

中文摘要

沙尘天气是半干旱、干旱和荒漠化地区特有的一种天气现象,是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和某种系统所诱发的一种小概率、危害大的灾害性天气。由于沙尘天气给人民生命财产造成严重损失,而且破坏自然生态环境,加速土地荒漠化的进程。我国北方特别是西北地区属于全球现代沙尘天气的高活动区之一,因此,了解沙尘天气过程并做好预报仍然是一个需要解决的重大科学问题。

在介绍了宁夏沙尘暴天气气候背景的基础上,利用常规观测资料,对 2001 年 4 月以及 2005 年 4 月发生在宁夏地区的沙尘暴过程进行了分析、比较,得到如下结论:(1) 沙尘暴发生前后,地面气象要素有很明显的变化。午后地面增温最强,大气层结不稳定性显著增大,有利于高空动量下传产生大风,为沙尘天气的发生提供了动力和热力条件;(2) 地形的阻挡作用对冷锋和沙尘暴的移动有较大的影响;(3) 高空横槽与强锋区是激发这次沙尘暴的重要动力机制,高空急流区的形成是产生大风、沙尘暴天气的必要条件,蒙古气旋和地面冷锋是造成这次沙尘暴的主要影响天气系统。分析结果表明,两次沙尘暴天气过程除了天气形势背景不同之外,冷空气路径以及动力和热力条件都基本相同。05 年 4 月发生的沙尘暴天气是西西伯利亚强冷空气迅速东移,在新疆北部上空形成强锋区,对应的地面冷锋东移形成了本次沙尘暴天气。高空切变提供了动力条件,低层强辐合上升运动和大气热力不稳定性激发了沙尘暴的形成。

对 2005 年 4 月发生的这次沙尘暴天气过程进行了诊断分析,发现:中、低空温度槽落后于高度槽的这种斜压结构,将使该冷槽加深。槽前暖平流和 850 百帕的小低压对沙尘暴的发生有明显的指示意义。在流场上高低空之间有强烈的切变,切变发生在 500 百帕与 700 百帕之间。低空强辐合和高空强辐散与深厚正涡度柱的耦合,是沙尘暴生成和发展的一种典型结构。垂直速度一般在中空达最大。低空相当位温锋区明显,低层存在不稳定的热力条件。沙尘暴区上空螺旋度垂直分布分为高层负值,低层正值。构成了低空强辐合,高空强辐散的深厚上升运动区,这样螺旋度垂直分布是十分有利于沙尘暴发展的一种形式。K 指数分析表明,宁夏附近大气层结还是比较稳定,空气比较干燥。

关键词: 沙尘暴 螺旋度 诊断分析

Abstract

The sand-dust weather, unique to semi-arid, arid and desertification areas, formed in specific geographical environment and under underlying surface conditions, is a kind of a small possibility, disastrous weather induced by the particular background of the large-scale circulation and certain a system. It creates heavy losses to the people, causes great harm to the natural ecological environment and speeds up land desertification process. Northern China, especially the northwestern region belongs to one of the global modern sand dust weather high active areas. Therefore, understanding of the sand-dust weather and accurate weather forecasting is still a major scientific problem needed to solve.

On the basis of introducing the Ningxia sand-dust storm weather climate background foundation, the sand-dust storm process was analyzed and compared by using the normal observation data of the dust storm which occurred on April, 2001 and 2005 in Ningxia. The result shows that (1) Pre- and post- sandstorm, the ground meteorological elements changed greatly, Atmospheric instability significantly increased because of strongest temperature build-up post meridiem, is conducive to high gale under the upper air momentum transportation downward, which provides the dynamic and thermal conditions for the dust weather. (2) Terrain blocking has greater impact on the cold front and the movement of sandstorms. (3) The upper air horizontal and the strong frontal zone are important power mechanism to stimulates this sand-dust storm, the upper air jet stream area formation is essential condition which produces the gale, the sand-dust storm weather, the Mongolian cyclone and the ground cold front is the major effect weather system which creates this sand-dust storm. The analysis result indicated that, two sand-dust storm weather process besides synoptic situation background different, the cold air ways, as well as the dynamic and thermal conditions are basically the same. The sand-dust storm weather formed by the cold air from the western Siberian moves rapidly eastward and forms strong frontal zone over the northern Xinjiang, which corresponding surface cold front moves to such special underlying surface. Upper jet stream was the favorable power condition,

the strong ascending motion at low-level and thermal instability induced the sandstorm.

The diagnostic of the sand-dust storm process was analyzed which occurred on April, 2005, found: medium- and low-altitude troughs falling behind the high trough formed this kind of slanting pressure structure, which would deepen this cold trough. The warm advection in front of the trough and 850hPa small-low pressure had a clear indication of the sand-dust storm occurrence. The high and low altitude intense shear on the flow field happened between 500hPa and 700hPa. Strong low-level convergence and height-level divergence coupled with the deep vorticity column is a typical structure which the sand-dust storm generation and development. Vertical velocity generally hollow greatest. The low altitude equivalent potential temperature layer front frontal zone is obvious, the low-level existence unstable thermal energy condition. The distribution of helicity over the sandstorm area was negative at higher levels and positive at lower levels, This vertical distribution of helicity is very conducive to form the development of the sand-dust storms. The K-index analysis indicated that, the atmospheric stratification nearby Ningxia is still relatively stable, the air relatively dry.

Key words: Sand-dust storm; helicity; Diagnosis analysis

原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 李明强 日 期： 2007.5.29

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名：胡明波 导师签名：王 日期：2007.5.29

第一章 引言

1.1 沙尘暴研究意义及概述

沙尘天气是半干旱、干旱和荒漠化地区特有的一种天气现象，是在特定的地理环境和下垫面条件下，由特定的大尺度环流背景和某种系统所诱发的一种小概率、危害大的灾害性天气。我国北方特别是西北地区属于全球现代沙尘天气的高活动区之一。春季是冷暖空气活动频繁的过渡季节。一般情况下，当高空处在急流带里，中层又有快速移动的冷性低压槽，地面有冷锋存在时，由于冷锋后面冷空气的下沉，动量下传使锋后地面风速加大；冷锋后出现较大的正变压中心，所产生的变压风亦加强了地面风；而一些独特的地形还会产生“绕流”或“狭管效应”，使风力不断加强。同时在低压槽的前部一般有来自相对低纬度的相对暖湿气流，这里天空晴朗，地面太阳辐射强度较强，出现正变温区，而对流层中部有时存在负变温，造成大气不稳定（有利于动量下传，加强地面风；热力扰动也有利于将地面沙尘卷入空中）。因此，因气候异常而造成的势力强盛或频繁的冷空气活动及持续干暖的气候背景等均可对沙尘暴的活动产生明显的影响。

在气象学上，沙尘天气可分为沙尘暴、扬沙和浮尘三类。它们是既有联系又有区别的三种沙尘天气，它们虽都与风沙有关，但其形成情况、强度和危害程度却不相同。气象学中明确规定，沙尘暴是指强风把地面大量沙粒和尘埃卷入近地气层内所形成的携裹大量沙尘的风暴，使空气特别混浊，水平能见度低于 1KM 的一种灾害性天气，当其达到最大强度（瞬时最大风速 $\geq 25\text{m/s}$ ，能见度 $< 50\text{m}$ ，甚至降到 0m）时，破坏力极大，俗称分黑风暴或“黑风”^[1]。扬尘常为本地起沙现象，多发生在地面附近，主要是指由于大风把地面的尘沙等吹起，使空气相当混浊，水平能见度在 1~10KM 的天气现象。浮尘是尘土细粒均匀的浮游在空气中的现象，多为远处沙尘随高度强风输送而来或为当地沙尘暴之后尚未下沉的细粒浮游空中所致，浮尘出现时，垂直能见度较差，水平能见度 $< 10\text{KM}$ 。扬尘和浮尘仍属于轻度沙尘天气，因其风速不够强，空气中的含沙量还不够大，对地面能见度的影响比较小。

沙尘暴的直接危害往往是在很短的瞬间里，由静风或小风，突然转为 10m/s

以上的大风，狂风突起，将大量沙尘卷入空中、水平能见度急剧减小。往往造成户外活动的人畜伤亡。与沙尘暴相伴的大风本身就具有强大的破坏力，导致一些工业和民用建筑受损或破坏，如造成房屋倒塌，通讯和电力线、杆被刮断、吹倒等等。

沙尘天气还引发众多的次生灾害：附着在农作物叶面上的尘土直接减弱植物的光合作用和呼吸作用，严重阻碍作物的生长；邻近沙漠地区的农田被流沙掩埋，甚至农作物连苗带土一起被吹走；浮尘对于精密机械、精密化工、航空交通等设施，都有着严重的破坏性影响；沙尘加速了机械设备运转部件的磨损；沙尘暴天气引起的“风沙电”经常干扰通讯及控制设备；“电晕”现象也可造成严重的人身伤亡及设备事故。铁路如遭到流沙掩埋，可造成交通中断甚至发生列车出轨事故。沙尘天气还导致大范围的空气质量严重恶化，损害人身健康^[2,3,4]。

由于沙尘天气给人民生命财产造成严重损失，而且破坏自然生态环境，加速了土地荒漠化的进程。因此，了解和预报沙尘天气的发生已成为一个迫切需要解决的重大科学问题。

1.2 沙尘天气研究现状

近年来，沙尘天气特别是沙尘暴因其强度大、危害性大而备受关注，许多学者致力于这方面的研究。在世界范围内，沙尘暴主要发生在沙漠及其邻近的干旱、半干旱地区，有中亚、北美、中非及澳大利亚四大沙尘暴区，我国西北地区属于中亚沙尘暴区的一部分，属于全球现代沙尘暴的高活动区之一^[2]。

早在 20 世纪 20 年代起国外就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策等方面的研究。其中，Thomas^[5]分析了亚洲沙尘暴的空间分布特征和印度、中国、撒哈拉、拉赫尔、中东和苏联沙尘暴的季节变化特征及其沙尘暴频数变化和降水、气温、风速的关系，并指出中国沙尘暴主要出现在塔里木盆地和准格尔盆地。Sutton^[6]首先研究了北非苏丹喀土穆地区黑风的若干特征，后来 Idso^[7]报道了美国亚利桑那州西南部强沙尘暴的特征，Brazle^[8]进一步总结了该州多年来产生沙尘暴的四类天气形势。Wheaton^[9]等分析了加拿大草原区域沙尘暴的时空分布特征。Jauregui^[10]系统研究了墨西哥城沙尘暴的时空分布。

相对来说，我国对沙尘研究的起步较晚，始于 20 世纪 70 年代^[1]。不少学者

[11-15]通过对我国沙尘天气过程个例的总结,得出沙尘天气的发生具有大尺度、中尺度能量相互制约、互相转换的特点以及中尺度的天气特点。进一步研究结果表明,我国沙尘天气发生的频数和强度与其气候背景密切相关,张德二^[16]、黄兆华等^[17]曾利用我国历史上降尘(尘暴)记载进行统计分析,表明降尘频数与温度和湿度变化呈负相关关系,即尘暴频发期大致对应于气候干冷期,减弱期对应于气候暖湿期。石广玉等^[18]指出 20 世纪 70 年代及以前气候处于干冷期,是我国北方大部分地区沙尘暴频发期。在以往对我国北方沙尘天气的时空分布特征及其气候成因的研究中,多是针对小区域沙尘暴而言的。而且多是挑选出本区域沙尘暴比较集中的典型代表站来进行分析,如苟日多杰^[19]利用柴达木盆地 11 个气象站 40 年的沙尘暴资料和 21 年 40 次春季沙尘暴个例分析,总结了柴达木盆地沙尘暴天气的时空分布特征:年内以春季出现最多,40 年总的变化呈下降趋势,而强沙尘暴的出现呈增多趋势,空间分布呈鞍形场;并总结了有利于沙尘暴发生的四种环流形势的风向、风速、温度、气压等要素的预报指标。李林等^[20]利用青海省 41 个台站 40 年的沙尘暴日数、大风日数和干燥度资料,指出青海省 40 年的沙尘暴日数呈减少趋势,年内以春季沙尘暴居多,尤以 3 月份最多,在省内西部及东北部有两个高值中心;并指明大风和干燥度是造成沙尘暴天气的两个重要因素,大风与沙尘暴日数呈显著的正相关关系,同时,干燥度的增大易引发沙尘暴时间的发生。尚可政等^[21]研究了赤道太平洋海温与河西沙尘暴发生次数之间的遥相关关系,表明春季河西沙尘暴次数与前两年秋、冬季海温因子存在好的负相关;而夏季河西沙尘暴次数与前两年春、夏季海温因子负相关最好。李海英等^[22]研究表明,当内蒙古中西部春季降水偏少,冷空气活动频繁时,沙尘暴发生频数次多;前冬副高偏强、偏大时,次年春季沙尘暴发生频数次少,两者存在显著的反相关关系;前期南方涛动处于正位相时,春季沙尘暴偏多,否者相反。顾卫等^[23]利用 NOAA/ANHRR 的植被指数 NDVI 数据分析了内蒙古中西部的沙尘暴日数在 80 年代和 90 年代与植被覆盖率的负相关关系。此外,对小区域沙尘暴的研究还主要集中在民勤沙区、怀来盆地、吐鲁番盆地、塔里木盆地、敦煌、河西走廊、宁夏盐池等地区。

近年来,为提高对我国北方沙尘天气的整体认识,不少学者扩大了研究范围和研究对象。王式功等^[24]和全林生等^[25]研究了我国沙尘暴天气的时空分布特征、

形成原因和发展趋势。胡金明等^[26]分别分析了我国沙尘暴高频区的空间分布。李栋梁等^[27]指出青藏高原地面加热场强度和我国北方沙尘天气总日数两者是隔年反相应关系,即当前一年青藏高原地面加热场强度异常偏强时,次年我国北方大部分地区的沙尘天气就偏少;而当前一年青藏高原地面加热场强度异常偏弱时,次年我国北方大部分地区的沙尘天气就偏多。张平等^[28]通过对沙尘天气与11个物理量场的相关分析,进一步证实了风是影响沙尘天气特别是扬尘和沙尘暴发生的最主要的气象因素。王式功等人^[29]利用我国338个站1954年—200年47年的资料,详细分析了三类沙尘天气的空间分布特征及气候特征,并在对沙尘暴发生的时间和日数上进行聚类分析的基础上,结合气候区划的分布特点,将全国沙尘暴天气易发区分为7个亚区,指出在南疆区沙尘暴和浮尘发生最多,而在河西区扬沙发生最多,扬沙可向东北和东南方向扩展,而浮尘主要向东南方向扩展。史培军等^[30],叶笃正等^[31]分析了我国北方地区沙尘源区的分布规律和成因,指出了沙尘暴的发生、发展是下垫面地形地貌、水文、土壤、植被等多种环境因素相互作用、长期发展的结果,并提出了相应的对策。

因沙尘暴的较强危害性,故在沙尘天气的预报方法研究上多是针对沙尘暴而言的。孙军等^[32]根据我国西北地区沙尘暴发生的主要因子和天气学特征,建立了天气学概念模型,并利用MM5模式,设计了沙尘暴的数值预报办法,得出当摩擦速度一般大于0.19M/S和大气边界层为不稳定时有利于沙尘暴的产生的结论。赵光平等^[33]应用对宁夏强沙尘暴有实际预报能力的综合指标和组合模型,应用螺旋度修正方案确定沙尘暴落区,建立了宁夏强沙尘暴天气监测和预报系统。

1.2.1 沙尘暴天气成因的研究

夏训城^[34],钱正安^[35]等指出,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,它的大小决定着空气中沙尘数量、粒径大小、沙尘影响的高度和范围。每年冬春季中国北方的寒潮是这种条件最重要的表现;二是地面上的沙尘物质,它是沙尘暴的物质基础,沙源来自沙漠、退化的森林草地或没有植被覆盖的干松土地以及城乡建筑工地的泥沙。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,又如前苏联50年代在哈萨克和西伯利亚等地区盲目大量开垦荒地,使地表裸露的沙尘物质增多,导致强沙

