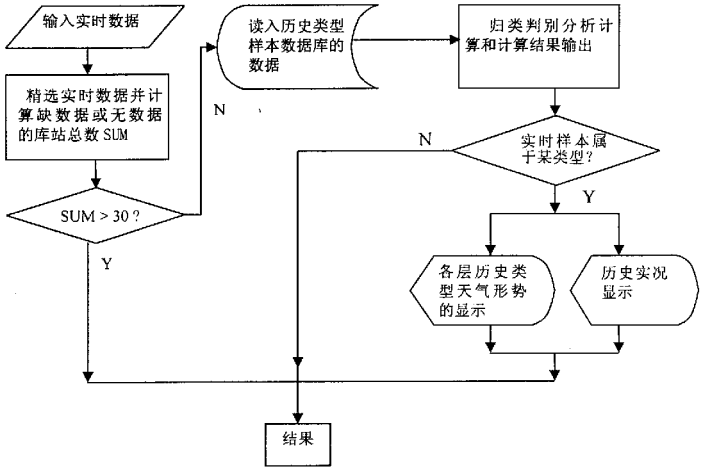


图 1—1：归类判别分析预报模式粗框图

该模式曾成功地应用于 2000 春内蒙古地区的沙尘暴天气预报业务中，并取得了较好的预报效果，但是运行该模式时，常常因为计算区域内缺乏实时数据或无实时数据的站集中的区域位置而影响预报效果。另外，模式中的一些参数也会影响判别函数。

模式（二） 螺旋度修正方案[15]：

此系统首先对预报对象排空处理，其次，进行动力过程相似过滤分析，判别实况是否具备易激发产生中尺度干飑线的基本物理条件，然后，依据强沙尘暴的基本条件，等进行诊断分析，综合运用动力/热力参数模型制作区域性强沙尘暴有无预报，最后，利用螺旋度构造量判别易发生中一尺度干飑线的警界区，确定强沙尘暴天气的主要预报工具。此方案的系统流程图见下图 1—2：

本方案成功的用于宁夏区域性强沙尘暴短期预报。

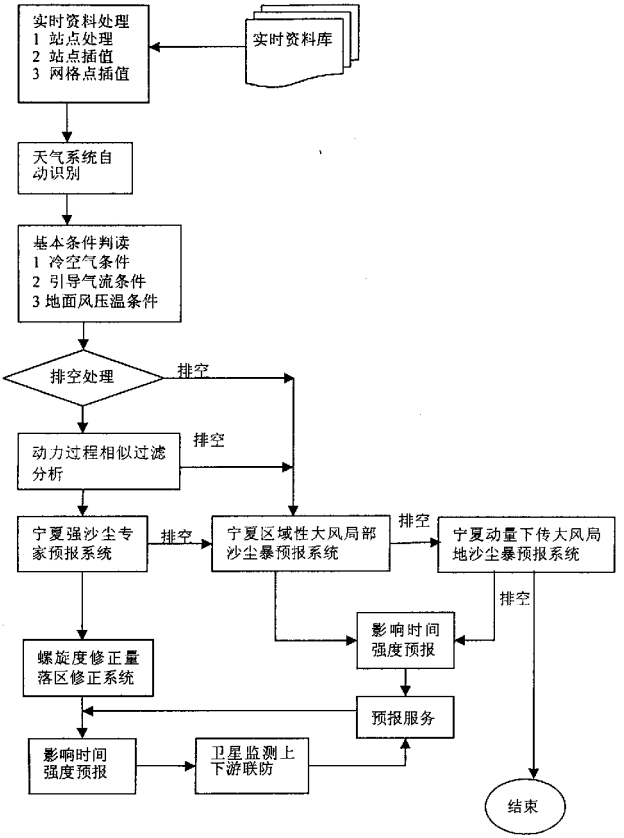


图 1—2：螺旋度修正方案天气监测系统运行总流程图

模式（三） Markov 模型[16]：

此方法是从统计力学的角度出发，通过不确定性的程度研究沙尘暴发生发展的规律，Markov 模型的数据采集应用统计力学的方法，模型的预测过程依据的理论是转移概率，仅与现在的状况有关，而与过去的各个状态无关。随着时间序列的延长，Markov 模型可能成为预测沙尘暴发生的一条有效途径。

模式（四） 新的尝试预报方法[17]：

这是一种将天气学原理和数值预报方法相结合来对沙尘暴进行预报的方案。首先选择一个合理的天气学概念模型，一般运用 PSU/NCAR 的中尺度模式 MM5 来建立天气模型，在此基础上，设计用摩擦速度和大气边界层稳定度状况来模拟，见图 1—3。

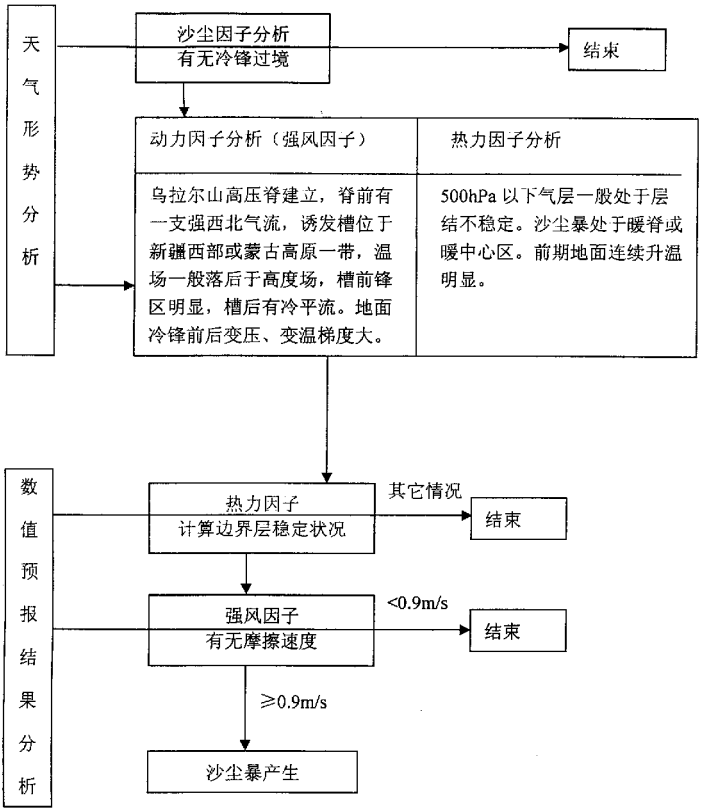


图 1－3： 沙尘暴短期预报流程图

将摩擦速度大值区（一般>0.9mgs^{-1}）及边界层稳定度情形为强迫对流不稳定和自由对流不稳定情况下设计为沙尘暴出现的区域。此种方案是一种新的尝试，缺点主要是模式中只考虑了一种冷风天气系统下起沙的类型，比较局限。另外，操作起来有些不便，还需要进一步完善，真正做到量化。

模式（五） 有限区域气象模式和沙尘传输模式相耦合的数学方法：

1996 年，北京大学，在有限区域气象动力模式 MM4/MM5 的基础上，发展了一个沙尘暴传输扩散模式，模式对源汇项的处理作了考虑。并利用 1991 年 4 月 30 日的实况资料体验了模式的性能。结果表明，模式能够模拟沙尘暴的总体特征。见参考文献【18】

另外，在气象模式 MM4 和沙尘暴传输模型耦合的基础上，对沙尘暴源汇项的处理还有多种方法，可以采用数学方法，也可以用参数化方案或在输送方程中采用沙尘抬升参数化的方程来预报沙尘暴。具体详见参考文献【13】、【19】、【20】

多相悬浮系统的基本方程组。此后，不少其他学者，如柏实义（1973）、Ishii(1975)、Deemer 和 Slattery(1978)等也分别由连续介质出发推导了自己的方程组[21]。尽管在某些具体问题上的处理存在着不同的看法，基本方程组在具体的项目内容上也由些差别，但从整体上看并没有根本的区别。在多相流发展的初期阶段，模拟研究的方法主要基于欧拉方法。欧拉方法的前提是所描述的场具有连续性，因此该方法对液体场、气体场和稀相流动的模拟是行之有效的，前人运用该方法对各种对象进行模拟也取得了巨大的成就。早期的多相流数学模型主要基于上述理论，建立的模型分别为：

（1） 离散介质模型

离散介质模型在数学上处理比较简单，如果不考虑颗粒对流体的作用，则固体颗粒运动的模型只是非线性常微分方程组，这就是普通的颗粒一轨道方法；如果考虑颗粒对流体的作用，还需要把颗粒相对流体的作用力转化成流体相运动方程的源项，因而在计算两相流动时，需要在流体相和固体相的运动方程之间进行反复的叠代，这就是颗粒的源项耦合方法。

离散介质模型虽然可以较好地描述颗粒在时均速度场的运动，但是它的明显缺陷是在计算颗粒浓度和计算轨道时需要计算比较多的轨道。另外一个缺点是不易描述湍流对颗粒运动的影响，因此在采用离散介质模型的同时，对于湍流脉动影响比较重要的问题，不得不再设法模拟湍流对颗粒的作用。离散介质模型最大的不足之处是没有完善的考虑颗粒间的相互作用，对于颗粒与壁面间的相互作用也是简单的基于镜面反射定律。对于小粒径的稀相流动，颗粒间的相互作用是比较弱的，该种处理方法具有一定的可靠性和准确性。

（2） 连续介质模型

连续介质模型对颗粒相的处理采用与处理流体相相同的方法，按 Spalding 学派理论，无论是固体相还是液体相，都用一组形式统一的两阶椭圆型（或简化成抛物型）对流一扩散方程来描述，计算固体相的运动需要求解与流体相类似的偏微分方程。这类模型中颗粒相与流体相类似，也有自身的湍流特性。显然，这种方法比前一种方法需要更大的储存空间和更多的计算时间。当颗粒相数目划分的比较多时，就受到了计算机能力的限制。除此之外，连续介质模型在处理固体相的边界条件（边界上存在速度滑移），颗粒相之间的相互作用以及颗粒相本身的输运性质等方面还存在一定的困难。

连续介质模型把颗粒相作为连续的介质来处理，对于小颗粒（颗粒粒经在 μm 级）稀相流动而言该种处理方法是允许的，模拟结果也具有一定的准确性。科学工作者应用该模型解决了许多实际问题。周力行[22]采用基于离散介质模型的随机轨道模型，忽略相间耦合，对气相流场用 $\kappa-\varepsilon$ 模型，成功的求解了旋风除尘器内的气固两相流动，计算结果和实验基本相符。

§1.4 大型数值并行计算的研究背景

本文所做的数值计算是在我们自己建立和开发的网络机群上进行的并行计算。因此有必要介绍一下大型数值并行计算的研究背景。

网络并行计算是当前国内外计算机科学研究与应用领域中最引人注目的前沿课题之一。本文通过我们自己研制的 PC 机群系统，面向网络并行计算与分布式编程环境，对沙尘暴传输过程的一些天气系统进行了交错网格下的并行化初步研究。

首先，综述并行计算的发展与现状，接着重点介绍机群系统的特点。

电子计算机的出现和发展，使数值模拟这种研究手段应运而生。数值模拟技术充分利用计算机的高速度及精确性，通过建立数学模型达到对所研究工程及科学问题的分析与设计，由于具有耗费少，时间短，省人力，易重复等优点，计算机数值模拟与辅助设计已经在国防和工程领域中充当越来越重要的角色。然而尽管数值模拟已经在许多领域达到了相当成熟的程度，取得了广泛的成果，但是限制它们广泛应用的主

总的来说，以前对沙尘暴的预报主要是天气学方法或统计学方法【14-16】，这些方法的优点是易于操作，但主观性强。现在数值预报技术日臻完善，各种中尺度模式发展得也较快，对各种物理过程考虑得也比较周全，对一些中小尺度天气过程可以完全做到定量化的客观预报【17-20】。这样的模式现在有很多，像 PSU/NCAR 的非静力模式 MM5 是一个比较好用的工具，本文就利用了该模式。因此，怎样把传统的天气学方法同现代数值预报技术完美地结合起来，探索一种新的天气预报方法，乃是今后需要深入研究的一个关键课题。本文就是基于以上观点尝试建立对我国西北和华北地区沙尘暴预报方法。

§1.3 数值模拟在多相流上的发展

众所周知，沙尘暴事件是一次典型的大气气固两相流过程，本文是在两相流的基础上进行沙尘暴的数值模拟。

含有大量固体或液体颗粒的气体或液体流动，或者含有气泡的液体流动，称为“两相流”或“多相流”。两相或多相流体力学的主要研究对象是该系统的流动，传热传质，化学反应，电磁效应等，其中十分重要的是相与相间的质量、动量和能量的相互作用规律。

两相或多相广泛存在于自然界及工程中，可以认为绝大多数的流动都是多相流。纯粹的单相流（如极纯净的气体或水等）只是个别情况。诸如大气中云雾，含尘空气，含泥沙水流，生物体血管流，粉尘或粒料的气力或液力管道输送，粉尘的分离与收集，喷雾干燥与喷雾冷却，选矿，气流纺纱，液雾或煤粉或金属粉的燃烧，流化床，固体火箭排气，等离子体化工，各种粉末制备，烟气透平内的含沙流等等都是多相流。

1.3.1 大气中的多相流微粒扩散现象

大气中的多相流微粒扩散研究是当前研究的热点之一，尤其是沙尘暴的运动，对环境保护有很现实的意义。当气流在沙地上吹过、携带部分沙粒一起运动时，这种运动称为风沙二相流。由于沙漠在世界陆地面积中占有相当大地比例，而且每年还在继续扩大，侵吞良田，因此，从防止土地的沙漠化，并进而改造沙漠来看，研究风沙运动规律十分重要。

研究大气中的多相流微粒扩散现象，主要是通过风沙物理学。风沙物理学主要分为宏观和微观二个方面。宏观方面的研究包括单宽输沙率、输沙率沿高度的分布等。微观方面主要是对颗粒跃移运动的照片进行统计分析，分析其颗粒起跳的机理。研究两相或多相流有两类基本上不同的观点：一类是只把流体作为连续介质而把颗粒群作为离散体系，将离散的颗粒相通过平均，研究颗粒群的平均行为，通过偏微分方程来描述其特性；另一类是除流体作为连续介质外把颗粒群当作拟连续介质或拟流体，设其在空间中有连续的速度和温度分布及等价的输运性质（粘性、扩散、导热等），通过引入两相间的相互作用来建立模型。研究大量颗粒的运动，只能采用连续介质力学方法，通过二相流方程求解，困难在于对方程中的许多物理量（如应力、相间力等）的本构式知之甚少。连续介质模型的主要特点在于把宏观上离散的颗粒相和宏观上连续的流体相经过空间或时间的平均，处理成连续相，这样便于使用积分和流体力学的成果。

在多相流发展的初期，研究的重点集中在小颗粒（粒径在μm 级）的稀相流动上，研究的对象主要集中于管流、流化床和固定床内气体流动的经验公式的求取。只有个别学者对颗粒运动的基本理论做过一些探索性的研究，其中最著名的是陈善模（1949）提出的单颗粒运动方程[21]，该方程至今仍被广泛应用。50 年代后期由于工业发展的需要，多相流的研究工作得到了飞速的发展。Murray(1965)根据连续介质理论推导了单一尺寸颗粒悬浮体中流体和固体颗粒的基本方程[21]。S.L.Soo[21]从同样的观点出发，但强调了颗粒尺寸分布的重要性，认为不同尺寸的颗粒具有不同的动力特性从而构成不同的相，在此基础上也建立了

多相悬浮系统的基本方程组。此后，不少其他学者，如柏实义（1973）、Ishii(1975)、Deemer 和 Slattery(1978)等也分别由连续介质出发推导了自己的方程组[21]。尽管在某些具体问题上的处理存在着不同的看法，基本方程组在具体的项目内容上也由些差别，但从整体上看并没有根本的区别。在多相流发展的初期阶段，模拟研究的方法主要基于欧拉方法。欧拉方法的前提是所描述的场具有连续性，因此该方法对液体场、气体场和稀相流动的模拟是行之有效的，前人运用该方法对各种对象进行模拟也取得了巨大的成就。早期的多相流数学模型主要基于上述理论，建立的模型分别为：

（1） 离散介质模型

离散介质模型在数学上处理比较简单，如果不考虑颗粒对流体的作用，则固体颗粒运动的模型只是非线性常微分方程组，这就是普通的颗粒一轨道方法；如果考虑颗粒对流体的作用，还需要把颗粒相对流体的作用力转化成流体相运动方程的源项，因而在计算两相流动时，需要在流体相和固体相的运动方程之间进行反复的叠代，这就是颗粒的源项耦合方法。

离散介质模型虽然可以较好地描述颗粒在时均速度场的运动，但是它的明显缺陷是在计算颗粒浓度和计算轨道时需要计算比较多的轨道。另外一个缺点是不易描述湍流对颗粒运动的影响，因此在采用离散介质模型的同时，对于湍流脉动影响比较重要的问题，不得不再设法模拟湍流对颗粒的作用。离散介质模型最大的不足之处是没有完善的考虑颗粒间的相互作用，对于颗粒与壁面间的相互作用也是简单的基于镜面反射定律。对于小粒径的稀相流动，颗粒间的相互作用是比较弱的，该种处理方法具有一定的可靠性和准确性。

（2） 连续介质模型

连续介质模型对颗粒相的处理采用与处理流体相相同的方法，按 Spalding 学派理论，无论是固体相还是液体相，都用一组形式统一的两阶椭圆型（或简化成抛物型）对流一扩散方程来描述，计算固体相的运动需要求解与流体相类似的偏微分方程。这类模型中颗粒相与流体相类似，也有自身的湍流特性。显然，这种方法比前一种方法需要更大的储存空间和更多的计算时间。当颗粒相数目划分的比较多时，就受到了计算机能力的限制。除此之外，连续介质模型在处理固体相的边界条件（边界上存在速度滑移），颗粒相之间的相互作用以及颗粒相本身的输运性质等方面还存在一定的困难。

连续介质模型把颗粒相作为连续的介质来处理，对于小颗粒（颗粒粒经在 μm 级）稀相流动而言该种处理方法是允许的，模拟结果也具有一定的准确性。科学工作者应用该模型解决了许多实际问题。周力行[22]采用基于离散介质模型的随机轨道模型，忽略相间耦合，对气相流场用 $\kappa-\varepsilon$ 模型，成功的求解了旋风除尘器内的气固两相流动，计算结果和实验基本相符。

