

南京信息工程大学

---

硕士学位论文

---

我国北方地区一次沙尘暴天气特征分析

---

姓名：孙燕

---

申请学位级别：硕士

---

专业：气象学

---

指导教师：沈桐立

---

20061201

# 学位论文独创性声明

本人郑重声明：

- 1、坚持以“求实、创新”的科学精神从事研究工作。
- 2、本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
- 3、本论文中除引文外，所有实验、数据和有关材料均是真实的。
- 4、本论文中除引文和致谢的内容外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。
- 5、其他同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示了谢意。

作者签名： 孙燕

日期： 2006年12月

# 学位论文使用授权声明

本人完全了解南京信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅；有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索；有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

作者签名： 孙燕

日期： 2006年12月

# 我国北方地区一次沙尘暴天气特征分析

## 摘 要

本文对 2002 年 3 月 18 日~3 月 22 日发生在我国华北、东北和蒙古国的强沙尘暴成因进行了诊断分析和数值模拟分析, 首先对环流背景、蒙古气旋进行诊断分析; 然后利用 MM5 非静力模式对这次过程进行数值模拟, 并以模式输出的各物理量从螺旋度、高空急流等方面对沙尘暴过程作诊断分析。得出以下几点结论:

(1) 蒙古气旋是这次沙尘暴天气的主要影响系统, 这次气旋发生发展在斜压区, 气旋的发展阶段以温度平流的作用为主, 斜压性的作用不可忽视。沙尘暴过程主要是由气旋冷锋及锋后地面大风触发的, 地面大风的形成与气旋发展、锋后冷平流以及高空急流动量下传有关。

(2) 通过中尺度特征分析, 发现这次过程中伴随着中小尺度系统的发生发展, 表明中小尺度系统对强沙尘暴的加强和发展有很重要的作用。

(3) 本文将螺旋度引入到沙尘暴的研究当中, 发现沙尘暴具有对流天气的一些典型特征, 局地垂直螺旋度对沙尘暴强度的预报具有一定参考价值。

(4) 高空急流对沙尘暴发生区有很好的指示作用, 强沙尘暴发生在 300hPa 高空急流入口区右侧、低层正涡度中心附近下方, 高空急流发生变异时, 导致对流层中下部锋区加强, 为中尺度系统的发生、发展、和沙尘暴的产生提供了有力的大尺度环流背景。

**关键词:** 蒙古气旋, 数值模拟, 诊断分析

# **A sand storm weather characteristic analysis in northern area of china**

## **Abstract**

The genesis and development of a severe dust storm occurred in the area of north-east china, north china and Mongolia during 18-22 March,2002 are analyzed, and the cause of severe dust storm is diagnosed and simulated respectively .In the first part, the circulation background of the Mongolia cyclone is analyzed. Then, this process is simulated using MM5 non- static pattern, and the sand storm process is diagnostic analysed by the pattern output various physical quantities from the aspects of the helicity, upper air jet stream and so on, the results show :

(1)The Mongolian cyclone is a major effective system of the sand storm weather. The cyclone occurring in the slanting pressure area is phased by the temperature advection function primarily. The slanting function is noticeable. The sand storm process is mainly triggered by surface gale after the cyclone cold front and the front. On back of the ground gale formation and the cyclone development, the cold front advection as well as under the upper air jet stream momentum is the mostly concerns.

(2) Through the center criterion characteristic analysis, it is discovered that this process is following the small criterion system occurrence development, which indicated that the small criterion system has a very vital role to strong sand storm strengthened with the development.

(3) The spiral is introduced into the sand storm research, it is discovered that the sand storm has the convection weather of some typical characteristics, and the local vertical spiral helicity has some reference value to the sand storm intensity forecast.

(4) Upper air jet stream is main therm-dynamics center. The severe sand-dust storm happened at the south side of high jet exit area and downwind of vorticity center of 300hPa and ascending area of sub-circulation. When the variation is occurred in the upper air jet stream, it causes the enhance of the frontal zone in the troposphere lower part, which has provided the powerful great criterion circulation background to the center criterion system occurrence, the development, and the sand storm production.

**keyword: Mongolia cyclone, Numerical Simulation, Diagnosis Analysis**

# 第一章 前言

## 1.1 沙尘暴概述

### 1.1.1 沙尘暴的定义及时空分布

沙尘暴 (sand-dust storm) 是沙暴 (sand storm) 和尘暴 (dust storm) 两者兼有的总称, 是指强风把地面大量沙尘卷入空中, 使空气很混浊的严重风沙天气现象。其中沙暴指大风把大量沙粒吹入近地面气层所形成的携沙风暴。尘暴则是大风把大量尘埃及细粒物质卷入高空所形成的风暴。按照中国气象局《沙尘天气预警业务暂行规定 (修订)》将沙尘天气分成浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。其具体判定为: (1) 浮尘的标准是尘土、细沙均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于 10km 的天气现象; (2) 扬沙的标准是风将地面尘沙吹起, 使空气相当混浊, 水平能见度在 1~10km 内的天气现象; (3) 沙尘暴的标准是强风将地面大量尘沙吹起, 使空气很混浊, 水平能见度小于 1km 的天气现象; (4) 强沙尘暴则是大风将地面尘沙吹起, 使空气非常混浊, 水平能见度小于 500m 的天气现象。

沙尘暴的季节分布基本上是春多秋少。这是因为春季我国北部地区冷空气活跃, 多大风, 气温回暖解冻, 地表裸露, 容易起沙。日变化主要集中在中午至傍晚, 夜间至午前相对较少, 这显然与近地层空气热力稳定性的日变化有关<sup>[1]</sup>。这种季节变化和日变化主要反映了与沙尘暴产生密切联系的大风因素与层结稳定度因素。春季我国北方受极锋控制, 利于动量下传形成地面大风; 午后至傍晚也是易于形成地面大风的时段; 同时, 午后层结不稳定度增大也易于对流产生。

沙尘暴主要发生在沙漠、戈壁及其邻近地区。沙尘暴天气现象并不仅限于中国发生, 在世界上大多数的荒漠化和沙漠地区几乎都可以形成沙尘暴。全球有四个沙尘暴多发区, 分别是中亚及中国西北部、澳大利亚中部、美国中西部和非洲撒哈拉沙漠区。上述地区一旦遇到适宜的气象条件都能形成沙尘暴天气。从卫星遥感资料分析, 明显形成沙尘暴的地区是非洲撒哈拉沙漠和中国北

部到蒙古的沙漠地带。通过对卫星观测资料的分析，撒哈拉沙漠的沙尘不仅能被输送到欧洲，甚至可以输送到北美洲南部和南美洲北部。我国几个主要的、大的沙漠和沙地主要位于新疆、内蒙古、甘肃和宁夏等地，沙漠（包括沙丘和风蚀土地）总面积为 71.29 万平方千米，戈壁总面积为 56.95 万平方千米，占全国面积的 13.36%，其中新疆沙漠总面积为 42.0 万平方千米，戈壁面积为 29.3 万平方千米，戈壁面积为 18.8 万平方千米。新疆和内蒙古自治区的沙漠和戈壁总面积分别占全国总面积的 7.4% 和 4.2%<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 沙尘暴形成的条件

据有关研究<sup>[3]</sup>，沙尘暴的形成有三个基本条件：一是大风，这是形成沙尘暴的动力条件；二是地面上的沙尘物质，它是沙尘暴的物质基础，50 年代盲目大量开垦荒地，使地表裸露的沙尘物质增多，导致强沙尘暴频繁发生，这都是明显的例证；三是不稳定的空气状态，这是使沙尘暴上扬到高空的重要的局地热力条件。沙尘暴多发生在午后至傍晚时段内，就充分说明了大气不稳定状态的重要性。

## 1.2 引发沙尘暴的天气系统研究

沙尘暴的发生除应具备有力的气候背景和下垫面条件外，还需要有利的天气系统的配合。王式功<sup>[4]</sup>总结了我国西北地区几次大范围沙尘暴过程，得出易产生沙尘暴的主要环流形势和天气系统有：（1）经纬向环流调整，即经向环流向纬向环流调整。（2）地面强冷锋活动和暖舌，在未来沙尘暴发生区形成暖区，使冷锋前后温度对比强烈，产生强烈的锋面的抬升，由此可产生瞬时变压风，此大风所经之地，常导致沙尘暴的产生。（3）高空西风急流加强、降低高度。（4）中尺度系统，多为中尺度低压或中尺度涡线系统。刘景涛等<sup>[5]</sup>以地面环流系统进行分类和命名，将形成我国北方特强沙尘暴的环流系统归纳概括为纯强干冷锋型、蒙古气旋与干冷峰混合型、蒙古冷高压南部倒槽型和干飏

线与冷锋混合型 4 种类型，其中，第二种类型对我国华北及东北地区影响最大。统计分析表明，东亚地区影响范围大、生命史长的强沙尘暴常常和春季罗第气旋发展紧密相连：从全年变化看，沙尘暴频次与气旋日数之间的相关系数较高，正相关达 0.671<sup>[6]</sup>。刘景涛等<sup>[7]</sup>分析了 2001 年 4 月 6~7 日中国北方沙尘暴过程，指出蒙古气旋强烈发展是形成这次强沙尘暴的主要原因。

### 1.3 沙尘暴的数值模拟工作进展

沙尘暴，尤其是特强沙尘暴往往是由大、中、小各种天气尺度系统及其特殊地形和下垫面条件共同作用的产物。为了研究其形成的物理机制，数值模拟是重要的手段之一。

国外在沙尘暴的数值模拟进行了多种工作，用数值模拟沙尘的远距离输送。Schutz<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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，发展成二维动力学沙尘传输模式，真实地模拟了撒哈拉沙尘 SAL(Sahara Air Layer)在大气边界层中的许多特征，Westphal<sup>[9]</sup>在二维模式的基础上，发展了三维动力学传输模式，研究了 1974 年 8 月 23—28 日撒哈拉沙尘起沙和远距离输送到大西洋的沙尘暴个例，结果发现：该时期的起沙是一个浅薄的东风波所致，而不是以前人们认为的那样是中层东风急流干对流混合所致。Cautenel<sup>[10]</sup>利用中尺度模式对西非尼日尔首都尼亚美上空来自撒哈拉尘暴的热力影响进行了数值模拟，获得了令人满意的结果，认为大气中的沙尘含量和辐射特征是最有意义的特征参数。

我国在沙尘暴的数值模拟方面也做了大量的工作，兰州高原所焦颜军等<sup>[11]</sup>用 P-6 混合坐标有限区域预报模式对“93.5.5”黑风个例作了模拟，表明：青藏高原地形屏障和强迫绕流的综合作用，将加强黑风暴的风速，也加强了黑风暴向东扩展的移动速度，水气凝结潜热效应对加强沙尘暴也有重要贡献；还指出了模式的分辨率对高空形势场和地面强风的预报结果有明显的影响，随着分



辨率的提高,对低空诱发槽和锋区、地面冷高压、冷锋、地面风的强度和位置的预报均有明显提高。牛宝山等<sup>[12]</sup>对1998年10月中旬的蒙古大地的爆发性气旋的数值模拟与湿位涡的诊断分析发现,气旋的爆发与湿位涡德平流关系密切。王文等<sup>[13]</sup>运用MM5模式输出资料进行了动力学诊断研究,指出将沙尘浓度和气块轨迹叠加在一起时,可以确定沙尘的输送路径。沙尘暴发生在冷锋后强下沉气流和较强气压梯度区。赵琳娜等<sup>[14]</sup>对造成2000年4月5~7日华北大范围沙尘天气的蒙古气旋快速发展过程进行了诊断分析以及数值模拟,结果表明温度平流是气旋发展初期和成熟期的主导因子,斜压作用增强是在气旋发展到最强之后。王劲松、李耀辉等<sup>[15]</sup>利用MM5非静力模式对“2000.4.12”个例进行了诊断分析,分析结果表明:沙尘暴发生在地面处于干暖状态的地区,位涡的水平分布特征对沙尘暴的出现时间和落区有一定的指示作用;强沙尘暴区上空螺旋度垂直分布为高层负值,低层正值,螺旋度正值的演变与沙尘暴的出现有一定的对应关系。

#### 1.4 本文研究意义

研究表明<sup>[16]</sup>,沙尘暴天气的起因是与冷空气的活动及其引起的大风过程相联系,而大风又常常和锋生过程及气旋的发生发展过程密切关联,有时甚至和某些强烈发展的中尺度系统,诸如飚线及MCS有关。东亚地区影响范围大、生命史长的强沙尘暴常常和春季气旋快速发展紧密相连:当蒙古气旋与冷锋配合时,地面冷锋引发偏北大风、降温、造成大范围的东亚沙尘天气。从天气学和动力学角度看,研究沙尘暴发生发展机制就要研究其天气影响系统的发生发展机制。在本文中蒙古气旋、冷锋、中尺度系统是研究的重点。