尘暴频繁发生，这都是明显的例证；三是不稳定的空气状态，这是重要的局地热力条件。沙尘暴多发生在午后至傍晚时段内，就充分说明了大气不稳定状态的重要性。沙尘暴，尤其是特强沙尘暴的发生发展是大、中、小各种尺度的天气系统相互作用与特定下垫面条件有机结合的结果。

我国北方的地理环境。大风、沙尘天气的发生、发展离不开丰富的沙尘源。我国北方与蒙古国境内戈壁沙漠众多，总面积达数百万平方公里的沙漠戈壁为沙尘暴天气的发生提供了大量的沙尘源。此外在全球气候变化的影响下，我国北方地区干旱和暖冬现象日益严重，加之不合理的人为活动干扰(过度农垦、放牧、滥伐以及水资源利用不当，工厂交通建设中不注意环境保护等)，造成了大面积植被的破坏，加剧了水土流失、土壤沙化、土壤次生盐渍化和土壤物理性质的恶化。我国北方土地荒漠化越来越严重，因此地表覆盖状况急剧恶化。而强沙尘暴灾害的频繁发生又与土地荒漠化的加速蔓延和扩展密切相关。

气候年代和年际变化。近40年来的气象记录表明，我国北方春季大风日数的增减与沙尘暴日数的增减是一致的。研究表明大风日数的增减是气候年代际和年际变化的反映，每年冬春季寒潮大风的出现与冬季风的强度有关，东亚季风有明显的10~50年尺度的变化，亚洲冬季风与厄尔尼诺事件有密切关系，在厄尔尼诺年东亚冬季风强度弱，而在反厄尔尼诺年东亚冬季风势力强。

沙尘暴发生与前期的气候背景及下垫面有密切关系。徐建芬^[36]等指出前期持续增温为沙尘暴的发生提供了有利的热力条件。杨民^[37]等指出春季我国北方干旱少雨，气温回升迅速且温度偏高，使解冻的地表土层疏松，又提供了丰富的沙尘源，一遇大风，浮土就会随风而起，形成浮尘、扬沙甚至沙尘暴。沙尘天气的出现与大尺度环流形势密切相关。对于中国而言，在500h Pa高空环流形势图上，亚洲东部沿海地区是一稳定的深槽区，亚洲西部是一个稳定的高压脊，中国北方正处于脊前槽后的西北气流下，这股强劲的西北气流将俄罗斯新地岛附近的寒冷空气源源不断地向东南方向输送，这是中国北方出现沙尘天气时典型的高空环流形势。地面西北风与蒙古国高空较强的西北气流带相配合，这些都有利于沙尘向东南方向的输送。随着高空和地面系统的东移，输送带也逐渐东移。在多次出现的沙尘暴过程中，乌拉尔山高压脊和蒙古低槽的配置形势是一种典型的环流形势，这期间的强气压梯度是沙尘暴的动力源。另外高空急流的振荡合并导致对

流层中、下层锋区加强和大气层结不稳定,为沙尘暴天气的产生提供了有利环流背景^[38]。加之高空急流动量的下传,是沙尘暴天气发生的环流背景和动能基础^[39]。

冷锋活动及影响系统。许多研究认为^[40,41],导致沙尘暴的天气系统一般为:高空有一较深的西风槽,槽后有强冷中心;地面有一庞大的冷高压,高压前有气旋强烈发展。与沙尘暴关联的气旋有蒙古气旋、东北气旋和黄河气旋。沙尘暴出现在冷锋后至冷高压中心之间得大片区域。王锡稳^[42]对2000年4月12日天气过程进行了分析和研究。分析结果表明,这次强沙尘暴的触发系统主要是冷锋过境。徐建芬^[43]等在“我国西北地区4.5沙尘暴天气研究”一文中指出蒙古高压与热低压相互作用是激发东风沙尘暴的重要天气系统。王式功^[24]对1993年5月5日研究中指出不同地区大风开始时间和地面冷锋的移动位置一致,冷锋活动是造成大范围大风沙尘暴的主要天气系统,冷锋过境前后会产生很强的变压梯度,变压风是产生沙尘暴区瞬时大风的主要因素。高原低涡的发展导致河西走廊低空急流的形成,是河西走廊发生大范围黑风暴的重要条件。强冷空气迅速南下,形成显著的水平气压和温度梯度所造成的偏差风,是形成这次大风沙尘暴的重要原因^[44]。

沙尘暴是由一些中尺度强对流系统形成和发展而造成的。项续康,江吉喜^[45]利用GMS静止气象卫星红外资料,对我国西北地区1990年以来爆发的6次强沙尘暴天气的成因做了中尺度分析。结果表明,强沙尘暴是由一些中尺度强对流系统形成和发展而造成的。它们包括:中- α 尺度飚线系统,中- β 尺度强对流系统和
中尺度对流复合体。前二者是锋前晴空干热区内形成的干飚线,而后者是由一系列与中尺度对流复合体相关联的飚线造成的。江吉喜^[46]对1993年5月5日的黑风进行卫星云图分析表明,这场特大的沙尘暴主要由中尺度对流系统(MCS)及其伴随的飚线造成的。中尺度辐合切变线是造成94.4沙尘暴直接的中尺度的天气系统。

其他物理量。沙尘暴产生在上升运动区域和正涡度中心附近。低值系统有正涡度中心支持,外围是负涡度区,其间有强涡度梯度带。低值中心伴随有低层辐合高层辐散的垂直结构,易于发生近地面大风和上升气流,有利于地面起沙上扬,形成沙尘暴。大风区与强涡度梯度带一致,强风速切变形成的涡度输送有利于加强低值系统,进而增强风场^[47]。张玉林^[48]诊断分析认为:在极有利的大尺度环

境、高空干冷急流和强垂直风速、风向切变及强热力不稳定层结条件下，引起锋区前后的巨大压、温梯度。在动量下传和梯度偏差风及高空强大下击暴流的共同作用下，使近地层风速陡升，掀起地表沙尘，形成强沙尘暴天气。

1.2.2 沙尘天气的数值模拟研究

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

申绍华，陈受钧^[49,50]分别利用二维和三维数值模式研究了沙尘暴爆发时，沙尘辐射强迫的锋生过程和孤立的沙尘暴辐射效应对锋面环流的影响，结果表明：沙尘暴爆发时，沙尘的辐射强迫对天气系统的影响是非常重要的。白天，沙尘辐射加热在大气低层导致锋生，产生很强的上升运动。由于沙尘的持续加热，使大气中出现层结不稳定，最终在大气层中形成一等熵混合层。沿锋面移动方向的水平速度表现出明显的辐散（辐合）特征。垂直于锋面方向的高空急流减弱，低空急流加强。晚上，沙尘的辐射冷却导致大气低层锋消，垂直速度场主要为下沉运动，水平速度场也发生相应的变化。

孤立的沙尘暴辐射加热（冷却）在盛行的大尺度风方向强迫出一个明显的垂直环流圈，它位于大约 1KM 以上的高度。白天，这个垂直环流圈非常深厚，上升支较强，下沉支较弱。晚上，垂直环流反向，变薄。在沙尘区周围有明显的水平速度切变存在，它增加湍流的水平交换及辐合。水平风场对沙尘辐射的响应在不同高度上是不同的。程麟生^[51]和惠小英^[52]等分别对我国西北“93.5”黑风暴发展成因与沙尘输送进行了数值模拟，结果表明：二维数值模式模拟出了沙尘的抬升及水平输送，三维数值模式模拟出了沙尘的水平分布和垂直分布，对冷锋前后的低压和高压脊的模拟效果也较好。程麟生^[53]等还利用改进的 MM4 和高分辨率行星边界层参数化及 40KM 细网格控制实验能基本上模拟出“93.5”黑风暴的结构和演变。模拟结果表明，黑风暴发展时段，在行星边界层内与一个中尺度气旋性强涡旋相伴，在对流层内与一个垂直涡柱相伴，这个伸展至对流层顶的涡柱下（上）半部是与低（高）空强烈辐合（辐散）入（外）流相伴的气旋（反气旋）性涡柱。该黑风暴结构不同于一般锋面结构，其主要差别是：界面坡度陡， θ_1 水平梯度大，斜压性强，PBL 内暖心明显。该暖心结构与下垫面剧烈热力强迫有关。

不同 PBL 参数化方案对改进黑风暴发展结构及其演变的模拟是十分必要的。

宋振鑫^[54]利用“93.5”黑风暴中尺度数值模拟资料,根据湿斜压大气的湿扰动能量方程,对“93.5”黑风暴发展过程中有效位能和湿扰动能源的贡献进行了数值诊断分析,结果表明,湿扰动有效位能在 PBL 内的巨量释放是该期间黑风暴迅速发展的主要能源。该能源的产生不仅与湿斜压大气中风的强垂直切变有关,而且也与 PBL 那下垫面的强烈加热增温及强对流不稳定有关,湿扰动有效位能源在 PBL 以上迅速减小;扰动能源在黑风暴区基本为负,即为能汇。张小玲^[55]等使用具有高分辨 PBL 参数化的 MM4 模式对“93.5”黑风暴天气过程中中尺度涡旋发生发展的涡源进行了诊断分析。诊断结果表明:“93.5”黑风暴的发展与一个中尺度气旋性涡旋的发生和发展直接相关:总涡源的产生,发展及柱状垂直结构的形成和演变与黑风暴中尺度涡旋发展的涡度垂直结构和演变是一致的。该结果揭示,此类中尺度涡旋急剧发展的动力机制主要受控于总涡源;对大气总涡源的区分结果表明,与强波扰气流有关的扰动涡源对总涡源的贡献最大;大中尺度系统间非线性相互作用涡源的贡献次之;与地形强迫相关的时间平均涡源贡献最小。陈伟民^[56]等利用改进型 PSU/NCAR 中尺度模式(MM4 标准版),以常规观测资料作为初始场,较好的模拟出了 1994 年 4 月 5-11 日西北地区大范围的浮尘和沙尘暴天气过程中海平面气压的演变和分布,特别是张掖,柴达木盆地和敦煌附近的三个中尺度地压。同时模拟出了张掖中低压与蒙古冷高压之间的甘肃河西大风。敏感性试验表明,沙尘基中低压的形成与发展主要是受大气中干物理过程制约,热力,动力过程及特殊地形的外源强迫等也起重要作用。

1.3 本文工作

首先介绍了宁夏沙尘暴天气的一些特点，在此基础上，利用常规观测资料，对 2001 年 4 月以及 2005 年 4 月发生在宁夏地区的沙尘暴过程进行分析、比较，并对 05 年 4 月发生的这次沙尘暴天气过程进行了诊断分析，从而得到沙尘暴发生的原因，这将有助于人们对沙尘暴的发生发展有进一步的了解，进而对预报沙尘暴提供一定的物理依据。

本文的主要内容：

1. 宁夏沙尘暴天气的一些特点；
2. 两次沙尘天气过程的分析；
3. 物理量的诊断分析；
4. 总结与讨论。

第二章 宁夏沙尘暴天气的一些特点

宁夏地处黄土高原西北部边缘,境内地势南高北低,地表侵蚀严重。其上游甘肃河西、内蒙古一带沙漠纵横。西部有腾格里沙漠,西北部有巴丹吉林和乌兰布和沙漠,加上特殊的地理、地貌条件,每逢春季几乎都会有较强沙尘暴天气影响本区^[57]。

风沙是春季严重的灾害性天气之一,由于沙尘暴天气来势迅猛、影响范围大,尤其对农林业、畜牧业、电力、通讯有着极大危害。如1993年5月5日横扫我国西北地区110万 km^2 、72个市县、1200万人口的一次强沙尘暴天气,仅宁夏就有100多人人员伤亡,2万多头牲畜死亡、丢失,3173万 hm^2 农作物受灾,8万多株树木被折断或连根拔起,1300多根电线杆被刮倒或刮断,217亿元财产顷刻间化为乌有,受灾人口达70多万(据政府有关部门统计结果^[58])。从气象资料分析中得出,类似1993年“5.5”强沙尘暴天气过程,20世纪80年代宁夏出现过3次,而随着西北地区生态环境的进一步恶化和干旱的加重,进入90年代后期,沙尘暴天气的发生频率也有增加的趋势。截至2004年4月6日,出现沙尘天气就有9次之多。根据我国的发展战略目标,开发西部将是重要的组成部分,随着宁夏经济实力的增强,同样强度的一次强沙尘暴天气带来的经济损失绝对值将会大大增加。同时,它的频繁发生也极大地影响了我国西部多民族地区的社会安定与经济发展^[59]。

近年来,宁夏在沙尘暴天气研究过程中取得了一定的进展。后利用宁夏及周边地区的沙尘暴资料、北极海冰、极涡强度和面积指数、西风环流指数、海温等资料开展了强沙尘暴天气气候背景、主要影响系统发生演变、移动路径及与之对应的风暴时空分布特征以及不同下垫面、天气条件下的强沙尘暴成灾规律和机理的研究^[60-61];开展了沙尘暴发生过程中主要气象要素变化特征及其成因的分析研究;对中北部沙尘暴多发区和关键区盐池、同心、中宁、中卫、银川、陶乐、惠农等地生态退化、土地荒漠化与强沙尘暴间的相互关系及其时空特征进行了研究,取得了阶段性进展^[62-64]。在前期研究的基础上,利用多源资料及相关科研成果,建立了适合中北部地区气候特征的沙尘暴发生频率量化模型;开展了沙尘暴短期气候趋势预测方法研究及预报业务系统建立工作。

2.1 沙尘暴天气的时空分布及演变趋势^[65]

2.1.1 空间分布

宁夏沙尘暴分布范围广,影响面积大。各站由于地形地貌的差异,沙尘暴发生次数具有不同的分布特点。中北部地区发生机率较大,南部六盘山区发生机率相对较小。两个沙尘暴多发区,分别位于中部的盐池、同心、海原一带和北部引黄灌区。其中,位于干旱半干旱荒漠化草原地带的盐池县,其地表以细微颗粒沙质土为主,是沙尘暴年发生次数最多的区域(18.5d);其次是处于沙漠化狭管内的同心县,年均出现沙尘暴 11.5d;第三是位于贺兰山及桌子山风口西南方的陶乐县,其东北方向是沙漠地带,年均出现沙尘暴次数为 11.2d;而年均大风天气发生次数最多、风力强劲的惠农站(年均 52.6d),其上游以砾质戈壁为主,沙尘暴天气却相对较少,年均 6.8d。通过其他相关分析,沙尘暴出现较少的是固原南部山区,贺兰山和六盘山出现次数最少。春季 3~5 月中,盐池县出现日数最多,平均每年 10.7d,其次是同心县,平均每年 6d,再次是陶乐,平均每年 5.7d;六盘山区的泾源和隆德站出现日数最少,平均每年仅为 0.7d 和 0.4d^[65]。

2.1.2 季节分布

宁夏一年四季均会出现沙尘暴。1960—2000 年出现全区性或局地性沙尘暴天气共计 4608 站次,其中春季(3~5 月)发生次数最多,占总次数的 56%,冬季(12 月至翌年 2 月)次之,达 25%,夏季(9~11 月)较少,为 14%,秋季最少,仅占 5%。全年沙尘暴天气以春季 4 月最多,占总次数的 24%,秋季的 9 月、10 月最少,分别为 0.8%和 1%^[65]。

2.1.3 年际和年代际变化

将宁夏 18 个站 1960—2000 年的沙尘暴发生次数进行标准化处理后分别按春季 3~5 月和全年求和,从图(图略)上可以看到,近 41a 春季和全年沙尘暴发生次数总体都呈下降趋势。沙尘暴天气主要发生在 20 世纪 60 年代至 80 年代中期,1984 年之前大部分年份沙尘暴发生次数大于 41a 的平均值,而 1984 年以后,全部小于平均值。春季和全年沙尘暴的年际变化非常一致,相关系数高达 0.90。春季沙尘暴发生次数 41a 的平均值为 73 次,1984 之前平均为 95 次,1984 年之后仅为 38 次,前者是后者的 2.5 倍。5 a 滑动平均线更明确的表示了这种年代际变

