

## 独创性声明

本人声明所呈交的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。本论文除了文中特别加以标注和致谢的内容外，不包含其他人或其他机构已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京信息工程大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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谢意。

学位论文作者签名：云静波

签字日期：2011.5.5

## 关于论文使用授权的说明

南京信息工程大学、国家图书馆、中国学术期刊（光盘版）杂志社、中国科学技术信息研究所的《中国学位论文全文数据库》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，并通过网络向社会提供信息服务。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）授权南京信息工程大学研究生院办理。

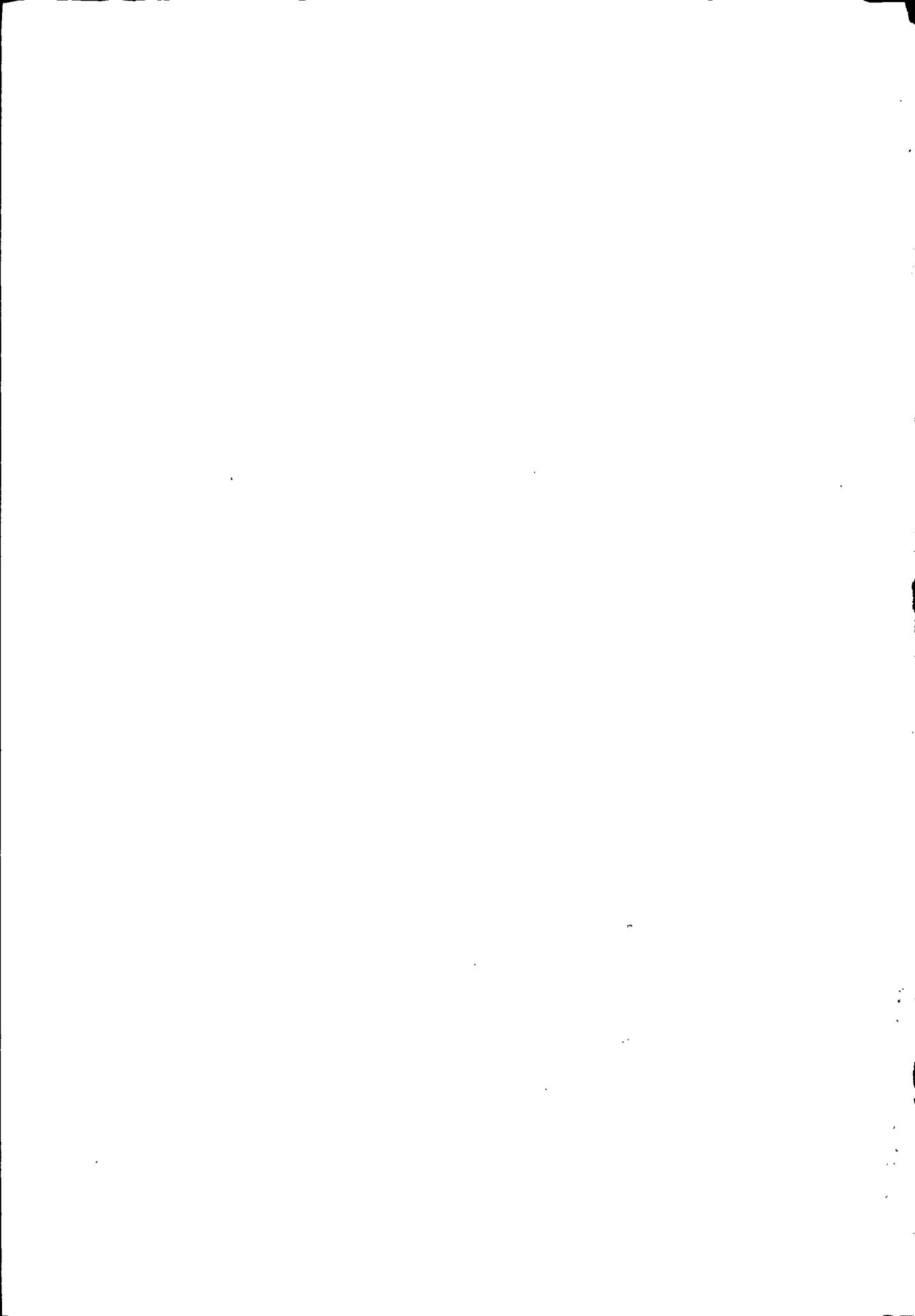
公开    保密（    年     月）（保密的学位论文在解密后应遵守此协议）

学位论文作者签名：云静波

签字日期：2011.5.5

指导教师签名：    

签字日期：2011.5.6



# 目 录

摘    要 .....	V
Abstract: .....	V
第一章 绪论 .....	7
1.1 引言 .....	7
1.1.1 沙尘暴的定义和危害 .....	7
1.2 沙尘暴的产生及时空分布特征 .....	8
1.2.1 沙尘暴形成的宏观条件 .....	8
1.2.2 沙尘暴的沙源分布 .....	9
1.2.3 沙尘暴活动的时间变化 .....	9
1.2.4 我国沙尘暴空间分布 .....	10
1.3 沙尘暴形成的大风因素 .....	12
1.4 沙尘暴形成的层结因素 .....	12
1.5 沙尘的卫星遥感监测研究 .....	13
1.6 沙尘气溶胶的物理化学及辐射特征 .....	14
1.7 沙尘暴数值预报 .....	15
1.8 导致沙尘暴的主要流型和天气系统 .....	15
1.8.1 主要环流形势 .....	15
1.8.2 主要天气系统 .....	16
1.8.3 导致沙尘暴的天气尺度系统 .....	16
1.8.3.1 冷锋 .....	17
1.8.3.2 蒙古气旋 .....	18
1.3 本文研究的目的是和意义 .....	19
第二章 资料及分析方法 .....	21
2.1 所用资料 .....	21
2.1.1 基本观测资料: .....	21
2.1.2 NCEP 再分析资料: .....	21
2.2 研究方法 .....	21
2.2.1 统计分析方法 .....	22
2.2.1.1 冷锋型、蒙古气旋型天气过程区分标准 .....	22
2.2.1.2 冷锋型、蒙古气旋型天气过程的统计 .....	23
2.2.2 天气学及诊断分析 .....	23
2.2.2.1 典型个例的选取 .....	23
2.2.2.2 对典型个例的诊断分析 .....	24
第三章 近 10 年冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程统计 .....	25

3.1 两类沙尘过程统计说明 .....	25
3.2 两类沙尘过程发生次数 .....	25
3.3 两类沙尘过程日数及沙尘过程持续时间.....	27
3.4 两类沙尘过程影响系统强度.....	30
3.5 两类沙尘过程的最大风速.....	31
3.5 两类沙尘过程的沙尘暴站数.....	33
3.6 两类沙尘过程的最小能见度.....	34
3.7 两类沙尘过程的最小能见度<200m 的站数.....	34
3.8 两类沙尘过程的移动和扩展方向.....	35
3.9 两类沙尘过程的影响地区.....	39
第四章 冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气个例对比分析.....	42
4.1 引言 .....	42
4.2 沙尘过程概述 .....	42
4.2.1 冷锋型沙尘过程概述.....	42
4.2.2 蒙古气旋型沙尘过程概述.....	43
4.2.3 冷锋、蒙古气旋型沙尘天气实况差异.....	46
4.3 大尺度环流分析及对比 .....	47
4.3.1 冷锋型沙尘过程大尺度环流.....	47
4.3.2 蒙古气旋型沙尘过程大尺度环流.....	52
4.3.3 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程形势对比.....	56
4.4 单站地面气象要素 .....	57
4.4.1 冷锋型沙尘过程单站地面气象要素.....	58
4.4.2 蒙古气旋型沙尘过程单站地面气象要素.....	59
4.4.3 单站地面气象要素对比.....	60
4.5 地面大风的成因 .....	61
4.5.1 地面大风分布特征与沙尘暴强度的关系.....	61
4.5.2 系统发展因素 .....	62
4.5.3 动量下传 .....	64
4.5.3.1 冷锋型沙尘过程的动量下传.....	65
4.5.3.2 蒙古气旋型沙尘过程的动量下传.....	66
4.5.3.3 冷锋型、蒙古气旋型对比分析.....	67
4.6 层结特征和演变 .....	67
4.6.1 冷锋型沙尘过程单站层结特征和演变.....	68
4.6.2 蒙古气旋型沙尘过程单站层结特征和演变.....	69
4.6.3 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程层结特征对比分析.....	71
4.7 物理量分布特征 .....	71
4.7.1 冷锋型沙尘过程物理量分布特征.....	71
4.7.2 蒙古气旋型沙尘过程物理量分布特征.....	74
4.7.3 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程物理量分布特征对比.....	76

目录

---

4.8 天气学概念模型 .....	76
4.8.1 冷锋型沙尘过程天气学概念模型.....	76
4.8.2 蒙古气旋型沙尘过程天气学概念模型.....	77
第五章 结论和讨论 .....	79
5.1 结论 .....	79
5.2 讨论 .....	81
参考文献 .....	82
附录一 .....	85
附录二 .....	89
致 谢 .....	93



## 摘 要

本文综合利用高空、地面、地面加密、卫星遥感、等观测资料和 NCEP 再分析资料,在对 2001-2010 年间我国北方沙尘暴过程进行普查的基础上,针对十年间冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程的发生频数、影响范围、地区、强度等特征进行了对比统计分析,在此基础上,针对 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘暴过程和 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘暴过程的动力热力结构和方式机制进行了天气学对比和诊断分析,结果发现 (1) 我国北方沙尘天气过程出现次数呈波动减少,2001 年最多;2006 年次之,期间呈现波动减少,2010 年又略有增加。(2) 冷锋型出现频数大,约占统计总数 60%的,蒙古气旋型占 40%。沙尘天气在 4 月份出现最多,3 月次之。(3) 冷锋型过程平均持续 1.54 天,蒙古气旋 1.68 天,两类过程最多持续 3 天,冷锋型持续 1 天和 2 天次数相当,各占 48.5;蒙古气旋型持续 2 天最多,占 54%。(4) 冷锋型影响范围大于蒙古气旋型,冷锋型多向东和东南方向移动,并以西北-东南向为主,蒙古气旋型多向东、东偏南和东偏北方向移动,以自西向东移动为主。冷锋型主要影响新疆、西北、华北、甚至到华东地区,蒙古气旋型主要影响西北、华北及东北地区。(5) 两类过程平均最大风速在  $15\sim 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  间,且最大风速均出现在 4 月,分别为  $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。(6) 蒙古气旋沙尘暴过程平均强度略大于冷锋型,冷锋型在我国观测区域内平均每次过程约有 14 站出现沙尘暴,而蒙古气旋型为 22.5 站。

对 2010 年 3 月 19-20 冷锋型和 2006 年 3 月 9-10 蒙古气旋型沙尘暴过程的典型个例分析得出: (1) 冷锋型大尺度环流为两槽一脊型,蒙古气旋型为一槽一脊型。斜压强迫在两类过程中均较为显著,冷锋型过程中,随高度降低高空槽明显加深;蒙古气旋型则在低层 (850hPa)、中层 (500hPa) 形成切断低压。(2) 从地面高、低压强度对比看,冷锋型差异明显大于蒙古气旋。(3) 冷锋型地面风速与能见度的反相关性优于蒙古气旋型,且锋后气温下降较蒙古气旋型显著。(4) 冷锋型动量下传首先随系统发展出现在 300-700hPa 间,之后对流层低层深厚混合层的形成,进一步从 700hPa 下传到地面。蒙古气旋型主要的动量下传出现在 300-700hPa 间,天气系统发展、低层气压梯度增大等是地面和对流层低层风速增大的主要原因。(5) 两类沙尘过程中,层结均表现出显著的日变化,有沙尘天气时,混合层比晴天时高。且混合层的形成有利于沙尘暴的发生。(6) 冷锋型锋前上升运动中心位于 700hPa,锋后下沉运动中心位于 600hPa。蒙古气旋型气旋中心及其附近 300hPa 以下均有强的上升运动。冷锋型过程中,锋面过境常常伴随相对湿度的急剧减小;蒙古气旋型过程中,气旋南侧整层大气较为干燥,易出现强沙尘暴。冷锋型过程中,锋面附近正涡度随高度增高而增大,最大正涡度中心在 300hPa。蒙古气旋型,气旋中心及其附近为正涡度,最大正涡度中心出现在 700hPa。(7) 分别总结了冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程的天气学概念模型。

关键词：冷锋 蒙古气旋 沙尘暴 对比分析 统计学

## Abstract:

By an integrated utilization of aerial observation data, surface observation data, ground truth data, satellite remote sensing data and NCEP reanalysis data, this thesis comparatively analyzed certain characteristics, such as frequency, coverage, effect region and intensity, of the cold-front sandstorms and Mongolia cyclone sandstorms occurred during 2001-2010 years, based on the general sandstorm processes investigation data in North China in the same time period. Then, we conducted the synoptic comparative analysis and diagnostic analysis of the dynamic-thermal structures and mechanisms of both the cold-front sandstorm and Mongolia cyclone sandstorm, happened in March 19-20, 2010 and March 9-10, 2006 respectively. The results shown: (1) The occurrences of sandstorms in northern China was decreasing in a fluctuating way and having its maximum value happened in year 2001. (2) Cold-front sandstorm happened more often than the Mongolia cyclone sandstorm, taking 60% and 40% of the total occurrence, respectively; and the dust weather occurred most frequently in April and then in March. (3) The average duration of cold-front sandstorm and Mongolia cyclone sandstorm are 1.54 and 1.68 days, respectively; both of their maximum duration is less than 3 days. For the cold-front sandstorm, the occurrences of 1-day and 2-day lasting sandstorms are nearly the same, each taking 48.5% of the total occurrences. While for the Mongolia cyclone sandstorm, the 2-day lasting sandstorm occurred most frequently, taking 54% of the total occurrence. (4) The coverage of cold-front sandstorm is larger than that of Mongolia cyclone sandstorm. Most of the cold-front sandstorms moved to east and southeast; and the main direction was from northwest to southeast; while for Mongolia cyclone sandstorm, most of them moved to east, southeast and northeast; and the main direction was west-east. The regions under the influence of cold-front sandstorm usually include Xinjiang, northwest, northeast and east parts of China, meanwhile Mongolia cyclone sandstorm often affected the northwest, north and northeast parts of China; (5) The average maximum speed of the two kinds of sandstorm is between 15-18  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; and both kinds of the sandstorm gains maximum speed in April, 32  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  and 28  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively. (6) The average intensity of Mongolia cyclone sandstorm is larger than that of cold-front sandstorm; averagely, each cold-front sandstorm and each Mongolia cyclone sandstorm can be observed respectively by 14 and 22.5 stations in China.

The typical cases analysis of the cold-front sandstorm and Mongolia cyclone sandstorm cases happened in March 19-20, 2010 and March 9-10, 2006 respectively had the following results: (1) the cold-front large-scale circulation had two trough a ridge form while that of Mongolia cyclone has a trough-ridge form. There was apparent barocline forcing in both kinds of the sandstorm. For the cold-front sandstorm, the high-level trough became deeper as its height decreased; for Mongolia

cyclone sandstorm, there were breaking low pressure formed at low layer (850hPa) and middle layer(500hPa). (2) The difference between the highest and the lowest ground pressure value was larger in cold-front sandstorm than in Mongolia cyclone sandstorm. (3) The anticorrelation between wind speed and visibility in cold-front sandstorm is higher than in Mongolia cyclone sandstorm; and the post-frontal temperature in cold-front sandstorm decreased more apparently than in Mongolia cyclone sandstorm. (4) With the development of cold-front sandstorm system, momentum-downlink of cold front firstly appeared between 300 and 700hPa, then from 700hPa to ground surface as mixture layer forming at low layer of troposphere. For the Mongolia cyclone sandstorm, the main momentum-downlink happened between 300 and 700hPa; the development of the weather system and the increasing gradient in low layer accounted majorly for the increment of wind speed at the low layer of troposphere and above ground. (5) The stratification in both kind of the sandstorm has apparent daily variations. When dust weather existed, the mixture layer is higher than not, and the formation of which further helps the occurrence of sandstorm. (6) The pre-frontal upward motion center and post-frontal downward motion center in cold-front sandstorm was at 700hPa and 600hPa, respectively. At the center of Mongolia cyclone and its nearby region below 300hPa, there existed strong upward motion. The frontal passage in cold-front process usually led to a dramatic decrease of relative humidity. The air is relatively dry in the south side of the cyclone in Mongolia cyclone process which usually results in server sandstorm. In the cold-front process, the positive vorticity near the front was increasing with its height, reaching its maximum at 300hPa. In the Mongolia cyclone process, the positive vorticity was located at the cyclone center and its nearby regions, reaching its maximum at 700hPa. (7) The weather conceptual models of cold-front sandstorm and Mongolia cyclone sandstorm were summarized.

**Key words: cold-front, Mongolia cyclone, sandstorm, Comparative analysis, Statistics.**

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

### 1.1.1 沙尘暴的定义和危害

沙尘暴是一种形成于荒漠化地区的灾害性天气，是指强风把地面大量沙尘卷入空中，使空气特别浑浊并且水平能见度低于 1km 的天气现象。根据 2003 年中国气象局实施的沙尘暴标准，将沙尘天气划分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。其中，浮尘指尘土、细沙均匀地浮游在空中，使水平能见度小于 10 公里的天气现象；扬沙指风将地面尘沙吹起，使空气相当混浊，水平能见度在 1-10 公里以内的天气现象；沙尘暴指强风将地面大量尘沙吹起，使空气很混浊，水平能见度小于 1 公里的天气现象；强沙尘暴指大风将地面尘沙吹起，使空气非常混浊，水平能见度小于 500 米的天气现象。

根据沙尘暴观测规范（国标），沙尘天气过程同样可以分为四类：浮尘天气过程是指在同一次天气过程中，我国天气预报区域内 5 个或 5 个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了浮尘天气；扬沙天气过程是指在同一次天气过程中，我国天气预报区域内 5 个或 5 个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了扬沙天气；沙尘暴天气过程是指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；强沙尘暴天气过程是指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强沙尘暴天气。

沙尘暴是形成于沙漠及其邻近地区特有的一种灾害性天气。它的发生既是土地荒漠化发展到一定程度的表现，也是一种加速土地荒漠化的重要过程。强沙尘暴和特强沙尘暴常常带来巨大的危害，其形成之后，由强风挟卷大量砂粒往往形成直立翻滚的沙尘壁以排山倒海之

势滚滚向前移动。其成灾的作用方式有沙埋、风蚀沙割、狂风袭击,降温霜冻等。造成的灾害包括:使大片农田受到沙埋,或吹走沃土,致使农作物绝收或减产;对交通运输造成严重影响,对供电线路造成破坏;造成人员伤亡;造成牧区牲畜圈棚损毁,造成牲畜死亡或走失;加剧土地荒漠化进程。同时,大量悬浮沙尘向下游地区传输并沉降,也严重恶化了人类生存的大气、水体和土壤环境,间接地影响了人体健康(特别是呼吸道疾病),沙尘的辐射效应对其后的气候也产生深远的影响。

我国每年都会因沙尘暴的影响造成各种损失。例如,1993年5月5日的特强沙尘暴过程造成的直接经济损失达5.6亿元。其影响波及10万 $\text{km}^2$ ,丢失和死亡的牲畜几十万头,91人失踪,264人受伤。受灾农田及果林、幼林几十万亩。又如2006年4月9日晚由新疆进京的T70次列车,在鄯善至哈密段,遇强沙尘暴袭击,12级以上的强风卷夹起沙石,使列车行进方向左侧全部车窗的双层钢化玻璃被击碎,使T70次等9趟列车晚点。

## 1.2 沙尘暴的产生及时空分布特征

### 1.2.1 沙尘暴形成的宏观条件

沙尘暴的形成有3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,如30年代美国西部大草原的过度开垦,荒漠化加剧,沙尘源扩大,造成沙尘暴肆虐;三是不稳定的空气状态,这是重要的局地热力条件<sup>[1-2]</sup>。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。

王式功等<sup>[3]</sup>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: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很疏松;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性增大,午后易产生对流,有利于高空动量下传;⑤春季是北方地区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。

### 1.2.2 沙尘暴的沙源分布

沙尘暴的多发区与沙漠区或土地荒漠化区域相联系。世界范围内沙尘暴多发区位于中亚、北美、中非和澳大利亚<sup>[4]</sup>，我国的沙尘暴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。影响我国的沙尘暴有两个主要的沙尘源区（也是沙尘暴多发区），一个位于我国以塔克拉玛干沙漠为中心的南疆盆地，另一个位于从蒙古国到我国内蒙古西部荒漠化地区，而我国河西走廊到黄土高原一带为沙尘暴的次多发区<sup>[5]</sup>。可见沙尘暴总体分布可以反映沙尘暴的背景因素—沙源。

我国北方受地质地理和大气环流的影响，从东北到西北分布着大面积的沙区。这些沙区因风蚀程度的不同分为沙地、沙漠和戈壁。从气候和植被分布的角度，把贺兰山以东的半干旱沙区成为沙地，以西的干旱沙区称为沙漠。在广大干旱多风的地区，则广泛分布着不同类型的戈壁<sup>[6]</sup>。表1为我国主要的沙源分布地区<sup>[7]</sup>。这些沙源地区为沙尘暴的发生提供了丰富的沙尘物质。

表1 中国主要沙漠和沙地

沙漠或沙地	地理位置	海拔 (m)	面积 (km <sup>2</sup> )
塔克拉玛干沙漠	新疆塔里木盆地	800~1400	33.76
古尔班通古特沙漠	新疆准格尔盆地	300~600	4.88
巴丹吉林沙漠	阿拉善高原西部	1300~1800	4.43
腾格里沙漠	阿拉善高原东部	1400~1600	4.27
柴达木盆地沙漠	青海柴达木盆地	2600~3400	3.49
库姆塔格沙漠	阿尔金山以北	1000~1200	2.28
库布齐沙漠	鄂尔多斯高原北部	1000~1200	1.61
乌兰布和沙漠	阿拉善高原东北部	1000	0.99
科尔沁沙地	西辽河下游	100~300	4.23
毛乌素沙地	鄂尔多斯高原东南部	1300~1600	3.21
浑善达克沙地	内蒙古高原东南部	1000~1400	2.14
呼伦贝尔沙地	内蒙古高原东北部	600	0.72

### 1.2.3 沙尘暴活动的时间变化

我国北方的沙尘活动呈明显的年代际变化特征。较普遍的观点认为，上世纪67-70年代为沙尘暴的高发期，80-90年代有所减少，上世纪末到本世纪初，沙尘暴又呈现一定的增多

趋势。钱正安等我国强和特强沙尘暴气候特征的研究指出, 上世纪50-90年代, 中国北方每个年代的强沙尘暴次数依次是48、68、89、67 及36 次。即从50-70年代, 沙尘活动在增强, 于70年代达到最强期; 80 年代后则开始减弱; 钱正安<sup>[8-10]</sup>, 周自江<sup>[11]</sup>, 丁瑞强、王式功等<sup>[12]</sup>, 方宗义、王炜<sup>[13]</sup>, 宋敏红<sup>[14]</sup>的统计、研究指出, 2000-2002年沙尘暴发生出现突然的增强趋势, 并主要出现在中蒙东区: 蒙古国东部、华北区北部、我国东北、韩国、日本及台湾, 而2003-2005年又有所减弱。

沙尘暴的发生呈现显著的季节变化特征, 我国沙尘暴的季节变化特征表现为: 春季沙尘暴最多, 夏季次之, 秋季最少; 在月份变化方面, 4月份发生频率最高, 3月和5月次之, 9 月份最少<sup>[3]</sup>。刘景涛<sup>[15]</sup>, 尤莉<sup>[16]</sup>对内蒙古中西部地区黑风暴及沙尘天气的分析结果也表明, 4月份出现频率最高, 春季(3~5月)占全年的73%。

沙尘暴也具有明显的日变化特征, 据王式功等<sup>[3]</sup>对1994 年4 月上旬发生在我国西北地区沙尘暴发生频率日变化的研究结果表明: 沙尘暴主要发生在午后到傍晚时段内, 占总数的65.4%, 清晨到中午时段内, 仅占34.6%。在甘肃河西走廊中部地区, 黑风暴大都出现在中午12时至晚上22时的时段内。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, 午后层结稳定度降低也易于干对流产生。

#### 1.2.4 我国沙尘暴空间分布

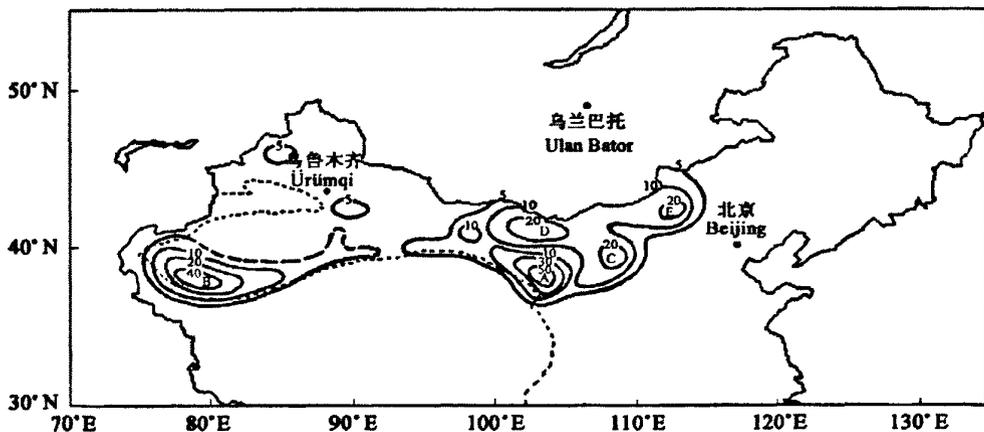


图 1.1 1952~2001 年间中国北方强和特强沙尘暴总频数(次)分布<sup>[17]</sup>  
A,B,C,D 及 E 站分别是民勤、和田、伊克乌素、拐子湖及朱日和等 5 大沙尘暴多发区中心。

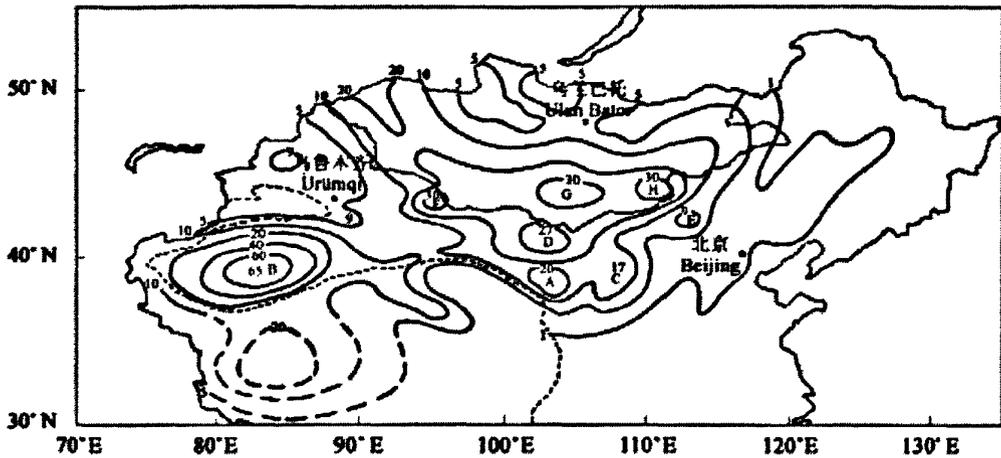


图 1.2 1964~2000 年间中蒙地区年平均沙尘暴日数分布<sup>[18]</sup>

A~H 分别为中国的民勤、塔中 1 井、伊克乌素、拐子湖、朱日和、淖毛湖和蒙古国的达兰扎达嘎德及扎门乌德等沙尘暴多发区中心

沙尘暴多发区和季节变化等应该根据历年出现沙尘暴的实际频数客观地确定。我国的沙尘暴区属于中亚沙尘暴区的一部分，总的特点是西北多于东北、平原（盆地）多于山区，沙漠及其边缘多于其它地区。钱正安<sup>[2,9,17]</sup>、周自江<sup>[20]</sup>及刘景涛<sup>[21]</sup>、李栋梁<sup>[18]</sup>等先后对此作了许多工作。图 1.1<sup>[17]</sup>是 1952~2001 年间我国北方强和特强沙尘暴的频数分布。如图所示，虽然我国西北和华北许多地区，以及东北个别地区都可能出现强或特强沙尘暴，但总频数在 20 次以上的多发区仅有 5 大片：以民勤为中心(53 次)的河西走廊区；以和田为中心(42 次)的南疆盆地区；以拐子湖为中心(25 次)的内蒙古阿拉善高原区；以伊克乌素镇为中心(27 次)的鄂尔多斯高原区；以及以朱日和为中心(22 次)的浑善达克沙地区。

李栋梁等<sup>[18]</sup>曾得到 1964~2000 年间我国北方多年平均的年沙尘暴(也包括弱沙尘暴在内)日数图(图 1.2)。其中，民勤、和田、拐子湖、伊克乌素及朱日和的多年平均沙尘暴日数分别为 25、24、27、17 天及 9 天。除南疆盆地外，图 1.1 和图 1.2 中的高频数中心的分布大体是一致的，根据 Mandakh and Khaulenbek<sup>[19]</sup>的资料，蒙古国南部东戈壁省的扎门乌德及南戈壁省的达兰扎达嘎德的年平均沙尘暴日数达 30 天，也是两多发区，且与内蒙古中西部的多发区是连片分布的。

### 1.3 沙尘暴形成的大风因素

地面大风是沙尘暴形成的三个基本条件之一。这首先表现在与起沙密切相关的起沙风速。Helgren (1987)<sup>[22]</sup>对撒哈拉西部沙尘暴过程的分析,表明与起沙相联系的平均地面风速为 $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而单站的变化范围在 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 13.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。不同地区以及不同土壤粒径特征对起沙风速具有一定的影响,但变化幅度并不明显。可见起沙并不需要特别强大的地面风速。但也说明形成起沙和形成沙尘暴的机制并不完全相同。

地面大风的形成有多种原因。高空动量下传是其中重要的方式之一。高空动量从对流层中上层向下输送到达地面往往需要通过不同的动力过程实现。首先是高空系统的发展导致锋区加强和下落(多数情况下出现对流层顶的折叠),这样可以使对流层中上层的动量下传至对流层中低层。动量进一步下传到达地面的方式最常见的是地面冷锋后强冷平流引导动量下传,导致地面大风加强。而强沙尘暴过程中(如强冷锋、蒙古气旋)往往出现高空系统的强烈发展以及地面冷锋及其后强冷平流对沙尘暴的引导,因此,同时具备了地面大风出现的条件。另外,在沙尘暴发生过程中,往往出现深厚的混合层, Takemi<sup>[23]</sup>, Pauley<sup>[24]</sup>指出:这一方面由于干旱地区地面加热往往形成深厚的混合层,另一方面冷锋锋前抬升、锋后下沉也会导致大气旺盛的垂直混合,形成深厚混合层。而深厚混合层是一种有利于动量下传的层结状态(这是春季午后地面风速明显增大的原因)。可见,导致沙尘暴的天气系统往往同时具备了形成地面大风的条件。对于引发沙尘暴的中尺度系统,其有利于形成地面大风的天气条件更是毋庸置疑的。

