

分类号_____

密级_____

UDC_____

编号_____

南京信息工程大学

硕士学位论文

高空急流与沙尘暴关系的统计
分析与动力学研究

培养单位：南京信息工程大学

专 业：气 象 学

申 请 人：程 海 霞

指导教师：丁 治 英 副教授

二〇〇六年三月

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：程海霞

日期：2006.4.28

学位论文使用授权声明

本人完全了解南京气象学院有关保留、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：程海霞

日期：2006.4.28

高空急流与沙尘暴关系的统计分析及动力学研究

摘要

本文首先对 2000~2004 年 5 年的沙尘暴与高空急流的关系进行了统计, 并利用 MM5 模式对 2001 年 4 月 8~9 日强沙尘暴天气过程进行了数值模拟和诊断分析。统计结果表明: 沙尘暴与高空急流总是相伴出现; 急流造成的沙尘暴可分为 2 类: 单急流型和双急流型; 大范围的强沙尘暴多与双急流相伴出现; 沙尘暴多出现在西南风、西北风急流的左侧及其右后方。统计中还发现, 在一些双急流中存在急流异变, 急流异变对沙尘暴的发生和发展具有重要作用。

模拟中发现: 在 2001 年 4 月 8~9 日沙尘暴的生成、发展过程中, 高层的西风产生了强烈的动量下传, 低层的南风 and 北风分量共同促进了沙尘暴的发展, 高层的南风却起了抑制沙尘暴发展的作用。南北两支高空急流的共同作用是造成该次沙尘暴的主要原因, 北支急流有直接的作用, 南支急流有间接的影响。不论是上升还是下沉气流均可能产生沙尘暴, 低层辐合、高层辐散(上升运动)导致的抽吸作用可引起近地层形成大风和沙尘暴; 强的下沉气流可导致动量下传有利于沙尘暴的产生。在高空急流的移动过程中, 非地转风分量 $u-u_g$ 决定着南北两支急流轴转动的方向。

两支 MPV1 正的大值位涡区与南、北两支急流有很好的对应关系, 两支急流的走向分别与两支 MPV1 正的大值位涡区南侧的密集等值线走向一致, 沙尘暴发生在中高纬正位涡前部梯度大值区附近, 负 MPV1 位涡中心的北侧。在沙尘暴区域前部, MPV1 和 MPV2 反号, 且 $MPV < 0$, 说明在这个部位, 对流层高层有对称不稳定存在。对称不稳定有利于引起地面大风, 从而促进了沙尘暴的形成和发展。

分析位涡的垂直结构, 可以知道: 位涡正值区能够很好地反映冷空气和气旋性环流的活动, 位涡的斜压项 MPV2 与垂直环流有一定的对应关系。

关键词: 沙尘暴 高空急流 双急流 统计 动力分析

The statistical analysis and dynamics study
on the relation between high jet and sandstorm

Abstract

correlation is carried out to reveal the relation between sandstorm and high level jet during 2000—2004, and the numerical simulation and diagnosing to strong sandstorm of the 8th - the 9th of April , 2001 also has been carried on by MM5 mode in this paper. The statistical result shows: The sandstorms that the jets cause can be divided into 2 kinds: Single jet pattern and double jet pattern. Sandstorms is likely to occur left to where the high level SW single jet and NW single jet and right to their enters, or left to where the high level NW jet exits .the abnormal jets have important function on the emergence and development of the sandstorm .

Some conclusions have been drawn in simulation (that) the sandstorm has obvious momentum spreading that is made by latitude wind mainly. The position and the degree of strong or weak of divergence field and vertical velocity field have close relations to emergence and development of high jet and sandstorm. The ageostrophic wind latitude components determine the direction rotated of two jets' axles.

The change of barotropic potential vorticity (MPV1) have good correspondence with the development of the high jet and sandstorm: the north jet lie in Intensive positive of MPV1 large value Isopleth's area in high latitude, the south jet lie in Intensive positive MPV1 large value Isopleth's area in middle and low latitude. The movement direction of two jet axles coincide with southern positive MPV1 large value Isopleth's areas separately, and the sandstorm takes place near positive MPV1's gradient large value district or lie in northwest of potential vorticity (MPV) area too. Symmetrical judder takes place in sandstorm area. The positive potential vorticity area can reflect cold air and cyclone's activity of circulation well. There is certain corresponding relation between the emergence and development of the barclinity of the atmosphere and vertical circulation.

Keyword: sandstorm, high jet, double jet, statistical analysis and dynamics analysis

第一章 前言

近年来,随着全球性气候的变暖及异常气候事件的频繁发生,我国北方地区,尤其是西北和华北地区沙尘暴天气频繁出现,给所影响的地区造成了严重的危害,而且已经严重危害京津等地,并波及到全国。沙尘暴已经成为一种严重的气象灾害和生态环境问题。20世纪90年代以来,我国北方地区进入沙尘暴相对活跃的时期,沙尘暴灾害的次数和强度都有增加的趋势。进入本世纪,这种增加的势头仍在继续,沙尘暴出现的时间在提前,次数在增多,影响的范围在扩大,并多次出现影响东亚地区的大范围沙尘暴。因此,研究沙尘暴对区域生态环境建设和可持续发展有着重要的意义。

1.1 沙尘暴概述

沙尘暴是沙漠及其邻近地区特有的一种自然灾害,是土地荒漠化程度的重要指标,它是由特殊的地理环境和气象条件形成的一种较为常见的自然现象。根据气象观测规范,沙尘暴是沙暴和尘暴的总称,是指强风把地面大量沙尘卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度低于1km的天气现象。世界范围内沙尘暴多发区位于中亚、北美、中非和澳大利亚,我国主要分布在西北及华北大部分地区,属于中亚沙尘暴区的一部分,是全球现代沙尘暴的频发地区之一。

在强大气流驱动下,地面缺少植被覆盖时,气流携带大量地表粉尘,悬浮在空中形成沙尘,其高度达1000~2500m,严重时可达2500~3200m。我国北方春季沙尘天气是特殊的地理环境和气象条件所致的自然现象。我国西北及华北大部分地区属中纬度干旱和半干旱地区,地面多为沙地、稀疏草地和旱作耕地,植被稀少,特别是春季地面回暖解冻,地表裸露,多细沙尘土,狂风起时,沙尘弥漫,在本地及狂风经过地带形成沙尘天气。

对沙尘暴强度的等级划分,各地标准不太一致,但一般都采用风速和能见度2个指标。为了规范全国沙尘天气的观测、监测,以更好地开展沙尘天气预警服务业务,中国气象局预测减灾司制定了《沙尘天气预警业务暂行规定》,并在2002年12月作了补充修订。依据新规定,将沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴四类。对沙尘天气的划分主要依据能见度,对风力的作用考虑得少,当能见度在0.5~1.0km时为沙尘暴,能见度<500m时为强沙尘暴。并规定,如果在同一天气过程中,我国天气预报范围内3个或3个以上国家基本(准)站出现了沙尘暴(强沙尘暴)天气,则认为我国出现了一次沙尘暴(强沙尘暴)天气过程。

根据有关研究^[1],沙尘暴的形成有3个基本条件:一是足够强劲持久的风力,这是形成沙尘暴的动力条件;二是地表具有丰富的松散干燥的沙尘,这是沙尘暴的物质基础;三

是不稳定的空气状态，这是重要的局地热力条件，沙尘暴多发生在午后至傍晚时段，就充分说明了大气不稳定状态的重要性。

王式功等通过对沙尘暴形成的宏观天气气候条件和下垫面状况的系统分析，认为沙尘暴主要发生在春季和初夏季节有 5 个方面的原因^[2]：

- ①丰富沙尘源的下垫面和特殊的地形条件；
- ②冬半年长时间的干燥和冻结，到春季解冻后地表土质变得疏松；
- ③春季高空急流轴所处位置是北方地区易吹大风的重要原因；
- ④春季大气层结不稳定度增大，午后易产生对流，有利于高空动量下传；
- ⑤春季是北方冷锋活动最频繁的季节，锋后大风也是产生沙尘暴最重要的因素之一。

沙尘暴是多种因素共同作用的产物，尤其是特强沙尘暴的发生发展，在具备宏观的气候和下垫面条件的前提下，还需要有利的环流形势和天气系统相配合，王式功等通过对我国西北地区几次大范围强或特强沙尘暴天气过程的分析研究，认为易产生沙尘暴的主要大气环流形势和天气系统有^[3]：

① 经纬向环流调整

我国西北地区大范围沙尘暴天气过程的发生发展，总伴随着一次大尺度环流调整，位于西伯利亚的冷空气迅速向我国境内由西北向东南爆发，若此时处在春季，且前期久旱无雨，对流层低层处于强烈不稳定时，则易造成大范围沙尘暴天气。

② 冷锋及锋前暖舌

春季是我国西北地区冷锋活动最频繁的季节。每次强冷锋过境后都会产生很强的变压梯度，同时，由于系统局地增温和午后增温，锋前的暖区加强北伸，在未来沙尘天气发生区域形成暖区，使冷锋前后温度对比更为强烈，产生强烈的锋面抬升，由此产生 $20\sim 30\text{ms}^{-1}$ 的瞬时变压风，此大风所经之地，常导致沙尘暴天气的发生。

③ 低空东风急流

沙尘暴天气出现前期，青藏高原东部低空常出现大幅度增温，促使高原东北部低涡（如柴达木低涡）发展，若蒙古高原东南部同时也有高压发展，则可导致高原北部河西走廊地区低空东风急流的形成。这是我国西北地区发生大范围强沙尘暴的重要条件。

④ 中尺度系统

从上世纪 80 年代和 90 年代发生在我国西北地区的几次大范围的强沙尘暴天气的分析结果看，与之相伴的特强沙尘暴中心区，总是与中尺度低压或中尺度爬线相联系，表明中尺度系统对局部强或特强沙尘暴的发生发展起着至关重要的作用。

⑤ 高空急流

高空西风急流、高空南北风急流是沙尘暴天气发生的一个重要因素。高空急流在沙尘暴过程中所起的动量下传作用,促进了低层风速的增大和地面中尺度系统的发展,对沙尘暴的发生、发展具有重要影响。本文的主要方向就是研究高空急流对沙尘暴的影响。

1.2 国内外关于沙尘暴、高空急流的研究和进展

国外早在上个世纪 20 年代就开始了沙尘暴研究。Hankin^[4]对印度的“Anhdi”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了研究,1925 年 Sutton^[5]对北非苏丹喀士穆地区的黑风(当地称 Haboob)的若干特征进行了分析研究。之后,世界许多国家对沙尘暴的研究不断深入。Morals^[6]对苏丹 1973 年的一个沙尘暴个例进行了诊断分析,认为干冷空气和辐合上升气流共同作用形成了沙尘暴。Ott, S. T 和 A. Ott^[7]等在 1991 年利用卫星和 GATE 资料对撒哈拉沙漠沙尘暴的爆发作了分析。国内起步较晚,始于 20 世纪 70 年代,研究范围主要集中在沙尘暴的天气气候学特征、时空分布特征、分析预报、遥感监测、成分分析、数字模拟以及灾害预防等领域。刘景涛^[8]对内蒙古中西部地区的分析结果表明,4 月份沙尘暴出现的频率最高,春季(3~5 月)占全年的 73%。沙尘暴也有明显的日变化特征,王式功等研究表明:沙尘暴主要发生在午后到傍晚时段内,占总数的 65.4%。Jauregui(1989)对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究,并指出 3 月份沙尘暴出现的频率最大^[9],Braze 对发生在美国亚利桑那的沙尘暴天气类型同样作了统计分析^[10]。1993 年贺慧霞等研究表明^[11],我国西北地区最大的沙尘暴出现区域,是西起吐鲁番、哈密地区,东接蔓延长达 1000km 的甘肃河西走廊,北连内蒙古阿拉善,东延到河套地区。叶笃正等^[12]指出,影响华北地区的沙尘天气主要发源于内蒙古中西部和河北西北部,发源地及沿途地表粉尘是沙尘的主体,并进一步提出了关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策。

关于高空急流,90 年代以前,多出现在暴雨研究中。在日本的暴雨预报方法中,根据高空急流的位置,定出暴雨出现的区域,不论东西走向(纬向)或南北走向(经向)的 200hPa 或 300hPa 急流,暴雨区多位于高空急流轴南侧 300km 处。朱乾根^[13]指出我国暴雨往往发生于高空西南急流右后方,陈久康等^[14]研究了一次西北风高空急流下的梅雨暴雨过程,发现高空西北急流促进了低空的辐合及垂直上升运动。孙淑清等指出低空急流左前方常为对流不稳定区,暴雨经常发生在低空急流的左前方,高空南压高压东部的偏北大风轴的右后方^[15-16];翟国庆等指出低空急流左前方有强的辐合区,高空偏北大风轴的右后方有强的辐散区^[17]。

近些年来,随着对沙尘暴天气的关注和研究,高空急流出现在有关文献中。引起沙尘暴的大风除了地转偏差外,高空急流的动量下传对低层风速的加大作用也是不容忽视的一个重要因素^[18],而高空急流的存在,是动量下传产生沙尘暴的必要条件。由此可见,对高

空急流与沙尘暴之间的关系进行更加全面和深刻的研究是很有必要的。本文首先利用 2000—2004 年五年的 Micaps 常规资料,对我国沙尘暴及其高空急流与沙尘暴天气过程的关系作了统计分析,得出了一些结论,也提出了一些有待于进一步研究的问题。

第二章 2000~2004 年沙尘暴特点及高空急流与沙尘暴的统计关系

2.1 相同点

(1) 对这五年的沙尘暴过程按月进行统计(表 1),可以清楚地看出,沙尘暴在 4 月发生得最多,有 21 次,占总数的 46.8%,春季(3~5 月)一共 42 次,占总数的 87.5%,冬季(12 月~次年 2 月)5 次,占总数的 10.4%,秋季(9~11 月)只有 1 次,仅占总数的 2.1%。钱正安等^[10]统计了 1952~2001 年我国北方强和特强沙尘暴,指出:沙尘暴主要出现在春季(3~5 月,占 63%),特别是 4 月(占 30%)。因为 2000~2002 年沙尘暴次数急剧增多,所以本文的统计结果偏高。

表 1 沙尘暴的月际分布

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	11 月	12 月
2000	0	0	2	7	3	0	1
2001	2	1	4	6	3	0	1
2002	0	0	5	6	0	1	0
2003	0	0	0	2	0	0	0
2004	0	0	3	0	1	0	0
合计	2	1	14	21	7	1	2
百分比	4.2	2.1	29.2	46.8	14.5	2.1	4.2

(2) 沙尘暴具有明显的日变化特征,一天中,沙尘暴主要发生在午后到傍晚时段内,即集中发生在 11 时—17 时。这是因为春季午后地面受热增温快,加强了空气的热力不稳定,为地面热低压发展和沙尘暴的生成提供了热能。

(3) 沙尘暴有三个多发区:一是内蒙古西部和甘肃河西地区东部,二是内蒙古偏东地区和河北西北部,三是南疆盆地和青海西北部。这三个地区都是干燥沙漠地带,具有丰富的沙源。

(4) 范围大、强度强的沙尘暴大部分都有蒙古气旋和冷锋相伴,而且蒙古气旋的中心强度都很强。2002 年 3 月 18~22 日的强沙尘暴过程,强度强、波及范围广,沙尘袭击了我国 11 个省区,影响这次过程的蒙古气旋最强时中心气压值为:990.0hPa,发生在 2001

年4月5~8日的大范围强沙尘暴的蒙古气旋最强时中心气压值为: 982.5hPa。

2.2 不同点

2001年沙尘暴天气过程最多, 一共17次, 2000年13次, 2002年12次, 而2003年全年仅只出现了2次, 2004年前半年4次。这和前期的大气环流形势、气候背景有密切的关系。

2000年受La Nina结束后的冷水过程的影响, 隆冬以经向环流为主, 气温偏低, 春季经纬向环流交替, 以纬向环流为主, 气温偏高, 降水偏少。我国在经历了1999年的大旱之后, 2000年又遭受了罕见的全国性的干旱, 为1949年以来干旱最严重的年份之一。3~5月华北大部、西北、东北平原西部降水较常年同期偏少3~9成。持续少雨, 加上同期气温偏高, 大风天气频繁, 导致我国北方地区沙尘天气频发。

受赤道东太平洋海温持续冷水位相的影响, 2000年12月~2001年2月我国东部大范围雨雪偏多, 2001年春季(3~5月)全国大部地区降水偏少、温度偏高, 沙尘暴频繁。我国北方地区风沙和沙尘暴天气出现时间偏早、次数多, 影响范围广。据统计, 仅3月至5月中旬, 就先后出现范围不同、强度不等的沙尘天气达18次之多, 总日数为41天。

一次新的厄尔尼诺事件在2002年春末夏初形成, 对2002年的天气产生了影响。冬季(2001年12月至2002年2月)全国大部分地区温度偏高, 华北大部、华南大部、西南大部降水偏少; 春季(3~5月)全国大部地区3~4月温度持续偏高, 5月正常偏低, 北方沙尘天气频繁。仅春季, 我国共受到12次沙尘天气的袭击, 其特点是强度偏强, 影响范围广, 出现时段集中。

2002年发生的厄尔尼诺事件于2003年初结束。受这次事件的影响, 西太平洋副热带高压冬、春、夏、秋季持续偏强, 北方大部地区四季降水持续偏多。2002/2003年冬季(2002年12月~2003年2月)和春季中国大范围雨雪偏多, 是近年来北方冬春季土壤墒情最好的一年, 北方沙尘天气明显偏少, 沙尘暴天气只出现了2次。

2004年亚洲中高纬环流平直, 亚洲中高纬度的环流经向度较小, 以纬向环流为主, 因而虽然亚洲北部冷空气活动较频繁, 但南下势力较弱。全年一共发生沙尘暴天气4次。

2.3 高空急流与沙尘暴的关系

有关的定义: (本文有关沙尘暴及沙尘暴天气过程的定义执行中国气象局《沙尘天气预警业务服务暂行规定(修订)》(气发[2003]12号))

沙尘暴: 强风将地面大量沙尘吹起, 使空气非常浑浊, 水平能见度小于1km的天气现象。

沙尘暴天气过程: 在同一次天气过程中, 我国天气预报区域内3个或3个以上国家基本

(准)站在同一观测时次出现了沙尘暴天气。

高空急流：以 300hPa 以上大于 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风速带作为高空急流，其轴线为高空急流轴，其中心为高空急流中心。考虑到大多数沙尘暴过程是大尺度天气，定义高空急流轴与沙尘暴区不超过 12 个纬距为两者有关系。表 2 是 2000~2004 年五年间的沙尘暴过程发生次数与相伴的高空急流次数的分布。从表中可以看出，沙尘暴与高空急流关系非常密切，总是相伴出现。

表 2 沙尘暴次数与所对应的高空急流次数的分布

年份	沙尘暴次数	急流次数	急流次数占沙尘暴次数的比率/%
2000	13	13	100%
2001	17	17	100%
2002	12	12	100%
2003	2	2	100%
2004	4	4	100%

黄安丽^[19]等曾将高空急流分为三种类型：西北~东南型、西风平直型和西南~东北型，后被简称为西北风型、西风型和西南风型。本文在分析 2000~2004 年的沙尘暴资料中发现，在沙尘暴过程中，常常在 $45\sim 60^\circ\text{N}$ 有一支西北风急流和中心在 35°N 以南的强盛的副热带偏西风急流同时出现，沙尘暴区位于两支急流附近，我们称其为双急流。因此在本文中，把影响沙尘暴的急流分为两大类：单急流和双急流。

在本文中，把同一次沙尘暴过程中，我国天气预报区域内有 10 个或 10 个以上国家基本（准）站出现了沙尘暴，称为一次大范围的沙尘暴过程。在所统计的 48 次沙尘暴天气过程中，有 19 次大范围的沙尘暴过程，其中，7 次与高空单急流相伴，12 次与高空双急流相伴出现。

根据统计结果，与沙尘暴相伴出现的单急流有三类：西风型、西北型和西南型，双急流有四种类型：西北+西南型、西北+西风型、偏北+西风型和西南+西风型。表 3 是 2000~2004 年不同类型高空急流与沙尘暴过程次数的分布情况。

从表中可以看出，五年中，与沙尘暴过程相伴的单急流一共有 27 次，占有急流沙尘暴次数的 56%，其中西风型 14 次，占总数的 29%，西北风型 8 次，占 17%，西南型 5 次，占 10%；双急流共出现了 21 次，占有急流沙尘暴次数的 44%，其中西北+西南风型发生的频次最高，有 9 次，占总数的 19%，西北+西风型次之，8 次，占 17%，偏北+西风型、西南+西风型各 2 次，各占 4%。可见与沙尘暴天气过程相伴出现的高空急流主要是单急流中的西风型、西北型和西南型以及双急流中的西北+西风型、西北+西南型。

表 3 沙尘暴过程中不同类型高空急流所对应的沙尘暴次数的分布

年份	有高空急流 对应的沙尘 暴次数	不同类型高空急流对应的沙尘暴次数						
		单急流			双急流			
		西风型	西北型	西南型	西北+西 南	西北+西 风	偏北+西 风	西南+ 西风
2000	13	2	2	2	2	3	1	1
2001	17	6	4	1	3	2	0	1
2002	12	4	2	1	4	1	0	0
2003	2	0	0	1	0	1	0	0
2004	4	2	0	0	0	1	1	0
合计	48	14	8	5	9	8	2	2