化特点^[65]。

2.1.4 周期及突变

采用最大熵谱对宁夏春季沙尘暴出现日数的周期特征进行分析^[66]，得出春季沙尘暴有 3.8 a 的周期变化。同时，通过对沙尘暴年际变化序列的突变分析可知，春季和全年沙尘暴发生次数均在 1984 年左右发生了明显的突变，1984 年之前是多发时期，1984 年之后处于少发时期^[65]。

2.2 沙尘暴天气环流类型、主要影响系统和移动路径^[65]

通过对近 30a 沙尘暴天气过程个例分析表明：

(1) 产生宁夏沙尘暴的天气形势背景分 3 种类型：一为槽脊东移型，是产生沙尘暴天气的主要环流型，即强冷空气东移型，占总个例的 54.5%，且区域性沙尘暴天气多在此型下发生；二为西北气流型；三为涡型，后两种类型分别占总个例的 36.4%和 9.1%，一般只产生局地性较弱沙尘暴天气^[67]。

(2) 造成沙尘暴的主要影响系统有冷锋过境大风、动量下传大风和热低压梯度大风 3 种类型。但 3~5 月出现强沙尘暴天气时往往同时存在这 3 种因素共同作用。近 30a，宁夏区域性较强沙尘暴过程的主要影响系统基本均为东移冷锋。这说明造成较强沙尘暴天气的主导天气系统是冷锋。而穿越锋面的次级环流是促使锋前气流强烈上升、锋后动量下传加大的主要中尺度系统，它是产生近地层梯度偏差风、动量下传大风的主导因素之一，同时也是区别一般强度沙尘暴和特强沙尘暴天气的主要天气系统。

(3) 造成沙尘暴天气的冷空气路径有 4 条：第一条为西北偏北，冷空气偏北移到 29 区后，转向东南下，经蒙古人民共和国西部，甘肃河西东部然后影响宁夏。第二条为西方路径，冷空气主力经巴尔喀什湖，我国新疆、甘肃，自西向东影响宁夏。第三条为西北路径，冷空气到西伯利亚后，经我国新疆、内蒙古西部、甘肃河西影响宁夏。第四条为北方路径，冷空气自贝加尔湖向西南，然后经蒙古从我国河套一带南下侵入宁夏。其中，影响宁夏沙尘暴天气冷空气路径最多的是西北路径，占总个例的 63.6%；其次是西北偏北路径，占 22.7%；北方路径占 9.1%；最少的是西方路径仅占 4.6%；分析得出影响宁夏的特大强沙尘暴和强沙尘暴天气的强冷空气主要取道于乌鲁木齐-哈密-野马街-酒泉-贺兰山西侧这一沙漠通道上，而当强冷空气急行东南下时，地面冷高压不断发展、加强，锋区附近压、温

梯度持续加大和整体东移是产生特大强沙尘暴和强沙尘暴天气的必要条件。

2.3 气候因素对沙尘暴频率的影响^[65]

通过对局地气候因素与沙尘暴关系的研究表明：宁夏中北部地区风向对沙尘暴天气的发生具有重要影响，从西到北之间的五个风向下发生沙尘暴天气的次数占沙尘暴天气总次数的 70%以上；在同一沙尘暴天气过程中最大风速对沙尘暴天气过程中，不同代表站沙尘暴天气的持续时间与地形、地貌及地理环境的关系最密切，其次是与最大风速的关系；但同一代表站在不同的沙气的持续时间影响最大。

从沙尘暴发生期间风速与强度间的关系可看出：特强沙尘暴一般是在大尺度天气过程中出现的比例较大，属西北气流型，影响区域广泛，起沙源地多，空中沙尘粒子浓度较高；而强沙尘暴虽然系统性过程比例也较多，但中尺度强锋线型也占一定比例，这种天气虽然风速最大，但起沙源地比前者少，空中沙尘粒子浓度较前者低，造成沙尘暴强度不及前者。其次，从沙尘暴持续时间可以看出，特强沙尘暴平均持续 14h，强沙尘暴可持续 12h，中沙尘暴平均持续 9.5h，而弱沙尘暴仅持续 3.5h。

土壤湿润度对沙尘暴频率的影响。一年中土壤湿润度与沙尘暴频率的月际变化基本上是反位相的，夏秋季节（8月、9月）土壤湿润度最大，对应沙尘暴的发生频率最低；冬春季节（12月至翌年5月）是一年中土壤湿润度最低的时期，对应春季沙尘暴频率最高，冬季尽管土壤湿润度低，但由于冬季温度较低，从前一年12月至翌年2月各站月平均气温均在-3~-9℃之间。由于气温偏低往往造成地表土壤冻结，从而使风蚀和沙尘暴发生的可能性大为降低。因此是否可以说，温度的变化也是造成沙尘暴频率月际变化的一个重要原因。

地面温差与沙尘暴频率的月际变化规律基本上是一致的，在地面温差为正值的月份，沙尘暴频率相对较高；地面温差为负值的月份，沙尘暴频率相对较低。从2月份开始地面温差为正值，此时地面开冻融化，随着地表温度上升速度的加快，地面极易形成强烈的热力不稳定条件，在降水极少的情况下，使得裸露的沙土结构逐渐变得松散，当地面风速达到一定程度，就很容易引起沙尘暴，这种状况一直延续到4月份，温差达到最大对应的沙尘暴频率也达到最大。5月以后随着地表温差的下降，地面的热力不稳定也有所缓和，对应的沙尘暴频率也明显下

降秋季 10 月份沙尘暴频率最小,地面温差 11 月份最低,两者之间有 1 个月的位相落后关系。因此我们认为,月平均地面温差是决定地表热力状况及沙尘暴频率的又一重要因素。

综合考虑气候因素对沙尘暴频率月际变化的影响。宁夏中北部地区秋季以后降水量急剧减少,土壤湿润度 12 月至翌年 1 月达到最小,春季 3~5 月份降水量仍相对较少,干旱频繁,气温回升快,地面温差大,这一时期植物一般尚未开始萌发生长,地表覆盖率低下,无法为土壤提供有效保护,同时也正是春季开始耕种的季节,土地耕种清除了地表仅存的植被,并破坏土壤覆被结构,将深层细微土壤颗粒暴露于地表;另外,从大的环流形势来看,春季正处于环流调整时期,平均风速及大风日数均为一年中最多^[68]。所有这一切因素,决定了春季往往是宁夏中北部地区沙尘暴发生最为频繁的季节,尤其在 4~5 月份,同时也说明最小土壤湿润度对最大沙尘暴频率的影响可以持续 3~4 个月,而最大平均风速和地面温差对沙尘暴频率的影响是同步的;进入夏季以后,随着降水的增多,土壤湿润程度不断提高,同时风力减弱,植被覆盖率增大,沙尘暴的发生频率也随之降低,往往在 9~10 月份降至最低,此时平均风速及地面温差比较小,对沙尘暴频率的影响也较小。进入冬季后,降水渐少,植被覆盖率也逐渐降低,沙尘暴频率略有增加,由于冰冻温度对地表的冻结作用,在一定程度上减少了沙尘暴的发生。

第三章 沙尘暴个例分析

本文就选取了 2001 年 4 月以及 2005 年 4 月发生在宁夏的沙尘暴个例作为研究对象。

3.1 2001 年 4 月发生在宁夏的沙尘天气过程^[69]。

3.1.1 天气过程

3.1.1.1 过程概述

概括地说,这是一次集大风、降雪、降温、沙尘暴于一体的典型寒潮天气过程。2001 年 4 月 8 日白天到夜间,受新疆附近较强冷空气快速东移南下的影响,宁夏全区出现了当年最强的一次沙尘暴天气,部分地区出现了强沙尘暴。宁夏石嘴山、吴忠及固原三市的局部地区最大瞬时风力 9 级左右,惠农 11 级。大风过后气温骤降,宁夏全区各站日平均气温普降了 10~12℃。伴随降温,8 日夜间至 9 日上午宁夏大部还出现了小到中雪天气,南部山区局部地区降了大雪,其中,沙尘暴主要出现在 8 日下午至傍晚前后^[69]。

地面气象观测规范规定:沙尘暴是由于强风将地面大量尘沙吹起,使空气相当混浊,水平能见度小于 1km 的天气现象。2001 年 4 月 8 日 08:00 到 9 日 08:00 宁夏各站最大瞬时风速及出现时间、最大平均风速、最低能见度、沙尘暴发生时间、各站降水量见表 1^[69]。

表 1 2001 年 4 月 8—9 日宁夏各站部分气象要素情况^[69]

序号	站名	最大瞬时 风速 $m\ s^{-1}$	最大瞬时风 速出现时间	最大平均 风速 $m\ s^{-1}$	最低 能见 度 m	沙尘暴发生时 间	24h 降水 量 mm
1	石炭井	15.0	19:20	9.6	2000		
2	惠农	30.6	18:59	21.6	200	13:33—02:08	
3	大武口	17.9	18:36	10.6	300	13:27—02:17	
4	平罗	16.9	18:42	7.6	200	13:35—23:31	0.0

5	陶乐	24.8	17:30	15.0	200	16:02—0:26	0.3
6	贺兰	13.3	15:09	8.7	300	14:22—16:08	4.9
7	银川	16.3	14:14	9.9	300	13:55—16:17	2.4
8	永宁	15.0	12:58	11.1	900	13:08—18:40	6.4
9	灵武	19.2	13:44	14.1	600	13:39—15:43	2.5
10	青铜峡	25.0	13:34	15.7	300	12:23—22:43	2.5
11	吴忠	20.8	12:35	13.8	300	13:36—22:10	0.4
12	盐池	21.3	17:05	12.6	300	09:04—12:36; 14:06—18:31	5.4
13	韦州	23.1	15:46	15.6	300	12:58—20:55	2.5
14	中卫	21.9	10:57	16.0	600	10:44—22:37	0.6
15	中宁	24.8	11:26	14.1	600	11:38—20:21	3.0
16	麻黄山	24.0	19:53	19.0	0	14:22—21:37	7.2
17	同心	19.8	18:14	11.5	400	12:34—20:45	7.8
18	兴仁	20.4	19:16	15.2	800	12:51—20:26	1.9
19	海原	19.4	13:18	13.5	400	15:06—20:00	5.4
20	固原	16.7	19:13	9.3	700	16:03—20:25	4.8
21	西吉	17.7	18:32	10.6	600	17:28—20:45	3.1
22	六盘山	15.0	23:00	10.7	8000		9.5
23	隆德	17.1	12:39	9.6	3000		7.7
24	泾源	23.1	19:57	14.5	2000		4.8

注: 1)降水时段为 8 日 20:00 到 9 日 20:00;

2)盐池沙尘暴分两个时段, 其中前一时段为锋前增温偏南风引起, 后一时段为锋后强冷空气引起。

由表 1 可见, 这次过程的最大瞬时风速于 8 日 18:59 出现在惠农, 达 $30.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 17 个站的平均风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或瞬时风速超过 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到

大风标准。出现沙尘暴的 20 个站中,有 13 个站的能见度降到 400m 以下,其中,麻黄山最低能见度为 0^[69]。

3.1.1.2 沙尘暴发生前后气象要素的变化情况

宁夏北部的银川和南部的固原是国家基准站,可对诸多气象要素进行逐时观测,所以选取这两个站的气压、气温、相对湿度、能见度进行分析。由图(图略)上可见,沙尘暴发生前,气温上升,气压降低,相对湿度下降,风力逐渐增大;在 8 日 13:00 和 15:00,冷锋开始逼近银川和固原,气压、相对湿度降到这一天中的谷底,而气温上升至当日最高,风速大增,冷锋携带和大风卷起的沙尘使能见度急剧降低,形成沙尘暴^[69]。

3.1.1.3 沙尘暴天气风速时空分布特征

强冷空气活动时,与巨大气压梯度相伴随的大风是其最为显著的特征之一,能够很好地反映出强冷空气的运动情况。宁夏北部和中部风速普遍较大,南部风速略小。最大风速于 18:00 出现在惠农,达 $20.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 19:00 为 $20.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。20:00 在麻黄山出现了 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。从时间分布上看,较大风速首先出现在宁夏最北部的石炭井和中部的中宁,在 07:00 和 09:00 风速分别达到 8.4 和 $11.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。主要原因在于:一方面中宁的位置相对略为偏西;另一方面,两站分别位于宁夏北部贺兰山的南、北两个山口,由于地形阻挡作用^[70],冷空气无法直接翻越贺兰山,而从两端的山口灌入,因狭管效应造成风速大增,从而使该两站最先遭受大风的袭击。冷空气从贺兰山南、北两端绕过后,最终在背风面(东侧)的中段会合,所以该处的平罗、陶乐、贺兰等站大风出现时间相对较迟。

从风速地理区域分布上可以看出,冷空气主要影响了兴仁以北的宁夏北部和中部地区,宁夏南部的冷空气活动与北部相比略为偏弱。结合表 1,可以看到最南端的 3 站未出现沙尘暴,且南部各站的能见度总体情况较北部稍好^[69]。

3.1.2 沙尘暴天气成因

3.1.2.1 气候背景

2000 年冬季(2000 年 12 月—2001 年 2 月),宁夏全区气温异常偏高,气温距平在 $2.0 \sim 3.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,大部分站平均气温达历史最高值或次高值,是自 1987—1999 年连续 13a 偏暖后的又一个暖冬。宁夏中北部降水异常偏少,春季仍然维持这种情况。冬、春季持续高温、缺少降水造成土壤含水率低,土壤解冻的时

间比往年提前。无明显雪盖,加速了土壤水分的蒸发,大面积地表土层干燥、疏松;再加上拉尼娜年东亚季风偏强,北方地区多大风天气,为沙尘暴天气的发生提供了有利的气候背景^[69]。

3.1.2.2 天气背景

高空横槽和强锋区

过程初期,500hPa天气图(图略)上亚洲环流为两槽两脊形势,乌拉尔山以西、贝加尔湖到蒙古各为一暖脊,西西伯利亚为高空冷槽控制。东亚槽较偏东,主要冷空气来自新地岛附近。6日,新地岛以北的冷气团南下,在西西伯利亚堆积,形成一个东北—西南向的横槽。7日乌拉尔山西部高压脊发展东移,环流经向度增大,脊前偏北风加强,冷空气在西西伯利亚横槽内聚集。08:00,横槽底部分裂小槽东移,槽前正涡度平流促使槽的东南方产生负变高,中亚地区高度场降低;20:00,高空锋区加强南压,进入新疆北部,在蒙古国中部形成一较强高空冷涡,冷中心强度达 -41°C 。8日08:00,高空冷涡继续加深并南下至北疆附近,锋区南压到新疆东部至河西西部,温度槽落后于高度槽,槽前温度场与高度场的交角增大。对应700hPa天气图(图略)上,内蒙古到新疆中部也有一冷低涡槽,冷中心为 -25°C ,新疆到河西为 $24\sim 28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风带;河套及其以东有明显的暖舌向北伸展至贝加尔湖,冷暖中心之间温度等值线非常密集,温度场与高度场近于垂直分布,形成强力管。强冷空气翻越天山,灌入南疆盆地,在东移过程中使青海、甘肃河西、宁夏、陕西等地出现了大风、沙尘暴、强降温(寒潮)天气。8日20:00,高原东侧转为西南气流,河套地区湿度增大,银川以南为高湿区。受东移冷空气与偏南暖湿气流共同影响,河套地区自南向北出现降雪天气^[69]。

地面冷锋和蒙古气旋

过程前期,新地岛以北的冷空气沿乌拉尔山脊南下,西西伯利亚冷高压形成并东移,地面冷锋位于巴尔喀什湖附近。7日08:00,冷高压东移加强,地面冷锋移至新疆西北部。冷锋前后,气压梯度加大。14:00,冷高压中心在国境线附近加强,其前部冷锋东移南下进入北疆。20:00,冷锋翻越天山移至蒙古及新疆一带,锋后气压梯度非常大,沿天山形成地形等压线,锋后伴有区域性大风、沙尘暴、降水及明显的降温天气。此时在蒙古国境内有一气旋形成,中心气压为999hPa。8日08:00,蒙古气旋发展东移,河套处于“热倒槽”中,开始升温降