#### 1.5 本文研究方法

本文挑选了2002年3月18~22日沙尘暴个例,这是近几年来范围最大、持续时间最长、影响最大的一次强沙尘暴过程。其影响因子主要是蒙古气旋和强冷锋后产生的大风,将从以下几方面进行工作:1、分析与沙尘天气有关的

蒙古气旋发生发展的天气形势，结合冷锋对蒙古气旋进行物理量场分析。2、对中小尺度系统特征进行分析。3、将采用美国宾洲大学和美国国家大气研究中心(PUS/NCAR)联合研制的非静力中尺度数值模式 MM5V3 对本次过程进行模拟。对这个沙尘暴个例进行模拟并分析沙尘暴形成的物理机制。研究中发现物理量场对沙尘暴的出现区域有很好的对应关系并具有指示作用。

在具体的模拟过程中，将利用模式的 3 小时间隔输出量模拟沙尘暴发生、发展过程，分析中—高层的物理量场的垂直与水平分布情况以揭示北方沙尘暴的机制，试图得到发生沙尘暴的一般规律。

## 第二章 天气过程概述及大尺度物理量诊断分析

### 2.1 天气过程概述

上面已指出,沙尘暴是区域性和时间性特征非常明显的一种天气现象,同台风、暴雨相比,它在一年中出现的次数要少得多,再加上西北地区地广人稀、站点稀疏,而很多沙尘暴的发生又是一种局地性的,有时只影响到一两各观测站,有的甚至更本观察不到,而发生影响大片地区的区域性沙尘暴很少见。

2002年3月18日下午到22日,我国北方大部地区及河南、湖北、湖南西部、四川东部、重庆、安徽中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、甘肃中西部、宁夏北部、河北北部、北京、吉林西北部等地的部分地区出现了强沙尘暴,甘肃鼎新、内蒙古乌拉特后旗还曾一度出现能见度为零的特强沙尘暴<sup>[17]</sup>。

这次沙尘暴过程的特点是:持续时间长、覆盖面积大、强度高、且伴随有明显的大风和大幅度的降温。这是近几年来范围最大、持续时间最长、影响最大的一次强沙尘暴过程。

#### 2.1.1 沙尘天气实况及天气形势简要分析

这次天气过程的发生发展主要是由强冷空气和蒙古气旋影响造成的。在3月11~15日,我国大部地区高空受偏西或西偏北气流控制,温度较高,从16日开始,500hPa高空气流经向度开始加大,18日冷锋到达新疆北部,中亚地区被高压控制,南疆盆地有一个热低压,当天下午起,受高压前部西北大风影响,南疆盆地西部开始出现沙尘天气。到了19日(图2.1.1),高压中心继续加强并东移到新疆北部,蒙古气旋在蒙古国中部开始发展,冷锋东移南下扫过内蒙古西部、甘肃、宁夏等地,上述地区出现强沙尘暴天气。20日(图

2.1.2), 冷空气继续东移南下, 华北西部及西北地区被高压所控制, 冷锋一路扫过华北地区、东北西南部、黄淮、江淮直到江南北部。而蒙古气旋在蒙古国东部停滞少动并进一步加强, 06 时(世界时, 下同)中心气压降低到 981hPa。受上述系统共同影响, 华北等地出现了近几年来最强的沙尘天气, 北京北部遭遇强沙尘暴影响。随着蒙古气旋的东移及冷空气的东移南下, 21 日(图 2.1.3)沙尘天气影响范围进一步扩大, 连长江以南及东北东部地区都出现了沙尘天气, 这是很少见的。同时, 又有一股冷空气补充东移南下, 西北部分地区再次出现沙尘天气。到了 22 日 12 时, 高压中心位于江南西部, 冷锋移到华南南部, 沙尘天气结束。从地面温度场情况看, 冷锋前部区域由于暖平流和日照影响温度较高, 而锋区附近及后部由于强冷平流加上沙尘天气造成天空状况差日照弱导致温度偏低, 锋区前后温度差别很大, 强温度梯度也促进了地面风力加大。

通过分析可以看出: 这次过程之所以很强, 主要是因为冷高压及蒙古气旋均很强, 锋区附近气压梯度、温度梯度大, 同时蒙古气旋 20 日在蒙古国东部出现了停滞。这次强沙尘暴天气过程属于锋后型。

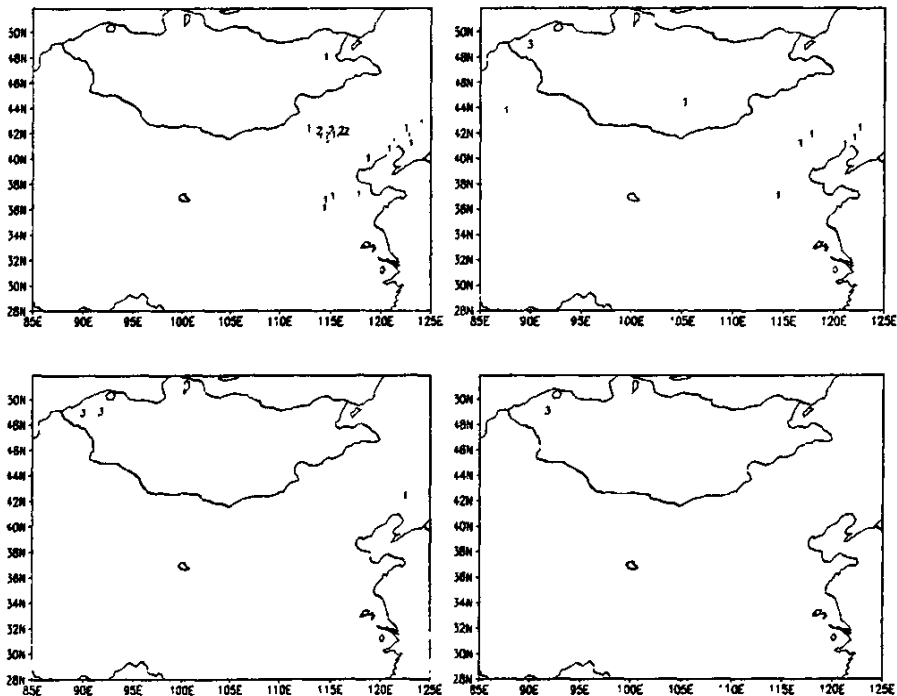


图 2.1.1 2002 年 3 月 18 日 06 时、09 时、12 时、15 时(世界时)沙尘天气现象

(1 扬沙, 2 沙尘暴, 3 强沙尘暴)

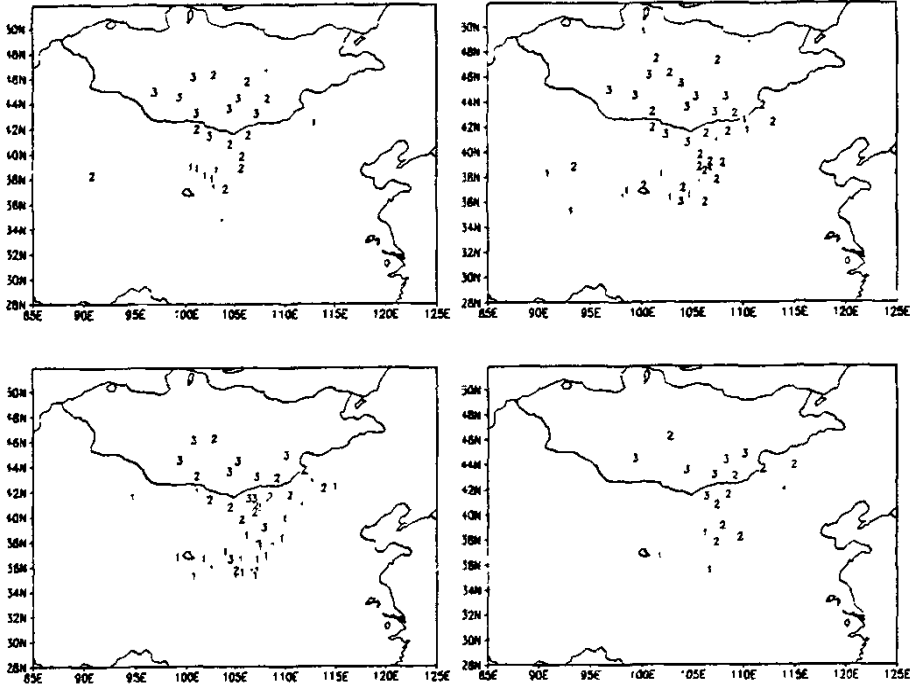


图 2.2.2 2002 年 3 月 19 日 06 时、09 时、12 时、15 时 (世界时) 沙尘天气现象  
(1 扬沙, 2 沙尘暴, 3 强沙尘暴)

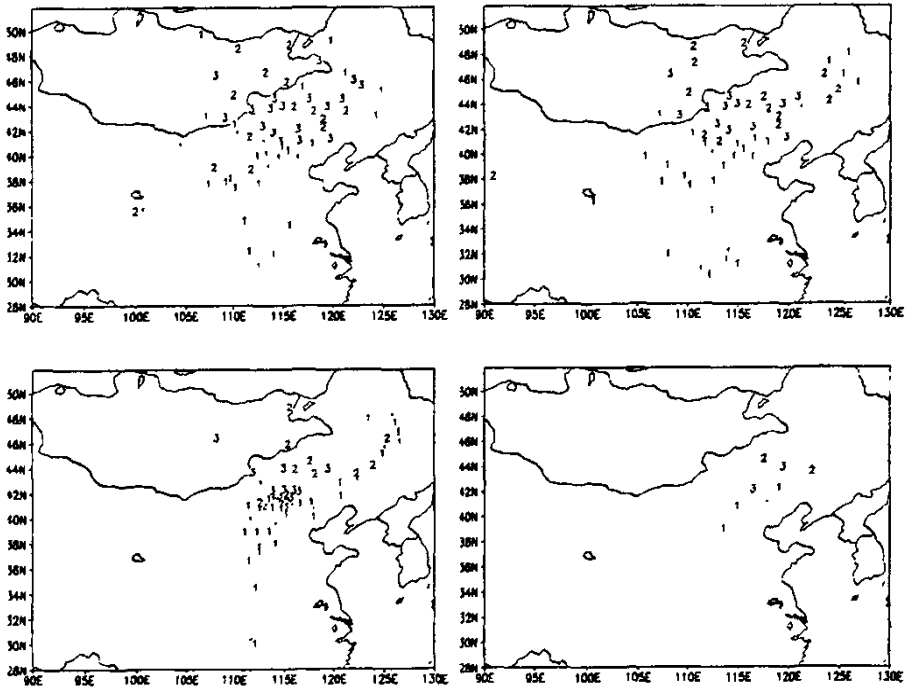


图 2.2.3 2002 年 3 月 20 日 06 时、09 时、12 时、15 时（世界时）沙尘天气现象  
（1 扬沙，2 沙尘暴，3 强沙尘暴）

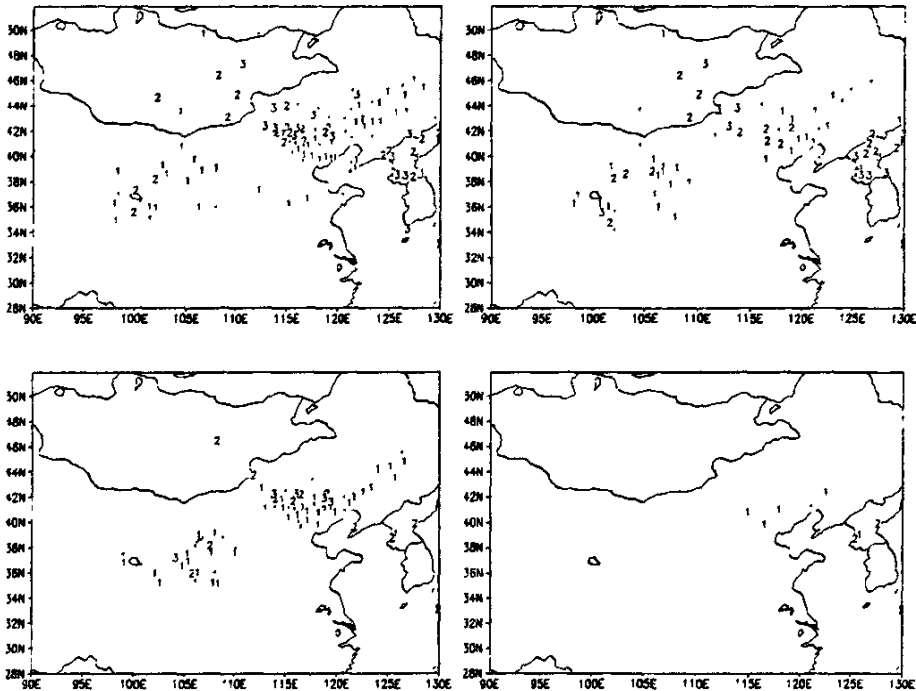


图 2.2.4 2002 年 3 月 21 日 06 时、09 时、12 时、15 时（世界时）沙尘天气现象  
（1 扬沙，2 沙尘暴，3 强沙尘暴）

### 2.1.2 气候背景分析

在 1999~2001 年连续少雨大旱之后，2002 年又发生了较大范围的干旱，2002 年 1 月，由于影响我国的冷空气势力较弱，全国大部地区气温明显偏高，月平均气温为近 40 年同期的最高值。2 月份，这种偏暖势头仍有增无减。全国有 20 个省市气温均创 1961 年以来历史同期最高记录，其偏暖范围之广，幅度之大为近 40 年来同期之最<sup>[18]</sup>。进入 3 月，北方地区气温明显偏高的势头仍然持续。