§1.4 大型数值并行计算的研究背景

本文所做的数值计算是在我们自己建立和开发的网络机群上进行的并行计算。因此有必要介绍一下大型数值并行计算的研究背景。

网络并行计算是当前国内外计算机科学研究与应用领域中最引人注目的前沿课题之一。本文通过我们自己研制的 PC 机群系统，面向网络并行计算与分布式编程环境，对沙尘暴传输过程的一些天气系统进行了交错网格下的并行化初步研究。

首先，综述并行计算的发展与现状，接着重点介绍机群系统的特点。

电子计算机的出现和发展，使数值模拟这种研究手段应运而生。数值模拟技术充分利用计算机的高速度及精确性，通过建立数学模型达到对所研究工程及科学问题的分析与设计，由于具有耗费少，时间短，省人力，易重复等优点，计算机数值模拟与辅助设计已经在国防和工程领域中充当越来越重要的角色。然而尽管数值模拟已经在许多领域达到了相当成熟的程度，取得了广泛的成果，但是限制它们广泛应用的主

总的来说，以前对沙尘暴的预报主要是天气学方法或统计学方法【14-16】，这些方法的优点是易于操作，但主观性强。现在数值预报技术日臻完善，各种中尺度模式发展得也较快，对各种物理过程考虑得也比较周全，对一些中小尺度天气过程可以完全做到定量化的客观预报【17-20】。这样的模式现在有很多，像 PSU/NCAR 的非静力模式 MM5 是一个比较好用的工具，本文就利用了该模式。因此，怎样把传统的天气学方法同现代数值预报技术完美地结合起来，探索一种新的天气预报方法，乃是今后需要深入研究的一个关键课题。本文就是基于以上观点尝试建立对我国西北和华北地区沙尘暴预报方法。

§1.3 数值模拟在多相流上的发展

众所周知，沙尘暴事件是一次典型的大气气固两相流过程，本文是在两相流的基础上进行沙尘暴的数值模拟。

含有大量固体或液体颗粒的气体或液体流动，或者含有气泡的液体流动，称为“两相流”或“多相流”。两相或多相流体力学的主要研究对象是该系统的流动，传热传质，化学反应，电磁效应等，其中十分重要的是相与相间的质量、动量和能量的相互作用规律。

两相或多相广泛存在于自然界及工程中，可以认为绝大多数的流动都是多相流。纯粹的单相流（如极纯净的气体或水等）只是个别情况。诸如大气中云雾，含尘空气，含泥沙水流，生物体血管流，粉尘或粒料的气力或液力管道输送，粉尘的分离与收集，喷雾干燥与喷雾冷却，选矿，气流纺纱，液雾或煤粉或金属粉的燃烧，流化床，固体火箭排气，等离子体化工，各种粉末制备，烟气透平内的含沙流等等都是多相流。

1.3.1 大气中的多相流微粒扩散现象

大气中的多相流微粒扩散研究是当前研究的热点之一，尤其是沙尘暴的运动，对环境保护有很现实的意义。当气流在沙地上吹过、携带部分沙粒一起运动时，这种运动称为风沙二相流。由于沙漠在世界陆地面积中占有相当大地比例，而且每年还在继续扩大，侵吞良田，因此，从防止土地的沙漠化，并进而改造沙漠来看，研究风沙运动规律十分重要。

研究大气中的多相流微粒扩散现象，主要是通过风沙物理学。风沙物理学主要分为宏观和微观二个方面。宏观方面的研究包括单宽输沙率、输沙率沿高度的分布等。微观方面主要是对颗粒跃移运动的照片进行统计分析，分析其颗粒起跳的机理。研究两相或多相流有两类基本上不同的观点：一类是只把流体作为连续介质而把颗粒群作为离散体系，将离散的颗粒相通过平均，研究颗粒群的平均行为，通过偏微分方程来描述其特性；另一类是除流体作为连续介质外把颗粒群当作拟连续介质或拟流体，设其在空间中有连续的速度和温度分布及等价的输运性质（粘性、扩散、导热等），通过引入两相间的相互作用来建立模型。研究大量颗粒的运动，只能采用连续介质力学方法，通过二相流方程求解，困难在于对方程中的许多物理量（如应力、相间力等）的本构式知之甚少。连续介质模型的主要特点在于把宏观上离散的颗粒相和宏观上连续的流体相经过空间或时间的平均，处理成连续相，这样便于使用积分和流体力学的成果。

在多相流发展的初期，研究的重点集中在小颗粒（粒径在μm 级）的稀相流动上，研究的对象主要集中于管流、流化床和固定床内气体流动的经验公式的求取。只有个别学者对颗粒运动的基本理论做过一些探索性的研究，其中最著名的是陈善模（1949）提出的单颗粒运动方程[21]，该方程至今仍被广泛应用。50 年代后期由于工业发展的需要，多相流的研究工作得到了飞速的发展。Murray(1965)根据连续介质理论推导了单一尺寸颗粒悬浮体中流体和固体颗粒的基本方程[21]。S.L.Soo[21]从同样的观点出发，但强调了颗粒尺寸分布的重要性，认为不同尺寸的颗粒具有不同的动力特性从而构成不同的相，在此基础上也建立了

要还是计算机资源本身，计算机运行速度和容量大小。以气象预报为例，要提高全球气象预报的准确性，据估计在经度、纬度及大气方向至少要取网格点 200×100×20=40 万个，如目前中期天气预报有的模式需要 635 万个点，内存需几十个 GB，总运算量为 25Tera（1Tera=10^{12}），并要求在不到 2 小时内完成 48 小时的天气预报[23]。当计算能力不足时只能降低结果的分辨率，简化计算方案，这样就影响了预报的准确率。

正是各个领域类似的大型科学计算问题，提出了对计算机性能的要求。高性能并行计算（HPPC, High Performance Parallel Computing）可以最大限度地满足人类对计算速度和存储容量的要求，高性能计算机的发展水平已经成为衡量一个国家高新科技水平和综合实力的重要标志，因此许多国家作为投资重点对其加以研究[24]，美国政府于 1991 年开始执行“高性能计算与通信（High Performance Computing and Communication , HPPC）”项目[25]，日本政府出台了 RWC（Real World Computing）计划；国内高性能计算技术在航天、气象和石油勘探等领域受到了极大的关注，在国家“八六三”计划等的支持下，国家智能计算机研究开发中心自 1993 年以来，相继研制出曙光-1 全对称（SMP）并行机、曙光 1000 大规模并行处理（MPP）系统和曙光 2000 系列百亿次高性能计算机。现在世界上理论速度峰值超过 10^{12}/s 的计算机已达 7 台。预计到 2003 年，高性能计算机的速度将达到 10^{15}/s，而民用研究团体所使用的高性能计算机也可达几十万次的浮点运算速度。下面是 1999 年 6 月 TOP500 统计的世界前 10 位高性能计算机的主要性能指标。

表 1.1 世界前 10 位高性能计算机

排名	厂商	型号	年份	处理单元	浮点运算速度/$10^9 \cdot s^{-1}$	
					实测峰值	理论峰值
1	Intel	ASCI Red	1999	9152	2121.3	3154
2	SGI	ASCI Blue	1998	6144	1608	3072
3	SGI	T3 E1200	1998	1084	891.5	1300.8
4	Hitachi	SR8000/128	1999	128	873.6	1024
5	SGI	T3 E900	1997	1324	815.1	1191.6
6	SGI	ORIGIN 2000	1999	2048	690.9	1024
7	SGI	T3 E900	1997	876	552.92	788.4
7	IBM	SP Silver	1998	1952	547	1296
9	SGI	T3 E900	1999	812	515.1	703.8
10	SGI	T3 E1200	1998	612	509.9	734.4

可见，高性能计算的研究是近年国际研究热点。目前，高性能计算机的两个重要发展方向是大规模并行计算（Massively Parallel Processor，MPP）和工作站网络机群（Network of Workstations, NOWs）[26, 27]。短期内，MPP 技术仍被高性能计算系统广泛应用。专用的 MPP 系统一般都是基于市场上的微处理器，但是支持通信和同步的机制却是高性能超级计算机专用的部件，这使得 MPP 系统性能非常卓越，但价格也十分昂贵。高性能工作站和高性能网络设施的出现，为工作站机群的发展提供了新的契机。1994 年，NASA 建立了机群并行系统模型 Beowulf，网络机群并行系统因其高性能价格比、结构灵活、可扩展性强、软件财富可继承、通用性好以及异构能力强等诸多优点而备受关注，它是高性能并行计算领域的主要发展方向之一[28, 29]。作者认为，发展高性能计算必须结合我国国情。现有的机群计算环境主要针对工作站网络。在我国，很少单位拥有多台工作站，而拥有多台 PC 机的单位已经十分普遍。现代 PC 机的性能不断大幅度提高，价格大幅度下降，其性能价格比已优于工作站。另一个事实是，全世界熟悉 PC 机的人数远大于熟悉工作站的人数。因此，开发 PC 机群上的并行计算环境是十分有意义的，它应该是目前我国高性能计算运用的唯一途径。

沙尘暴过程中的沙尘起沙、传输和沉降过程均发生在及其复杂的天气系统中，是极为复杂的非线形现象，大规模数值计算正是研究上述过程的重要理论手段之一。网络并行计算机系统实现了超级计算机的部

分功能，使原来国外同行才可进行的天气预报，大气环境模拟等非线性数值计算研究在国内成为可能，是适合我国国情的、赶超国际先进水平的有效途径。

本文的工作就是研究分析沙尘暴在复杂天气系统下的输运、扩散过程。并且在我们自行开发研制的独具特色的基于 PC 机的网络并行机群系统下，检验了系统的可行性，并行机群为本文的研究工作提供了强有力的计算工具。

§1.5 本文的研究目的、方法、内容及意义

沙尘暴是一种灾害性天气现象，近年来引起全国的关注，尤其是北京中央政府的高度重视，弄清沙尘暴传输路径及扩散范围，对我国沙尘暴的预报及环境的治理有重要意义。这也是本文研究工作的目的和意义。

本文首先建立了一个模拟沙尘传输过程的三维动力欧拉方程，然后利用有限区域中尺度动力气相模型 MM5 和沙尘传输扩散模型相耦合，来讨论如何应用控制模型来模拟我国沙尘暴的爆发、传输和沉降的物理特征。

沙尘暴过程是一个典型的大气气固两相流过程，主要包括：沙尘暴的起源、沙尘暴的传输及沙尘暴的沉降三个主要阶段。本文建立的传输模型中，对沙尘暴的三个阶段都作了仔细的考虑，尤其重点突出考虑沙尘粒子在不稳定温度场中的热漂移作用，并分析比较了加上热漂移源项和没加上热漂移源项两种工况下模型输出的不同结果，进而讨论研究了粒子热漂移源项在整个沙尘暴过程中对粒子传输、扩散的作用，最后得出初步研究结论。

本文作者首次将大气气象过程与工程的两相流过程相结合，大胆创新，是我国热工界与气象学科交叉研究的首次尝试。同时气象模式中应用并行计算，证实并行计算机是大型数值模拟的必要手段。

本文建立的气相模型 MM5 和沙尘输送模型很好的模拟了大气沙尘暴的过程，计算结果与实际情况相符合，正确反映了沙尘暴迁徙的路径和影响范围。

本文在下面的第二章、第三章、第四章将具体阐述模型方程组的建立、计算结果的分析讨论及输出图形的处理。

第二章　沙尘暴（气体一颗粒）两相流的数值方法

§2.1　动力气相模式 MM5 的建立

2.1.1 概述

对地球人类活动而言，长远的问题是：未来的气候变化将给人类生活带来什么样的影响，然而就短期而言，对国民经济和人民生命财产经常造成严重损失的则是那些中尺度天气系统[29]，沙尘暴天气正是中尺度天气之一。因此，如何对中尺度气象过程进行数值模拟，进而实现其业务数值预报已成为各国备加关注的问题。一些国家已经成功的发展了自己的中尺度气象过程的模拟系统。为了能对中尺度数值模拟，有一个全面的了解，这里首先从这类模拟系统的建立谈起。（本文以MM5为例）

动力模式 MM5 是 NCAR/PUS 发展的一个中尺度模拟系统，它是一个 σ 坐标系中的三维流体原始方程模式，关于流体静力学与流体非静力学，根据地形来模拟的模型。变量在水平和垂直方向的配置均为跳点格式，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，并具有多个物理参量可根据需要选用，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。这个模式始于 NCAR/PENN 公司，现作为公共软件在各个大学，实验室得到运用和近一步发展。模式所有可预报参量均采用 Asslin [30]方案，水平对流项采用二阶精度有限积分。有关 MM5 的详细介绍可以参考文献：Anthes and Warner(1978)[31]、Anthes et al .(1987)[32]。

一个中尺度气象模拟系统（MM5），至少需要包括三个程序库，即预处理程序库，主程序库（这里是MM5）和后分析程序库。预处理程序库指主程序MM5前的所有程序；后分析程序库指在主程序后运行的各个程序。预处理程序库主要为主程序MM5运行准备输入资料；主程序是模拟系统模拟所研究气象过程的主控程序，即MM5；后分析程序库主要分析处理模式运行后的输出结果，包括诊断和图形输出，解释和检验模式模拟或预报结果。详见图2－1。

气相模式MM5主要包括六个模块：

(1) TERRAIN 模块：主要从规则经纬网格的地形资料和下垫面类型（LANDUSE）分类资料中插值求取模式 LAMBERT（或其他投影方式）下的坐标网格上地形高度和地表类型；（地形模块）

(2) REGRID 模块：把全球或半球范围的粗分辨率的经纬度分析资料水平插值到中尺度模拟区域的网格上；（水平插值模块）

(3) RAWINS 模块：主要目的是通过对实际观测的地面和高空资料的客观分析来改善DATAGRID模块输出的有粗分辨资料得到的初始场；（客观分析模块）

(4) INTERF 模块：把初始数据处理成模式所需的格式或对模式结果进行转换处理以用于分析；（垂直模块）

(5) MM5 模块：中尺度模式第五代，进行数值计算；

(6) GRAPH 模块：把模拟结果用图像显示出来。（图形输出模块）

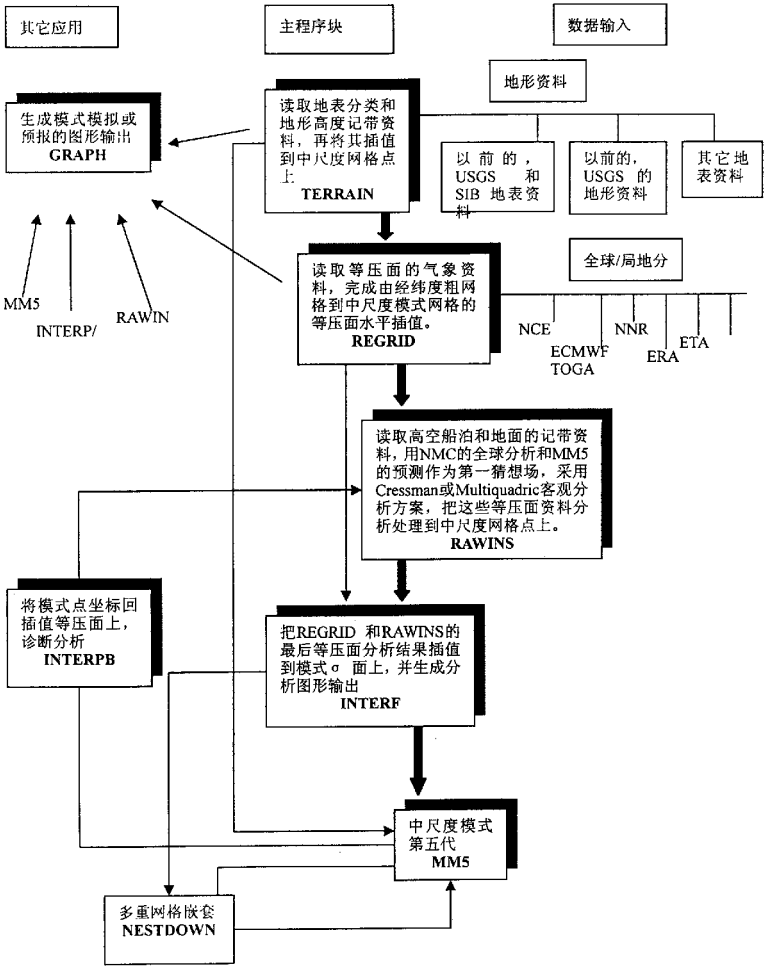


图 2－1　MM5 模型流程图

2.1.2 MM5模式建立的设计思想

首先要使气相模式设计的目的能圆满地实现，须要遵循如下原则[33]：

（1） 通过量级比较和物理过程相对重要性分析，使模式包含有可能达到目的有关制约大气过程的物理因子和物理机制。

（2） 模式整体性质合理

（3） 计算稳定、精确。

（4） 模式各部分协调。

（5） 有合适的网格和分辨率。

（6） 有合适的计算域

垂直方向

1，层数

在大气中如果从位势高度考虑，要表示温度场至少需要2层；要表示温度随高度的变化，至少需要3层；而要表示温度直减率随高度的变化，则至少需要4层；为了使计算精密一些，则应在5层以上。

2，分层的疏密

现在，许多业务模式都用不等距分层，考虑对流层顶附近和边界层内温度、风等气象要素随高度变化较大，一般这些地方分层较密，其他地方较疏。

3，模式顶高度

有些模式顶高度取到大气顶。但由于大气顶资料无定义，其附近资料也很少，因此有不少模式把顶取到略低于大气顶的地方。

4，数值模拟

在有限域中尺度模式中，数值近似和计算方法一般包括三方面内容，即坐标系和格点结构，数值方法，数值技巧。

对坐标系来说，通常有三种类型，即单变数垂直坐标，地形坐标系和混合坐标系。这些坐标系均决定于垂直坐标变数。这三类坐标系的代表通常是P坐标系，σ坐标系：$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$和混合的P－σ坐标系（式中$Ps$、$Pt$分别代表地表气压和模式顶层气压）。在列举的坐标系中，对单变数垂直坐标（如P），气压梯度力项计算精度高，但下边界条件复杂；而但在单调函数垂直坐标系中（如σ），气压梯度力项计算精度差，然而，下边界条件简单。所以，本文模型采用σ坐标系。