压。同时,锋面也已移过河西走廊,逼近河套,冷锋前后气压梯度加大,锋后3 h 变压最大为 6.5 hPa,银川与酒泉温差高达 14 ℃。14:00 至 20:00,冷锋快速移过河套,宁夏开始出现大风、沙尘(沙尘暴)天气。8 日夜間,气旋及冷锋减弱东移,沙尘暴天气结束,气温骤降,宁夏自南向北出现降雪^[69]。

3.2 2005 年 4 月发生在宁夏的沙尘天气实况。

2005 年 4 月 8 日白天到夜里,银川、石嘴山、吴忠、中卫四市大部出现 7 级左右偏北风,并伴有扬沙天气。其中,大武口最大瞬时风力达 9 级,盐池、大武口、青铜峡出现沙尘暴;固原市降了小雨或雪,吴忠、石嘴山两市的局部地区降了小阵雨。9 日清晨固原市的大部及盐池、海原的最低气温达 -6℃左右,其他地区最低气温在 -1℃到 -3℃。现将 2005 年 4 月 8 日 20 时到 9 日 20 时全区各站最大瞬时风速统计如下:

表 2 2005 年 4 月 8—9 日 20 时全区各站最大瞬时风速。(单位: M/S)

石炭井	大武口	惠农	平罗	陶乐
	24	22	22	
贺兰	银川	永宁	吴忠	青铜峡
			18	21
灵武	中卫	中宁	盐池	麻黄山
		17		23
同心	韦州	兴仁	海原	固原
21	19	17		
西吉	六盘山	隆德	泾源	彭阳
	23		18	17

另此次沙尘天气不仅仅只有大风出现,还伴随着雨或雪的降水过程,现将 2005 年 4 月 8 日 20 时到 9 日 20 时全区降水实况统计如下:

表 3 2005 年 4 月 8—9 日 20 时全区降水。(单位: MM)

固原	西吉	六盘山	隆德	泾源	彭阳	盐池	麻黄山	石炭井	大武口
0.3	0.0	1.7	5.7	2.7	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0

3.2.1 温压场配置特征

从4月6日20时的温压场配置分布图(图 1.2.5.8)上可以看出:在200百帕天气图(图 1)上温压场配置基本为三冷两高,新西伯利亚以及我国东北部为暖中心,我国北方部分地区处于冷中心,还有一个冷中心在 55°E , 52°N ,处于高空槽后。500百帕天气图(图 2)和700百帕天气图(图 11)冷中心位于巴尔喀什湖上方,位于巴尔喀什湖附近的温度槽均落后于相应的高度槽,说明高度槽将加强发展。850百帕天气图(图 8)青海,甘肃,宁夏大部分地区受低压控制,标志着地面将有气旋发展。另外在陕西,山西,河南交界处有一暖中心,温度值为 25°C 。

7日20时500百帕天气图(图 3)上,随着系统规律东移,巴尔喀什湖低槽东移至新疆北部,由于贝湖脊阻挡作用,西西伯利亚附近南下冷空气在新疆上方堆积加强,形成深厚的高空冷槽和强锋区,冷中心达 -40°C ;对应700百帕天气图(图 6)上,巴尔喀什湖也有一冷低压槽,锋区进一步加强,进入新疆北部,冷中心有 -20°C 。8日20时500百帕天气图(图 4)上,主体冷空气向东,冷槽移至贝加尔湖下方;对应700百帕天气图(图 7),冷中心也移至贝加尔湖,温度场与高度场交角几成垂直分布,形成强力管。