### 1.4 沙尘暴形成的层结因素

大风是产生沙尘暴的重要条件,但沙尘暴的形成并不总与地面大风相伴。瞿章<sup>[25]</sup>的研究表明某些不伴有沙尘暴的大风,比与沙尘暴相伴的风力还要大,且年平均的沙尘暴日数远小于大风日数,说明大风并不是形成沙尘暴的唯一条件。许多研究表明沙尘暴多发于午后至傍晚,说明不稳定因素对沙尘暴形成具有重要意义。

对成熟沙尘暴结构进行的理论研究表明,在稳定层结下沙尘浓度随高度指数减小,而在对流状态下,沙尘浓度随高度保持不变,说明了大气层结状态对沙尘暴形成的重要性。

沙尘暴是一种干对流风暴,因此,干对流强度是沙尘暴强度的一个重要决定因素。能够影响干对流强度的因素,不仅有低层扰动的强弱(如锋面抬升等),还包括有利的层结条件。相关研究指出:热力不稳定层结,即在近地面层形成超绝热层( $\partial\theta/\partial Z < 0$ ),是沙尘暴发生的有利层结条件。

Carlson等<sup>[26]</sup>研究发现,沙尘气溶胶在白天将削弱地面接收的太阳辐射,同时加热地面上方的沙尘层大气,夜间则削弱地面的辐射冷却同时冷却地面上方的沙尘层大气,将减小大气层结的日变化。而在沙尘暴传输过程中,沙尘气溶胶辐射强迫将使850-500hPa沙尘层维持一等熵混合层<sup>[27]</sup>。Legrand等<sup>[28]</sup>对撒哈拉尘暴辐射特性的研究表明,尘霾通过影响辐射过程,降低了白天地面的加热作用和夜间近地面的冷却作用。申绍华、陈受钧<sup>[29-30]</sup>利用数值模拟方法研究了沙尘辐射效应对锋面系统的影响,结果表明:白天沙尘辐射加热在大气低层导致锋生,晚上沙尘辐射冷却导致锋消,这与实际观测结果是一致的。

### 1.5 沙尘的卫星遥感监测研究

卫星遥感是沙尘暴监测的一种重要手段,特别是近些年随着卫星遥感及反演技术的快速发展。可用于沙尘暴监测的卫星包括极轨卫星和静止卫星。极轨卫星具有分辨率高,同一地方每天有2次观测,静止卫星具有时间分辨率高,成像范围大等特点,在预报业务中都得到了较好的应用。

根据沙尘羽的卫星云图特征可以更清楚准确的分辨沙尘暴。郑新江等<sup>[31]</sup>对1993年5月5日沙尘暴天气云图特征的研究结果表明:在可见光云图上,沙尘暴的顶部区域结构均匀,顺着风向有纹理,色调呈浅灰色,有高云的暗影。沙尘暴区顶部反照率与云团和地表的反照率有明显差别,地表反照率最低,达15%左右;沙尘暴顶部比地面高,达24%;云团的反照率最高,达到51%。在红外卫星云图上,沙尘暴、云团和地表的温度有明显的差异。其中,云团的温度最低,集中在-54℃附近;沙尘暴区温度次之,集中在-3℃附近;地表温度最高处可达+39℃。

徐希慧<sup>[32]</sup>对沙漠地区(塔克拉玛干沙漠)沙尘暴的卫星云图特征的研究结果表明:在可见光卫星云图上,陆地表面有水体、雨迹,森林覆盖的地方反照率最小,呈黑色;有作物、牧草、荒漠草原覆盖的地区为深灰色或灰色;在干旱气候区的沙漠,由于植被稀少,反照率较大,呈现灰色或浅灰色;云系和高山积雪则反照率最大,为灰白色或白色;而沙尘暴所形成的“沙尘羽”和低云相似,呈灰白色,两者的区别在于,低云边界清楚,外形呈现出一定的形状或因扰动而起伏不平;沙尘暴则是边界不清楚,呈比较均匀的羽毛状,分布在云系的下面,容易与云系区分。“沙尘羽”的分布受地形走向影响,它的边缘往往和盆地边缘一致。

近些年,多通道的遥感监测数据为沙尘暴的监测提供了有力的支撑。用于沙尘暴监测的主要遥感数据包括NOAA/AVHRR、Terra/MODIS、GMS/VISSR、风云系列,空间分辨率从250m至5km,光谱范围覆盖可见光、近红外和中远红外。通过分析多时次的遥感数据,可以动态监测到沙尘暴的起源、扩散及沉降过程。利用GMS卫星逐日、逐时的遥感监测数据,结合地面气象站观测、天气图分析和中尺度数值模拟等资料,可以对沙尘暴全过程的机制有进一步的了解。

## 1.6 沙尘气溶胶的物理化学及辐射特征

沙尘暴主要通过注入大气的沙尘气溶胶对生态环境及气候变化产生影响。沙尘气溶胶,即矿物沙尘(mineral dust),是对流层气溶胶的主要构成成分。据初步估计,全球每年进入大气的沙尘气溶胶达10~20亿吨<sup>[33]</sup>,几乎占了对流层中气溶胶总量的一半。矿物沙尘气溶胶主要来源于干旱或半干旱地区的风蚀过程,在全球尺度,主要的原地在撒哈拉沙漠和塔克拉玛干沙漠。东亚地区的沙尘源区主要在中亚和中国西北地区的沙漠以及黄土高原。在春季,中国北方裸露的草原和耕地也会成为沙尘源区<sup>[34]</sup>。沙尘气溶胶物理化学特性的研究主要是观测分析粒子谱分布、质量浓度、光学特性、化学组分及其富集因子等方面。大气中沙尘粒子的谱分布与沙尘源地的地表成分及输送过程有关。由于受沙尘强度、降水及大气环流形势等的影响,大气中沙尘气溶胶的浓度和分布具有明显的时间变化。北京地区的观测发现沙尘浓度在春季最大,其次是冬季,夏秋季最小<sup>[34]</sup>。沙尘暴天气过程中,沙尘中各元素的浓度差异

也很大。如杨东贞等对1988年4月9-12日出现在北京地区一次强沙尘暴的测定结果为：元素浓度>500ppm的有Al、Fe、K、Mg、S、P、Ti、Na；浓度为100-500ppm的有Mn、Ba、V；浓度为1-100ppm的有Zn、Ni、Pb、Cr、Co、Cd。杨东贞等<sup>[35]</sup>对1990年4月发生的两次沙尘暴的分析结果表明：沙尘气溶胶中以地壳元素为主，主要存在于大粒子( $d > 2.1\mu\text{m}$ )中，一些人为排放污染元素主要分布在小粒子( $d < 2.1\mu\text{m}$ )中，所以沙尘气溶胶中的元素主要来自于自然源。

## 1.7 沙尘暴数值预报

近些年，随着沙尘暴受到越来越多的关注，沙尘暴数值预报成为沙尘暴业务预报的重要工具，同时，利用沙尘暴模式进行数值模拟也成为沙尘暴研究的重要手段之一。Wang等<sup>[36]</sup>采用天气类型、摩擦速度和土壤湿度三个控制因子设计了东亚地区起沙机制模型。程丛生等<sup>[37]</sup>利用参数化方法及基于MM5模式开发了沙尘数值预报模式并应用于沙尘天气预报中。赵琳娜<sup>[38-39]</sup>等发展的沙尘天气数值预测系统耦合了中尺度天气模式MM5（包括陆面模式）、起沙模式、沙尘传输模式、GIS（地理信息系统）数据集。这些模式通常采用的技术方案为：将中尺度天气模式、起沙模式和输送模式耦合在一起，同步进行积分。边界层模式（MRF）和陆面模式（OSU/Eta）分别提供摩擦速度、表层土壤湿度给起沙模式，起沙模式计算起沙率，然后计算垂直沙通量给输送模式，输送模式利用天气模式提供的水平风场、垂直速度、温度、位势高度等驱动沙尘模块，在每个格点计算瞬时沙尘浓度。模式首先计算摩擦速度和临界摩擦速度，当摩擦速度大于临界摩擦速度时，开始起沙。这些模式在沙尘暴预报和研究中均得到了不同程度的应用，成为目前沙尘暴预报和研究的重要领域之一。

## 1.8 导致沙尘暴的主要流型和天气系统

### 1.8.1 主要环流形势

沙尘暴的发生除应具备有利的气候背景和下垫面条件外，还需有利的天气流型及天气

系统的配合。赵翠光, 刘还珠<sup>[40]</sup>从冷空气移动的路径和影响方式, 将沙尘暴发生的环流形势分为三种: 西北冷锋型、西方槽脊移动型和北方路径型。其中, 西北冷锋移动型是造成我国北方沙尘暴天气最多的一种环流形势。同时指出, 沙尘暴的爆发式高低空环流配合发展的结果, 冷暖空气加强并交绥于蒙古和我国西北、内蒙古等地, 促使地面冷高压和蒙古气旋的生成和发展, 地面气压梯度加大、风速加强, 这是沙尘暴形成的天气条件。

### 1.8.2 主要天气系统

造成沙尘暴的天气系统包括天气尺度、中尺度、小尺度等不同尺度。其中, 较为普遍的是天气尺度。王式功<sup>[3]</sup>总结了我国西北地区几次大范围沙尘暴过程, 得出沙尘暴多发生于: ①经纬向环流调整时期; ②与冷锋活动相伴; ③低空东风急流; ④中尺度系统, 多为中低压或中飑线系统。Brazel<sup>[41]</sup>通过对美国亚利桑那州1965-1980年沙尘暴过程的分析, 提出4种引发沙尘暴的天气系统: 锋面、雷暴与对流、热带扰动、高层切断低压。Pauley<sup>[24]</sup>认为, 与地形密切联系的背风坡槽、在陡峭地形附近形成的地形强迫地面风, 均适宜沙尘暴的形成。另外, 气旋系统的强气压梯度, 也有利于沙尘暴的发生。胡隐樵等<sup>[42]</sup>研究了干飑线和强冷锋前干飑线发展同黑风暴爆发的关系后指出, 由于强冷锋过境时冷锋前干飑线移至被强烈太阳辐射加热的地表以及条件不稳定大气层结地区, 干飑线进一步发展致使黑风暴爆发。

刘景涛等<sup>[43]</sup>系统分析了导致我国北方强沙尘暴的天气系统类型, 并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纯冷锋型、蒙古气旋与冷锋混合型、蒙古冷高压型和干飑线与冷锋混合型4种类型。

### 1.8.3 导致沙尘暴的天气尺度系统

引发我国北方强沙尘暴的4类天气系统中, 干飑线为中尺度系统, 尽管强度较大, 但出现次数较少; 蒙古冷高压底部倒槽型介于天气尺度和中 $\alpha$ 尺度之间, 系统稳定少动, 同时出现次数也较少。因此, 这两类天气系统导致的沙尘暴的影响较小。而冷锋和蒙古气旋这两类天气尺度系统, 不仅系统尺度较大, 同时, 出现次数较多, 约占强沙尘暴过程的9成以上, 因此, 成为影响我国北方沙尘暴的主要天气系统。

### 1.8.3.1 冷锋

冷锋是我国北方春季出现较频繁的天气系统。冷锋过境时，因锋前后的冷暖气团之间有较大的气压梯度，在锋后产生大风，兼之我国北方春季降水偏少，地表干燥，大风掠过沙地时，常常导致沙尘暴天气。

地面高压的前缘都有一条强度较强的冷锋，冷锋随高度向冷空气一侧倾斜，在高空等压面图上对应有很强的锋区，锋区结构上宽下窄。冷锋的移动方向与地面高压的路径有密切关系；与锋前的气压系统和地形也有关；与引导冷空气南下冷锋后的垂直于锋的高空气流量有关<sup>[44]</sup>。

地面气压系统活动特征是<sup>[45]</sup>：强大的冷气团（冷高压）由中亚东移或由西西伯利亚南下至我国新疆北部，然后经河西走廊东移（西方路径），或由西西伯利亚向东南方向移经蒙古西部山地，自西北方向袭击我国（西北路径），锋后冷气团前部有强大的气压梯度，据统计纯冷锋型冷锋后气压梯度可达15~25hPa/500km，冷锋前后出现明显的负变压和正变压中心，两者之间变压差可达到6~12hPa。大气受强大的气压梯度力和变压梯度力共同作用形成强风，起沙成暴。

刘景涛等研究表明<sup>[43]</sup>，导致我国北方强沙尘暴的冷锋具有典型的第2类型的冷锋垂直结构，冷锋后有强气压梯度，冷平流强烈，锋后为西北大风，沙尘暴随冷锋自西向东（西方路径）或自西北向东南（西北路径）袭击我国北方，形成西北东南向的强沙尘暴带。在沙尘暴源区（如塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠等）和沿途裸露地表扬起的大量沙尘，由高空西北气流输送到东南方向，此类沙尘暴对京津乃至华东地区影响最大，如1992年4月10日强干冷锋出发的强沙尘暴过程，其沙尘影响到我国东南沿海地区。同时刘景涛指出在普查的33次特强沙尘暴过程中有25次天气系统为纯冷锋型，占总次数的76%，这是造成特强沙尘暴最主要的天气系统类型。

在纯冷锋型沙尘暴过程中，“沙尘壁”前后辐射造成的热力正负反馈作用强度与太阳辐射日变化关系密切，白天到达地面的太阳短波辐射随着大气浑浊的增大而减小，白天，冷锋

后沙尘暴区太阳短波辐射很少达到地面，地面增温弱，而冷锋前天空晴朗少云，太阳辐射极易被裸露的地表吸收，地面增温迅速，造成冷锋前后大气非绝热加热不均，加大了冷锋前后的温度梯度，造成局地锋生，使地面风不断加大，被扬起的沙尘不断增加，能见度越来越恶化，即白天冷锋型沙尘暴自身会形成热力正反馈。入夜后，冷锋后沙尘暴区的沙尘阻挡了地面长波辐射向太空散失，地面冷却缓慢，而冷锋前地面迅速辐射冷却，使冷锋前后温度梯度减小，造成局地锋消，产生负反馈。所以沙尘暴在午后到傍晚最强，入夜后明显减弱，这是纯冷锋型沙尘暴过程的重要特征。

### 1.8.3.2 蒙古气旋

蒙古气旋是我国北方沙尘暴的主要影响系统之一，由蒙古气旋导致的沙尘天气对我国华北及东北地区影响最大。

蒙古气旋是生成于蒙古国（大约在 $43^{\circ}\text{N}$ — $50^{\circ}\text{N}$ ， $90^{\circ}\text{E}$ — $120^{\circ}\text{E}$ 范围内）的气旋。它是斜压性很强的极锋上的波动，是典型的锋面气旋。（另一类气旋虽不在蒙古国生成，但移至蒙古国后获得明显加强，其发展的特征、造成的影响等均类似于蒙古气旋，因此也可作为蒙古气旋研究）。另外，蒙古气旋产生于阿尔泰—萨彦岭山地的背风坡，具有较典型的背风坡气旋特征。

蒙古气旋的强度各月有所不同，4、5月为最强，中心数值一般在990~1009hPa之间，12月和1月最弱，大多在1010~1029hPa之间<sup>[44]</sup>。

从地面形势看，蒙古气旋形成过程大致可分为三类<sup>[45,46]</sup>，以暖区新生类出现次数最多。

第一，暖区新生气旋，即：当西西伯利亚或中亚的气旋向东或向东北移动时，受到萨彦岭、阿尔泰山等山脉的影响，强度往往会减弱，甚至填塞，中心部分与南部的暖区脱离而向东北方向移去，南端的冷锋受地形阻挡，移动缓慢，冷锋前方的暖区可形成一个新的低压中心。当其西边的冷空气进入低压和其前部的高空槽的暖平流的作用下，形成冷、暖锋，产生气旋。

第二，倒槽内生成气旋，即：从中亚移来或北疆一带发展起来的伸向蒙古西部的暖性倒槽，当其发展较强时，倒槽后北部形成一个低压，当有冷空气侵入其后部时，可形成气旋。

第三, 蒙古副气旋, 即: 当冷空气自西北或西向东南或东北移动进入萨彦岭山地时, 形成钳状, 一部分冷空气先侵入蒙古且与暖性低压结合产生气旋并迅速东移。这时冷空气主体仍停留在蒙古和苏联边界一带, 之后, 在蒙古地区形成低压。当冷空气整体东移时, 蒙古境内有产生一气旋, 即称为副气旋, 一般情况下, 这两个气旋产生相隔时间不超过24小时, 前一个气旋迅速减弱, 后一个气旋发展。

蒙古气旋的移动路径有三条<sup>[45]</sup>: (1) 东北路径, 自源地向东偏北方向移动, 经内蒙古东北部向东北方向移动, 此路径为最多, 约占48%。(2) 偏东路径, 自源地向东经内蒙古中东部再向东移动, 约占总数27%。(3) 东南路径, 自源地经锡林郭勒盟、赤峰市南部向河北省移去, 此路径为最少, 约占25%。

蒙古气旋是春季东亚中高纬度重要的天气系统, 不仅发生频率高, 而且影响范围广, 常常波及蒙古国及中国华北, 东北的大部分地区, 造成风雪、寒潮、沙尘暴等强灾害性天气。根据中国气象局沙尘天气年鉴的统计<sup>[46]</sup>, 从2000年1月到2003年12月这48个月期间共有68次沙尘天气, 其中有48次是由蒙古气旋引发, 在这48次蒙古气旋引发的沙尘天气中有33次沙尘天气强度达沙尘暴以上, 由此可见在引发沙尘天气、尤其是强沙尘暴天气的系统中, 蒙古气旋相当值得关注。

刘景涛等对2001年4月6~7日发生在中国北方的一次强沙尘暴过程分析表明<sup>[47]</sup>, 这次因蒙古气旋引起的沙尘暴, 强烈的干对流式沙尘暴起沙的动力机制。表现在三个方面: (1) 湍流的垂直输送, (2) 干冷锋强迫抬升和锋面次级环流, (3) 高空急流出口区左侧辐散强迫。赵琳娜等<sup>[48-49]</sup>, 赵志刚等<sup>[50]</sup>对造成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和数值模拟, 结果表明温度平流是气旋发展初期和成熟期的主导因子, 随气旋的发展斜压作用增强, 斜压作用是气旋发展加强的主要因子。

### 1.3 本文研究的目的和意义

综上所述, 冷锋型和蒙古气旋型是最为重要的沙尘天气影响系统, 这是由于干飚线型为中尺度系统, 影响地区较小, 多导致局地沙尘暴; 高压底部型则稳定少动, 也常常产生局

地沙尘暴。而尺度达到天气尺度系统,并且能够产生远距离传输影响下游地区的天气系统为冷锋和蒙古气旋。尽管国内对于蒙古气旋沙尘暴过程的个例研究较多<sup>[51-62]</sup>,或蒙古气旋沙尘过程与下垫面起沙机制的研究<sup>[63]</sup>,也有少数对蒙古气旋和地面高压底部沙尘暴的对比研究<sup>[64]</sup>,但针对蒙古气旋和冷锋型沙尘暴过程的对比研究还很少见到。因此,针对蒙古气旋型和冷锋型沙尘暴过程,对比研究它们在沙尘暴发生、发展机理、沙尘上扬高度及传输距离、沙尘暴移动路径和影响地区等方面的差异,对于认识我国北方沙尘暴形成机理、沙尘暴预报及沙尘暴防治无疑具有重要的理论和业务应用价值。

本文将利用2001年—2010年的天气观测资料(地面及探空),2001—2010年NCEP再分析资料,运用统计学方法研究冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程的空间分布、时间变化、移动路径、沙尘天气强度等特征。分别选取一个典型沙尘个例,利用天气学及诊断分析方法通过研究涡度、散度、垂直速度、位温等物理量的空间分布和时间变化特征,揭示冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴的动力、热力结构以及发生发展特点,并给出冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程的天气学模型。希望能够阐明冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气在动力、热力及发生发展等方面的差异。帮助预报人员做好沙尘暴的预报预警,为工农业生产和人民生活服务。

## 第二章 资料及分析方法

### 2.1 所用资料

本文采用了基本气象观测资料和有关沙尘暴灾害的相关信息和文献,参考了现有研究结果,统计整理了2001年到2010年10年间我国北方两种类型的沙尘天气过程,即冷锋型沙尘过程和蒙古气旋型沙尘过程。

#### 2.1.1 基本观测资料:

2010年1月1日—2010年12月31日,10年的高空、地面观测资料。应用地面观测站记录确定沙尘天气发生的时间、持续天数、范围、最大风速、移动方向、沙尘暴站数、最小能见度等要素。同时本文选取2010年3月19—20日和2006年3月9—10日两个沙尘暴过程分别对冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴天气进行对比分析。本文用常规气象观测资料中,地面资料为3小时一次,高空资料为12小时一次。

#### 2.1.2 NCEP再分析资料:

用于对沙尘天气个例进行诊断分析。针对沙尘天气的两种主要影响系统,发生发展的动力、热力特征进行深入的分析。诊断分析中所以资料为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  NCEP分析资料,该资料每6小时一次。

### 2.2 研究方法

综合运用统计学、天气学分析、动力诊断分析等研究方法,对我国北方沙尘天气发生的

机理进来深入分析和研究。

## 2.2.1 统计分析方法

### 2.2.1.1 冷锋型、蒙古气旋型天气过程区分标准

由于地形影响（蒙古西部萨彦岭山地），当蒙古高原有低值天气系统影响时（包括沙尘暴过程），往往在背风坡形成低压系统。同时，蒙古气旋沙尘暴过程中，气旋冷锋同样作为具备冷锋特征的天气系统出现。因此，冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程均有冷锋和低压出现，这使得冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程具有一定的相似性。本文主要以地面天气图为主，通过以下特征来区分冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程。

（1）冷锋型沙尘天气过程：强大的冷高压由中亚东移或由西西伯利亚南下至我国新疆北部，然后经河西走廊东移（西方路径），或由西西伯利亚向东南方向移经蒙古西部山地，自西北方向袭击我国（西北路径），锋后冷高压前部有强大的气压梯度，冷锋前后出现明显的负变压和正变压中心。冷锋北端尽管也伴有低压活动，但在整个沙尘天气过程中加深不明显（6小时中心气压下降 $\leq 6$  hPa）。另外，这类过程具备如下典型特征：

- ① 冷锋位于地面高、低压之间的过渡带，未穿过低压中心。
- ② 整个天气过程中，低压区附近没有沙尘天气发生。
- ③ 沙尘天气出现在冷锋后，与地面偏北风或偏西风配合。

（2）蒙古气旋型沙尘过程：在蒙古国或贝加尔湖附近形成典型的气旋波（有明显的冷、暖锋结构），形成后多向东南或偏东方向移动，并常在蒙古国中部（ $50^{\circ}$  N以南）发展加深，过程后期常形成锢囚。另外，还可通过以下特征进行判断：

- ① 冷锋穿过低压中心，并存在显著的气旋暖锋。
- ② 沙尘天气不仅出现在气旋冷锋后，也出现在低压（气旋）区，包括其东南、东北象限，可与地面偏南风或东南风配合。
- ③ 遥感图上沙尘云呈现涡旋带状。

### 2.2.1.2 冷锋型、蒙古气旋型天气过程的统计

利用统计学方法研究冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程的空间分布、时间变化、移动路径、沙尘天气强度等特征。利用 2010 年 1 月 1 日—2010 年 12 月 31 日, 10 年的高空、地面观测资料。应用地面观测站记录确定沙尘天气发生的时间、持续天数、范围、最大风速、移动方向、沙尘暴站数、最小能见度、能见度小于 200 米的站数及影响系统的强度(其中, 冷锋型以沙尘天气过程中地面冷高压中心最大气压值表示, 蒙古气旋型以沙尘天气过程中气旋中心最低气压值表示)。后附统计的表格, 见附录一、二。(附录一为 2001-2010 年冷锋型沙尘过程, 附录二位蒙古气旋型沙尘过程。)

## 2.2.2 天气学及诊断分析

### 2.2.2.1 典型个例的选取

通过对 2001-2010 年间冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程的普查, 基于①天气系统典型, 具有代表性②沙尘过程强度大③沙尘过程影响范围广④过程各类资料, 特别是信息化较完整等项原则来确定研究个例⑤近 5 年同期过程。

冷锋型过程: 选择 2010 年 3 月 19-20 日沙尘暴过程, 过程从 2010 年 3 月 19 日 05 时持续至 20 日 20 时, 影响蒙古、内蒙古、甘肃、陕西北部、山西、河北、北京、天津、山东、河南、安徽、江苏等多个省区地区, 其中, 在内蒙古河套北部为能见度小于 200m 的强沙尘暴区, 海力素 1 个测站出现黑风暴(能见度 0m)。

蒙古气旋过程: 选择 2006 年 3 月 9-10 日沙尘暴过程, 过程从 2006 年 3 月 9 日 11 时持续至 10 日 14 时, 影响蒙古、内蒙古、宁夏、陕北、山西北部、河北、吉林西部、辽宁北部、黑龙江西部、北京、天津等多个省区地区, 其中, 内蒙古中部为能见度小于 200m 的强沙尘暴, 朱日和、苏尼特右旗 2 个测站出现黑风暴(能见度 0m)。

### 2.2.2.2 对典型个例的诊断分析

选取 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型和 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型两个典型沙尘天气过程，主要使用实况地面、高空天气图， $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  NCEP 再分析资料，通过计算冷锋过境前、后，散度、垂直速度、涡度、比湿、相对湿度、位温，给出沙尘天气在不同时刻的物理量场，研究冷锋型沙尘过程的特征；同样对于蒙古气旋型生产过程，研究气旋及气旋冷锋的移动、过境前、后，上述物理量场的演变。对比研究这两个典型个例中涡度、散度、垂直速度、位温等物理量的空间分布和时间变化特征，揭示冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴的动力、热力结构以及发生发展特点。同时，分析两类沙尘暴发生前、中、后的地面气象要素的变化，以揭示冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程的差异，并给出这两个典型沙尘个例的天气学概念模型。

## 第三章 近 10 年冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程统计

### 3.1 两类沙尘过程统计说明

沙尘天气是在四季都有出现,本文统计的是沙尘天气过程,严格按照沙尘观测规范,即:在同一次天气过程中,我国天气预报区域内 5 个或 5 个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了浮尘天气,记为浮尘天气过程;当在同一次天气过程中,我国天气预报区域内 5 个或 5 个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了扬沙天气,记为扬沙天气过程;当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,记为沙尘暴天气过程;当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强沙尘暴天气,记为强沙尘暴天气过程。

对于冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程的说明:对于沙尘天气,冷锋的出现是普遍的。纯冷锋型沙尘天气,从地图上,大多在强冷高压南部或东南部有低压活动,随着冷空气南下,高压底部冷锋加强,但没有进入低压,地面低压迅速减弱,沙尘天气出现在地面高压前缘的较强的冷锋。而蒙古气旋的冷锋,是冷锋进入暖区,形成气旋,这两类的主要区别在于,蒙古气旋型中暖空气活动活跃。

### 3.2 两类沙尘过程发生次数

统计的冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程中,冷锋型为 110 次,蒙古气旋型为 74 次。沙尘天气过程在这 10 年中几乎一年四季都有出现,春季最多,秋季最少。

从冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程各月发生次数统计(图 3.1)知:冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程在一年四季均有发生。主要集中在春季,其中 4 月份最多,3 月份其次。冬季也出

现较多的沙尘天气过程。冷锋型沙尘过程 3 月、4 月均为 36 次；蒙古气旋型沙尘过程 4 月发生次数最多（23 次），3 月次之（20 次）。同时，从图 3.1 知：冷锋型沙尘过程出现次数多，约占统计总数的 60%，蒙古气旋型沙尘过程占 40%。

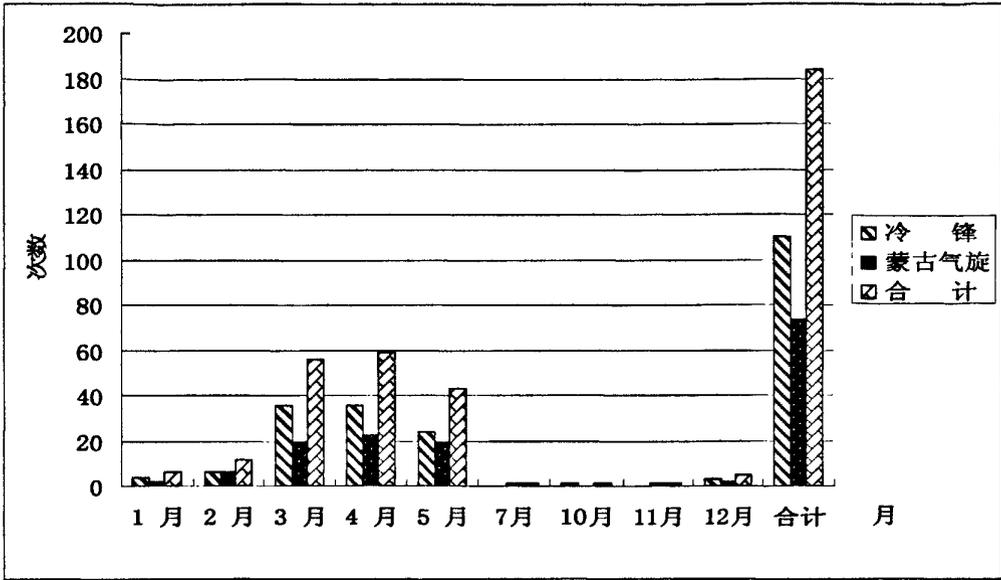


图 3.1 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程各月发生次数统计 (2001~2010 年)

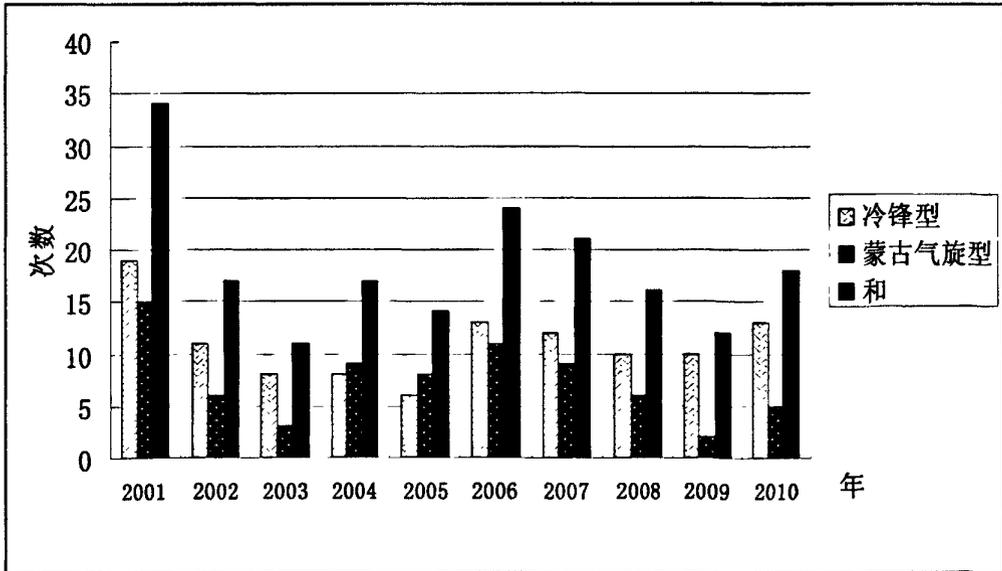


图 3.2 2001-2010 年冷锋型、蒙古气旋型沙尘天气过程的发生次数

由图 3.2 知, 2001-2010 年的十年间, 我国北方沙尘天气过程出现次数呈波动减少, 2001 年沙尘天气过程最多; 2006 年有所增加, 此后又开始波动减少, 2010 年沙尘天气略有增加。10 年间除 2004、2005 年冷锋型沙尘过程比蒙古气旋型沙尘过程略少, 其余的八年中冷锋型影响均多于蒙古气旋产生的沙尘天气过程。由此可见, 冷锋是我国北方沙尘过程最主要的影响系统。