在气候异常偏暖的同时，我国北方大部地区降水明显偏少。2 月份北方大部地区月降水不足 10mm，其中东北西部、华北大部、西北中部及南疆几乎无降水<sup>[19]</sup>。3 月上中旬，北方大部地区的浅层土壤相对湿度仍低于 60%，内蒙古中东

部、东北地区中西部部分地区的干土层厚度达 5~25cm。这样,前期持续的高温少雨多风天气,加剧了土壤水份的散失,使得地表更为干燥,土质疏松,为这次强沙尘天气的爆发创造了有利条件,提供了丰富的物质源<sup>[20]</sup>。

### 2.1.3 环流形势分析

有研究<sup>[21]</sup>指出有利于我国北方形成沙尘暴天气的 500hpa 环流形势有如下特征:(1)极涡偏向东半球且强度偏强;(2)北支锋区径向度加大且东亚大槽偏强,东半球 500hpa 环流形式径向度明显加大,锋区强度也加强;(3)南支槽偏弱,南支槽偏弱使西南暖湿气流在向北输送过程中受到抑制。

通过分析 500hPa 环流形式,可以发现本次过程是非常有利于沙尘暴天气的出现:东亚地区为两槽一脊型,高空槽几乎呈南北走向,低压及槽上对应冷中心,脊区对应暖区,这种配置属于较稳定的形式。极锋锋区位置相对偏南,南支槽减弱。来自于西伯利亚的冷空气沿槽东移南下影响我国的西北地区。在气旋发展阶段,环流形式调整,高空槽分裂南下,在蒙古中东部形成低压中心,风速加大。20 日 20 时冷空气在蒙古国中东部地区填塞形成高空冷涡,来自于西伯利亚的冷空气不断进入冷涡中,促使冷涡发展。因为有冷空气不断补充,冷涡位于黑龙江稳定少动,沙尘天气得以长时间维持。21 日 18 时冷涡开始移出东北。

与 500hPa 对应的 700hPa 上有小槽发展成低涡。18 日 06 时可见巴湖以北为低压控制区,19 日 06 时高空槽上出现波动。19 日 12 时在蒙古国中东部有闭合环流出现,强度为 2800gpm,温度槽与高度槽交角近乎 90 度,斜压性较强,移动缓慢。20 日 12 时到 21 日 12 时,低压强度为 2600 gpm,其中心位置由 118° E 以东到 138° E,24 小时内向东移动 20 个经度,这一阶段对应的是地面气旋强盛阶段,也是沙尘天气肆虐时期。22 日 00 时开始,低涡减弱东移,在 22 日 06 时,沙尘暴天气过程结束阶段。

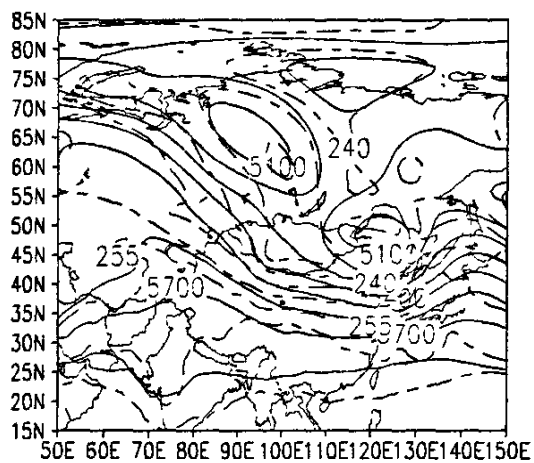
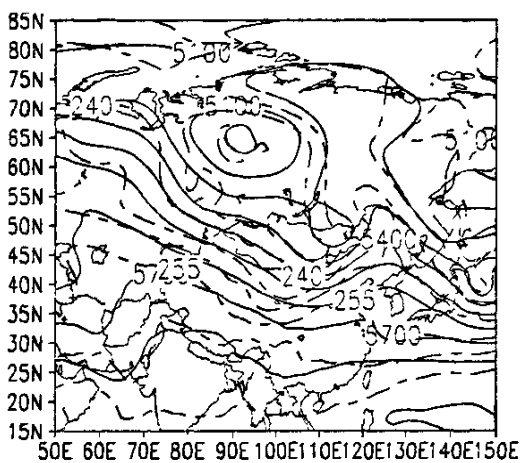
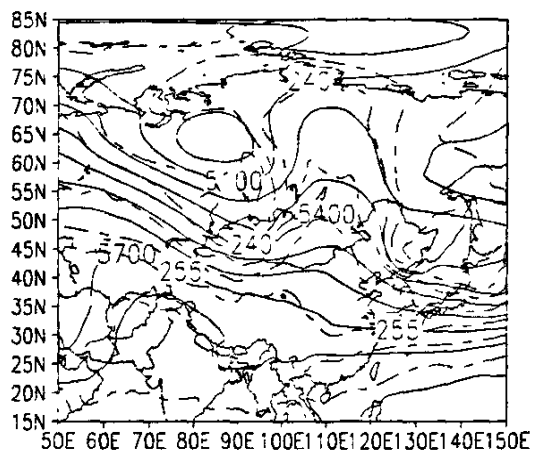
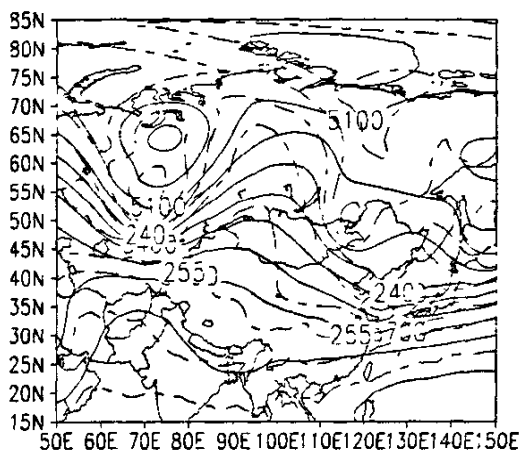
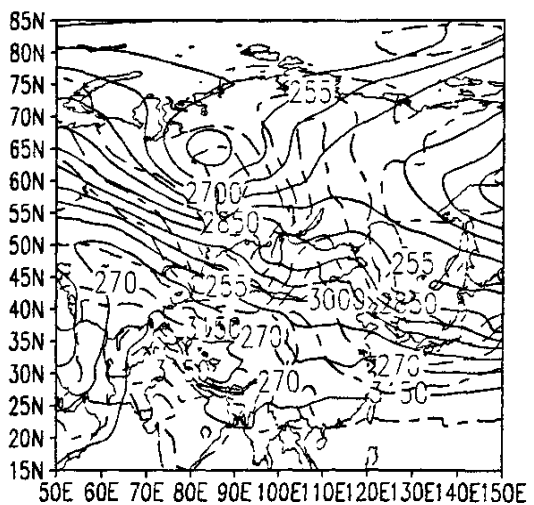
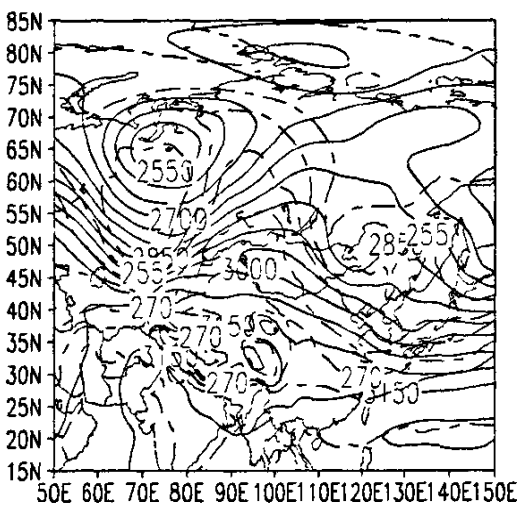


图 2.1.2 2002 年 3 月 18 日、19 日、20 日、21 日 00 时 (世界时) 500hPa 形势场





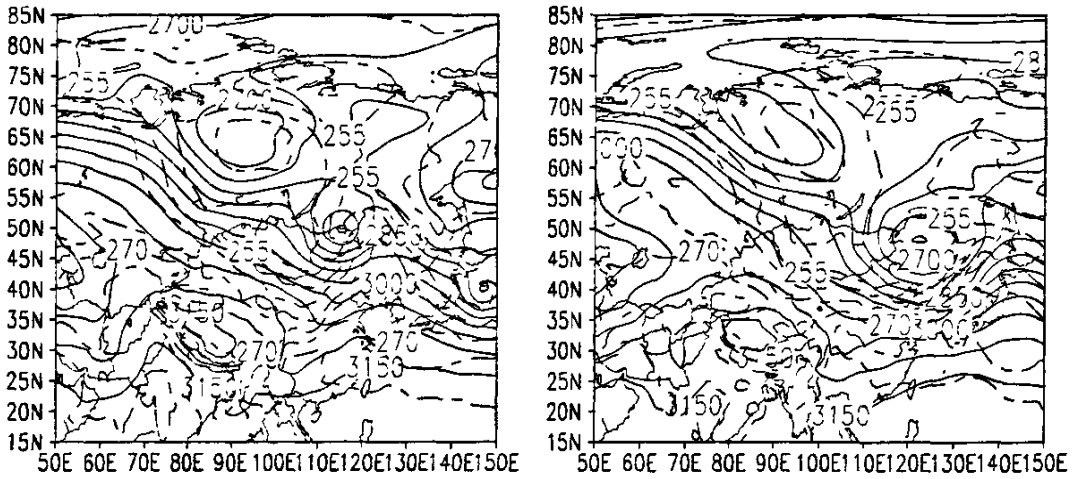


图 2.1.2 2002 年 3 月 18 日、19 日、20 日、21 日 00 时（世界时）700hPa 形势场

200hPa 上，我国表现为暖槽冷脊。18 日 06 时在  $60^{\circ}\text{N}$  以南地区，存在冷脊，因受冷脊的阻挡，位于  $80^{\circ}\text{E}$  暖槽缓慢东移，19 日 12 时在西伯利亚形成闭合环流，随着脊的减弱消失，低压有所加强，低压槽分裂南下，但高纬低压却稳定少动，与中低层不同，分裂出的低槽在 200hPa 上并未形成明显的闭合中心。从温度场分布特点来看，18 日 06 时温度场呈东西冷南北暖型，暖中心位于  $80^{\circ}\text{E}$ ，即槽区附近，脊所在区域为冷中心，冷暖中心的移动趋势是：南北暖中心东移合并并促使东部的冷中心南压，而西部的冷中心东移并处在暖中心底部，这样在 20 日 06 时，低压所在区域是暖中心 ( $-41^{\circ}\text{C}$ )，暖中心的南侧是冷中心 ( $-57^{\circ}\text{C}$ )，暖中心的活动趋势与低压是比较一致的。

从各层高度场可清楚地看到，在地面气旋发生发展过程中，各层低值中心的位置随高度向西北倾斜，说明斜压性很强，而且这种斜压性在我国沙尘天气过程中一直存在。

我们给出 19 日 06 时到 21 日 06 时每隔 6 小时的海平面气旋的位置及强度，它可以看出气旋的大概位置。

时间	中心位置		中心强度 (mb)
	经度	纬度	
19日06时	110° E	47° N	1000
19日12时	112° E	48° N	995
19日18时	115° E	49° N	990
20日00时	117° E	50° N	990
20日06时	118° E	50° N	990
20日12时	118° E	50° N	990
20日18时	118° E	49° N	990
21日00时	122° E	48° N	990
21日06时	137° E	45° N	980