沙尘暴爆发最常见的环流形势是西北路冷空气入侵，因此与沙尘暴对应的西北、西风型单急流占了 46% 的比例；而与沙尘暴相伴的双急流中，南支急流主要是副热带急流（以偏西风占多数），北支急流中西北风占了 81% 的比例。双急流的高频率出现，以及南、北支（有些情况下是东、西两支）急流对沙尘暴区的共同影响需要引起足够的注意和研究。统计中发现，大范围的沙尘暴天气一般与 200hPa 高空的双急流相伴出现。

与沙尘暴相伴出现的高空急流具有明显的季节特征。在春季，因为大气环流活跃多变，有单支急流与沙尘暴相伴，也有两支急流出现在沙尘暴区附近，而冬季和秋季的沙尘暴区 200hPa 高空只有单支急流出现。春季的沙尘暴强，影响范围大，秋季、冬季的沙尘暴相对来说要弱得多。分析中还发现，冬季的高空急流很强，200hPa 高空急流中心最大风速有时超过 $100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，但沙尘暴的强度较弱，影响范围较之春季也小得多，主要原因在于冬季地面上冻，不易起沙。而春季我国北方冷空气活动频繁，多大风，气温回暖解冻，地表裸露，土质松软，容易起沙。

分析单急流中心位置与沙尘暴区的对应关系（表 4），可以发现，沙尘暴多发生在西风、西南风和西北风急流的左侧（共 22 次）以及这三种急流的右后方（5 次）。其中，沙尘暴发生在西风急流左后方的次数最多，占总次数的 22.2%，出现在西北风急流左前方的次数是 4 次，占总次数的 14.8%，发生在西南风急流左后方的次数为 2 次，占总次数的 7.4%。西风急流的左中和左后方是辐合区，能引起动量下传，加大低层风速，使地面出现大风和沙尘暴，这一点已经得到广泛的认可。由于西北风左侧及其西风、西南风和西北风急流的右后方出现沙尘暴的几率也很大，其原因有待于进行进一步的分析和研究。

总体说来，与我国沙尘暴相伴的单急流以纬向环流为主，但与经向环流也有密切的关系。

表 4 沙尘暴区位置与单急流中心关系次数的分布

年份	西风型急流				西南风型急流				西北风型急流		
	左前	左中	左后	右后	左前	左中	左后	右后	左前	左后	右后
2000	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
2001	1	0	3	2	0	1	0	0	3	1	0
2002	1	1	2	0	0	0	1	0	0	0	2
2003	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2004	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	3	3	6	2	1	1	2	1	4	2	2
百分率 (%)	11.1	11.1	22.2	7.4	6.7	6.7	7.4	6.7	14.8	7.4	7.4

我们也分析了沙尘暴位置与双急流中心的对应分布。结果表明，与西北+西南型双急流相伴的沙尘暴多出现在双急流中心的左前+左后方（图 2.1），共发生了 7 次，占有双急流相伴的沙尘暴总数的 33%。而且，在分析中还发现：单纯的西北+西南型双急流伴随的沙尘暴范围小，强度也较弱，而在发展过程中有分支出现的西北（或西南）急流与另一支急流相互作用，所伴随发生的沙尘暴则是大范围的强沙尘暴。另外，与西北+西风型双急流有关的沙尘暴出现的总次数虽然多，但沙尘暴区域与两个急流中心的相对位置的分布却比较分散，西南+西风型和偏北+西风型出现的次数较少。

图 2.1 出现频率最高的双急流型式及沙尘暴区分布

在统计中还发现，有 8 次沙尘暴天气的 200hPa 高空的北支急流在向东（或向东南）移动的过程中发生了急流异变，即位于 45~60° N 的北支急流在东移（或东南移）的过程中，与中心在 35° N 以南的强大的副热带偏西急流的外围合并（合并后仍然有两个急流中心）。表 5 中比较详细地列出了这 8 次沙尘暴天气过程的 200hPa 高空急流合并前后流层中低层、地面风速及沙尘暴强度的变化。

从表 5 中可以看出：高空急流异变后高空风速、对流层中低层的风速一般都有不同程度的增大，促进了低层急流的形成或加强，增大了地面最大风速，从而加强了沙尘暴的强度。

急流的这种振荡合并对沙尘暴的发生发展具有重要作用^[20]：①使得对流层中下层 500hPa、700hPa 锋区明显加强。②导致大气层结不稳定和低层中低压的发展。高空急流加强，自急流中心不断向下伸展，动能下传，导致下层西风气流明显加大。对流层锋区加速东移，高层先降温，不仅有利于形成不稳定的大气层结，使上升气流得到维持和加强，而且引起地面减压，有利于地面中低压的发展。两支急流异变为中小尺度系统的发生、发展及沙尘暴的产生提供了有利的大尺度背景。

表 5 沙尘暴过程高空急流异变对对流层、低层及地面的影响

序号	发生时间	高空急流	合并前、后	合并前、后	合并前、后	合并前、后	合并前、后
		合并时段	高空急流 中心最大 风速 (m/s)	500hPa 沙尘 区上空最大 风速 (m/s)	850hPa 有、 无急流及≥ 12m/s 测站站 数	沙尘区地 面最大风 速 (m/s)	沙尘暴强 度 (出现沙 尘暴的测 站站数)
1	2001-03-04 ~ 06	5 日 08 时—	44	36	8	12	无
		20 时	56	48	11	30	7
2	2001-03-19	18 日 20 时—	40	26	无	12	无
		19 日 08 时	48	24	5	16	4
3	2001-03-21 ~ 22	21 日 08 时—	52	28	无	14	无
		20 时	48	38	3	16	3
4	2001-04-05 ~ 08	6 日 20 时—7 日 08 时	44 60	44 48	9 6	16 20	13 13
		2002-03-18 ~ 22	19 日 20 时— 20 日 20 时	68 84	44 40	8 11	20 20
6	2002-04-05 ~ 09	5 日 20 时—6 日 08 时	64 68	44 52	无 4	8 16	无 13
		2004-03-09 ~ 10	9 日 08 时— 20 时	68 72	46 52	3 8	8 18
8	2004-03-26 ~ 28	26 日 20 时— 27 日 08 时	52 56	28 44	无 4	10 18	无 11

第三章 模式简介、资料与方法

3.1 MM5 模式结构和主要物理过程简介

MM5 是美国宾州大学 (PSU) 和美国大气研究中心 (NCAR) 于 80 年代末 90 年代初在 MM4 基础上研制发展的新一代中尺度天气模式。与 MM4 相比, MM5 在资料初始化和物理过程参数化上都作了较大的改进, 同时还发展了非静力部分和区域嵌套功能。近年来, 该模式不仅广泛应用于中尺度天气的研究, 而且也应用于天气尺度和区域气候方面的研究。

MM5 的三维非静力基本控制方程组如下:

水平动量守恒方程:

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* \sigma u}{\partial \sigma} + uDIV - \frac{mp^*}{\rho} \left[\frac{\partial p^*}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p^*}{\partial \sigma} \right] + fp^* v - p^* ew \cos \theta + D_u \quad \dots \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{\varphi}^* v}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial \dot{\varphi}^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* vv/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \dot{\varphi}^* v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + v \text{DIV} - \frac{m p^*}{\rho} \left[\frac{\partial \dot{\varphi}^*}{\partial x} \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial \dot{\varphi}^*}{\partial y} \frac{\partial \dot{\varphi}^*}{\partial \sigma} \right] - f p^* u + p^* e w \sin \theta + D_v \quad \dots \quad (2)$$

垂直动量守恒方程:

$$\frac{\partial \dot{\varphi}^* w}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial \dot{\varphi}^* uw/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* vw/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial \dot{\varphi}^* \dot{\sigma} w}{\partial \sigma} + w \text{DIV} + \frac{g p^* \rho_0}{\rho} \left[\frac{1}{p^*} \frac{\partial \dot{\varphi}^*}{\partial \sigma} + \frac{T_v}{T} - \frac{T_0 p^*}{T p_0} \right] \dots \quad (3)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \dot{\varphi}^* p^*}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial \dot{\varphi}^* up^*/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* vp^*/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial \dot{\varphi}^* p^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + p^* \text{DIV} - m^2 p^* p \quad (4)$$

热力学能量守恒方程:

$$\frac{\partial \dot{\varphi}^* T}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial \dot{\varphi}^* uT/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* vT/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \dot{\varphi}^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + T \text{DIV} + \frac{1}{\rho c_p} \left[p^* \frac{dp^*}{dt} - p^* \rho_0 g w - D_p \right] + p^* \frac{\dot{Q}}{c_p} + D_T \quad (5)$$

上式中

$$\text{DIV} = m^2 \left[\frac{\partial \dot{\varphi}^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* v/m}{\partial y} \right] + \frac{\partial \dot{\varphi}^* \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (6)$$

$$\dot{\sigma} = \frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad (7)$$

$$\tan \theta = -\cos \Phi \frac{\partial \lambda / \partial y}{\partial \Phi / \partial y} \quad \dots \quad (8)$$

式中 λ 为经度, Φ 为纬度, $e=2 \Omega \cos \Phi$, Ω 为地球自转角速度。

水汽守恒方程:

$$\frac{\partial \dot{\varphi}^* q_v}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial \dot{\varphi}^* uq_v/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* vq_v/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \dot{\varphi}^* q_v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + p^* (P_{rv} - P_{con} - P_H - P_{ID}) + F(q_v) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \dot{\varphi}^* q_{iw}}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial \dot{\varphi}^* uq_{iw}/m}{\partial x} + \frac{\partial \dot{\varphi}^* vq_{iw}/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \dot{\varphi}^* q_{iw} \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + p^* (-P_{rv} - P_{rc} + P_H + P_{ID} + P_{con}) + F(q_{iw}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial p^* q_x}{\partial t} = -m^2 \left(\frac{\partial p^* u q_x}{\partial x} + \frac{\partial p^* v q_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* q_x \sigma}{\partial \sigma} + p^* (P_m + P_r - P_n) + \frac{\partial v_s \rho g q_x}{\partial \sigma} + F(q_x) \quad (11)$$

式中 q_v 、 q_{iw} 、 q_x 分别是水汽、云冰（云水）和雪水（雨水）的混合比， P_{con} 、 P_r 、 P_m 、 P_n 是水汽、云水、雨水、云冰和雪水之间的转换率。 V_s 是雨水或雪的落速。 P_n 是冰核浓度决定的冰晶核化生成项， P_D 是由核化生成的冰晶在达到冰面过饱和时的凝化项。

在动力结构的设计上，MM5 模式同其他常用模式的最重要差别在于，除了保留静力平衡方案外，还增加了非静力平衡方案。非静力的中尺度模式 MM5 是在满足静力学的 MM4 模式基础上发展起来的，当中尺度模式的水平网格尺度比垂直特征尺度大时，可以保持静力近似。随着模式分辨率的提高，当模式水平尺度接近或小于垂直尺度时，需要考虑对垂直气压梯度有贡献的垂直加速度，此时静力平衡近似不再适用。在 MM5 的非静力平衡设计中，定义了静力平衡的参考状态和非静力平衡的扰动状态。参考状态下的气压梯度项从有关方程中扣除，而气压扰动与垂直速度分量一起成为增加的三维预报变量（见方程（1）—（11）气压梯度力项的气压被扰动气压取代）。

在格点结构的设计上，MM5 模式的水平格点和垂直格点均采用“跳点”格式。对水平跳点格式（Arakawa B 格式）是将水平风速变量定义在黑点上，而其他变数定义在 \times 点上，这种跳点格式比非跳点格式计算的气压梯度力、水平散度和涡度更精确。在 σ 坐标系的垂直方向，垂直速度 σ 定义在整数层上，而其余变数定义在半数层上。

MM5 对降水和辐射等物理过程的描述和处理更为周密合理。在降水物理过程的积云参数化方案中，除了一般采用的 Anthes-Kuo 方案外，增加了改进的 Arakawa-Schubert 方案和 Grell 方案；在显式方案中增加了冰相过程；在辐射物理方案中除了在用地面能量平衡方程计算地面温度时考虑辐射过程外，在模式各高度层上均考虑了辐射过程的能量收支，包括云水、云冰、雪和 CO_2 对辐射的吸收、散射和反射等。

在侧边界处理上，MM5 模式设计了固定边界、时变边界、时变的开放边界、时变的海绵边界以及张弛逼近边界等，并设计了选择开关。

此外，MM5 还设计了多重可移动嵌套网格方案，粗细网格之间可以双向反馈。采用九点平滑算子处理粗细网格重叠部分的地形高度，使两者协调并满足运算要求。采用四阶水平扩散、分离输入和动力反馈、牛顿型阻尼等方法控制边界噪声。在做模拟研究中使用套网格方案，可以方便地跟踪系统。模式还加入了四维资料同化系统，可以进一步改进预报效果。

3.2 模式方案与资料介绍

本文在进行中尺度数值试验研究中,采用的是二层嵌套模式,中心为(107° E, 40° N);外层格点91×91,格距为90km;内层格点61×61,格距为30km。垂直方向为不等距的25层。

本次试验采用MM5模式的如下方案:(1)动力过程采用的是非静力平衡方案;(2)显式水汽方案,对模式可分辨降水进行模拟,即云水、雨水(含冰相过程)也作为预报量,模式不可分辨的降水的模拟则选用Grell^[24]对流参数化方案;行星边界层过程的模拟选择了Blackadar 高分辨率方案;大气辐射方案采用云辐射方案;模式层顶利用海绵边界条件,侧边界采用时间流入、流出的时变边界。

本次模拟资料使用美国大气中心的NCEP数值预报产品分析场,将其内插到粗网格区域作为初估场,再加入实况高空、地面资料后,对初估场作再分析,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2001年4月8日00时(世界时,下同),积分时间36小时,结束时间为2001年4月9日12时,积分时间步长取的是3分钟,每3小时输出一次积分结果。

第四章 天气事实特点及研究的目的和方法

4.1 天气事实及特点

4.1.1 天气过程简述

2001年是沙尘天气频发的一年,全年一共发生沙尘暴过程17次。2001年4月8~9日,受强冷空气以及中尺度锋面气旋的共同影响,在新疆东部、内蒙古、青海、甘肃、宁夏、陕西部分地区以及黑龙江西部出现了一次大范围的大风、扬沙、沙尘暴天气,其中共有22站出现了沙尘暴。过程前期,4月4~5日,受冷暖气流的共同影响,新疆西部、河套中东部出现了一次降水天气过程,5日09时降水结束,地面冷高压主体移至渤海一带。5日23时,贝加尔湖至蒙古有低压带形成,至5日21时发展成蒙古气旋。此时,内蒙古、西北地区中东部大范围内天气晴好,气温回升,6日03时蒙古气旋加深,地面梯度明显加强,蒙古国至内蒙古北部(100~110° E, 40~50° N)范围内有沙尘暴出现,06~09时,气旋发展进入爆发阶段,内蒙古中东部大部地区出现沙尘暴,至7日00时后,蒙古气旋锢囚并开始减弱,7日12时蒙古气旋东移至东北,只有内蒙古东部和黑龙江省少数测站有沙尘暴出现,新疆有强冷空气入侵。7日18时强冷高压形成,主体位于新疆西北部,冷高压前部位于若羌~七角井,西北地区东部有中尺度低压形成,中心位于青海刚察一带,新疆东部、内蒙古、甘肃、宁夏部分地区开始出现沙尘暴天气。8日06时(图4.1),冷高压东移南下,锋面加强,风力加大,西北地区从西到东大范围出现沙尘暴天气,沙尘暴过程在8日09时

发展至最强(图 4.2)。8 日 18 时(图 4.3)，由于 700hPa 上有西北涡加强东移，配合南下的强冷空气，在西北地区东部、华北地区西部出现了大范围降水天气，内蒙古中部降了大雪，陕北出现了中雪。降水有利地遏制了东移的沙尘暴，加之，9 日地面冷锋已移至内蒙古东部和东北地区西部，地表沙源减弱，所以，尽管 9 日高层和低层的风速仍然很强，但沙尘暴的强度已经比前一天明显减弱。9 日 12 时(图 4.4)，冷高压主体控制西北地区，只在内蒙古北部有零星测站还有沙尘暴，沙尘暴天气过程趋于结束。图 4.4 和 4.5 分别给出了 8 日和 9 日的沙尘暴动态图。

图 4.1 2001 年 4 月 8 日 06 时地面实况图

图 4.2 2001 年 4 月 8 日 09 时地面实况图

图 4.3 2001 年 4 月 8 日 18 时地面实况图

图 4.4 2001 年 4 月 9 日 12 时地面实况图

图 4.5 2001 年 4 月 8 日 00~12 时沙尘暴动态图

图 4.6 2001 年 4 月 9 日 00~12 时沙尘暴动态图

4.1.2 实况的沙尘暴区与大风的对应关系

分析这次沙尘暴天气过程的每 3 小时地面实况场，可以看出，沙尘暴主要出现在 $35^{\circ}\sim 46^{\circ}\text{N}$ ， $75^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 的范围内。表 6 给出了实况的沙尘暴区与大风的对应关系。

其中，风速 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 但未出现沙尘暴的测站主要位于 40°N 以北、 100°E 以西的范围内，即新疆北部和内蒙古西部局部，该区域的风速随时间的变化不很明显。从上表中可看出，沙尘暴区与东移的、风速 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的大风区有较好的对应关系。

表 6 地面图上实况的沙尘暴区与大风的对应关系。

项目 时间	出现沙 尘暴的 站数	其中风速 \geq 12ms^{-1} 的站数	$8\text{ms}^{-1} \leq$ 风速 $<$ 12ms^{-1} 的站数	其中风速 $< 8\text{ms}^{-1}$ 的 站数	风速 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ ， 但未出现沙尘 暴的站数
8 日 00 时	8	4	3	1	4
8 日 06 时	12	9	3		5
8 日 09 时	17	12	4	1	6
8 日 12 时	15	9	4	2	10
9 日 00 时	2	2			5
9 日 06 时	4	4			7

4.1.3 环流形势分析

高空形势在各种强天气的发生、发展中作用重要。本节着重分析此次沙尘暴天气在不同时期的高空各个层次高度场上槽脊的位置、配置和演变情况。

(1) 前期特征

4~5日, 500hPa 乌拉尔山(以下简称为乌山)附近为低槽区, 贝加尔湖(以下简称为贝湖)到我国西北地区为弱高压区, 700hPa 为较弱的两槽一脊形势: 乌山偏东附近为弱低值区, 贝湖至河套北部同 500hPa 高压区位置重合, 为弱高压脊区, 日本海附近为另一低槽区, 中纬度环流较平直。在此形势下, 高压控制区天气较好, 有利于地面增温。6~7日, 乌山高压脊开始建立, 500hPa 上贝湖到蒙古地区高压迅速降为低压槽区, 横槽转竖, 冷空气快速加强东移南下, 由于动量下传作用, 700hPa 新疆到河套地区西北气流明显增强, 风速加大, 平均风速由 4~5 日的 14ms^{-1} 加大至 18ms^{-1} , 其中哈密、酒泉、马鬃山等站出现了 24ms^{-1} 的大风, 地面上在河套北部到蒙古国的部分地区、内蒙古的东部出现了大范围的沙尘暴天气(图 4.7), 使得在 8~9 日的沙尘暴前期的地表变得更加干燥、疏松, 形成了非常有利的地表沙源条件。

图 4.7 2001 年 4 月 7 日 06 时地面实况图

(2) 高空锋区槽脊及其低涡配置与沙尘暴天气的演变关系特征分析

从实况可以看到: 8 日 00 时至 9 日 00 时, 500hPa 上乌山高压脊发展并略有东移, 在新疆北部又发展出一横槽, 高空锋区位于北纬 40°N 附近, 随着横槽转竖, 西北气流经向度加大, 槽后的偏北气流引导冷空气南下, 110°E 以西区域风速增大, 最大风速达到 38ms^{-1} , 出现在甘肃敦煌。8 日 00 时 700hPa 上分别在东北北部、蒙古国西部形成了 2 个低值中心, 中心气压值分别为 288 位势什米和 284 位势什米, 8 日 12 时, 西部低压加强南下, 在巴盟农试站~合作站之间形成了一个强的西北风与西南风的切变, 内蒙至西北地区东部再次出现大范围沙尘暴天气, 沙尘暴天气就发生在切变线附近。

4.1.4 200、250hPa 急流的演变与沙尘暴区的对应关系

图 4.8a~d 为 200hPa 急流的演变与沙尘暴区的对应关系。8 日 00 时(图 a), 在 200hPa 高空有两支急流, 北支急流轴呈弱的气旋式弯曲, 中心西部呈西北~东南向, 中心东部呈东~西向, 中心位于(39°N , 88°E), 中心风速为 55ms^{-1} , 南支为副热带西风急流, 最大风速中心位于(29°N , 104°E), 中心风速为 70ms^{-1} 。此时在北支急流的右侧及出口区前部、南支急流的左后方有沙尘暴出现。8 日 12 时(图 b), 北支急流快速东移, 急流轴发生逆时针转动, 最大风速中心位于(40°N , 103°E), 中心风速为 55ms^{-1} , 南支急流略有东移, 急

流轴上有 3 个中心。在北支急流的右侧、南支急流的左后方出现了大片的沙尘暴。

9 日 00 时 (图 c), 北支急流中心东北移了 4—5 个纬距, 急流轴进一步逆转, 呈西南—东北向, 急流中心位于 (44°N , 112°E), 中心风速增大为 55ms^{-1} , 南支急流中心东移至 (31°N , 114°E) 附近。沙尘暴区急剧减小, 只有 2 个测站出现沙尘暴, 位于北支急流和南支急流的左后方。