### 3.3 两类沙尘过程日数及沙尘过程持续时间

表 3.1 冷锋型、蒙古气旋型影响下各月沙尘日数统计表 (2001~2010 年)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
冷 锋	6	9	56	59	33	0	2	0	4	169
蒙古气旋	3	8	32	42	32	1	0	2	4	124
合 计	9	17	88	101	65	1	2	2	8	293

根据 2001-2010 年冷锋型、蒙古气旋型影响下各月沙尘日数的统计结果 (表 3.1) 知, 10 年间受冷锋影响出现的沙尘总日数为 169 日, 而蒙古气旋影响下出现沙尘天气的日数为 124 天。两类沙尘总日数达 293 天, 年平均出现 29.3 天。4 月份是冷锋和蒙古气旋影响下沙尘日数出现最多的, 全年 1/3 以上的沙尘日数主要集中在 4 月; 3 月冷锋型沙尘日数略少于 4 月, 约占全年冷锋型沙尘日数的 1/3, 5 月冷锋型沙尘日数约为全年冷锋型沙尘日数的 20%; 对于蒙古气旋型沙尘过程, 3 月和 5 月出现的日数相当。6 月、8 月和 9 月没有沙尘过程出现。从两类沙尘日数和的统计可知, 6 月到 11 月偶尔出现沙尘天气过程, 12 月开始沙尘日数逐渐增加, 3 月份显著增加, 4 月达到最多, 5 月沙尘日数也较多。

对于沙尘天气持续时间, 本文是从沙尘在我国观测区域内从开始出现沙尘天气, 到下游沙尘天气结束为一次沙尘天气过程的持续时间, 不是指某一区域沙尘的持续时间。从统计结果知: 总体而言, 一次沙尘天气过程最多能够持续三天, 最少持续一天, 51% 的沙尘天气过

程持续一天。十年间冷锋型沙尘天气过程持续一天（54次）和持续两天（53次）的次数相当，分别约为48.5%；平均每次冷锋过程持续时间为1.54天。3、4月份冷锋型持续两天的过程较多，这与冷空气在3、4月活动频繁且势力较强有关，持续3天仅出现在4-5月；5月份冷锋型持续一天的次数是持续两天的次数的2.3倍，这与冷空气势力在5月开始减弱有关；持续3天的沙尘天气过程在统计的十年间共3次，出现在4月（2次），5月（1次）（图3.3）。

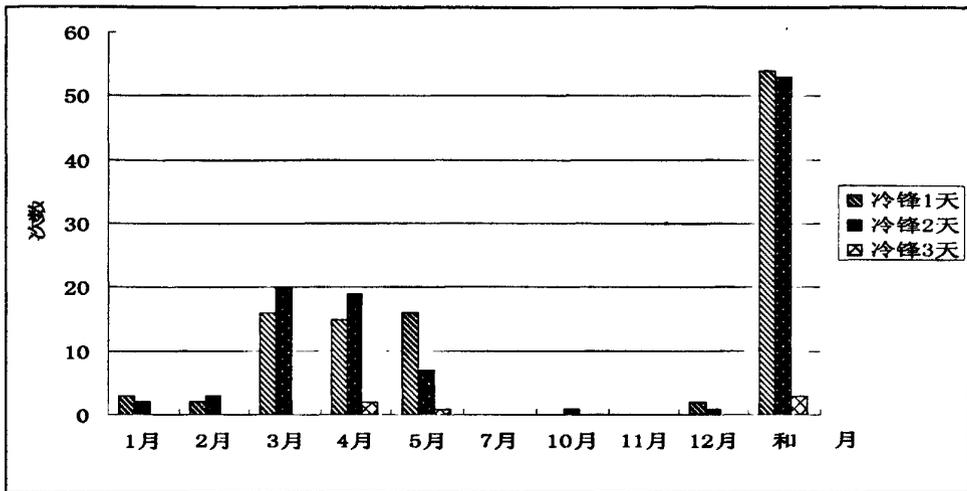


图 3.3 2001-2010 年冷锋型沙尘天气过程持续时间统计

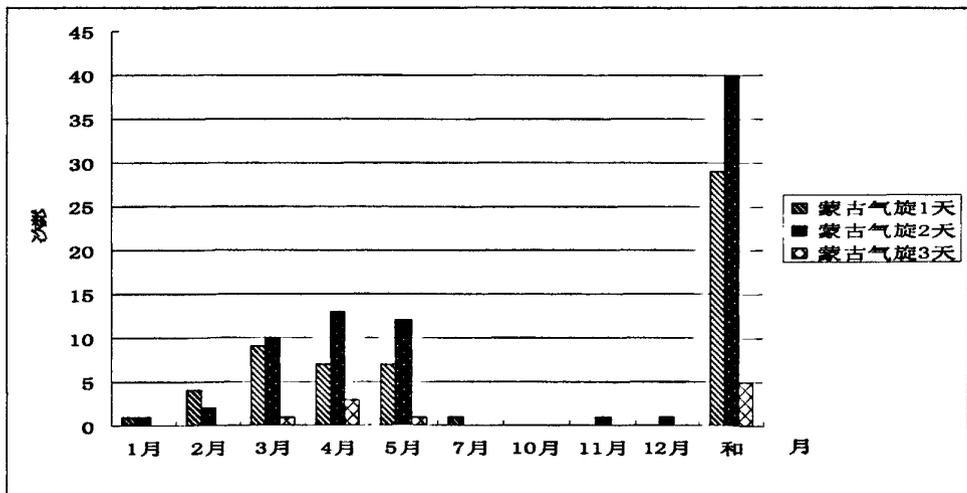


图 3.4 2001-2010 年蒙古气旋型沙尘天气过程持续时间统计

蒙古气旋型沙尘天气过程持续时间的统计(图 3.4)表明:蒙古气旋型沙尘天气过程 54% 持续两天, 39%持续一天, 7%能持续 3 天。平均每个蒙古气旋型沙尘天气过程持续 1.68 天。春季(3-5 月)各月蒙古气旋型沙尘天气均是持续两天为最多, 特别是 4 月、5 月, 蒙古气旋型沙尘天气过程持续两天的次数比 1 天的明显增多, 其中 4 月蒙古气旋型沙尘天气持续两天的次数是持续一天次数的接近 2 倍, 同时持续 3 天的的蒙古气旋型沙尘天气过程 60%在 4 月。由此可见, 蒙古气旋型沙尘天气过程在 4 月份最为活跃; 随着春季气温回升, 暖空气的活动增强, 蒙古气旋产出是沙尘天气强度也在增大。

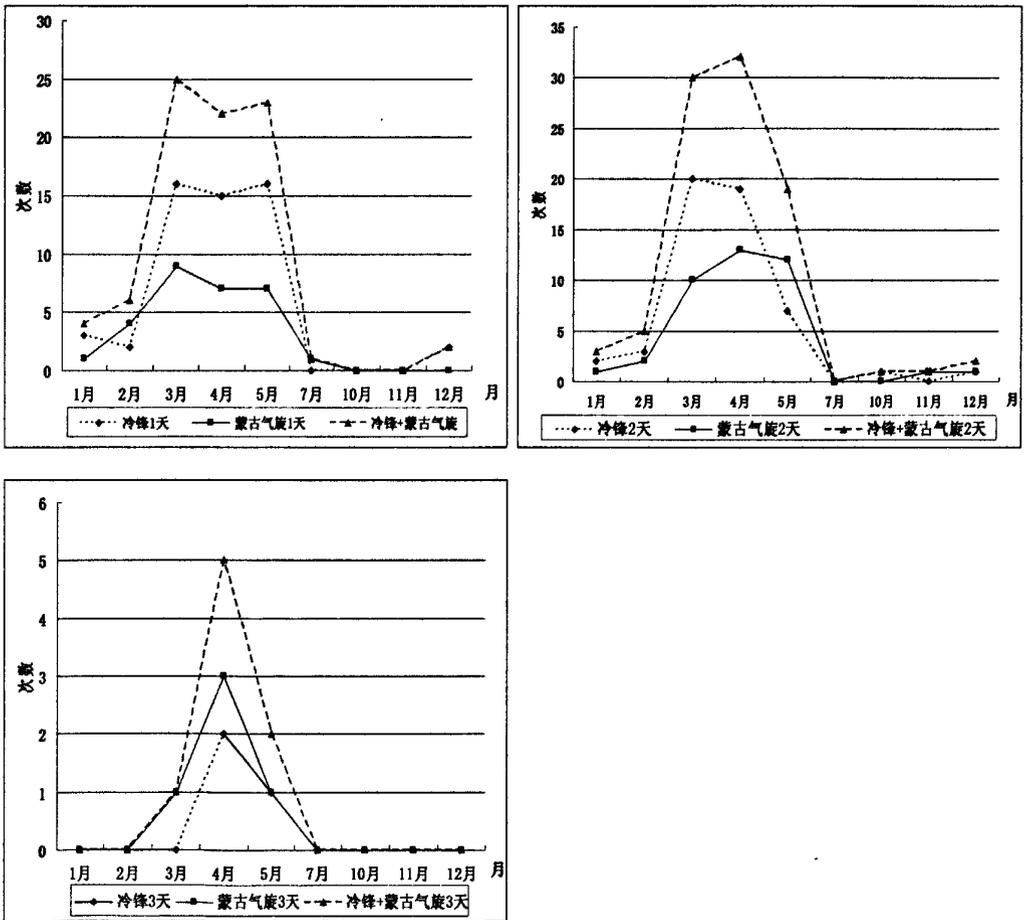


图 3.5 2001-2010 年冷锋、蒙古气旋型、冷锋+蒙古气旋型沙尘天气过程持续时间统计

(a) 持续一天; (b) 持续两天; (c) 持续三天

对比图 3.5 (a、b) 知: 3 月、4 月冷锋型、蒙古气旋型两类沙尘过程持续 2 天的比 1 天的多, 5 月份开始沙尘天气过程大多持续 1 天。两类沙尘过程能够持续三天的主要是在 4 月份 (图 3.5c)。冷锋型沙尘过程持续一天、两天的次数均大于蒙古气旋型沙尘过程出现的次数。只有持续 3 天的天气过程是蒙古气旋型多于冷锋型。

### 3.4 两类沙尘过程影响系统强度

对于两类沙尘天气过程影响系统强度的说明: 蒙古气旋型以整个沙尘天气过程持续期间地面气旋中心最低气压值表示蒙古气旋的强度; 冷锋型的强度以整个沙尘天气过程持续期间地面冷高压中心最高气压值表示。

表 3.2 2001~2010 年冷锋型沙尘过程各月冷高压中心气压数值统计表 (单位: hPa)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月
平均气压	1047	1046	1037	1033	1024	—	1025	—	1057
最高气压	1062	1050	1063	1048	1048	—	1025	—	1063
最低气压	1038	1042	1018	1018	1015	—	1025	—	1045

从 2001-2010 年冷锋型沙尘过程中冷高压中心气压值的统计 (表 3.2) 知: 平均冷高压中心气压在 12 月达到最大, 从 12 月到次年 5 月, 平均冷高压中心气压值是不断减小的, 此后开始增加。在沙尘多发月份, 冷高压中心气压值最大达到 1063 hPa, 最小为 1015 hPa。

表 3.3 2001~2010 年蒙古气旋沙尘过程各月冷高压中心气压数值 (单位: hPa)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月
平均气压	1007	1007	996	991	990	989	—	996	1012
最高气压	1007	1015	1008	1003	1020	989	—	996	1012
最低气压	1006	999	980	997	981	989	—	996	1012

从 2001-2010 年蒙古气旋沙尘过程中蒙古气旋中心气压值的统计 (表 3.3) 知: 蒙古气旋的强度从 11 月开始逐渐减弱, 12 月蒙古气旋强度最弱, 中心气压达 1012 hPa, 此后蒙古气旋中心强度逐渐加强, 在 3 月份蒙古气旋平均中心气压显著下降, 即从 3 月开始蒙古气旋强度显著增强, 与 3 月开始沙尘天气频发的特点一致。

### 3.5 两类沙尘过程的最大风速

本文统计的沙尘天气过程最大风速是指: 在沙尘天气持续期间, 沙尘区域内出现的最大风速。

表 3.4 2001~2010 年冷锋型沙尘过程各月最大风速统计表 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月
平均值	20	15	17	17	16	—	18	—	18
最大值	26	22	24	32	24	—	18	—	20
最小值	16	12	10	10	10	—	18	—	14

表 3.5 2001~2010 年蒙古气旋型沙尘过程各月最大风速统计表 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月
平均值	19	18	18	17	17	16	—	16	20
最大值	22	22	24	28	22	16	—	16	20
最小值	16	12	14	12	14	16	—	16	20

从 2001-2010 年冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程中最大风速的统计 (表 3.4、3.5) 知: 两类沙尘过程平均最大风速在  $15 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且两类沙尘天气过程的最大风速均出现在 4 月, 但冷锋型沙尘天气过程中出现的最大风速 ( $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 大于蒙古气旋型 ( $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。从两个

沙尘过程各的最大风速的最大值对比知,冷锋型的最大值较蒙古气旋型大,这可能与强冷空气爆发产生的大风有关。而对比最大风速的最小值,蒙古气旋型均大于冷锋型。

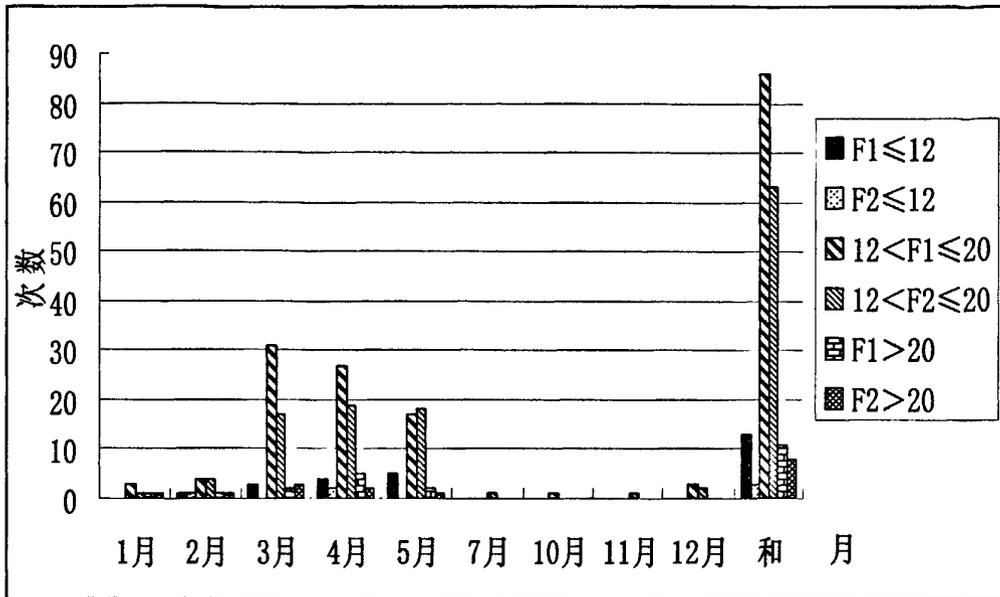


图 3.6 2001-2010 年冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程最大风速等级统计 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(F1: 冷锋型; F2: 蒙古气旋型)

本文将两类沙尘过程中的最大风速分为 3 个等级统计,即:最大风速  $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < \text{最大风速} \leq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和最大风速  $> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从各月两类沙尘过程最大风速分 3 个等级的统计(表 3.6)知:两类沙尘过程中,最大风速主要集中在  $12-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 约占总数的 81%; 其中冷锋型沙尘过程中,最大风速在  $12-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间的约占冷锋型过程的 81%, 而在蒙古气旋型中约占 85%。同时,冷锋型出现最大风速在  $12-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的次数 3 月  $>$  4 月  $>$  5 月; 蒙古气旋型出现最大风速在  $12-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的次数是 4 月  $>$  5 月  $>$  3 月; 沙尘过程中最大风速小于  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  这两个等级的最大风速均较少。

### 3.5 两类沙尘过程的沙尘暴站数

本文统计的沙尘暴站数是在整个沙尘过程持续期间,我国区域内出现沙尘暴天气,能见度小于 1 公里的站数。同一个站点在不同时次出现沙尘暴记为 1。扬沙天气过程,沙尘暴站数记为 0,但这样的沙尘过程也包括在本文天气系统统计中。在出现沙尘天气的情况下,(见表 3.6 和 3.7)蒙古气旋影响下有 6 次扬沙过程,约占蒙古气旋沙尘过程的 8%,冷锋型沙尘过程中有 26 次是扬沙过程,约占冷锋型沙尘过程的 24%(这里不包括有这样的天气形势,但没有出现沙尘天气的情况)。可见蒙古气旋影响下,若出现沙尘天气,绝大多数以沙尘暴为主,而冷锋影响下,出现的沙尘天气,约 1/4 为扬沙过程,3/4 为沙尘暴过程。其中,冷锋型出现强沙尘暴过程的占 55%。

表 3.6 2001~2010 年冷锋型沙尘过程各月扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程次数

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
扬沙	1	2	9	7	7	—	0	—	0	26
沙尘暴	1	3	7	6	4	—	1	—	1	23
强沙尘暴	2	1	20	23	13	—	0	—	2	61

表 3.7 2001~2010 年蒙古气旋沙尘过程各月扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程次数

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
扬沙	0	1	1	2	2	0	—	0	0	6
沙尘暴	1	3	3	8	5	0	—	0	0	20
强沙尘暴	1	2	16	13	12	1	—	1	2	48

冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程均能产生大范围区域性的沙尘天气。本文通过统计 2001-2010 年间这两类沙尘天气过程的沙尘暴站数,得出以下结论:冷锋型沙尘过程中,在

我国观测区域内最多有 116 个观测站出现了沙尘暴天气，平均有 14 个站出现沙尘暴天气。蒙古气旋型沙尘天气过程中，在我国观测区域内最多有 108 个观测站出现沙尘暴天气，平均有 22.5 个站出现沙尘暴。

### 3.6 两类沙尘过程的最小能见度

本文统计的沙尘过程最小能见度是指：在沙尘天气持续期间，出现沙尘天气的测站所出现的最小的能见度。我们知道当沙尘天气最小能见度为 0 时，为黑风暴。在 2001-2010 年间统计的 184 次沙尘过程中，有 24 次沙尘过程的最小能见度为 0。其中蒙古气旋型出现能见度为 0 的过程数为 14，约占蒙古气旋过程的 19%；冷锋型出现能见度为 0 的过程有 10 次，约占冷锋型沙尘过程的 9%。

### 3.7 两类沙尘过程的最小能见度<200m 的站数

本文对两类沙尘天气过程中能见度<200m 的站数进行了统计，分别按各月出现能见度<200m 的过程数及一次过程中出现能见度<200m 最多的站数进行。

表 3.8 2001~2010 年冷锋型沙尘过程各月能见度<200m 的过程数、最多站数

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
能见度<200m 的过程数	0	0	10	15	5	—	0	—	1	31
最多站数	0	0	6	17	12	—	0	—	4	Max=17

表 3.9 2001~2010 年蒙古气旋沙尘过程各月能见度&lt;200m 的过程数、最多站数

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
能见度<200m 的过程数	1	0	13	6	8	0	—	0	2	30
最多站数	5	0	17	15	5	0	—	0	3	Max=17

从冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程能见度<200m 的过程数及一次过程中出现能见度<200m 最多的站数的统计结果(表 3.8、表 3.9)知:出现能见度<200m 的沙尘天气过程主要出现在 3、4、5 及 12 月。冷锋型沙尘天气过程中,4 月出现能见度<200m 的过程数最多,达 15 次,3 月次之(10 次);而蒙古气旋型沙尘天气过程中,3 月份出现能见度<200m 的过程数最多(13 次),5 月次之(8 次)。两类沙尘天气过程中出现能见度<200m 的,一次最多有 17 个观测站出现能见度<200m。

对于能见度小于 200m 的强沙尘暴站数本文也做了统计,在十年间,平均每次冷锋型沙尘天气过程中约有 0.98 个站点出现了能见度小于 200m 的强沙尘暴,最多出现强沙尘暴的站数为 17 个。蒙古气旋型沙尘过程中,平均每次有 1.7 个站点出现强沙尘暴,最多出现强沙尘暴的站数也为 17 个。

### 3.8 两类沙尘过程的移动和扩展方向

沙尘天气的移动路径与影响沙尘天气的天气系统的移动方向有密切关系,即,沙尘暴的移动与造成沙尘天气的冷空气移动密切相关。王式功等<sup>[3]</sup>、钱正安等<sup>[8]</sup>研究指出,影响我国的沙尘暴的移动路径主要有三条,分别为西路、西北路、北路。其中西北路径沙尘暴最多,西方路径次之,北方路径最少<sup>[3]</sup>。西路:沙尘暴发源于南疆塔里木盆地南部,沿青藏高原北侧向东经河西走廊向东传播,其中一个分支进入柴达木盆地。该路沙尘暴移出河西走廊时往往强度大为减小。西北路:沙尘暴发源于北疆准噶尔盆地(包括阿尔泰山南麓),沿天山山脉北麓、河西走廊以北到达青藏高原东北侧;或经我国西北地区东部到达黄土高原;或沿河

西走廊转而向西到达塔里木盆地。北路：沙尘暴发源于蒙古国西部、南部、内蒙古中西部，沿东南方向移动，其中一个分支沿内蒙古西部到达河套附近；或经过内蒙古中部到达华北平原。本文统计 2001-2010 年间 184 次沙尘过程的移动方向是从按出现沙尘天气的先后时间的推移，沙尘天气出现的位置来定的。随着天气系统的移动，两类沙尘天气过程大多是自西向东移动，但每一类沙尘天气过程略有差别。从统计的 184 次沙尘过程中，主要的移动方向有 3 种：(1) 向东移动，(2) 向东偏南方向移动，(3) 向东偏北方向移动。有一些沙尘过程还出现了路径的转变，如先向东移，然后转向东北方向移动，或转为向东南方向移动。(1) 向东移动：是沙尘天气主要的移动方向，

这 3 种移动方向均在沙尘天气冷空气的移动路径上。本文从移动的方向上更细致的体现了两类沙尘天气过程的移动特点。从 2001—2010 年两类沙尘天气过程的统计，得出以下结论：

(1) 两类沙尘天气过程移动方向最大的差异在于：蒙古气旋型沙尘天气有向东偏北方向移动，且占蒙古气旋型沙尘个例总数的 21.6%，这与蒙古气旋的移动特点密切相关，而冷锋型沙尘过程几乎没有向东偏北方向移动，这同样与冷高压向南、东南方向移动的特点一致。向东偏北方向移动的蒙古气旋型沙尘天气过程大多影响到内蒙古的东北部、黑龙江西部、辽宁西部、北部、吉林西部、北部，而冷锋型沙尘过程大多不会出现在这些区域。

(2) 两类沙尘天气过程共同的特点：沙尘暴和扬沙天气在一些过程中出现明显的两个移动方向，沙尘暴向东移动，扬沙向东偏南方向扩散。这与我国西北、华北北部多出现沙尘暴，但在沙尘的下游大多为扬沙或浮尘天气的现象一致。较明显的两个移动方向的沙尘过程，冷锋型和蒙古气旋型均约占 5%。

(3)

表 3.10 各月冷锋型不同移动方向统计结果

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
E	2	4	10	16	8	—	1	—	3	44
SE	2	2	26	20	16	—	0	—	0	66
NE	0	0	0	0	0	—	0	—	0	0

从冷锋型沙尘天气过程移动方向的统计(表 3.10)知:冷锋型沙尘天气过程主要有两个移动方向,即向东移动和向东偏南方向移动。其中向东移动占冷锋型 40%,向东偏南方向移动的占 60%。同时可以看出在 3、5 月份冷锋型沙尘天气过程向东偏南方向移动的远大于向偏东方向移动的个数,向东偏南移动的分别约占 72%和 67%。4 月份冷锋型沙尘过程向东偏南移动的略多于向偏东方向移动。其余月份里,向两个方向移动的个数相差不大。

(4)

表 3.11 各月蒙古气旋型不同移动方向统计结果

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
E	1	5	13	14	11	0	—	1	2	47
SE	1	1	2	4	2	1	—	0	0	11
NE	0	0	5	5	6	0	—	0	0	16

从蒙古气旋型沙尘天气过程移动方向的统计(表 3.11)知:蒙古气旋型沙尘天气过程的主要移动方向有 3 个,即向偏东、东偏南和东偏北方向移动。其中向偏东方向移动的最多,约占蒙古气旋型的 63.5%;其次是向东偏北方向移动,约占 21.6%;向偏南方向移动的最少,约为 14.8%。向东偏北方向移动的沙尘天气过程出现在 3、4 和 5 月,这是蒙古气旋发展较成熟的月份。向偏东方向移动的在全年都会出现,且在各个月份里,蒙古气旋型沙尘过程向偏东方向移动的个数几乎在了各月沙尘天气的 50%—100%,即各月里有一半以上的蒙古气旋沙尘天气过程是向偏东方向移动的。

(1) 冷锋型、蒙古气旋型移动方向示意图



图 3.7 冷锋型沙尘天气过程的移动方向示意图

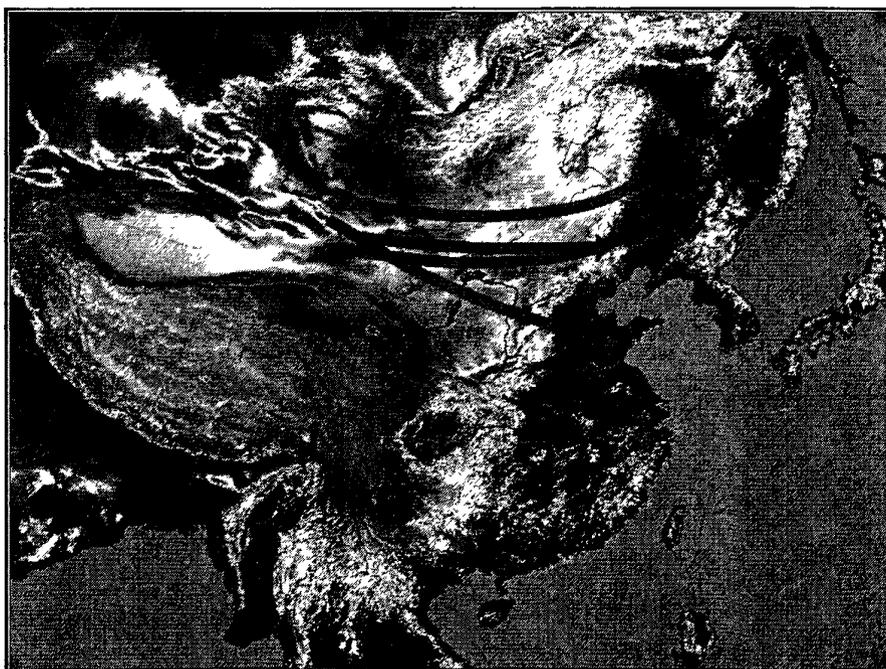


图 3.8 蒙古气旋型沙尘天气过程的移动方向示意图

从冷锋型和蒙古气旋沙尘天气过程移动方向示意图（图 3.7、3.8）知：

1、冷锋型沙尘天气过程移动路径较长。在东偏南方向上，最长的可以从蒙古西部、或新疆北部至我国江苏、上海等地；在向偏东方向上，最长的可以从南疆盆地，经青海、甘肃北部、中部、内蒙古西部、中部，至河北、北京及华北大部地区。

2、蒙古气旋型沙尘天气过程移动路径主要在黄河流域北部，移动路径上以向东移动为主，向东偏北移动（先向东移，从内蒙古东部、东北地区开始向东北方向移动）的次之，向东偏南方向移动的最少，且向东偏南方向最远影响到山东半岛。

3、主要区别：移动路径经南疆盆地的多为冷锋型沙尘天气过程，经由内蒙古东部、我国东北地区的多为蒙古气旋型。冷锋型沙尘天气过程以向东偏南方向移动为主，而蒙古气旋型沙尘天气以偏东方向移动为主。

### 3.9 两类沙尘过程的影响地区

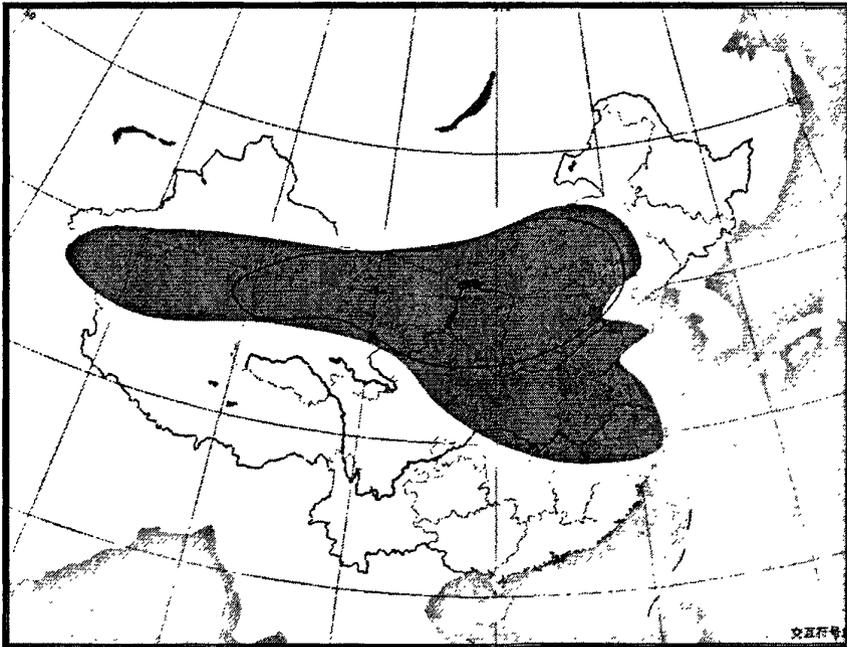


图 3.9 冷锋型沙尘天气过程的沙尘天气影响区

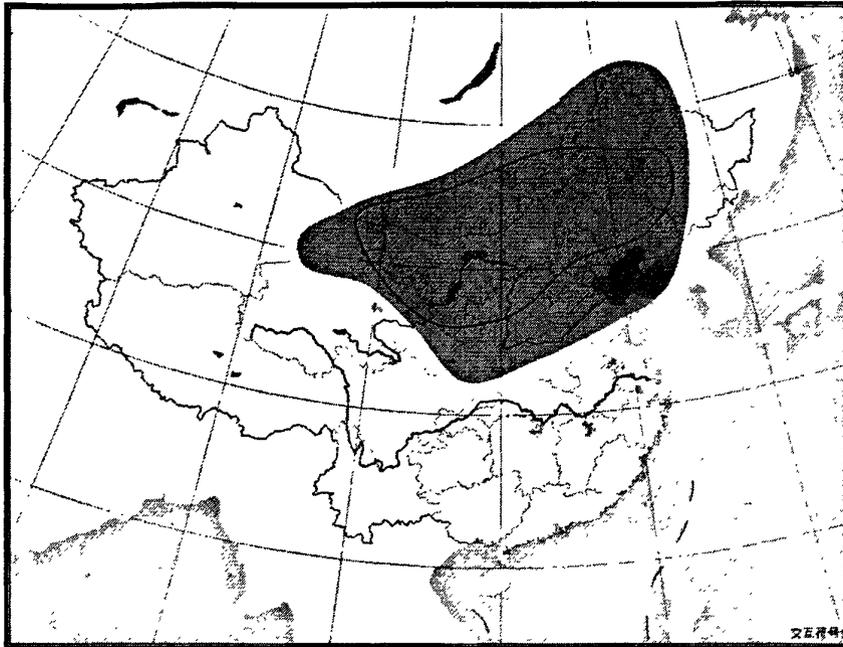


图 3.10 冷锋型沙尘天气过程的沙尘天气影响区

图 3.9 和 3.10 为两类沙尘天气过程的影响区域，其中用实线圈出的地区为两类沙尘天气过程中沙尘天气多发区，同时也是出现沙尘暴天气频数多的地区。

本文将两类沙尘天气的影响区域做了分类，对于冷锋型过程，将影响地区分为 3 类，即（1）新疆地区，（2）西北、华北大部，（3）影响区域扩展偏南（能够影响河南、江苏等地的）。将蒙古气旋型沙尘天气影响区域分为两类，即（1）能够影响到东北地区的，（2）除影响东北地区的大部。按以上分类，统计了各个区域内沙尘天气的发生频数（表 3.12、表 3.13）。