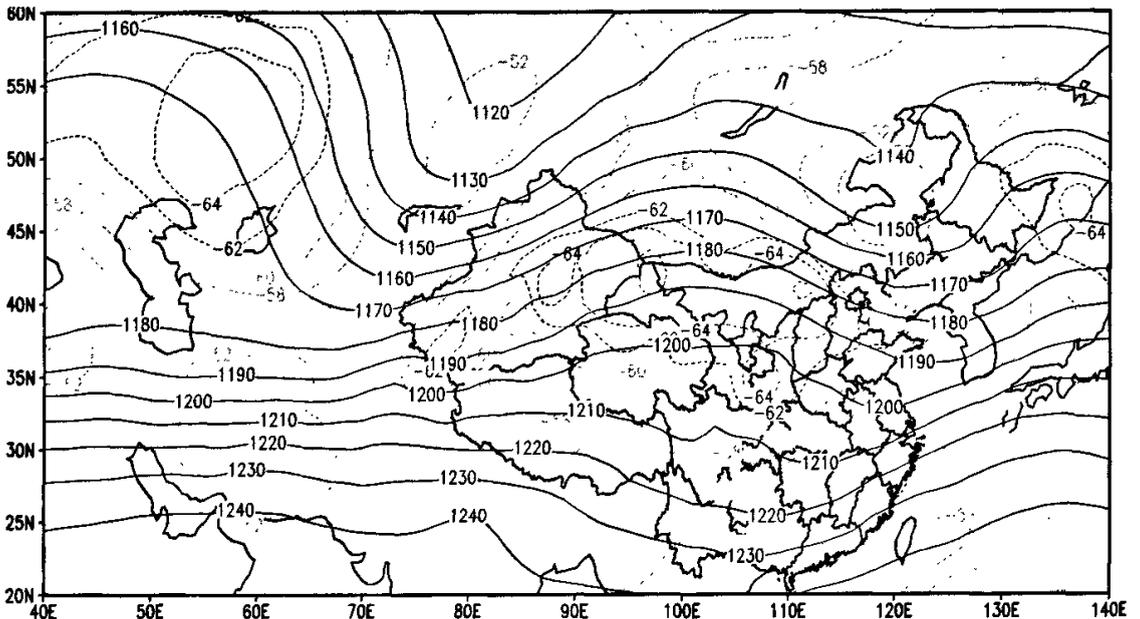


图1 4月6日20时200hpa温压场配置

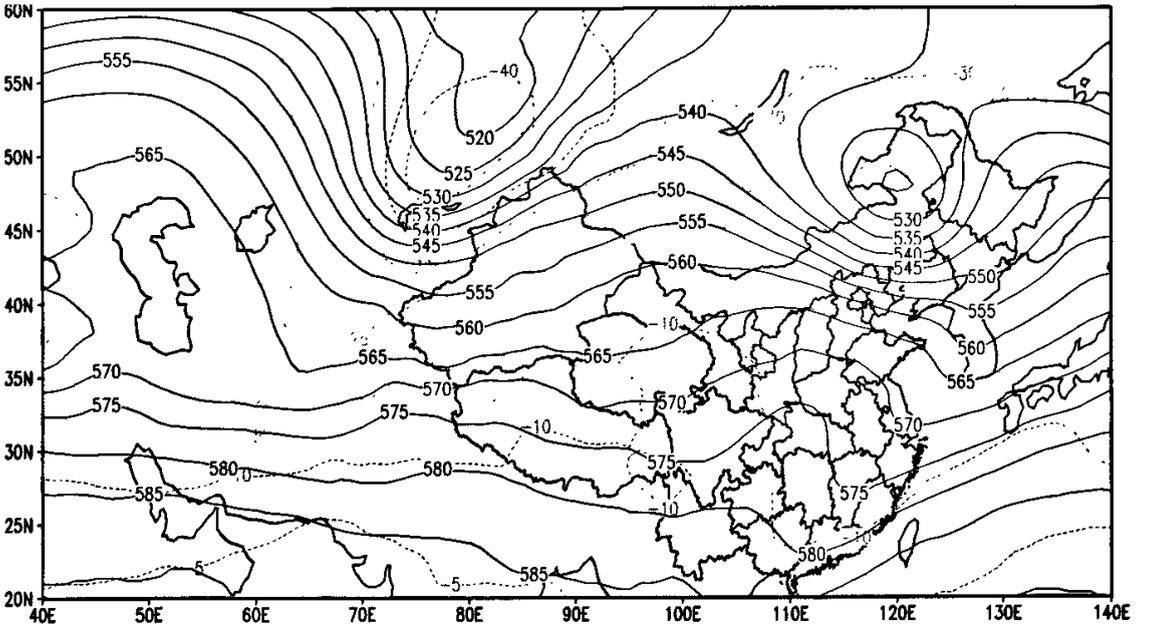


图 2 4月6日20时500hpa温压场配置

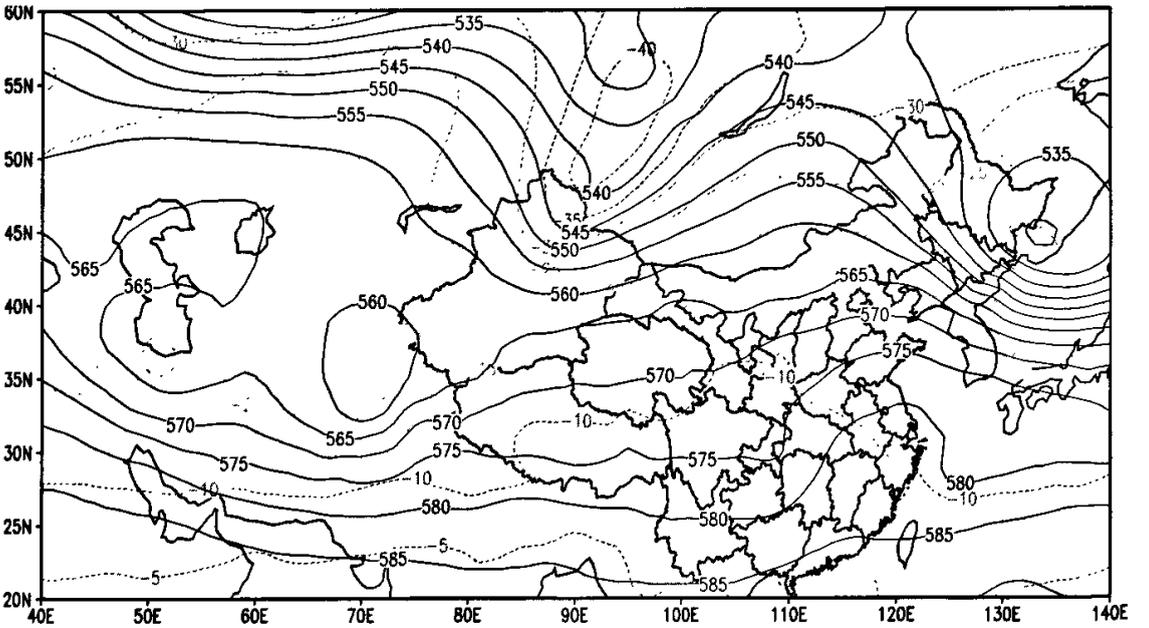


图 3 4月7日20时500hpa温压场配置

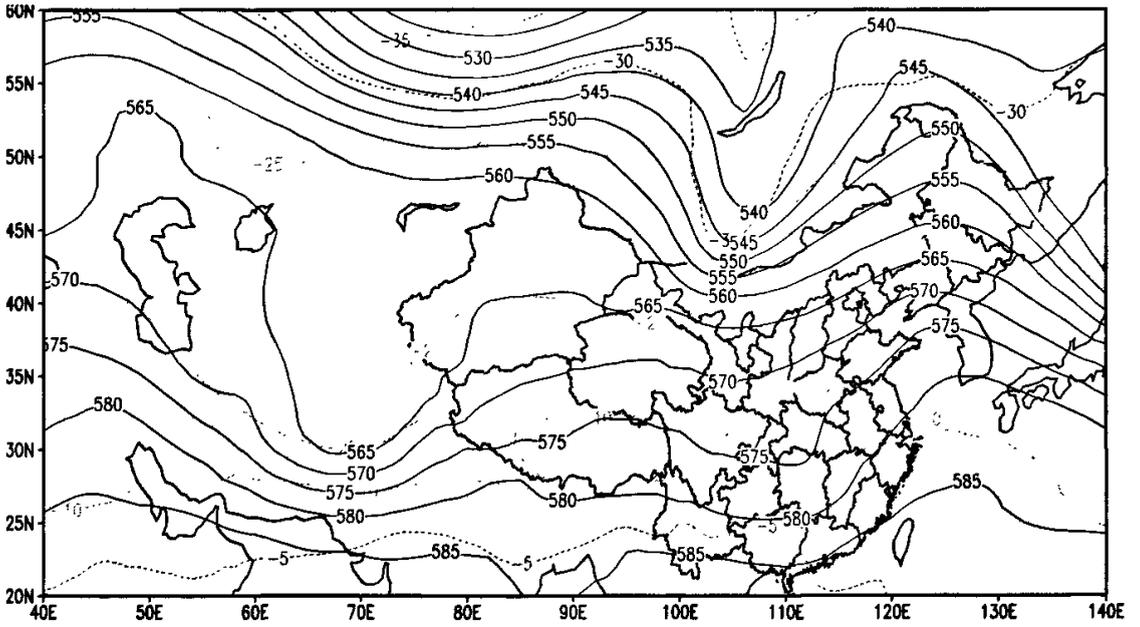


图4 4月8日20时500hpa温压场配置

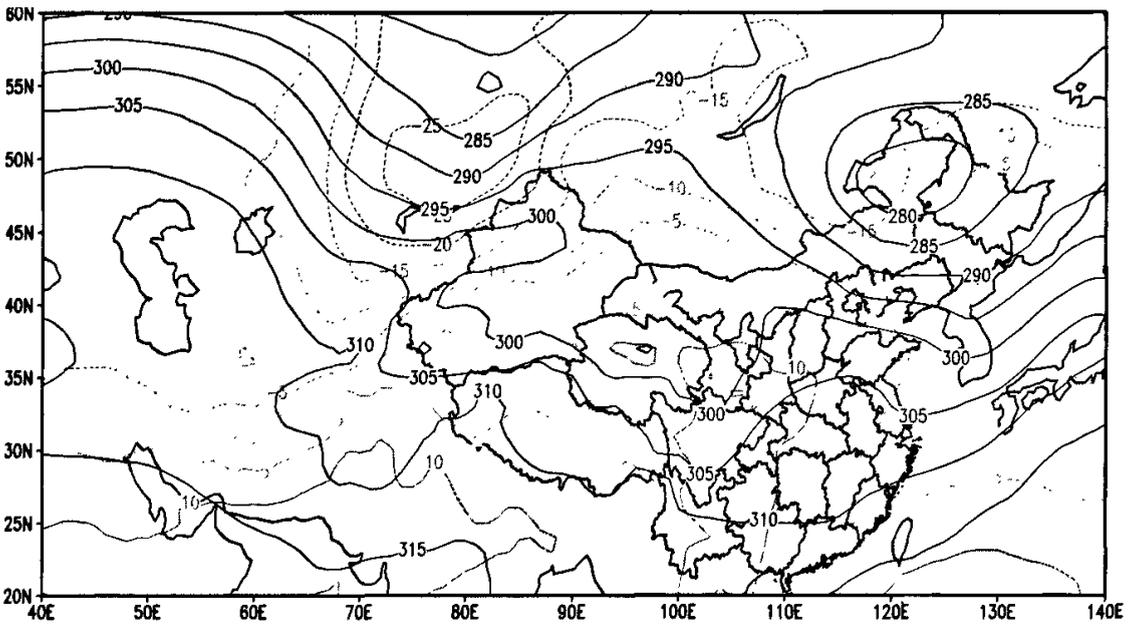


图5 4月6日20时700hpa温压场配置

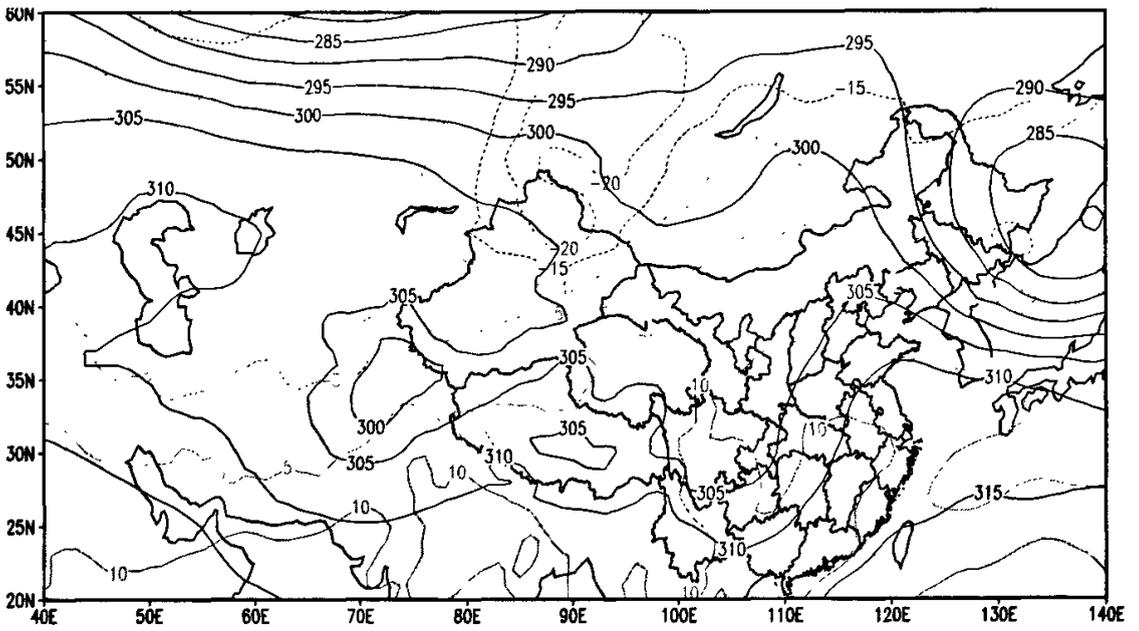


图 6 4月7日20时700hpa温压场配置

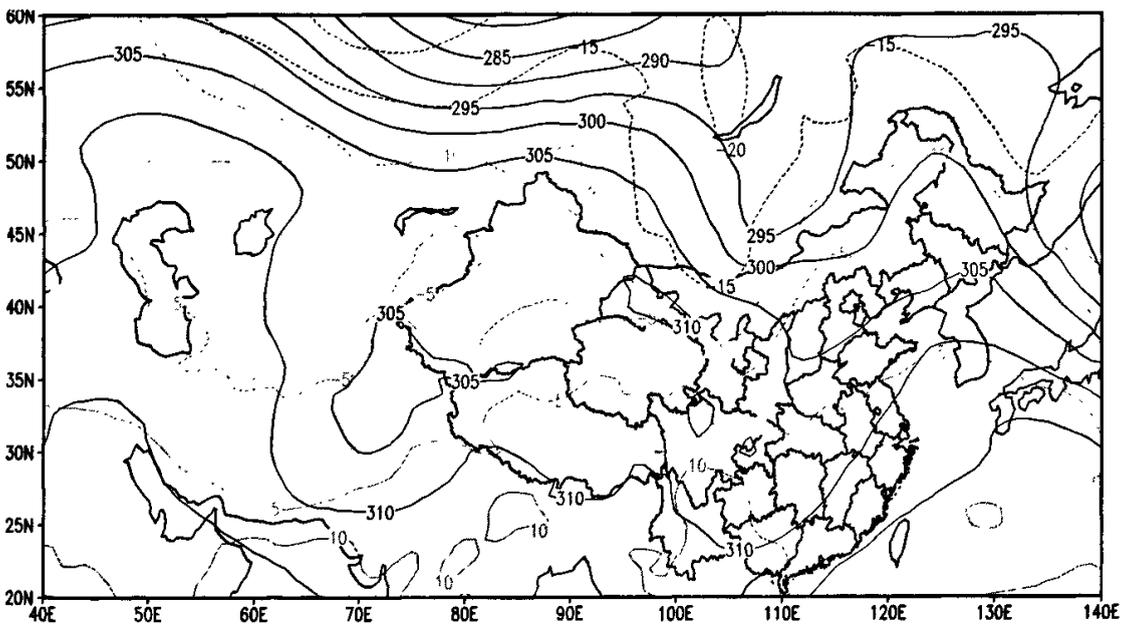


图 7 4月8日20时700hpa温压场配置

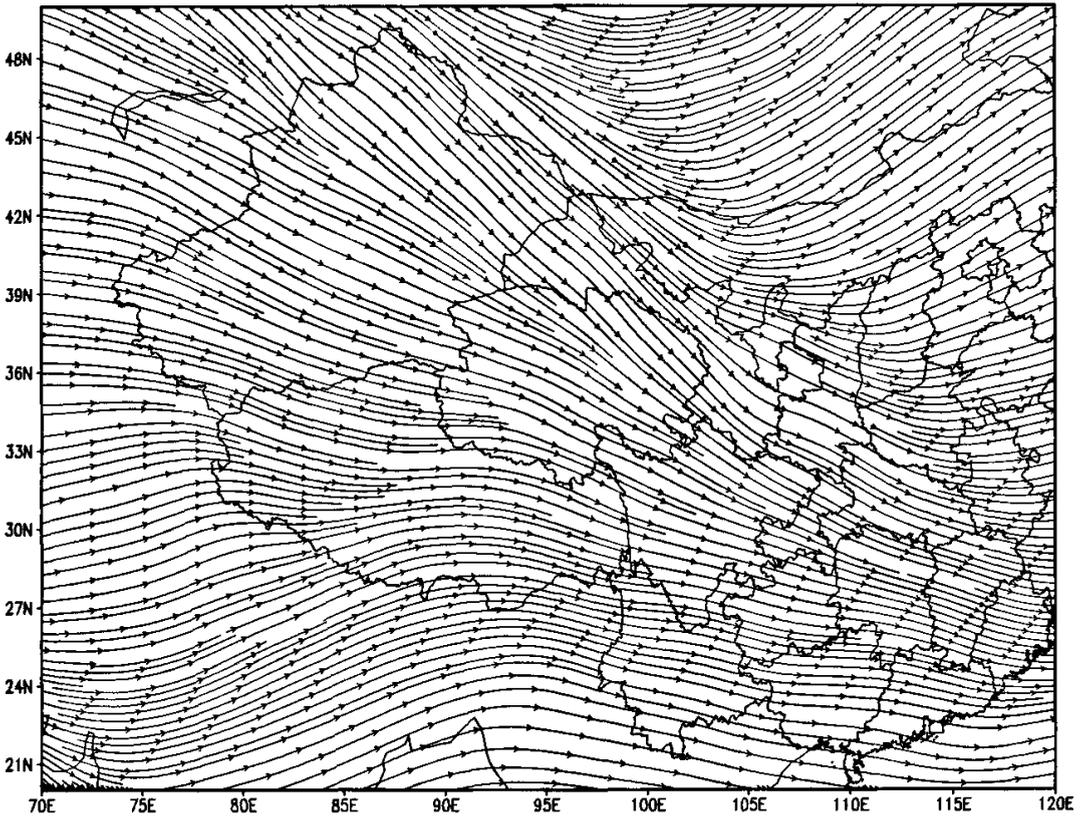


图9 4月6日20时200百帕平均流场分布特征

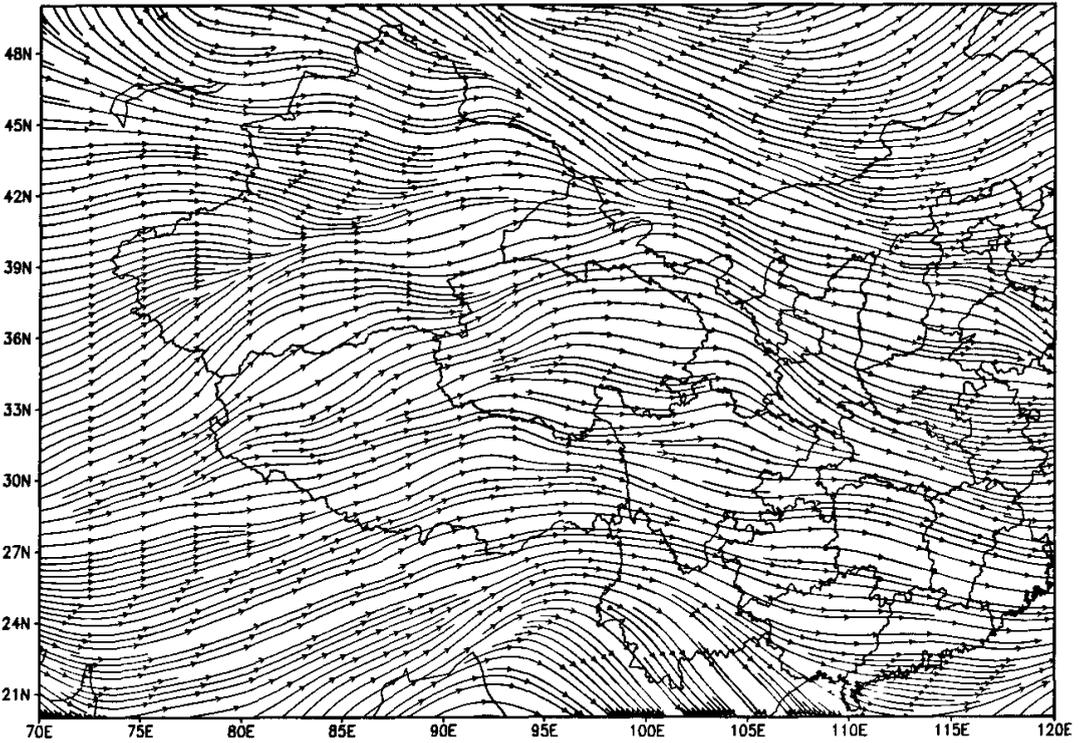


图10 4月6日20时500百帕平均流场分布特征