对格点结构来说，无论选用哪种坐标系，通常采用跳点格式，这种格式的最大优点是：当水平跳点和非跳点的格点数目相同时，而跳点对有关梯度项的计算有更高的精度（Arakawa等，1977）[34]；这是因为跳点比非跳点有加倍的分辨率。对水平和垂直跳点结构来说，唯一缺点是需较短时间步长。

对数值求解偏微分方程的数值方法，在大气数值模拟中可以说是研究的非常多的，这些方法一般可分四类，即有限差分法，谱或假谱方法，有限元法及插值法。其中，除谱方法外，其余都可构成有限差分方程组。由于在各种气象条件下，差分法的简便和良好的试验结果，所以，至今该方法仍是中尺度模式中最常用的。在比较不同的差分方案时，应着重注意数值近似的精度，守恒特性，方案复杂与否以及计算费用等。

在空间差分中，常用的中央差分是二阶精度（差分误差正比于格距或时间步长的二次方）。由于与空间差分相伴的截断误差是模式误差的主要误差，因此，许多模式在计算机条件允许的情形下，多采用高阶

差分近似。

对时间积分方案，通常可分为显式和隐式。由于隐式较显式可用更长的（2～8倍）时间步长，因而其效率更高。与空间截断误差在模拟中所引入的误差相比，而时间截断误差引入的要小的多。

在数值近似中，除了要注意数值计算方法外，还必须重视数值技巧，以便保证数值模拟的合理运行。通常，数值技巧处理包括：水平和垂直平滑，时间过滤，侧边界条件和垂直边界条件，但有时把空间边界条件分开来讨论。

首先谈谈水平和垂直平滑。水平和垂直扩散是出现在微尺度范围的物理过程，这种过程的作用是消除或平滑一些小尺度梯度，在数值模式中则要求用一种数值过程消除那些由于模式不精确和计算的舍入误差而产生的一些小尺度（相对于格距）梯度。只要求这种方案尽可能有效，并不要其与物理解释有关，唯一的条件是，这些“平滑器”几乎对模式可分辨的较大尺度没有影响。

其次，谈谈时间过滤。为了防止与蛙跃时间差分方案相伴的解在偶数为奇数时间步长上的分裂或发散，人们常常用一个时间过滤器或平均技术来收敛这类解，Asselin（1972）[35]给出的下述时间过滤器可应用于所有预报变数，即

$$\hat{\phi}^{\tau} = (1-\nu)\phi^{\tau} + \frac{1}{2}\nu(\phi^{\tau+1} + \hat{\phi}^{\tau-1}) \tag{2-1}$$

其中，$\hat{\phi}$是变率系数，系数ν在0.3和0.1之间，其余符号通用。关于这类过滤器的应用，在许多地方都可看到，但其系数必须通过试验才能决定。

最后谈谈侧边界条件和垂直边界条件问题。对有限域中尺度模式来说，侧边界条件的数值处理无疑是一个困难而又重要的问题，从物理和数学上讲，选取有限域侧边界条件必须注意这样几个问题：其一，边界条件应尽量和大气实况相近，并且在预报和模拟过程中也相近；其二，问题的提法是适定的；第三，当边界条件和控制方程组相结合时，能近似反映原来方程组在全球或大尺度范围内的重要物理特性。为此，在中尺度数值模拟中已经有几种不同的侧边界处理技术和方法，其中一个，也即MM5中用到的是海绵边界：

海绵边界条件：这是围绕边界向内一定范围设置一个增加水平涡动粘滞性的过渡带。这种海绵边界条件由下式给出：

$$(\frac{\partial\alpha}{\partial t})_n = W(n)(\frac{\partial\alpha}{\partial t})_{MC} + [1-w(n)](\frac{\partial\alpha}{\partial t})_{LS} \tag{2-2}$$

其中，α代表任意系数；下脚MC表示模式计算的趋势，而LS表示大尺度趋势（从观测或大尺度模拟获得）；W（n）是权重系数。这种海绵边界通常是中尺度模式用的最多。

中尺度大气物理过程的处理

由于大气的物理过程非常复杂，这儿就不详细介绍了，但MM5模型的优越性也正体现在它可提供多种物理参数选择，我们可根据本模型的模拟区域地形，天气背景等具体情况，来设置符号需要的物理参数，达到最佳真实模拟效果。

2.1.3 MM5模式方程组的建立形式

MM5 的模式方程组为：

用压力项表示的垂直σ坐标：

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \tag{2-3}$$

P_s，P_t分别表示地表气压和模顶气压，P_t是常数，两者之差定义为：

$$p^* = p_s - p_t, \tag{2-4}$$

水平动量方程：

$$\frac{\partial(p^*u)}{\partial t} = -m^2\frac{\partial(p^*uu/m)}{\partial x} + \frac{\partial(p^*vu/m)}{\partial y} - \frac{\partial(p^*u\dot{\sigma})}{\partial \sigma} - mp^*\left[\frac{RT_V}{(P^* + P_t/\sigma)}\frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x}\right] + fp^*v + F_H u + F_V u, \tag{2-5}$$

$$\frac{\partial(p^*v)}{\partial t} = -m^2\frac{\partial(p^*uv/m)}{\partial x} + \frac{\partial(p^*vv/m)}{\partial y} - \frac{\partial(p^*v\dot{\sigma})}{\partial \sigma} - mp^*\left[\frac{RT_V}{(p^* + p_t/\sigma)}\frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y}\right] - fp^*u + F_H v + F_V v, \tag{2-6}$$

能量方程：

$$\frac{\partial(p^*T)}{\partial t} = -m^2\left[\frac{\partial(p^*uT/m}{\partial x} + \frac{\partial(p^*vT/m)}{\partial y}\right] - \frac{\partial(p^*T\dot{\sigma})}{\partial \sigma} + \frac{RT_V\omega}{c_{pm}(\sigma + p_t/p^*)} + \frac{p^*Q}{c_{pm}} + F_H T + F_V T, \tag{2-7}$$

$$\omega = P^*\dot{\sigma} + \sigma\frac{dp^*}{dt}, \tag{2-8}$$

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial p^*}{\partial t} + m\left[u\frac{\partial p^*}{\partial x} + v\frac{\partial p*}{\partial y}\right], \tag{2-9}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln(\sigma + p_t/p^*)} = -RT_V\left[1 + \frac{q_c + q_r}{1 + q_v 0}\right]^{-1}, \tag{2-10}$$

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

式中，r为粒子半径，$E(r)$为半径为r的沙尘粒子浓度，$F_H v$，$F_H u$，$F_H T$分别表示动量，温度水平扩散，$F_V u$，$F_V v$分别表示动量的垂直扩散，$F_V T$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。

2.1.4 空间时间差分方案

上面的方程是在B网格上进行差分的。水平网格点分为叉点（cross point）和圆点（dot point）两种，u, v定义在圆点上，而其他的变量定义在叉点上。除了降水用一阶上游方案外，其余的都用两阶中央差分格式。模式的垂直方向是采用σ分层，$\dot{\sigma}$定义在整σ层上，而其余的变量都定义在半σ层上。

本模型的网格点的设置以及垂直方向的设置见下图2—2、图2—3。

本模型的网格点的设置以及垂直方向的设置见下图 2—2、图 2—3。

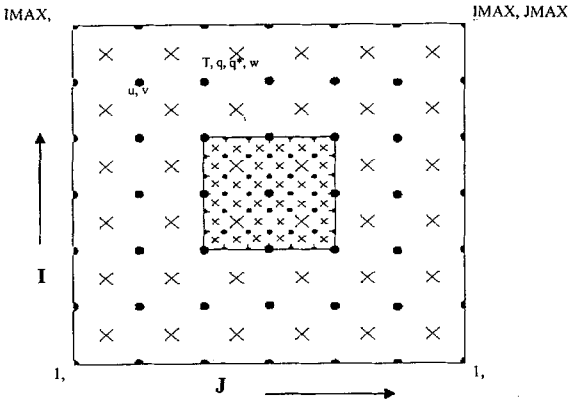


图 2—2：上图显示的是 MM5 模式中水平网格点的分布，图中（●）点和（×）点分别插值不同的变量，中间细网格为内嵌小区域，粗细网格间距比例为 1：3。

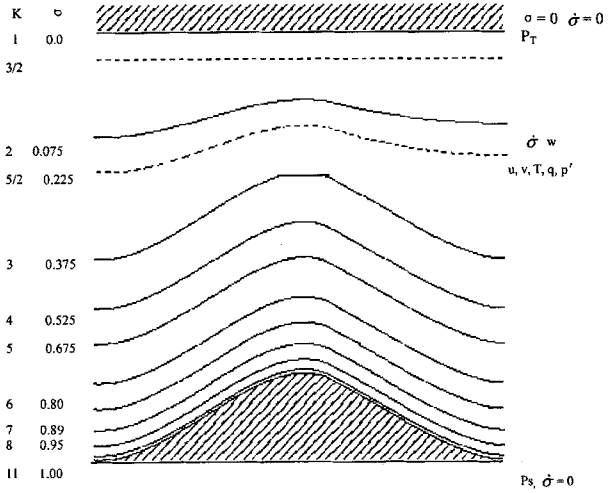


图 2—3：上图显示的是本模式垂直方向分布，本模式垂直方向分为 10 层，图中实线表示一个 σ 层，虚线表示半 σ 层，P_T 表模顶气压，P_S 表地表气压

有限时间差分方案：

模式中的时间方案主要用蛙跳方案（leapfrog），对于有些项采用时间分裂算法。

在非静力模式中，由于模式大气是可压缩的，必然包括快速的声波，为了保证计算的稳定性这部分的计算必须选用较短的时间步长，这样模式的计算效率就会很低，为了提高计算效率，数值积分时分两种情况，当计算模式中与快波声波有关项时，假定其他项不变的，这样使描述声波作用的方程大为简化，此时选用较短的时间步长进行计算，另外还包括预报降雨项、物理参数 PBL 趋势项等，与声波无关的项时，选用较长的时间步长，这种时间分裂的算法使模式的计算效率大大提高。

方程的处理过程中为了稳定性还采用隐式时间方案，这样变量的计算趋势不仅依靠现在，过去的变量值，还需要将来值。这样的处理过程对所有的时间步长都是稳定的，但执行时通常需要一个矩阵转换。在 MM5 模型中隐式时间方案只在计算垂直扩散和垂直声波时用到。

时间积分方案见下图。

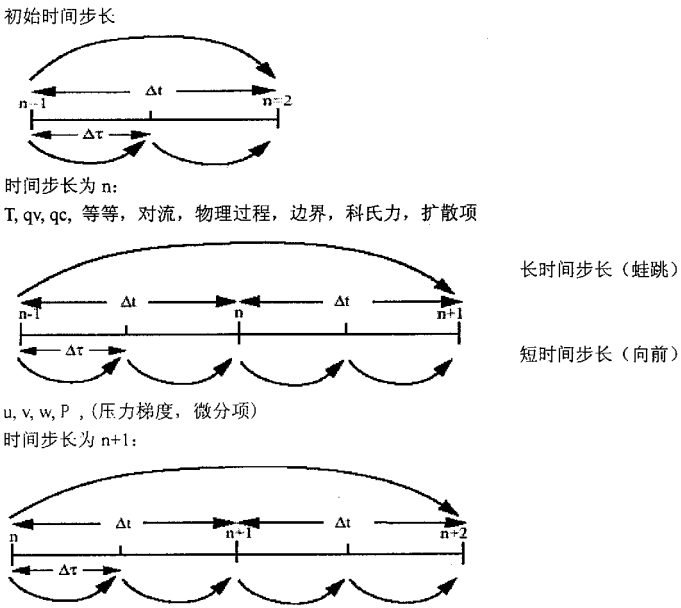


图 2－4： 时间积分方案

2.1.5 模式物理过程

MM5 模式中包括了 6 种积云参数化方案：Anthes-Kuo 方案、Grell 方案、Arakawa-Schubert 方案、Fritsch-Chappell 方案、Kain-Fritsch 方案和 Betts-Miller。5 种边界层方案：Burk PBL 方案、高分辨 Blackadar PBL 方案、Burk-Thompson PBL 方案、Eta PBL 方案、Mrf PBL 方案和 Gayno-Seaman PBL 方案。7 种显式水汽方案：稳定降水（Stable Precip）方案、暖降雨（Warm Rain）方案、简单冰相（Simple Ice）

方案、混合过程（Mixed Phase）方案、Goddard 微物理方案、CCM2 辐射方案和 RRTM 辐射方案。3 种计算地面温度的方案：强迫恢复方案（Force/Restore Blackadar Scheme）、五层土壤模式、OSU/Eta 陆地过程模式。图 2－5 描述了各个物理过程之间的关系。

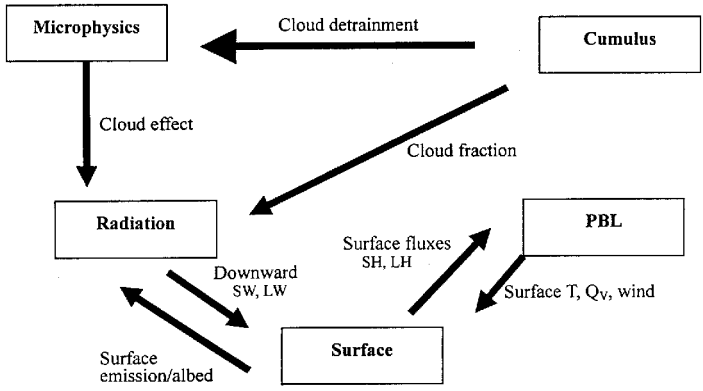


图 2－5： MM5 模式中各物理过程的相互作用

§2. 2 沙尘传输模型的建立

2.2.1 概述

沙尘暴发生在沙漠和干旱地区，它不仅影响本地区，还可以通过大气输送影响大范围的下游地区的生态，环境和气候。因此，对沙尘暴进行全面、系统、深入的研究，有助于搞清荒漠化过程中的某些动力学机制。对如何建立一个有效的模式来模拟沙尘暴的机制，一直是科学家致力研究的问题，近二三十年来，有关沙尘暴模型的发展已具成熟化。

目前由于监测手段的限制，有关沙尘暴的观测资料少且不全面，对沙尘暴起动，传输的分部特征了解的很少，因而模型模拟的方法就显得非常重要。

本文作者在一般大气传输模型的基础上发展了一个受气相模型 MM5 驱动的三维欧拉沙尘传输模型。模型中根据沙尘传输的特征，详细的考虑了沙尘的三个特征阶段：起沙、传输和沉降。传输过程中包括水平，垂直扩散，尤其考虑了粒子在不稳定温度场中的迁移（热漂移过程）。

2.2.2 沙尘传输方程的建立形式

沙尘颗粒输送模型：

$$\frac{\partial(p^* E(r))}{\partial t} = -m^2\left[\frac{\partial(p^* u E(r)/m)}{\partial x} + \frac{\partial(p^* v E(r)/m}{\partial y}\right] - \frac{\partial(p^* \dot{\sigma} E(r))}{\partial \sigma} + F_H E(r) + F_V E(r) + Q_{DEP} + Q_s + Q_T \tag{2-11}$$

式中，$p^* = p_s - p_t$ 是地表气压与模顶气压差，r 为粒子半径，$E(r)$ 为半径为 r 的沙尘粒子浓度，$F_H E(r)$ 表示粒子浓度的水平扩散，$F_V E(r)$ 表示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，$\dot{\sigma}$ 分别表示动力气相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。

2.2.3 方程源项处理

沙尘暴的起沙源的处理：

沙漠和沙地为沙尘暴和扬沙的天气提供了丰富的物质源。

沙尘暴起沙源的处理是模式中的一个最关键的问题，源区的范围、源区的分布、源区内地表特征、起动的沙子通量、以及起沙粒子的尺度分布等等都是非常复杂的过程，而我们对这些过程的了解又非常少，所以在本模型处理过程中采用简单加入沙尘源。由于本模型模拟的主要研究目的是探讨沙尘长距离传输、扩散过程中的粒子热漂移项的作用，以及研究不同沙尘源地的起沙对下游地区爆发沙尘暴的影响，复杂的起沙机制不是本模型考虑的重点，因此本文重点考虑沙尘被起动过后的传输、扩散和沉降过程。为简单工作量，本模型在建立沙尘源项时，在模型方程式源项中，每计算积分一步（$\Delta t = 6\,\mathrm{min}$）加一次沙源。虽然这样，但是为了尽可能反映沙尘事件的实际过程，本文沙尘源区位置及范围的选择参考中国沙漠网上（http://www.duststorm.com）提供的资料。

影响我国的沙尘天气源地有两个：（中国沙漠网）

① 境外源地：蒙古国南部广大的戈壁地区。

② 境内源地：内蒙古西部的中央戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布其沙漠、毛乌素沙地以及内蒙古东南部的浑善达克沙地、科尔沁沙地， 新疆北部的古尔班通古特沙漠、新疆东部的哈顺戈壁、库姆塔格沙漠及新疆南部的塔克拉玛干沙漠。

另外，我国北方春季的沙尘天气也与冷空气活动产生的大风相伴出现，冷空气影响我国的路径主要有三条。

东路：从蒙古国东中部南下，影响我国东北、内蒙古东部、中部和山西、河北及以南地区；

中路：从蒙古国中西部东南下，影响我国内蒙古中西部、西北东部、华北中南部及以南地区；

西路：从蒙古国西部和哈萨克斯坦东北部东南移，影响新疆在内的西北、华北及以南地区。

根据我国沙尘多发地，模型中给定三个均匀源区：1）蒙古中南部，2）内蒙古中西部，甘肃中部，宁夏地区，及陕西西北部，3）内蒙古中部，山西和陕西，及河北西部。地理位置详见第四章中的图（4－6）。

近 50 年气象台站的观测结果分析，我国长江以北大部地区都曾出现过扬沙和沙尘暴天气，并以西北地区最为突出。沙尘的多发区主要集中在塔里木盆地周围，敦煌－河西走廊－宁夏平原－陕北一线，内蒙古阿拉善高原、河套平原和鄂尔多斯高原。