表 3.12 冷锋型沙尘天气过程各月影响区域次数统计

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
新疆地区	0	0	7	13	8	—	0	—	0	28
西北、华北	4	5	25	23	15	—	1	—	3	76
影响区域偏南	0	1	4	0	1	—	0	—	0	6

表 3.13 蒙古气旋型沙尘天气过程各月影响区域次数统计

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	7 月	10 月	11 月	12 月	合计
影响东北地区	0	2	13	14	8	0	—	1	1	39
其余地区	2	4	7	9	11	1	—	0	1	35

从冷锋型沙尘天气过程各月影响区域分类的次数统计（表 3.12）知：仅约 5% 的冷锋型沙尘天气过程可以影响到较为偏南的长江流域；约 1/4 的冷锋型沙尘天气经由新疆地区开始，这些影响新疆地区的冷锋型沙尘过程中约 21% 的未能向东大范围的移动。冷锋型沙尘天气影响的主要区域位于西北及华北地区大部，约 95% 的冷锋型沙尘天气过程主要出现在这一地区。同时，影响范围大，且能够扩散至长江流域的沙尘天气过程主要出现在 3 月份，在新疆地区出现的冷锋型沙尘天气过程主要在 3、4 和 5 月。

从蒙古气旋型沙尘过程各月影响区域分类的次数统计（表 3.13）知：大于 52% 的蒙古气旋型沙尘过程能够影响到内蒙古东北部、黑龙江西部、吉林西部、辽宁西部、北部。同时，能够影响到东北地区的蒙古气旋型沙尘天气过程主要出现在 3、4 月，5 月次之，4 月最多。

## 第四章 冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气个例对比分析

### 4.1 引言

本章针对冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气分别选取了一个天气过程进行对比分析。冷锋型选取 2010 年 3 月 19—20 日（北京时，同下），蒙古气旋型选取 2006 年 3 月 9—10 日。分别从沙尘天气的强度、大尺度环流形势、地面大风的成因、层结特征及物理量的高低空配置对比进行分析，并给出了冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程的天气学概念模型。

### 4.2 沙尘过程概述

#### 4.2.1 冷锋型沙尘过程概述

2010 年 3 月 19—20 日出现在我国北方的强沙尘暴过程是冷锋强烈发展所致。其影响地区包括新疆南部、青海北部、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西北部、山西、河北、北京、天津、山东、河南、安徽、江苏等省区。其中，在内蒙古西部偏北地区海力素形成了特强沙尘暴（能见度在 0—200m）。本次过程是 2010 年我国发生的强度最强、影响范围最大的强沙尘暴过程。2010 年 3 月 18 日 20 时-19 日 02 时，冷锋从新疆北部逐渐向东南方向移动，19 日 05 时，在冷锋侵入甘肃、内蒙古西部，在冷锋后，内蒙古西部偏北地区出现了小范围扬沙天气。19 日 08—20 时，冷锋东移侵入内蒙古大部。期间，08 时，在冷锋后内蒙古西部、甘肃中部出现了扬沙和沙尘暴天气。14 时，沙尘天气主要在内蒙古阿拉善盟、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟西部、宁夏、陕西北部产生大范围的扬沙和沙尘暴天气，其中强沙尘暴在巴彦淖尔市，水平能见度下降到 100—200m（海力素能见度下降到 100m）。17—20 时，沙尘天气达到最强，在河套北部达到强沙尘暴（水平能见度下降到 200m 以下），其中，黑风暴于 19 日 17 时出现在海力素（能见度 0m）。20 日 02 时后，

沙尘暴区继续向东、南扩展,强度减弱。到20日08时,内蒙古沙尘天气基本结束,沙尘天气主要在山西、河北、北京、河南、山东等地。此后在华东地区的沙尘天气继续向东南方向扩张,强度减弱。到20日20时,我国的沙尘天气基本结束,但仍然有扬沙天气在朝鲜半岛南部。图4.1(a)为2010年3月19-20日冷锋型沙尘天气过程中沙尘天气区域,出现沙尘暴的站点的最小能见度分布,沙尘暴区域大致呈水平东西带状,这与冷锋自西向东移动的特征相关。图4.1(b)为出现沙尘暴各站地面风速极值分布。

本次沙尘天气过程影响范围包括南疆盆地东部、西北地区东部、华北、华中等15省区690个县(旗),受影响土地面积约180万平方公里,受影响人口约2.7亿,受影响的耕地面积约2800万公顷,经济林地面积约270万公顷,草地面积约5100万公顷。沙尘天气造成的土壤失墒将不利于甘肃河西走廊、宁夏平原、河套平原、华北平原、黄淮海平原的春播,对宁夏平原、华北平原、黄淮海平原的冬小麦返青以及经济林果的发芽、开花也有不利影响。此外,沙尘发生对上述地区城市交通造成影响,同时使空气质量下降,影响人民群众的日常生活。

#### 4.2.2 蒙古气旋型沙尘过程概述

受地面蒙古气旋的强烈发展影响,2006年3月9-10日,我国北方大部出现了一次区域性强沙尘暴天气过程。本次过程是2006年春季最强的沙尘天气过程之一。受其影响的地区有蒙古、内蒙古大部、甘肃中部、宁夏、陕北、山西北部、河北、吉林西部、辽宁北部、黑龙江西部、北京、天津等。其中,在内蒙古中西部偏北地区出现了强沙尘暴(水平能见度在0—200m),最大风速达 $17-23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。朱日和、苏尼特右旗出现了黑风暴(水平能见度降至0m)。从3月9日11时开始在内蒙古中西部偏北地区开始出现扬沙和沙尘暴天气,并伴有 $18-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。此后沙尘区域向南、向东扩展,14-17时,沙尘天气达到最强,在甘肃中部、内蒙古西部、中部、宁夏均出现了沙尘暴天气,17时在锡林郭勒盟的朱日和能见度下降为0m,出现了黑风暴。20时沙尘暴区域继续向内蒙古中部及东部偏南地区扩展,苏尼特右旗水平能见度下降为0m,同时扬沙天气开始在陕西北部、山西北部出现。此后随着地面气旋的东移,到10日08点沙尘暴主要在内蒙古东部偏南地区,扬沙、浮尘天气区域

广泛分布在华北、东北地区。随后地面气旋向东北转向，在东北地区维持扬沙天气。受地面气旋产生的沙尘天气在 10 日 14 时基本结束。图 4.2 (a) 2006 年 3 月 9-10 日冷锋型沙尘天气过程出现沙尘暴的站点的最小能见度分布，沙尘暴区域大致呈涡旋带状分布，强沙尘暴和黑风暴区域位于内蒙古中部。图 4.2 (b) 为出现沙尘暴各站地面风速极值分布图。

2006 年 3 月 9-10 日的沙尘天气过程是 2006 年受蒙古气旋影响下产生的最强的沙尘天气过程，我国 11 个省份受其影响，在西北、华北、东北地区均出现了沙尘暴、扬沙天气。沙尘暴对上述地区的城市交通、人民日常生活产生了极大的不便。

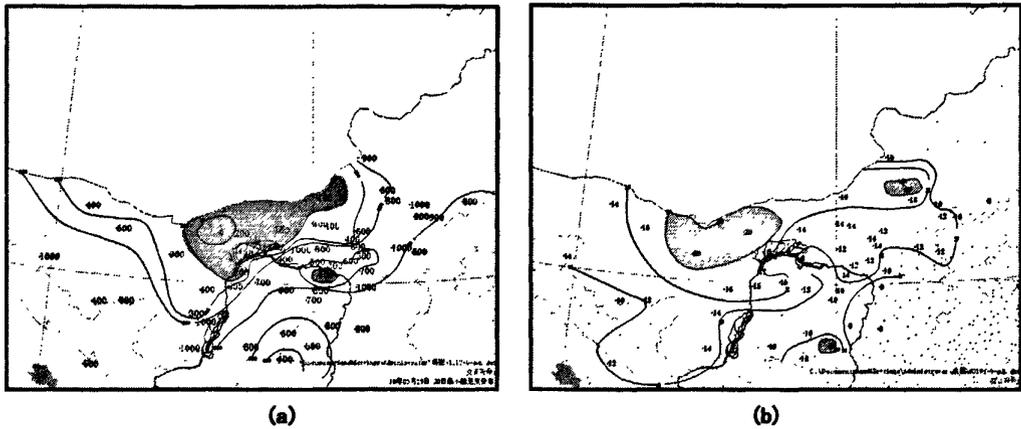


图 4.1 (a) 2010 年 3 月 19-20 日出现沙尘暴各站最小能见度分布。单位: m, 间隔: 200。阴影区为能见度  $\leq 200\text{m}$  的强沙尘暴区; (b) 2010 年 3 月 19-20 日出现沙尘暴各站地面风速极值分布。单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 间隔 4, 阴影区为定时风速  $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强风区; 资料取自逐 3 小时地面天气图。

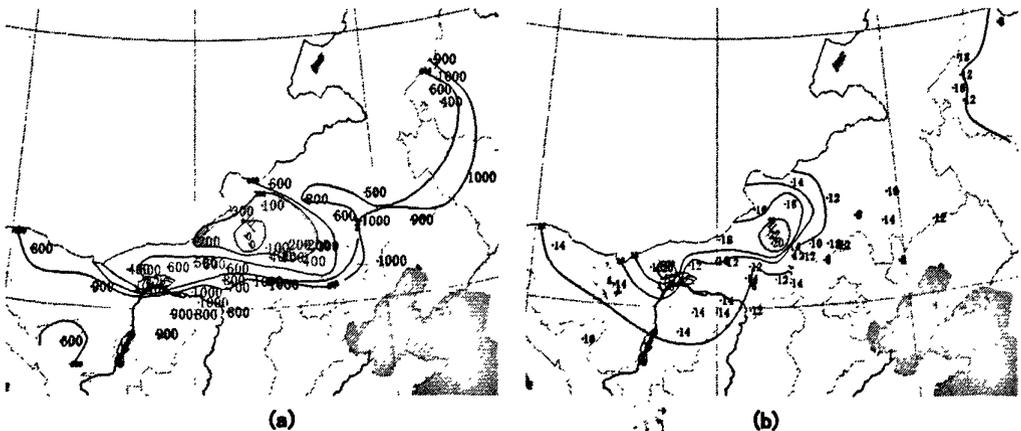


图 4.2 (a) 2006 年 3 月 9-10 日出现沙尘暴各站最小能见度分布。单位: m, 间隔: 200。阴影区为能见度  $\leq 200\text{m}$  的强沙尘暴区; (b) 2006 年 3 月 9-10 日出现沙尘暴各站地面风速极值分布。单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 间隔 4, 阴影区为定时风速  $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强风区; 资料取自逐 3 小时地面天气图。



冷锋型沙尘暴区主要位于冷锋中段后部,如图 4.3 为 2010 年 3 月 19 日 16 时沙尘暴遥感监测图,由于内蒙古中西部上空有云覆盖,无法准确检测到地表信息。蒙古气旋型沙尘暴区多呈现东西带状,沙尘暴自西向东延伸,与气旋中心移动路径关系密切,多呈涡旋状分布,遥感图显示沙尘区为涡旋状。如图 4.4,为 2006 年 3 月 19 日 14 是 NOAA-18 沙尘暴遥感监测图。

#### 4.2.3 冷锋、蒙古气旋型沙尘天气实况差异

对比 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘过程(图 4.1)和 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘天气过程(图 4.2)的沙尘暴和地面极值风速分布知:

(1) 两类沙尘天气过程均产生了大范围的强沙尘暴天气,但冷锋型沙尘天气过程中,沙尘暴、扬沙天气出现在地面冷锋后部,从内蒙古西部开始向东、向南推进,呈发散式,沙尘天气自西北-东南向移动。而蒙古气旋型沙尘天气过程中,开始阶段,沙尘天气主要随着地面气旋中心向东移动,未向南扩散,以沙尘暴和强沙尘暴为主,到沙尘过程后期,开始向南扩散至华北大部,出现扬沙和浮尘天气,且随着地面气旋的东移,在东北地区也出现了扬沙和沙尘暴天气,而冷锋型沙尘天气过程对东北地区没有造成沙尘天气。

(2) 如图 4.1(a)所示,冷锋型沙尘过程,沙尘暴区域大致呈水平东西带状,强沙尘暴区位于内蒙古中、西部偏北地区,这与冷锋自西向东移动的特征相关。而蒙古气旋型沙尘过程如图 4.2(a),沙尘暴区域大致呈涡旋状分布,与气旋中心的移动有关,强沙尘暴和黑风暴区域位于内蒙古中部。

(3) 对比沙尘暴区域及大风区,可以看出:沙尘暴区域和大风极值区有一定的对应关系。(图 4.1a, b)在冷锋型沙尘过程中,在地面风速极值为  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的站点均出现了能见度小于等于 500m 的强沙尘暴,甚至是黑风暴。在蒙古气旋沙尘过程中,(图 4.2a, b)在气旋中心附近地面风速在  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的站点也出现了强沙尘暴或黑风暴。

(4) 大风的分布:在两次过程中均在内蒙古西部偏北和中部偏北地区出现了两个风速极值中心。冷锋型西部偏北地区  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的区域大,这个区域也是能见度小于 200m 的强沙尘暴区。蒙古气旋型沙尘天气过程中,中部偏北的大风极值中心对应一个范围比大风极值

中心范围大的强沙尘暴区。

### 4.3 大尺度环流分析及对比

#### 4.3.1 冷锋型沙尘过程大尺度环流

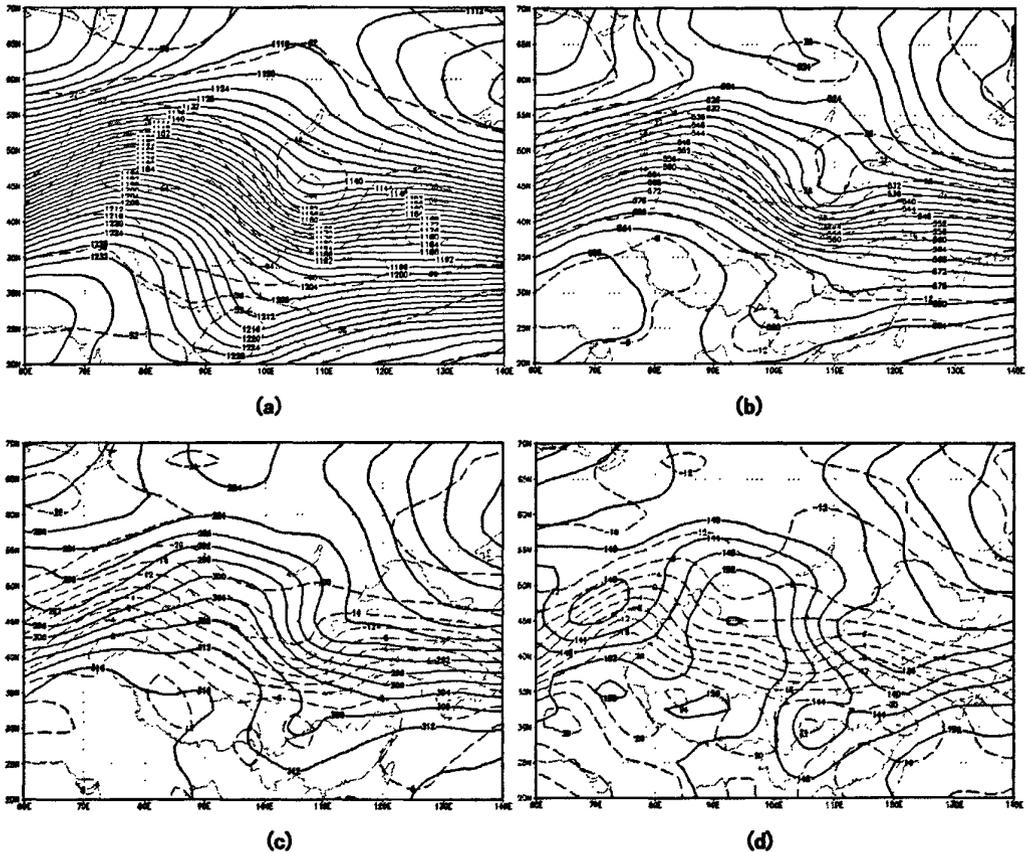
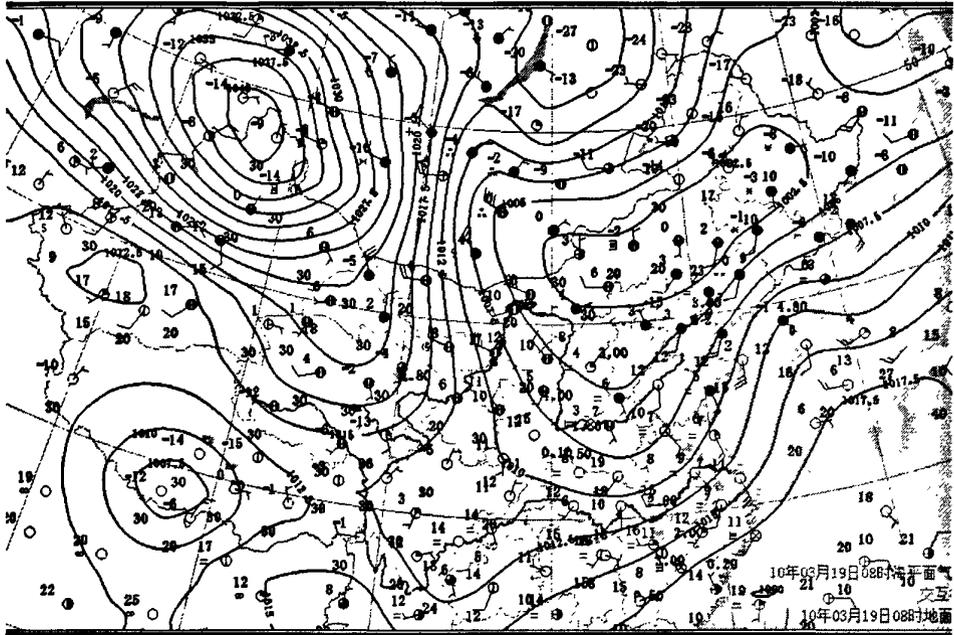


图 4.5 2010.3.19.20 (北京时, 下同) 实况高空天气图 (a) 200hPa (b) 500hPa (c) 700hPa (d) 800hPa。图中实线为高度, 单位: 位势什米, 间隔: 4; 虚线为温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ , 间隔: 4。

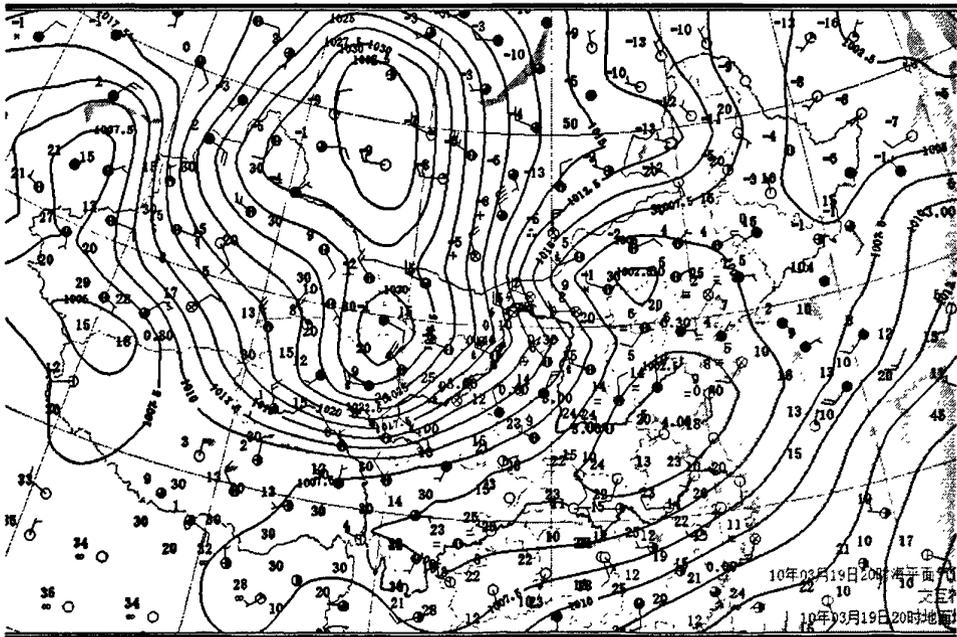
**高空形势:** 2010年3月18日20时, 亚欧中高纬为两槽一脊形, 200、500、700hPa 在新疆北部-西伯利亚地区为高压脊, 阿尔泰山及以东地区为一东西向的横槽, 蒙古到我国北方大部在西北气流控制下, 强锋区位于巴尔喀什湖北部-新疆西北部, 在蒙古国、甘肃-内蒙

古为暖区。3月19日08时,500hPa高压脊向东推进,脊前西北气流下有冷空气向南爆发,高空锋区移至蒙古国西部、甘肃北部-内蒙古西北部地区,锋区附近有强冷平流。700hPa高空槽底部气旋型曲率加大,且在甘肃北部-内蒙古西部温度槽加深,温度槽落后于高度槽,在甘肃西北部冷平流加强。低层850hPa低槽移动速度比中高层快,高空槽经向发展,850hPa高空槽已经控制了我国华北、东北地区,内蒙古西部在高空槽后西北气流下,温度槽与高度槽呈反位相,在内蒙古西部及其以南地区为暖区。高低层在锋区附近冷平流都很强,等高线与等温线交角随高度降低而增大,500hPa为 $30^\circ$ ,700hPa为 $60-90^\circ$ 左右,850hPa接近垂直(图略)。图4.5为这次冷锋型过程中沙尘暴最旺盛阶段的高空形势图,3月19日20时,高层200hPa大风速区压在西北地区-内蒙古西部。高空槽在内蒙古中部加深,温度槽位于内蒙古西部,高空冷空气已经控制了内蒙古西部地区,强锋区位于内蒙古西部,内蒙古东部及中部偏南地区位于高空槽前,在850hPa高空脊前槽后冷平流进一步加强。700、850hPa槽区移动速度加快,高空槽移至华北东部,内蒙古西部处于槽后西北气流下。20日08时,随着高空槽向东南方向移动,内蒙古及华北北部均在高空槽后西北气流控制下。可以看出,东亚大槽底部低槽的向南扩展,直接导致高空锋区的南亚,并引发强冷空气的爆发。

从高低层配置看:在高层200、500hPa槽区移动速度慢,主要表现为槽底部气旋曲率加大,并缓慢南亚。700、850hPa槽区移动速度快,特别是850hPa。在700和850hPa,3月19日08,冷空气开始进入内蒙古西部,在内蒙古中部仍为暖区,随着新疆北部高压脊的发展,在脊前西北气流下,到19日20时,冷空气控制了西北地区大部。



(a)



(b)

图 4.6 实况地面天气图 (a) 2010. 3. 19. 08(北京时, 下同) (b) 2010. 3. 19. 20, 实线为海平面气压, 单位: hPa, 间隔: 2.5。

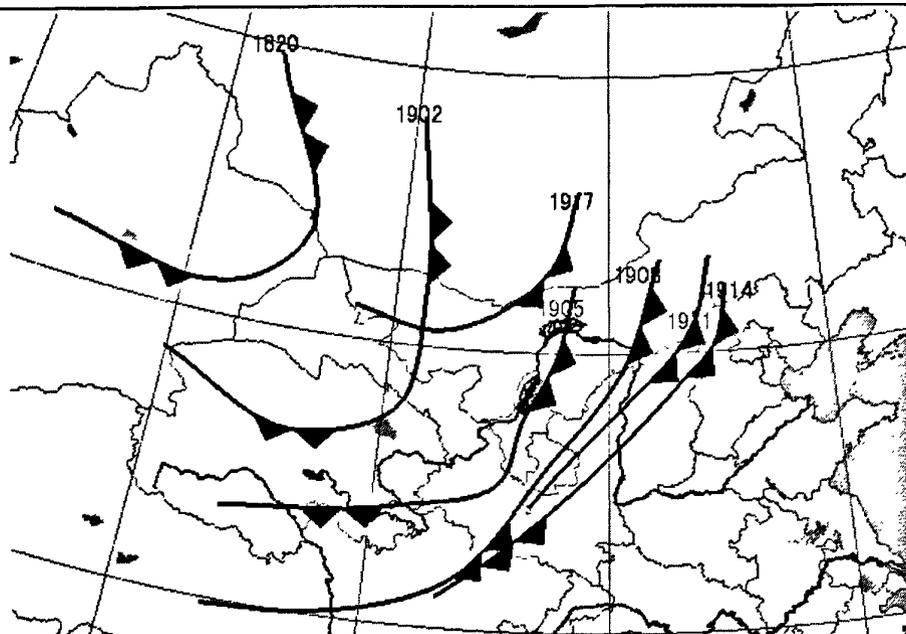


图 4.7 2010 年 3 月 18 日 20 时-3 月 19 日 14 时地面冷锋动态图

本次过程受西路冷空气影响，出现在冷高压爆发性东移南下，地面气压梯度骤增的时段里。是典型的冷锋（而非气旋冷锋）影响下的强沙尘暴天气过程。2010 年 3 月 18 日 08-23 时，在冷高压加强南下前，地面暖性低压系统没有爆发性发展，在蒙古及内蒙古西部地区由较为分散的多个低压，地面高压位于新疆北部至阿尔泰山以西地区，移动缓慢，高压中心位于威海附近，且中心气压值在 1038hPa 以下。19 日 02 时在内蒙古中东部形成一个地面低压，只有 1-2 条闭合等压线；当冷高压越过阿尔泰山时（18 日 23-19 日 08 时），中心强度有所增强，并维持在 1040-1042hPa 之间，同时，高压中心移至新疆北部。地面冷锋动态如图 4.7 所示：19 日 02 时冷锋开始侵入甘肃北部、内蒙古阿拉善盟西北部，在甘肃北部、内蒙古西部地面风力明显加大，能见度从 30km 下降至 12-20km；19 日 05 时，地面冷锋压到河套西部和宁夏，冷锋风力进一步加强，同时在锋后（甘肃北部、内蒙古阿拉善盟北部）开始出现扬沙天气。随着地面冷锋继续东南移和锋后冷空气的补充南下，锋后西北大风陡增，部分站点有强沙尘暴出现。图 4.6 为 2010 年 3 月 19 日 08 时和 19 日 20 时地面图，19 日 11-14 时冷高压前冷锋移动速度开始减慢，锋后沙尘区域扩大，强度加强，冷高压进一步向南伸，且开始有冷空气从高压中心分裂南下，到 17 时，在甘肃北部，出现了一个分裂出的闭合冷高压

中心,位于甘肃北部,此时整个地面冷高压占据了内蒙古西部、我国西北地区和蒙古国( $40\text{--}43^\circ\text{E}$ ,  $97.4\text{--}92^\circ\text{N}$ )。在不断有冷空气的补充下,17时在内蒙古西部偏北地区有副冷锋形成,使得地面风速陡增,平均风力达  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,内蒙古西部地区水平能见度下降到  $100\text{--}200\text{m}$ ,其中在内蒙古西部的海力素出现了黑风暴,能见度下降到  $0\text{m}$ 。19日17-20时,沙尘暴强度达到最强,但下游地面低压在东移的过程中略有加强,中心气压由  $1001$  降至  $994\text{hPa}$ ,所以沙尘天气缓慢向东南方向扩张,且上游沙尘暴天气得以持续。到20日11时,地面高压范围缩小,位置南压明显,中心位于内蒙古西部,而地面低压东移入海,沙尘天气主要在华北东部和华中地区。20日20时,地面高压占据了我国北方大部,沙尘天气结束。地面热低压的存在,为低层大气增温起到了重要作用,有利于低层形成易于起沙的层结,当冷高压大举向东、南爆发时(19日08时—20日08时),且这期间仍有冷空气的不断补充南下,使得沙尘暴强度增强,同时地面的低压与冷高压形成对峙,有利于在我国西北、华北大部出现持续的沙尘暴天气。

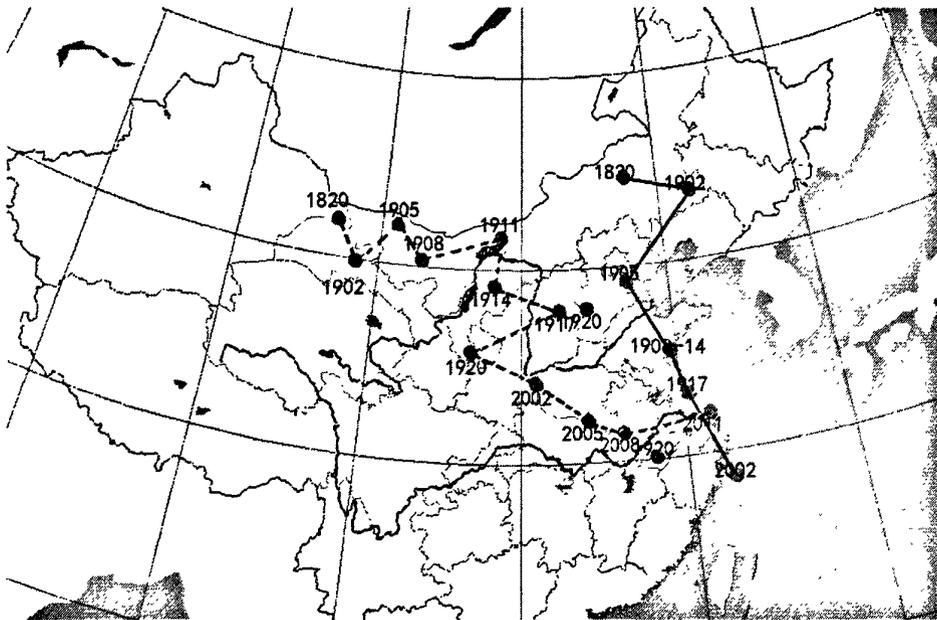


图 4.8 2010年3月18日20时-3月20日11时地面3小时变压中心连线图,实线为负变压中心连线,虚线为正变压中心连线,图中标注为时间。

地面 3 小时变压 (图 4.8) 与冷锋的活动有紧密关系, 地面正变压很好的表示了锋前系统的移动, 负变压表明了冷锋的移动速度和位置。同时, 正变压向南移动速度很快, 比负变压的移动快 9-15 小时, 正、负变压中心的移动方向基本一致。地面沙尘天气的出现与该时刻正变压中心有密切关系, 沙尘区位于以正变压为中心的西北象限内。3 月 19-20 日的沙尘过程中, 主要的沙尘区域在这两条变压线的中间区域。