## 2.2 大尺度物理量诊断分析

### 2.2.1 层结分析

相当位温  $\theta_e$  同时包含了温度和湿度的信息，可以说明冷暖空气的活动情况和锋生的性质，从  $\theta_e$  的分布情况来看，中纬地区存在位温线密集带，这是锋区所在的位置， $\theta_e$  东移可以看出冷峰的活动趋势（图 2.2.1）。18 日 00 时冷锋压至新疆西北部，冷锋先于气旋存在；我国北方大范围地区处于暖舌控制下。西北地区从地面到对流层中层异常增暖，整层增暖为地面热低压发展和沙尘暴的生成提供了热能。

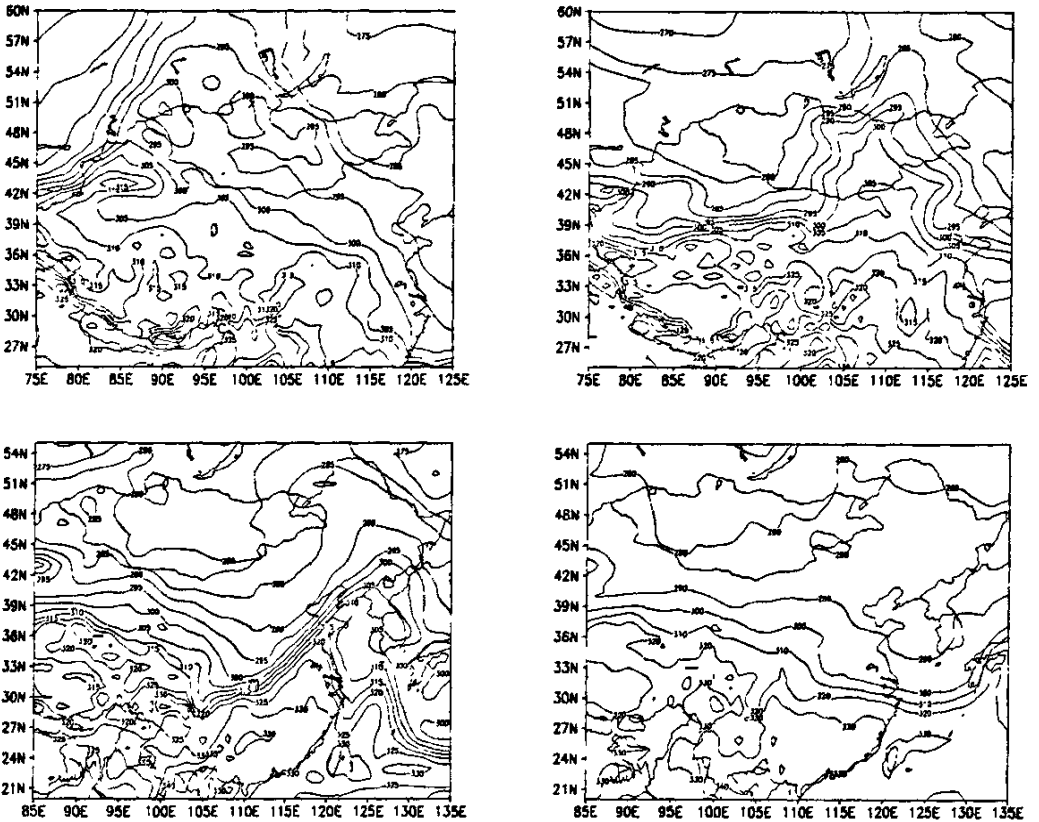


图 2.2.1 2002 年 3 月 18 日、19 日、20 日、21 日 06 时 (世界时)850hPa 相当位温

将  $\Delta \theta_{e} = \theta_{e850} - \theta_{e500}$  作为大气稳定性的判据, 发现整个过程中  $\Delta \theta_{e} < 0$  的区域主要在冷锋前部的暖区内有, 而沙尘暴主要发生在锋后大风区, 锋后为大气层结稳定区 and 中性区, 整体来看, 整个沙尘天气过程中没有出现强烈的不稳定区。

### 2.2.2 温度平流分析

由图 2.3.1-3, 可看出地面气旋中心主要位于冷暖平流交接处, 在东移过程中, 低层的冷平流逐渐减弱, 而高层暖平流逐渐向下扩散, 形成对流层高层和底层两个中心 (图 2.3.2), 与此同时低压槽上的冷暖平流都在加强, 冷平流一方面是使高空槽东移, 另一方面与暖平流共同作用促进气旋发展。在 500hPa 上, 低压槽上为冷平流 (图 2.3.4); 随着低压槽东移发展, 在蒙古国