粒子的干沉降

粒子的干沉降不同于气体，主要由布朗扩散，惯性碰撞、重力沉降等因素引起，通常认为粒子沉积到表面而后没有再悬浮，则表面阻力可以忽略。根据阻力模式，粒子沉积速度为[36]：

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_a R_b V_g} + V_g \tag{2－12}$$

式中 Ra，Rb 和 Vg 的定义如下。

- Ra，是由湍流运动引起的粒子由大气输送至地面附近时受到的阻力。根据近地层中粒子的质量输送和热量输送类似的假定[37]，Ra 可表示为：

$$R_a = \frac{\ln(Z_r / Z_0) - \psi_c}{\kappa u_*} \tag{2－13}$$

这里，Zr 是计算 Vd 时选择的参考高度，u_*是摩擦速度，Von Kórman 常数 κ 取 0.4。Z_0表示下垫面的粗糙度长，由局地地形特征经验地获得。与质量通量有关的稳定度修正函数 ψc 取为：

$$\psi_c \begin{cases} \ln(1+Y^2)^2 & (Z/L<0) \\ -5Z/L & (Z/L>0) \end{cases} \tag{2－14}$$

其中$Y=(1-16Z/L)^{\frac{1}{4}}$，L 是 Monin-obukhov 长度。

- Vg，是粒子的重力沉降速度，可由下面 Stokes 公式计算得到。
重力沉降速度用斯托克斯（Stokes）公式：

$$Vg(r) = \frac{2}{9}\frac{\rho_g - \rho_a}{\eta} \cdot g \cdot r^2 \tag{2－15}$$

上式中，ρg，ρa 代表分别代表粒子和空气的密度，η为空气粘性系数。

- Rb，采用 Wesely(1985)[38]的研究结果：

$$R_b = \begin{cases} \dfrac{1}{0.002u_*} & (L \geq 0) \\ \dfrac{1}{0.002u_*[1+(-\frac{300}{L})^{2/3}]} & (L<0) \end{cases} \tag{2－16}$$

当大气处于非常不稳定时（Zi/L<-70），强烈的对流运动导致近地面大的阵风度，使粒子沉积速度增大。这时在 Rb 中引入混合层高度 Zi 的影响，即：

$$R_b = \frac{1}{0.002u_*[1+(-0.3Z_l/L)^{2/3}]} \tag{2-17}$$

传输过程中的沙尘粒子干沉降计算采用以下方案：
模式最低层方程式为：

$$Q_{DEP} = \frac{\partial(p^* E(r))}{\partial t}|_{DEP} = -\left[V_d(r) - V_g(r)\right] \cdot E(r) \cdot p^* \tag{2-18}$$

模式的其他各层：

$$\frac{\partial(p^* E(r))}{\partial t}|_{DEP} = -\frac{\partial}{\partial \sigma}(\rho_g \cdot g \cdot E(r) \cdot V_g) \tag{2-19}$$

粒子的热漂移[39]

粒子输运中最有意义的力场，是重力、电力和热力场，后者是气体里的温度梯度所产生的。

温度梯度中的小粒子，被迫从高温区转向低温区。在十九世纪，第一次观察到这个效应，当时发现，在适当照明的热物体周围有无尘空间或无光空间，粒子在温度梯度中的输运，取名为热漂移，从字面上讲，是被热携带的意思。热漂移与分子现象、热扩散和由温度梯度产生的分离密切相关。

当含有悬浮小粒子的热空气流经冷表面的时候，由热漂移所引起的沉积，会给加工处理造成困难，例如，在提炼石油的过程中，来自液化床的热气带有由于催化剂磨损或由于凝结而产生的粒子；这种气体通过热交换器时，粒子便沉积在冷表面上，引起疤垢形成，从而使热转换系数减小。利用热漂移可以采集气体里的小粒子。选择合适的气流几何结构，能使粒子沉积在表面上，然后进行研究。

若是 $d_p \ll l$，粒子在热梯度中输运的机理是很容易理解的：粒子受到它“热”的一边的高能分子的轰击，于是，便移向低温区域。根据气体分子论（Waldmann 和 Schmitt, 1966）[40]，可以计算粒子的热漂移速度：

$$\bar{C} = -\frac{3\nu\nabla T}{4(1+\pi\alpha/8)T} \qquad (d_p \ll l) \tag{2-20}$$

式中的负号表示粒子在温度逐渐降低的方向上运动，ν 是动力学粘度，α 是调节系数，通常取 0.9 左右。$d_p \ll l$ 时，热漂移速度和粒子大小无关。

欲阐明大于平均自由程的粒子运动，是比较困难的，这种解释基于在温度梯度中的粒子表面上产生的切向滑动速度（Kennard, 1938）[41]。这个蠕动速度指向高温一边，而在较低温度的方向上推进粒子。Epstein[42]通过解以滑动速度为边界条件的流体运动方程，导出了求热漂移速度的方程式：

$$\bar{C} = \frac{2\kappa\sigma}{2\kappa+\kappa_p}\left(\frac{\kappa}{p}\right)\nabla T \qquad (d_p \gg l) \tag{2-21}$$

在这里，κ 和 κ_p 分别表示气体和粒子的热导率，σ 是无量钢系数，表示粒子表面上的滑动速度和气体中温度梯度 ∇T 之间的关系：

$$v_{滑动} = \sigma\frac{\kappa}{p}\nabla T \tag{2-22}$$

据理论，σ值通常取1/5。热漂移速度也跟粒子大小无关，尽管它一般地与 $d_p<<1$ 时的方程不同。

本文模型中选用大小两个尺度的沙尘粒子来考虑沙尘事件过程中粒子浓度的演变及沉降特征，偏小粒子选用半径1.0μm，较大粒子选用半径25.4μm。这两种尺度均在大于粒子自由程的范围内，所以粒子热漂移速度选用方程（2－8）

力作用粒子通量：

$$J=\vec{C}\cdot E(r) \tag{2－23}$$

力场作用粒子输运：$-\Delta\cdot(\vec{C}\cdot E(r))$

故，传输过程中的粒子热漂移计算采用以下方案：

$$Q_T=\frac{\partial(p^* E(r))}{\partial t}|_T=-\Delta\cdot(\vec{C}\cdot E(r)) \tag{2－24}$$

§2．3 微机网络并行系统的配置

本文所做的并行数值模拟计算是在我们自己建立和开发的网络并行计算机系统上（16CPU，RAM 8G，约100亿次/秒）进行的，系统的结构简图如图2-1所示

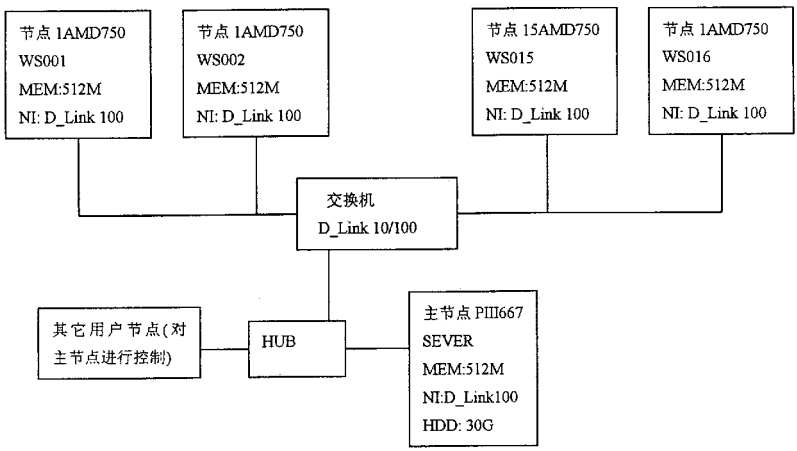


图2-1 并行网络计算系统示意图

系统简述如下。

系统硬件与软件：

1. 16个计算单元的配置为：

处理器：AMD －Duron 750MHz,
存储器：512 MB
网络： 100 M高速以太网
操作系统：从主节点引导启动的LINUX

2. 主计算节点的配置为：

处理器：PIII－667MHZ
存储器：512MB
操作系统：LINUX

3. 网络系统为：100M交换机高速以太网
4. 并行软件平台：支持消息传递机制（Message Passing）的PVM和MPI

局部自主创新：系统的16处理单元采用网络引导方式启动系统。
8GB内存。
约100亿次/秒的运算能力。
实现了超级计算机的部分功能。
实现了MPI和PVM系统功能。

系统测试：

经过测试，系统达到了约100亿次/秒的运算能力，实现了超级计算机的部分功能。

目前已经在该系统平台上成功地进行了MM5数值气象预报，等离子体场数值模拟、非均匀介质声波传播、方腔内SIMPLE流和圆柱绕流，等一系列算例。

§2.4 总 结

本模型在吸收前人建立的好模型基础上，开发研制了具有自己特色的模型：

1， 采用气相模型MM5：MM5是NCAR公司发展的第五代产品，是目前比较先进的中尺度模式，在MM4的基础上，MM5增添了许多新的功能：（1） 模型中提供了多个物理参数选择，使模型应用的空间更广，（2）采用流体非静力学，去除了流体静力学方案中的物理过程参数化，更符合实际（3）应用新的地表模型，输入更多更标准数据格式的数据信息，（4）模型中MM5模块编写程序采用更有效的路径名，使计算速度加快。（5）编程语言由原来的Fortran77改为Fortran 90。

2， 气相模式MM5与沙尘传输模型很好的相耦合，同时沙尘传输方程中重点考虑了粒子沉降模型和热漂移模型。粒子热漂移影响因素被前面许多学者忽略，本文将单独讨论粒子热漂移在沙尘传输过程中的影响作用，这也是本文的研究创新点之一。

3， 并行机的应用。本模型在网络并行LINUX系统上运行，并行计算的优势主要在大型数值模拟上，本文进一步证实了这一点。

第三章　模型方程组的变换与离散

§3. 1 概述

如果不计地形起伏，地球表面可以较好地用一个旋转椭球面来逼近，甚至用一个球面来逼近。一般来说，对于研究大气运动来说，用球面近似就足够了；目前尚无明显的证据，也无特别的需要，说明必须考虑地表面不是球面。因此最自然的就是用球坐标来研究大气运动，坐标的原点即地心，球面上的正交坐标系就是经度λ和纬度θ，记为原始球坐标（θ，λ，r，t）。

后来气象观测资料表明，气压沿高度的分布可以相当准确地用“静力平衡”关系来表示

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho g \tag{3-1}$$

由此就得到所谓压力－高度公式

$$p(z) = p_s \exp\left\{-\int_{z_s}^{z} \frac{g}{RT} dz\right\} \tag{3-2}$$

这里的Zs是地表面的海拔高度，Ps是地表面上的大气压力，Z＝r－a 是观测点的高度，

由（3－2）可见，p 是 r 的单调函数，在任一点（θ，λ）上，在任一指定时刻t，p 和 r 是一一对应的，故可用压力坐标 p 来代替 r，即所谓等压面坐标系（θ，λ，p，t）来代替原来坐标系（θ，λ，r，t），这在研究气象问题中常常是很方便的。

然而（θ，λ，p，t）坐标系的一个缺点是地表面不是等压面，提边界条件时常有不便之处。特别是在有山脉起伏的地区，地表面的水平气压梯度很大，要把地表面近似看作等高面或等压面是不容许的。为了准确地和方便地提边界条件起见，就应对原坐标系进行变换，使在新坐标系中起伏不平地地表面仍然是一个坐标等值面。这样坐标系可以是（θ，λ，Z/Zs，t）。也可以用（θ，λ，P/Ps，t）来表示。我们称这样的坐标为地形坐标（一）。

有时我们有必要讨论一定高度以下的大气运动，例如设大气有上届P＝Pt，Pt 为常数，这时为了使上届及下届（地表面）均为一个坐标等值面，可令

$$\left\{\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}\right\} \tag{3-3}$$

这样，大气的上下界就分别对应于等σ面，σ(0)=0，σ(1)=1，得到上界为σ＝0，下界为σ＝1，我们得到地形坐标（一）的推广地形坐标（二），σ坐标系（θ，λ，σ，t），也即：（x，y，σ，t）。

下面整个模型中用的坐标系均为σ坐标，包括MM5的气相场的变量。因此建立模型方程组时，首先要进行的是坐标方程组之间的变换。

§3.2 坐标转换通式推导

坐标转换的一般形式为：$(x,y,z)\rightarrow(x,y,\sigma)$

$$(\frac{\partial}{\partial x})_z\rightarrow(\frac{\partial}{\partial x})_\sigma-(\frac{\partial z}{\partial x})\frac{\partial}{\partial z} \tag{3-4}$$

由于，$\delta z=\frac{-\delta p_0}{\rho_0 g}=-\frac{(p*\delta\sigma+\sigma\delta p^*)}{\rho_0 g}$ (3-5)

所以

$$(\frac{\partial}{\partial x})_z\rightarrow(\frac{\partial}{\partial x})_\sigma-\frac{\sigma}{p^*}\frac{\partial p^*}{\partial x}\frac{\partial}{\partial\sigma} \tag{3-6}$$

$$\sigma=\frac{p-p_t}{p_s-p_t}=\frac{p_0-p_t}{p^*} \tag{3-7}$$

式中P_t 和 P_s代表P 在模式顶层和地表气压，$P^*=P_s-P_t$

$$\dot{\sigma}=\frac{\partial\sigma}{\partial t}$$

因此,

$$\dot{\sigma}=\frac{1}{p^*}\frac{Dp}{Dt}-\frac{(p-p_t)}{(p^*)^2}\frac{Dp*}{Dt} \tag{3-8}$$

扩展到整个微分注释，P=P(Z) 和 P*=P*(x,y)，并且P是符合静力学定律的：

$$\dot{\sigma}=-\frac{\rho_0 g}{p^*}w-\frac{\sigma}{p^*}(u\frac{\partial p^*}{\partial x}+v\frac{\partial p^*}{\partial y}) \tag{3-9}$$

有关变量 F 由 Z 坐标向 σ 坐标转换的通式为：

$$(\frac{\partial F}{\partial x})_z=(\frac{\partial F}{\partial x})_\sigma+\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial\sigma}{\partial x})_z \tag{3-10}$$

同理得，$(\frac{\partial F}{\partial y})_z=(\frac{\partial F}{\partial y})_\sigma+\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial\sigma}{\partial y})_z$ (3-11)

$$(\frac{\partial F}{\partial z})_z=\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot\frac{\partial\sigma}{\partial p}\cdot\frac{\partial p}{\partial z} \tag{3-12}$$

式中的 F 表示通量，适用于模式中所有三维变量，例如：U, V, T 等。

由于 $\sigma=\frac{P-P_t}{P_s-P_t}$；

推导$\frac{\partial\sigma}{\partial p}=\frac{1}{P_h}$ 其中，$P_h=\frac{1}{P_s-P_t}$，Ps, Pt 分别为地表和模顶气压，关于（x, y）变化的变量。

$$(\frac{\partial\sigma}{\partial x})_z=\frac{\partial\sigma}{\partial p}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})_z=\frac{1}{P_h}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})_z \tag{3-13}$$

同理：

$$(\frac{\partial\sigma}{\partial y})_z=\frac{\partial\sigma}{\partial p}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})_z=\frac{1}{P_h}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})_z \tag{3-14}$$

故方程（3－10）、（3－11）化为：

$$(\frac{\partial F}{\partial x})_z=(\frac{\partial F}{\partial x})_\sigma+\frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})_z \tag{3-15}$$

$$(\frac{\partial F}{\partial y})_z=(\frac{\partial F}{\partial y})_\sigma+\frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})_z \tag{3-16}$$

根据静力平衡得：

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g \tag{3-17}$$

故（3－12）式转化为：

$$(\frac{\partial F}{\partial z})_z=\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot\frac{\partial\sigma}{\partial p}\cdot\frac{\partial p}{\partial z} \tag{3-18}$$

$$=-\frac{\rho g}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}$$

二次微分方程的转换：

$$\frac{\partial^2F}{\partial x^2}|_z=\frac{1}{\partial x}(\frac{\partial F}{\partial x})|_z=\frac{\partial}{\partial x}\left[(\frac{\partial F}{\partial x})_\sigma+\frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x})_z\right]_z \tag{3-19}$$

令$F=(\frac{\partial F}{\partial x})|_\sigma$

则（3－19）中：

$$\frac{\partial F}{\partial x}|_z=\frac{\partial^2F}{\partial x\partial x}|_\sigma+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2F}{\partial x\partial\sigma}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}|_z \tag{3-20}$$

令$F=\frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z$

则有：

$$\frac{\partial F}{\partial x}=\frac{1}{P_h}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z\cdot\left[\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma\partial x}+\frac{1}{Ph}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}|_z\right]+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}|_z$$

$$=\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})^2|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}|_z \quad (3-21)$$

将（3－20）、（3－21）带入（3－19）得变量 F 在 σ 坐标下的关于 X 的二次微分方程形式为：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}|_z=\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}|_\sigma+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z$$

$$+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})^2|_z+\frac{1}{Ph}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z$$

$$=\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}|_\sigma+\frac{2}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})^2|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2})|_z \quad (3-22)$$

同理可以推导变量在 σ 坐标下关于 x, y 的二次微分方程形式：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y}|_z=\frac{1}{\partial y}(\frac{\partial F}{\partial x})|_z=\frac{\partial}{\partial y}\left[(\frac{\partial F}{\partial x})|_\sigma+\frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z\right]_z \quad (3-23)$$

首先令 $F=(\frac{\partial F}{\partial x})|_\sigma$

得：

$$\frac{\partial F}{\partial y}|_z=\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y}|_\sigma+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z \quad (3-24)$$

再令 $F=\frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z$

得到：

$$\frac{\partial F}{\partial x}|_z=\frac{1}{P_h}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z\cdot\left[\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma\partial y}|_\sigma+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z\right]+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial x\partial y}|_z$$

$$=\frac{1}{P_h}\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma\partial y}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{\partial p}{\partial y})|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial^2 p}{\partial x\partial y})|_z \quad (3-25)$$

由此：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y}|_z=\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y}|_\sigma+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z$$

$$+\frac{1}{P_h}\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma\partial y}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{\partial p}{\partial y})|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial^2 p}{\partial x\partial y})|_z \quad (3-26)$$

变量对 X, Z 的二次微分形式推导：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z}|_z = \frac{1}{\partial z}(\frac{\partial F}{\partial x})|_z = \frac{\partial}{\partial z}\left[(\frac{\partial F}{\partial x})|_\sigma + \frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial \sigma}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z\right]|_z \tag{3-27}$$