### 4.3.2 蒙古气旋型沙尘过程大尺度环流

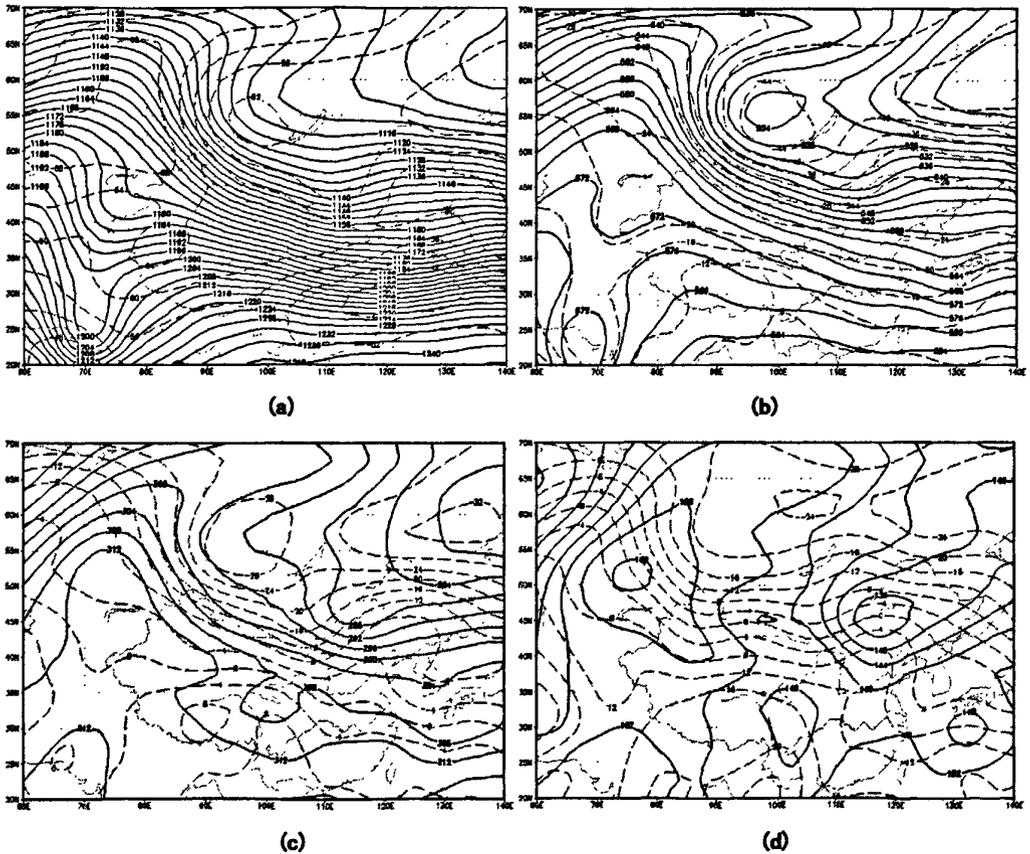
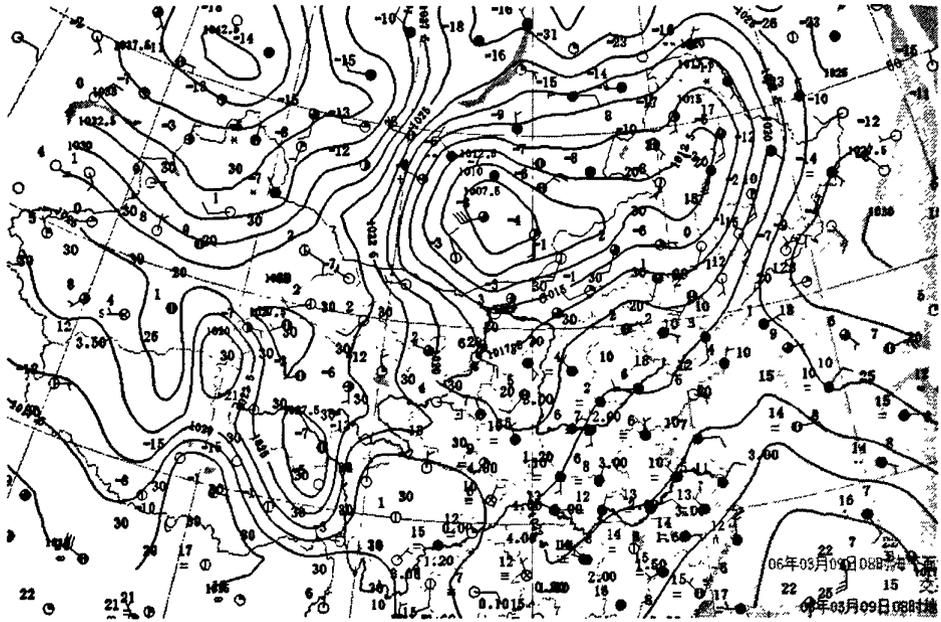


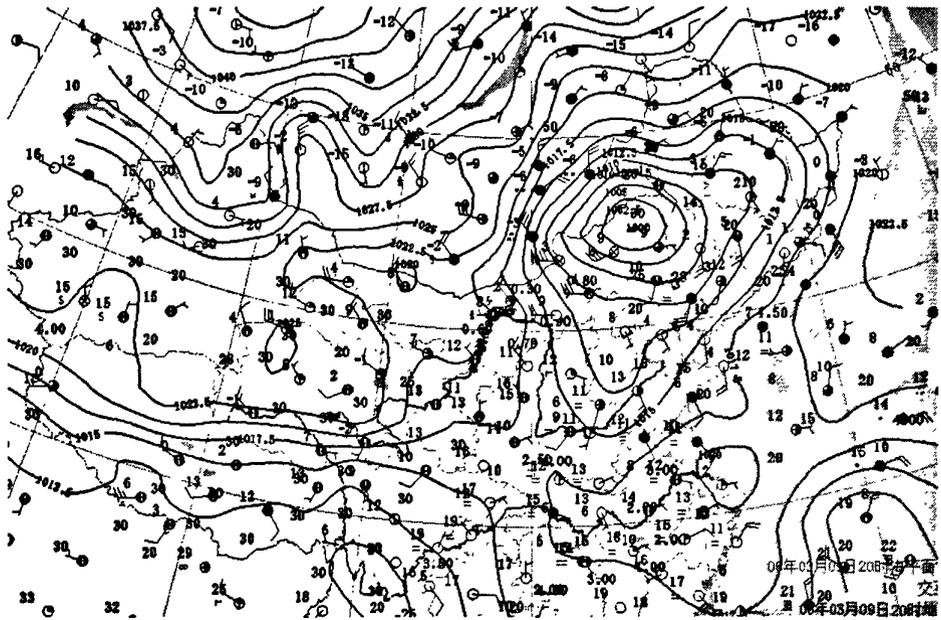
图 4.9 2006. 3. 9. 20 (北京时, 下同) 实况高空天气图 (a) 200hPa (b) 500hPa (c) 700hPa (d) 800hPa。图中实线为高度, 单位: 位势千米, 间隔: 4; 虚线为温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ , 间隔: 4。

高空形势：2006年3月8日20时，亚欧中高纬为一槽一脊形，200、500、700 hPa在亚洲东部为一横槽缓慢南压，槽区宽广，乌拉尔山及其以东地区为一高压脊，在脊前槽后间形成强西北高空急流。3月9日08时，高空槽有所加强，经向形显著，为势能转化为动能提供了有力的大尺度背景场，从而使得西伯利亚冷空气自西北向东南爆发。脊前不断有冷空气向南补充，使锋区持续加强。高空急流在200hPa最强，位于甘肃中部，急流核风速为 $54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。700hPa上在高层500hPa强的急流区位置下又一浅槽，850hPa上槽区明显加深，并在内蒙古东北部形成闭合等高线，闭合等值线为136dagpm。在700、850hPa槽后等高线与等温线几乎垂直，说明有强冷平流在此加强（蒙古国西部），有利于锋区加强。从高低层系统的配置看，系统的斜压性强，低层冷涡迅速发展，同时也促进了地面蒙古气旋的强烈发展。9日20时（图4.9），低槽向东南方向移动，内蒙古西部处于槽后西北气流下。在200hPa高空急流有明显南亚至内蒙古西部、中部地区。在300hPa高空急流风速最大。10日08时，高空槽东移，在850hPa形成强的冷涡，主要影响东北地区，内蒙古及华北大部均处于槽后西北气流下。

从高低层的配置看，高空槽为后倾槽，在200、500、700hPa表现为低槽，随着高度降低在对流层低层逐渐加强，并在850hPa形成切断低压。与温度场的配置：温度槽落后于高度槽，低槽（涡）后部有明显的冷平流，导致系统增强，冷平流强度随着高度降低为增强，等高线与等温线交角随高度降低而增大，200、500hPa夹角较小，700hPa夹角为 $60^\circ$ ，850hPa接近垂直。



(a)



(b)

图 4.10 实况地面天气图 (a) 2006.3.9.08(北京时间, 下同) (b) 2006.3.9.20。图中实线为海平面气压, 单位: hPa, 间隔: 2.5。

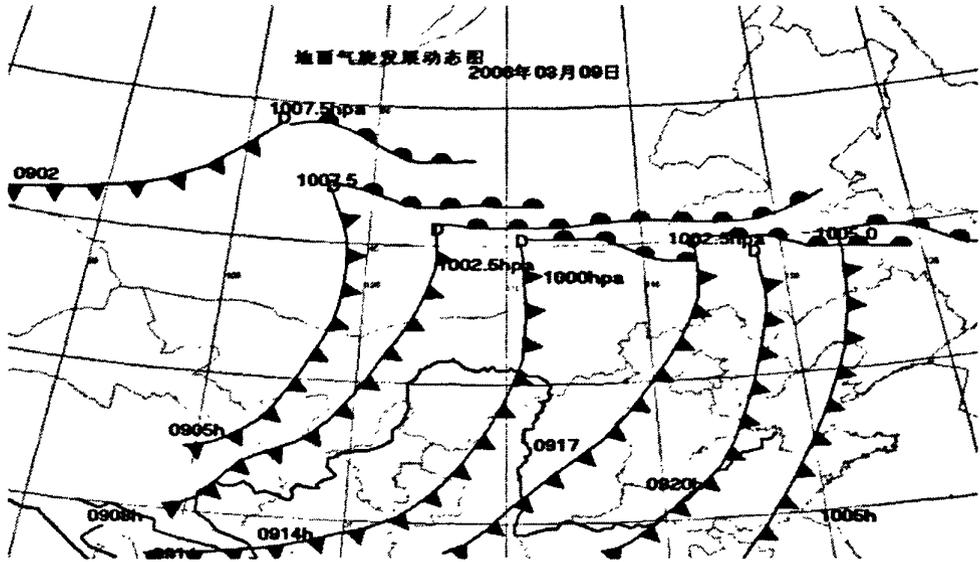


图 4.11 2006 年 3 月 9 日地面气旋发展动态图

大风是蒙古气旋的主要天气现象之一。从蒙古气旋动态演变图(图 4.11)和 2006 年 3 月 8-9 日地面图(图 4.10)可以看到,3 月 8 日 20 时,地面图上乌兰巴托西部有一蒙古气旋生成,中心值为 1007.5hPa,与 850hPa 弱冷涡相配合;9 日 02 时,蒙古气旋少动且闭合线加强,中心值为 1007.5hPa;9 日 08 时,蒙古气旋略向南压,气旋中心位于  $45.5^{\circ} \text{E}$ 、 $108^{\circ} \text{N}$ ,中心值为 1007.5hPa,蒙古气旋加强反映在等压线密集程度上,此时无沙尘天气出现;11 时,气旋中心向东移,位于  $45^{\circ} \text{E}$ 、 $110^{\circ} \text{N}$ ,中心气压值为 999.0 hPa,内蒙古西部偏北地区开始出现扬沙和沙尘暴天气;9 日 14 时,蒙古气旋移至  $45^{\circ} \text{E}$ 、 $111^{\circ} \text{N}$ ,气旋中心值为 994.0hPa,气旋发展最为强盛,地面气旋在此时达到最强,气旋后部、底部地面风速增大,大部分地区瞬时风速大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地面风速陡增,此时蒙古国西部、南部和内蒙古中西部大部都出现了沙尘暴天气;地面气旋一直向东移,到 9 日 20 时,地面气旋中心移至锡林郭勒盟 ( $44.5^{\circ} \text{E}$ 、 $117.6^{\circ} \text{N}$ ),沙尘暴区稍有东移,气旋中心值达 999.9hPa,此时在气旋中心的西侧出现了黑风暴。到 10 日 02 时,气旋中心值为 1002.0 hPa,只在内蒙古中部偏南及东部偏南地区出现沙尘暴天气;10 日 14 时蒙古气旋影响的沙尘天气过程基本结束。本次过程蒙古气旋首先生成于阿尔泰山-萨彦岭山地,在萨彦岭山地附近气旋没有发展增强,直至达到背风坡后又得到发展加强。萨彦岭山地对东移的低层冷空气能够明显的阻滞,这一阻滞

不同于阻塞 (Block), 阻滞的作用仅仅延缓了低层冷空气的推进<sup>[51]</sup>。此次过程中, 当气旋中心移至  $45^{\circ} \text{E}$ ,  $108^{\circ} \text{N}$  后, 地面蒙古气旋开始发展加强。

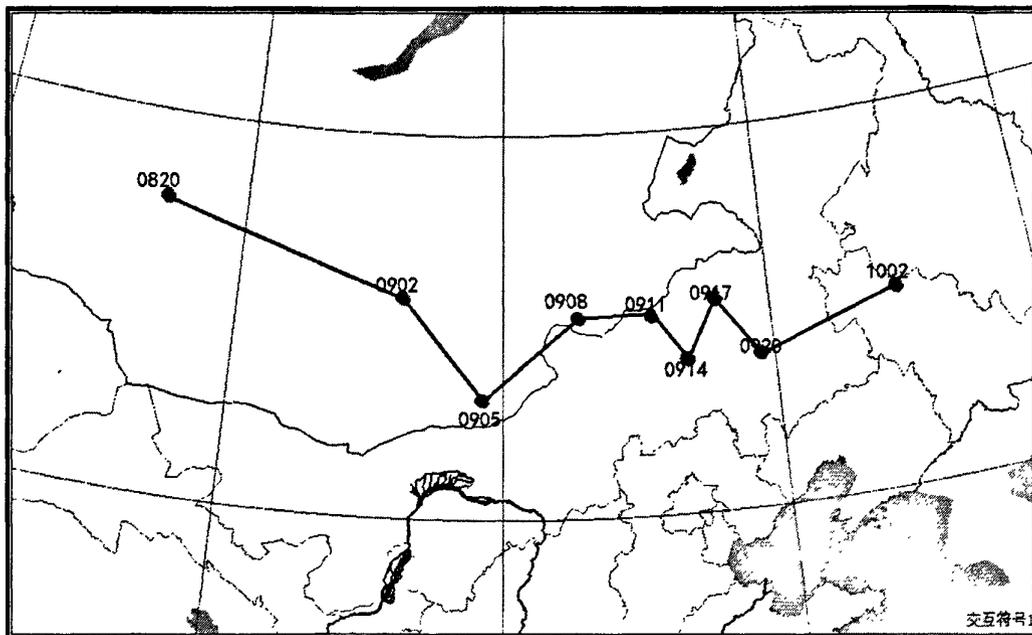


图 4.12 2006 年 3 月 8 日 20 时-3 月 10 日 02 时 地面 3 小时负变压中心连线图, 图中标注为时间。

地面蒙古气旋的移动与地面 3 小时负变压有密切关系, 如图 4.12。沙尘天气主要出现在负变压线以南 5 个纬度内, 沿着负变压中心的东移而移动。同时沙尘天气的出现比负变压的移动慢 3-9 个小时, 这与风场向气压场适应有关。

### 4.3.3 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程形势对比

对 2010 年 3 月 19-20 日和 2006 年 3 月 9-10 日的沙尘天气的地面、高空形势对比得出以下结论:

(1) 从大尺度环流背景看, 冷锋型沙尘过程高空为两槽一脊型, 蒙古气旋型高空为一槽一脊型。冷锋型过程中, 冷空气从脊前向南爆发, 高空槽底部气旋性曲率加大, 随着高度的降低, 高空槽明显加深; 蒙古气旋型高空槽在低层 ( $850\text{hPa}$ )、中层 ( $500\text{hPa}$ ) 形成切断低压。

(2) 从热力条件看,冷锋型高空槽后冷平流比蒙古气旋型高空槽后冷平流强。

(3) 在沙尘天气发生前,地面图上在蒙古到内蒙古一带均有低压存在,但两类过程地面低压的位置、强度有差异。冷锋型地面低压位置偏南,中心位于  $45-46^{\circ} \text{ E}, 106^{\circ} \text{ N}$ , 同时,冷锋在整个过程中均没有嵌入地面低压,即没有发展为气旋,而蒙古气旋型沙尘天气过程中,地面低压位置偏北,中心位于  $46^{\circ} \text{ E}, 105-110^{\circ} \text{ N}$ , 随着低压向东、南推进时,地面已经形成气旋,越过萨彦岭山地后,气旋得到强烈发展。

(4) 两类沙尘天气过程中,地面低压与其后部的冷高压的相对位置相似,但是两个系统的强度有显著差异。冷锋型沙尘过程中,冷高压强度高,中心气压值在  $1036-1042 \text{ hPa}$  之间,地面低压很弱,冷锋后有强气压梯度,锋后为西北大风。而蒙古气旋型沙尘过程中,气旋后部冷高压强度弱,几乎没有形成闭合的等压线。气旋强烈发展为主要特征,气旋强烈加深对地面强风的产生有重要作用。气旋暖区及冷锋后为西南和偏西大风,且大风多出现在气旋南部。

(5) 从沙尘暴出现的位置看,冷锋型受冷锋东南向南下,扫过西北-东南向的大范围地区。蒙古气旋型沙尘天气区随着气旋中心的移动向东移动,在气旋移至内蒙古东部偏南的位置时,气旋锢囚,在气旋东北部出现了沙尘天气。

#### 4.4 单站地面气象要素

2010年3月19-20日冷锋型沙尘过程内蒙古西部沙尘暴强度强于中部,2006年3月9-10日蒙古气旋型沙尘过程中内蒙古中部沙尘暴强度强于西部(图4.1、4.2)。为了便于比较,分别选取在这两次过程中出现最强的沙尘暴强度的代表站-海力素和朱日和(黑风暴)进行分析研究。

### 4.4.1 冷锋型沙尘过程单站地面气象要素

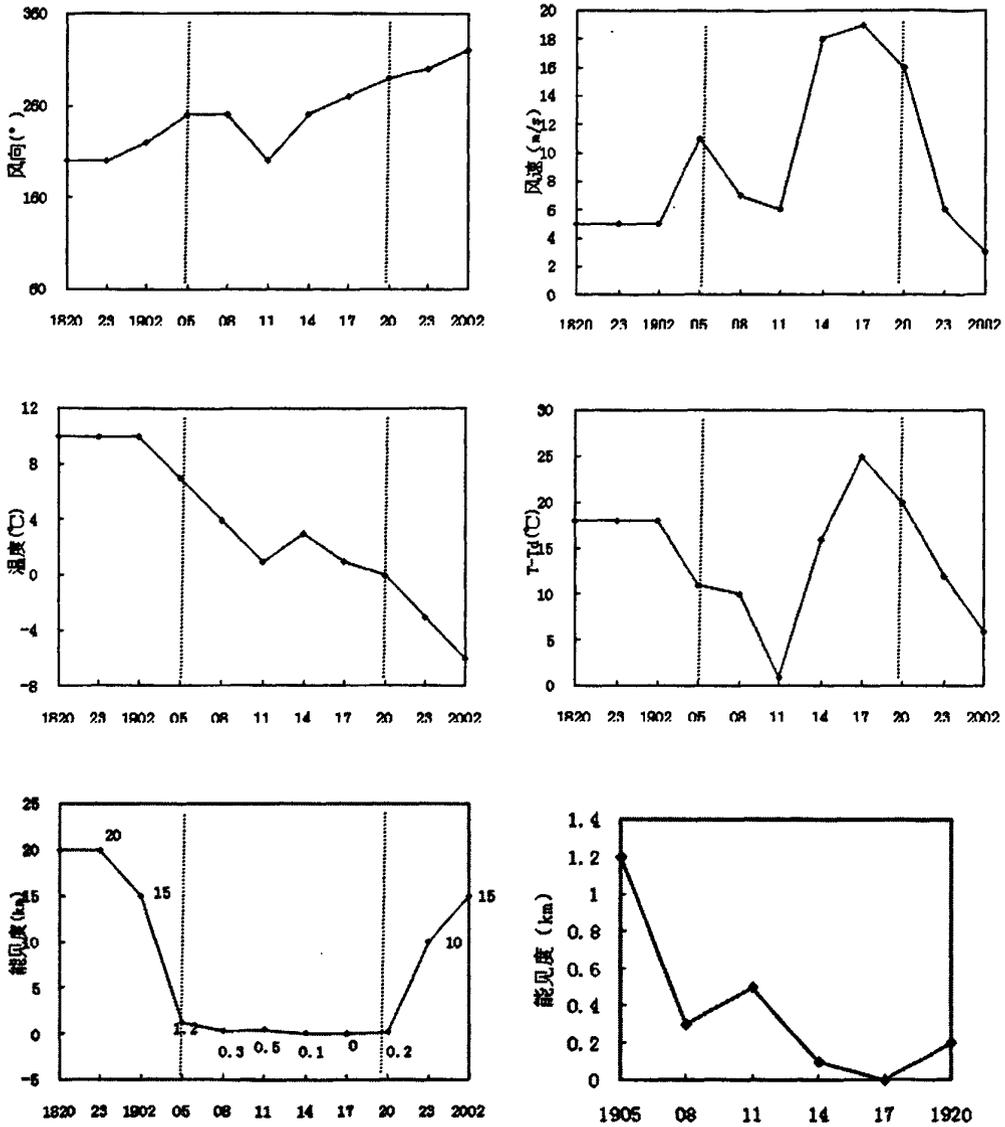
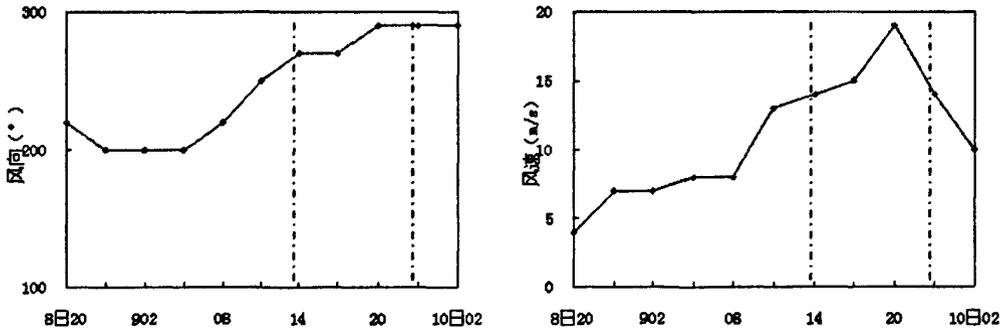


图 4.13 海力素 2010 年 3 月 18 日 20 时-20 日 20 时地面气象要素变化，其中 (a) 风向，(b) 风速，(c) 温度，(d) 温度露点差，(e) 水平能见度，(f) 19 日 05-20 时水平能见度。

从前面的分析知，地面冷锋在 19 日 02-05 时通过海力素，从图 4.13 可以看到：在冷锋前到冷锋逼近，地面风速逐渐增大，风向略向北偏转，海力素能见度由 20km 降至 15km，

冷锋过境后,在05时能见度降至1.2km,形成扬沙天气。冷锋过境后在白天地面温度总得趋势是下降的,冷锋后降温明显,24小时降温达14度。冷锋过境后,19日05时-19日20时,(图4.11b,f)地面风速的变化与能见度变化相关性好,风速越大,水平能见度越小。由于在19日11时出现大雾天气,湿度变化在11时达到最高,11时后,随着风速增大,大雾消散,湿度迅速减小,与沙尘天气出现也呈一致的变化趋势。14时是气象要素转折性变化的时段,风速剧增至 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且由西南风转为偏西北风,湿度急剧降低,地面气温可能受日变化影响出现小幅上升,能见度降至0.1km,大雾迅速消散,转为强沙尘暴天气。17时,风速增至最强( $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),湿度继续下降,气温下降,风向继续向偏西北方向偏转,能见度降至0m,出现黑风暴。到20点能见度上升至0.2km,此后能见度逐渐好转,湿度有开始增加,温度继续下降,风速递减,风向逐渐从西风转为西北风。可见,在海力素触发锋前扬沙天气的主要原因是冷锋的过境,冷锋过境后冷锋后风速跳跃式增大则导致沙尘暴的发生,风速逐渐增大,出现黑风暴,此后随着风速缓慢减小,能见度开始好转。

#### 4.4.2 蒙古气旋型沙尘过程单站地面气象要素



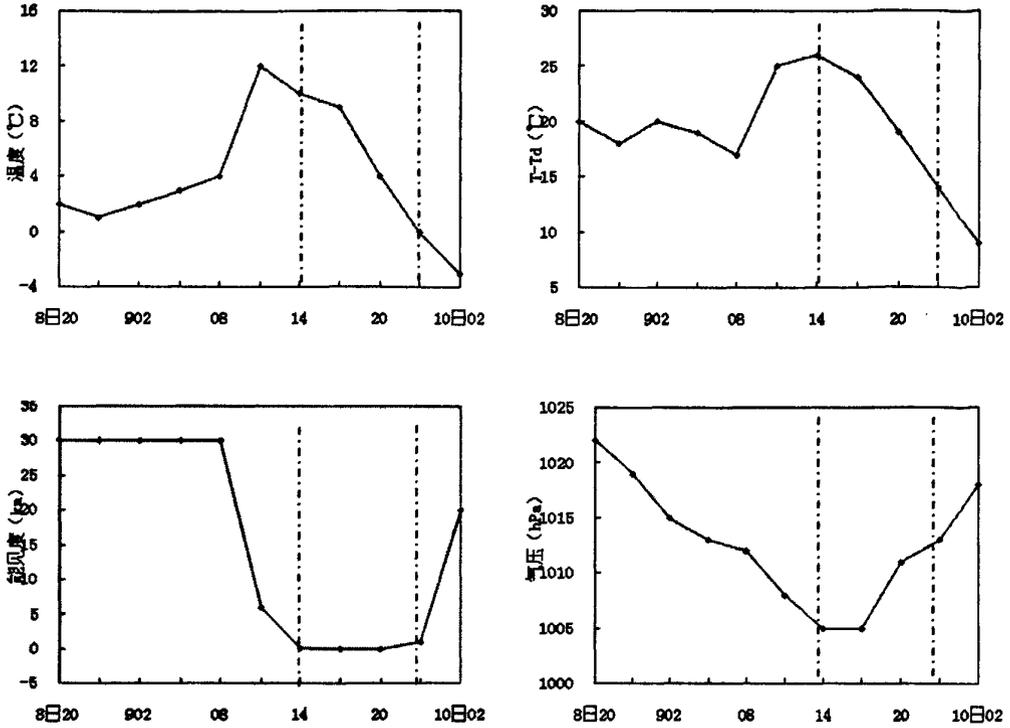


图 4.14 朱日和 2006 年 3 月 8 日 20 时-10 日 20 时地面气象要素变化, 其中 (a) 风向, (b) 风速, (c) 温度, (d) 温度露点差, (e) 水平能见度, (f) 气压。

从 2006 年 3 月 9-10 日的地面蒙古气旋动态 (图 4.11) 知, 9 日 14 时, 气旋冷锋即将通过朱日和, 17 时朱日和处于气旋冷锋后部。从图 4.14 朱日和在沙尘过程中地面气象要素变化知: 在气旋冷锋过境前, 地面风向逐渐从西南风转为偏西风, 湿度变化不大, 地面温度升高明显, 气压逐渐下降; 冷锋过境后, 湿度迅速减小, 地面气温下降, 24 小时降温 4 度, 气压开始上升, 能见度的变化与风速变化相关性与冷锋型相比较差, 在冷锋过境后, 风速逐渐增大, 但能见度迅速下降为 0.1km。

#### 4.4.3 单站地面气象要素对比

由海力素和朱日和地面要素 (图 4.13 和图 4.14) 的对比分析知:

一、冷锋型过程中，冷锋前地面温度不变，冷锋后降温显著，24小时降温达14度。而蒙古气旋型沙尘过程中，气旋冷锋前增温明显，气旋冷锋过境后降温小。

二、冷锋型沙尘过程中，冷锋过境后风速的变化与能见度变化相关性好。风速越大，能见度越低，而蒙古气旋型，气旋冷锋过境后，风速逐渐增大，而能见度迅速下降为0.1km。

## 4.5 地面大风的成因

### 4.5.1 地面大风分布特征与沙尘暴强度的关系

地面大风是影响沙尘暴形成和强度的重要因素。在冷锋型、蒙古气旋型沙尘天气过程中均出现了区域性的大风。如图4.1、4.2所示，在两次过程中均在内蒙古西部偏北和中部偏北地区出现了两个风速极值中心。冷锋型沙尘过程西部偏北地区 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域大，这个区域也是能见度小于200m的强沙尘暴区。另一个 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速极值中心位于内蒙古中部偏北，但能见度为600m。蒙古气旋型沙尘天气过程中，中部偏北的大风极值中心对应一个范围比大风极值中心范围大的强沙尘暴区。而西部偏北 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风区能见度为900m。

对比冷锋型和蒙古气旋型过程中的沙尘暴区域和大风极值的分布知，地面风速极值区与沙尘暴区有一定的对应关系。在冷锋沙尘过程中，地面大风极值 $\geq 14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域与强沙尘暴（能见度 $\leq 500\text{m}$ ）和黑风暴的区域基本一致。即，冷锋型沙尘过程中沙尘暴区与地面大风区位置一致。而在蒙古气旋型沙尘过程中，在内蒙古中部大风极值区与强沙尘暴和黑风暴的基本一致，但在内蒙古西部同样强的大风并没有产生强沙尘暴，能见度在900m。从实况分析知，蒙古气旋型沙尘过程中强沙尘暴主要分布在蒙古气旋中心附近的南部和西南部。

从两个过程中地面各站风速极值分布（图4.1b，图4.2b）知，冷锋型沙尘过程中地面大风（5级及以上）分布在内蒙古西部、中部甘肃中部、宁夏、陕西北部、山西北部，大风区域南北跨度大。7级（ $13.9\text{--}17.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）以上的大风主要位于阿拉善盟及河套北部地区—乌兰察布市北部，即在冷锋中段后部均出现地面大风。蒙古气旋型沙尘过程中大风主要在内蒙古西部、中部、东部偏南，及东北地区局部。大风区东西向跨度大，且在河套南部也出现