上空分裂形成蒙古气旋，此气旋的槽区上有强冷暖平流（图 2.3.6）。这说明气旋区有冷暖空气交汇，斜压性强易引起不稳定能量的释放，引发地面大风。

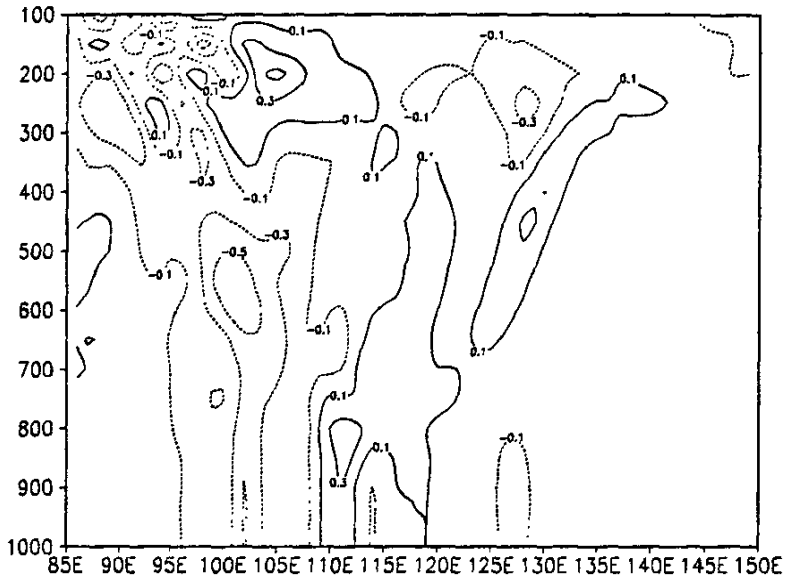


图 2.3.1 2002 年 3 月 19 日 06 时沿地面气旋中心纬度  $47^{\circ}$  N 的温度平流垂直剖面图

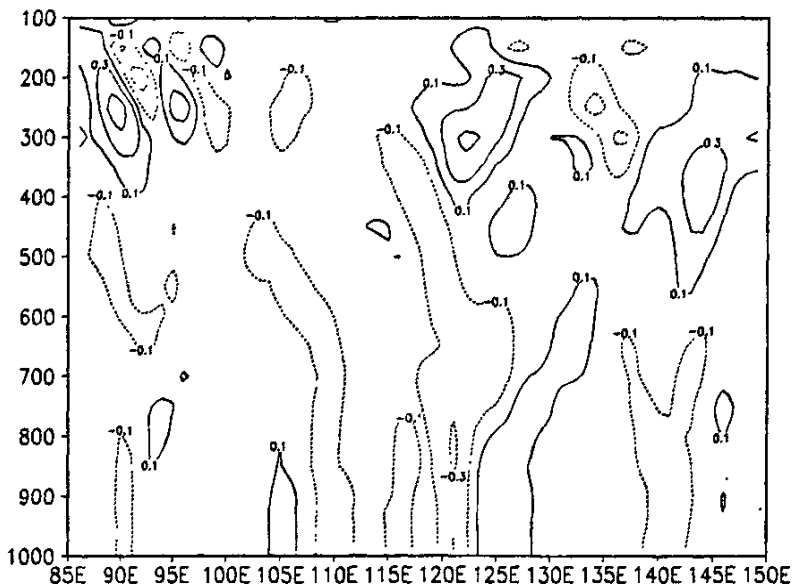


图 2.3.2 2002 年 3 月 20 日 06 时沿地面气旋中心纬度  $50^{\circ}$  N 的温度平流垂直剖面图

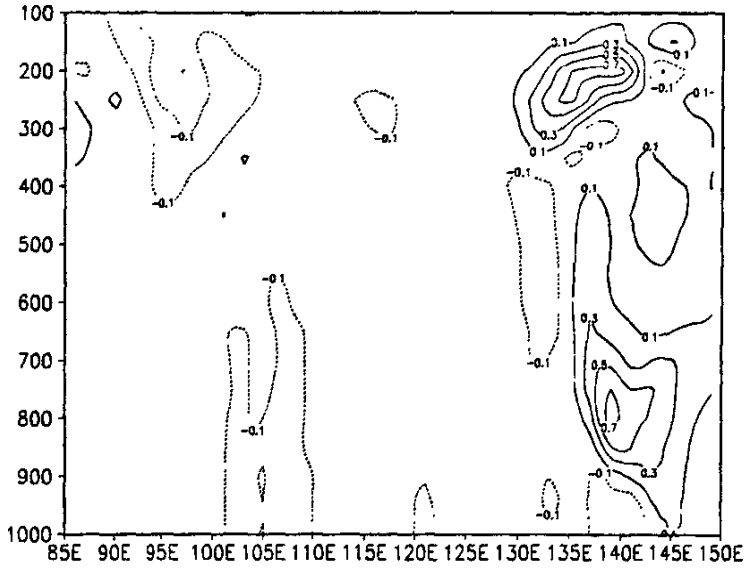


图 2.3.3 2002 年 3 月 21 日 06 时沿地面气旋中心纬度  $45^{\circ}$  N 的温度平流垂直剖面图

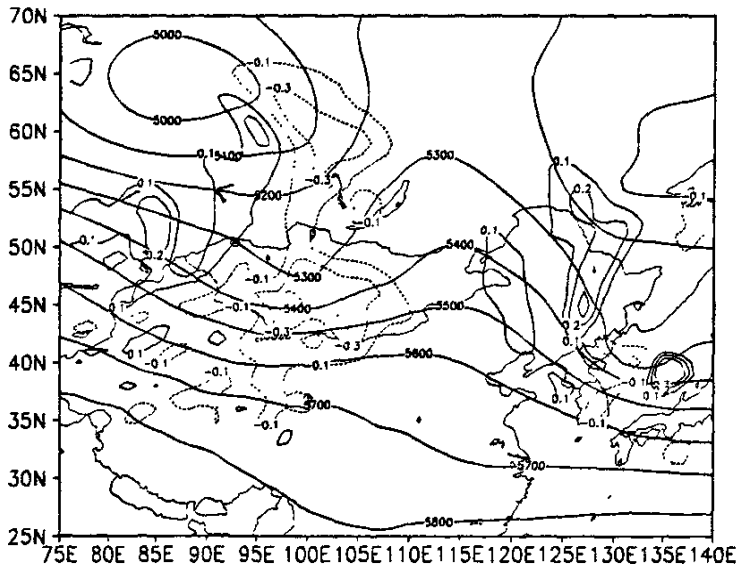


图 2.3.4 2002 年 19 日 06 时 (世界时) 500hPa 高度场和温度平流

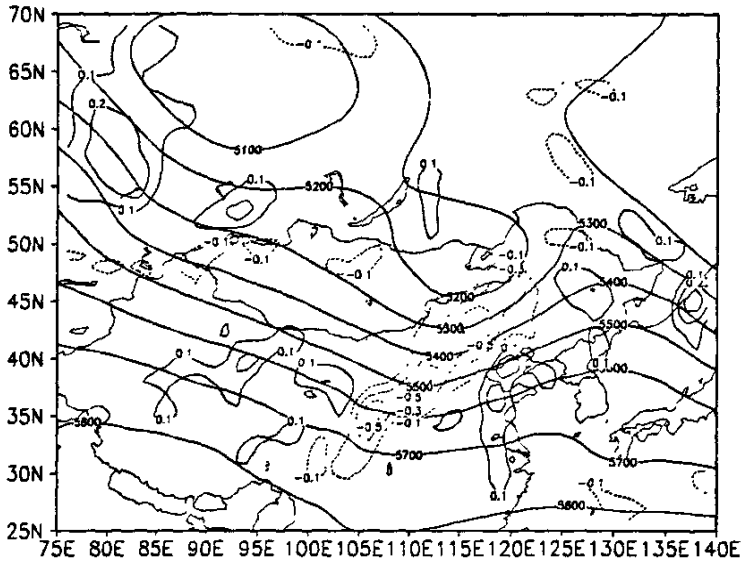


图 2.3.5 2002 年 20 日 06 时 (世界时) 500hPa 高度场和温度平流

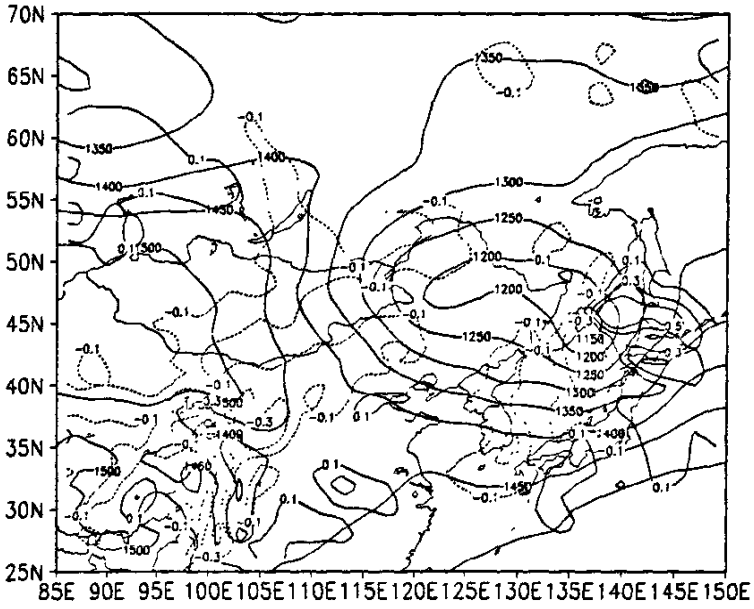


图 2.3.6 2002 年 21 日 06 时 (世界时) 500hPa 高度场和温度平流

## 第三章 MM5 模式方案及模拟结果分析

### 3.1 MM5 模式方案

本文运用美国宾洲大学和美国国家大气研究中心(PUS/NCAR)联合研制的非静力中尺度数值模式 MM5V3 对本次过程进行模拟。模式投影方式选取兰勃托投影,采用两重嵌套,中心为  $110^{\circ}$  E,  $41^{\circ}$  N,粗网格距为 60km,格点数是  $85 \times 75$ ;细网格距为 20km,格点数是  $121 \times 121$ ,内外两层的地形参数资料分别采用 30'、10' 地形及 landuse,垂直方向为不等距的 23 层。使用美国大气中心的 NCEP 再分析格点资料 (1.0X1.0)内插到粗网格区域作为初估场,形成模式的初始场及粗网格区域的侧边界条件,而细网格区域的侧边界值由同步的粗网格区域的预报值提供。模式起报时间为 2002 年 3 月 19 日 06 时(世界时,下同),积分时间 48 小时,模式顶气压 100hPa,积分步长 150s,每 3h 输出一次模拟结果。动力学过程采用流体非静力平衡方案,数值模式的物理过程选用 Athes Kuo 积云对流参数化方案,高分辨率的 MRF 边界层参数化方案,混合相 (Mixed-Phase) 的显式水汽方案,辐射过程采用 RRTM 长波方案和云辐射方案,地表温度方案为 5 层土壤模式,粗网格的侧边界条件采用松弛/流入-流出,细网格为时间依赖。

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 沙尘暴地面风场和高空形势场数值模拟

模式积分 24 小时、48 小时的输出量对应实况的时间为 3 月 20 日 06 时、21 日 06 时,包括了此次沙尘暴的发展期、强盛期。通过对图 3.2.1(a, b, c, d)、3.2.2 (a, b, c, d)、3.2.3 (a, b, c, d)的对比分析发现,模式在模拟地面风场方面对风速大于  $16\text{m/s}$  的风速模拟结果稍差,模拟结果比实际风速偏小,大于  $16\text{m/s}$  的风速区比实际范围偏小,但能准确地模拟出  $16\text{m/s}$  的风速区以下的风速区,积分 48 小时结果略差于积分 24 小时的输出结果。

对于高空形势场的模拟，认为无论从槽区位置、温度槽的强弱来看，都可以认为此次模拟是成功的，模拟结果可用来做以后的诊断分析。

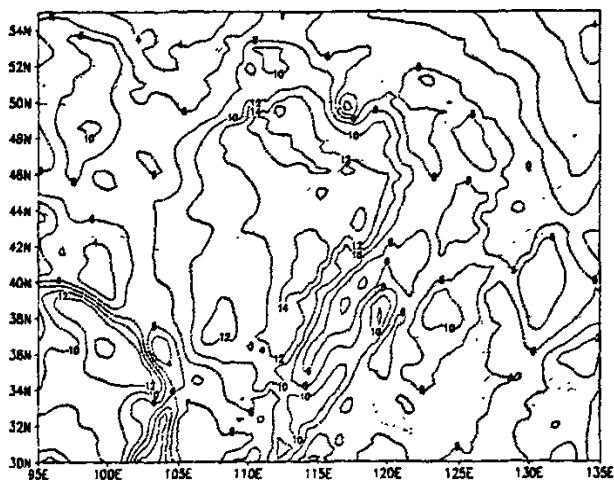


图 3.2.1a 模式积分 24 小时 (2002 年 3 月 20 日 06 时) 距地面  
10 米全风速图(单位: m/s)

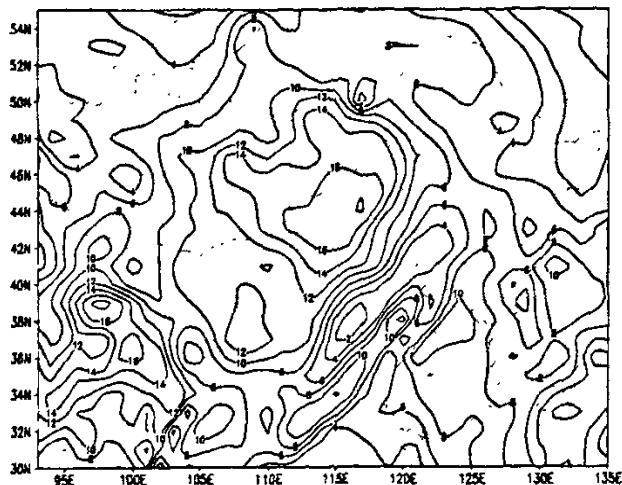


图 3.2.1b 2002 年 3 月 20 日 06 时距地面 10 米全风速图(单位: m/s)



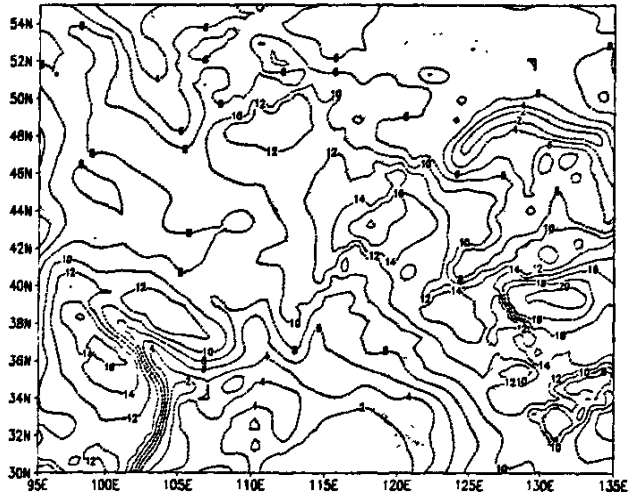


图 3.2.1c 模式积分 48 小时 (2002 年 3 月 21 日 06 时)  
距地面 10 米全风速图 (单位: m/s)

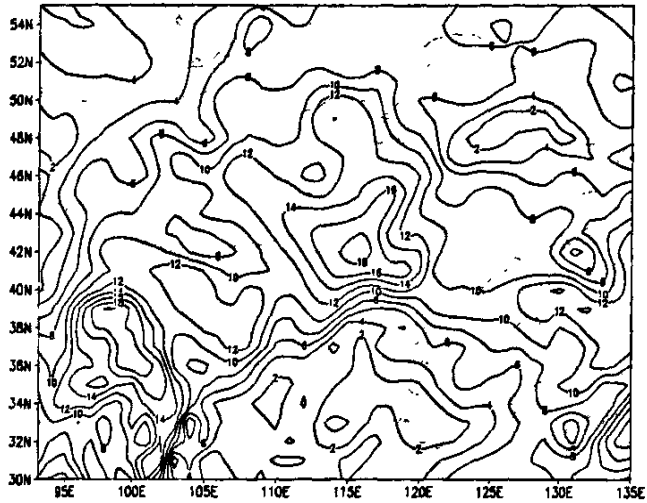


图 3.2.1d 2002 年 3 月 21 日 06 时距地面 10 米全风速图(单位: m/s)

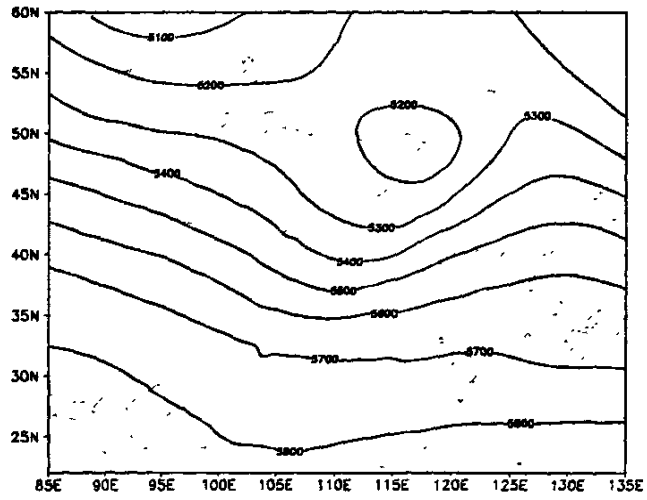


图 3.2.2a 模式积分 24 小时 (2002 年 3 月 20 日 06 时) 500hPa 高度场 (单位: gpm)

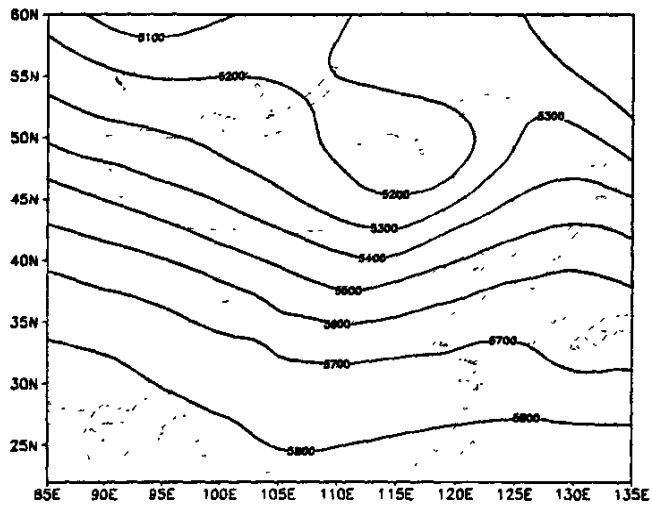


图 3.2.2b 2002 年 3 月 20 日 06 时 500hPa 高度场 (单位: gpm)

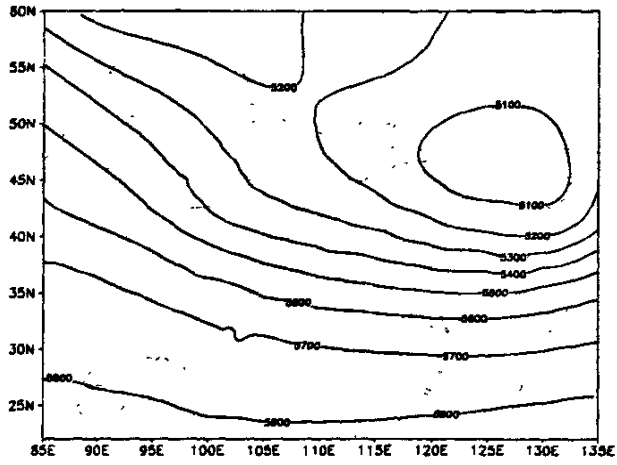


图 3.2.2c 模式积分 48 小时 (2002 年 3 月 21 日 06 时) 500hPa 高度场 (单位: gpm)

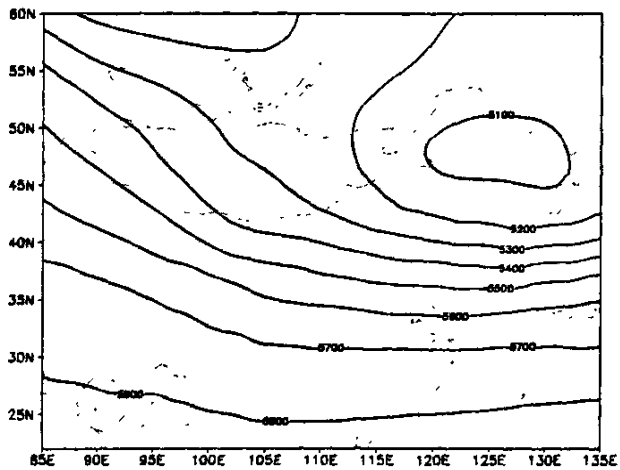


图 3.2.2d 2002 年 3 月 21 日 06 时 500hPa 高度场 (单位: gpm)