9 日 12 时 (图 d), 北支急流中心东移了 4—5 个纬距, 急流轴进一步逆转, 中心风速增大为 70ms^{-1} , 南支急流继续东移, 只有 2 个测站出现沙尘暴, 位于北支急流后部和南支急流的左侧。由于直接影响沙尘暴的急流是北支急流, 而北支急流的中心在 250hPa, 因此以下讨论 250hPa 急流的活动。

同样分析 250hPa 急流从 8 日 00 时~9 日 12 时 (图略) 的演变, 可以看到 250hPa 与 200hPa 一样也存在南北两支急流, 不论是急流的形状还是走向, 250hPa 急流与 200hPa 的都很相似, 只是北支急流比 200hPa 上的急流强, 南支急流比 200hPa 上的急流稍弱一些。9 日 12 时的沙尘暴区与急流中心的相对位置与 200hPa 上的略有不同, 250hPa 沙尘暴区出现在北支急流中心的前部。

由上分析急流与沙尘暴的关系可见, 急流与沙尘暴的活动可分为两个阶段。第一阶段为 8 日 00 时~8 日 12 时, 在 200~300hPa 上的两支急流之间有沙尘暴区存在且北支极锋急流的出口区也有一沙尘暴区存在。第二阶段为 9 日 00~9 日 12 时, 随着北支急流轴转竖, 原位于两支急流之间的沙尘暴区消失, 沙尘暴区只出现在北支极锋急流的中心附近。分析还可看出, 200hPa 的两支急流较 250hPa 相距更近。这两支急流如何影响沙尘暴的形成将是我们要讨论的问题。

图 4.8a ~d 8 日 00 时~9 日 12 时 200hPa 全风速图

4.1.5 本个例特点

研究表明, 沙尘暴的形成及强弱取决于风力、热力不稳定及其相关的土壤表层状况。沙尘暴发生前期的干旱少雨和异常增暖是沙尘暴产生的重要条件, 强劲的风力、丰富的沙尘源和不稳定的空气层结是沙尘暴产生的重要条件。经分析本个例有以下特点:

①气候背景有利于此次沙尘暴过程的产生。1999~2000 年北方地区连续 2 年干旱少雨, 2001 年 3~4 月冷空气活动频繁, 大气环流经向度大, 前期降水偏少, 气温偏高, 加剧了土壤水分的蒸发。

②本次过程前, 4~7 日我国北方刚经历过一次强沙尘暴过程, 土壤表层松软, 易于起沙。

③本次过程的主要地面影响系统是新疆冷高压和地面气旋。

④大气斜压性很强，高度场和温度场变化快，深厚的暖脊促成了地面气旋的形成，强冷平流造成地面冷高压的强烈发展。

⑤沙尘暴天气影响范围大，过程前后环流经过了从纬向到经向的调整，气象要素变化剧烈，冷空气很强，部分台站伴有降水。

4.2 研究目的及方法

由前面对于高空急流和沙尘暴关系的统计和本次个例的分析,可见:大范围、高强度的沙尘暴一般在 200~300hPa 上有南北(或东西)两支急流相伴。本文利用 MM5 中尺度数值模式,模拟和分析了发生在 2001 年 4 月 8~9 日的一次强沙尘暴天气过程,目的在于通过利用 MM5 中尺度数值模式,在归纳影响沙尘暴天气过程天气系统的基础上,利用模式每 3 小时间隔输出的模拟结果分析高空两支急流的演变,及其在沙尘暴发生、发展、消亡的过程中所起到的作用,同时配合分析中高层物理量场的垂直与水平特征,揭示有双急流相伴的沙尘暴形成、发展和消亡的动力学特征及其机制,寻找具有预报意义的物理量特征。

第五章 模拟结果与实况对比分析

5.1 高空场对比

5.1.1 高空风场对比(风向杆式)

图 5.1 是 8 日 12 时高空风场实况与模式积分 12 小时得到的预报场。从 5.1a 和 5.1b 可以看到:高空风场得到了很好的模拟,模式对高空风的风向、风向切变以及气旋式涡旋及其位置都模拟得很准确。

图 5.1a, b 2001 年 4 月 8 日 12 时 500hPa 高度实况风场及模拟场

5.1.2 高度场对比

图 5.2a~f 分别是 8 日 12 时 850、500 和 200hPa 高度场实况与模式积分 12 小时得到的预报场。

从图中可以看出:850、500 和 200hPa 模拟高度场上的槽、脊、低涡区及等值线的位置与实况场大致相符,500hPa 和 200hPa 模拟高度场与实况非常吻合,850hPa 模拟场在 30~35° N, 90~105° E 附近的低涡较实况略偏南,中心值也略偏低。总体上看,高度场的模拟结果与实况是很接近的。

图 5.2a, c, e 4 月 8 日 12 时 850、500 和 200hPa 实况高度场

图 5. 2b, d, f 4 月 8 日 12 时 850、500 和 200hPa 模式积分
24 小时预报高度场

5. 1. 3 环流场对比

图 5. 3a~f 分别是 9 日 00 时 200、500、和 700hPa 高空实况流场与模式积分 24 小时得到预报场。从图中可以看出，实况场上高空急流的位置、走向以及 500、700 上的涡旋都得到了很好的体现。

图 5. 3a, c, e	4 月 9 日 00 时 200、500 和 700hPa 实况流场
图 5. 3b, d, f	4 月 9 日 00 时 200、500 和 700hPa 模式积分 24 小时预报流场

5. 1. 4 高低空急流对比

图 5. 4a~d 分别是 4 月 9 日 12 时 200hPa 和 500hPa 全风速场的实况图与积分 36 小时得到的预报场图。

图 5. 4a, c	4 月 9 日 12 时 200 和 300hPa 实况全风速场
图 5. 4b, d	4 月 9 日 12 时 200 和 300hPa 模式积分 36 小时 预报全风速场

可以看出, 200hPa 上, 模式模拟出的 2 支急流的走向与实况相近, 南支为东~西向, 北支为东北~西南向, 但模拟场的 2 个急流中心风速值均比实况值偏低, 而且北支急流的位置比实况偏东、偏南。说明模拟的高空急流比实况的移速快、强度较弱; 与 200hPa 类似, 300hPa 上也有 2 支急流, 模式模拟出了 2 支急流的走向和位置, 但模拟的高空急流中心风速值均低于实况中心值, 且北支急流的位置比实况偏东、偏南。

5. 1. 5 温度场的对比

图 5. 5a~f 分别是 4 月 9 日 12 时 850、500 和 200hPa 温度场的实况图与积分 36 小时得到的 9 日 12 时的预报场图。

图 5. 5a, c, e	4 月 9 日 12 时 850、500 和 200hPa 实况温度场
图 5. 5b, d, f	4 月 9 日 12 时 850、500 和 200hPa 模式积分 36 小时预报温度场

从图中可以看出, 无论是锋区位置、走向, 还是温度槽脊的位置, 预报场和实况场都对应得较好, 预报场等温度线的形状与实况场也很相似。500hPa 上, 预报场的-32℃等温线与实况场的形状基本一致, 但范围略大, 说明预报场的冷空气强度稍强, 南下略快。850hPa 和 200hPa 的情况也大体相似。

5. 2 地面场对比

5.2.1 地面风场对比（风向杆形式）

图 5.6a~b 分别是 4 月 9 日 12 时地面风场实况图与模式积分 36 小时得到的 9 日 12 时的地面风场预报图。比较 a、b 两图可以看出, 模拟的地面风场的形状与实况场一致, 风向、风力及地面气旋的位置对应较好。

图 5.6a 4 月 9 日 12 时地面风场实况图

图 5.6b 模式积分 36 小时得到的 9 日 12 时的地面风场预报图

5.2.2 地面全风速场对比

图 5.7a~b、图 5.8a~b、图 5.9a~b 分别是 4 月 8 日 12 时、4 月 9 日 00 时和 4 月 9 日 12 时地面全风速实况图与模式积分得到的地面全风速场预报图。分别对 a、b 两图进行比较, 可以看出: 8 日 12 时, 模拟场模拟出了 $85\sim 110^{\circ}$ E 的 2 个 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心, 但模拟场的 2 个风速中心比实况值均偏低, 高纬度的风速中心位置与实况吻合, 低纬度的风速中心比实况偏西东、偏南。9 日 00 时, $85\sim 110^{\circ}$ E 模拟场有 3 个 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心, 高纬度 45° N 以北的大值风速中心比实况场偏弱, 45° N 以南的风速中心比实况位置略偏北, 中心风速偏小, 35° N 以南的大值风速中心在实况场没有对应。9 日 12 时, 实况场上 $85\sim 120^{\circ}$ E 在 $(35^{\circ}$ N, 90° E)、 $(43^{\circ}$ N, 112° E) 和 $(34^{\circ}$ N, 113° E) 有 3 个 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心, 模拟场与高纬度 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心对应的是 10ms^{-1} 的风速中心, 低纬度的 2 个 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心比实况位置偏南。

从逐时次的对比可以看出: 模拟的地面风场对 35° N 以北的实况模拟得较好, 尤其是对高纬度 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心的移动模拟得好, 但模拟的 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的风速中心均比实况值偏小。积分后期模式对低纬度的风速大值中心模拟得不太好。模拟场 100° E 以西的风场与地面实况风场对应较差, 是青藏高原地形影响所致。

图 5.7a 4 月 8 日 12 时地面风场实况图

图 5.7b 模式积分 12 小时得到的 8 日 12 时的地面全风速场预报图

图 5.8a 4 月 9 日 00 时地面风场实况图

图 5.8b 模式积分 24 小时得到的 9 日 00 时的地面全风速场预报图

图 5.9a 4 月 9 日 12 时地面风场实况图

图 5.9b 模式积分 36 小时得到的 9 日 12 时的地面全风速场预报图

总的说来, 地面全风速场的模拟是较成功的。根据第 4.1.2 节中 $35\sim 46^{\circ}$ N 范围内地面实况场沙尘暴区与 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的相对大风区的较好应关系 (除去 40° 以北、 100° E 以西的

区域), 在以下的模拟分析中, 定义: 在 $35\sim 46^{\circ}\text{N}$ 范围内, 地面模拟全风速场上随时间东移的、且风速 $\geq 12\text{ms}^{-1}$ 的区域为沙尘暴区域。

5.2.3 地面气压场对比

图 5.10a~b 分别是 4 月 8 日 12 时地面气压场实况图与模式积分 12 小时得到的 8 日 12 时的地面气压场预报图。比较 a、b 两图可以看出, 模拟的地面气压场的形状与实况场一致, 实况冷高压的中心位于 $(50^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E})$, 中心强度为 1050hPa , 模拟冷高压的中心位于 $(50^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E})$, 中心强度为 1047.5hPa , 河套低压的位置与中心强度也对应得很好。可见模式对冷空气和地面低压的模拟是相当成功的。

图 5.10a	4 月 8 日 12 时地面气压场实况图
---------	----------------------

图 5.10b	模式积分 12 小时得到的地面气压场预报图
---------	-----------------------

总之, 利用 MM5 模式对 2001 年 4 月 8~9 日的沙尘暴天气过程进行模拟是比较成功的。无论是高空高度场、温度场、风场、流场的模拟, 还是地面风场、气压场的模拟, 都取得了较为理想的结果, 这就为后面的物理量诊断奠定了良好的基础。

第六章 数值模拟结果分析

6.1 热力条件分析

6.1.1 位温特征分析

图 6.1a~d 分别为模式积分 6 小时、9 小时、12 小时和 30 小时输出的位温沿各时次沙尘暴中心的经向垂直剖面图。积分 6 小时位温分布(图 a)的特征是: 从 $75\sim 107^{\circ}\text{E}$, 与沙尘暴区对应, 为对流稳定区; 8 日 09 时(图 b), 在 $109\sim 110^{\circ}\text{E}$ 上空, $850\sim 700\text{hPa}$ 高度有一个 310K 的高温区, 在其上空, $700\sim 550\text{hPa}$ 的层面上 $\frac{\partial\theta}{\partial z} < 0$, 大气处于不稳定状态, 沙尘暴区位于不稳定大气区西侧 1~3 个纬距内的对流中性区内; 8 日 12 时(图 c), 在 800hPa 以下, 沙尘暴区上空为对流中性层结, 是弱对流稳定区, 在 $115\sim 125^{\circ}\text{E}$ 上空, $900\sim 500\text{hPa}$ 高度形成了一个 310K 的低温区, 在其下方, 900hPa 的以下 $\frac{\partial\theta}{\partial z} < 0$, 大气处于不稳定状态, 沙尘暴区位于不稳定大气区西侧 4~6 个纬距的范围内。9 日 06 时(图 d), 沙尘暴区域大气处于稳定状态。

从各个时次的位温演变来看: 从沙尘暴发展到鼎盛阶段, 600hPa 以下处于位温弱不稳定或接近中性区域, 在减弱期处于稳定层结中。在沙尘暴发展到鼎盛阶段在低层有不稳定

层结出现, 有利于沙尘暴的发展。

图 6.1 a~d 积分 6、9、12、30 小时位温沿沙尘暴中心的
纬度~高度垂直剖面图

6.2 动力条件分析

在沙尘暴形成、发展和消亡的过程中, 高空急流起了重要的作用。下面重点分析高空急流特征及其高空急流对沙尘暴发生、发展、消亡所产生的影响。

6.2.1 高空西风急流演变特征分析

分别过各个时次的沙尘暴中心作 u 分量的经向垂直剖面图 6.2.1a~f。逐个时次进行分析, 可以看到: 8 日 00 时 (图 a), 在 $20\sim 47^\circ \text{N}$, 300hPa 以上有两支西风急流, 可分别称其为南支西风急流和北支西风急流 (以下简称南支和北支), 南支中心向北支倾斜。此时, 沙尘暴区主要位于 $37\sim 43^\circ \text{N}$, $83\sim 103^\circ \text{E}$ 的范围内。与沙尘暴区高空对应的是北支, 北支的中心风速为 60ms^{-1} , 高度在 250hPa 附近, 700hPa 以下风速均小于 10ms^{-1} 。8 日 06 时 (图 b), 南支中心风速增大, 向北支的倾斜度也增大; 北支中心风速减小, 中心升至 180hPa, 等风速线下伸, 在 $40\sim 43^\circ \text{N}$ 附近, 800hPa 高度上形成了 15ms^{-1} 的西风急流; 8 日 09 时 (图 c), 南支稳定少动; 北支中心风速增大到 50ms^{-1} , 风速中心回落到 250hPa, 北支下沉支的 15ms^{-1} 的等风速线伸展至地面, 高层动量强烈下传, 沙尘暴发展旺盛。8 日 12 时 (图 d), 北支中心加强, 15ms^{-1} 的低空西风急流回升至 850hPa 附近, 沙尘暴区位于高空风垂直切变大值区下方。9 日 00 时 (图 e), 北支和南支都向北移动了 1 个纬距, 在沙尘暴区南侧, 600hPa 以下有东风形成。低纬度对流层中低层的东风与西风分量反向, 东西风互有抵消, 削弱了中低层的西风风力, 沙尘暴明显减弱; 9 日 06 时 (图 f), 北支下沉支的风速带向高层回缩, 15ms^{-1} 的等风速线缩到了 850hPa 以上, 沙尘暴趋于消亡。

由此可见, 此次沙尘暴天气有较强的西风动量下传, 动量下传主要由北支急流完成。

图 6.2.1a~f 沿沙尘暴中心 8 日 00 时、06 时、09 时、12 时、
和 9 日 00 时、06 时的 u 分量的经向垂直剖面图

6.2.2 高空南北风急流演变特征分析

分别沿沙尘暴中心作 8 日 00 时、06 时、09 时、12 时和 9 日 00 时、06 时的 V 分量经向垂直剖面图 6.2.2a~f。逐个时次进行分析, 可以看到: 8 日 00 时 (图 a), 在沙尘暴区上空风场很弱, 基本处在准西风的气流中。06 时 (图 b), 在中低层生成 2 个北风风速中心, 一支在 $37\sim 43^\circ \text{N}$, 与沙尘暴区对应, 另一支位于 $48\sim 56^\circ \text{N}$, 中心风速均为 12ms^{-1} , 在 43°N 以北为南风区域, 沙尘暴主要出现在低层南北风的辐散场中。在中高层, 在 $40\sim 55^\circ \text{N}$, 600hPa 以上有南风生成, 中心风速为 15ms^{-1} , 北支急流的南风分量明显加大, 南支急流

仍为准西风。09时(图c),低层的两支北风略有减弱,但位置少动,中高层的南风有所发展,中心风速增加至 20 ms^{-1} , 37° N 附近的南北风垂直切变增大,沙尘暴区位于南北风辐散区附近。12时(图d),南风中心南压约2个纬距,低层的两支北风维持少变,沙尘暴仍很强盛;9日00时之后(图e、图f),高层南风向低纬度强烈发展南伸,与低层的南风贯通,形成了一支南风急流,急流的 15 ms^{-1} 的等风速线伸展到了850hPa以下,沙尘暴附近的南北风辐散减弱,沙尘暴减弱。

图 6.2.2a~f 沿沙尘暴中心的8日00时、06时、09时、12时、和9日00时、06时的V分量的经向垂直剖面图

从上面的分析可知:在此次沙尘暴过程中,高层南风分量场由弱到强。高空北支急流由准西风转为西南风急流,南支急流变化不大。在沙尘暴发展旺盛阶段,对沙尘暴产生贡献的为高层的南北风辐散,在沙尘暴强盛时,高层的南北风辐散明显,衰减时南北风辐散减弱。南北风的辐散场可加大高层的动量下传,使低层风速加大,而高空南风分量的加强南伸有利于水汽的向北输送从而导致沙尘暴减弱、消失,实况天气图上8日12时之后有降水发生正说明这一点。

6.2.3 高空急流动量下传分析

在这次沙尘暴过程中,有明显的动量下传。那么,在高空急流的u、v分量中,到底哪个分量的动量下传占主导地位呢?通过沙尘暴区中心(40° N , 105° E)作u、v分量的时间剖面图(图6.2.3a~b)。从图中可以看出:u分量在动量下传中起主要作用,v分量动量下传不明显。

图 6.2.3a~b 过沙尘暴区中心(40° N , 105° E)的u、v分量时间—高度垂直剖面图

综上所述,在这次沙尘暴的生成、发展过程中,高层的西风产生了较强烈的动量下传,低层的南风和北风分量共同促进了沙尘暴的发展,高层的南风却起了抑制沙尘暴发展的作用。

6.2.4 垂直环流、散度场与沙尘暴的形成分析

图6.2.4a~g为8日00时及模式积分6小时、9小时、12小时、24小时、30小时和36小时环流沿沙尘暴中心的垂直剖面图。从中可以分析到:沙尘暴初期(图a),在 25° N 以南、 45° N 以北皆为上升运动区,两支上升气流在对流层高层下沉,在 $45\sim 25^{\circ}\text{ N}$ 之间形成了正、反、正三支环流,沙尘暴主要处于下沉气流内。与之对应的散度场上(图a1),沙尘暴区上空200hPa以上为辐合层,200hPa以下为辐散层,有利于高层动量下传。8日06时(图b),垂直环流场的结构发生了明显的变化, $37\sim 48^{\circ}\text{ N}$ 从低到高为一致的上升运

动区,原 30~35° N 上空的反环流加强北移,反环流的上升支与 40° N 附近近地层的辐散上升气流形成强辐合。沙尘暴发生在北支急流下方。在沙尘暴发展过程中,垂直环流对于沙尘暴的动力、热力的垂直输送起着重要的作用,高空南北两支急流下方形成的反环流与沙尘暴有着直接的关系。反环流与非地转热成风相关联:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial v}{\partial p} \right] = -f \overline{v_T} \quad (12)$$

上式是热成风平衡式,其中 $\overline{v_T}$ 表示非地转热成风,由上式(12)可知,在急流的下部,流场上热成风大于温度场的热成风,即 $\overline{v_T} > 0$,西风随高度的增大大于南北温差所对应的温度场的热成风,即 $-f \overline{v_T} < 0$,从而产生和加强高纬上升、低纬下沉的反环流。急流以下的反环流有两方面的作用:一方面调整高低空西风垂直切变,使随高度增大的西风流场切变减小,高层动量向低层传递,增大低层风速;另一方面,由于北部上升绝热降温,南部下沉增温,导致南北温度梯度增大,使锋区加强。两者共同作用的结果,使非地转热成风向热成风平衡。由非热成风向热成风平衡的过程也就是环流加速制造动能的过程。因此,在沙尘暴期间,高空急流以下的反环流的形成与发展起到了动量下传和加强锋区的作用,反环流是我国北方大风沙尘暴形成的重要动力。从散度场上(图 b1)可以看到,沙尘暴区上空的散度场分布为:42° N 以北为低层辐合、高层辐散的强上升运动区,42° N 以南为低层辐散、高层辐合的下沉运动区,低层辐合、高层辐散产生的抽吸作用形成了大风沙尘暴,低层辐散、高层辐合的下沉区有利于高层动量下传,沙尘暴发生在低层辐散、辐合转换的区域内。