了6-7级大风的。7级( $13.9-17.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )以上的大风位于内蒙古西部、中部偏北地区,即地面大风出现在气旋冷锋后部,并以内蒙古中西部偏西、西南转西北大风最为显著。同时两次过程中,平均最大大风风速达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

同时就单站风速而言,两类沙尘过程中,与锋后沙尘暴同时出现的是地面风速的增大。如冷锋型沙尘过程中海力素,当锋后出现风速陡增时,如19日02-05时,风速从 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,开始出现扬沙,能见度由6km降至1.2km;风速 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,能见度由0.5km降至0.1km。地面风速迅速增加时,能见度会迅速减少,可见沙尘暴的强度与地面风速的跳跃式增加紧密相关。

在已经出现沙尘暴后,若地面大风持续加强时,沙尘暴强度大多能够维持,当风速增大到极值时,沙尘暴强度最强,此后沙尘天气开始减弱。对比2010年3月19-20日海力素的地面风速与能见度,当风速逐渐增大至 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,能见度降至0m,出现黑风暴。同样,在2006年3月9-10日朱日和的地面风速逐渐增大至 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,沙尘暴强度达到最强,能见度降至0m,此后沙尘天气开始减弱。

#### 4.5.2 系统发展因素

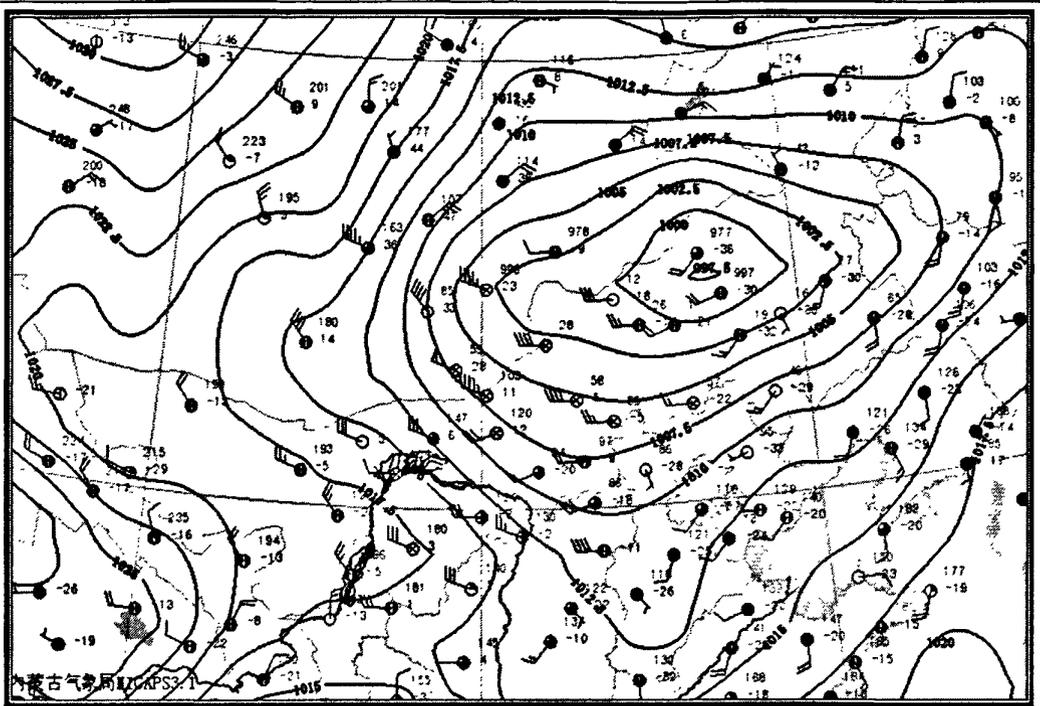


图 4.15 2006 年 3 月 9 日 17 时地面天气图，图上标注为气压和三小时变压。

在沙尘暴过程中，导致地面大风的直接因素是天气系统的发展。在气旋型沙尘暴观测中，气旋发展导致地面气压降低，气压梯度增大，从而使得地面风速增强与之适应，因此地面大风区往往出现在气旋中心附近等压线较密集区。蒙古气旋形成于萨彦岭山地背风坡，气旋冷锋后部冷空气常常经历从缓慢堆积到突然爆发过程，是气旋发展的主导因素，因此地面大风区常常出现在气旋冷锋后部，并以内蒙古中西部偏西、西南转西北大风最为显著（图 4.15）。这一特征在气旋发展初期最为明显，在气旋发展成熟期，也能够内蒙古东部偏南地区产生西南大风，在气旋锢囚阶段，则可以在内蒙古东部偏北地区产生东南大风。

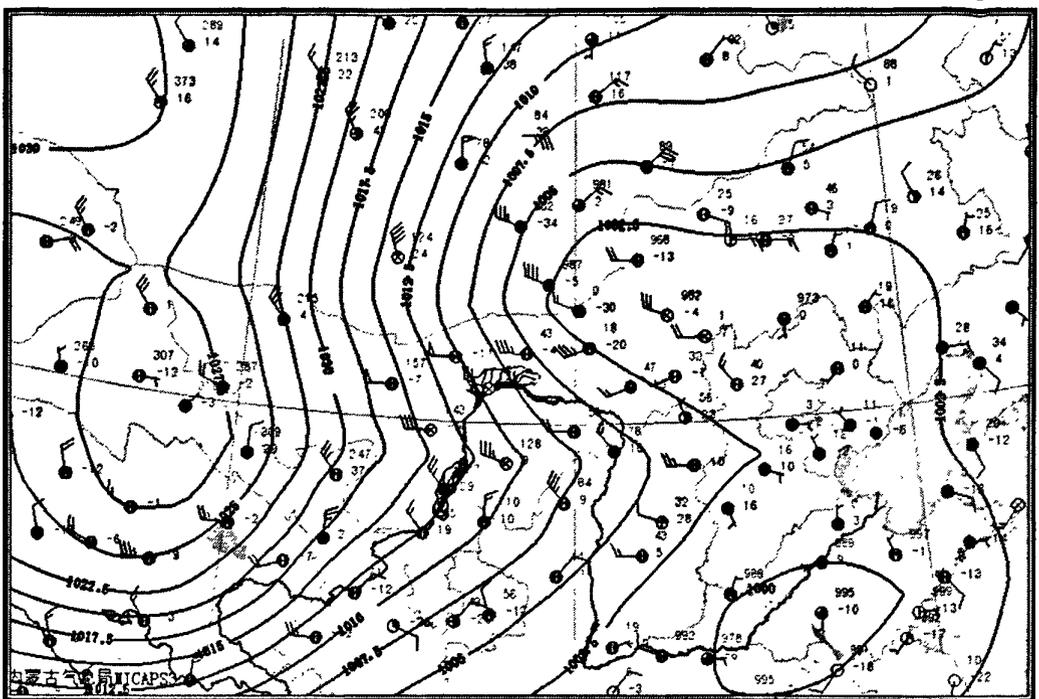


图 4.16 2010 年 3 月 19 日 17 时地面天气图，图上标注为气压和三小时变压。

对于冷锋型沙尘暴过程而言，冷锋发展增强的同时，在冷锋后形成地面大风，如图 4.16，整个冷锋后均出现地面大风，当冷锋扫过具备起沙条件的沙尘源区，即导致沙尘暴产生。

### 4.5.3 动量下传

高空动量的有效下传是地面大风形成的原因之一，多种天气和次天气尺度动力过程能够产生高空动量下传。本节基于实况、高空风和位温的垂直剖面，对两次沙尘暴过程的动量下传和低层混合层的演变情况进行了分析。本节对 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘过程选取了在 19 日 05-08 时过境的乌拉特中旗为代表站，2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘过程选取了 3 月 9 日 11-14 时过境的满都拉为代表站，以揭示冷锋型和蒙古气旋型两类沙尘过程的动量下传的特征。

## 4.5.3.1 冷锋型沙尘过程的动量下传

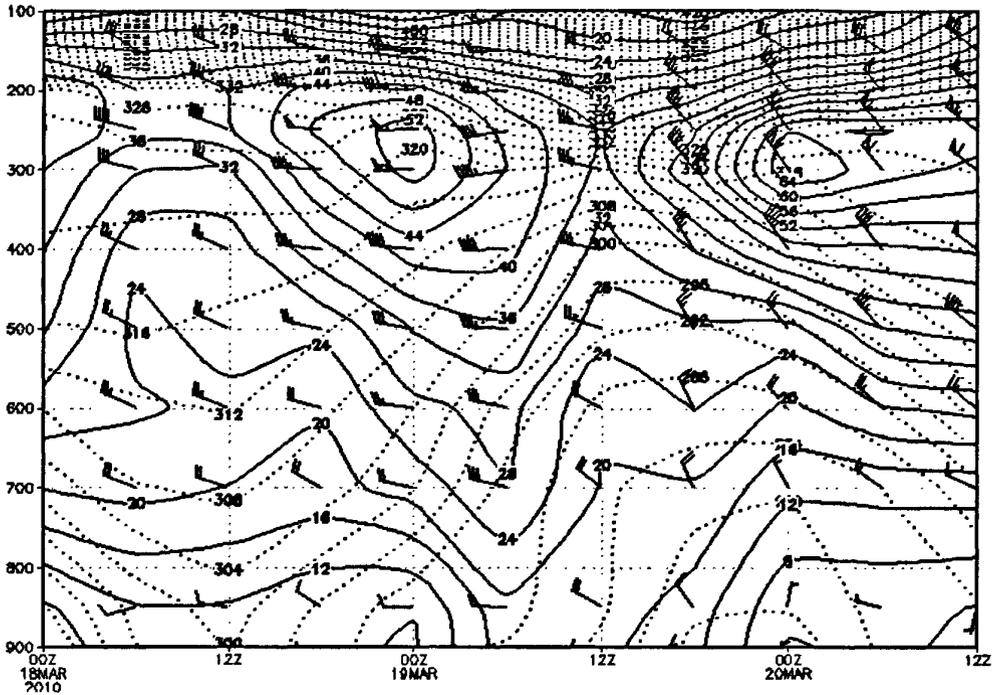


图 4.17 2010 年 3 月 18-20 日乌拉特中旗高空风时间剖面图, 实线为全风速, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 虚线为位温, 单位: K, 图中标注时间为世界时。

2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘过程中选取的乌拉特中旗位于河套北部地区, 冷锋过境在 19 日 05-08 时, 沙尘天气从 19 日 14 时开始到 19 日 20 时结束。本节对 2010 年 3 月 18-20 日乌拉特中旗的高空风做了时间剖面图 (图 4.17), 可以看出: 在冷锋过境前, 随着天气系统的发展, 高空槽加深, 地面冷锋逼近, 在 300-500hPa 风速逐渐增大, 等风速线明显向低层伸展, 表明出现明显的高空动量下传, 但这一下传主要出现在 700hPa 以上; 19 日 08 时, 冷锋过境, 高空 300hPa 出现了  $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速中心, 之后, 可以看到随着大气层结稳定度的降低, 700hPa 以下的动量下传明显增强, 在 19 日 14 时, 900-700hPa 出现了混合层, (混合层的存在有利于动量有效下传), 低层风速开始增大, 850hPa 风速增大到  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 地面风速达  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 开始出现扬沙天气。19 日 14-20 时, 900-700hPa 混合层维持, 使得低层风速得以维持, 沙尘天气持续。可见, 在对流层低层有混合层 (等位温区), 有利于动

量下传。此后 900-700hPa 位温差加大，混合层消失，地面风速骤降，沙尘天气结束。可见，本次过程中，导致地面大风形成的高空动量在对流层中高层和对流层低层表现为两种不同的特征。

#### 4.5.3.2 蒙古气旋型沙尘过程的动量下传

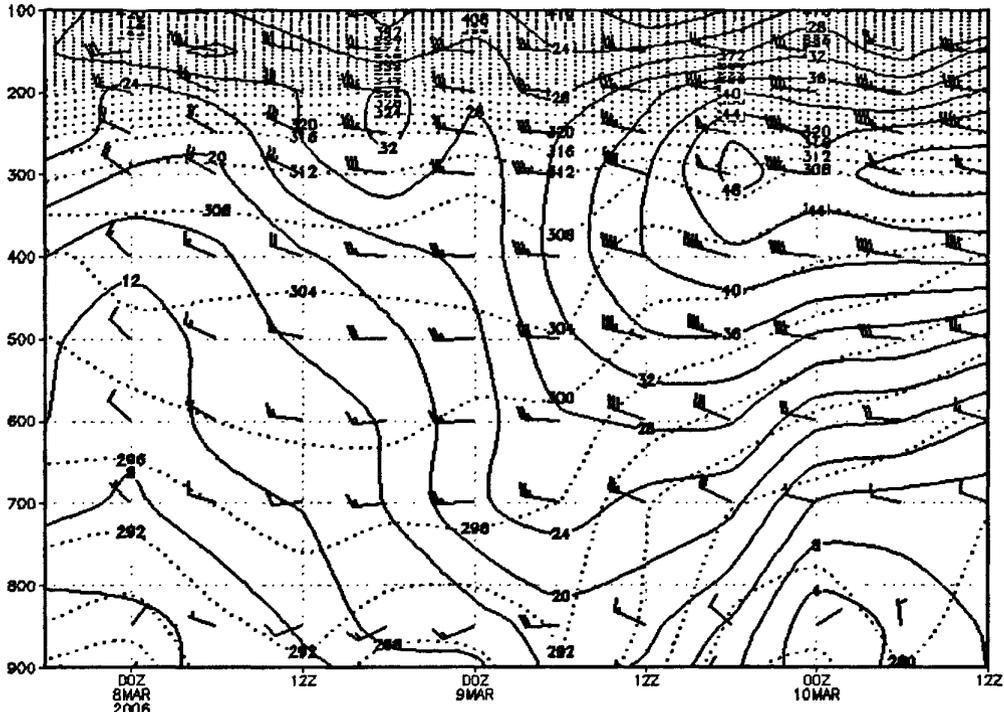


图 4.18 2006 年 3 月 8-10 日满都拉高空风时间剖面图，实线为全风速，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，虚线为位温，单位：K，图中标注时间为世界时。

2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘过程中选取的满都拉位于内蒙古西部偏东北的地区，气旋冷锋过境在 9 日 11-14 时（北京时，下同），沙尘天气从 9 日 11 时开始到 9 日 20 时结束。从 2006 年 3 月 8-10 日满都拉的高空风时间剖面（图 4.18）知：在气旋冷锋过境前，2006 年 3 月 8 日 08-9 日 08 时，高空 200-300hPa 全风速从  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增至  $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在 700-200hPa 间，风速垂直切变逐渐变小，有动量下传至 700hPa；在冷锋过境时（9 日 11-14 时），低层风速迅速增大，但在 700-850hPa 间风速变化大，没有出现动量下传，此时 850hPa 风速增至

接近 20m/s, 为气旋发展时, 强气压梯度下使气旋区风速迅速增强, 14 时-20 时, 在 900-700hPa 出现混合层, 低层风速维持, 沙尘天气持续。此后随着混合层消失, 600hPa 到低层风速显著下降。另外, 可以看到在气旋冷锋过境前, 高空 200hPa 附近有  $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的急流核, 冷锋过境后, 急流核下落至 300hPa, 急流核风速增大到  $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 4.5.3.3 冷锋型、蒙古气旋型对比分析

通过以上分析, 可以看到

(1) 在冷锋和蒙古气旋沙尘暴过程中, 地面风速的大小与沙尘暴强度均表现出比较密切的相关关系, 风速越大, 沙尘暴越强。

(2) 冷锋型沙尘暴过程中, 首先, 随着天气系统的发展和高空槽的加深, 在 300-700hPa 间风速大值区出现明显的下落, 即产生高空动量下传, 之后, 随着对流层低层深厚混合层的形成, 高空动量进一步从 700hPa 下传到达地面。

(3) 在蒙古气旋沙尘暴过程中, 强的动量下传主要出现在 300-700hPa 间, 显示天气系统发展导致的地面和对流层低层风速增大的作用更为明显。

(4) 在蒙古气旋型过程中, 出现高空急流较为明显的下落, 这与高空位涡下传、切断低涡形成等现象是一致的, 表明高层强迫参与了天气系统的发展过程。

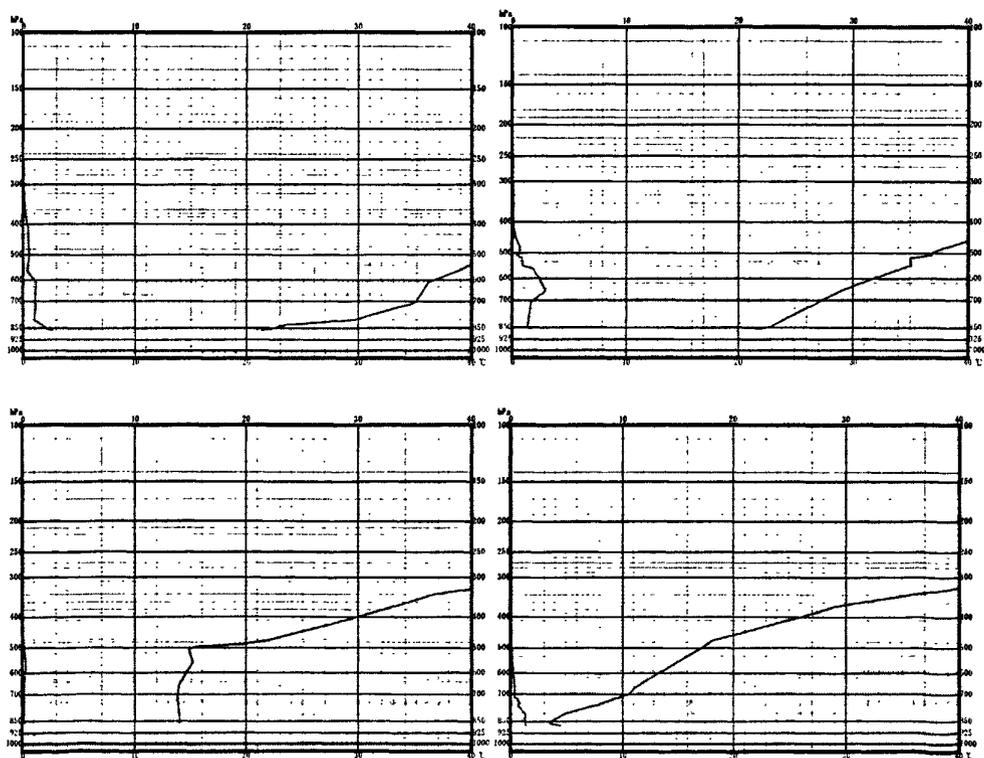
## 4.6 层结特征和演变

本章分析的两次沙尘暴过程中, 沙尘暴强度(能见度)分布于地面风速极值并不完全一致(图 4.1, 4.2)。如 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘过程中, 位于内蒙古中部锡林郭勒盟的 53272 地面风速极值达到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 但沙尘暴最小能见度为 0.6km。在河套附近的 53457 地面极值风速  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小能见度为 0.1km, 为强沙尘暴。同样在 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘过程中, 当极值风速为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 内蒙古中部锡林郭勒盟出现了黑风暴, 而在河套西北部的 53324, 最小能见度为 0.5km。可见, 影响沙尘暴强度的还有其他因素。

层结条件是影响沙尘暴发生发展的主要热力因素。在沙尘暴发生前，层结条件对沙尘暴触发的影响对整个沙尘暴过程来说最为重要，Takemi<sup>[23]</sup>对1993年5月5日中国西北黑风暴发生机理的研究发现，在沙尘暴发生前，对流层中低层形成了非常深厚的中性层结——混合层，由于中性层结能够减小气块抬升所需的能量，因而有利于干对流产生。沙尘暴往往发生在环境异常干燥的条件下，由于水汽的缺乏，因而客观上减小了不稳定层结的出现几率，使中性层结成为沙尘暴前大气层结的主要特征。姜学恭<sup>[65]</sup>等、赵琳娜等<sup>[48]</sup>研究中均发现我国北方沙尘暴过程触发前，混合层是一种较为普遍的层结形态。

本节分别对2010年3月19-20日冷锋型和2006年3月9-10日蒙古气旋型沙尘过程中讨论混合层的特征。

#### 4.6.1 冷锋型沙尘过程单站层结特征和演变



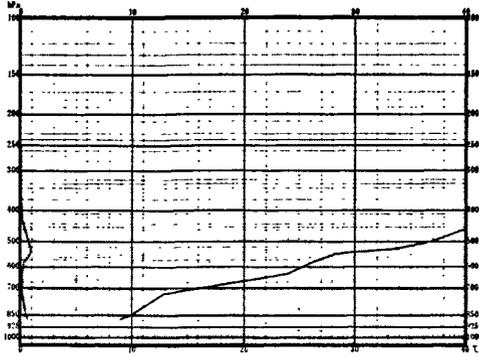
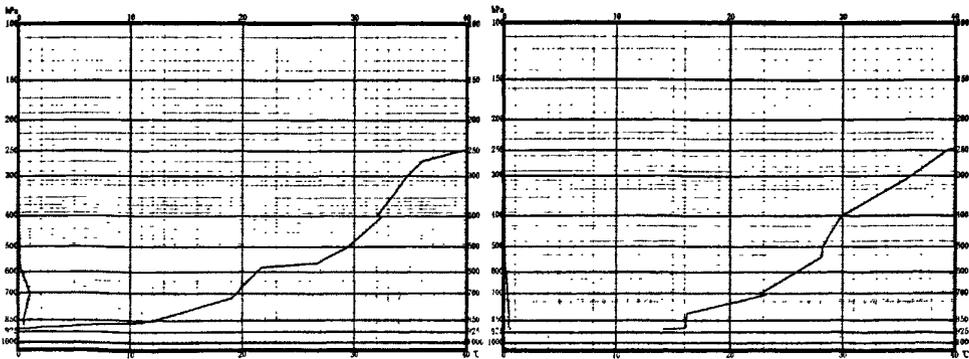


图 4.19 2010 年 3 月 18 日 20 时-20 日 20 时内蒙古乌拉特中旗位温和湿度廓线。位温，单位℃，比湿单位:0.1k/kg

2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘过程中选取代表站乌拉特中旗（位于河套北部地区），冷锋过境在 19 日 05-08 时，沙尘天气从 19 日 14 时开始到 19 日 23 时结束。从乌拉特中旗 3 月 18-20 日的位温和比湿廓线（图 4.19）可以看出：在冷锋过境前，（18 日 20-19 日 08 时），对流层低层（ $\partial\theta/\partial Z > 0$ ），整层大气为稳定层结，此后开始出现沙尘天气。在 19 日 14-20 时沙尘暴加强和持续期间，可以注意到在 19 日 20 时，对流层中低层有深厚的混合层，700-850 接近中性层结，700-500hPa 位温变化也很小，此时沙尘暴最强；到 20 日 08 时，低层有很浅薄的不稳定层结，沙尘天气已经结束。此后  $\partial\theta/\partial Z > 0$  转为稳定层结。

#### 4.6.2 蒙古气旋型沙尘过程单站层结特征和演变



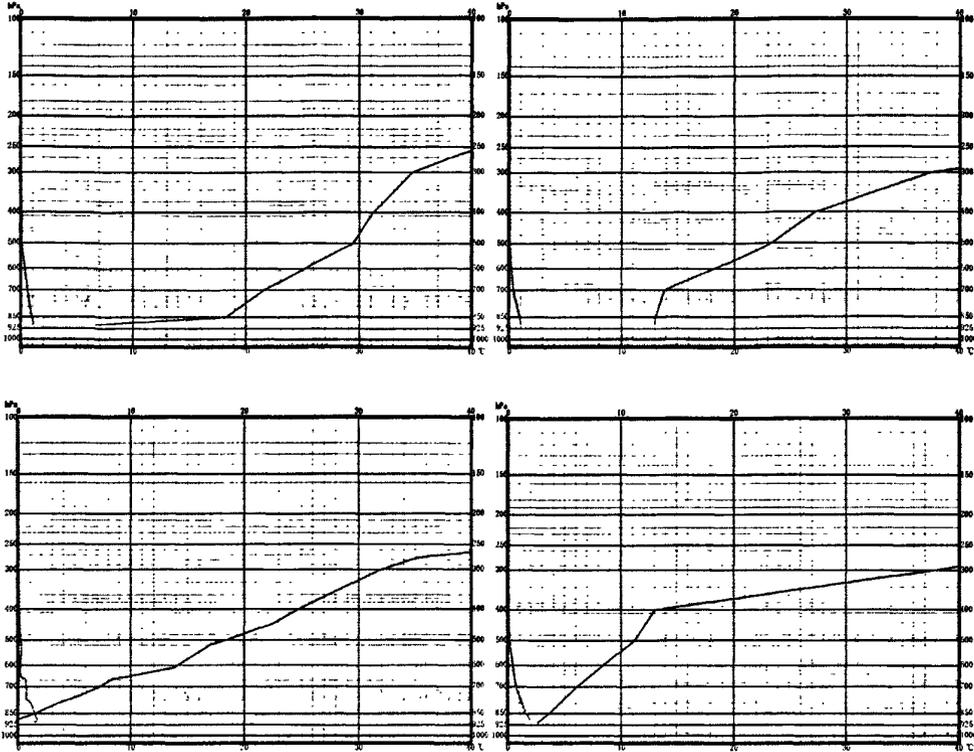


图 4.20 2006 年 3 月 8 日 08 时-10 日 20 时内蒙古二连浩特位温和湿度廓线。位温，单位  $^{\circ}\text{C}$ ，比湿单位： $0.1\text{k}/\text{kg}$

在 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘过程中，选取了位于内蒙古中部偏北地区的二连浩特的位温和比湿廓线（图 4.20）进行对比分析，气旋冷锋通过二连浩特在 9 日 14 时（北京时，下同），沙尘天气从 9 日 14 时开始到 10 日 02 时前结束。与图 4.20 类似，18 日白天整层大气为稳定层结，夜间在低层 850hPa 附近有浅薄的中性层结，这是由大气层结的日变化引起的，傍晚明显高于早晨。19 日早晨，整层大气又为稳定层结，到 19 日 20 时，700-850hPa 的位温差  $< 1\text{K}$ ，接近中性层结，混合层顶位于 700hPa 附近，混合层比 8 日 20 时深厚，低层混合层的存在有利于高空动量下传，进而地面风速增大，在沙源区形成沙尘暴。于此对应，3 月 9 日 17-20 时，二连浩特地面定时风速达  $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，能见度为 0.3km，是此次沙尘过程中该站出现的最小能见度。20 日 08 时，位温随高度的变化增大，为稳定层结。

### 4.6.3 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程层结特征对比分析

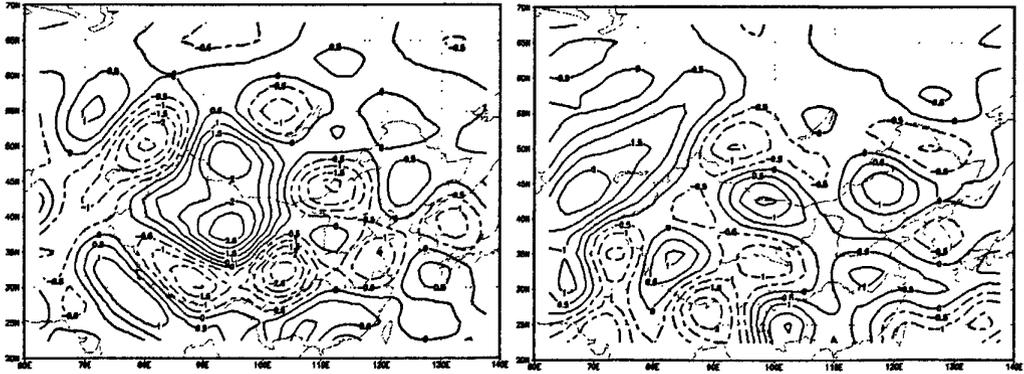
通过对冷锋型、蒙古气旋型两次沙尘过程层结特征的分析，可以得出：

(1) 在沙尘暴发生前，对流层中低层形成的中性层结——混合层，有利于干对流产生，从而诱发沙尘天气。

(2) 两类沙尘天气过程中，层结有显著的日变化，有沙尘天气时，混合层比晴天时高。且混合层均在沙尘出现后的傍晚 20 时出现，在冷锋型沙尘天气过程中，混合层最大高度接近 500hPa，蒙古气旋型混合层最大高度在 700hPa。可见冷锋型由于混合层高度高，更有利于高空的动量下传。

## 4.7 物理量分布特征

### 4.7.1 冷锋型沙尘过程物理量分布特征



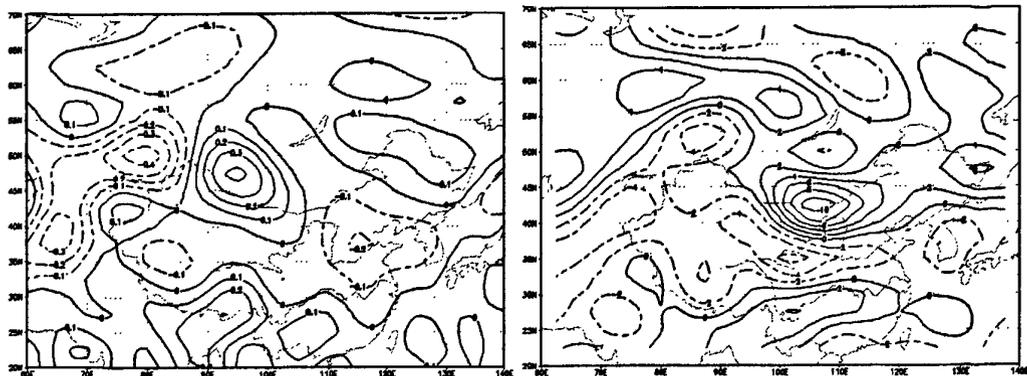


图 4.21 2010 年 3 月 19 日 20 时 (a) 850hPa 散度, 单位:  $10^{-6}s^{-1}$  (b) 200hPa 散度, 单位:  $10^{-6}s^{-1}$  (c) 500hPa 垂直速度, 单位:  $10^{-3}Pa \cdot s^{-1}$  (d) 500hPa 涡度, 单位:  $10^{-5}s^{-1}$ 。

从(图 4.21a)和(图 4.21b)可以看到在低层 850hPa, 蒙古国东部、内蒙古河套北部及内蒙古中部地区为明显的辐合区, 中心强度达  $-1.5 \times 10^{-6}s^{-1}$ , 对应在高层 200hPa 为强辐散中心, 中心强度为  $1.0 \times 10^{-6}s^{-1}$ , 低层有强的辐合, 高层辐散产生强迫抽吸, 有利于河套北部、内蒙古中部上升气流加强, 散度场呈低层辐合高层辐散结构有利于沙尘暴的发生<sup>[66]</sup>。在低层辐合中心西侧有强的辐散中心, 在  $100^{\circ} E$  有强的下沉气流。