当 $F = \frac{\partial F}{\partial x}|_\sigma$ 时

$$\frac{\partial F}{\partial z} = -\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial \sigma} \tag{3-28}$$

当 $F = \frac{1}{P_h}\frac{\partial F}{\partial \sigma}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z$ 时：

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial \sigma \partial z} + \frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial x \cdot \partial z}$$

$$= -\frac{\rho g}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z - \frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z \tag{3-29}$$

故得：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z}|_z = -\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial \sigma} - \frac{\rho g}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z - \frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z \tag{3-30}$$

同理推导得：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}|_z = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}|_\sigma + \frac{2}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial \sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z + \frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})^2|_z + \frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}\cdot(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2})|_z \tag{3-31}$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial z}|_z = -\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial \sigma} - \frac{\rho g}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z - \frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z \tag{3-32}$$

最后 Z 的二次微分形式：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial z^2}|_z = \frac{\partial}{\partial z}(-\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}) \tag{3-33}$$

当 $F = -\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial F}{\partial \sigma}$ 时

$$\frac{\partial F}{\partial z}|_z = \left(\frac{\rho g}{P_h}\right)^2\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2} \tag{3-34}$$

所以得到：

$$\frac{\partial^2 F}{\partial z^2}\Big|_z = \left(\frac{\rho g}{P_h}\right)^2 \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2} \qquad (3-35)$$

方程式（3－15）、（3－16）、（3－18）为变量 F 一次微分方程：（Z→σ）坐标的转换通式。

方程式（3－22）、（3－23）、（3－26）、（3－30）、（3－32）、（3－35）分别为 F 二次微分求导方程式：（Z→σ）坐标的转换通式。

气象模式 MM5 输出的所有气象变量均是σ坐标形式，而转换通量方程中除了变量 P 的微分求导需要在 Z 坐标下求导外，其余均可直接求导。为解转换方程的通式，我们需要将σ坐标下 P（x, y, σ）值重新插值到 z 坐标下，转化为 P（x, y, z）再进行偏微分，

可以将 P 值简单插值如下图 3－1：

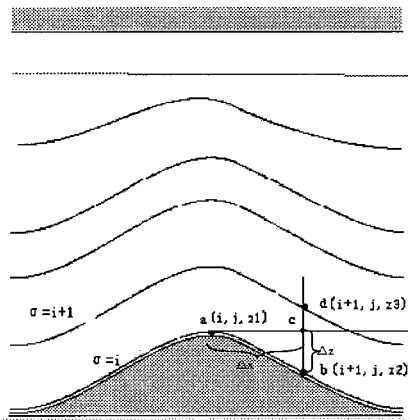


图 3－1

有图可知相同σ层所对应的地形高度 Z 值是不一样的。可通过简单的一次插值得到。图中 a 点所对应的坐标为（i, j, σ_i），b 点为（i＋1, j, σ_i），d (i+1, j, σ_{i+1}) 他们在 z 坐标下的表示形式为 a（i, j, z1），b (i, j, z2), d (i+1, j, z3)，c (i+1, j, z1) 。

已知 a、b、d 三点在σ坐标下的 Pa, Pb, Pd 值 求 Pc 的值：

$$\frac{P_d - P_b}{P_c - P_b} = \frac{z_3 - z_2}{z_1 - z_2}$$

Pc 求解得：

$$P_c = \frac{z_1(P_d - P_b) + z_2(P_b - P_d)}{z_3 - z_2}$$

Z 值可以通过下面的式子求出：

当 k=1 时， Z(i, j, k)=0 （1≤i≤89, 1≤j≤67, σ(i)=i）

当 2≤k≤10 时， （1≤i≤89, 1≤j≤67, σ(i)=i）

Z(i, j, k)=Z(i, j, k-1)+18400×[T（i, j, k-1）/273]×lg[P（i, j）/P2(i, j)]

P1(i, j)= σ(i-1)×Ps(i, j)+Pt(i, j)

P2（i, j）=σ(i)×Ps(i, j)+Pt(i, j)

式中，Ps(i, j) 、Pt(i, j) 为地表和模顶气压。

用 Fortran 语言简单编写程序如下：

```
DO 2300 I=1, NX
DO 2300 J=1, NY
DO 2400 K=1,NZ
        IF(K.EQ.1) THEN
        ZH(I,J,K)=0.0
        ELSE
         P1=HH(K-1)*PSTAR(I,J)+PT        !  HH(K)为σ值
         P2=HH(K)*PSTAR(I,J)+PT          !  PSTAR(I,J)为地表气压
         ZH(I,J,K)=ZH(I,J,K-1)+18400*(T(I,J,K-1)/273)*LOG10(P1/P2)
         2300 CONTINUE
         2400 CONTINUE
```

§3.3 微分方程式的离散形式：

3.3.1 粒子热漂移项的离散形式

方程通式为：

$$Q_T = \frac{\partial(p^* E(r))}{\partial t}|_T = -\Delta \cdot (\bar{C} \cdot E(r)) \qquad (3-36)$$

为简便，使 n = E(r)，则

热漂移源项的离散形式简化为离散下面的式子：

$$\nabla \cdot (\vec{c} \cdot n) \qquad (3-37)$$

$$= n \cdot \nabla \vec{c} + \vec{c} \cdot \nabla n$$

其中 $\vec{C} = \frac{2\kappa\sigma}{2\kappa + \kappa_p}(\frac{\kappa}{p})\nabla T$ (3−38)

令 A=$\frac{2\kappa^2\sigma}{2\kappa+\kappa_p}$ 则 $\vec{C} = A \cdot (\frac{\nabla T}{p})$

故

$$n\cdot\vec{c}=n\cdot(\frac{\partial\vec{c}}{\partial x}+\frac{\partial\vec{c}}{\partial y}+\frac{\partial\vec{c}}{\partial z})$$

$$=An\cdot\left[\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{p}(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z})\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{p}(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z})\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{p}(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z})\right]\right]$$

$$=.....$$

$$=.....$$

$$=An\cdot\left[\frac{1}{p}(\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial z^2}+2\frac{\partial^2T}{\partial x\partial y}+2\frac{\partial^2T}{\partial x\partial z}+2\frac{\partial^2T}{\partial y\partial z})-\frac{1}{p^2}(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z})(\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial p}{\partial z})\right]$$

$z\to\sigma$ 坐标转换

$$=An\cdot\left[\frac{1}{p}\left[\frac{\partial^2T}{\partial x^2}|_\sigma+\frac{2}{P_h}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})^2|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial T}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial^2p}{\partial x^2})|_z\right.\right.$$

$$\left.+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}|_\sigma+\frac{2}{P_h}\cdot\frac{\partial^2F}{\partial y\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})^2|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial T}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial^2p}{\partial y^2})|_z+(\frac{\rho g}{P_h})^2\cdot\frac{\partial^2T}{\partial\sigma^2}\right]$$

$$+2\left[\frac{\partial^2T}{\partial x\partial y}|_\sigma+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial x\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z+\frac{1}{P_h}\frac{\partial^2T}{\partial\sigma\partial y}(\frac{\partial p}{\partial x})|_z+\frac{1}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{\partial p}{\partial y})|_z+\frac{1}{P_h}\cdot\frac{\partial T}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial^2p}{\partial x\partial y})|_z\right.$$

$$-\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial x\partial\sigma}-\frac{\rho g}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z-\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial T}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial x})|_z-\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial y\partial\sigma}-\frac{\rho g}{P_h^2}\cdot\frac{\partial^2T}{\partial\sigma^2}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z$$

$$\left.-\frac{\rho g}{P_h}\cdot\frac{\partial T}{\partial\sigma}\cdot(\frac{\partial p}{\partial y})|_z\right]-\frac{1}{p^2}\left[\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{1}{P_h}\frac{\partial T}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}-\rho g)\right]\left[\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}-\rho g\right]\Bigg]$$

又：

$$\vec{c}\cdot\nabla n=A\cdot(\frac{\nabla T}{p})\nabla n$$

$$=\frac{A}{p}(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z})(\frac{\partial n}{\partial x}+\frac{\partial n}{\partial y}+\frac{\partial n}{\partial z})$$

$z\to\sigma$

$$=\frac{A}{p}\left[\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{1}{P_h}\frac{\partial T}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}-\rho g)\right]\left[\frac{\partial n}{\partial x}+\frac{\partial n}{\partial y}+\frac{1}{P_h}\frac{\partial n}{\partial\sigma}(\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}-\rho g)\right]$$

这样，下面的工作就是怎样将方程式离散成计算机识别的代数方程式。

本文采用中心差分法离散热源移源项。

以变量 T（i, j, k）举例：

求导量分别在 x, y, σ 方向的展开形式：

$$\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2\Delta x},\qquad\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2\Delta y},\qquad\frac{\partial T}{\partial\sigma}=\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2\Delta\sigma}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=\frac{T_{i+2}-2T_i+T_{i-2}}{4\Delta x^2} \qquad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=\frac{T_{i+2}-2T_i+T_{i-2}}{4\Delta y^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \sigma^2}=\frac{T_{i+2}-2T_i+T_{i-2}}{4\Delta \sigma^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x\partial y}=\frac{T_{i+1,j+1,k}-T_{i+1,j-1,k}-T_{i-1,j+1,k}+T_{i-1,j-1,k}}{4\Delta x\Delta y}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x\partial \sigma}=\frac{T_{i+1,j,k+1}-T_{i+1,j,k-1}-T_{i-1,j,k+1}+T_{i-1,j,k-1}}{4\Delta x\Delta \sigma}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y\partial \sigma}=\frac{T_{i,j+1,k+1}-T_{i,j+1,k-1}-T_{i,j-1,k+1}+T_{i,j-1,k-1}}{4\Delta y\Delta \sigma}$$

以上各式即为变量 T 在 x，y，σ 坐标下的一次求导、二次求导离散形式，其他变量以此类推可离散成计算语言形式。

第四章　多相流数值模拟结果及其规律研究

§4.1 概述

本研究采用的是美国 PSU/NCAR 的有限区域中尺度模式（MM5），许多研究表明该模式对一般的尺度天气过程有一定的模拟能力，且它的设计较利于沙尘暴天气预报，这一中尺度天气系统的研究。许多研究单位都应用 MM5 来模拟天气系统的气象场。

2002 年：3 月 18 日到 21 日，20 世纪 90 年代以来范围最大、强度最强、影响最严重、持续时间最长的沙尘天气过程袭击了我国北方 140 多万平方公里的大地，影响人口达 1.3 亿。

本文模型模拟的天气背景即为：2002 年 3 月（18～21），我国北方多个地区（以北京为中心）发生强沙尘暴。受西伯利亚强冷空气东移影响，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 4－1、4－2。

图 4－1：2002 年 3 月 18 日～3 月 21 日，大风沙尘天气横扫我国北方和蒙古国。沙尘暴天气影响区域和移动路径如上图所示

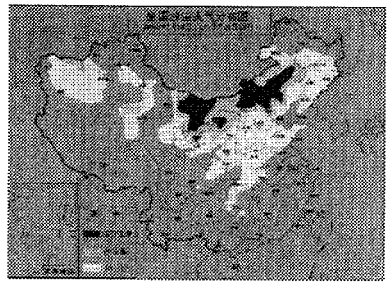


图 4－2：2002 年 3 月 18～21 日 08 时全国沙尘天气分布图。

图 4－1、4－2 为实测资料。由监测资料显示，我国北方地区 2002 年 3 月份爆发的这次强沙尘暴起始于 3 月 18 日，到 3 月 21 日，沙尘天气继续向东向南扩展并有减弱，我国华北东部南部、东北地区东部出现大片扬沙天气。

本模型基于上述资料背景进行了对比模拟，设置模拟区域，以 117°E，40° N 为中心，X，Y 方向为 89×67 网格，水平格距为 30Km，垂直方向分为不等的 10 层，相应的 σ 值为 0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.85, 0.93, 0.97, 0.99, 1。初始资料选用 2002 年 3 月 19 日 07 时 45 分，预报时间 3 天。