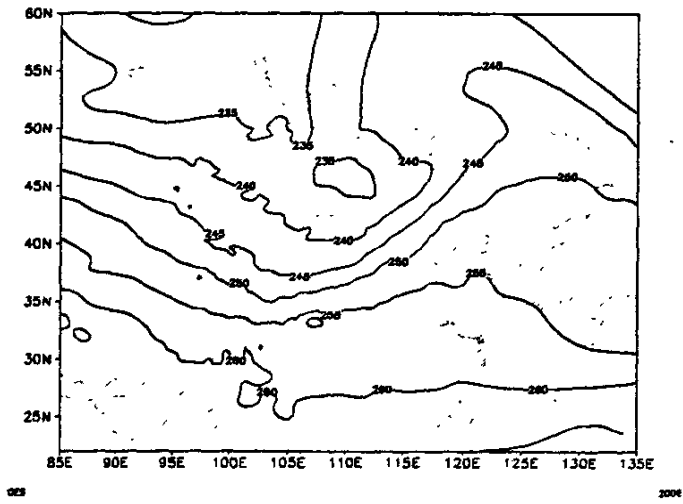


图 3.2.3a 模式积分 24 小时 (2002 年 3 月 20 日 06 时) 500hPa 温度场 (单位: K)

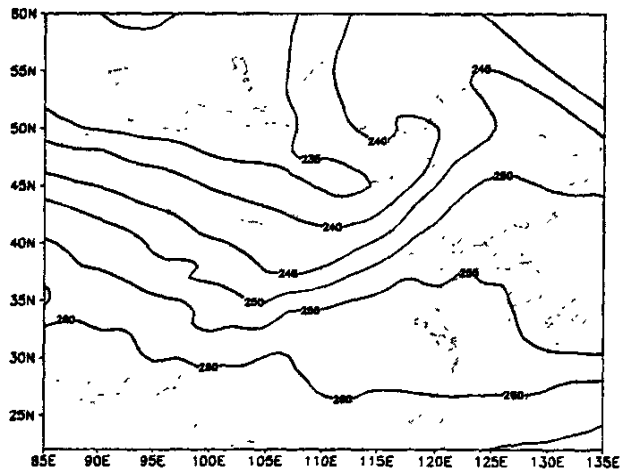


图 3.2.3b 2002 年 3 月 20 日 06 时 500hPa 温度场 (单位: K)

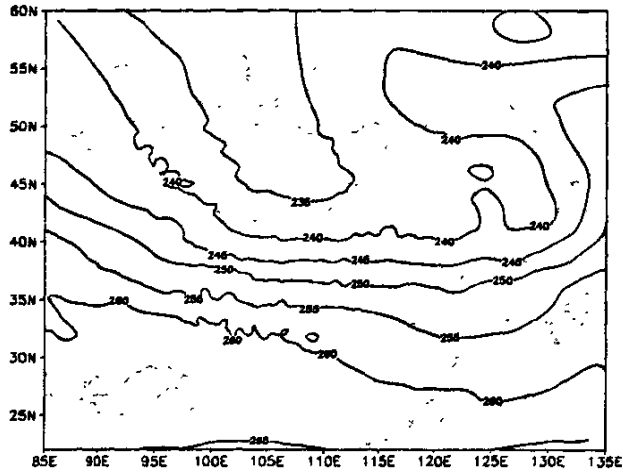


图 3.2.3c 模式积分 48 小时 (2002 年 3 月 21 日 06 时) 500hPa 温度场 (单位: K)

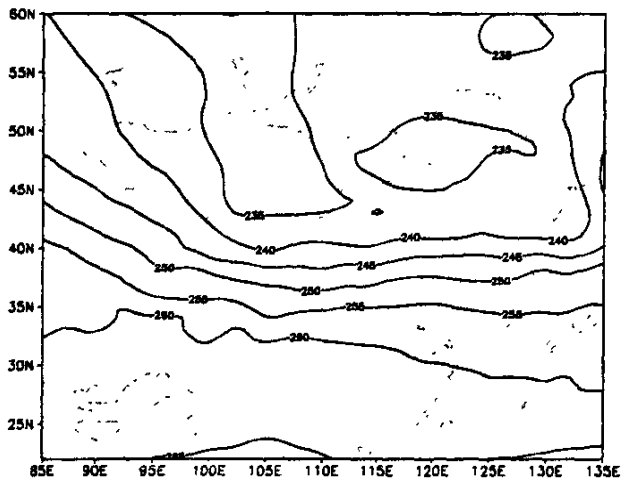


图 3.2.3d 2002 年 3 月 21 日 06 时 500hPa 温度场 (单位: K)

### 3.3 中尺度特征分析

采用滤波方法对模式结果进行了尺度分离, 分析了沙尘暴发生时的中尺度特征及成因。结果表明沙尘暴的中尺度特征在时间尺度、空间尺度、高低空流场和散度场上都很明显。正是维持少动的蒙古气旋和嵌入其上的这些中尺度系统相互作用造成了沙尘暴的发生。

#### 3.2.1、中尺度分离方法简介

分析大气环流相互作用的多尺度特征常常需要对大气环流进行尺度分离，本文的中尺度分离方法是采用以 Barnes 空间滤波方法为基础的 Maddox 方案<sup>[21]</sup>，方案中权重系数分别取为： $C_1=5000$ ， $G_1=0.3$ ， $C_2=40000$ ， $G_2=0.4$ ， $r=1.25$ ， $\lambda_{max}=500\text{km}$ ，滤波器的响应曲线见图 3.2.1。

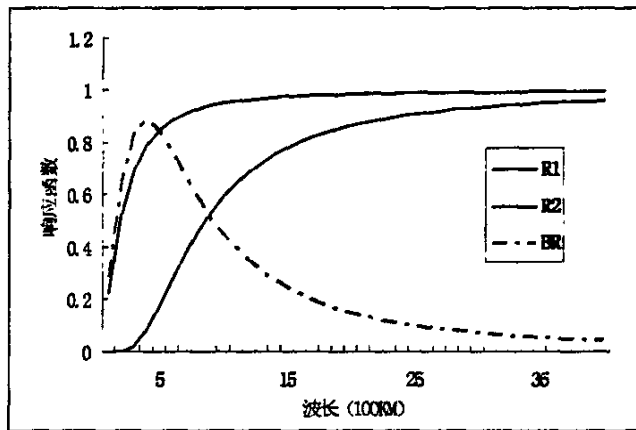


图 3.2.1 尺度分离滤波器的响应函数曲线(R1 和 R2 是用来决定带通滤波器的低通滤波，其响应函数为 BR)

在直接对天气形势进行分析时，看不清楚沙尘暴系统的中尺度特征或结构，但经过滤波以后我们发现，沙尘暴发生时无论在高空还是低空都有明显的中尺度特征。分离出的高低空中尺度流场与沙尘暴中心又非常好的对应关系（图 3.2.2），这表明沙尘暴的发生发展是蒙古气旋和嵌入其上的一些中小尺度系统相互作用的结果。

从图 3.2.2 可以看出，850hPa 上在 A 辐合区附近对应地面有强沙尘暴，在高空 200hPa 流场上（图 3.2.3），A 区处在辐散区，这种低层辐合，高层辐散的结构非常有利于系统的发展。这种正在发展的低压之间形成了很强的气压梯度，使得局地风力加大，为强沙尘暴的发生提供条件。

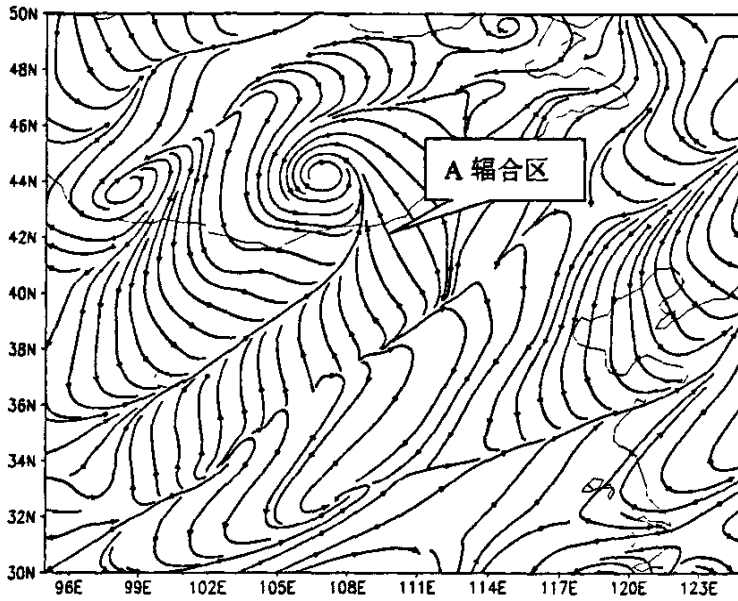


图 3.2.2、2003 年 3 月 20 日 12 时（世界时）850hpa 流场

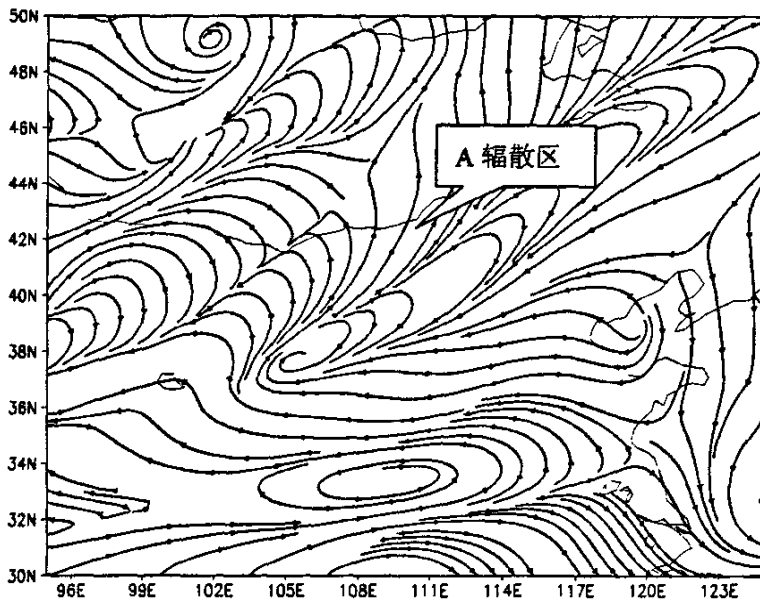


图 3.2.3、2003 年 3 月 20 日 12 时（世界时）200hpa 流场

### 3.4 螺旋度的诊断分析

螺旋度是强对流天气分析预报中的一个重要的物理量，螺旋度严格地定义为风速与涡度点积的体积分，螺旋度的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的

强弱程度,其单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,气压坐标系下的局地螺旋度可表示为

$$H = \iiint \boldsymbol{\omega} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) d\tau$$

$$= \left[ \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right] u + \left[ \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] v + \left[ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \omega, \quad (1)$$

(1) 上式右端 3 项分别是  $i, j, k$  方向的涡度和风速分量之积,文献<sup>[22,23]</sup>研究指出,  $k$  螺旋度较之  $i$  螺旋度和  $j$  螺旋度有更为清楚和重要的意义。本文仅讨论  $k$  螺旋度(垂直螺旋度),符合右手定则的螺旋度取正值,重新定义局地垂直螺旋度为

$$H_k = \left[ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \omega = -\xi \omega, \quad (2)$$

本文采用局地垂直螺旋度进行分析。通过对整个沙尘暴过程局地垂直螺旋度的分析,发现模式积分 24h(此时沙尘暴强度较强、范围较广),发生沙尘暴的区域上空有正的螺旋度(图 3.4.1),其大值区 A 区( $100 \times 10^{-7} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ )对应地面有强沙尘暴发生, B 区对应地面有降水(小雨),沿  $42^\circ \text{N}$  的剖面图(图 3.4.2)分析发现:在沙尘暴发生区域( $116 \sim 118^\circ \text{E}$  附近),中低层为正的螺旋度,高层为负值,同时的涡度剖面图(图 3.4.3)上以  $118^\circ \text{E}$  为界,左右两侧 500 hPa 高度以上分别有一正一负的两个涡度中心,对应的垂直速度剖面图上 500 hPa 以下该经度左右两侧对应应有上升运动和下沉运动区(图 3.4.4),在地面冷锋西侧的高空正涡度是下传发展且沿冷锋前气流方向东移的,而地面冷锋东侧由于上升运动,气流的负涡度性是减弱的。这种作用不仅有利于冷锋的加强,而且十分有利于冷锋前次级环流的发展。