从 500hPa 垂直速度(图 4.21c)知, 在河套东部、内蒙古中部、山西、河北为上升气流区, 中心强度为  $-0.2 \times 10^{-3}Pa \cdot s^{-1}$ , 与散度场中这一地区低层辐合, 高层辐散对应。下沉区位于内蒙古西部, 中心值为  $0.4 \times 10^{-3}Pa \cdot s^{-1}$ , 中高层 500hPa 垂直速度场的分布说明在  $110^{\circ} E$  及以东整层为上升运动,  $110^{\circ} E$  以西整层为下沉运动。

从 500hPa 涡度图 4.21d 知, 在内蒙古中西部偏北地区有强的正涡度中心, 且从 200、700、850hPa 的涡度场(图略)的分布知, 在这一地区整层为正涡度区, 且随着高度的增高, 正涡度中心强度增大, 在 850hPa 正涡度中心为  $4 \times 10^{-5}s^{-1}$ , 500 和 200hPa 达到  $10 \times 10^{-5}s^{-1}$ 。

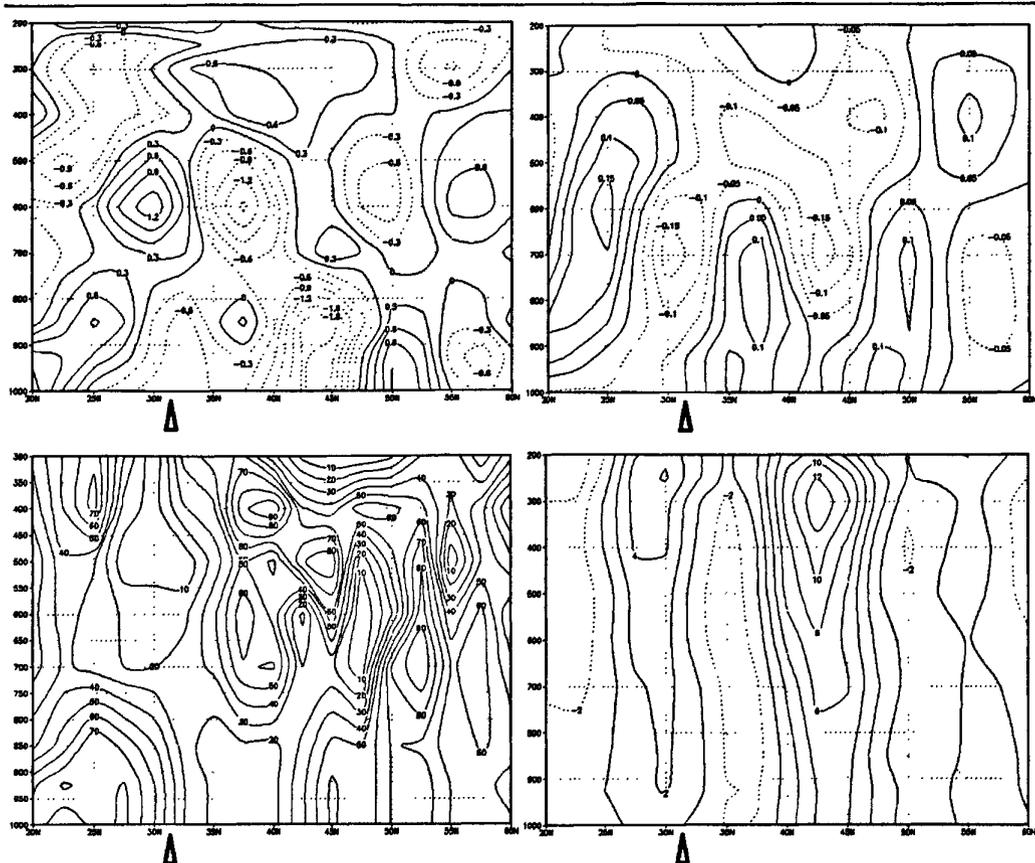


图 4.22 2010 年 3 月 19 日 20 时沿  $110^{\circ}\text{E}$  物理量纬向剖面图 (a) 散度, 单位:  $10^{-6}\text{s}^{-1}$  (b) 垂直速度, 单位:  $10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  (c) 相对湿度, 单位: % (d) 涡度, 单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。图中  $\triangle$  标记处为地面冷锋的位置。

从散度和垂直速度垂直分布可知 (图 4.22a、b): 在冷锋前 800hPa 存在辐合中心, 低层辐合区上空 700–500hPa 对应辐散区, 高层的辐散抽吸作用, 使得冷锋前强上升气流, 中心位于 700hPa (强度为  $-0.15 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 冷锋后下沉运动中心位于 600hPa。

从相对湿度的垂直剖面图知 (图 4.22c): 冷锋前, 低层辐合区内相对湿度  $>60\%$ , 锋前不利于沙尘出现; 冷锋后, 700–850hPa 以下的中低层大气相对湿度在 20–40%, 相对湿度低, 利于沙尘天气出现。

从涡度场的垂直分布知 (图 4.22d): 冷锋附近整层大气为正涡度, 且随着高度增高, 涡度增大。

## 4.7.2 蒙古气旋型沙尘过程物理量分布特征

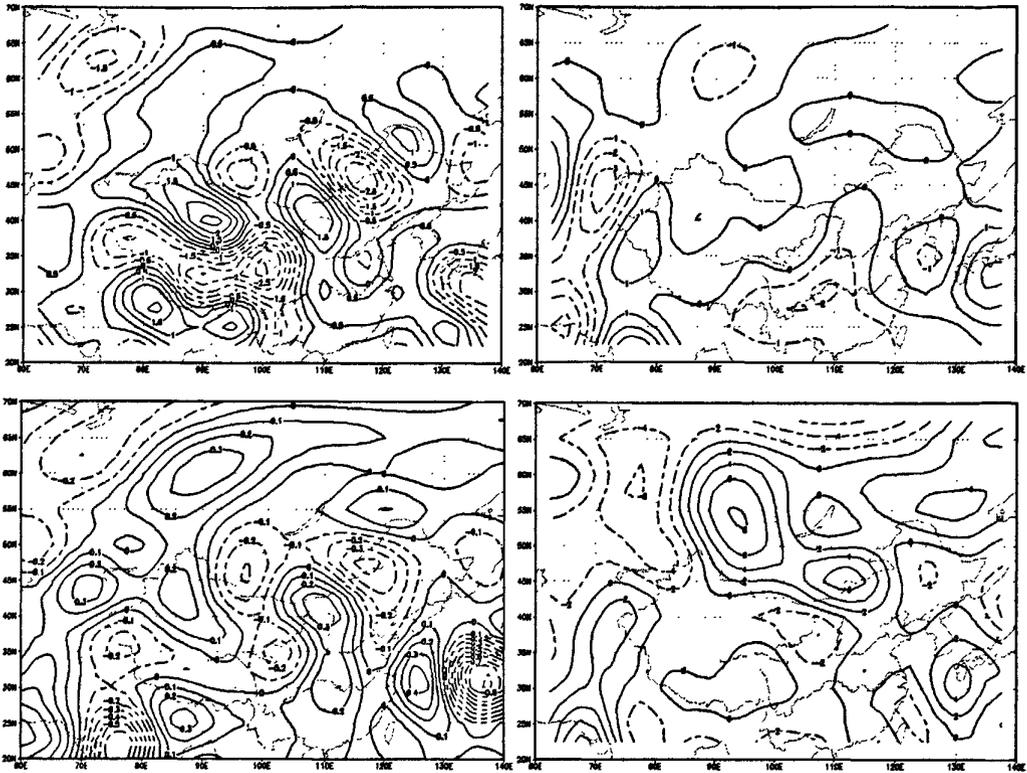


图 4.23 2006 年 3 月 9 日 20 时 (a) 850hPa 散度, 单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$  (b) 200hPa 散度, 单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$  (c) 500hPa 垂直速度, 单位:  $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  (d) 500hPa 涡度, 单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。

从 2006 年 3 月 9 日 20 时 850hPa 散度图 4.23a 知: 在低层 850hPa 内蒙古中部 (锡林郭勒盟) 为辐合区, 辐合中心强度为  $-2.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 但该地区在 200hPa 散度图 4.23b 接近为 0, 并没有出现辐散区。850hPa 内蒙古河套地区为辐散区。

从 2006 年 3 月 9 日 20 时 500hPa 垂直速度场图 4.23c 知: 500hPa 垂直速度负值区、正值区的位置正好对应 850hPa 的辐合、辐散中心。说明在低层辐合区上空 500hPa 仍有上升运动。

2006 年 3 月 9 日 20 时 500hPa 涡度场图 4.23d 可以看到, 在内蒙古中部有正涡度中心, 中心强度为  $6 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ , 在 500hPa 同一位置高空图中此时出现了闭合的低涡。

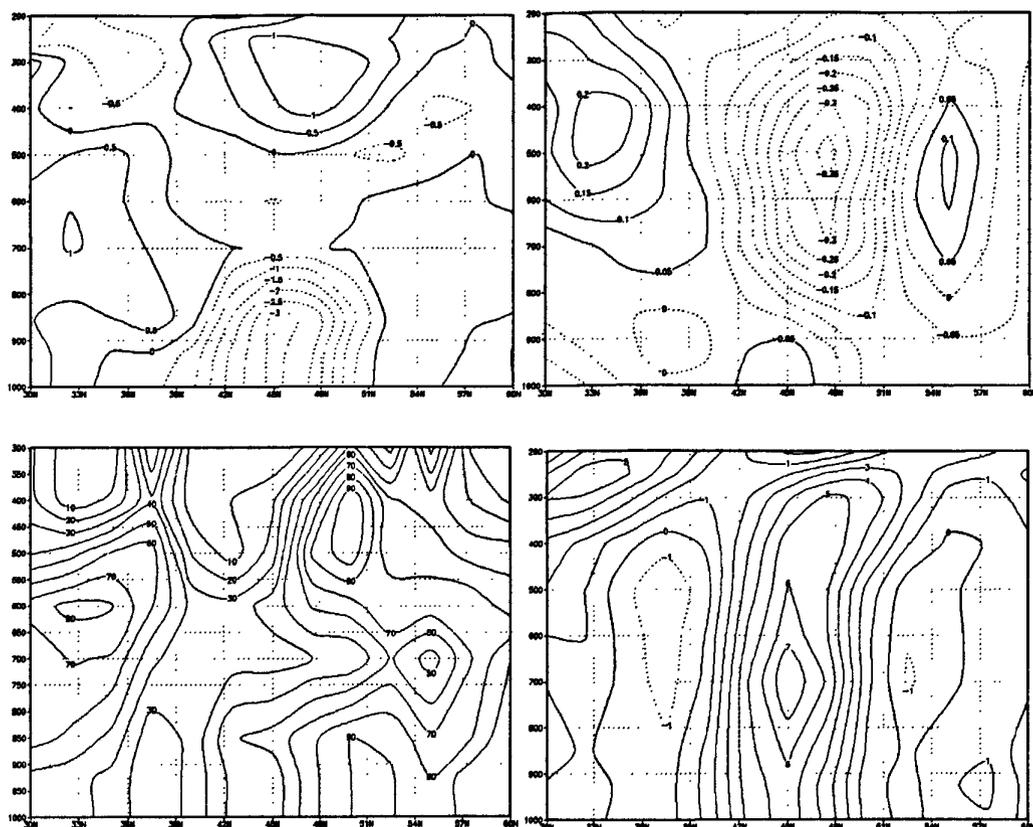


图 4.24 2006 年 3 月 9 日 14 时穿过气旋中心 ( $110^{\circ} \text{E}$ ) 物理量经向剖面图 (a) 散度, 单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$  (b) 垂直速度, 单位:  $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  (c) 相对湿度, 单位: % (d) 涡度, 单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ . 气旋中心位于  $45^{\circ} \text{N}$ ,  $110^{\circ} \text{E}$ .

从散度场垂直剖面图 4.24a 可以看出, 在气旋中心到整个气旋区, 在 700 hPa 以下有强的辐合, 在高空 300–400hPa 对应辐散中心, 低层辐合, 高层辐散, 有利于在气旋中心及其附近形成强的上升运动, 其中气旋中心辐合上升运动最强。这与气旋中心及附近垂直速度场 (4.24b) 的垂直分布一致, 在气旋中心及附近垂直速度为负, 负的垂直速度中心位于 500hPa。

从垂直速度场垂直剖面图 4.24b 可以看出, 在气旋中心及附近, 整层大气有强的上升运动, 气旋后部, 400–700hPa 间有下沉运动, 强度较弱。

从相对场垂直剖面图 4.24c 可以看出, 在气旋中心及气旋南侧 700hPa 以下相对湿度在 30% 以下, 而在气旋中心南侧发生沙尘暴的区域, 整个对流层均干燥。这也是强沙尘暴形成

的一个重要条件。在气旋中心北侧(45-48° N), 700-850hPa相对湿度也小于50%, 气旋北侧沙尘天气比南侧弱。

从涡度场垂直剖面图 4.24d 知, 在气旋及其附近, 整层为正涡度区, 在 700hPa 有正涡度中心。

### 4.7.3 冷锋型、蒙古气旋型沙尘过程物理量分布特征对比

(1) 冷锋型沙尘暴过程中, 锋前 800hPa 存在辐合区, 700-500hPa 对应辐散区, 上升运动中心位于 700hPa, 冷锋后下沉运动中心位于 600hPa。

(2) 蒙古气旋型沙尘暴过程中, 气旋中心及其附近 300hPa 以下均有强的上升运动, 高低层辐散、辐合中心分别位于 300hPa 和 850hPa。

(3) 冷锋型沙尘过程中, 锋前相对湿度大, 锋后相对湿度小, 在冷锋前不易于沙尘天气出现。蒙古气旋型, 气旋南侧整层大气干燥, 在气旋南侧容易出现强沙尘暴。

(4) 两个沙尘过程在锋面附近或气旋附近整层为正涡度。冷锋型沙尘过程中, 锋面附近正涡度随高度增高而增大, 最大正涡度中心在 300hPa。蒙古气旋型沙尘过程中, 气旋中心及其附近最大正涡度中心出现在 700hPa。

## 4.8 天气学概念模型

### 4.8.1 冷锋型沙尘过程天气学概念模型

本节通过对 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘天气过程的高空、地面形势分析、层结构、物理量空间分布特征, 对这次冷锋型沙尘过程高空锋区发展、南亚过程中, 高低层系统的配置进行了充分了分析, 并学习研究了一些学者对锋面结构的分析<sup>[43,67-68]</sup>, 得出 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘天气过程的天气学概念模型(图 4.25)。

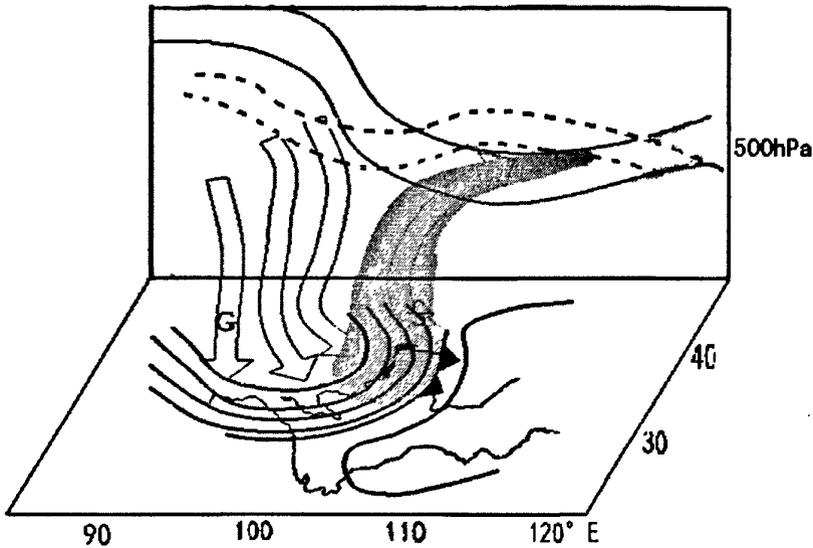


图 4.25 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型沙尘天气过程天气学概念模型，图中阴影区为沙尘，虚线为等温线，实线为地面气压场或高空等高线。

沙尘粒子在锋面强地面风速的作用下出现起沙，在锋前上升气流的作用下产生扬升，随着天气系统的移动，在下游出现沙尘暴或扬沙，锋前 700hPa 为上升运动中心，粒径较小的沙尘粒子会继续抬升，随着高空西北大风向东南方向输送，在较远距离的输送后，在地面形成浮尘天气。（如图 4.25 所示）。

#### 4.8.2 蒙古气旋型沙尘过程天气学概念模型

本节通过对 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘天气过程的高空环流形势、层结特征、高空风及物理量垂直分布的诊断分析，对蒙古气旋的发展及高低空配置有了清晰的认识。在此基础上给出了 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘天气过程天气学概念模型（图 4.26）。

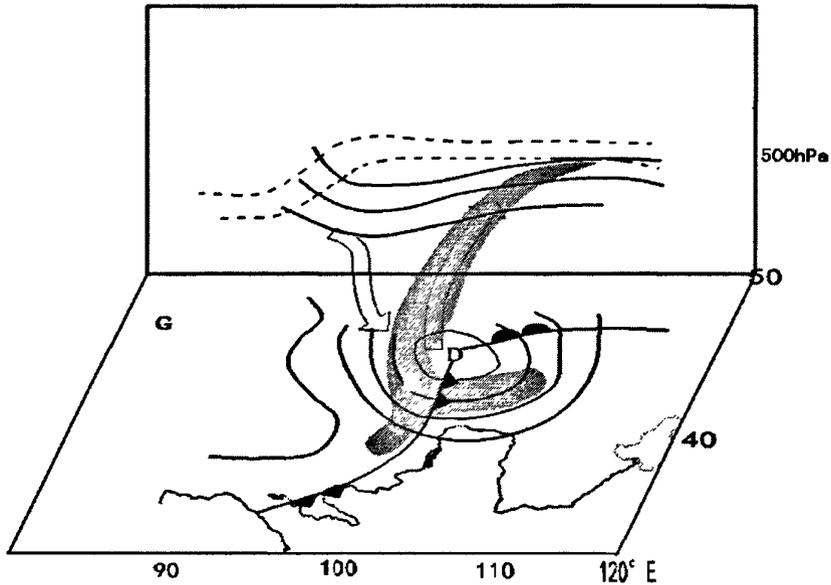


图 4.26 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型沙尘天气过程天气学概念模型，图中阴影区为沙尘，虚线为等温线，实线为地面气压场或高空等高线。

在地面气旋加强发展时，地面风速增大，沙尘粒子得以启动，在气旋区螺旋上升气流的作用下，沙尘粒子涡旋式向上扬升，其中，粒径较大的沙尘随气旋及冷锋向前扩展，产生扬沙或沙尘暴，气旋中心及附近 500hPa 为上升运动中心，粒径较小的涡旋上扬至 500hPa 以上，在高空槽前偏西、西南大风下向偏东、东北方向传输，在较远距离的输送后，在地面形成浮尘天气。（如图 4.26 所示）。

## 第五章 结论和讨论

### 5.1 结论

本文综合利用高空、地面、地面加密、卫星遥感等观测和 NCEP 再分析资料,在对 2001-2010 年间我国北方沙尘暴过程进行普查的基础上,针对 2001-2010 年间冷锋型和蒙古气旋型沙尘暴过程的发生频数、影响范围、地区、强度等特征进行了对比统计分析,发现和总结了有价值的结论。同时针对典型沙尘暴过程,利用天气学和诊断分析方法对比冷锋型、蒙古气旋型沙尘暴过程的天气系统动力、热力结构,沙尘暴强度的分布特征,及天气系统的发生、发展特点,并给出冷锋型和蒙古气旋型沙尘过程的天气学概念模型。主要结论如下:

(1) 2001-2010 年的十年间,我国北方沙尘天气过程出现次数呈波动减少,2001 年沙尘天气过程最多;2006 年有所增加,此后又开始波动减少,2010 年沙尘天气略有增加。

(2) 2001-2010 年间冷锋型和蒙古气旋型沙尘天气过程共 184 次,其中冷锋型为 110 次,蒙古气旋型为 74 次。冷锋型约占统计总数的 60%,蒙古气旋型占 40%。沙尘天气过程在这 10 年中几乎一年四季都有出现,春季最多,秋季最少。冷锋型沙尘过程 3、4 月发生最多,蒙古气旋型 4 月最多。

(3) 2001-2010 年间受冷锋影响出现的沙尘总日数为 169 日,而蒙古气旋影响下出现沙尘天气的日数为 124 天。两类沙尘总日数达 293 天,年平均出现 29.3 天。全年 1/3 以上的沙尘日数主要集中在 4 月。冷锋型过程平均持续 1.54 天,蒙古气旋 1.68 天,两类过程最多持续 3 天,冷锋型持续 1 天和 2 天次数相当,各占 48.5%;蒙古气旋型持续 2 天最多,占 54%。

(4) 冷锋型影响范围大于蒙古气旋型,冷锋型多向东和东南方向移动,并以西北-东南向为主,蒙古气旋型多向向东、东偏南和东偏北方向移动,以自西向东移动为主。

(5) 两类沙尘过程平均最大风速在  $15-18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 且两类沙尘天气过程的最大风速均出现在 4 月, 但冷锋型最大风速 ( $32\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 大于蒙古气旋型 ( $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

(6) 蒙古气旋沙尘暴过程平均强度略大于冷锋型, 在我国观测区域内, 冷锋型平均每次过程约有 14 站出现沙尘暴, 而蒙古气旋型为 22.5 站。

(7) 对 2010 年 3 月 19-20 日冷锋型和 2006 年 3 月 9-10 日蒙古气旋型两个沙尘天气过程的对比分析发现: 从大尺度环流背景看, 冷锋型沙尘过程高空为两槽一脊型, 蒙古气旋型高空为一槽一脊型。且冷锋型过程中, 冷空气从脊前向南爆发, 高空槽底部气旋性曲率加大, 随着高度的降低, 高空槽明显加深; 蒙古气旋型高空槽在低层 (850hPa)、中层 (500hPa) 形成切断低压。

(8) 两类沙尘天气过程中, 地面低压与其后部的冷高压的相对位置相似, 但冷锋型沙尘过程中, 冷高压强度强, 地面低压很弱, 冷锋后有强气压梯度, 锋后为西北大风, 沙尘暴西北-东南向移动。而蒙古气旋型沙尘过程中, 气旋后部冷高压强度弱, 几乎没有形成闭合的等压线。气旋强烈发展为主要特征, 气旋强烈加深对地面强风的产生有重要作用。气旋暖区及冷锋后为西南和偏西大风, 且大风多出现在气旋南部。

(9) 在冷锋和蒙古气旋沙尘暴过程中, 地面风速的大小与沙尘暴强度均表现出比较密切的相关关系, 风速越大, 沙尘暴越强。冷锋型地面风速与能见度的反相关性优于蒙古气旋型, 且锋后气温下降比蒙古气旋型显著。

(10) 冷锋型沙尘暴过程中, 首先, 随着天气系统的发展和高空槽的加深, 在 300-700hPa 间风速大值区出现明显的下落, 即产生高空动量下传, 之后, 随着对流层低层深厚混合层的形成, 高空动量进一步从 700hPa 下传到达地面。在蒙古气旋沙尘暴过程中, 强的动量下传主要出现在 300-700hPa 间, 显示天气系统发展导致的地面和对流层低层风速增大的作用更为明显。

(11) 两类沙尘天气过程中, 层结有显著的日变化, 有沙尘天气时, 混合层比晴天时高。在冷锋型沙尘天气过程中, 混合层最大高度接近 500hPa, 蒙古气旋型混合层最大高度在 700hPa。可见冷锋型由于混合层高度高, 更有利于高空的动量下传。

(12) 冷锋型沙尘暴过程中, 锋前 800hPa 存在辐合区, 700-500hPa 对应辐散区, 上升运动中心位于 700hPa, 冷锋后下沉运动中心位于 600hPa。而蒙古气旋型沙尘暴过程中, 气旋中心及其附近 300hPa 以下均有强的上升运动, 高低层辐散、辐合中心分别位于 300hPa 和 850hPa。

(13) 给出了冷锋型和蒙古气旋型天气学概念模型:

**冷锋型:** 沙尘粒子在锋面强地面风速的作用下出现起沙, 在锋前上升气流的作用下产生扬升, 随着天气系统的移动, 在下游出现沙尘暴或扬沙, 锋前 700hPa 为上升运动中心, 粒径较小的沙尘粒子会继续抬升, 随着高空西北大风向东南方向输送, 在较远距离的输送后, 在地面形成浮尘天气。

**蒙古气旋型:** 在地面气旋加强发展时, 地面风速增大, 沙尘粒子得以启动, 在气旋区螺旋上升气流的作用下, 沙尘粒子涡旋式向上扬升, 其中, 粒径较大的沙尘随气旋及冷锋向前扩展, 产生扬沙或沙尘暴, 气旋中心及附近 500hPa 为上升运动中心, 粒径较小的涡旋上扬至 500hPa 以上, 在高空槽前偏西、西南大风下向偏东、东北方向传输, 在较远距离的输送后, 在地面形成浮尘天气。

## 5.2 讨论

(1) 本文对沙尘暴形成的动力、热力条件分析仅限于个例, 且是天气尺度的分析, 还有待通过次天气尺度的分析以揭示冷锋型、蒙古气旋型的差异。

(2) 沙尘暴是大气、沙尘相互作用的天气现象, 今后详尽的沙尘气溶胶的观察结果, 有助于更深入的揭示沙尘暴生产的本质。

(3) 可以利用本文这些成果, 开发预报方法, 应用于业务, 更好的为沙尘暴预报服务。

## 参考文献

- [1] 夏训诚, 杨根生. 等. 中国西北地区沙尘暴灾害及防治[VI]北京: 中国环境科学出版社, 1996年10月.
- [2] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章, 等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[A]. 中国沙尘暴研究[C]. 北京: 气象出版社, 1997. 1-10.
- [3] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究进展. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-256.
- [4] Pye K. Aolian dust and dust deposits [M], London: Academic Press Inc Ltd, 1987. 113-126.
- [5] 姜学恭, 陈受钧. 地形影响沙尘传输的观测和模拟研究. 气象学报, 2008, 66(1): 722-834.
- [6] 史培军, 严平, 袁艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析. 第四纪研究, 2001, 21: 41-47.
- [7] 韩茂莉, 程龙. 大漠狂风——沙尘暴历史、现实的思考. 太原: 山西人民出版社, 2002. 1-30.
- [8] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 中国北方沙尘暴研究的若干进展[J], 干旱区资源与环境, 2004, 18(1)1-8.
- [9] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. 中国沙漠, 2002, 22 (2): 106-111.
- [10] 钱正安, 胡隐樵, 龚乃虎, 等. “931515” 特强沙尘暴的调查报告及其分析. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 37-43.
- [11] 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.
- [12] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 近45年我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. 中国沙漠, 2003. 23(3): 306-310.
- [13] 方宗义、王炜. 2002年我国沙尘暴的若干特征分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14 (5): 513-521.
- [14] 宋敏红, 钱正安, 蔡英, 等. 中蒙强、弱沙尘暴年春季平均环流及沙尘活动变化分析. 应用气象学报, 2007, 65 (1): 94-103.
- [15] 刘景涛, 郑明倩. 华北北部黑风暴的气候学特征[J]. 气象, 1996, 24 (2): 39-44.
- [16] 尤莉, 王革丽, 吴学宏, 等. 内蒙古阿拉善地区沙尘暴气候特征分析. 高原气象, 2004, 23(3): 382-386.
- [17] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展. 地球物理学报, 2006, 49(1): 83-92.
- [18] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽, 等. 中国沙尘暴的气候特征及其异常分析. 高原气象, 2003, 22 (4): 337-345.
- [19] Mandakh N, Khaulenbek A. Research activities of dust storm in Mongolia: Transportation process of dust storm and its temporal-spatial distribution in Gobi. International Workshop on Dust Storm(IWDUST, 2002). Beijing on Oct. 31 to Nov. 2, 2002.
- [20] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近47年中国沙尘暴和扬沙天气. 第二次全国沙尘暴学术会议. 兰州, 2001年2月23-25日.
- [21] 刘景涛, 郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征. 高原气象, 2003, 22 (1):

- 51-64.
- [22] Helgren,D.M., Prospero J.M.Wind velocities associated with dust deflation events in the western Sahara, *Journal of Applied Meteorology*, 1987, 26,1147-1151.
- [23] Takemi, T. 'Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China', *Mon. Wea. Rev.*, 1999, 127, 1301-1309.
- [24] Pauley, P.M., Baker, N.L. and Barker,E.H. 'An observational study of the "interstate 5" dust storm case', *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996,77, 693-719.
- [25] 瞿章等. "930505" 沙尘暴的若干启示. *干旱区地理*, 1994, 17(1): 63-67.
- [26] Carlson T N, Benjamin S G, Radiative heating rates for Saharan dust, *J. Atmos. Sci.* 1980, 37: 193-213.
- [27] Carlson T N, Prospero J .M, The large-scale movement of Sahalan air outbreak over the northern equatorial Atlantic, *J. Appl.Meteo.*1972, 11 :283-297.
- [28] Legrand,M.et al Satellite Detection of Saharan Dust, Optimized Imaging during Nighttime. *Journal of Climate* , 1988,1(3): 2392-2420
- [29] 申绍华, 陈受钧. 沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟. *气象学报*, 1993, 51(3): 283-294.
- [30] 申绍华, 陈受钧. 沙尘辐射强迫的锋生过程分析. *气象学报*, 1993, 51(4): 425-433.
- [31] 郑新江, 刘诚, 崔小平, 等. 沙尘暴天气的云图特征分析. *气象*, 1995, 21 (2): 27-31.
- [32] 徐希慧. 塔里木盆地沙尘暴的卫星云图分析与研究. *中国沙尘暴研究*. 气象出版社, 1997 年, 88-91.
- [33] 王自发. 我国和东亚地区硫化物和黄沙输送研究 (博士论文). 中国科学院大气物理研究所, 北京, 1997. 1-170
- [34] 钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化. *地球科学进展*, 1999,14 (4) 391-394.
- [35] 杨东贞, 颜鹏, 徐祥德. 北京风沙天气的气溶胶特征[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(T): 185-194.
- [36] Wang Z, H Ueda, M Huang.A deflation model for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, *J Geophy Res*,2000,105(D22): 26947-26960
- [37] 程从兰, 王迎春, 刘伟东, 等. 与动力场相耦合的区域沙尘分档模式及个例模拟. *科学通报*, 2004, 46 (19): 2007-2013.
- [38] 赵琳娜, 沙尘 (暴) 发生发展的机理及起沙机制的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文1-170.
- [39] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2002年3月20日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟. *干旱区资源与环境*. 2004, 18 (1): 72-80.
- [40] 赵翠光, 刘还珠. 我国北方沙尘暴发生的环流形势分析. *应用气象学报*, 2004, 15 (2): 245-250.
- [41] Brazel A J, Nicking W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona [J]. *J Climatol*, 1986, 6(3): 255-275.
- [42] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线—黑风暴形成的一个机理分析. *高原气象*, 1996, 15 (2): 178-185.
- [43] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统类型分析. *高原气象*, 2004, 23 (4): 540-548.
- [44] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. *天气学原理和方法*. 北京: 气象出版社, 2007. 122-134.
- [45] 王炯, 等. *内蒙古自治区天气预报手册 (上册)*. 北京: 气象出版社, 1987. 30-80.
- [46] *沙尘天气年鉴2002年*[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 1-78.