运行模型所需的地形资料是从 NCAR 的全球 30×30 分资料取得的；陆面资料是从 USGS 的全球 30×30 分资料分析得到的，陆面分为 24 类。

§4.2 数值模拟结果与讨论

4.2.1 气相场的输出

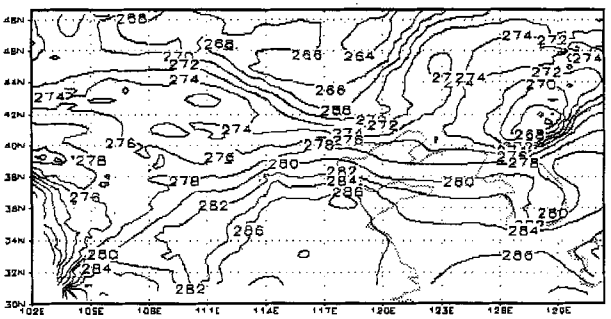


图 4－3－1　　初始时刻区域温度场分布

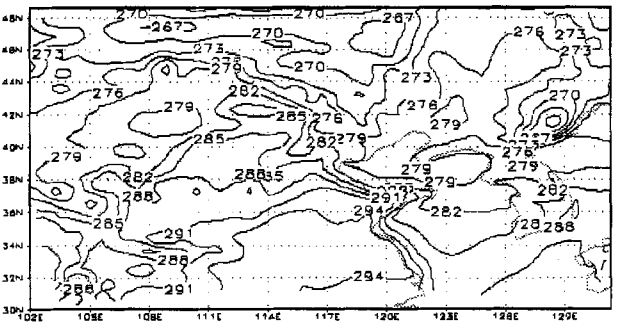


图 4－3－2　　计算 12 小时后温度场分布

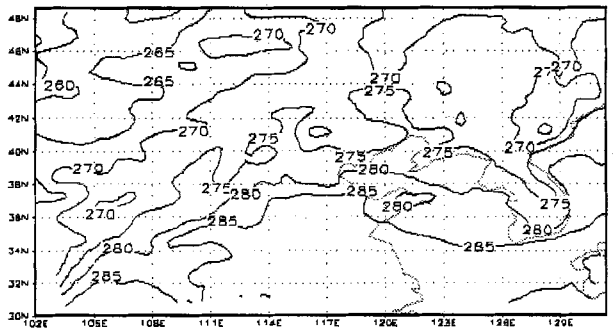


图 4－3－3　　计算 24 小时后温度场分布

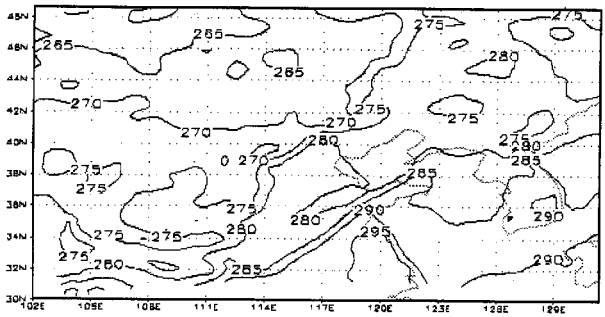


图 4－3－4　　计算 36 小时后区域温度场分布

图 4－3　在模式底边界层（σ=0.995），温度场在 4 个时间段的演变过程，图中曲实线表示等温线。（单位 ：K）

从图中等温线数值随时间的变化可看出，温度场的中心一直向东南方向发展。不稳定的热力条件是利于风力加大、强对流发展，从而夹带更多的沙尘，并卷扬得更高

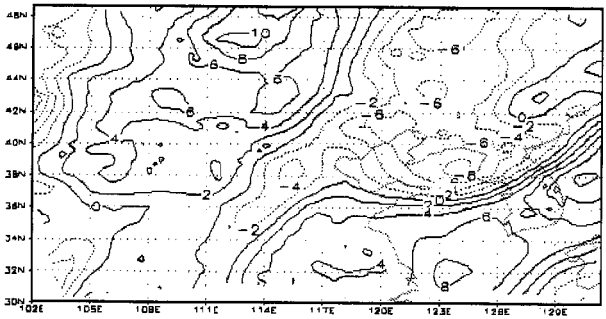


图 4－4－1　　初始时刻区域径向风速度场 v 的分布

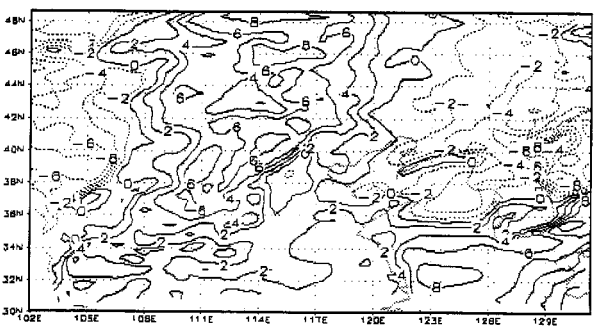


图 4－4－2　　计算 12 小时后区域径向风速度场 v 的分布

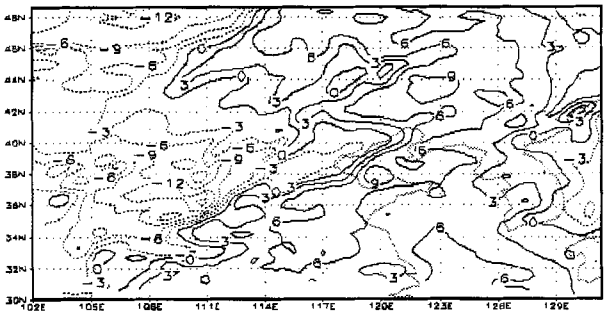


图 4－4－3　　计算 24 小时后区域径向风速度场 v 的分布

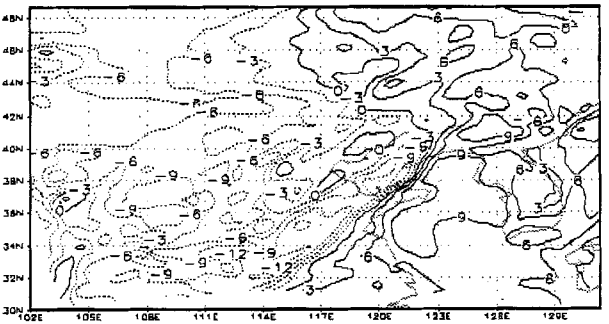


图 4－4－3　　计算 36 小时后区域径向风速度场 v 的分布

图 4－4　　在模式底边界层垂直速度场随时间变化的演变过程。

图中实曲线表示垂直方向正等速度线，虚线代表负等速度线，

单位：　m/s

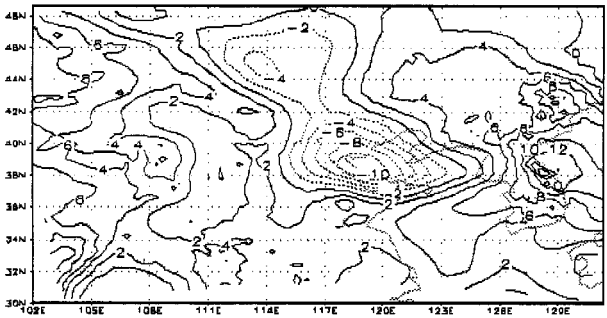


图 4－5－1　　初始时刻区域纬向风速度场 u 的分布

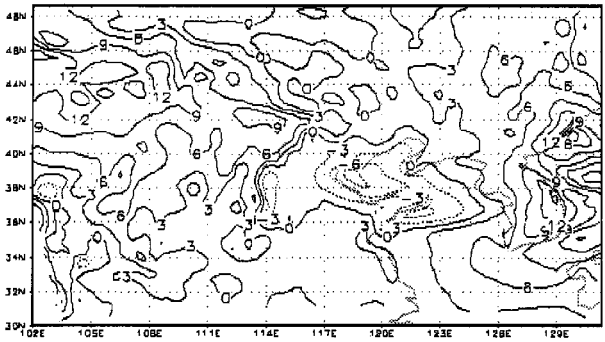


图 4－5－2　　计算 12 小时后区域纬向风速度场 u 的分布

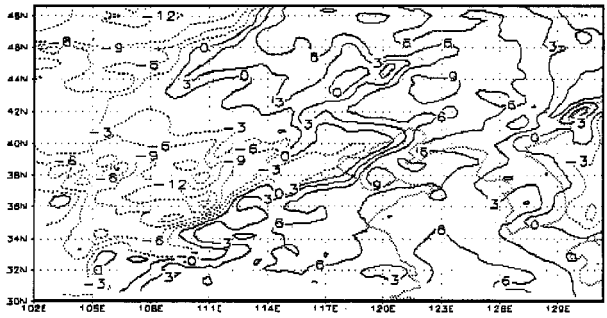


图 4－5－3　　计算 24 小时后区域纬向风速度场 u 的分布

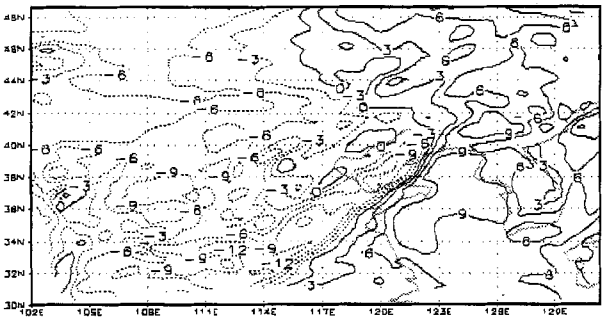


图 4－5－4　　计算 24 小时后区域纬向风速度场 u 的分布

图 4－5　　模式底边界层水平速度场随时间变化的演变过程。图中曲线表示了水平等速线。

单位：　m/s

从复杂的风速度场图 4－4、4－5 可看出当时恶劣的天气形势，风漩涡的发展有利于沙尘暴的爆发。

由于沙尘暴的发生，不仅与我国环境恶化，土地荒漠化加剧，绿化植被破坏严重等气候背景密切相关，局部的天气形势是直接原因，猛烈的阵风团席卷沙尘团到高空，再输送下游地区，造成了下游城市沙尘暴的发生。从上图，我们可以粗略地看出 2002 年 3 月 18～21 这几天的天气形势。图 4－3、图 4－4、图 4－5 均从模式 MM5 输出。比较四幅温度场图，可以看出温度中心逐渐向东南方向移动，从速度图可以看出风场的变化。为证实天气形势演变过程模拟的正确性，本文对输出数据与实际资料数据进行了验证对比，其误差为 0.1%。故这儿就不进行气相场的比较了。

4.2.2　沙尘源地分布图

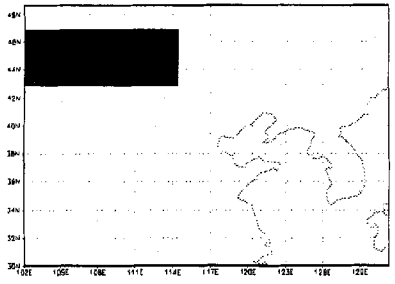


图 4－6－1　　沙尘源地（一）

源区设置在蒙古中南部地区

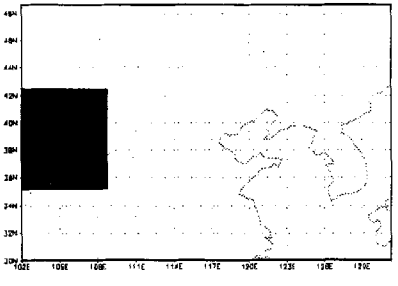


图 4－6－2　　沙尘源地（二）

内蒙古中西部地区，宁夏甘肃中部地区、山西西北地区

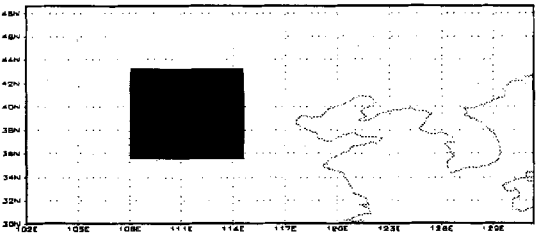


图 4－6－3　　沙尘源地（三）

内蒙古中部地区、山西、陕西地区和河北西部地区

图 4－6　　三个沙尘源地的分布图

初始沙尘源起沙浓度均为 6mg/ m^3

4.2.3　模拟结果：

作为第一步本模拟研究工作，首先考察沙尘粒子输送过程和热漂移项对沙尘迁移过程中的影响作用，取沙尘源区（一）作为考察对象，在模式边界层（σ=0.995），选用粒径为 r=25.4μm、r=2.0μm 两个大小尺度的沙尘粒子。

下面图 4－7 系列展示了沙尘中心从蒙古源地起动，逐步向下游输送的过程，同时显示了沙尘暴事件中心浓度的演变。

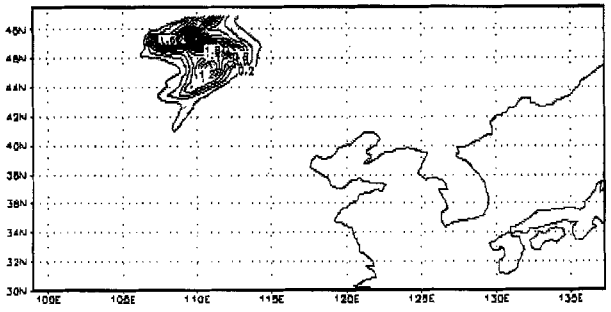


图 4－7－1　　初始时刻沙尘源地（一）浓度分布图

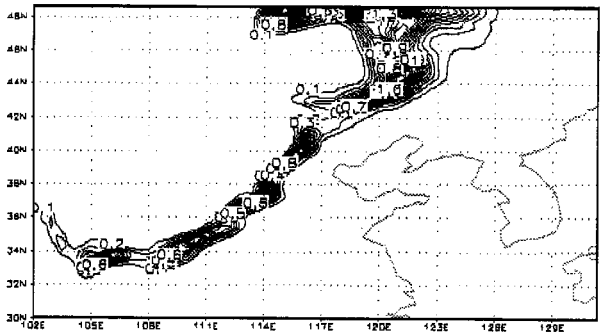


图 4－7－2　　计算 24 小时后模拟区域（一）浓度分布图

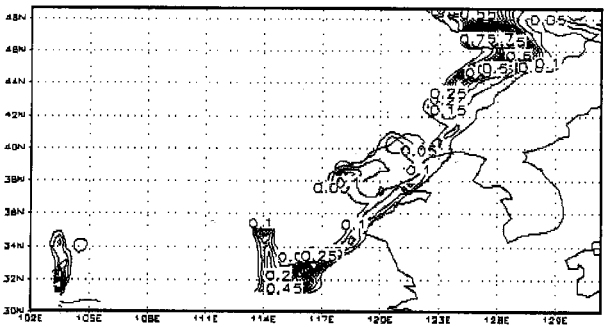


图 4－7－3　　计算 36 小时后模拟区域（一）浓度分布图

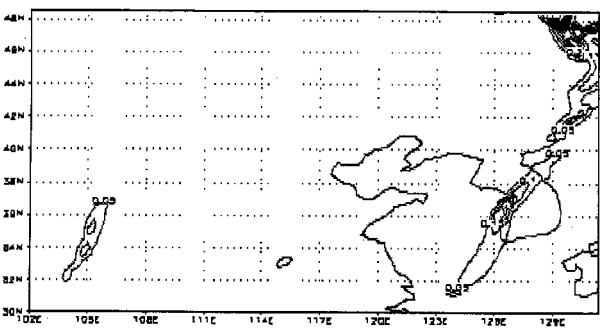


图 4－7－4　　计算 54 小时后模拟区域（一）浓度分布图

图 4－7：　　沙尘中心浓度演变过程

粒子 （r=25.4μm）在模式边界层上（σ=0.995）的浓度演变

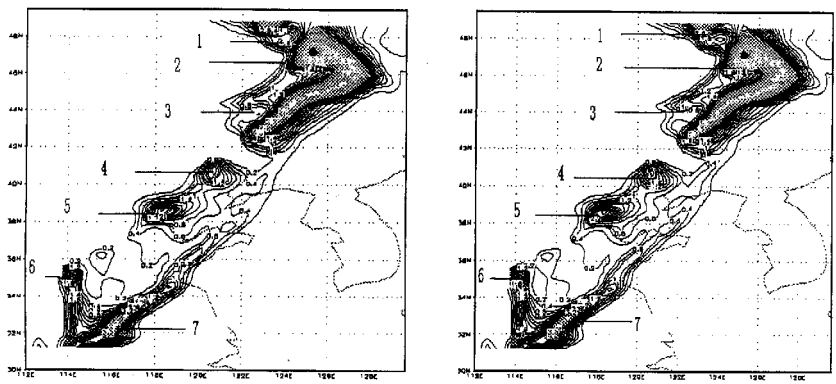
粒子浓度单位：　mg/m^3

图 4－7 为 r=2.54 μm 粒子在 σ =0. 995μm 层上的浓度演变。图中标出了中心浓度场的分布。沙尘由源区起动后，一直向东南方向移动，由于沿途中的沉降，粒子中心浓度值在降低。由初始的 6mg/m^3 到 1.2mg/m^3 再到 0.8mg/m^3，最后到(0.05~0.45)mg/m^3，沙尘粒子在沉降的同时，也随着风力传输、扩散，由图中模拟区域可看出，沙尘中心从上游地区逐渐移动到下游地区。由蒙古境内传输到我国的华北、东北、华东地区，最后到达朝鲜半岛。

另外，r=2.0μm 粒子浓度演变图和此相似整个模拟区域无明显变化，它们的区别在于沙尘中心浓度的大小。下面小节中我们在考察热漂移项的影响作用时将详细比较。

热漂移源项的作用

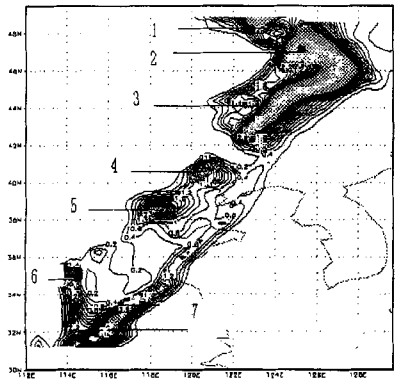
为了探讨粒子热漂移作用力的源项对模拟计算产生的影响，作者不改变任何其它的模型参数条件，仅在模拟计算方程式源相中去掉粒子热漂移源项，对 4. 1 节的工况再一次进行了模拟计算。
计算结果见图 4－8、图 4－9：



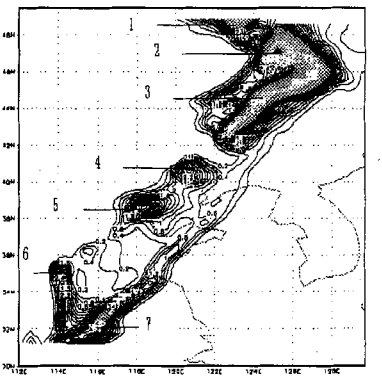
(a) 未加上热漂移项 (1—1.4；2—9.8；3—6.4；4—1.4；5—1.1；6—1.6；7—3.8)

(b) 加上热漂移项(1—1；2—10.4；3—6.8；4—1.6；5—2.2；6—1.8；7—4)

图 4－8： 积分 36 小时后， r=25.4 μm 粒子在模式边界层上的浓度演变。
Stokes 数：2.4E-13 （粒子浓度单位： mg/m^3）



(a) 加上热漂移项(1—2.3；2—13.6；3—10.4
4—1.8；5—3；6—2.2；7—4.6)



(b) 未加热漂移项 (1—2.3；2—13.2；3—9.6
4—2.2；5—3.2；6—2.4；7—4.6)

图 4－9： 积分 36 小时后， r=2.0 μm 粒子在模式边界层上的浓度演变
Stocks 数：1.4E-15， （浓度单位：mg/m^3）

图 4－8 的 a、b 图分别为 r=2.54 μm 粒子在 σ =0. 995μm 层上的浓度演变。图中标出了中心浓度场的分布。为清楚比较 a、b 两幅图，本文将区域局部放大，并选择计算 36h 时刻后的沙尘浓度分布图。此时沙尘中心向东南方向传播到了我国华北，东北城市地区，境内城市中粒子的中心浓度最大达到(1.0~2.0)mg/m^3。 比较 a, b 两图，热漂移应力对沙尘粒子扩散的范围影响不是很大，但它影响了沙尘中心浓度值的大小。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(0.01~0.08)倍。

图 4－9 的 a, b 图表示的是 r=2 μm 粒子在 σ =0. 995 上的浓度演变。沙尘同样向东南方向传播，计算 36h 后，沙尘粒子传输在我国区域内，其中心浓度达到 3.2mg/m^3 左右，表明较小粒子在空中维持的时间较大粒子长。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。

分析对比图 4－8、4－9 可以初步得出结论：首先，热漂移作用在粒子传输和扩散中的影响是不可忽略的，其影响作用达到（1～8）%左右。其次，热漂移的影响作用的大小与粒子颗粒大小无关，其影响系数一样。

§4.1 总结

作为第一步研究工作，分析模拟图形结果可初步得出结论：

（1）运用气相动力模式 MM5 与颗粒输送方程很好的模拟了大气沙尘暴过程，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（1%～8%）左右的贡献。

第五章　　多相流数值模拟结果和机理分析

§5.1 概 述

由沙尘暴的产生原因（详见第一章绪论），可知沙、尘源是沙尘暴物质基础。

中国西北地区沙源丰富，沙漠面积 160 万平方公里。风速每秒 5 米就能吹起沙尘，风速每秒 13 米就能刮起直径为 2 毫米的沙粒，在近距离形成沙尘暴，远距离形成扬沙、浮尘天气。然而北京的降沙降尘并非来自天然的沙漠和戈壁，这是因为大粒沙被风力搬运的距离不远，只有细沙尘才能飞越上千公里。从卫星遥感图象分析，2000 年春季的几场沙尘暴的源头均在国内，涉及 200 万平方公里的区域，供尘区就在内蒙古中部和河北省北部约 25 万平方公里的退化草场、撂荒耕地及旱作耕地。正是这些地区，近十年来植被的破坏相当严重。（摘自追溯沙尘暴之源…） 沙尘暴既是一种加速土地荒漠化的重要过程，又是土地荒漠化发展到一定程度的具体体现，具有一定的指示意义。沙尘暴发生在沙漠和干旱地区，它不仅影响本地区，还可以通过大气输送影响下游大范围地区的环境和气候。

可见我国沙尘暴问题治理方案之一：遏止沙尘源头，这不仅需要植树造林以控制沙漠地区进一步扩大，同时国内地区的荒漠化问题不容忽视。荒漠化作为一个全球性的重大环境问题，已受到广泛关注，它与全球气候变化，生物多样性一起构成当今世界三大科学前沿课题。荒漠化是由自然因素（主要是气候因素）和人为两方面共同作用的结果。

因此，在相同的天气形势和气候背景下，了解不同沙尘源对下游地区沙尘暴爆发的作用，以及了解不同源区沙尘迁徙的路径对沙尘暴的防治与预测有重要的意义。

本文研究工作（二），即模拟（二）为：设置三个不同的沙尘源区，经过模拟，了解不同沙尘源区对我国城市沙尘暴的影响，模拟结果有利于我国环境的治理，尤其有利于重视对部分地区土地荒漠化情形的控制。

源区的设置详看图 4－6 三幅图。

§5.2　模拟输出结果

模式输出结果见下图：

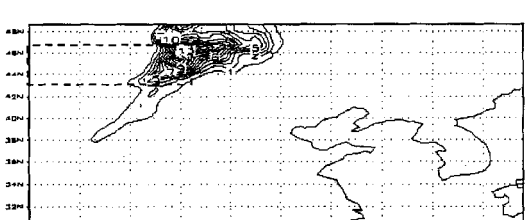


图 5－1－1　　模拟区域（一）
图中虚线框为沙尘源区

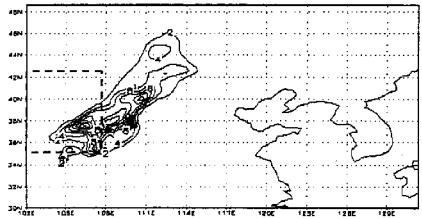


图 5－1－2　模拟区域（二）

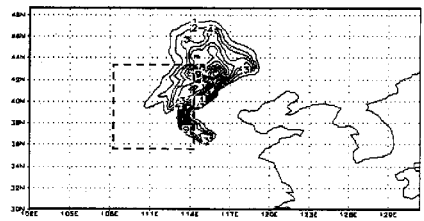


图 5－1－3　模拟区域（三）

积分 12 小时后的沙尘分布图

图 5－1　积分 12 小时后，r=25.4 μm 粒子在模式边界层上的浓度演变

图中虚线框为沙尘源区

粒子浓度单位：　mg/m^3

图 5－1 为 r=25.4μm 粒子在 σ=0.995 边界层上的浓度演变。积分 12 小时后，图中可以看出沙尘中心很快偏离了原来沙尘源区（虚线框所示）。也即：三个源区的沙尘很快向周围地区扩散，沙尘中心主要向东方向发展。