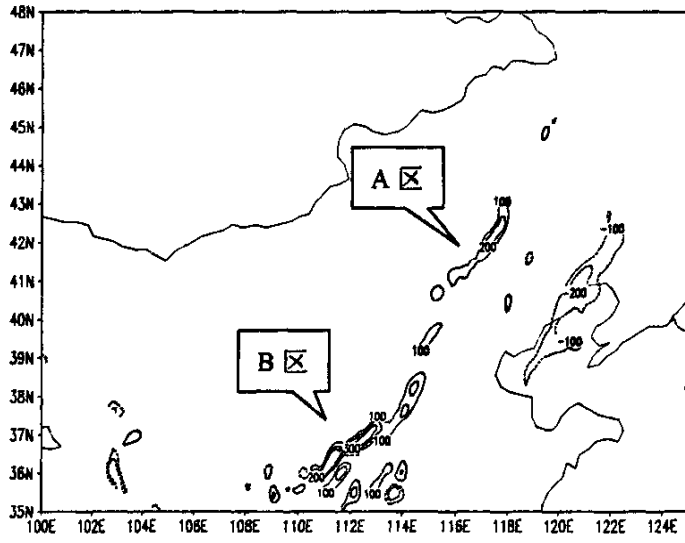


图 3.4.1 2002 年 3 月 20 日 06 时 (世界时) 700hpa 螺旋度 (单位:  $10^{-7}\text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ )

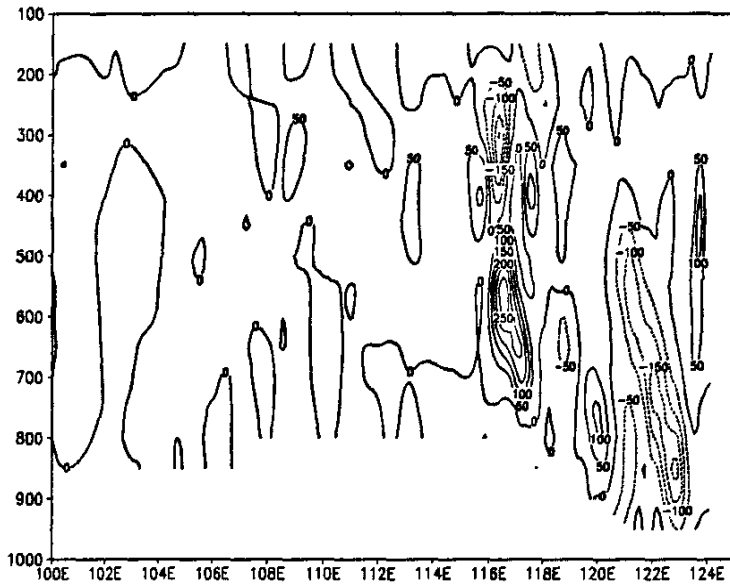


图 3.4.2 2002 年 3 月 20 日 06 时 (世界时) 沿纬度  $42^{\circ}\text{N}$  的  
螺旋度垂直剖面图 (单位:  $10^{-7}\text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ )

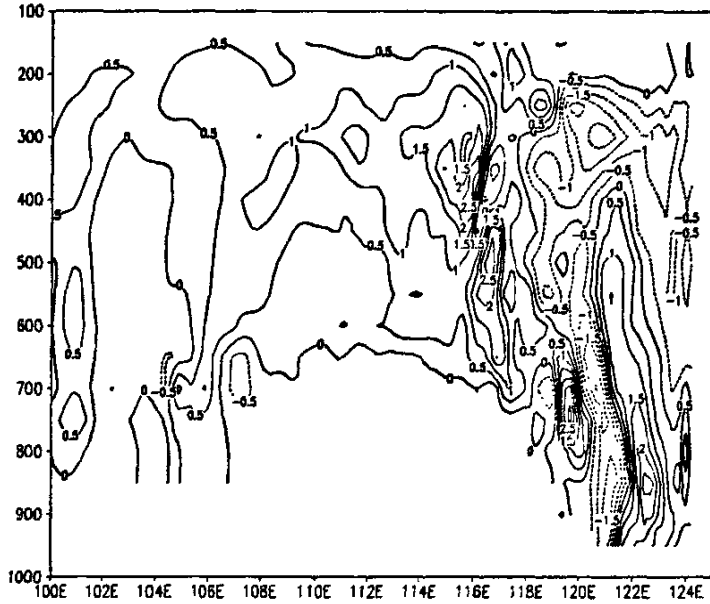


图 3.4.3 2002 年 3 月 20 日 06 时 (世界时) 沿纬度 42° N 的  
涡度剖面图 (单位:  $10^{-4}s^{-1}$ )

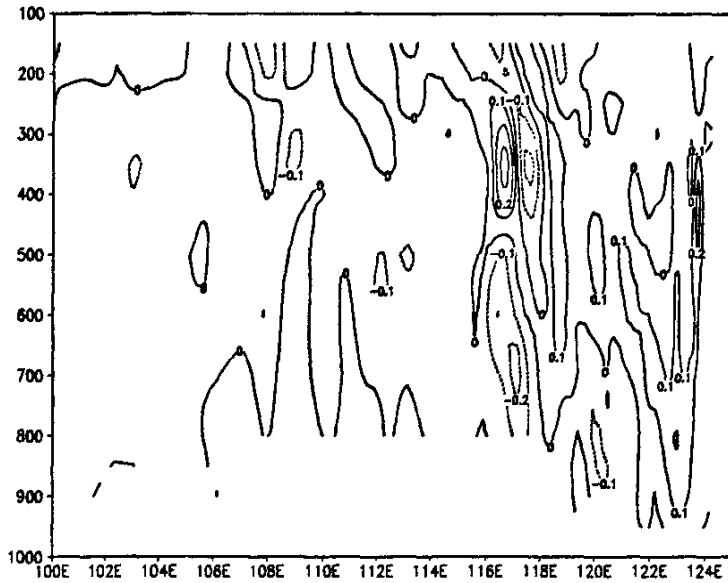


图 3.4.3 2002 年 3 月 20 日 06 时 (世界时) 沿纬度 42° N 的  
垂直速度剖面图 (单位: m/s)

以上分析表明, 沙尘暴发生区上空螺旋度的垂直分布特点是在对流层中下层为正值区, 对流层上层为负值区, 这种垂直结构十分有利于对流系统的发展。

与 B 区的降雨相比较，沙尘暴是一种干的对流天气现象。以朱日和为例，由图 3.4.2 可看出，在沙尘暴初期垂直螺旋度积分由负值变为正值，爆发期变幅明显增大，在强盛期，垂直螺旋度积分为高值区，之后降低，沙尘暴开始减弱。可见螺旋度的变化和沙尘暴的发展阶段有着很好的对应关系。

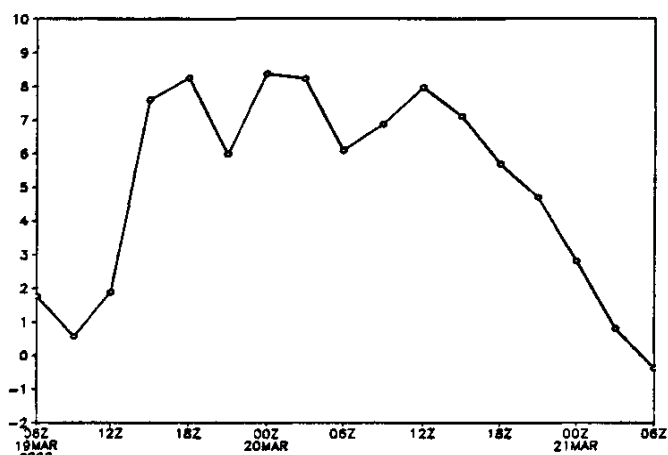


图 3.4.2 朱日和 垂直积分螺旋度随时间变化图 (2002 年 3 月 19 日 06 时至 21 日 06 时, 单位:  $10^{-7}\text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ )

### 3.5 高空急流分析

这次蒙古气旋引发的沙尘暴过程中伴有高空急流的活动，分析 300hPa 等压面上全风速，气旋发生发展过程中对流层高层风速迅速增大，伴随急流中心降低，强度增大。气旋初生时，300hPa 高空的急流核迅速向东发展，气旋位于急流核的前方。气旋强盛期急流核分裂为两个，一个在气旋的南部（我国内蒙古中东部），中心风速较大，并且此急流核中心与气旋中心几乎在同一经度（如图 3.5.2），另一个位于我国新疆和内蒙西部，风速小于前者。随后这两个急流核在发展过程中合并为一体，并且与中低纬南支急流贯通。

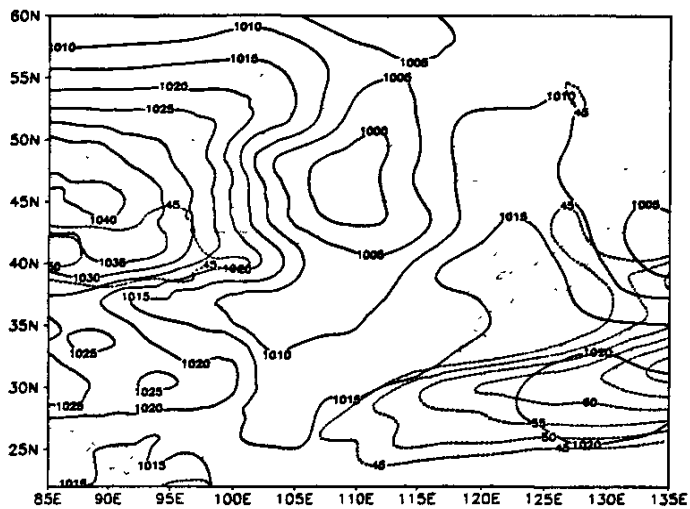


图 3.5.1、2002 年 3 月 19 日 14 时 300hpa 高空急流（虚线，m/s）  
与海平面气压（实线，hPa）

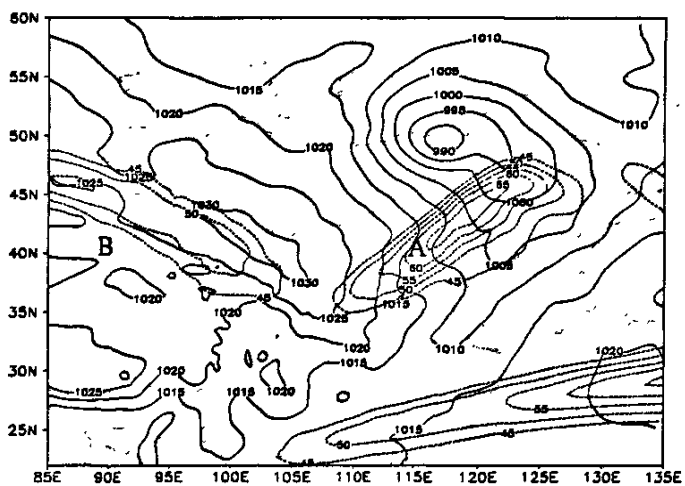


图 3.5.2、2002 年 3 月 20 日 14 时 300hpa 高空急流（虚线，m/s）  
与海平面气压（实线，hPa）

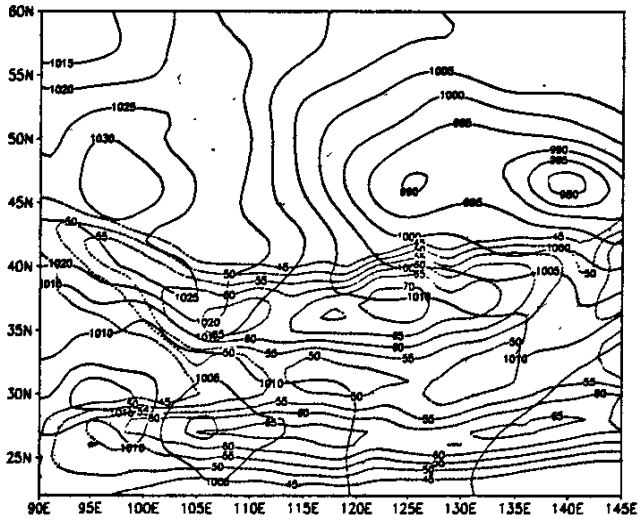


图 3.5.3、2002 年 3 月 21 日 14 时 300hpa 高空急流（虚线，m/s）  
与海平面气压（实线，hPa）

研究表明<sup>[24]</sup>：在急流出口区将发生质量调整，在出口减速区有指向其右侧的非地转分量，它引起质量的向南输送，出口区非地转风所引起的质量调整使其右下方减压，有利于低压的发展。19 日 14 时气旋与急流核中心还相差大约 20 多个经度，到 20 时分裂东移的急流核 A 部与气旋相差近 5 个经度，有研究表明<sup>[25]</sup>：当气旋中心位于急流核出口区前方适当距离时（5~15 个经距），气旋处于加深阶段。在高空急流出口区左侧的气旋性涡度非常有利于低层减压，促使气旋发展。由于急流核向东南方向移动，所以气旋中心一直位于高空急流核以北。从 700hpa 和 300hpa 水平风速的合成图（图 3.5.4）可以清楚地看出在急流 A 的入口处和出口处，出现低空风速的大值区。