8日 09~12 时(图 c、图 d),沙尘暴强烈发展阶段,在北支急流的下方形成了一支强盛的正环流,在南支急流下方形成了一支反环流,北支急流 300hPa 以下的动量下传促进了沙尘暴的发展,沙尘暴位于正环流下方。但南支急流下方的反环流也有间接的作用:其上升支外围的偏北气流与正环流上升支在 35° N 附近辐合上升,使沙尘暴上空的下沉气流得以加强和维持。对应的散度场上,09 时(图 c1),沙尘暴区上空为低层辐散、高层辐合的强下沉运动,说明在沙尘暴强烈发展阶段,高层动量下传强烈,12 时(图 d1),沙尘暴鼎盛期,对应的散度场较弱,沙尘暴区上空为弱的辐合场。

9日 00~12 时(图 e、图 f、图 g),北支急流下方的正环流减弱,且随高度向北倾斜,南支急流下方的反环流消亡,沙尘暴明显减弱,零星的沙尘暴出现在正环流下沉支内。散度场上(图 e1、图 f1、图 g1),沙尘暴区上空为低层辐合、高层辐散的上升运动。

图 6.2.4a~g 8 日 00 时及模式积分 6 小时、9 小时、12 小时、24 小时、30 小时、36 小时垂直环流场沿沙尘暴中心的经向剖面图

图 6.2.4a1~g1 8 日 00 时及模式积分 6 小时、9 小时、12 小时、24 小时、30 小时、36 小时散度场沿沙尘暴中心的经向剖面图

由上述分析可知：在这次沙尘暴过程中，除 8 日 06 时外，北支高空急流下方生成了一支正环流影响沙尘暴的发生、发展，而在沙尘暴发展到鼎盛阶段，在南北急流之间（或南支急流下方）生成了一支反环流，这支反环流在沙尘暴减弱时段消亡，说明对其也有重要作用。可见南北两支高空急流的共同作用是造成该次沙尘暴的主要原因，北支急流有直接的作用，南支急流有间接的影响。在 8 日 06 时，沙尘暴上空从低到高为一致的上升运动区，是由于热力条件所致。

还可以看出：不论是上升还是下沉气流均可能产生沙尘暴，低层辐合，高层辐散（上升运动）导致的抽吸作用，可引起近地层形成大风和沙尘暴；强的下沉气流可导致动量下传有利于沙尘暴的形成。

6.2.5 非地转风场对高空急流、沙尘暴的动力诊断分析

在大气中，非地转风相对于地转风来说并不大，但它对于大气变化却有着非常重要的作用。非地转风使实际风穿越等压线，使有的地区空气质量堆积，有的地区空气质量减少，从而引起气压场的改变；同时，当风穿越等压线时，气压梯度力对风做功，促使风速变化，非地转风也是造成垂直运动的重要原因，而垂直运动则是产生天气的重要因素^[21]。本节主要讨论在沙尘暴天气过程中，非地转风是如何对急流产生作用，从而对沙尘暴产生影响的。

图 6.2.5a~e 为模拟的 250hPa 全风速图。4 月 8 日 00 时(图 a)，在 250hPa 高空有两支急流，北支急流轴略呈气旋式弯曲，急流中心西侧呈西北~东南向，东侧呈西南~东北向；南支为副热带偏西南风急流，急流轴呈反气旋式弯曲。此时在北支急流的右侧有沙尘暴出现。8 日 06 时(图 b)，北支和南支急流都向东移动了 2~3 个纬距，且两支急流的曲率都有所减小；8 日 12 时(图 c)，北支急流西部的急流中心消亡，东部加强并快速南移，急流范围扩大，急流轴出口处略有逆转；南支急流在东移过程中中段向北拱起，急流中心北移，南北两支急流中心相距最近，约 12 个纬距，在北支急流的前部出现了大片的沙尘暴。

9 日 00 时(图 d)，北支急流向东北移动，急流轴逆时针转成了强西南~东北向；南支急流的急流轴中部继续向北拱起。由于北支急流发展成西南急流，在北支急流的右后方、南支急流的左后方出现了大片的降水区，沙尘暴减弱，只出现在零星的测站。9 日 12 时(图 e)，北支急流快速向东北方向移动，急流轴在东移过程中持续逆转，南支急流也快速东移，强度减弱。可以看出：北支急流变化的过程就是由西风转为西南风并加强的过程，西南风的

加强，又是造成沙尘暴减弱的主要原因。因此，以下主要探讨非地转风场是如何造成了西南风急流的加强。

据非地转风与加速度公式：

$$\frac{dv}{dt} = -f(u - u_g) \quad (13)$$

负 $u - u_g$ 必引起南风分量加速。南风分量加强，使急流轴在东移的过程中产生逆时针方向的旋转。可见，在高空急流的移动过程中，非地转风场 $u - u_g$ 决定着急流轴转动的方向。

图 6.2.5a1~e1 分别为积分初始时刻 8 日 00 时及模式积分 6 小时、12 小时、24 小时和 36 小时输出的非地转风场分量 $u - u_g$ 图。与图 6.2.5a~e 结合分析各个时次，可以看出高空急流与非地转风分布的基本特征是：从 $75 \sim 110^\circ \text{E}$ ，北支急流处于强的负 $u - u_g$ 大值区，与南支急流相对应的是一条正负相间的带状分布的 $u - u_g$ 区，沙尘暴区位于负 $u - u_g$ 大值区内。在东移过程中，北支急流逆时针旋转，南支急流轴的中部明显向北拱起。

北支急流处于负 $u - u_g$ 区内，可使南风分量加强，使急流轴在东移的过程中产生逆时针方向的转动。而南支急流的中段也是负 $u - u_g$ 的大值中心，负 $u - u_g$ 引起南风的分量加速使南支急流中部向北拱起。

可见，在高空急流的移动过程中，非地转风场分量 $u - u_g$ 使北支急流出现逆转，使南支急流中部向北拱起。

图 6.2.5a~e	初始时刻 8 日 00 时和模式积分 6 小时、12 小时、24 小时、36 小时输出的 250hPa 全风速场
图 6.2.5a1~e1	初始时刻 8 日 00 时和模式积分 6 小时、12 小时、24 小时、36 小时输出的非地转风场分量 $u - u_g$ 图

6.2.6 位涡与高空急流及沙尘暴的发展演变

6.2.6.1 位涡

位涡，也就是位势涡度，是一个既包含热力因子也包含动力因子的物理量，国内外许多气象学者都曾经成功地用它来分析天气问题。Hoskins^[22]在 1985 年提出了如果不计非绝热加热和摩擦效应，那么等压面位涡与湿位涡同样具备守恒性，当湿位涡为负值时有可能

会出现对称不稳定,而且对流层上部或平流层的位涡扰动可以下传而影响到对流层下部及地面气旋的发展,还会在对流层低层或地面的斜压区激发出气旋。1998年,John Molinary^[23]分析了热带风暴 Danny (1985)与一个对流层高层正的位涡变化的相互作用,提出了叠加原理,即小尺度的正的高层大值位涡与低层热带气旋中心相叠加能使得热带气旋加强,叠加理论发展和深入了 Hoskins 的“位涡下传”理论。在国内,吴国雄等(1995、1997)^{[24][25]}从严格的原始方程出发,在导出湿位涡方程的基础上,证明了绝热无摩擦的饱和大气具有湿位涡守恒的特性,并由此研究了湿斜压过程中涡旋垂直涡度的发展,提出倾斜涡度发展“SVD”理论,吴国雄的倾斜涡度发展理论为位涡在暴雨天气研究中的应用提供了更深的理论依据。

许多气象学者也都曾成功地应用位涡理论分析了锋面、爆发性气旋、暴雨、强对流等天气的发生与发展问题,推动了动力气象学尤其是中尺度气象学的发展。Cho 和 Chan(1991)^[26]用同一个二维半地转绝热锋生模式分析了中尺度位涡变化和雨带的关系,探讨了中纬度雨带可能的成因,模式结果表明雨带里的潜热释放在位温和位涡场中又诱生出重要的扰动,而位涡场又影响着雨带的后期演变。JoLy 和 Thorpe (1990)^[27]利用位涡理论研究了二维锋上扰动的发展。在国内,王永中、杨大升(1984)^[28]研究了暴雨与低层流场的位涡问题,发现暴雨区基本上和高值位涡区相重合或者靠得很近,并且二者的发展过程也比较一致。盛华(1984)^[29]对“81.7”大暴雨位涡与相当位涡的诊断分析中再次显示出暴雨区与位涡场基本一致的特点,并指出位涡场比涡度场更能表现暴雨的移动和强度变化。李丁民(1987)^[30]将能量位涡平衡方程用于暴雨的诊断分析中,得到暴雨与能量位涡的正中心以及相当能量位涡负中心相对应这一结论,从能量角度揭示了暴雨天气特征。1994年陆尔、丁一汇^[31]应用位涡分析讨论了91年江淮地区特大暴雨冷空气活动的特征,由于位涡在无粘、绝热的斜压大气中沿气块守恒,所以位涡与位温和比湿一样,可以作为跟踪气块移动的又一物理量。用位涡来示踪冷空气的轨迹,为业务天气预报提供了新的工具。

位涡应用在暴雨研究中已经取得了很多研究成果,但在沙尘暴天气的研究中应用的还较少。在本节中,我们尝试研究位涡在高空急流和沙尘暴发生、发展的过程中所起的作用。

等压面上位涡的表达式为:

$$MPV = -g\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right)\frac{\partial \theta_e}{\partial p} - g\left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x}\right)$$

设 $\zeta + f = \zeta_a$, $MPV1 = -g(\zeta + f)\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ 表示惯性稳定度 $(\zeta + f)$ 和对流稳定性

$(-g \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p})$ 的作用,称为正压位涡项, $MPV2 = -g(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x})$ 包含湿斜压性

$(\nabla_p \theta_e)$ 和水平风垂直切变的贡献,叫做斜压位涡项。位涡的单位是 $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{kg}^{-1}$, 记为 PVU。下面我们分别对 250hPa 位涡正压项、位涡斜压项、位涡的水平分布及位涡正压项、位涡斜压项及位涡垂直分布特征以及与有双急流相伴的沙尘暴过程的关系进行分析。

6.2.6.2 250hPaMPV1、MPV2 和 MPV 的分布以及与高空急流、沙尘暴区的演变特征

由于造成沙尘暴的北支急流的中心多在 200~300hPa 之间,因此在这里主要讨论 250hPaMPV 与高空急流以及沙尘暴的对应关系。

图 6.2.6.2abcdef 分别为初始时刻 8 日 00 时和模拟积分 6 小时、12 小时、18 小时、24 小时和 30 小时的 250hPa MPV1 分布图。8 日 00 时 250hPa MPV1 分布图上(图 a), 105°E 以西在中高纬有一支正的大值位涡区,位于贝湖西南方,中心在 $(45^\circ \text{N}, 95^\circ \text{E})$ 附近,中心值为 7.6PVU,代表强冷空气;另外在 $(27 \sim 32^\circ \text{N}, 80 \sim 115^\circ \text{E})$ 的范围内,呈带状分布着另一支正的大值位涡区,从西到东排列着 4 个中心,中心强度分别为:2.0、2.4、2.4、4.8PVU;在两支正的大值位涡区之间,是一支低值位涡区,分布有 2 个负值中心,中心值为 -0.2PVU。与 250hPa 同时刻的全风速图(图 4.9a)进行对比,可以清楚地看出:两支正的大值位涡区与南、北两支急流有很好的对应关系,北支急流位于高纬正的大值位涡区西南侧等值线密集区到正值位涡低值区,南支急流位于中低纬正的大值位涡区南侧等值线密集区域,两支急流轴分别与正的大值位涡区南侧的密集等值线接近平行。8 日 06 时(图 b),中高纬正的大值位涡区加强向东移动,其南侧的北支高空急流随之东移,急流轴略有逆转;中低纬正的大值位涡区也快速东移,南支高空急流与其走向一致。两支正的大值位涡区之间的负位涡区明显加强,范围扩大,中心强度增强为 -0.8PVU,大片的沙尘暴发生在中高纬正的大值位涡区中心东部,位于负值位涡中心的东北侧。8 日 12 时(图 c),中高纬正的大值位涡区加强东移,北支高空急流(见图 4.9b)随之向东北方向伸展,急流轴明显逆转,呈东北~西南向分布,中低纬正的大值位涡在东移中断裂成东、西两部,两个中心分别呈西南~东北向和西北~东南向,南支高空急流轴中部向高纬度伸展,呈反气旋弯曲,同时负位涡区继续向东移动,中心移至 $(34^\circ \text{N}, 104^\circ \text{E})$ 附近,中心值维持 -0.8PVU,大片的沙尘暴区位于中高纬正的大值位涡区中心东南部~位涡线密集区~负值区,即中高纬 MPV1 前部梯度大值区附近。8 日 18 时~9 日 00 时(图 d、e),中高纬正的大值位涡继续向东伸展,强度略有减弱,北支西南急流随之向东北方向伸展,南支急流走向与中低纬正的大值位涡区保持一致,但中低纬正的大值位涡区明显减弱,说明中低纬的暖湿气流在加强发展。由于西南急流强烈发展,在

8日12时~9日00时,西北和华北出现了大范围降水,有效地抑制了沙尘暴的发展。9日06时(图f),中高纬正的大值位涡区继续减弱,中低纬的正大值位涡减弱,沙尘暴和降水天气也随之减弱。

以上分析表明:250hPa上,中高纬度和中低纬度分别有两支正的大值位涡区,北支特强,反映了南下冷空气的强度很强,南支较弱。两支MPV1正的大值位涡区与南、北两支急流有很好的对应关系:北支急流位于高纬MPV1正的大值位涡区西南侧等值线密集区到的正位涡低值区,南支急流位于中低纬MPV1正的大值位涡区南侧等位涡线密集区域,两支急流的走向分别与两支MPV1正的大值位涡区南侧的密集等值线走向一致,沙尘暴发生在中高纬正位涡的梯度大值区附近,同时也位于负MPV1位涡中心的北侧。

图 6.2.6.2abcdef 初始时刻 8 日 00 时和模拟积分 6 小时、12 小时、18 小时、24 小时和 30 小时的 250hPa MPV1 分布图

从相应时次的MPV2图(图略)可以看出:与MPV1负值区对应的区域内,MPV2经历了由负值(8日00时)减弱变为正值(8日09时),正值变为零值(8日12时),零值又变为负值(8日12时),负值加强东移(8日12时~9日00时),然后在东移中负值又逐渐减弱(9日00时~12时)的一个过程。在沙尘暴发生区域的前部,MPV1、MPV2反号。

再来看MPV和沙尘暴区随时间的演变:图6.6.2.ab1c1d1e1f1分别为初始时刻8日00时和模拟积分6小时、12小时、18小时、24小时和30小时的250hPaMPV分布图。可以看出:MPV的正值区和负值区的演变与MPV1的演变基本一致。再与逐个时次的地面全风速场的大值风速中心(代表沙尘暴区域)(图略)进行对比:沙尘暴区总是位于MPV负值区的北方,而且随着MPV负值强度的增强而增强,随着MPV负值强度的减弱而减弱。当沙尘暴过程后期降水出现时,MPV负值仍然存在,但强度有所减弱,当沙尘暴和降水都趋于消亡时,MPV负值也逐渐被弱的正值所取代。

从上述的分析可以看出:

- ① 在250hPa,沙尘暴区与MPV负值区对应得较好,沙尘暴区总是位于MPV负值区的北侧。
- ② 在沙尘暴区域前部,MPV1和MPV2反号,且 $MPV < 0$,说明在沙尘暴发生区域前部,对流层高层有对称不稳定。在对称不稳定区,高空大气辐合下降区受到倾斜向下的力的作用,加速下沉,到地面后产生空气的质量堆积,并向四周扩散,在其他地区形成空气的辐合,造成上升运动,进一步加强了倾斜环流的上升支^[32],有利于引起地面大风,促进了沙尘暴的发展。

图 6.2.6.2a1b1c1d1e1f1 初始时刻 8 日 00 时和模拟积分 6 小时、12 小时、18 小时、24 小时和 30 小时的 250hPa MPV 分布图

6.2.7 位涡正压项 MPV1 的垂直分布

通过分析 MPV1 的垂直分布,可以进一步了解 MPV1 在垂直方向上的结构特征与沙尘暴的关系。先来分析纬向剖面图。图 6.2.7abcd 分别为 8 日 00 时及模式积分 06、09、12、24 小时沿沙尘暴中心所作的 MPV1 的纬向垂直剖面图。可以看出:8 日 00 时(图 a), 105°E 以东、对流层中高层为强大的位涡正值区,代表强盛的新疆冷空气,在强大的位涡正值区前部,对流层低层的位涡正值区则与地面气旋相对应,在其高层,300hPa 高度有一个位涡低值区。8 日 06 时(图 b)的沙尘暴发展阶段,与强冷空气对应的强大的正值位涡呈漏斗状向东向下延伸,与中尺度气旋相对应的对流层低层的正值中心东移,300hPa 高度的位涡低值区也东移至 100°E 附近,此时河套气旋最强,沙尘暴发生在两个位涡正值区之间。高层位涡向下注入对气旋的加深移动所起的作用是明显的。8 日 09 时(图 c),与中尺度气旋相对应的位涡正值区有所减弱,中尺度气旋也略有减弱,300hPa 高度的位涡低值区发展并西伸接地,沙尘暴位于位涡负值区及其东西两侧的正负位涡交界处。8 日 12 时(图 d),强大的位涡正值区继续向东移动,高位涡舌略有回缩,中尺度气旋减弱为地面倒槽。9 日 00 时,强大的位涡正值区东移减慢,高位涡舌回缩,强冷空气减弱,沙尘暴也趋于减弱。

接下来分析经向垂直剖面图。图 6.2.7. fghij 分别为 8 日 00 时及模式积分 06、09、12、18 小时沿沙尘暴中心所作的 MPV1 的经向垂直剖面图。从中可以看出:8 日 00 时(图 e),在 $57\sim 40^{\circ}\text{N}$ 从地面以上皆为正位涡,在 $40\sim 35^{\circ}\text{N}$ 的上空,780hPa 以下为负位涡,但强度较弱,中心值为 -0.2PVU ,另外在 28°N 以南为一强的负位涡区;8 日 09 时(图 g),位涡的分布发生了明显的变化,代表强冷空气的高值正位涡呈漏斗状向下伸展到 750hPa 的高度,在 38°N 附近 700hPa 处出现了位涡负值中心,中心为 -0.4PVU ,在 36°N 附近 250hPa 处也出现了位涡负值中心,中心也为 -0.4PVU ,沙尘暴发生在正负位涡交界处,同时, 28°N 以南的强负位涡区向高层伸展,说明低纬度有暖湿气流的辐合;8 日 18 时(图 i),原位于 28°N 以南的强负位涡区向高纬度伸展,与从强大正位涡分离出的一个正位涡区在 36°N 附近相遇,冷暖空气的交锋带来了降水,降水发生在 $36\sim 38^{\circ}\text{N}$,正负位涡交界处。

由以上分析可以得出: **位涡的正值区反映了强冷空气和气旋性环流的活动。**

图 6.2.7abcd	8 日 00 时及模式积分 06、09、12 小时 沿沙尘暴中心的 MPV1 纬向垂直剖面图
图 6.2.7efghi	8 日 00 时及模式积分 06、09、12、18 小时 沿沙尘暴中心的 MPV1 经向垂直剖面图

6.2.8 位涡斜压项 MPV2 的垂直分布

图 6.2.9abcd 分别为 8 日 00 时及模式积分 06、09、12 小时沿 40°N 作的斜压位涡纬向垂直剖面图。沙尘暴发生初期,8 日 00 时(图 a),在 89°N 上空,在 200hPa 和 500hPa

分别有强的负值中心,中心数值都大于1.0PVU;80~115°E的低层分布着3个弱的正值中心,这说明在沙尘暴初始阶段,高低层大气的斜压性就很强;在沙尘暴发展最强阶段,8日06时(图b)200hPa和500hPa的强的负值中心减弱,且都向低层的伸展,低层的弱正值区也有所减弱,说明在沙尘暴发展阶段近地层的斜压性有所减弱;8日09~12时(图c、图d),108°E上空,800~700hPa之间有负值区发展,说明大气的斜压性有所增强。8日18时(图略)以后,高层和中层负值区在东移中略有加强,800~700hPa之间的负值区加强明显,低层斜压发展,对应降水发生。

为了更好地说明位涡斜压项的垂直分布,过沙尘暴中作8日00时及积分06、09、12、24、30、36小时的斜压位涡经向垂直剖面图(图6.2.9efghijk)。逐个时次进行分析,可以看出:8日00时的MPV2图上(图e),35—45°N上空为强MPV2负值区,以300hPa为界分为上、下2个大值中心,中心强度分别为0.75PVU、0.7PVU,且2个中心在垂直方向上叠置分布;与之对应的环流场上(见图6.2.9a),在37°N附近的低层有气流的辐合,沙尘暴区(37—43°N)上空为一支南部上升、北部下沉的正环流,说明沙尘暴初期大气的斜压性很强,垂直对流旺盛。8日06时(图6.2.9f),沙尘暴区上空(37—48°N)MPV2的负值区急剧减弱,对应的环流场上(见图6.2.9b),沙尘暴区上空为上升气流,垂直对流明显减弱。8日09时(图6.2.9g),高层MPV2的大的负值中心北移,而低层的MPV2的大的负值中心南压,两个中心强度比06时有所加强,600hPa~300hPa为弱的MPV2负值区,近地层开始出现MPV2的正值区,对应的环流场(见图6.2.9c)上,在37°N附近上升气流有所加强,40°N上空有下沉气流生成,垂直环流比06时有所加强;8日12时,MPV2图上(图6.2.9h),35—45°N上空700hPa以上MPV2负值区明显加强,高层和低层的2个MPV2的负值区连为一体,且随高度略向北倾斜,对应的环流场(见图6.2.9d)上,35°N上空有强的上升气流发展,同时在其北部有下沉气流,垂直对流旺盛,在150hPa左右生成一支反环流,600hPa为强烈发展的正环流,说明在沙尘暴鼎盛时期,大气的斜压性明显加强;9日00时,36—46°N上空MPV2(图6.2.9i)负值区加强,从低层到高层向北倾斜增大,负值区的下沉支向低层伸展,沙尘暴区(42—44°N)低层为弱的MPV2的正值区,对应的环流场(见图6.2.9e)上,高层的反环流已消亡,中低层的正环流也有所减弱;9日06时(图6.2.9j),沙尘暴区上空MPV2的负值区仍很强,但随高度的倾斜度也逐渐加强,低层的垂直环流减弱(见图6.2.9f)。