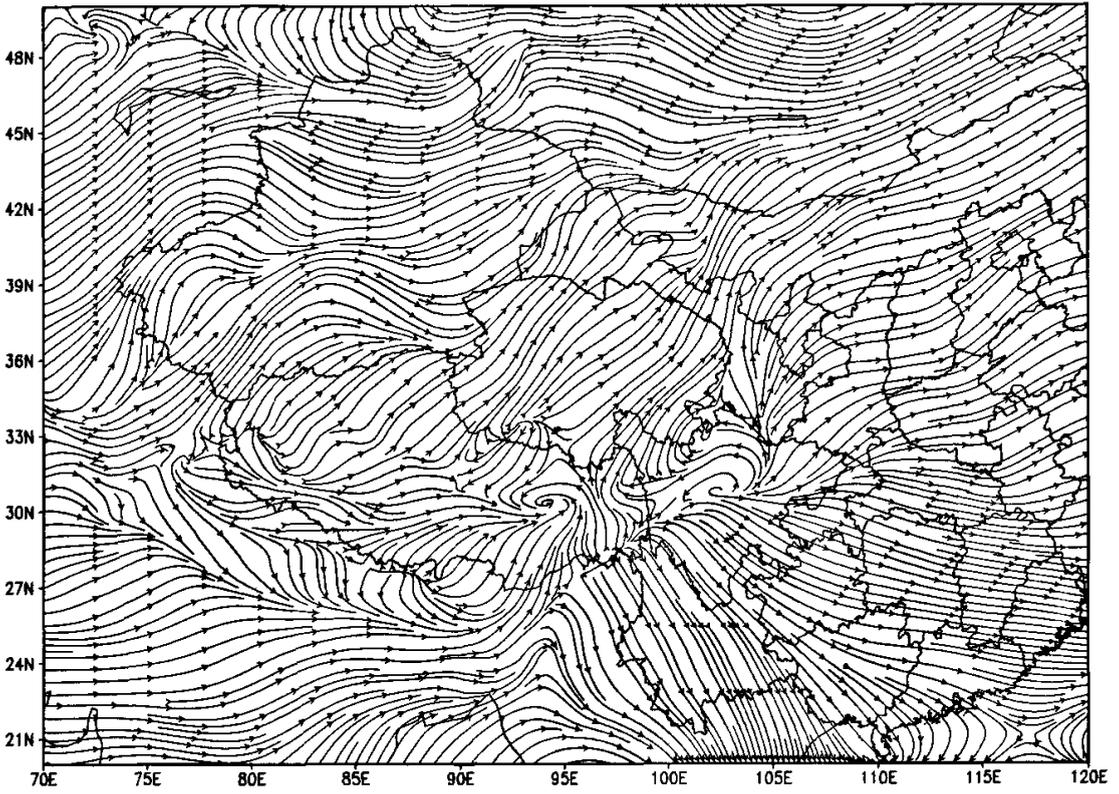


图 11 4月6日20时700百帕平均流场分布特征

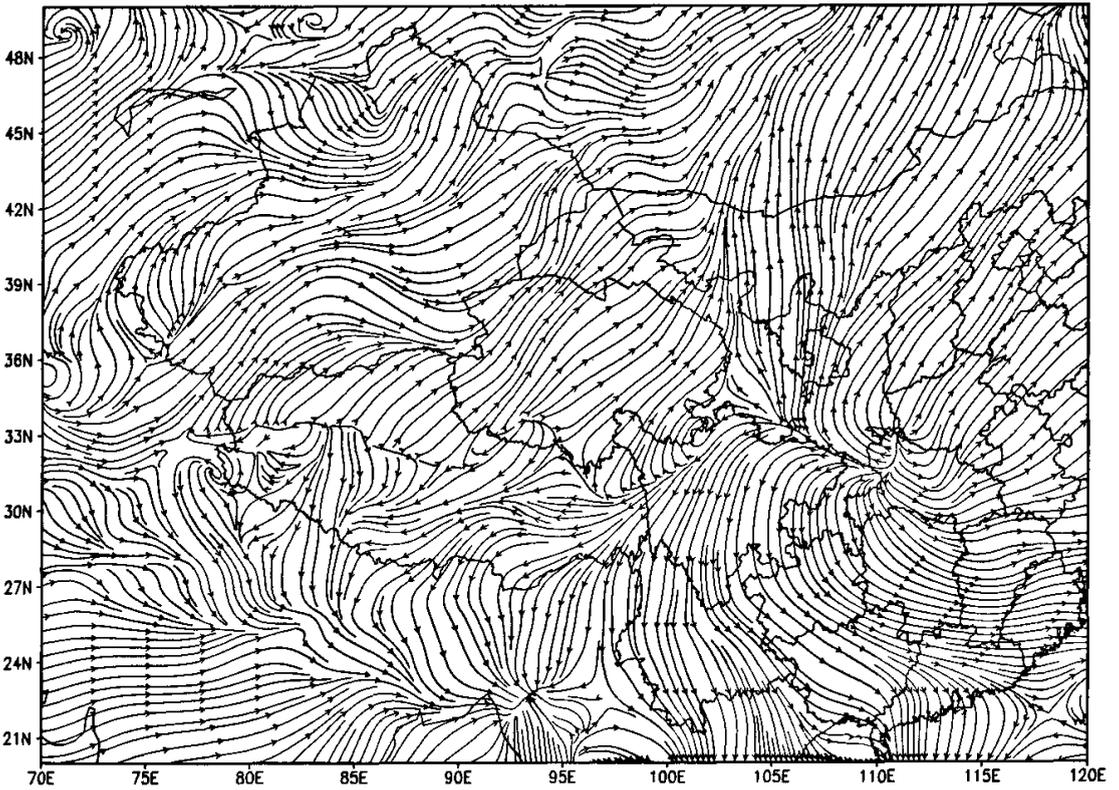


图 12 4月6日20时850百帕平均流场分布特征

3.2.3 散度场和涡度场配置特征

从4月6日20时的散度场分布图(图 13-15)可以看出:在宁夏省境内,散度变化比较大。500百帕散度分布图上大部分地区为辐散层,只有下方的一小部分为辐合层,辐散中心在 108°E , 39°N 附近。700百帕辐散达到最大,最大辐散强度为 $20\times 10^{-5}\text{S}^{-1}$ 。850百帕散度值明显下降,绝大部分区域为负散度值,并有一部分区域为散度正值。这样的散度分布说明在沙尘暴发生前,其区域内已经形成了很强的高空辐散,低空辐合的流场形势,具备对流活动的有利条件。从垂直剖面图(图 16)上还可以看出:最大散度负值在850百帕,其极值为 $-50\times 10^{-5}\text{S}^{-1}$ 。散度0线在600百帕附近。最大散度正值出现在500百帕附近,值为 $20\times 10^{-5}\text{S}^{-1}$,说明在此高度上气流辐散达到最大。这样的散度垂直分布特征表明在沙尘暴发生前,其区域内已经形成了较强的气流辐合,对垂直气流的发生极为有利。