图 3.5.5 是全风速的纬向剖面图，在气旋的发展阶段高空有急流存在，急流核位于 200hPa 与 300hPa 之间，中心值为 50m/s，低空风速较小；图 3.5.6 是 20 日 20 时气旋发展强烈阶段，最大值出现在 350hPa，高达 60m/s 以上，对流层中下层风速增大，近地面有风速大于 15m/s，此时地面已经有强沙尘暴天气现象出现。

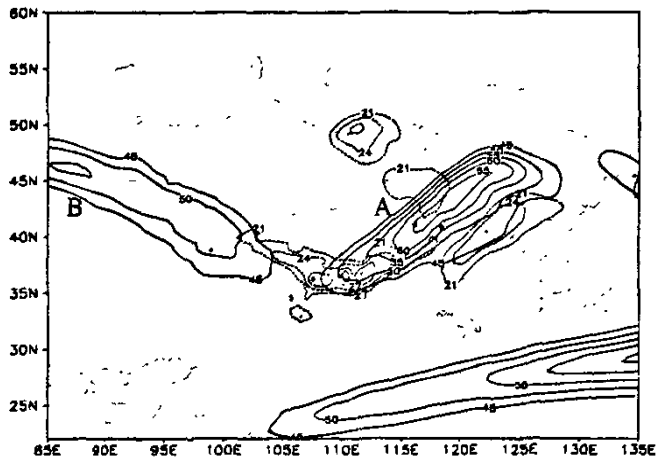


图 3.5.4 2002 年 3 月 20 日 06 时 (世界时) 300hpa、700hpa 全风速图 (单位: m/s)

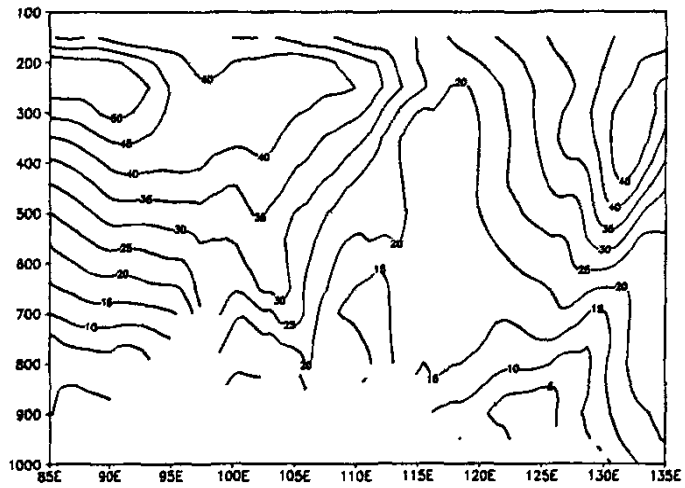


图 3.5.5、2002 年 3 月 19 日 20 时 40N 全风速图 (单位: m/s)

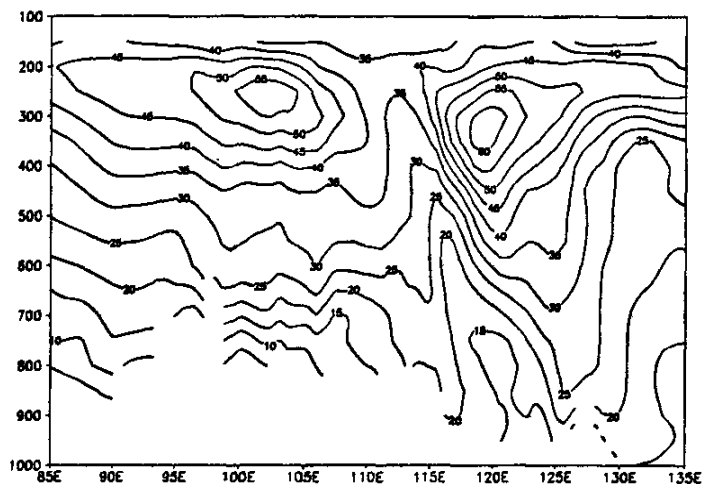


图 3.5.6、2002 年 3 月 20 日 20 时 40° N 全风速图 (单位: m/s)

在本次蒙古气旋冷峰引发的强沙尘暴过程中,高空急流的作用是不可忽视的。气旋发生时,高空急流起主要作用,在急流出口区左侧减压,促进气旋和底层大风区的形成;此外高空急流有一个振荡合并的过程,北支极锋急流和副热带西南风急流合并贯通,处在气旋底部,急流的这种振荡合并促使对流层中下层锋区加强,导致大气不稳定和高空冷涡的发展。我国沙尘天气的减弱主要是因为影响系统东移出国。

2003 年 3 月 17 日——22 日沙尘天气高空急流特点:南支急流强盛位置稳定少动,急流轴位于 30N 附近,中心最大风速超过 70m/s;北支极锋急流自西向东移动,强度渐强,急流轴位于我国北方上空,呈东西走向,强盛期中心最大风速在 65m/s 以上。气旋在急流出口区左侧发展,在急流中心迅速向东发展的同时,蒙古气旋发展加深,缓慢东移,强盛期急流中心与气旋中心经度一致,且位于气旋南部。

## 第四章 结论

这次大风沙尘暴是大、中、小三种不同尺度的天气系统相互作用的结果，大尺度天气系统表现为高空强西风带上的低槽东移引起西西伯利亚强冷空气迅速南下，东移形成大风；中尺度天气系统表现为地面急行冷锋使冷平流加强，在地面上产生了中尺度涡旋，由于冷锋前的中尺度低压和锋后的冷高压的存在，产生了次级环流，增强了垂直运动；小尺度天气系统表现为冷锋前后近地面的小尺度湍流，特别是沙尘天气暴爆发时，对流层底层至地面正是这些极不规则的且旋转卷夹的垂直上升运动，把所经过的地面的尘土卷搅起来。整个过程中大尺度的天气系统制约着中小尺度天气系统的发生发展，而中小尺度系统的发生、发展有对大尺度天气系统的发展、加强起着反馈作用。

### 4.1 “3.18—22”沙尘暴形成的物理机制

一、蒙古气旋是这次沙尘暴天气的主要影响系统，这次气旋发展发生在斜压区，气旋的发展阶段以温度平流的作用为主，斜压性的作用不可忽视。沙尘暴过程主要是由气旋冷锋及锋后地面大风触发的，地面大风的形成与气旋发展、锋后冷平流以及高空急流动量下传有关。

二、通过中尺度特征分析，发现这次过程中伴随着中小尺度系统的发生发展，表明中小尺度系统对强沙尘暴的加强和发展有很重要的作用。

三、高空急流对沙尘暴发生区有很好的指示作用，强沙尘暴发生在300hPa高空急流入口区的右侧、次级环流的上升运动区内。

四、本文将螺旋度引入到沙尘暴的研究当中，发现沙尘暴具有对流天气的一些典型特征，局地垂直螺旋度对沙尘暴强度的预报具有一定参考价值。



## 4.2 本文创新点

(1) 本文将螺旋度引入到沙尘暴的研究当中，并与此过程受同一系统影响，同时间不同区域的降雨相比较，沙尘暴是一种干的对流天气现象，因此具有对流天气的一些典型特征，表明局地垂直螺旋度对沙尘暴强度的预报具有一定参考价值。

(2) 在研究中引用带通滤波的分析方法，分析引起、促进沙尘暴发展的中小尺度系统。表明中小尺度系统对强沙尘暴的加强和发展有很重要的作用。

## 4.3 存在问题和研究展望

沙尘暴已跨越国界，成为国际性的环境问题。本文重点研究了发生在我国北方地区的一次典型沙尘暴天气过程，但还不足以比较全面的说明问题。因为造成我国北方地区强沙尘暴的天气系统存在很大不同，必然会导致沙尘暴内部结构上的差异。沙尘暴内部结构究竟存在多大程度差异，对沙尘暴预警预报具有重要意义。

## 致 谢

本文是在导师沈桐立教授的指导下完成的，首先我要感谢导师的悉心指导和严格要求。导师渊博的学识，朴实的工作作风，严谨的治学态度，宽厚的待人方式，给我留下了深刻的印象，将使我终生受益。由于我是在职研究生，相比而言，在校的时间较短，每一次的见面聆听教授的讲解尤显珍贵，受益匪浅，我的硕士论文的完成离不开教授的关心鼓励、耐心指导。

感谢同学王龙学、崔粉娥、班君梅等在学习和生活上的无私关心、帮助，为我收集资料，创造了上机的条件。使我体会到了同学情谊的珍贵。

感谢智海、何如意、李宁等师兄弟（妹）的真诚相助，热心关怀。

感谢气象系和研究生部的所有老师。

再一次衷心感谢所有帮助和关心我的人们，正是在他们的长期关心和无私的帮助使我完成了研究生学业。

孙 燕

2006年12月29日

## 参考文献

- [1] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13 (2) : 193-200
- [2] 高庆先, 任阵海编著. 沙尘暴——自然对人类的报复. 北京: 化学工业出版社. 2002, 5:1-178
- [3] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 李希良, 金炯. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠 2000, 20(4):351-357
- [4] 王式功, 杨德保, 金炯等. 我国西北地区黑风暴的成因和对策[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1):19-30.
- [5] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象, 2004, 23(4):540-547 .
- [6] 全林生, 时少英, 朱亚芬等. 中国沙尘天气变化的时空分布特征及其气候原因[J], 地理学报, 2001, 56 (4) :477-485
- [7] Schutz L. Saharan dusttransportin the NE-trade wind region overthe North Atlantic Ocean. Proc SymRadi atom, 1977, 1:68—70
- [8] Westphal, Toon O B, Carlson T N. A two-dimension numerical investigation of the dynamics and micro-physics of Saharan duststorms. Journal of Geophysical Research, 1987, 92:3027-3049
- [9] 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
- [10] Cautenel G. Thermal impact of Saharan dust to over land .Part I :Simulation[J]. J. Appl. Meteor, 1992:166-180.
- [11] 焦彦军, 钱正安等. “93. 5. 5” 特强沙尘暴成因的数值模拟研究. 中国沙

尘暴研究, 气象出版社, 1997:121—127.

[12]牛宝山, 丁治英, 王劲松. 一次爆发性气旋的发展与湿位涡关系的研究[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(1): 8-16.

[13]王文, 隆霄, 李耀辉等. “2002.3”强沙尘暴过程的中尺度动力学诊断分析[J]. 干旱气象, 2004, 22(3): 17-21

[14] 赵林娜, 赵思雄. 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1):116-125.

[15]王劲松, 李耀辉等. “4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析 [M] 西北重要天气成因数值预报方法研究, 北京, 气象出版社, 45—55.

[16]中国气象局预测减灾司. 沙尘暴监测预警服务研究. 北京: 气象出版社, 2002.

[17]乔林, 薛建军. 北方出现强沙尘暴 南方阴雨天气多[J]. 气象. 2002, 28(6):58-61.

[18]祝昌汉, 张强, 陈峪. 2002年我国十大极端气候事件[J]. 灾害学, 2003, 16(2):74-78.

[19]张金艳. 全国气温持续偏高 北方大部雨雪稀少. 气象, 2002, 28(5):58-61.

[20]杨德保, 尚可政, 王式功. 气候变化丛书—沙尘暴. 北京: 气象出版社, 2003, 3:1-176.

[21] MADDOX R.A. An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data [J]. Mon Wea Rev, 1980, 108(8):1108-1121.

[22] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴. “4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析 [J]. 高原气象, 2004, 23(1):89-95.

[23] 程麟生, 马艳. “93.5 黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值实验” [J]. 应用气象学报, 1996, 7(4):385-395.

[24] Uccellini, L. W., The possible influence of upstream upper-level baroclinic processes on the development of the development QEI I storm [J]. Mon. Wea. Rev. , 1986, 114:1019-1027.

[25] 刘景涛, 郑新江, 康玲等. 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8 (2) :218-228