- [47] 刘景涛, 郑新江, 康玲. 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究. 气候与环境研究, 2003, 8(2): 218-229.
- [48] 赵琳娜, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 722-734.
- [49] 赵琳娜, 赵思雄. 引发北方沙尘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.
- [50] 赵志刚, 赵琳娜, 矫梅燕, 等. 一次引发沙尘天气的快速发展蒙古气旋的诊断分析. 气象. 2007, 33(5): 27-35.
- [51] 姜学恭. 一例蒙古气旋强烈发展及其导致强沙尘暴过程的成因分析: [硕士论文]. 北京: 北京大学物理学院大气科学系, 2004, 1-71.
- [52] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛等. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究. 气象学报, 2003, 61(5): 606-620
- [53] 姜学恭, 郝璐, 李彰俊, 等. 2001年4月6-8日特强沙尘暴过程的观测和诊断分析. 沙尘暴形成及下垫面对其影响研究. 北京: 气象出版社, 2009.11-22.
- [54] 孟雪峰, 云静波, 哈斯, 等. 浅析内蒙古中西部一次沙尘暴预报过程. 内蒙古气象. 2007年第一期: 12-14.
- [55] 李小龙, 方宗义. 2006年两次影响北京的沙尘天气对比分析. 气候与环境研究. 2007, 12(5): 320-328.
- [56] 张连霞, 梁凤娟, 高玲, 等. 2006年河套地区一次灾害天气过程诊断分析. 气候与环境学报. 2007, 23(2): 11-14.
- [57] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 1-8.
- [58] 薛建军, 刘月巍, 牛若芸, 等. 2002年3月18日-22日强沙尘暴过程分析[J]. 气象, 2004, 30(9): 39-44.
- [59] 肖贤俊, 刘还珠, 宋振鑫, 等. 2002年3月19日沙尘暴爆发条件分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(1): 1-9.
- [60] 张小玲, 李青春, 谢璞, 等. 近年来北京沙尘天气特征及成因分析. 中国沙漠, 2005, 25(3): 417-421.
- [61] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛, 等. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究. 气象学报, 2003, 61(5): 606-620.
- [62] 李彰俊, 孙照渤, 姜学恭. 蒙古气旋天气过程中的沙尘传输特征. 沙尘暴形成及下垫面对其影响研究. 北京: 气象出版社, 2009.23-29.
- [63] 李彰俊, 姜学恭, 郝璐. 沙尘暴形成及下垫面对其影响研究. 北京: 气象出版社, 2009. 23-30.
- [64] 姜学恭, 沈建国. 内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 702-711.
- [65] 姜学恭, 郝璐, 李彰俊, 等. 2001年4月6-8日特强沙尘暴过程的观测和诊断分析. 沙尘暴形成及下垫面对其影响研究. 北京: 气象出版社, 2009.23-29.
- [66] 王锡稳, 刘治国, 黄玉霞, 等. 河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析[J]. 气象, 2006, 23(7): 102-109.
- [67] 李振军, 赵思雄. 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究I. 东亚春季强冷锋结构. 大气科学. 1996, 6(20): 602-672.
- [68] 仇永炎. 在一种寒潮情况下的水平温度场及锋面构造, 气象学报, 1997, 28, 13-26.

## 附录一

附录一：2001-2010 年间冷锋型沙尘过程的统计列表。

日期	持续 天数	系统 强度	最大 风速	沙尘范围	移动 方向	沙尘暴 站数	能见度 <200 米的 站数	最小 能见度
20010112	1	1037.5	20	青海东南部、甘肃南部、宁夏、内蒙古西部	SE	1	0	0.7
20010125	2	1037.5	26	西藏中北部、青海西南部	E	5	0	0.4
20010128	1	1050	16	蒙古、内蒙古中部偏北	SE	5	0	0.8
20010214	1	1047.5	12	甘肃中部、内蒙古西部、宁夏	E	3	0	0.7
20010302	2	1052.5	16	甘肃南部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部、北京、河南、湖北南部	E	17	0	0.8
20010305	2	1050	18	甘肃、宁夏、青海、山西北部、陕西北部、内蒙古中西部、河北北部、北京、山东、河南、安徽、朝鲜半岛	SE	40	1	0.2
20010310	1	1030	10	甘肃中部、宁夏、内蒙古西部 内蒙古中西部、北京、陕西、山西中部、南部、河北	SE	0	0	8
20010313	2	1045	16	南部、河南、山东、湖北北部、蒙古、新疆南部、甘肃北部	SE	18	0	0.4
20010316	1	1035	14	甘肃北部、中部、内蒙古西部	SE	0	0	5
20010321	2	1025	18	蒙古、内蒙古中部、西部偏东、宁夏、陕西、山西、河北、北京	E	16	3	0.1
20010324	1	1037.5	16	甘肃中部、内蒙古中西部、宁夏、陕西北部、中部、山西北部、中部、河北北部、北京	SE	12	0	0.6
20010403	2	1035	16	新疆南部、甘肃北部、中部、青海、内蒙古中西部偏北地区、河北北部	E	12	1	0.1
20010408	2	1042.5	16	新疆南部、甘肃、青海北部、中部、内蒙古中西部、宁夏	E	29	12	0
20010412	2	1030	16	甘肃北部、中部、新疆南部、内蒙古西部	E	4	0	0.4
20010419	1	1030	12	甘肃北部、中部、内蒙古西部、河北南部、陕西南部	SE	3	0	0.4
20010421	1	1030	16	青海北部、甘肃中部、北部、蒙古、新疆南部	SE	3	0	0.6
20010428	1	1032.5	18	新疆中部、南部、甘肃、青海北部、中部、内蒙古西部	E	19	4	0.1
20010507	1	1017.5	18	蒙古南部、内蒙古中西部	E	4	0	0.9
20010521	1	1022	12	新疆南部、甘肃北部	E	3	0	0.3

南京信息工程大学硕士学位论文

20020207	1	1042	14	内蒙古西部、宁夏、陕西北部	SE	1	0	0.8
20020209	2	1042	16	甘肃中部、内蒙古西部、宁夏东部、陕西北部、山西、河南、安徽	E	5	0	0.8
20020306	1	1045	16	阿拉善盟、甘肃中部、宁夏	SE	0	0	6
20020316	1	1032.5	12	锡林郭勒盟、通辽、河北北部、北京	SE	4	0	0.3
20020328	2	1025	16	甘肃、宁夏、内蒙古西部、陕西、山西北部	ESE	18	0	0.3
20020414	2	1047.5	22	蒙古、甘肃中部、南部、内蒙古西部、中部、东部偏南、宁夏、陕西、山西、河北北部、北京、天津	E	20	1	0.2
20020419	1	1047.5	16	蒙古、内蒙古西部、中部	E	3	0	0.8
20020420	1	1035	16	蒙古、内蒙古东部偏南	E	11	0	0.3
20020421	2	1040	16	新疆南部、青海北部、甘肃、内蒙古西部、宁夏	SE	9	1	0.2
20020515	2	1020	24	新疆南部、甘肃北部、青海北部	E	7	1	0.2
20020518	1	1027.5	10	新疆南部	E	4	0	0.4
20030310	1	1035	12	甘肃南部、宁夏、阿拉善盟南部	SE	0	0	5
20030408	2	1035	28	新疆中部、南部、甘肃北部、青海、宁夏、内蒙古西部	SE	27	5	0
20030411	1	1022.5	18	宁夏、内蒙古中部、西部	E	9	0	0.4
20030416	2	1042.5	28	新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙古西部	SE	17	3	0.1
20030428	1	1030	16	甘肃、宁夏北部、内蒙古西部	E	8	0	0.6
20030504	1	1020	16	甘肃中部、内蒙古西部、蒙古、宁夏北部	SE	4	0	0.6
20030507	1	1025	14	辽宁西部、吉林西北部	SE	0	0	2
20030511	2	1025	10	新疆南部、甘肃北部、青海北部	SE	6	0	0.3
20040203	2	1048	14	甘肃北部、中部、内蒙古西部、宁夏、陕西南部	SE	3	0	0.5
20040302	1	1045	16	甘肃中部、南部、青海东部、宁夏北部、内蒙古西部偏南地区	SE	10	1	0.2
20040315	2	1052	16	蒙古、甘肃中部、南部、内蒙古中西部、宁夏、陕西北部、河南中北部、山西南部	SE	7	0	1
20040328	2	1040	14	蒙古、内蒙古西部、甘肃北部、宁夏南部、山西北部、陕西北部、河北、北京、天津、辽宁西北部	SE	19	0	0.3
20040330	2	1020	20	甘肃北部、青海东南部、内蒙古西部、宁夏	ESE	14	0	0.4
20040428	1	1027.5	16	甘肃中部、宁夏、内蒙古西部、中部	SE	11	0	0.8
20040517	1	1015	14	内蒙古西部偏南、宁夏	SE	4	0	0.7
20040520	2	1017.5	16	南疆盆地	SE	5	1	0.1
20050315	2	1030	20	蒙古、内蒙古中西部	E	3	0	0.5
20050408	2	1037.5	16	蒙古、甘肃中部、内蒙古中西部、锡林郭勒盟、赤峰北部、宁夏、陕西西北部	E	9	0	0.6
20050427	1	1017.5	16	蒙古、内蒙古中部、东部偏南(锡赤通)、吉林西部、辽宁北部、山西北部	E	32	3	0
20050430	1	1027.5	14	蒙古、内蒙古西部偏北、甘肃中部	SE	0	0	4

## 附录一

20050504	1	1027	16	蒙古、内蒙古西部、中部偏北、宁夏	SE	1	0	1
20050510	1	1015	20	蒙古、内蒙古中部、西部偏东(巴盟东部、包头)、山西北部、河北北部	SE	8	0	0.3
20060310	2	1057.5	16	内蒙古西部、甘肃中部、宁夏、陕北、山西、河北、山东东部	SE	56	3	0.1
20060316	2	1037.5	16	甘肃北部、中部、青海北部、东部、内蒙古西部、中部、锡、赤、通、蒙古、河北北部	SE	4	0	0.7
20060321	1	1035	14	阿盟东南-锡盟	E	2	0	0.6
20060324	2	1030	20	蒙古、阿-赤峰、河北北部、北京、天津	SE	6	0	0.6
20060327	1	1031	16	内蒙古西部偏南、宁夏、陕西北部、山西、河北、北京、山东北部、河南北部	SE	14	0	0.6
20060331	1	1025	16	甘肃中部、南部、青海东南部、宁夏、内蒙古西部、陕西北部	SE	19	0	0.3
20060409	3	1040	32	新疆中部、南部、青海北部、东部、甘肃、宁夏、内蒙古西部、中部偏南、陕西、山西北部、河北北部、辽宁	SE	116	17	0
20060417	2	1022.5	16	甘肃北部、宁夏北部、东部、内蒙古(除赤通呼兴)、陕西北部、山西、河北北部、北京、蒙古	SE	28	0	0.3
20060421	1	1030	14	内蒙古中部、东部偏南(赤通)、西部偏南、宁夏东部、陕西西部、山西北部、河北北部、北京、蒙古	SE	21	1	0.2
20060422	2	1025	16	蒙古、内蒙古中部偏东(锡)、东部偏南(赤)、河北北部、北京	SE	17	0	0.3
20060510	2	1047.5	22	新疆南部、东部、甘肃、青海、内蒙古西部、中部、东北部、宁夏、陕西北部、中部、山西、河北西部、辽宁	SE	109	12	0
20060513	1	1037.5	16	内蒙古中部、蒙古东部	E	10	1	0.2
20060519	1	1020	12	内蒙古西部、蒙古、宁夏东部	SE	3	0	1
20070125	2	1062	18	青海北部、甘肃北部、中部、内蒙古西部、宁夏、陕西北部	E	10	0	0.3
20070326	1	1020	18	锡林郭勒盟、赤峰市西部	E	5	0	1
20070327	2	1017.5	18	青海东部、甘肃、内蒙古西部、宁夏、陕西北部	E	15	1	0.2
20070331	1	1042.5	16	内蒙古大部(除阿拉善盟、兴安盟)、辽宁、山西中部、北部、河北北部、蒙古	SE	34	1	0.1
20070414	2	1030	16	甘肃河西南部、内蒙古西部、宁夏北部、青海西部、陕西	SE	14	0	0.6
20070502	1	1022.5	16	甘肃中部、南部、内蒙古西部、宁夏、陕西北部	ESE	8	0	0.6
20070507	1	1022	12	内蒙古中部、西部偏东、东部偏南、山西北部、辽宁	E	1	0	1
20070509	1	1030	16	新疆南部、青海北部、甘肃北部、内蒙古西部	ESE	16	0	0.4
20070511	2	1030	16	内蒙古西部、中部、东部偏南、宁夏、陕西北部山西	E	6	0	1

北部、蒙古									
20070515	1	1020	16	内蒙古西部、中部、宁夏、陕西北部、山西	SE	8	0	0.4	
20070519	1	1017	16	甘肃北部、内蒙古西部、蒙古	SE	7	0	0.9	
20071229	1	1063	20	内蒙古中部、东部偏南	E	11	0	0.3	
20080211	1	1048	14	兴安盟南部、通辽、辽宁、吉林西部	E	1	0	1	
20080317	2	1035	18	内蒙古大部(除呼盟)、蒙古、宁夏、甘肃北部、陕西北部、山西、河北北部、北京	SE	16	0	0.4	
20080401	2	1027	16	阿拉善盟、鄂尔多斯、宁夏、陕西北部、通辽、兴安盟、辽宁	E	0	0	3	
20080420	2	1040	16	青海东部、甘肃北部、中部、巴盟北部、内蒙古中部偏北、宁夏	SE	3	0	0.5	
20080424	2	1026	10	内蒙古西部(除阿拉善盟)、蒙古、陕西北部、山西、河北南部、山东	SE	4	0	1	
20080426	1	1020	12	内蒙古西部偏南、甘肃中部、宁夏、陕西北部	SE	1	0	1	
20080501	3	1025	18	新疆、青海、甘肃、蒙古、内蒙古西部、锡盟、内蒙古东部偏南(赤通)、宁夏、陕西北部	SE	35	2	0.1	
20080507	2	1020	16	甘肃北部、中部、青海北部、东部、阿拉山盟西部	ESE	5	0	0.1	
20080528	2	1028	16	蒙古、内蒙古西部、中部、宁夏、甘肃南部、山西北部、陕西南部、河北、北京、河南北部、山东	SE	33	0	0.3	
20081207	1	1045	14	甘肃中部、内蒙古西部、宁夏、陕西北部	E	4	0	0.6	
20090218	2	1050	22	青海北部、甘肃中部、蒙古、内蒙古西部、中部、河北北部	E	15	0	0.5	
20090310	1	1043	24	新疆东部、南部、西藏北部	SE	4	1	0.1	
20090314	2	1033	18	甘肃北部、中部、内蒙古西部、宁夏、山西、陕西北部、北京、河北北部、山东北部	SE	12	0	0.3	
20090320	2	1040	16	甘肃中部、内蒙古西部、宁夏、陕西北部、陕西北部、锡林郭勒盟南部	ESE	1	0	0.7	
20090416	2	1023	14	新疆南部、中部、青海北部、甘肃北部、内蒙古西部	E	17	5	0	
20090419	1	1029	16	内蒙古西部、蒙古、宁夏、甘肃中部、陕西北部	ESE	7	0	0.9	
20090423	2	1038	20	甘肃、内蒙古西部-乌盟、宁夏、陕西、山西、河北西北部	E	59	3	0.1	
20090429	2	1032	18	新疆东南部、青海、甘肃北部、内蒙古西部、中部	E	33	2	0.1	
20091017	2	1025	18	甘肃北部、内蒙古西部、中部、宁夏北部、陕西北部、陕西北部、河北	E	21	0	0.7	
20091224	2	1062	20	甘肃北部、内蒙古西部、中部、东部偏南、宁夏北部、山西北部、河北、北京、天津、山东北部	E	41	4	0	
20100308	1	1063	18	新疆南部、青海东部、甘肃中部	SE	3	0	0.4	
20100313	2	1043	16	新疆南部、青海、甘肃中部、内蒙古西部、宁夏、锡林郭勒盟西部、陕西北部、山西北部	E	26	0	0.7	

附录二

20100316	1	1030	18	青海东部、甘肃中部、宁夏南部、阿拉善盟 新疆南部、青海、甘肃北部、中部、内蒙古西部、中	SE	3	0	1
20100319	2	1038	24	部、宁夏、蒙古、陕西、山西、河北、北京、天津、 山东、河南、江苏	E	88	6	0.1
20100321	2	1039	16	新疆南部、青海北部、甘肃中部、内蒙古西部、中部、 宁夏、陕西北部、山西、河北、北京、赤峰市南部	E	13	2	0.1
20100324	1	1032	16	阿拉善盟南部、鄂尔多斯市、宁夏、陕西北部	E	0	0	5
20100328	2	1046	16	新疆南部、甘肃北部、内蒙古西部、宁夏、蒙古	ESE	26	3	0
20100401	1	1035	12	赤峰东部、通辽市、兴安盟、吉林西部、辽宁北部 青海北部、甘肃中部、宁夏南部、鄂尔多斯南部、乌	E	1	0	1
20100409	1	1030	16	兰察布市南部、锡林郭勒盟南部、山西北部、河北北 部	SE	6	0	0.4
20100410	2	1039	20	新疆南部、青海北部	SE	8	3	0
20100424	3	1043	24	新疆东部、南部、甘肃、青海北部、内蒙古西部、宁 夏、陕西、山西南部	SE	33	4	0
20100427	2	1026	18	蒙古、内蒙古西部、甘肃南部、宁夏、陕西北部、山 西南部、赤峰市南部	S	5	0	0.8
20100504	1	1018	14	甘肃中部、宁夏、内蒙古西部	E	0	0	3

附录二

附录二：2001-2010 年间蒙古气旋型沙尘过程的统计列表。

日期	持 续 天 数	系 统 强 度	最 大 风 速	沙 尘 范 围	移 动 方 向	沙 尘 暴 站 数	能 见 度 <200 米 的 站 数	最 小 能 见 度
20010101	1	1006	22	内蒙古中西部、山西北部、河北北部、北京、天津、 蒙古	E	34	5	0
20010130	2	1007	16	蒙古、内蒙古中西部、甘肃、宁夏、山西、陕西	SE	11	0	0.6
20010304	1	1007.5	16	甘肃、内蒙古、蒙古、宁夏陕西、山西、河北北部	E	18	1	0.2
20010312	1	997.5	16	蒙古、内蒙古中西部偏北地区	E	12	0	0.7
20010318	2	989	16	甘肃北部、内蒙古西部、中部、陕西、山西、河北北 部、宁夏	E	6	0	0.6

南京信息工程大学硕士学位论文

20010323	1	998	18	蒙古、内蒙古中西部	SE	9	0	0.3
20010406	2	977	20	蒙古、内蒙古中西部、甘肃中部、山西北部、陕西北部、宁夏、黑龙江西部、吉林、辽宁、河北北部	NE	85	12	0
20010417	2	987.5	18	蒙古、内蒙古除东北地区的大部、辽宁、黑龙江西部、吉林西部	E	8	0	0.3
20010422	1	1002	16	蒙古、甘肃中部、内蒙古西部、中部、东部偏南、宁夏、黑龙江西部、辽宁北部	E	19	0	0.4
20010427	1	987.5	20	蒙古、内蒙古中西部	SE	16	0	0.6
20010429	2	995	16	蒙古、甘肃北部、中部、内蒙古大部、宁夏、陕西、山西、黑龙江西部、吉林、辽宁	NE	31	3	0
20010501	2	991	18	蒙古、甘肃北部、内蒙古中西部、东北偏西、黑龙江西部、吉林西部、辽宁北部	NE	14	0	0.6
20010503	2	988	16	蒙古、内蒙古大部、山西北部、河北北部、北京、黑龙江西部、吉林西部、辽宁北部	NE	31	2	0.1
20010513	2	984	18	蒙古西南部、甘肃中部、内蒙古中西部、赤峰东部、兴安盟、宁夏北部、黑龙江西部、吉林西部、辽宁北部	EN	10	0	0.6
20011211	2	1012	20	甘肃北部、内蒙古西部偏北、中部、东部偏南、河北北部、北京、天津、辽宁东部	E	33	3	0
20020315	1	1005	18	蒙古、乌兰察布市、锡林郭勒盟、赤峰市、山西北部、河北北部、北京	E	23	1	0
20020318	1	1002	14	锡林郭勒盟南部、河北北部、辽宁西部	E	7	0	0.6
20020319	3	988	24	蒙古国、甘肃、宁夏、陕北、内蒙古、山西、河北、北京、黑龙江西部、南部、吉林、辽宁、山东北部、朝鲜半岛	E	108	17	0
20020324	2	992	18	蒙古、内蒙古中部、东部偏南、吉林西部、辽宁北部、黑龙江西部	E	13	1	0.1
20020331	1	992.5	16	蒙古、锡林郭勒盟、赤峰市、兴安盟南部、黑龙江西部	EN	6	1	0.2
20020406	3	989	28	蒙古、宁夏北部、内蒙古西部、中部、东部偏南、陕北、河北、北京、天津、山东、辽宁、吉林、黑龙江南部	E	53	15	0
20030228	1	999	20	呼伦贝尔市、黑龙江西南部、吉林西部、辽宁	E	3	0	0.8
20030410	1	997.5	12	青海、甘肃中部、南部、内蒙古中西部偏北地区	SE	15	0	0.8
20030414	1	984	20	内蒙古中部、辽宁北部、吉林西北部	E	1	0	1
20040212	2	1015	16	甘肃、中部、内蒙古西部、中部偏南、宁夏、陕西北部、山西、河北、河南、北京、山东西部、吉林西部、蒙古	E	19	0	0.7
20040223	1	1012	22	内蒙古西部、中部、蒙古	E	12	0	0.3

## 附录二

20040224	1	1007	20	甘肃中部、内蒙古西部、中部、银川、山西西部、河北北部	ESE	16	0	0.6
20040309	2	980	22	南疆盆地、蒙古、青海北部、甘肃、内蒙古大部、宁夏、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、山东、吉林西部、黑龙江西南部	E	77	4	0.1
20040327	2	995	18	内蒙古大部、蒙古、甘肃北部、宁夏北部、陕西北部、山西北部、河北北部、北京、吉林西部	NE	46	6	0
20040414	2	995	16	蒙古、内蒙古西部偏北、东部、辽宁北部	SE	21	0	0.8
20040505	1	1020	16	内蒙古东部偏南、蒙古东部、辽宁西部	E	2	0	0.8
20040508	1	990	18	内蒙古东南部、黑龙江西部、吉林西北部、辽宁北部	E	13	2	0.2
20040518	1	984	16	锡林郭勒盟、黑龙江西部、吉林西北部、辽宁北部	E	6	1	0.1
20050405	2	985	24	蒙古、内蒙古西部偏北、锡林郭勒盟北部、呼盟西部、辽宁北部局部	E	4	0	0.5
20050413	2	998	16	蒙古、内蒙古东部、东北部、吉林西部、黑龙江西部、辽宁西北部	E	5	0	0.5
20050416	1	1003	14	蒙古、内蒙古西部偏北地区	SE	0	0	2
20050418	3	994	18	蒙古、内蒙古大部、青海东部、甘肃北部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部	NE	10	0	0.4
20050429	1	983	16	蒙古、内蒙古西部偏北、中部、东部偏南、山西北部	NE	8	0	0.3
20050514	2	990	18	内蒙古西部、中部、锡盟、宁夏东部、甘肃中部、蒙古	NE	6	2	0
20050717	1	989	16	甘肃北部、中部、阿拉善盟	SE	14	0	0.3
20051105	2	996	16	蒙古、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、内蒙古中部、东部偏南、山西北部、河北北部、吉林	E	21	0	0.3
20060309	2	997.5	20	蒙古、内蒙古大部、甘肃中部、宁夏、陕北、山西北部、河北、吉林西部、辽宁北部、黑龙江西部、北京、天津	NE	63	9	0
20060326	2	999	18	蒙古、鄂尔多斯-赤峰、河北、北京、天津、辽宁北部、吉林西北部、宁夏东部、陕西北部、山西北部、山东	ESE	42	7	0
20060405	3	995	16	蒙古、甘肃北部、内蒙古(除呼兴)、宁夏东部、陕西北部、河北西北部	E	38	2	0.1
20060408	2	992.5	14	甘肃北部、蒙古、阿-锡、河北北部、北京	E	9	0	0.7
20060416	1	992.5	18	甘肃北部、宁夏东部、陕西北部、内蒙古(除赤通呼兴)、山西北部、蒙古	ENE	47	2	0.2
20060424	2	997.5	16	甘肃中部、内蒙古西部、中部、山西北部	E	12	0	0.6
20060429	2	985	20	甘肃中部、内蒙古(除赤通呼兴)、宁夏、陕西、山西北部、辽宁北部、黑龙江西部、吉林西北部	E	83	11	0
20060505	2	992.5	18	蒙古、内蒙古西部、中部、东北部	NE	29	1	0.1
20060508	3	982.5	16	蒙古、内蒙古西部偏东、中部、河北北部、北京北部	E	17	0	0.7

南京信息工程大学硕士学位论文

20060516	1	992.5	18	甘肃北部、内蒙古西部、中部、宁夏东部、陕西北部、山西北部、河北北部	SE	42	1	0.2
20060529	2	982.5	16	内蒙古中西部、东北偏东、宁夏南部、陕西西部	NE	21	0	0.4
20070221	1	1001	12	内蒙古中西部偏北地区、蒙古	E	0	0	5
20070323	2	990	16	阿拉善盟西南部、锡林郭勒盟西北部、呼伦贝尔市西部、兴安盟、吉林、蒙古	E	5	0	0.3
20070330	1	992.5	22	蒙古、内蒙古大部(除赤通)、宁夏东部、陕西北部、山西北部	E	52	4	0.2
20070419	2	990	18	蒙古、内蒙古西部、中部、东南部、辽宁、甘肃南部、宁夏、陕西、山西	E	16	0	0.7
20070429	2	990	18	内蒙古中、东部、西部偏南、黑龙江、辽宁、宁夏、陕西	E	19	0	1
20070510	1	998	16	蒙古、内蒙古西部、中部、宁夏东部、甘肃中部	E	16	0	0.3
20070523	2	988	20	蒙古、内蒙古西部、中部偏南、甘肃中部、宁夏北部、陕西北部、陕西北部、河北北部、北京	E	20	1	0.2
20070526	1	993	14	蒙古、内蒙古西、中部偏北	E	8	0	1
20071227	2	1012	20	甘肃中部、青海东南部、宁夏、内蒙古西部、中部、山西北部、河北北部、北京	E	28	2	0
20080229	2	1006	16	甘肃中部、内蒙古西部、宁夏、陕西北部、山西	E	19	0	0.3
20080312	1	998	14	内蒙古东北部、蒙古	E	5	0	0.8
20080314	2	996	16	内蒙古大部、蒙古、黑龙江西部、辽宁西北部	E	26	2	0.1
20080428	2	991	12	蒙古、内蒙古西部、中部、黑龙江、辽宁	E	13	0	0.8
20080519	2	992	14	蒙古、巴盟西部、呼和浩特、内蒙古中部、赤峰市、呼盟西部、山西北部、河北北部、北京	SE	29	0	0.3
20080526	2	987	22	蒙古、内蒙古西部偏北、中部、东部(除兴安盟)、山西北部、河北北部、黑龙江西部	E	32	5	0
20090311	2	1005	16	青海、甘肃北部、中部、内蒙古西部、蒙古	ENE	22	0	0.4
20090519	2	981	16	蒙古、兴安盟东部、黑龙江西部、吉林西北部	E	6	0	1
20100311	2	996	18	甘肃中部、内蒙古西部、中部、通辽市、辽宁西部、宁夏、陕西北部、山西	E	31	2	0.1
20100331	1	998	20	蒙古、内蒙古中部、东部、黑龙江西部、吉林西部	NE	25	1	0.2
20100407	2	993	16	内蒙古西部偏北、中部、东部(除呼伦贝尔市)蒙古、河北北部、辽宁、吉林西部、黑龙江西部	E	20	0	0.4
20100506	2	991	20	内蒙古西部、中部偏南、赤峰、河北北部	E	8	0	1
20100508	1	993	20	内蒙古西部、中部、蒙古、陕西北部	E	18	0	0.3

## 致 谢

在论文完成之际,我要衷心感谢我的导师王文副教授,本文是在王老师的悉心指导和严格要求下完成的。从论文的开题立意,中间的论文指导、到最后的耐心细致修改,小到附图说明、引文、参考文献的书写,大到文章结构,王老师倾注了大量心血,王老师严谨的治学态度和工作作风以及宽厚的待人方式使我受益匪浅。

感谢南京信息工程大学提供的宝贵的学习机会!感谢大气科学学院和研究生部的所有老师。感谢我的工作单位内蒙古自治区气象台为我创造的良好工作和学习环境!感谢台领导对我学习的大力支持及无私帮助!

非常感谢内蒙古气象台胡英华高工为我提供相关气象资料,感谢孟雪峰高工和李一平高工在天气学分析中的指导和帮助!感谢宫春宁高工在本文数据处理给予的帮助。感谢杭月荷在论文打印、提交给我的帮助。感谢李林惠在论文排版工作给予的帮助。感谢廊坊市气象局张素云、周贺玲、李茜在论文期间给予的宝贵建议。对他们的辛勤工作表示真诚的谢意。

在此,要特别感谢内蒙古气象台姜学恭正研,从论文开题、论文指导,姜老师都给予了很多宝贵意见,他认真的态度和热情帮助,从附图的绘制、论文的编排、文字的使用,姜老师都给予了耐心的指导。使我懂得了对待科学研究应该具备怎样的一种真诚的态度。

最后也非常感谢家人的理解和支持,使我顺利完成了学业。感谢我的男朋友李哲,在论文期间给予的支持,论文英文摘要及在论文最后排版工作给予的帮助。

在此向所有关心、支持和帮助过我的领导、家人、同学、同事及朋友致以诚挚的谢意!

论文研究过程中得到了国家自然科学基金项目(40965005)和内蒙古自然科学基金项目(2010MS0613)的资助。

云静波

2010年3月10日 于呼和浩特

## 作者简介

云静波，女，蒙古族 1983 年出生，籍贯：内蒙古包头市。

2005 年 7 月毕业于内蒙古科技大学包头师范学院数学系，大学四年间，在兰州大学大气科学学院就大气科学的相关专业课程进行了系统全面的学习。毕业后，在内蒙古气象台工作，从事短期天气预报业务。2010 年 12 月，评为工程师。

2007 年 10 月参加了河北省组办的气象研究生班，在保定学习。硕士课程学习期间成绩优秀，平均成绩在 90 分以上。共修 15 门课程，已修学分为 36 分。期间 2009 年通过学位英语考试。

从参加工作至今，发表文章 8 篇，其中第一作者两篇，《2006 年春季内蒙古一次强沙尘天气分析》，内蒙古气象，2010 年第 4 期；《沙尘天气器测资料与常规观测资料的对比分析》，内蒙古气象，2011 年第一期。

在做硕士毕业论文期间，由于时间紧张，很多东西没有系统的进行分类整理，但在此过程中，深刻的体会到理论知识和实际业务相结合会产生很多有价值的亮点。今后这也将是我努力的方向。

最后，感谢南京信息工程大学及大气科学学院的各位老师及同学，在硕士期间及论文工作期间对我无私的帮助和支持。

云 静 波

2011 年 5 月 8 日 于南京