从4月6日20时的涡度场分布图(图 17-19)上可以看出:在沙尘暴发生区域内,其涡度值随高度变化比较小。850百帕上涡度最大值达到 $8\times 10^{-5}\text{S}^{-1}$,大值中心在 106°E , 37°N 附近。到700百帕高度涡度值变化不大,但大值中心稍微偏西。500百帕有正有负。从涡度的垂直剖面图(图 20)上可以看出:最大涡度出现在700百帕附近,极值为 $8\times 10^{-5}\text{S}^{-1}$ 。零度涡度线在500百帕附近,500百帕以上为负涡度区。这样的涡度场配置说明沙尘暴生成前,在该区域内500百帕以下有气旋性涡柱,以上有反气旋性环流。

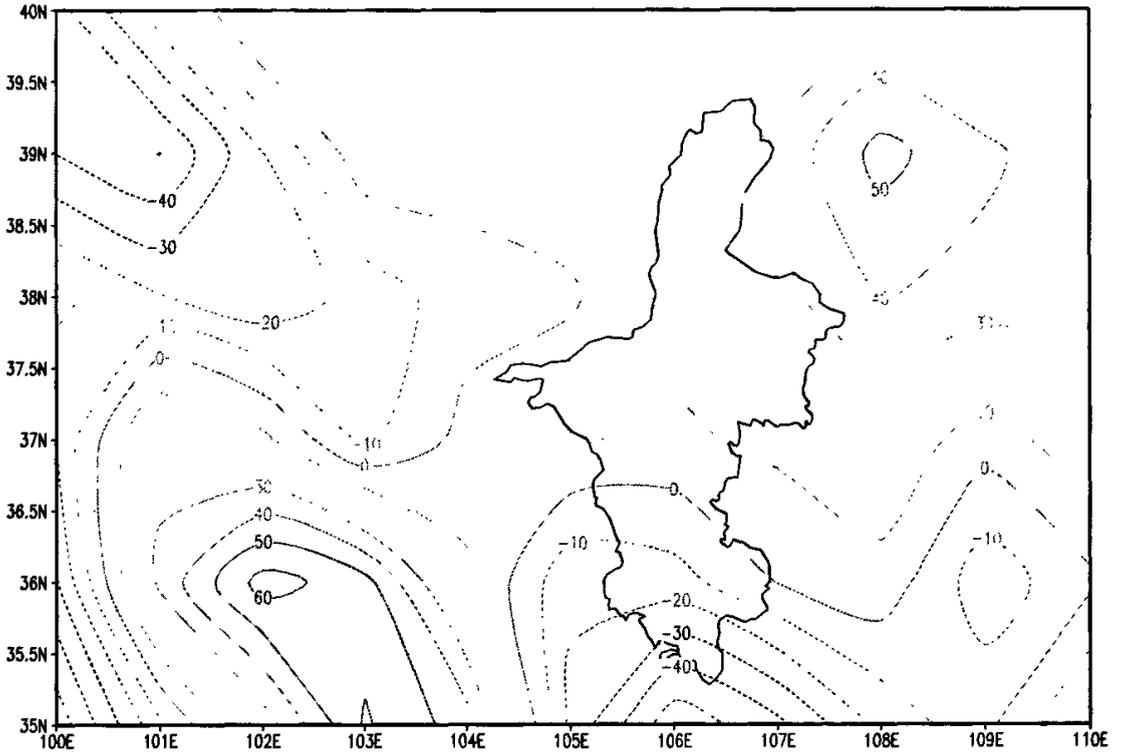


图 13 4月6日20时500hpa散度场

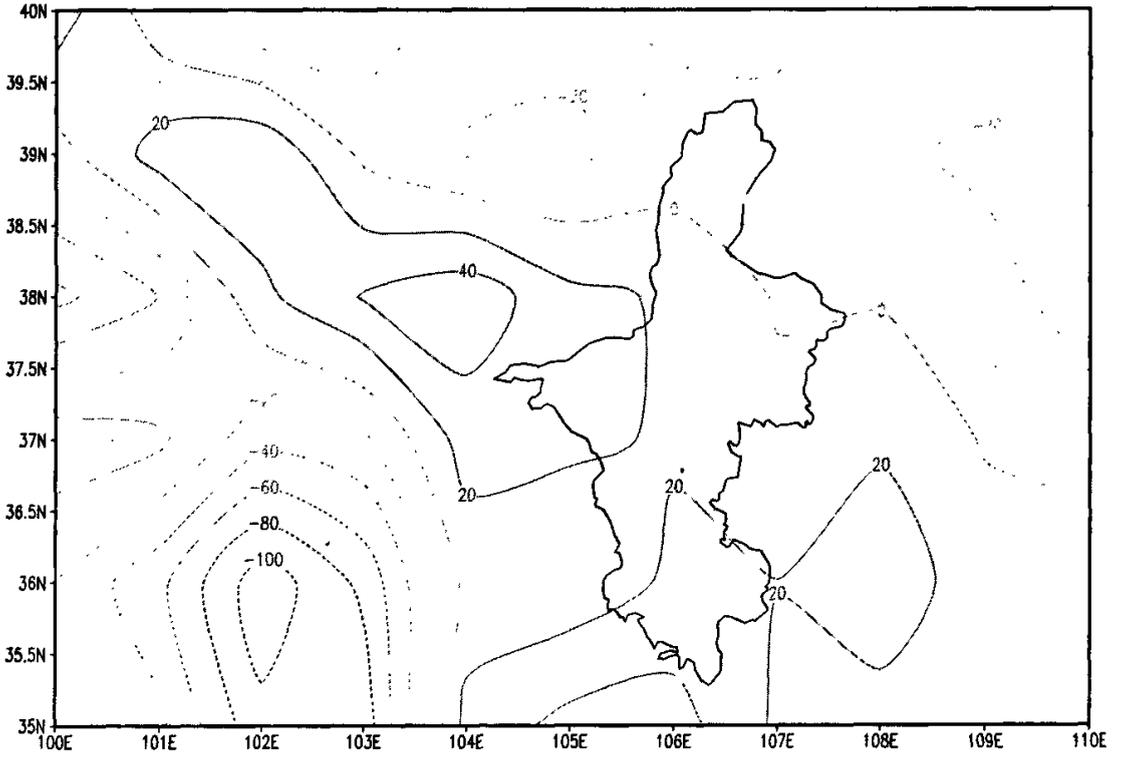


图 14 4月6日20时700hpa散度场

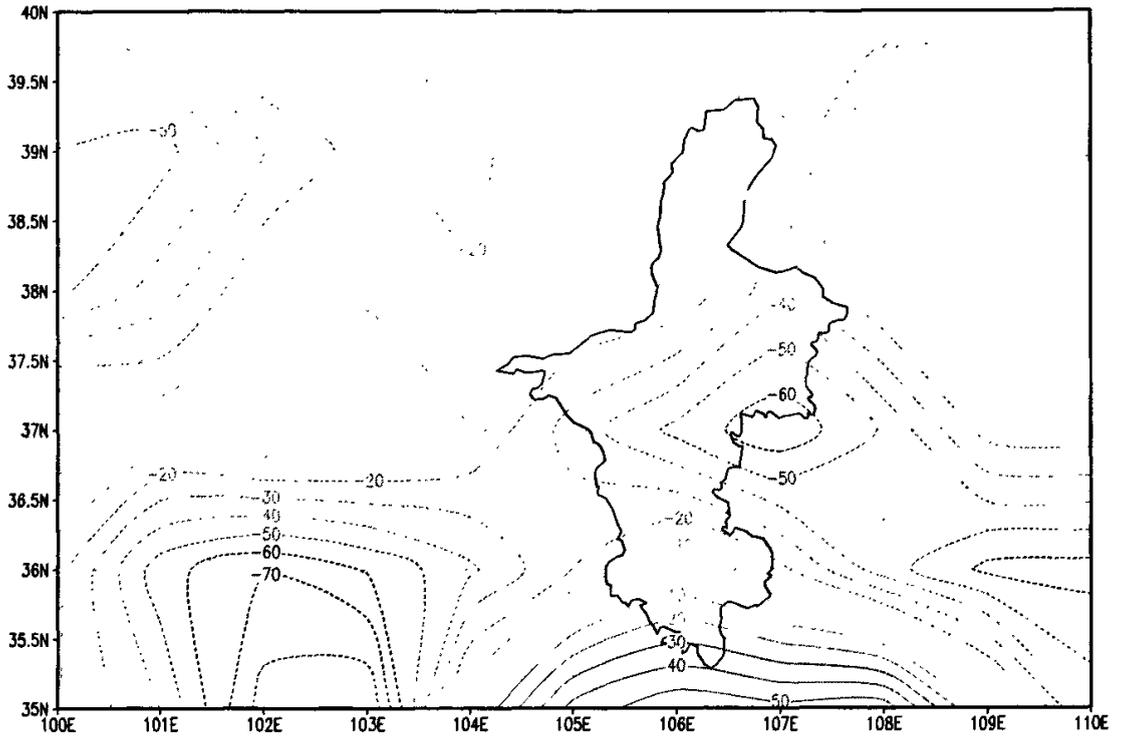


图 15 4月6日20时850 hpa 散度场

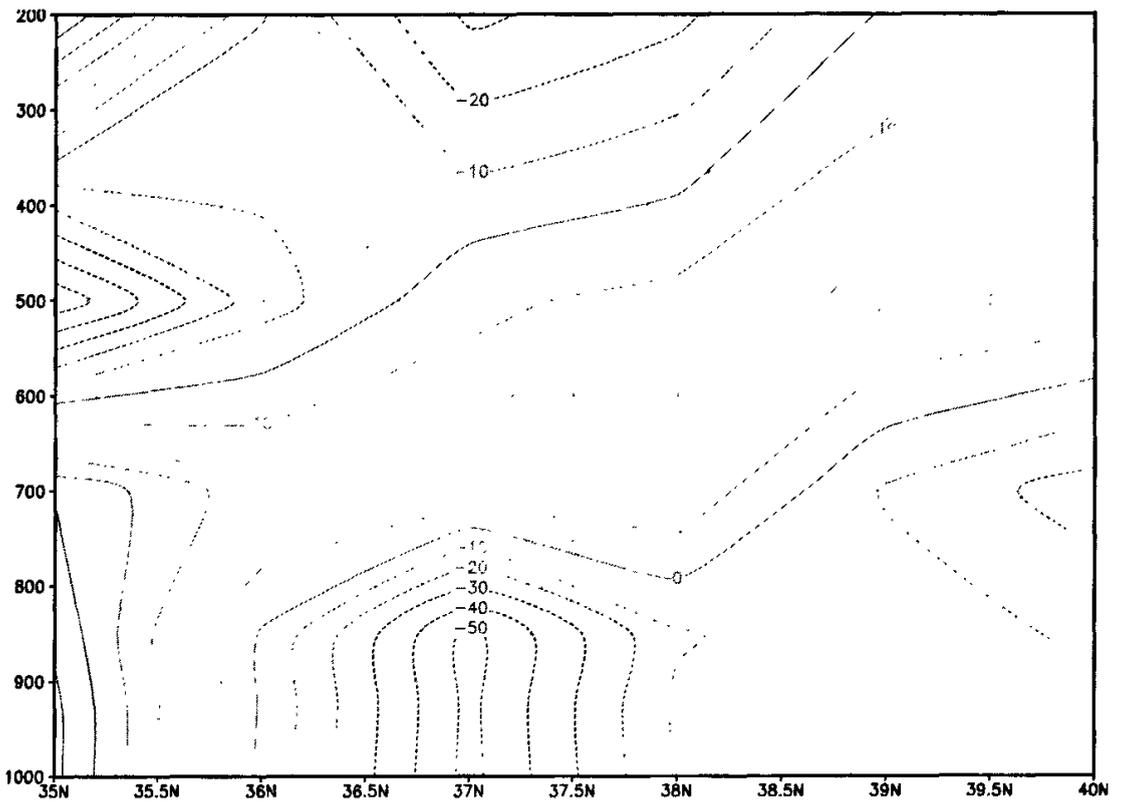


图 16 散度沿 106E 的垂直剖面图

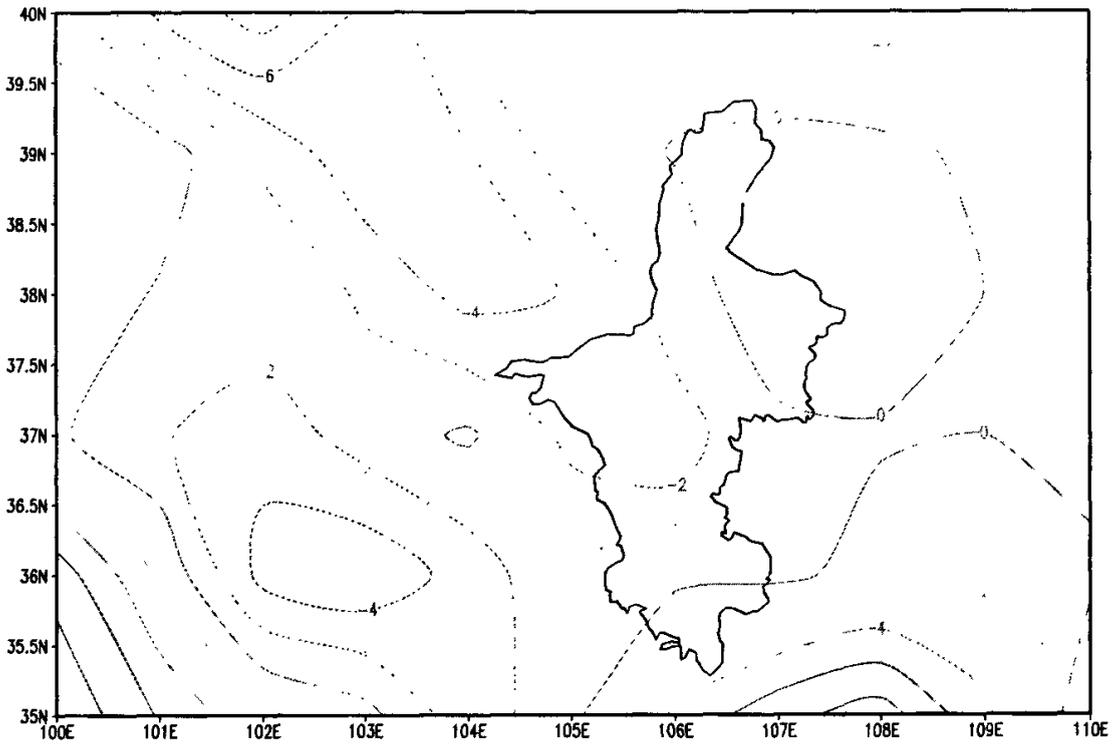


图 17 4月6日20时500hpa 涡度场

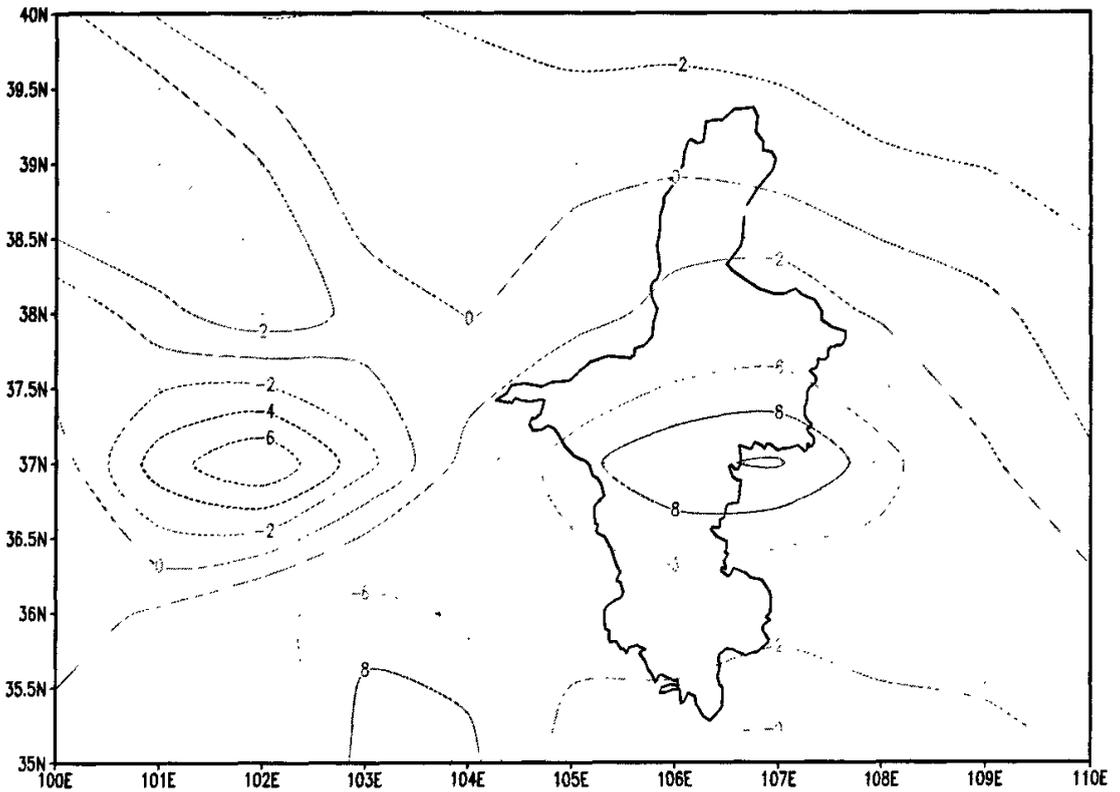


图 18 4月6日20时700hpa 涡度场

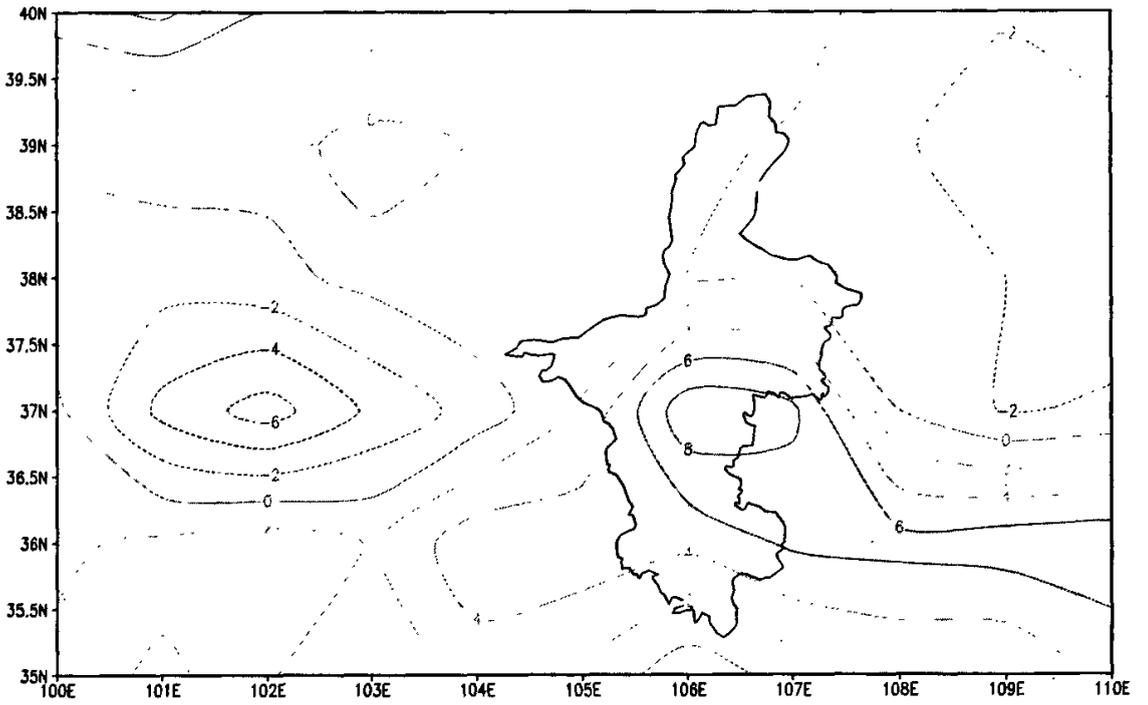


图 19 4月6号850hpa 涡度场

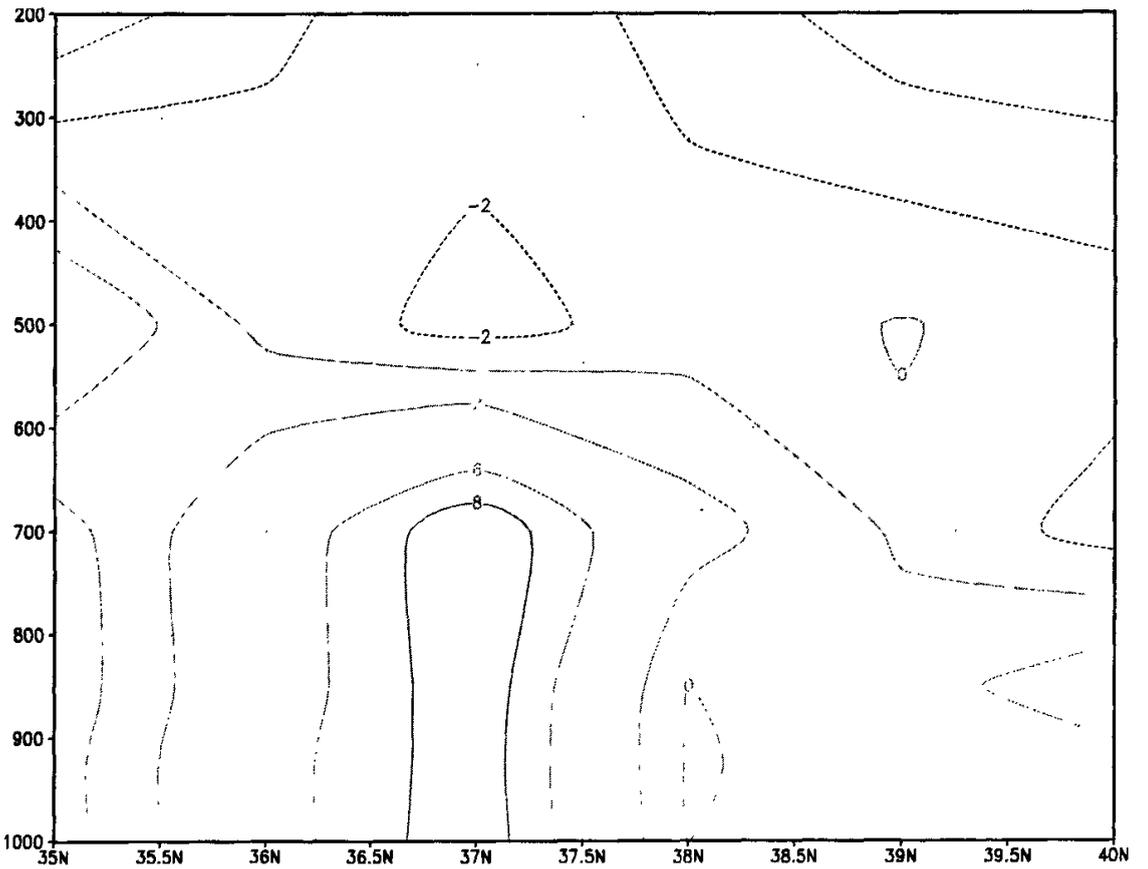


图 20 涡度沿 106E 的垂直剖面图

3.2.4 垂直速度

从4月6日20时的垂直速度分布图(图21-23)上可以看出:在宁夏省境内,其垂直速度在500百帕层达到最大,最大值为 $60 \times 10^{-2} \text{M/S}$ 。位置在 107°E , 38°N 附近,受高空槽的影响,槽前的广大区域都盛行上升运动。垂直速度在此达到最大,这也说明,在沙尘暴发生前,其生成区域已经存在垂直方向上的对流上升运动,只不过强度不是很强。随着高空系统的东移,对流逐渐得到加强发展,最终导致沙尘暴的发生。在700百帕以下和850百帕以上有部分区域为垂直速度负值区,在垂直剖面图(图24)上可以看出这种分布特征,为弱下沉气流。