以上分析表明:沙尘暴初期,MPV2的负值很大,大气的斜压性很强,对流旺盛;在沙尘暴发展期(8日06时),大气的斜压性和垂直对流明显减弱;在沙尘暴旺盛期(8日09—12时),大气的斜压性逐步增强,垂直环流发展到鼎盛;当沙尘暴减弱时(9日00—12时),大气的斜压性仍比较强,低层环流维持。

图 6.2.8abcd	8 日 00 时及模式积分 06、09、12 小时沿沙尘暴中心的斜压位涡纬向垂直剖面图
图 6.2.8efghijk	8 日 00 时及模式积分 06、09、12、24、30、36 小时过沙尘暴中心的斜压位涡纬向垂直剖面图

第七章 结论和讨论

本文对 2000~2004 年 5 年的沙尘暴与高空急流的关系作了统计分析, 并利用 MM5 模式对 2001 年 4 月 8 日 00 时~9 日 12 时的强沙尘暴天气过程进行了数值模拟和诊断分析, 得出如下结论:

(1) 沙尘暴具有很强的季节和日变化规律; 有三个多发区; 范围大、强度强的沙尘暴大都伴有强蒙古气旋和冷锋。沙尘暴与高空急流总是相伴出现。急流造成的沙尘暴可分为 2 类: 单急流型和双急流型。沙尘暴多出现在西风、西南风、西北风急流的左侧及其右后方, 以及西北+西南双急流中心的左前+左后方。统计中还发现, 在一些双急流中存在急流异变, 急流异变对沙尘暴的发生和发展具有重要作用。

(2) 模拟中发现: 在这次沙尘暴的生成、发展过程中, 高层的西风产生了较强烈的动量下传, 低层的南风 and 北风分量共同促进了沙尘暴的发展, 高层的南风却起了抑制沙尘暴发展的作用。

(3) 南北两支高空急流的共同作用是造成该次沙尘暴的主要原因, 北支急流有直接的作用, 南支急流有间接的影响。不论是上升还是下沉气流均可能产生沙尘暴, 低层辐合, 高层辐散(上升运动)导致的抽吸作用, 可引起近地层形成大风和沙尘暴; 强的下沉气流可导致动量下传有利于沙尘暴的形成。

(4) 在高空急流的移动过程中, 非地转风分量 $u - u_g$ 决定着南北两支急流轴的转动的方向。

(5) 两支 MPV1 正的大值位涡区与南、北两支急流有很好的对应关系: 北支急流位于高纬 MPV1 正的大值位涡区西南侧等值线密集区到的正位涡低值区, 南支急流位于中低纬 MPV1 正的大值位涡区南侧等值线密集区域, 两支急流的走向分别与两支 MPV1 正的大值位涡区南侧的密集等值线走向一致, 沙尘暴发生在中高纬正位涡前部梯度大值区附近, 同时也位于负 MPV1 位涡中心的北侧。

沙尘暴区与位涡负值区对应得也较好, 总是位于 MPV 负值区的西北方。在沙尘暴区域前部, MPV1 和 MPV2 反号, 且 $MPV < 0$, 说明在沙尘暴发生区域前部, 对流层高层有对称

不稳定。在对称不稳定区，高空大气辐合下降区受到倾斜向下的力的作用，加速下沉，到地面后产生空气的质量堆积，并向四周扩散，在其他地区形成空气的辐合，造成上升运动，进一步加强了倾斜环流的上升支，有利于引起地面大风，促进了沙尘暴的发展。

分析位涡的垂直结构，可以知道：强大的位涡正值区，与强盛的冷空气对应，较弱的位涡正值中心与地面上的中尺度气旋相对应，沙尘暴位于位涡负值区及其两侧的正负位涡交界处。位涡正值区反映了冷空气和气旋性环流的活动，表明了冷空气和地面气旋在沙尘暴天气形成中的重要作用。沙尘暴初期，MPV2 的负值很大，大气的斜压性很强，垂直对流旺盛；在沙尘暴发展期，大气的斜压性和垂直对流明显减弱；在沙尘暴旺盛期，大气的斜压性逐步增强，垂直环流发展到鼎盛；当沙尘暴减弱时，大气的斜压性仍比较强，低层环流维持。

本文对高空急流与沙尘暴关系的模拟分析限于个例分析，所得结论有待于进一步的验证和深入讨论。

参考文献

- [1] 杨德保, 尚可政, 王式功. 沙尘暴失控分布特征[A]. 沙尘暴[C]. 北京: 气象出版社, 2003: 1-5.
- [2] 王式功, 董光荣, 陈惠中, 李希良, 金炯. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠 2000, 20(4): 351-357.
- [3] 王式功, 杨德保, 金炯等. 我国西北地区沙尘暴时空分布及成因分析[A]. 中国科协第二届青年学术年会论文集资源与环境科学分册[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 364-370.
- [4] Hankin E H, On dust raising wings and descendeding currents, Part VI[J]. India Met Memoris, 1921, 22(1): 80-84
- [5] Morals H C, A case study of a dust storm weather situation in the Sudan in April 1973, Pure. Appl. Geophys, 1981, 119: 658-676.
- [6] Ott S T, Ott A, Analysis of a Tran-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data[J], Mon Wea Rev, 1991, 119(8): 1832-1850.
- [7] Westphal D L, O B Toon and T N Carlson, A two dimensional numerical investigation Of the dynamics and Microphysics of Saharan dust storms. J. Geophys. Res., 1988, 92: 3029
- [8] 刘景涛, 郑明倩. 华北北部黑风暴的气候学特征[J]. 气象, 1998, 24(2): 39-44.
- [9] Jaureguie, The dust storms of Mexio City[J]. Ihter. J. Climatology, 1989, 9(2): 169-180.
- [10] Brase A. J. and W. C. Nicking the relationship of weather types to dust storm generation in Arizona. J. Climatory[J]. 1986, 6(3): 255-270.
- [11] 贺慧霞, 钱正安, 瞿章. 我国西北地区部分沙尘暴个例谱[J]. 大气情报, 1993, 30(4): 14-18.
- [12] 叶笃正, 丑纪范等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策, 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.
- [13] 朱乾根. 暴雨维持和传播的机制分析[J]. 南京气象学院学报, 1979, 1(1): 1-7.
- [14] 陈久康, 丁治英. 高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统[A]//丁一汇. 中尺度天气和动力学研究[C]. 北京: 气象出版社, 1996: 172-178
- [15] 孙淑清, 翟国庆. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 1980, 4(4): 327-337.
- [16] 翟国庆, 丁华君, 孙淑清. 与低空急流相伴的暴雨天气的诊断研究[J]. 大气科学, 1999, 23(1): 112-118.
- [17] 翟国庆. 对流层高层偏北气流在梅雨暴雨中的作用[J]. 气象学报, 1998, 56(1): 68-76.

- [18] 钱正安等.关于甘、宁部分地区“96.5.5”特强沙尘暴灾害的调查报告[J]大气情报,1993,30(4):1-16.
- [19] 黄安丽,高坤.对流层高低空急流耦合的动力学分析[J].杭大学学报,1982,9(3):356-364.
- [20] 尹树新,赵亚贤,西风急流异变对“5.5”西北地区沙尘暴的影响.中国沙尘暴研究,北京:气象出版社,1997:65-69
- [21] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文等.天气学原理与方法[A]北京:气象出版社,2000:165~169
- [22] Hoskins B J, McIntyre M E and Robertson A W on the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Quart J R, Meteor soc*, 1985, vol. 111(470):877-946.
- [23] John Molinary et al. Potential vorticity analysis of tropical cyclone intensification. *J Atmos Sci*, 1998, Vol 55(16):2632-2644.
- [24] 吴国熊,蔡雅萍,唐晓青,湿位涡和倾斜涡度发展,气象学报,1995, Vol 53(4):387-404, (1995)
- [25] 吴国熊等,风垂直切变和下滑倾斜涡度的发展,大气科学,1997, Vol 21(3):273-281, (1997)
- [26] Han-Ru Cho and Douglas S T, Chan. Meso- β -scale potential vorticity anomalies and rainbands, Part II: Moist model simulations. *J Atmos Sci*, 1991, Vol. 48(2):331-341.
- [27] Joly and A J Thorpe. Frontal instability generated by tropospheric potential vorticity. *Quart J R, Meteor Sci*, 1990, Vol. 116:525-560.
- [28] 杨大升,王永中,暴雨和低层流场的位涡,大气科学,1984, Vol 8(4):411-417.
- [29] 盛华,“81.7”大暴雨位涡与相当位涡的诊断分析,高原气象,1984, Vol 3(2):10-17
- [30] 李丁民,能量位涡平衡方程及其在暴雨诊断分析中的应用,高原气象,1987, Vol 6(3):193-206
- [31] 陆尔,丁一汇,李月洪,1991年江淮特大暴雨的位涡分析与冷空气活动,应用气象学报,5(3):267-274, (1994)
- [32] 张颖,张明.线性与非线性对称不稳定的数值试验.气象学报,1995,53(4):225.
- [33] 马光,登陆北上台风位涡倾向与暴雨关系的研究,南京气象学院2003年硕士研究生论文.
- [34] 王建鹏,西北地区沙尘暴天气过程的中尺度数值模拟及诊断分析,南京气象学院2003年硕士研究生论文.
- [35] 赵玉广,华北地区沙尘暴天气形成机制的分析研究,南京气象学院2003年硕士研究生论文.

致 谢

硕士论文终于完成了。掩卷沉思，不禁感慨万千……

首先要真诚地感谢我的导师丁治英老师。在一年的学习过程中，导师不倦的教诲、严格的要求、严谨的治学作风、求实创新的科学态度和敏锐独特的分析能力使我受益非浅，尤其是导师仁慈宽厚的品格、废寝忘食的敬业精神、平易近人的态度以及对事业的执着追求将会成为我今后学习的榜样。值此论文完成之际，谨向丁老师表示我衷心的感谢和深切的敬意。在今后的工作生活中，我一定把导师的教诲铭记在心，努力工作，正直做人，以报答导师的对我的深切关怀和谆谆教导之情。

感谢山西省气象局给了我这次宝贵的进修机会，感谢单位的领导和同事对我默默的支持和帮助，他们为我的学习提供了充足的时间和尽可能的条件。

感谢大气科学系的朱银萍老师、研究生部的马革兰、吴鹏飞老师和图书馆的朱紫阳等老师，学习期间他们对我在学习、生活上给予了很大的关心和帮助。

感谢老同学任璞为我提供了论文所需的部分资料，感谢在校读研的老同学邱明宇和刘秀在生活上给了我极大的关怀和帮助。

感谢王丛梅、张润琼、王丽荣、王淑云、陈艳、张雪梅、杨国锋、刘敏等同学，作论文期间大家互相帮助，互相鼓励，互相学习，在一起度过了一段美好的时光，结下了终身难忘的友谊。

最后，要深深地感谢我的公婆、父母、儿子，特别是我的丈夫师克杰。在我攻读硕士学位的四年时间里，他们是我坚实的后盾，是他们给了我莫大的鼓励，使我遇到困难的时候有勇气去克服；是他们的默默牺牲和奉献，使我能够最终完成了学业。

附

图

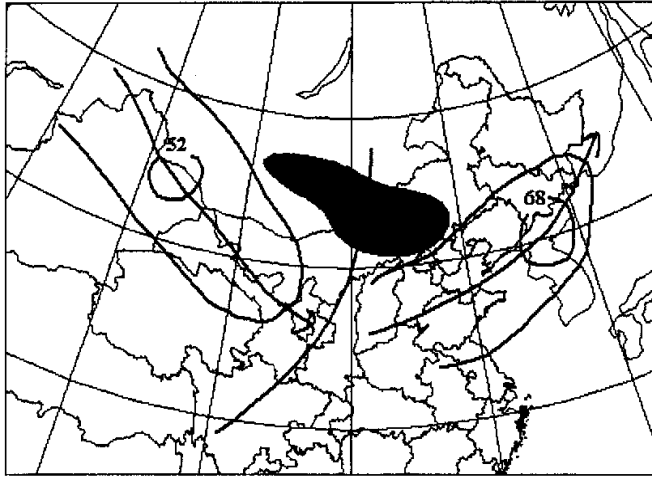


图 2.1 出现频率最高的沙尘暴型式及沙尘暴区分布
(阴影区为沙尘暴区)

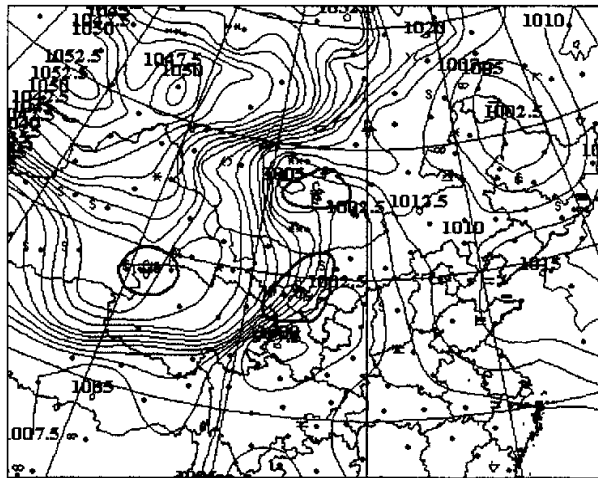


图 4.1 2001 年 4 月 8 日 06 时(世界时,以下同)地面实况图
(粗黑线圈内为沙尘暴区域)

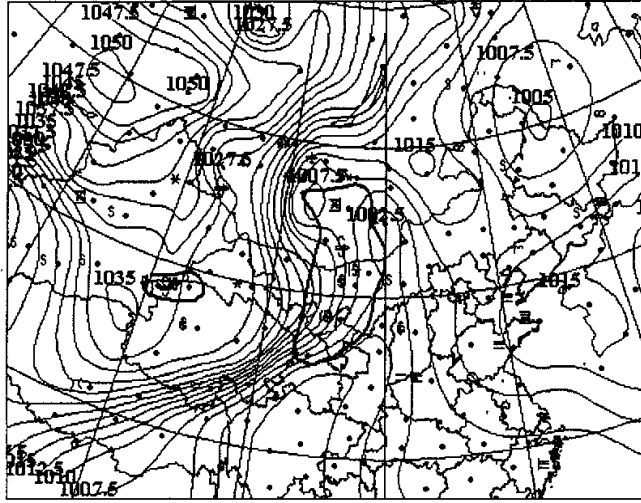


图 4.2 2001 年 4 月 8 日 09 时地面实况图
(粗黑线圈内为沙尘暴区域)

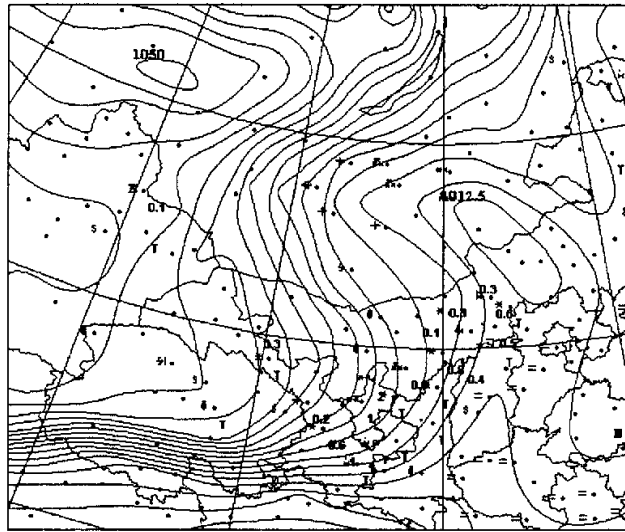


图 4.3 2001 年 4 月 8 日 18 时地面实况图

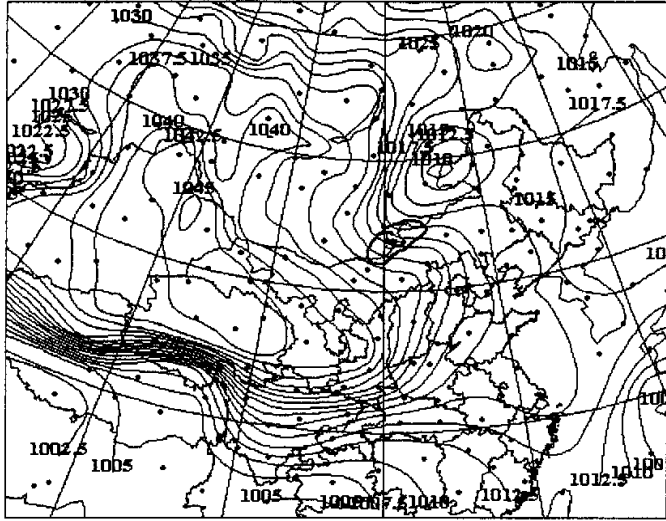


图 4.4 2001 年 4 月 9 日 12 时地面实况图
(粗黑线圈内为沙尘暴区域)

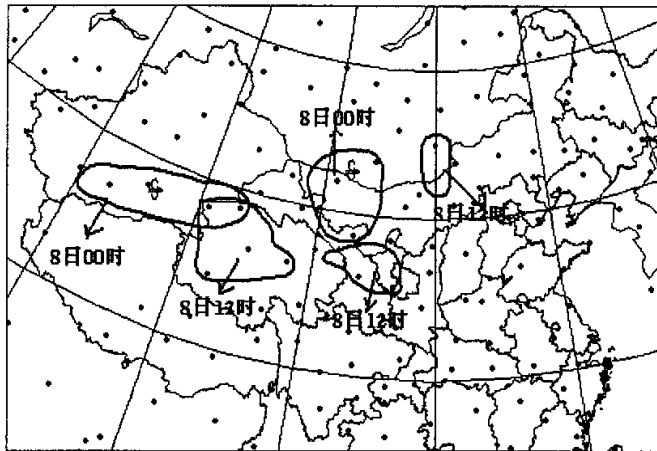


图 4.5 2001 年 4 月 8 日 00 时~8 日 12 时沙尘暴活动图

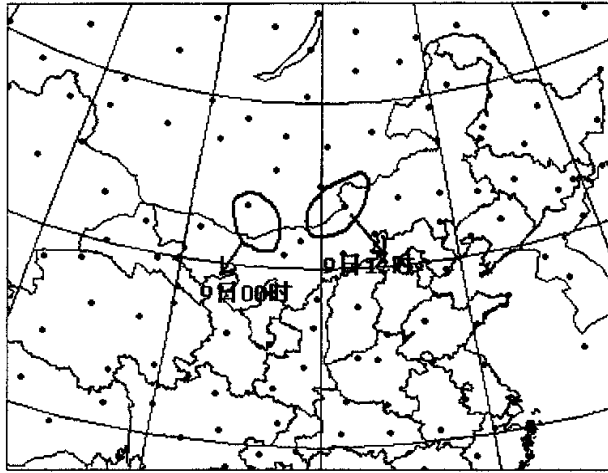
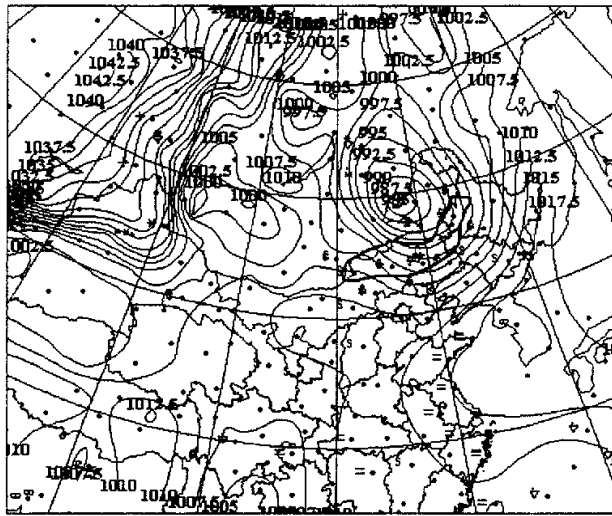