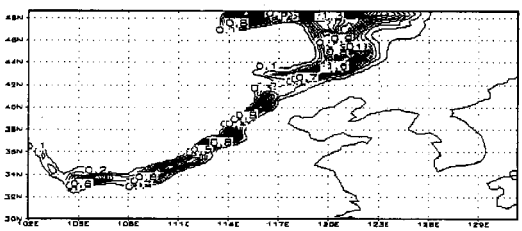


图 5－2－1　模拟区域（一）

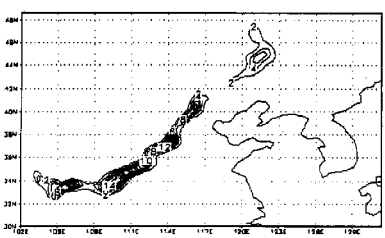


图 5－2－2　模拟区域（二）

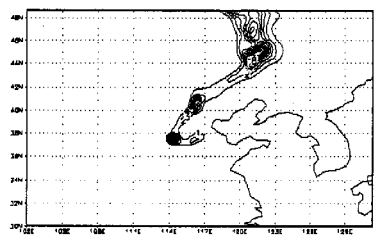


图 5－2－3　模拟区域（三）

积分 24 小时后沙尘浓度分布图

图 5－2　积分 24 小时后，r=25.4 μm 粒子在模式边界层上的浓度演变

粒子浓度单位：　mg/m^3

图 5－2 为积分 24 小时后的粒子浓度场分布图，可以看出沙尘除继续向东南方向发展，蒙古源地沙尘发展较快，沙尘暴中心很快传输到下游地区，且影响的范围较大。

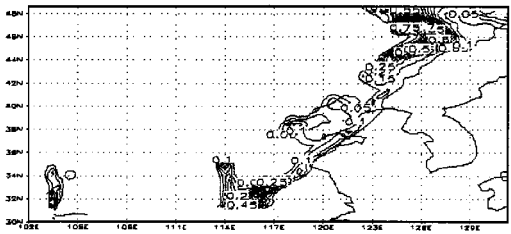


图 5－3－1　模拟区域（一）

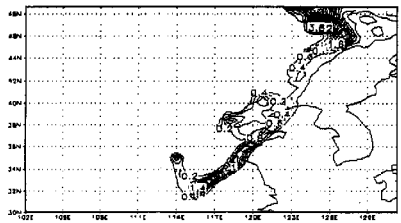


图 5－3－2　模拟区域（二）

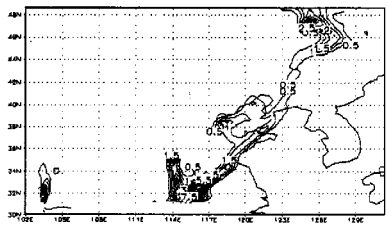


图 5－3－3　模拟区域（三）

图 5－3　积分 36 小时后，r=25.4 μm 粒子在模式边界层上的浓度演变

粒子浓度单位：　mg/m^3

图 5－3，36 小时后，沙尘继续向东，向南方向发展。影响的区域如图所示。蒙古沙尘源区和甘肃，宁夏，山西和陕西，及河北西部为代表的沙尘源区的沙尘均输送到了河南，山东，江苏一带。分析比较三个模拟区沙尘浓度演变图：经过 36 小时长时间输送后，起源于三个不同沙尘源的沙尘均迁徙到相同的地区。

§5.3　热漂移源项作用分析

在第四章中我们通过比较加热漂移源项和不加热漂移源项输出图形，已经初步定性得出热漂移源项的影响作用。

在这节中，我们将通过输出热漂移源项的数值，来定量的分析热漂移源项在整个沙尘事件过程中的规律。

首先引入传质葛拉晓夫（Grashof）数[42]，Gr_D. 即传质系数，

它的表达式为：

$$Gr_D = \frac{gL^3\Delta\rho}{\rho\gamma^3} \qquad (5-1)$$

式中 $\Delta\rho = \rho_a - \rho_q$ ， ρ_a 为粒子密度， ρ_q 为气体密度，

因为 $\rho_a >> \rho_q$， 所以上式中 ρ_q 可忽略不计。

（5－1）式简化为：

$$Gr_D = \frac{gL^3\rho}{\mu\nu} \tag{5－2}$$

本文中，Gr_D 表示传质系数。

由理想气体状态方程

$$P = \frac{RT}{\rho} \tag{5－3}$$

将 Gr_D 与 P、T 直接联系。推导得：

$$Gr_D = \frac{gd^3P\mu_\circ}{\mu\nu RT} \tag{5－4}$$

式中，d 表示粒子直径， μ ν 分别代表动力粘度系数、运动粘度系数，P, T 为三维压力场，温度场。R 表示空气常数，$\mu_\circ$ 表分子重力。

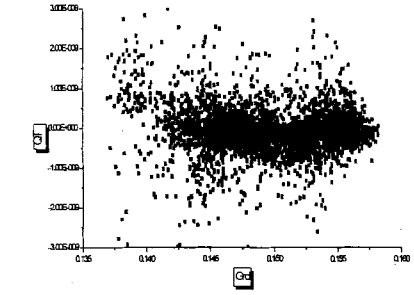


图 5－4－1 计算 6 小时后

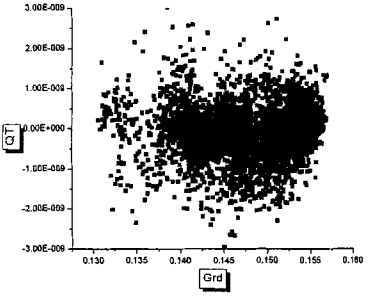


图 5－4－2 计算 12 小时后

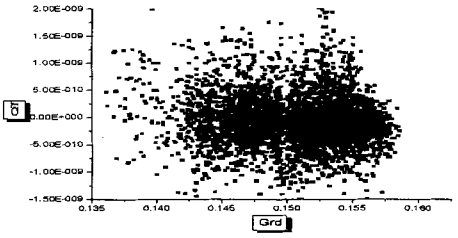


图 5－4－3　　计算 24 小时后

图 5－4　　Grashof（Grd ）数分布

在空气边界层上（σ=0.995），热漂移项（QT）和传质系数（Grd）即：(QT~Grd)关系演变图

图 5－4－1、5－4－2、5－4－3 分别为三个时间段上(QT~Grd)图

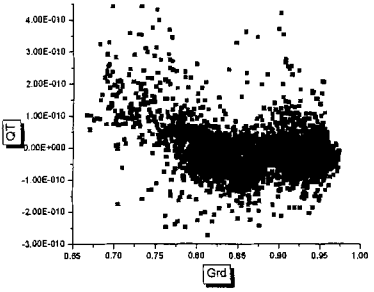


图 5－5－1　计算 6 小时后

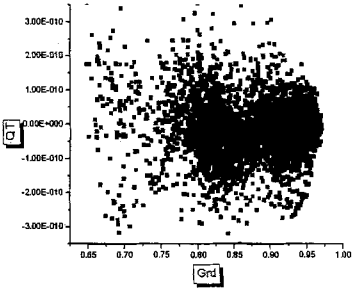


图 5－5－2　计算 12 小时后

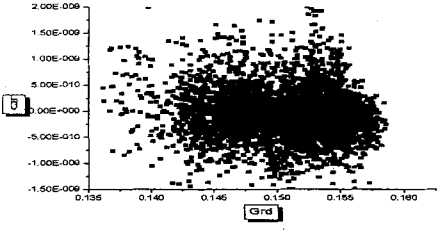


图 5－5－3　　计算 24 小时后

图 5－5　　Grashof（Grd ）数分布

在空气边界层上（σ=0.95），热漂移项（QT）和传质系数（Grd）即：(QT~Grd)关系演变图

图 5－5－1、5－5－2、5－5－3 分别为三个时间段上(QT~Grd)图

图 5－4、5－5 代表两个不同空间层，在三个不同时间层上，QT（表示热漂移项）与 Grd（传质系数）之间的关系。分析图形，发现规律（一）：QT 数值成对称分布态，集中在区间（+2.0e-10～-2.0e-10）mg/m^3，正负绝对值大小相等。规律（二）：对应于 Grd 数，QT 在图示中有两个高峰，形成哑铃状。在边界层 σ =0.995，在不同时间层上，Grd 数始终集中在区间(0.14~0.150)和区间(0.150~0.155)。然而在边界层 σ =0.95 上，Grd 数值随时间发生变化，当计算 12 小时后，Grd 数在区间(0.80~0.85) 和(0.90~0.95)，计算 24 小时后，Grd 数分布区间在(0.145~0.150) and (0.15~0.155)。表明在不同垂直高度上，传质系数发生了变化。而热漂移项数值不随之改变。始终保持在固定数值范围内。

基于上图分布规律，我们进一步研究，将输出的 QT 值利用软件 Stanford Graphics 进行了回归。见下图

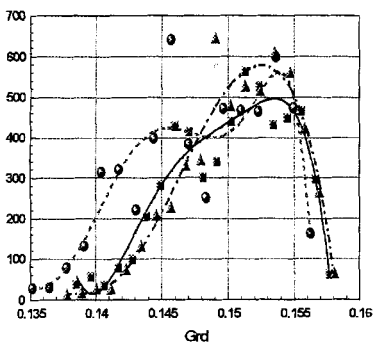


图 5－6－1　　回归曲线（一）
在模式底边界层（ σ =0.995）

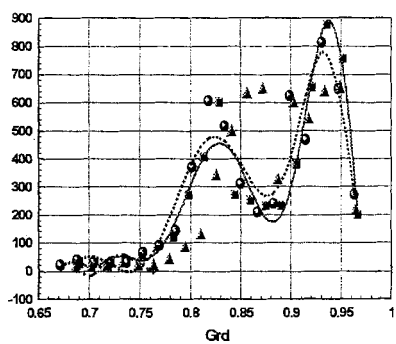
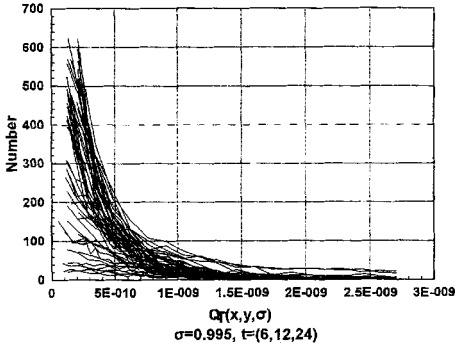


图 5－6－2　　回归曲线（二）
在模式底边界层（ σ =0.95）

图 5－6　(Grd～Number)曲线图

图中曲线，X 方向代表 Grd 数，Y 方向代表模拟区域格点数，图中三条曲线分别表示三个不同时间层，小方块代表计算到 6 小时时刻，模拟区域中（Grd～Number）关系图，相应的实线代表其拟合曲线，黑原点代表计算到 12 小时时刻，拟合曲线对应于虚线，而小三角则代表计算到 24 小时时刻，其拟合曲线相应于

图 5－6 显示了在模拟区域内，传质系数 Grd 数的分布，图 1 回归的是边界层（ σ =0.995）上的(Grd～Number)规律曲线，图 2 回归的是边界层（ σ =0.95）上的，比较上述两图，图 5－6－2 中曲线的双峰现象非常明显，图 5－6－1，在计算时间到 12 小时，双峰比较明显。得出结论：在空间垂直方向上，上界层 Grd 数分布更加稳定。



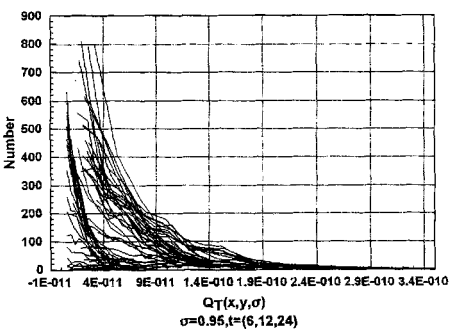


图 5－7　热漂移源项分布

图中横坐标代表的是热漂移项数值，纵坐标代表的是模拟区域格点数，图中曲线一共有 20 条，将 Grd 数值划分 20 段，画出 20 条曲线。

分析图 5－7，QT 的曲线分布具有规律，符合 Rosin-Rammler 分布。

我们继续进行回归公式：

一般 Rosin-Rammler 的公式[43]：

$$f(x)=\theta_1\cdot\frac{0.1}{(x/\theta_2)^{0.1}}\exp(-\frac{x}{\theta_2})^a \qquad (5-5)$$

公式 5－5 中的 θ1、θ2 系数为待求量。a 为方程指数。

应用软件 Stanford Graphics，输入六组数据 QT(x, y, σ)，拟合出 θ1、θ2 值。

得出 Rosin-Rammler 分布方程式中的系数。见表 1：

表 1：

	σ =0.995 , a=0.5			σ =0.95, a=0.44		
	t=6h	T=12h	t=24h	t=6h	t=12h	t=24h
θ 1	4.9E-7	4.3-7	1.34-7	1.36-13	1.14-13	9.1-12
θ 2	9.7E-11	9.9E-11	9.8-11	9.89-11	9.91-11	11.0-11
平均值	θ 1=3.5E-7, θ 2=9.8E-11			θ 1=1.25E-13, θ 2=9.9E-11		

从表格中可以看出，在工况（一）：σ =0.995 , a=0.5 时，当 T 分别为 6h，12h，24h，方程回归得到 θ 1、θ 2 的三个值，虽然略有不同，但它们的值均在同一数量级上，经平均得到一组数据 θ 1=3.5E-7，θ 2=9.8E-11，

在工况(二) σ =0.95 , a=0.44 时，同样在 T=6、12、24 时刻，方程回归得到三组数据，经平均得到 θ 1=1.25E-13，θ 2=9.9E-11，比较工况一、二两组数据，可看出，θ 1 相差较大，θ 2 差别较小，

这种现象发生，我们虽然暂时不知为什么，但可以得出结论，粒子热漂移对粒子输送、扩散的过程中，其作用是有规律的，

本文分析得出，(Grd～Number)曲线图确实符合 Rosin-Rammler 分布。

QT 符合公式（5－5）的 Rosin-Rammler 分布。在两种工况下，其形式有变化。

在低层 σ =0.995：

$$f(x) = (3.5\text{E-}7)\cdot\frac{0.1}{(x/(9.8\text{E-}11)^{0.1}}\exp(-\frac{x}{(9.8\text{E-}11)})^{0.5} \qquad (5-6)$$

在边界层 σ =0.95

$$f(x) = (1.25\text{E-}13)\cdot\frac{0.1}{(x/(9.9\text{E-}11)^{0.1}}\exp(-\frac{x}{(9.9\text{E-}11)})^{0.44} \qquad (5-7)$$

§5. 4 结论

本章进行了第二个模拟，沙尘从三个源地起动，经传输、扩散，36 小时后，均传到了我国下游地区，模拟（二），分别在三个时刻，T=0、12h、24h、36h 输出整个模拟区域沙尘浓度的分布图，显示了整个沙尘暴事件，沙尘传输、扩散的过程。图 5－1、5－2、5－3 分别代表了三个起源于不同沙尘源区的沙尘暴过程，沙尘暴从三个不同路线向下游输送，经 36 时间后，沙尘中心均到达朝鲜半岛，在相同的中尺度系统下，不同沙尘源的沙子运输到同一地区，其在沿途的影响区域范围略有不同，可以得出，受相同风力影响，不同地区沙尘源对我国下游城市沙尘暴的发生具有叠加作用，加大了某些城市沙尘暴事件发生的频率。沙尘暴除了受国外蒙古地区、我国西北地区沙漠、戈壁，周边城市或者本市周边地区的污染物，粉尘也能导致城市沙尘暴的发生。所以，要治理我国沙尘暴这一灾难性天气，除了要加强沙漠绿化、防止扩大化，尤其要防止一些城市土地继续荒漠化，加强周边地区良田的灌溉，城市边缘大力植树造林。降低沙尘暴爆发的可能性。

在第三章中，本文定义了热漂移现象是粒子在温度梯度中的输运。在有温度梯度的地方，必导致周围物质密度的改变，引起物质流的传动，这就涉及到传质系数（Grashof 数）。本文作者从模式中单独输出热

漂移项（QT）值，和同一时刻的 Grd 系数，由此建立了（QT~Grd)之间的关系，并发现它们之间关系图呈哑铃状，极有规律。在单独分析 QT、Grd 的特点时发现，它们在区域中的分布并不是杂乱无章的，随着时间和空间的变化，QT、Grd 在模拟区域中有规律的分布，其中 QT 的分布符合一种 Rosin-Rammler 分布。以上这些都是本文的研究新发现。证明粒子热漂移作用在沙尘传输、扩散过程中，不仅不能忽略，而且是有规律可遁。 得出的粒子热漂移源项（QT）与传质系数(Gr_D)之间的规律，这以后对沙尘暴以及大气多相流的研究都是具有重要的参考价值。

第六章　模拟结果与实际测量的对比分析

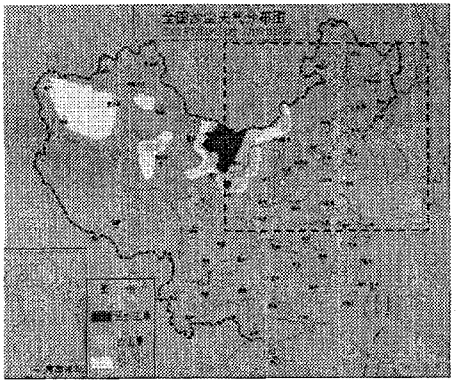
§6．1　概述

大气环境流体物理模拟简称物理模拟，是一种行之有效的实验研究途径。它以适当的流体，如空气或水作为介质，将发生在实际大气里的大气过程和和现象（可从分子尺度到行星尺度），通过一定装置和技术手段予以再现，以供在实验室内进行专门的细致研究。