图 4.6 2001 年 4 月 9 日 00 时~12 时沙尘暴活动图



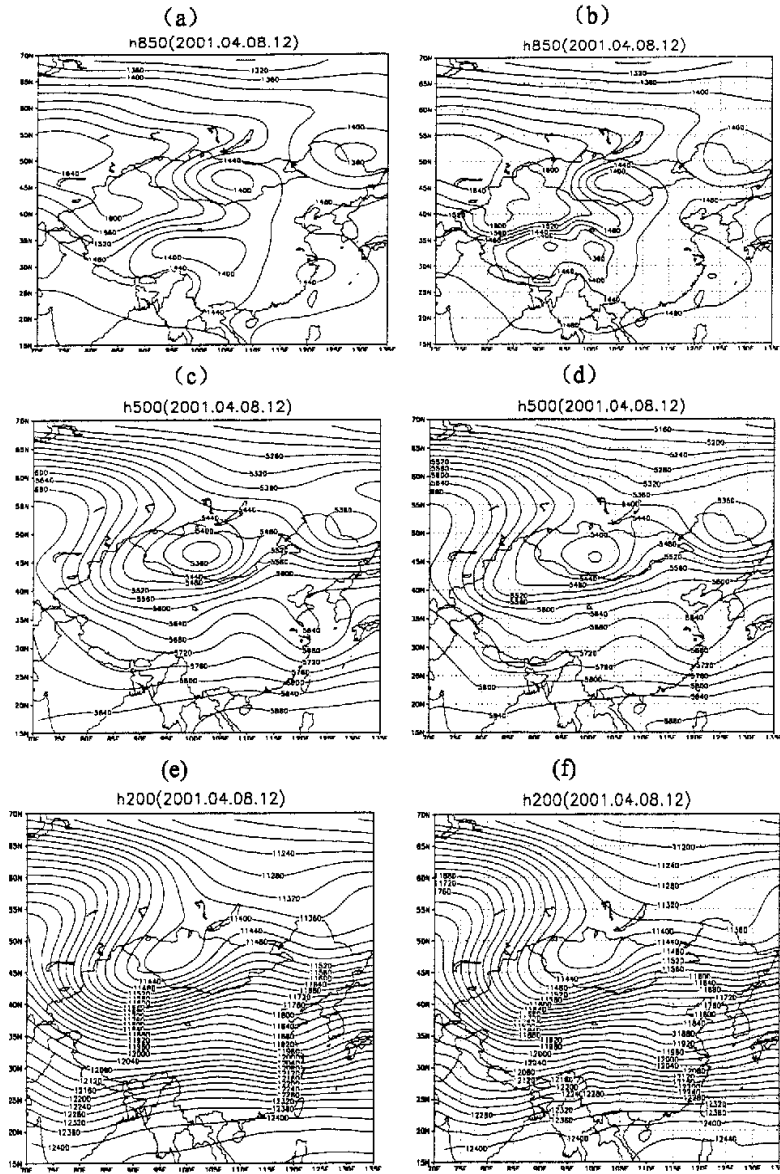


图 5.2 4月8日12时模式积分12小时高度场比较(单位: 位势米)

- (a): 850hPa 实况 b: 模式积分12小时850hPa模拟图,
 (c): 500hPa 实况 d: 模式积分12小时500hPa模拟图,
 (e): 200hPa 实况 f: 模式积分12小时200hPa模拟图)

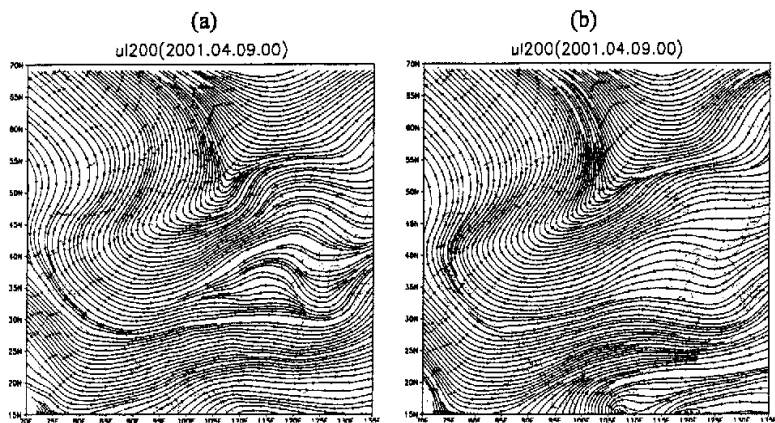


图 5.3 4月9日00时200hPa 流场
(a: 实况 b: 模式积分 24 小时输出的流场模拟图)

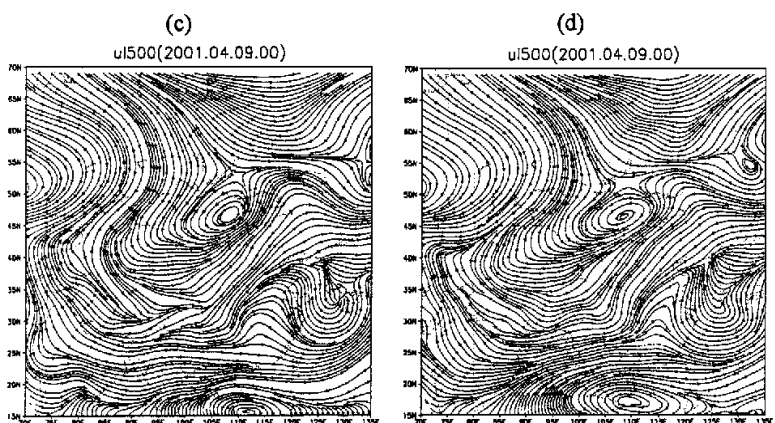


图 5.3 4月9日00时500hPa 流场
(c: 实况 d: 模式积分 24 小时输出的流场模拟图)

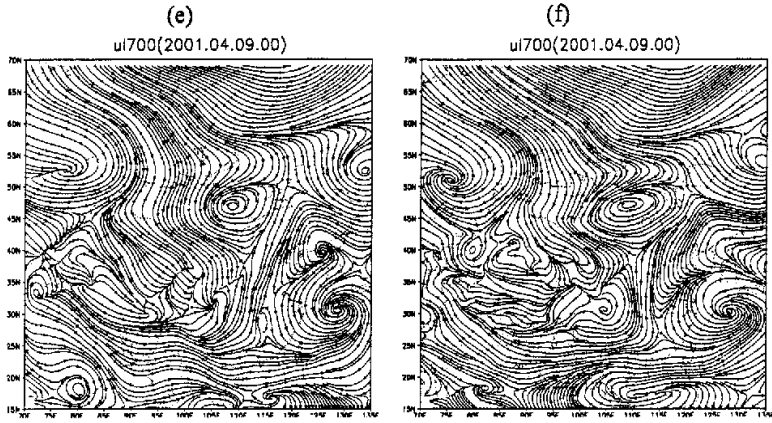


图 5.3 4月9日00时700hPa流场
(e: 实况 f: 模式积分24小时输出的流场模拟图)

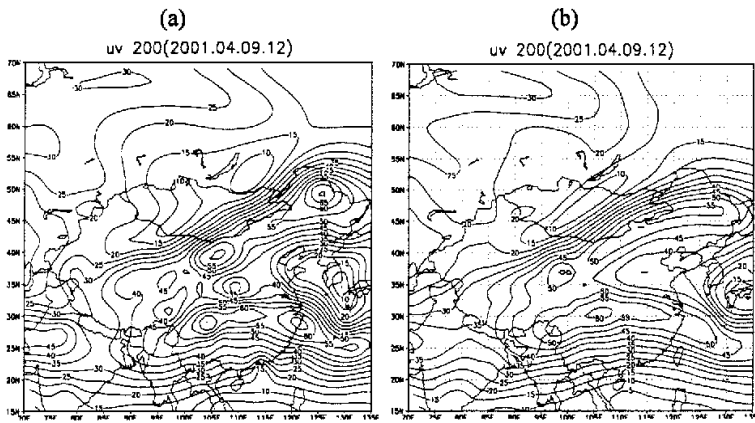


图 5.4 4月9日12时200hPa全风速场 (单位: ms^{-1})
(a: 实况 b: 模式积分36小时输出的全风速场模拟图)

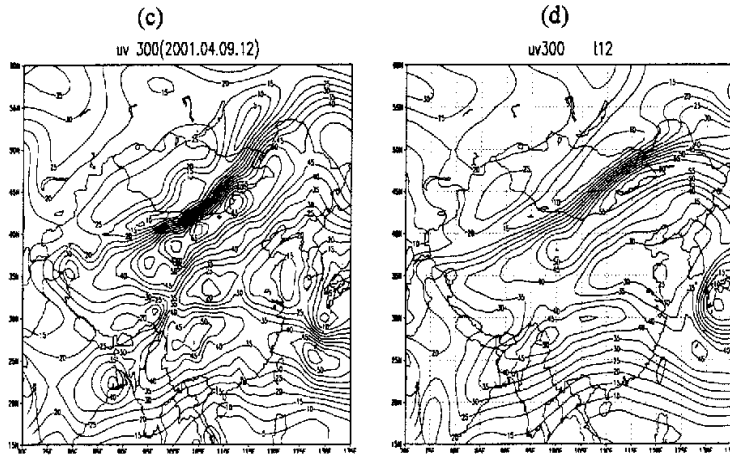


图 5.4 4月9日12时300hPa全风速场 (单位: ms^{-1})
(c: 实况 d: 模式积分36小时输出的全风速场模拟图)

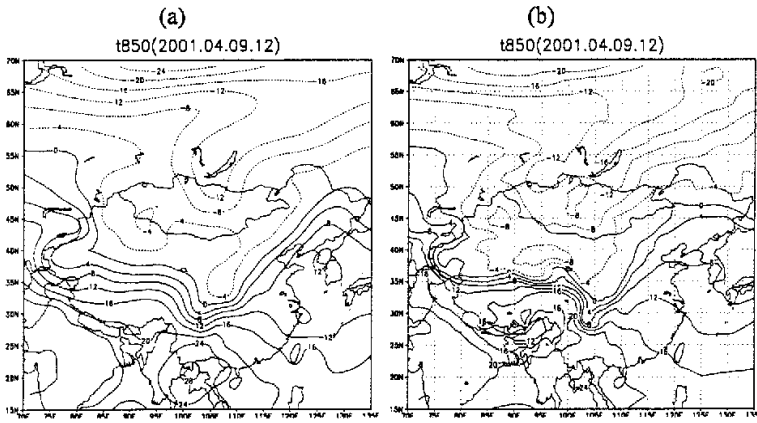


图 5.5 4月9日12时850hPa温度场
(a: 实况 b: 模式积分36小时输出的温度场模拟图)
(单位: $^{\circ}\text{C}$)

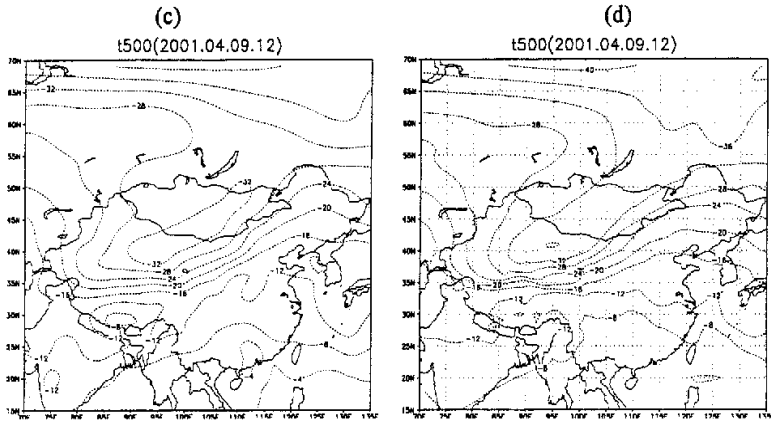


图 5.5 4月9日12时500hPa温度场
(c: 实况 d: 模式积分36小时输出的温度场模拟图)
(单位: $^{\circ}\text{C}$)

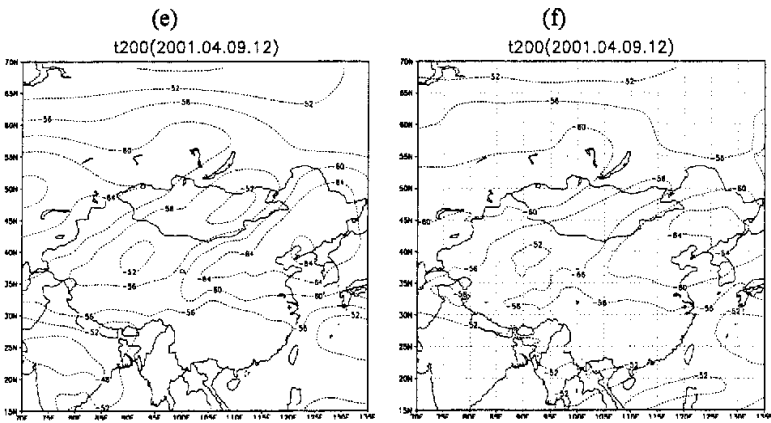


图 5.5 4月9日12时200hPa温度场
(e: 实况 f: 模式积分36小时输出的温度场模拟图)
(单位: $^{\circ}\text{C}$)

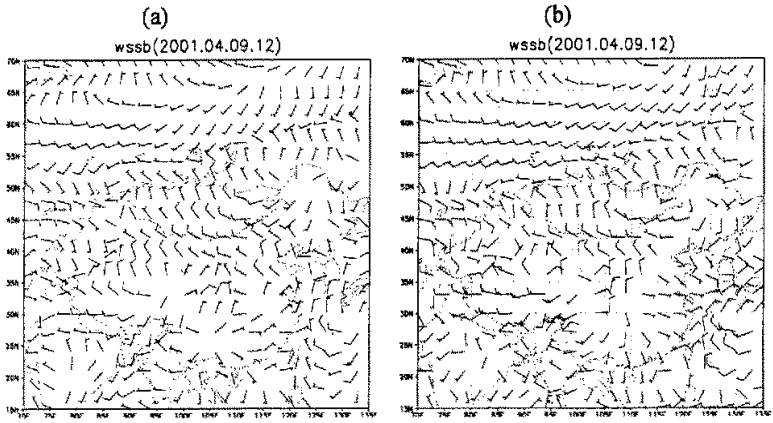


图 5.6 4月9日12时地面风场(风向杆形式)
 (a: 实况 b: 模式积分36小时输出的地面风场模拟图)

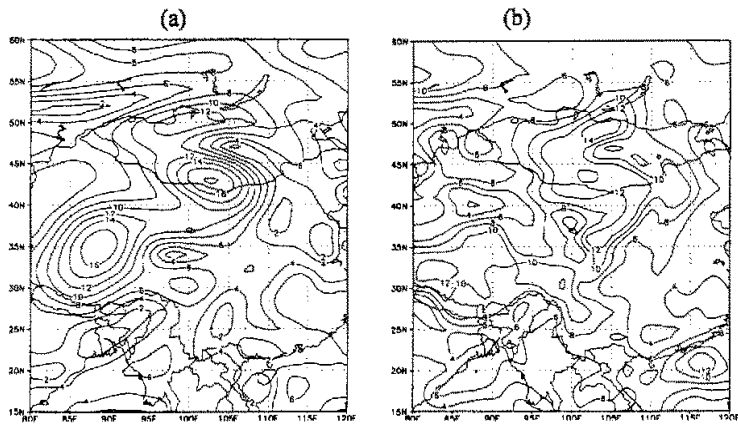


图 5.7 4月8日12时地面全风速场
 (a: 实况 b: 模式积分12小时地面全风速场模拟图)
 (单位: ms^{-1})

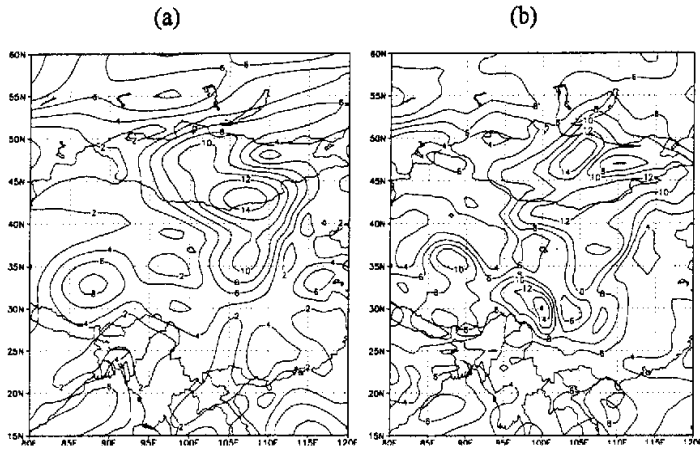


图 5.8 4 月 9 日 00 时地面全风速场
 (a: 实况 b: 模式积分 24 小时地面 a 全风速场模拟图)
 (单位: ms^{-1})

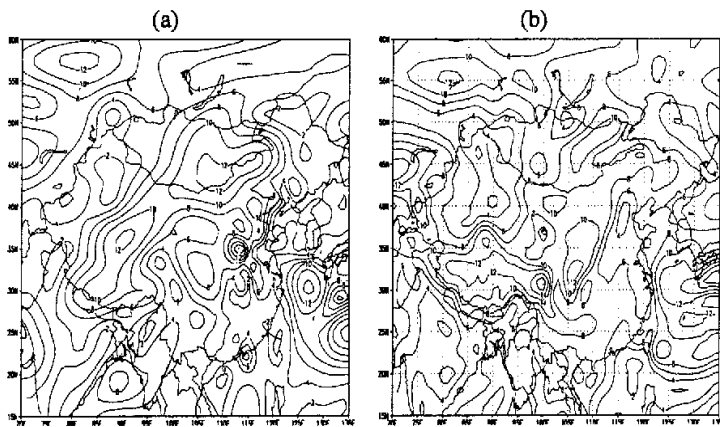


图 5.9 4 月 9 日 12 时地面全风速场
 (a: 实况 b: 模式积分 36 小时地面全风速场模拟图)
 (单位: ms^{-1})

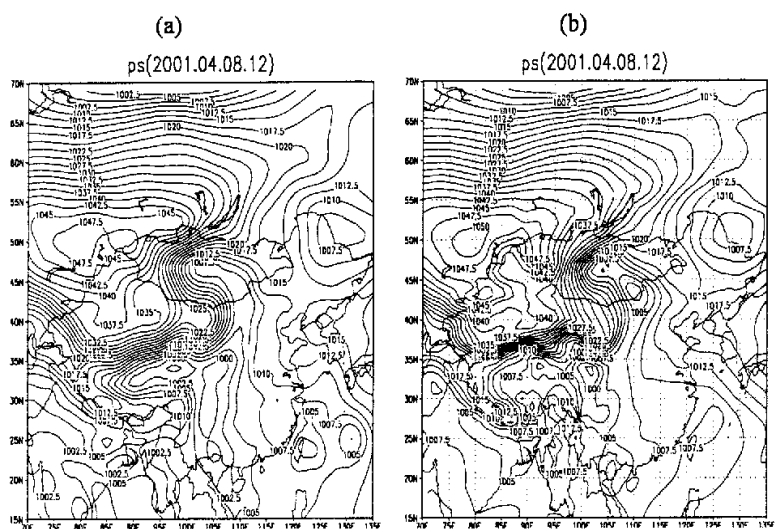
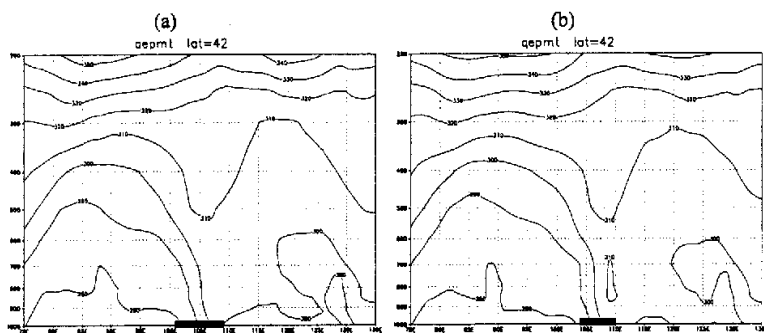


图 5.10 4 月 8 日 12 时地面气压场

(a: 实况 b: 模式积分 12 小时地面气压场模拟图)

(单位: hPa)



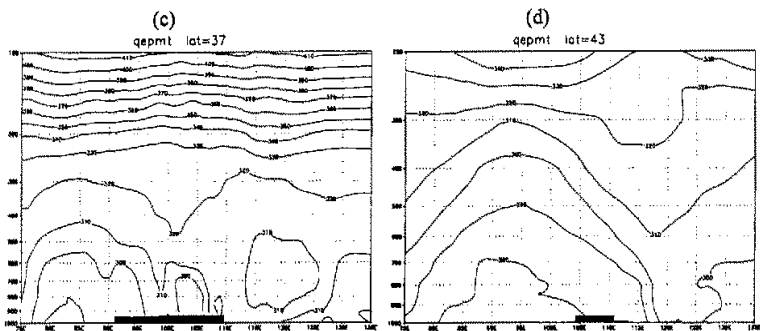
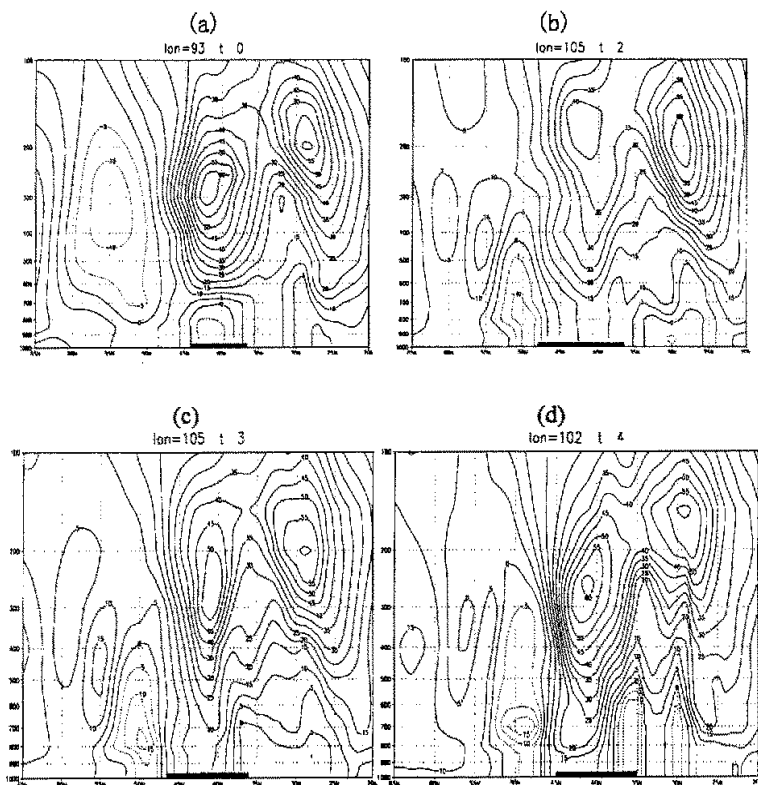


图 6.1 位温沿沙尘暴中心的纬向垂直剖面图
 (a:8 日 06 时, b:8 日 09 时, c:8 日 12 时, d:9 日 06 时) (单位: K)
 (粗黑线为沙尘暴区域, 以下同)



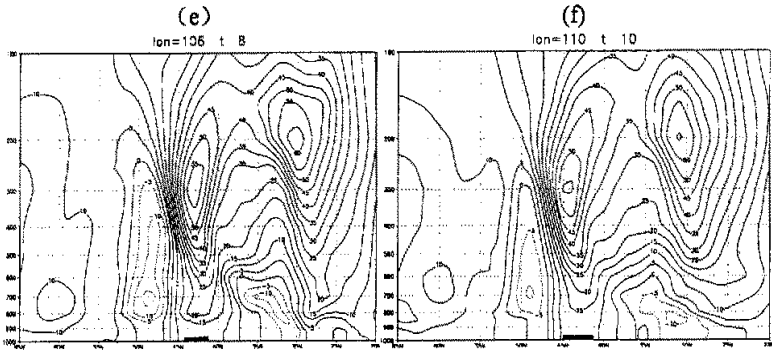
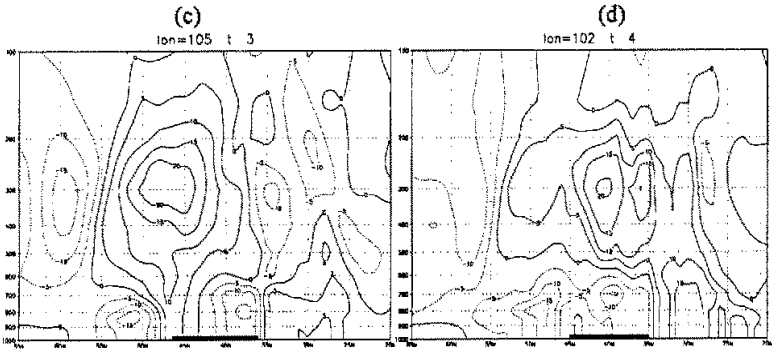
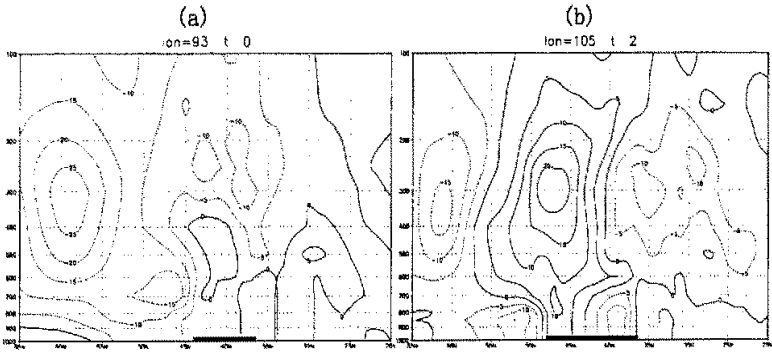


图 6.2.1 u 分量沿沙尘暴中心的经向垂直剖面图 (单位: ms^{-1})

(a:8日00时,b:8日06时,c:8日09时,d:8日12时,e:9日00时f:9日06时)

(粗黑线为沙尘暴区域)



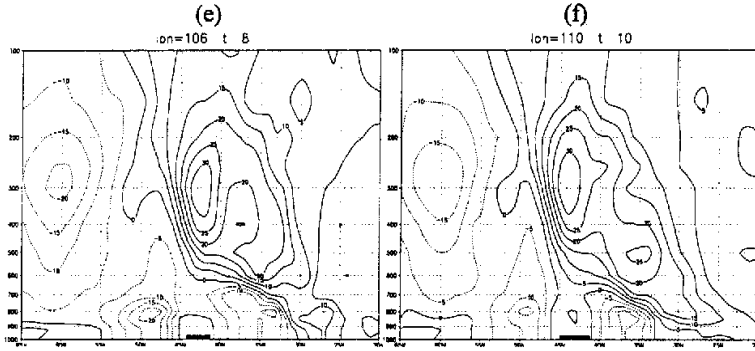


图 6.2.2 v 分量沿沙尘暴中心的经向垂直剖面图 (单位: ms^{-1})
 (a:8 日 00 时, b:8 日 06 时, c:8 日 09 时, d:8 日 12 时, e:9 日 00 时 f:9 日 06 时)
 (粗黑线为沙尘暴区域)

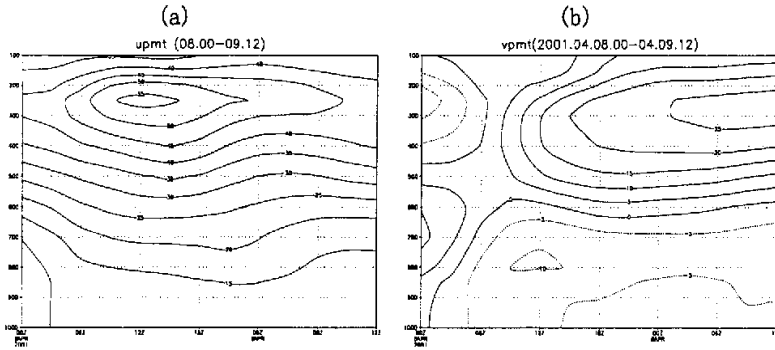
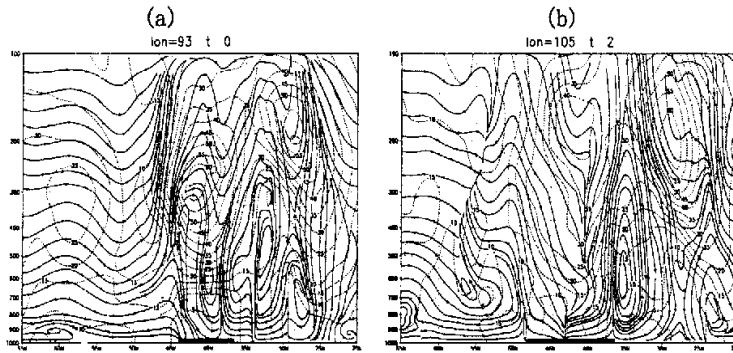
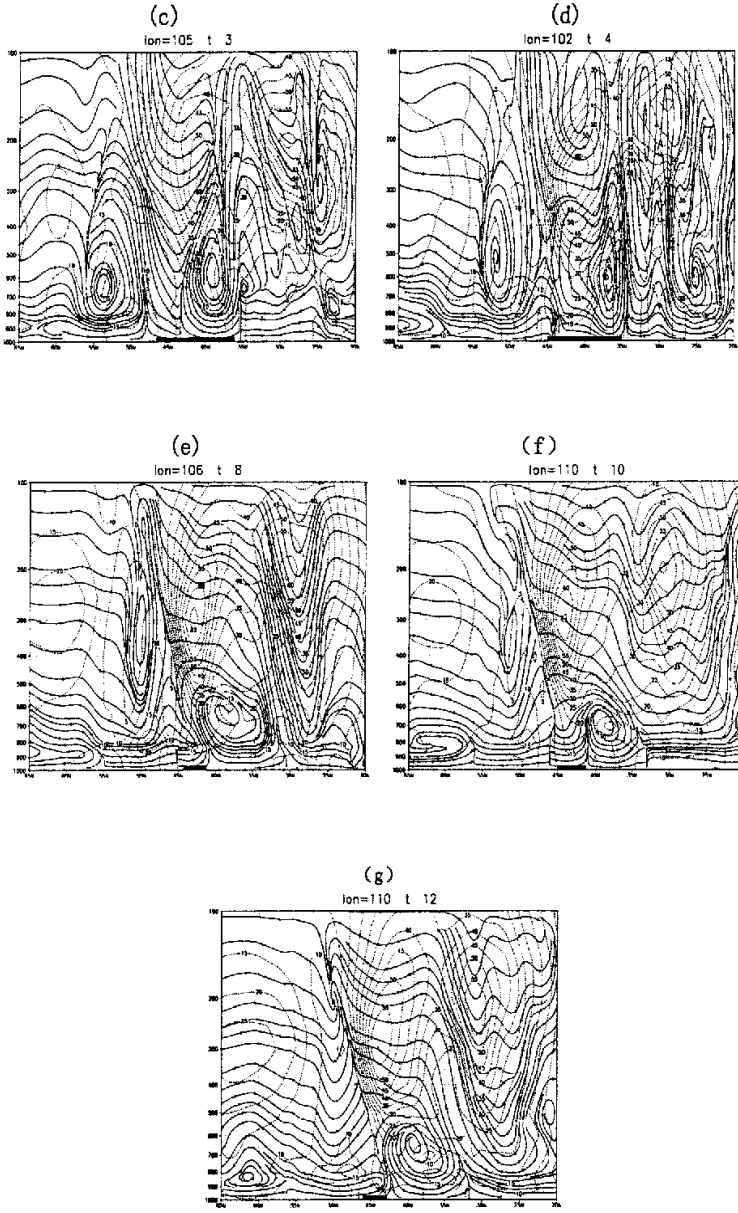
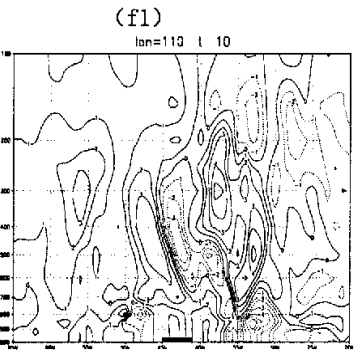
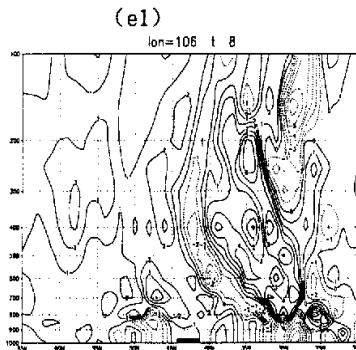
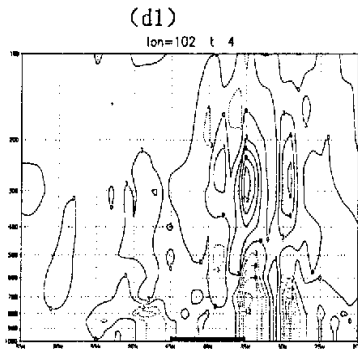
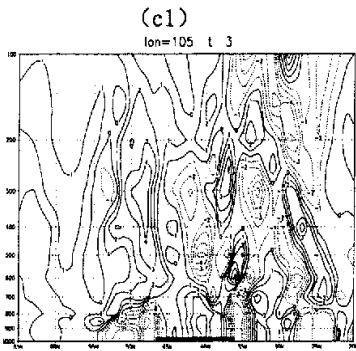
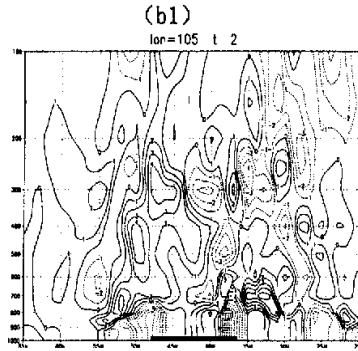
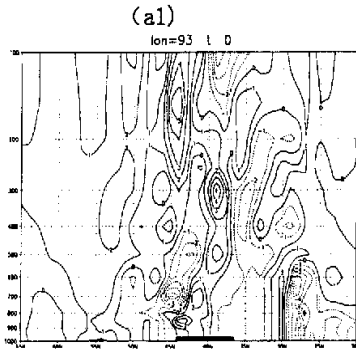


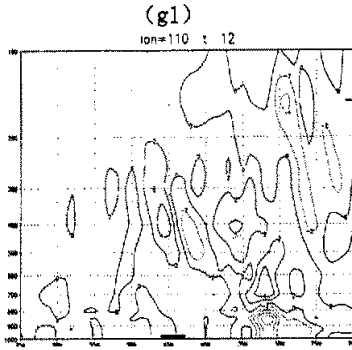
图 6.2.3 过沙尘暴区中心 (40°N , 105°E) u 分量、v 分量的
 时间-高度垂直剖面图 (单位: ms^{-1})



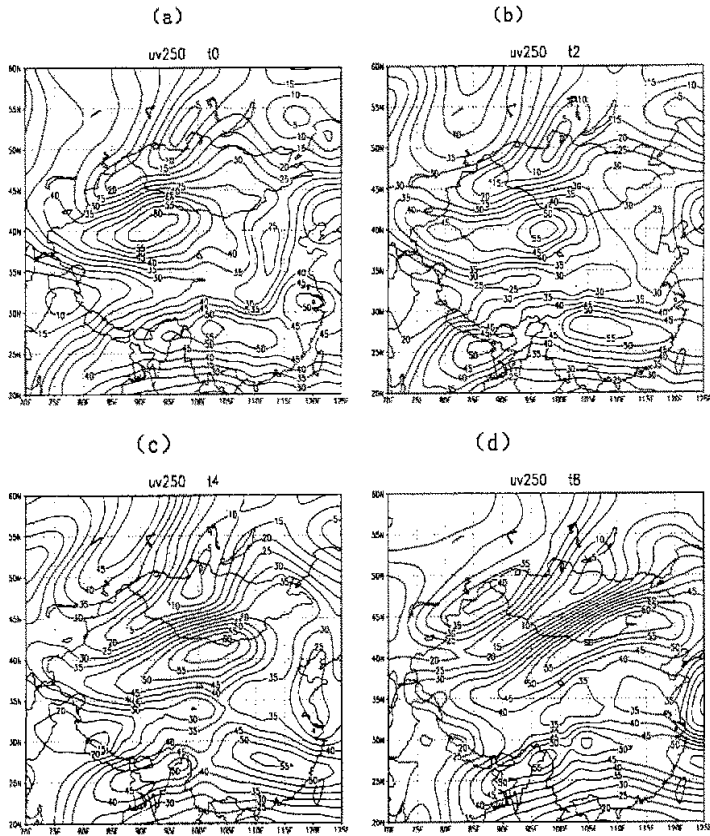


6.2.4 垂直环流场沿沙尘暴中心的经向垂直剖面图(单位: $10^{-2} \cdot \text{ms}^{-1}$)
 (a:8日00时,b:8日06时,c:8日09时,d:8日12时,e:9日00时,f:9日06时,
 g:9日12时) (粗黑线为沙尘暴区域)





6.2.4 散度场沿沙尘暴中心的经向垂直剖面图(单位: $10^{-5} \cdot s^{-1}$)
 (a:8日00时,b:8日06时,c:8日09时,d:8日12时,e:9日00时,f:9日06时,
 g:9日12时) (粗黑线表示沙尘暴区域)



(e)

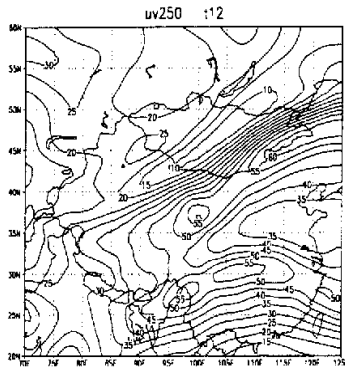
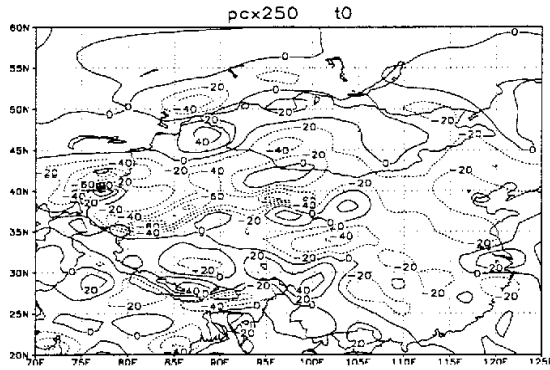


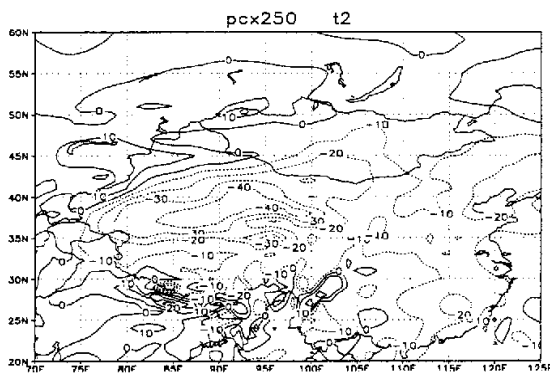
图 6.2.5 250hpa 全风场 (单位: ms^{-1})

(a: 8日00时, b:8日06时, c:8日12时, d:9日00时, e:9日12时)

(a)



(b)



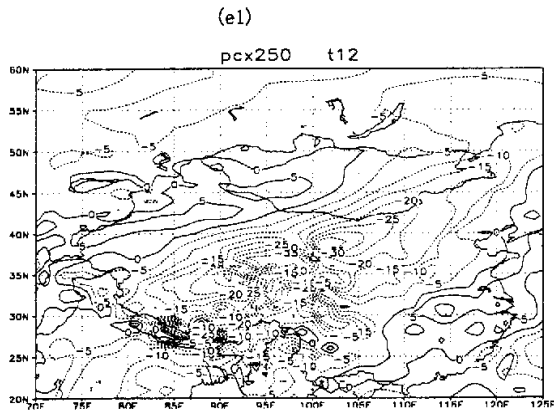
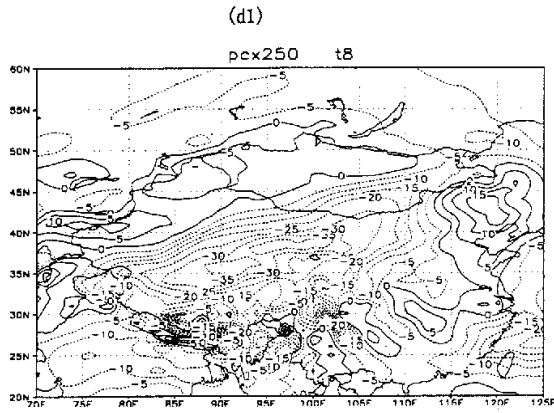
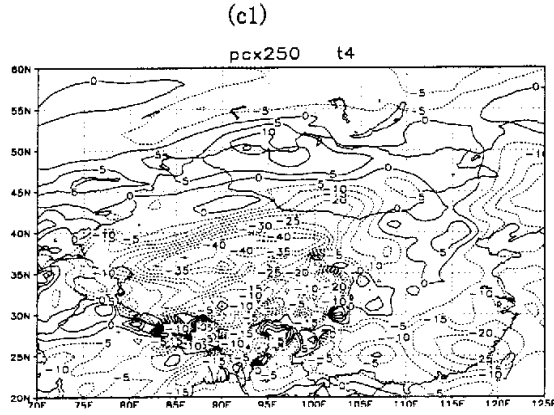
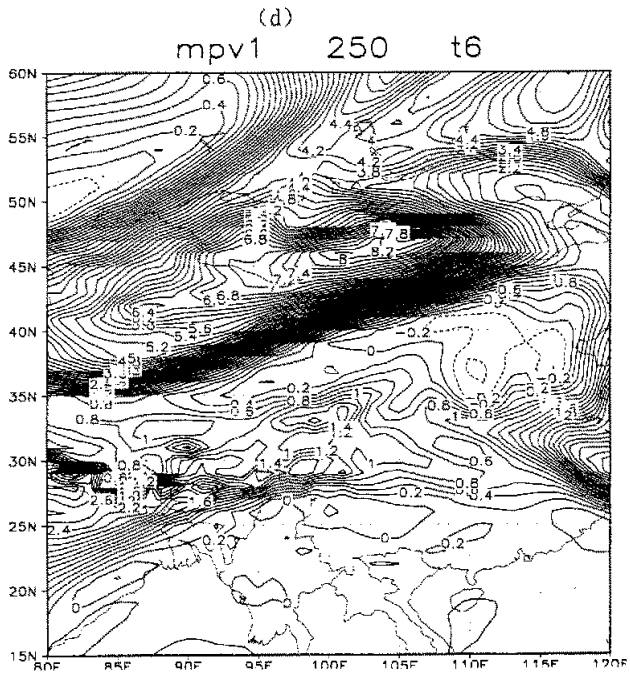
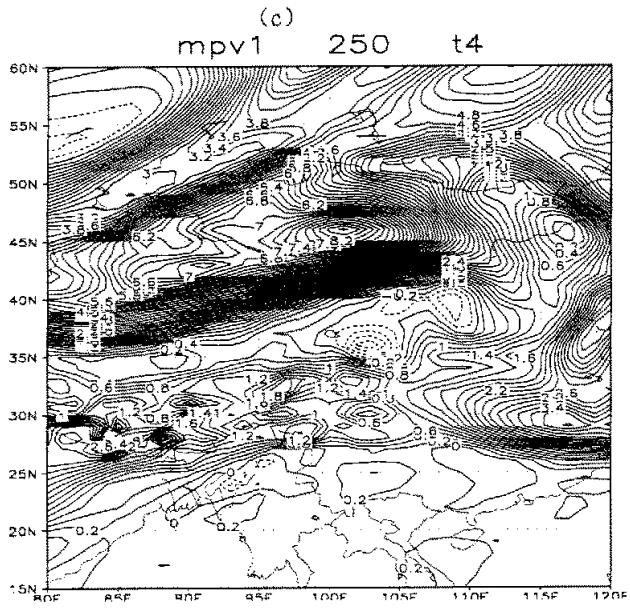