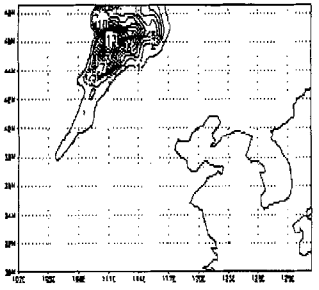
物理模拟、野外试验与数值模拟一起，已经被人们承认为大气科学研究的三种基本途径。它不仅可以对理论研究起到检验和指导的作用，而且还可以作为数值模拟与现场试验研究之间的联系纽带和桥梁。当然，主要由于实验装置和实验技术的限制。物理研究途径存在不少局限性。例如，一些相似模拟的实现远非轻而易举的，除非花费极为昂贵的代价。况且，实验室模拟装置本身固有一些限制，如上边界和侧边界的存在难以去除等，都会限制这一有效研究手段发挥更大效用。但是，我们相信随着现代科学技术的迅速发展，这一颇具潜力的研究手段必将更臻于完善，将发挥其应有的作用的。

正因为实验条件的限制，本文没有开展物理模拟，数值模拟结果将与（中国沙尘暴网）上的实际结果进行对比分析。

§6．2　模拟结果和实际结果的对比分析

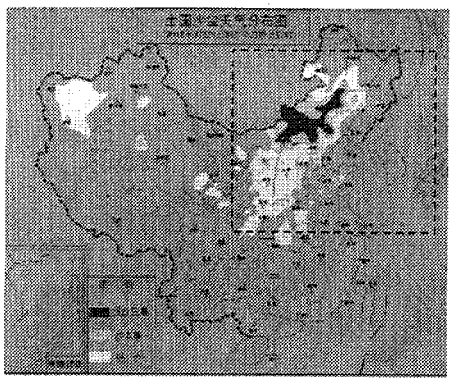


左图 6－1－1：实际监测示意图（图中虚线框为模拟区域）
2002 年 3 月 19 日 8 时—3 月 19 日 17 时全国沙尘天气分布图

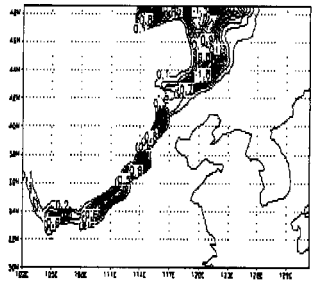


右图 6－1－2：　模拟输出图形
初始时刻（19 日 8 时）

图 6－1：　沙尘天气东移并发展，在甘肃河西、内蒙西部和宁夏等地区出现大范围的沙尘暴和强沙尘暴天气。在青海北部，甘肃中部也出现了沙尘暴。

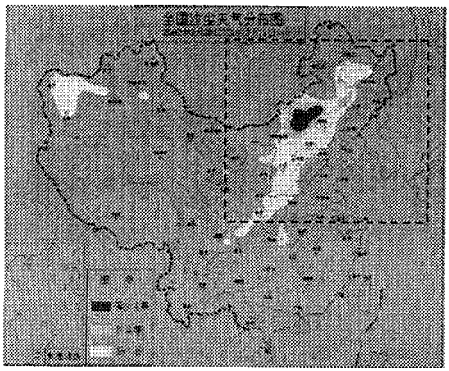


左图 6－2－1：实际监测示意图（图中虚线框为模拟区域）
2002 年 3 月 20 日 08 时—3 月 20 日 17 时全国沙尘天气分布图。

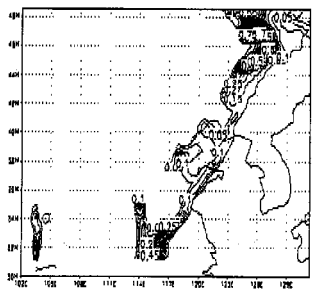


右图 6－2－2： 计算 24 小时后
（时刻：20 日 8 时）

图 6－2： 沙尘天气继续向东向南扩展。我国西北地区东部，华北、东北部分地方出现扬沙、沙尘暴和强沙尘暴天气。

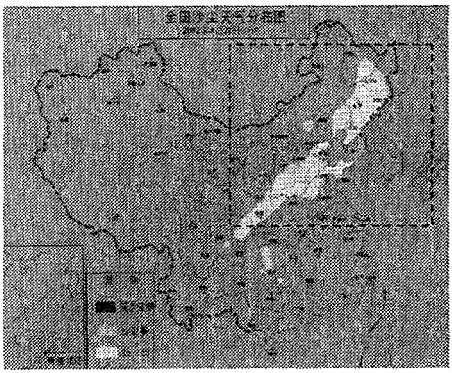


左图 6－3－1：实际监测示意图（图中虚线框为模拟区域）
2002 年 3 月 20 日 20 时—3 月 21 日 05 时全国沙尘天气分布图

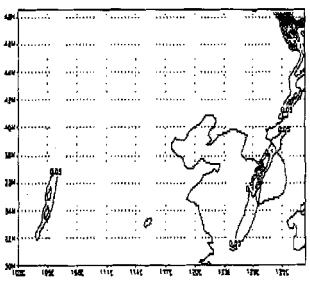


右图 6－3－2： 计算 36 小时后
（时刻：20 日 20 时）

图 6－3： 沙尘天气继续影响我国华北、东北地区。低沙尘暴和强沙尘暴天气出现在华北北部.



左图 6－4－1：实际监测示意图（图中虚线框为模拟区域）
2002 年 3 月 21 日 08 时全国沙尘天气分布图。



右图 6－4－2：计算 54 小时后
（时刻：21 日 20 时）

图 6－4： 沙尘天气继续向东向南扩展并有所减弱。我国华北东部南部、东北地区东部出现大片扬沙天气。

对比分析：

图（6－1）～（6－4），其中左图：为中国沙尘暴网发布的 2002 年 3 月 19 日～21 日沙尘暴天气概况，中央气象台和西北、华北等有关省市气象台站对这一强沙尘暴做出了较准确的预报。

右图：为数值模拟结果。 模式输出图形，计算 3 天，（19～21），2002，输出时刻分别为 T=12, 24, 36, 48（以蒙古源区起动的沙尘暴为例）

经过比较，可以看出，模拟结果和实际监测结果取得了很好的一致。沙尘暴在大气中传输的运动路线及其扩散的覆盖地区范围，和对我国城市的影响，模拟结果都能够再现出来。这主要表现在三个方面：

（1） 沙尘中心浓度传输的速度相接近；（基本同一时刻到达同一区域）

（2） 沙尘暴迁徙的路径相一致；（都是向我国东南方向发展）

（3） 从蒙古沙源起动的沙尘，其对我国城市沙尘暴爆发的影响范围相符合（与实际监测范围相符合）。

模拟结果和实测结果的一致性表明，运用气相 MM5 与颗粒输送方程很好相耦合，它对大气气－固两相流问题进行模拟研究时具有的优点体现在：建立的模型接近于实际的监测情形，模拟结果准确反映实际情况。同时说明建立的数值模型的准确性，计算程序的正确性。

结 论

本文建立了沙尘传输模型——三维欧拉方程，该模型与气相模型 MM5 相耦合，计算模拟了区域沙尘暴传输、扩散的过程。首次在模型中考虑沙尘热漂移作用，同时建立了粒子干沉降模型，较为客观的考虑了沙尘源项。与 MM5 模型很好的相耦合，沙尘传输模型中采用与 MM5 模型相同的 σ 坐标，物理参数及 IEEE 数据格式。模型中初步考虑沙尘粒子与大气气流考虑单项耦合，即大气气场对沙尘粒子的作用，而忽略粒子对气场的作用。

本文利用建好的模型模拟了沙尘暴事件的整个传输过程，模拟结果图示反映了沙尘中心移动的轨迹，同时经过对加沙尘源项与不加沙尘源项两种工况的对比分析，得出沙尘粒子热漂移在整个传输过程中起着不可忽视的作用，模型还从三个不同沙尘源区起动的沙尘中心迁徙的路径及其扩散范围，来分析研究了不同沙尘源，对我国北方城市沙尘暴爆发的影响作用。这对我国的环境治理提供可参考信息。在此基础上，定性分析了热漂移项在模拟区域中，不同时间层和不同空间层上的分布，得出其规律分布曲线。经曲线拟合，得到符合 Rosin-Rammler 分布的方程式。

整个计算在 Linux 平台上完成，我们自己开发的网络并行系统为本文提供了强有力的计算工具。模型设置计算积分时间为 3 天，系统运行时间经测试：同时运行 8 个 CPU(处理器)，测试时间为 30 分钟，而运行单个 CPU，时间则为 3 小时。表明并行计算机确实是大型数值模拟不可缺少的工具。

为验证模拟结果的正确性，本文参考了沙尘暴中心网发布的 2002 年 3 月沙尘暴天气分布图，在各个时间段进行了对比分析。模拟结果与实测结果对比分析表明，本模拟方法能够正确的反映沙尘暴迁徙的路径和沙尘中心分布影响的范围。

本文得出以下结论：

(1) 运用气相运用气相 MM5 与颗粒输送方程很好的模拟了大气沙尘暴过程，即 Eular-Eular 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。同时热漂移的影响作用在模拟区域内的分布是有规律的，符合 Rosin-Rammler 分布。

(3) 沙尘中心迁徙路径主要受风力影响，起动于不同沙尘源的沙尘在同一天气系统下，经风力输送到相同的区域。表明我国不同沙尘源对下游城市沙尘暴爆发具有叠加的作用，城市周边地区土地荒漠化需加强治理。

(4) 并行计算机型是大气气固两相流数值模拟的必要条件。我们开发的基于 PC 机的网络计算机系统（16CPU/ 750RAM/ 8G），由 16 个 CPU 通过传输速度为 100M 的高速以太网经 24 口高速交换机与主节点相连，整个系统的操作为 Linux, 16 个处理单元采用网络引导方式由主节点启动，实现了超级计算机的部分功能，与美国 NASA 与日本九州大学所建立的同类系统相比，本系统在网络技术和应用能力上，都有见长。

本文的研究工作处于初期阶段，是一次将气象界数值模型和热工界数值模型相结合的跨学科研究,具有广阔的发展前景。它为将来进一步用数值模拟方法来研究大气中气固两相流过程中粒子传输、扩散包括城市污染物，等极为复杂的工程问题提供了较有意义的参考价值。

为了完善和发展本数学模型，下面的工作还有待进一步深入：

① 为使模型更具模拟能力，气相模型 MM5 和沙尘传输模型之间的耦合，应考虑双向耦合，在 MM5 气相方程式中加入粒子颗粒作用。

② 为了能使计算更加准确，在模型中更精确考虑沙尘源项，即：有必要建立复杂的沙尘起动机制模型，另外还需要在本模型基础上补充相应的粒子化学反应、颗粒之间的碰撞作用和颗粒对流体的作用。

③ 为了发展和体验模型，还应该发展物理实验模拟，以期得到更多的实验中的颗粒运动信息。

参考文献

[1] 郭亚萍 等, 沙尘暴的成因与防治措施初探， 干旱环境监测，2000, 14:3

[2] Brazel A. J. and W. C. Nicking The relationship of wealther types to dusts storm generation in Arizona.J. Clima-tology[J]. 1986, 6(3): 255-275

[3] Schutz L.Saharan dust transport in the NE-trade wind region over the North Atlantic Ocean. Proc Sym Radiatiom,1977, 1:68~70

[4] Wesphal, Toon O B, Carlson T N. A two-dimension numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms, Journal of Geophysical Research, 1987, 92: 3027~3049

[5] Westphal, Toon O B, Carlson T N, A case study of mobilization and transport of Saharan dust, Jouran of Atmospheric Science, 1988, 45:2145~2175

[6] Ta-Hsiung Lin, , Long-range transport of yellow sand to Taiwan in sping 2000: observed evidence and simulation , Atmospheric Environment, 2001， 35: 5873-5882

[7] Lu, Hua, Shao.Yaping , Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications, Environmental Modelling & Software 2001,16: 233~249

[8] *Zhang, Daizhou,; Iwasaka, Yasunobu* Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in spring of 1995 and 1996 , Atmospheric Environment, 1999, 33: 19 ,

[9] Gomes,etc, Comparison of characteristics of aerosol from dust storms in Central Asia with soil-derived dust from other regions, Atmospheric Environment, Part A: General Topics, 1993 , 27A: 2539-2544

[10] Ma, Chang-Jin; 2001,Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asia dust-storm period, Atmospheric Environment , 2001, 15(35): 2707-2714

[11] 徐建芬, 牛志敏, 陈伟民等.我国西北地区 94.4.5 沙尘暴天气分析.中国沙漠,1996;16(3):281—286

[12] 徐国昌, 等，甘肃省“4. 22”特大沙暴分析，气象学报， 1979, 37(4):26～35

[13] 刘春涛 程麟生, 黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验, 气象学报 1997, 6 (55) : 726~739;

[14] 高 涛, 刘景涛等，沙尘暴天气的归类判别分析预报模式，甘肃气象, 2001,2 (19) : 14~20;

[15] 赵光平，王连喜，杨淑萍，宁夏区域性强沙尘暴短期预报系统简介，甘肃气象，2001, 2 (19): 175~181;

[16] 屈建军,孙宏义,李金贵， 腾格里沙漠东南缘沙尘暴变化趋势的Markov 模型分析，中国沙漠，2001, supp (21) : 72~75

[17] 孙军,李泽椿, 西北地区沙尘暴预报方法的初步研究，气象, 1 (27) : 19~24

[18] 纪飞， 秦瑜， 东亚沙尘暴的数值模拟（1）模式建立，北京大学学报(自然科学版), 1996, 3 (32) : 385~392;

[19] 王强 等，一次沙尘暴中尺度低压和沙尘输送的数值模拟， 甘肃气象，1997, 4 (15) : 1~5

[20] 刘毅，张华等，一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟，南京气象学院学报，1997, Vol.20No.4

[21] Gad HetSroni, Handbook of Multipliphase System, 1982

[22] 周力行， 湍流两相流动与燃烧的数值模拟，1991

[23] 皇甫雪宫， 并行计算在气象预报上的应用，数值计算与计算机应用，1995，16(3)：20～27

[24] 韩冀中，韩承德， 高性能计算技术的发展现状及趋势， 中国工程科学，2000，2(1)：85～86

[25] 孙家旭，张林波，等， 网络计算与分布式编程环境，北京：科学出版社，1996

[26] Fox G,Williams R, Messina P., Parallel Computing Works, Morgan Kaufmann Publischers, Inc., SanFrancisco, California, 1994

[27] Veer N. Vatsa, Bruce W.Wedan, Parallelization of Multiblock Flow Code: An Engineering Implementation, Computers & Fluids, 1999, 28 : 603～614

[28] Jams C. Hoe, Andy Boughtonk, et al., Network Substrate for Parallel Processing on a Workstation Cluster in HOT Intercommects II, Angust 11-13, 1994: 144-163

[29] 吴锤红，吴锤结，微机网络并行计算环境 Linux、并行计算平台 MPI 及其应用，福建农业大学学报，1997，26（4）：478～482

[30] Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version, NCAR, Mar. 1994

[31] Anthes and Warner: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. Mon. Wea. Rev. 1978, 106, 1045～1078

[32] Anthers et al. 1987: Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4(MM4). NCAR/TN-282+STR, National Center for Atmospheric Research , Boulder, CO, 66 pp.

[33] 廖洞贤，大气数值模式的设计，气象出版社，1999

[34] Arakawa, A., and V. R. Lamb, Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 173-265

[35] Asselin, R., 1972: Frequency filter for time-integrations. Mon. Wea. Rev., 1977, 100, 487-490.

[36] Yamartio R J, Scire J S, Atmos. Environ, 1992, 26A: 1493～1512

[37] Walcek CJ, Brost R A, Chang J S. Atmos Environ, 1986, 20: 949～964

[38] Wesely M L, Cook D R, Hart R L, A. M, J Geophys Res, 1985, 24: 1196～1207

[39] S. K. Friendlander, SMOKE, DUST AND HAZE (FUNDAMENTALS OF AEROSOL BEHAVIOR), John Wiley &Sons , 1997

[40] Waldmann, L., and Schmitt, K. H. Thermophoresis and Diffusiophoresis of Aerosol, Chap. VI in Davies, C. N. (Ed.) *Aerosol Science*, Academic, New York, 1966

[41] Kennard, E. H. (1938) Kinetie Theory of Gases, McGraw-Hill, New York. A good discussion of the creep velocity at a particle surface resulting from a temperature gradient in the carrier gas is given on pp. 327 ff.

[42] Epstein, P. S. (1924) Phys. Rev., 23, 710

致谢

在论文完成之际，我谨向导师顾璠教授致以最诚挚的谢意，笔者在研究生阶段近三年的学习、工作和生活中，都得到了导师悉心教导和无微不至的关怀。导师敏捷的思维，严谨的治学态度，以及对科学知识执着的追求以及正直、坦诚的人生态度都给了我深刻的印象，使我受教终身。在整个论文完成过程中，顾老师悉心关心我论文进展情况，对我的论文提出了详细的指导。在论文完成之际，谨向顾老师表示衷心的感谢。

同时，我也要向徐益谦教授致以最诚挚的谢意，徐益谦教授在课题的研究过程中给予了我尽心的关怀和指导，徐益谦教授为人朴实、和善和宽容使我们年轻人倍感亲近，他开阔的视野，丰富的科学知识令我心悦诚服。我始终以徐益谦教授作为我的楷模。

在此，还必须感谢南京大学大气科学系苏炳凯教授、王体健教授和汤剑平博士，正是在他们悉心教导和热心帮助下，作者得以顺利完成论文，论文中凝聚了他们大量的心血和汗水。同时，张军教授在论文的完成过程中也给予了大量的关心和支持。师兄刘勇博士后、汉春利博士和余刚博士在论文的完成过程中给予了积极的合作与帮助，在此作者深表感谢。

感谢刘岩硕士、高登山硕士、杨爱勇硕士、王心亮硕士、张欣硕士和叶丹硕士等对作者的帮助，

最后，我还要感谢支持和帮助我的家人、朋友，是他们在我最困难的时候给予我最无私的关怀和鼓励，使我能够顺利完成论文的工作，他们是我完成工作的精神动力。