图 6.2.5 250hPa $u - u_g$ 分布图 (单位: ms^{-1})

(a1: 8 日 00 时, b1: 8 日 06 时, c1: 8 日 12 时, d1: 9 日 00 时, e1: 9 日 12 时)



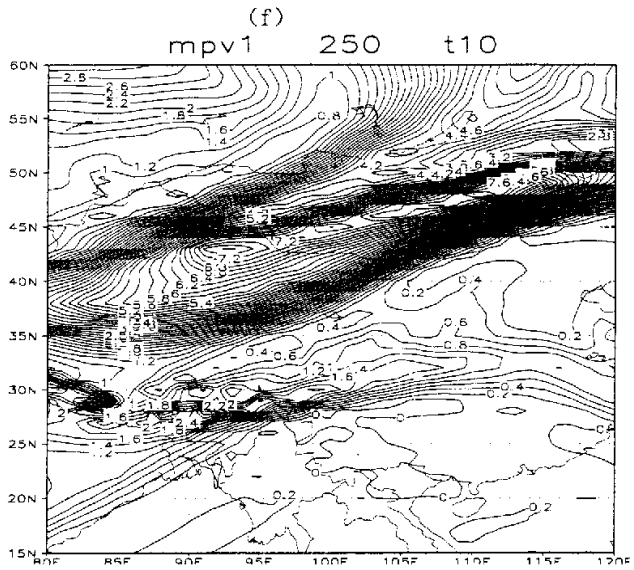
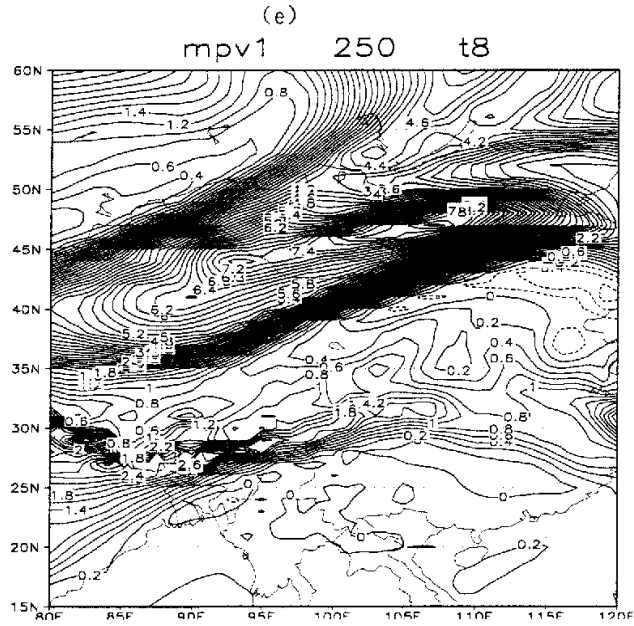
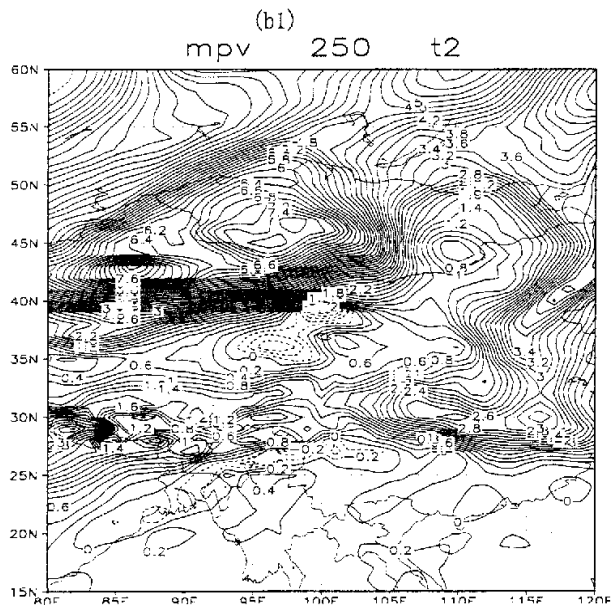
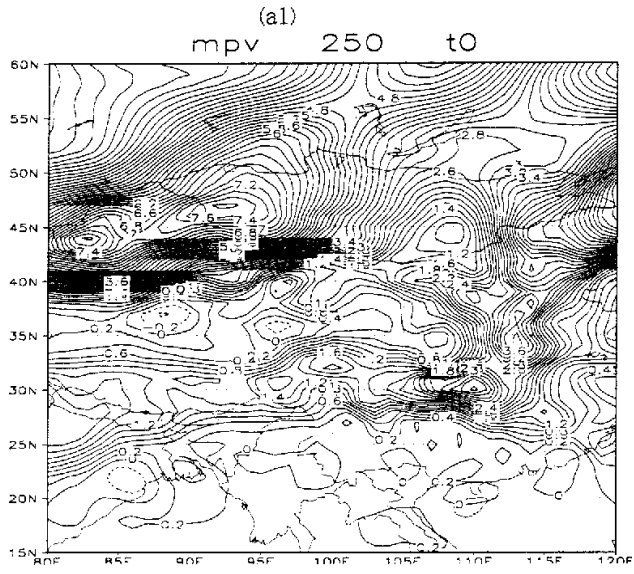


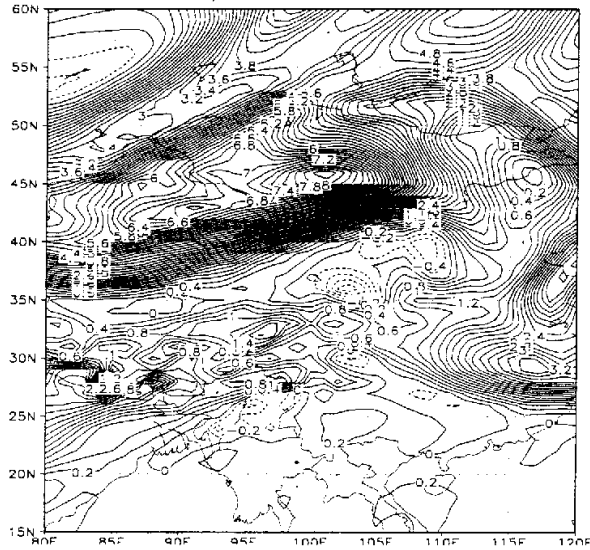
图 6.2.6.2 250hPa MPV1 分布图 (单位: $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(a: 8日06时, b: 8日09时, c: 8日12时, d: 8日18时, e: 9日00时 f: 9日06时)



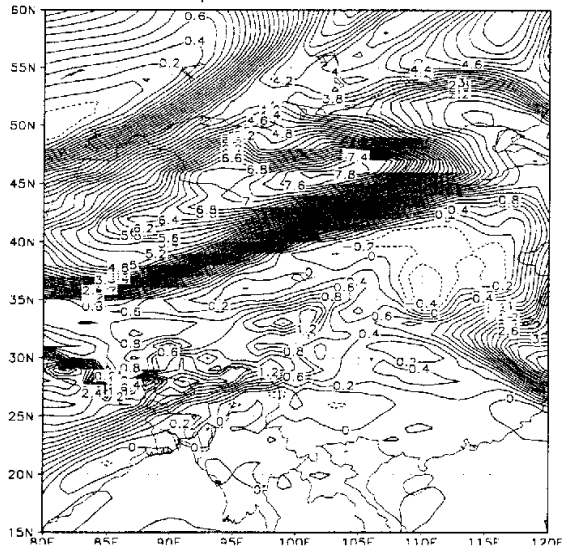
(c1)

mpv 250 t4

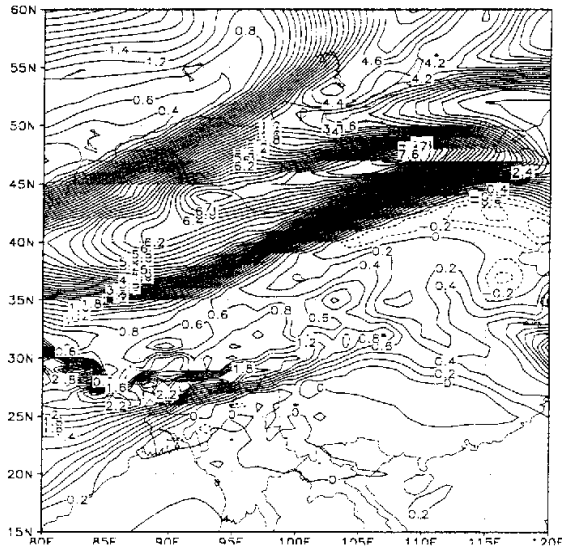


(d1)

mpv 250 t6



(e1)



(f1)
mpv 250 t10

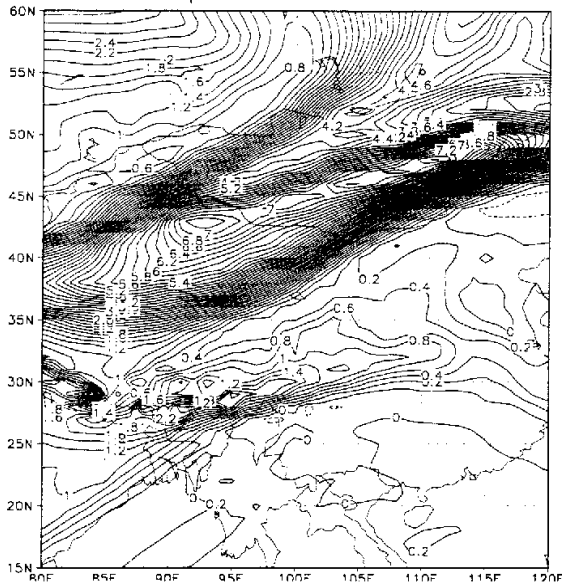


图 6.2.6.2 250hPa MPV 分布图 (单位: $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
(a1: 8 日 06 时, b1: 8 日 09 时, c1: 8 日 12 时, d1: 8 日 18 时,
e1: 9 日 00 时, f1: 9 日 06 时)

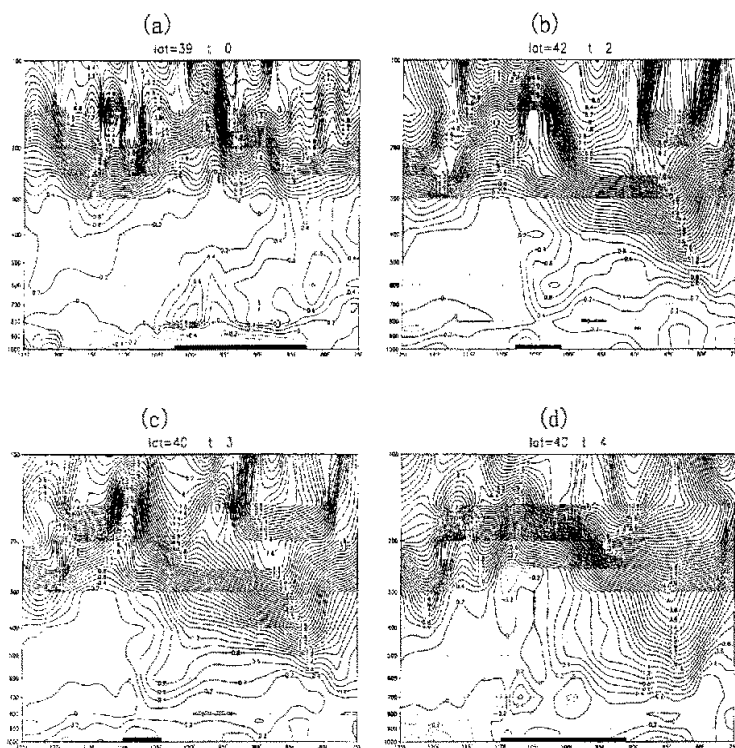
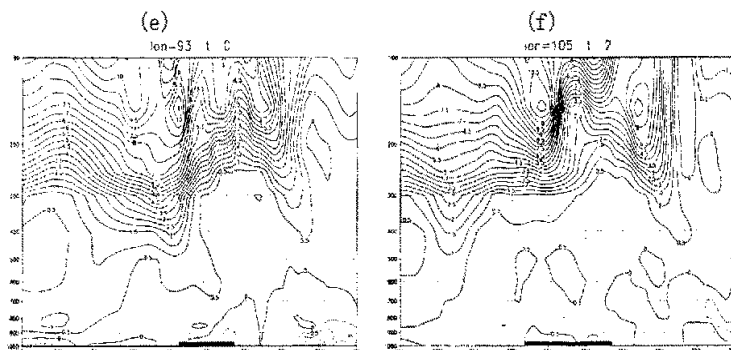


图 6.2.7 沿 40° N 的 MPV1 纬向垂直剖面图 (单位: $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
 ((a: 8 日 00 时, b: 8 日 06 时, c: 8 日 09 时, d: 8 日 12 时)



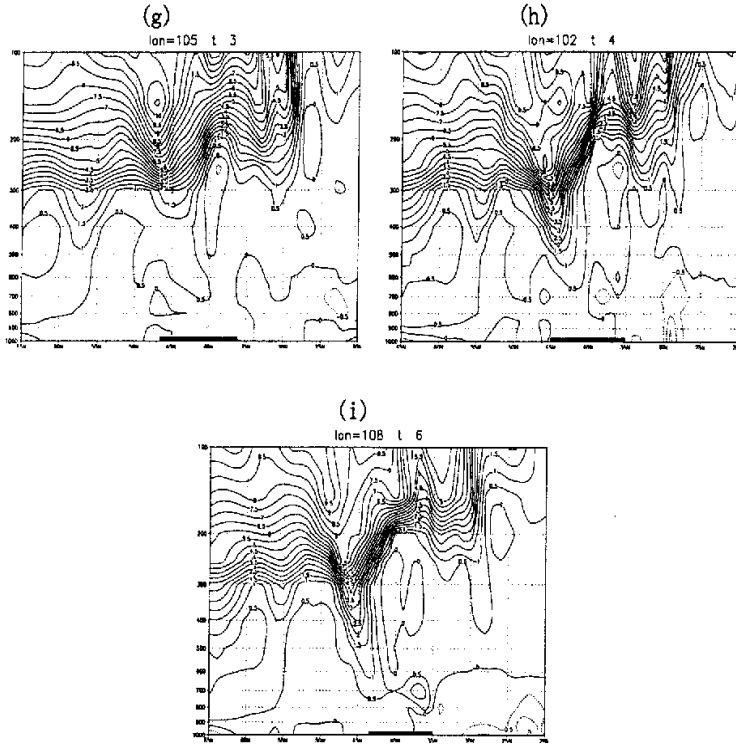
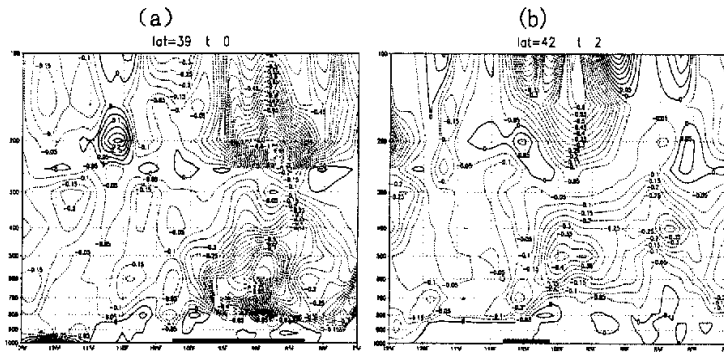


图 6.2.7 沿沙尘暴中心的 MPV1 经向垂直剖面图 (单位: $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
 (e: 8 日 00 时, f: 8 日 06 时, g: 8 日 09 时, h: 8 日 12 时 i: 8 日 18 时)



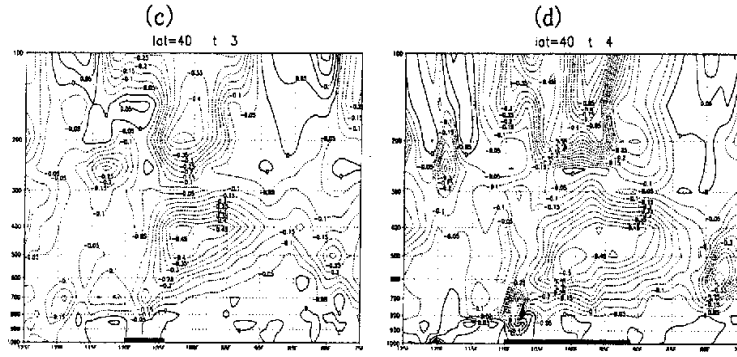
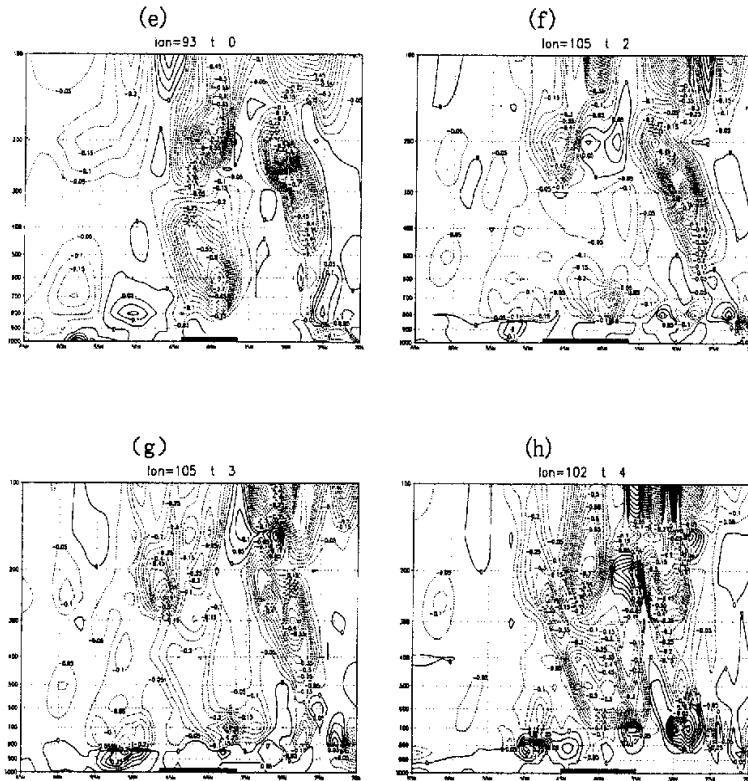


图 6.2.8 沿沙尘暴中心的 MPV2 纬向垂直剖面图 (单位: $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
 (a: 8 日 00 时, b: 8 日 06 时, c: 8 日 09 时, d: 8 日 12 时)



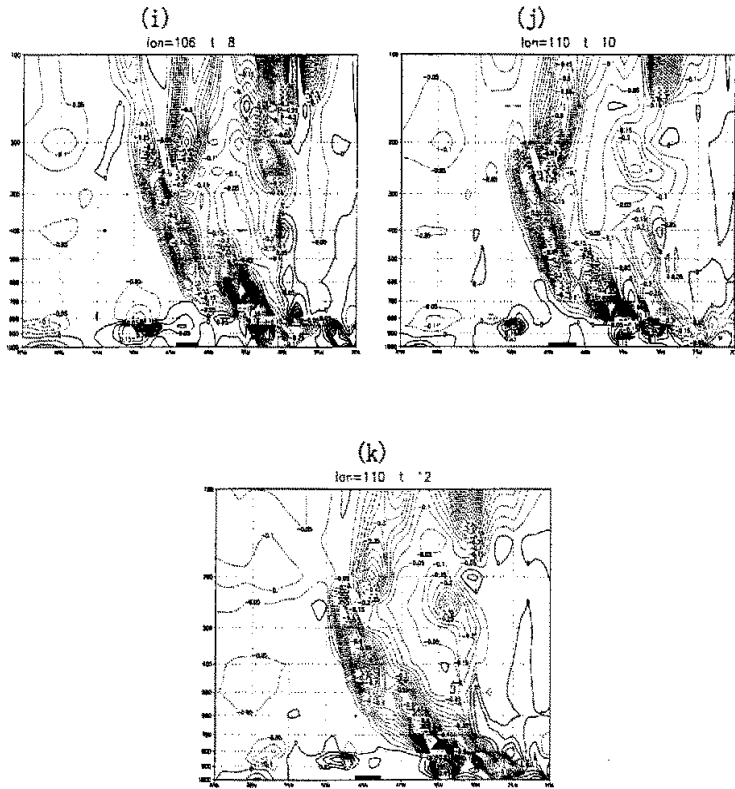


图 6.2.8(e~k) 过沙尘暴中心 MPV2 经向垂直剖面图 (单位: $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
 (e: 8日00时, f: 8日06时, g: 8日09时, h: 8日12时,
 i: 9日00时, j: 9日06时, k: 9日12时)