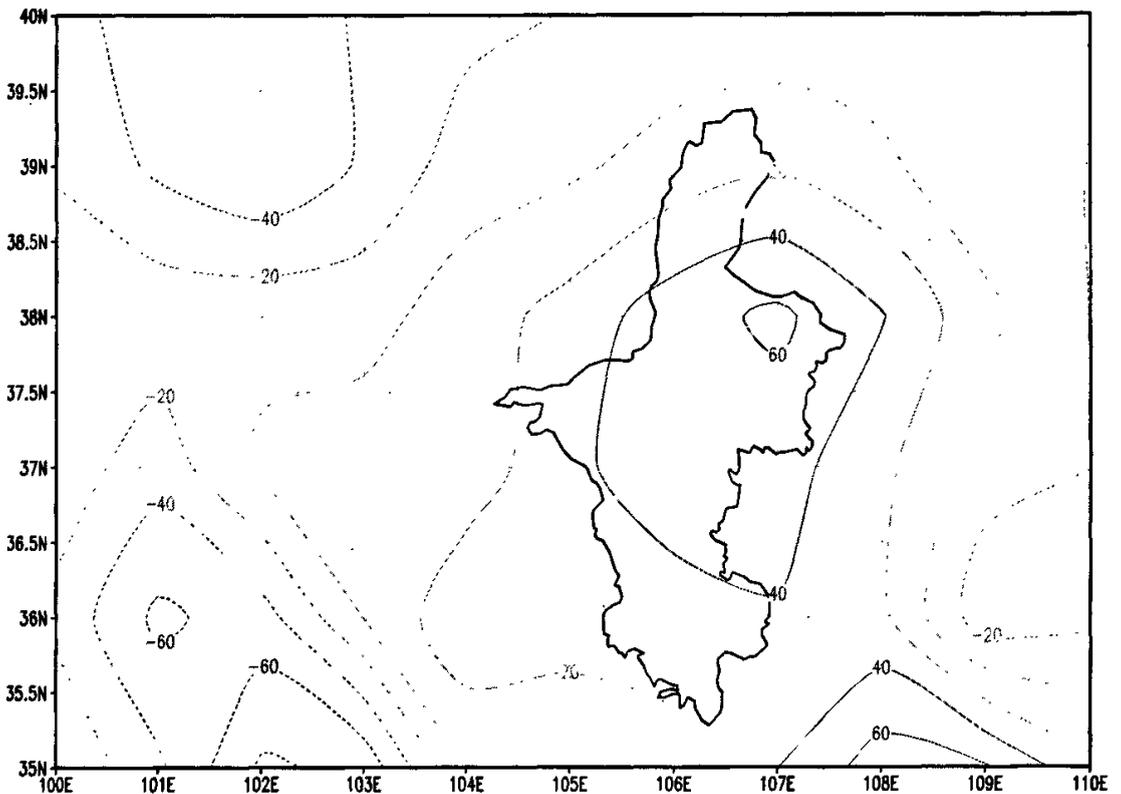


图21 4月6日20时500hpa垂直速度

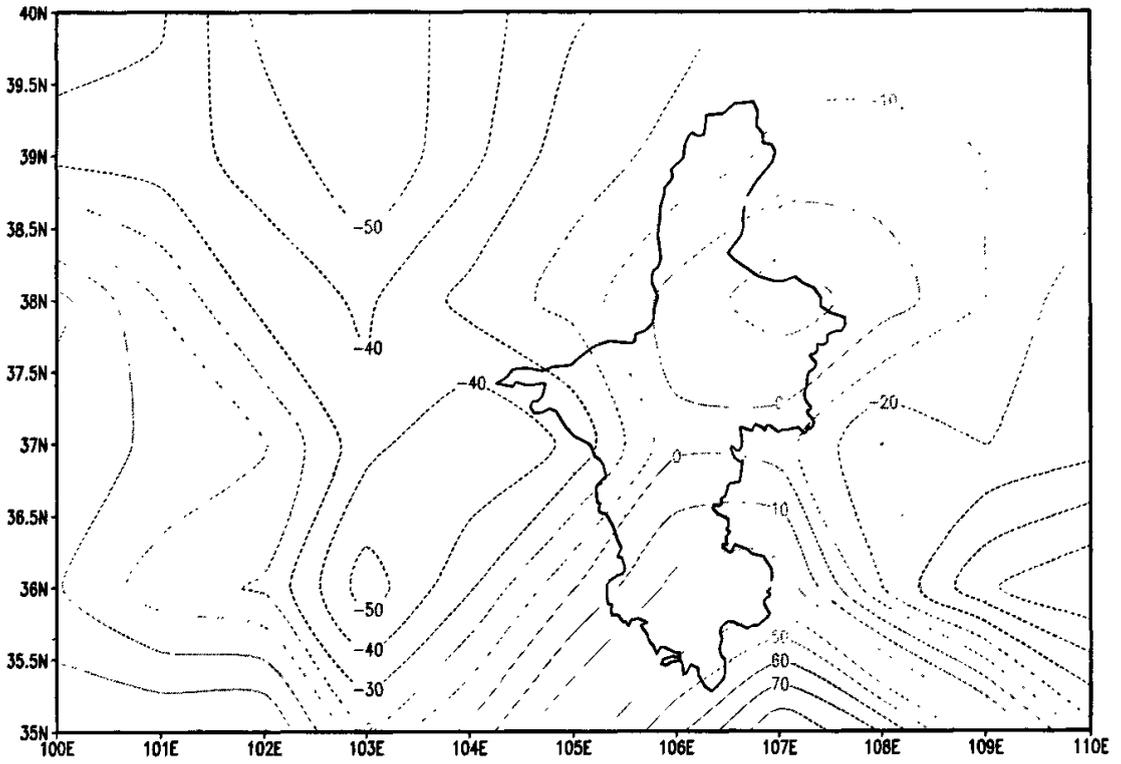


图 22 4月6日20时700 hpa 垂直速度

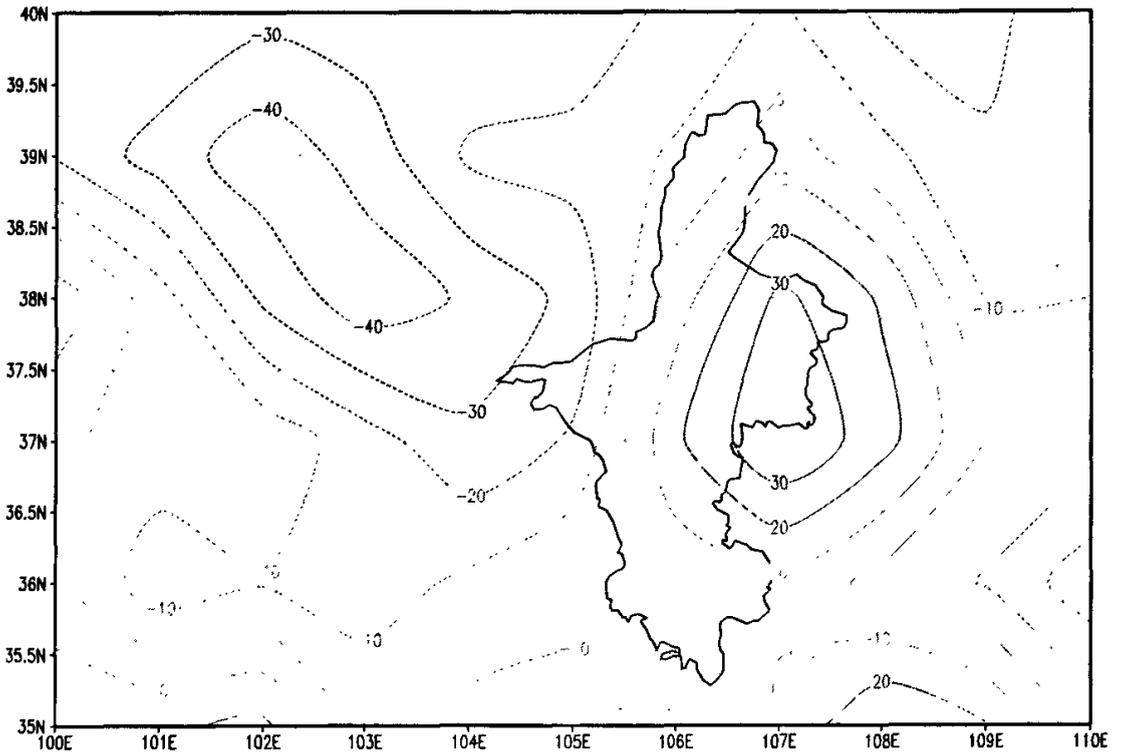


图 23 4月6日20时850 hpa 垂直速度

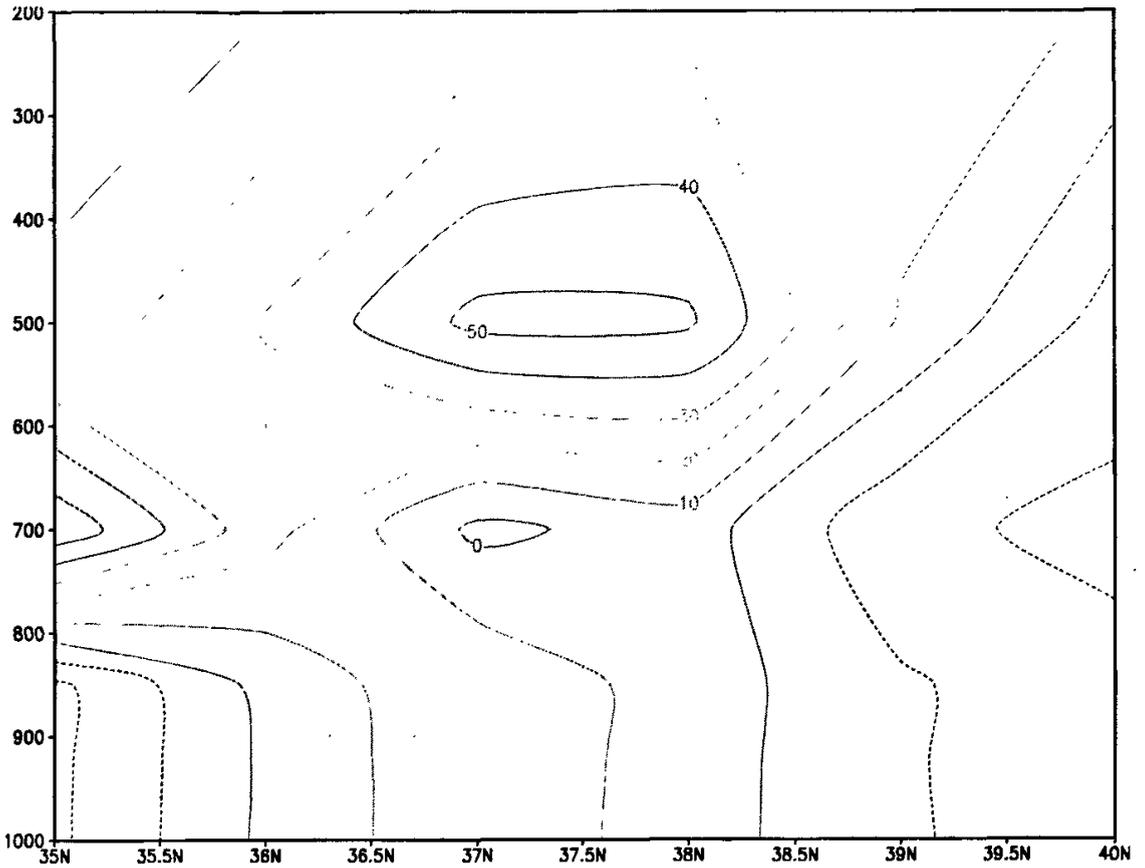


图 24 垂直速度沿 106E 的垂直剖面图

3.2.5 相当位温

从 4 月 6 日 20 时的相当位温分布图 (图 25-27) 上可以看出: 在低空存在相当位温的高值区, 这表明高能区已经形成。在 850 百帕 (图 27) 和 700 百帕图 (图 26) 上, 可以看出宁夏省境内的相当位温梯度很大, 达到 6°C 以上, 相当位温锋区明显。可见此时地面锋面已经形成。500 百帕图 (图 25) 上相当位温呈南高北低的分布状态, 这与 500 百帕温度场对应较好。从 700 百帕图 (图 26) 上可以看出, 在 $35^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 为高能量脊, 可见这次沙尘暴在低层存在不稳定的热力条件。

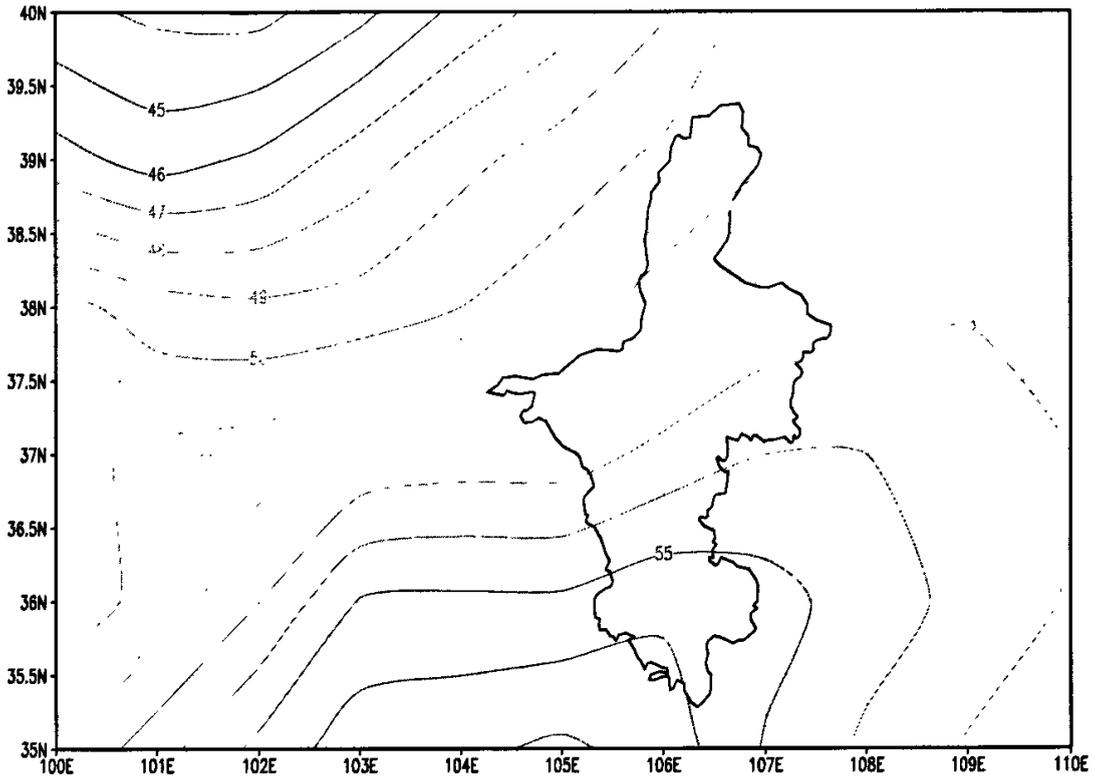


图 25 4月6日20时500hpa相当位温

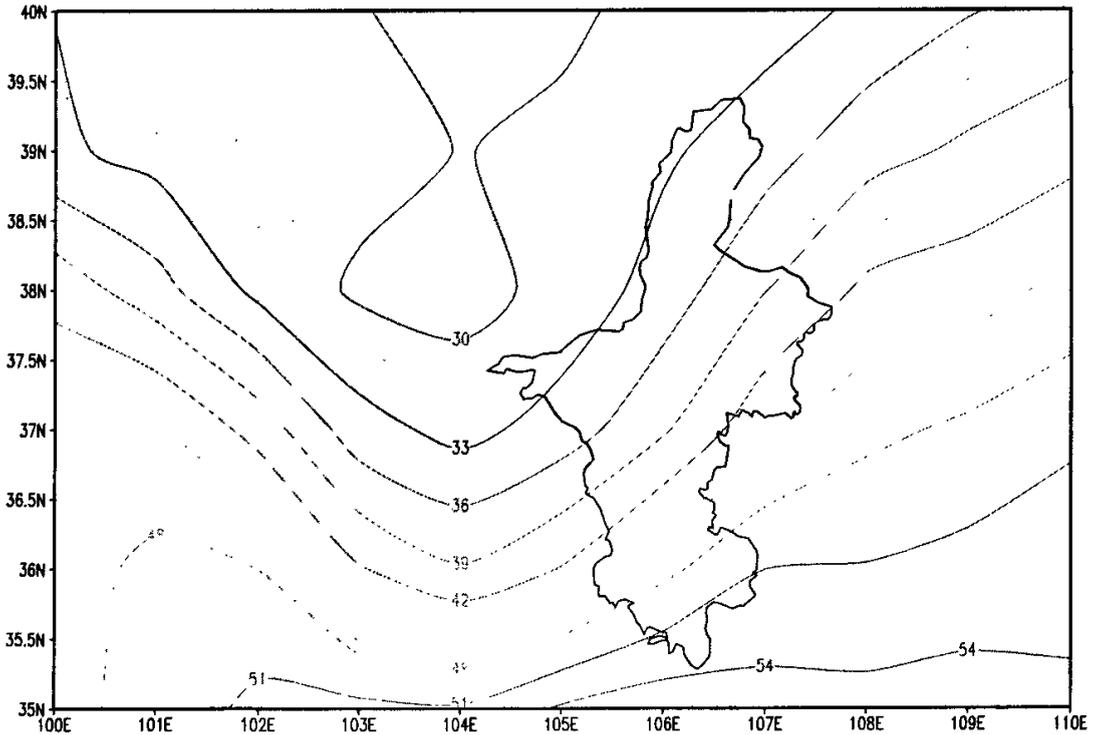


图 26 4月6日20时700hpa相当位温

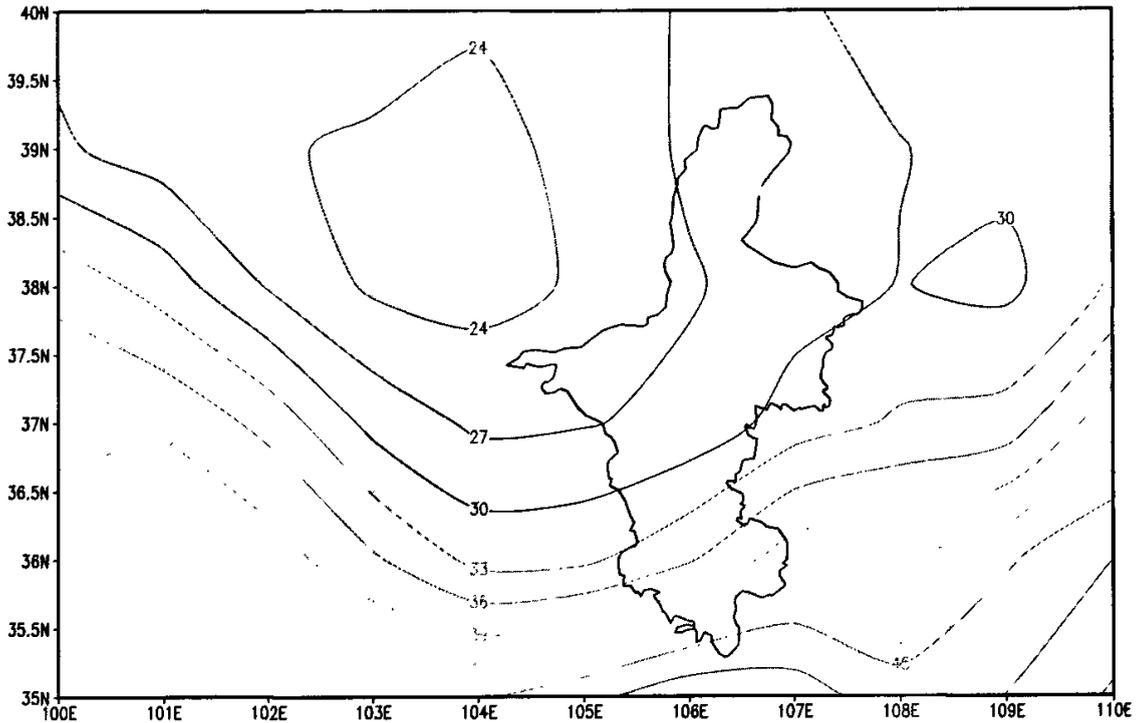


图 27 4月6日20时850hpa相当位温

3.3 结论

通过对 2001 年 4 月 8 日天气过程与背景分析，得到如下结论：

(1) 沙尘暴发生前后，地面气象要素有很明显的变化。午后地面增温最强，大气层结不稳定性显著增大，有利于高空动量下传产生大风，为沙尘天气的发生提供了动力和热力条件。

(2) 地形的阻挡作用对冷锋和沙尘暴的移动有较大的影响。

(3) 此次过程属于西北路径冷锋后西北大风引起的沙尘暴天气。高空横槽与强锋区是激发这次沙尘暴的重要动力机制，高空急流区的形成是产生大风、沙尘暴天气的必要条件，蒙古气旋和地面冷锋是造成这次沙尘暴的主要影响天气系统。

通过对 2005 年 4 月 6 日要素特征的分析，得到如下结论：

(1) 温压场：中、低空温度槽落后于高度槽的这种斜压结构，将使该冷槽加深。槽前暖平流和 850 百帕的小低压对沙尘暴的发生有明显的指示意义。

(2) 流场：高低空之间有强烈的切变。切变发生在 500 百帕与 700 百帕之间。

(3) 散度和涡度场：低空强辐合和高空强辐散与深厚正涡度柱的耦合，是沙尘暴生成和发展的一种典型结构。

(4) 垂直速度：垂直速度一般在中空达最大。

(5) 相当位温：低空宁夏省境内相当位温锋区明显，低层存在不稳定的热力条件。

对比这两次沙尘暴天气过程可以看出，二者除了冷空气的环流形势背景不同（01 年的是西北气流型的沙尘暴天气，05 年的是槽脊东移型的沙尘暴天气）以外，其余的如冷空气路径，动力以及热力条件基本相同，为了更好得研究 05 年 4 月的这次沙尘暴天气过程，做了后面的诊断分析。

第四章 物理量的诊断分析

4.1 螺旋度

众所周知,垂直运动是大气过程发展的产物,是导致云、降水等天气现象的重要动力条件^[71]。大气中发生的凝结和降水过程、热量和动量的垂直输送以及大气中位能与动能之间的相互转换等,都与垂直运动有密切关系,因而垂直运动常被作为天气系统生成和发展的一个重要指标,是对天气预报以及与暴雨有关的研究工作十分重要的一个物理量,掌握它的诊断方法,对于天气预报,特别是对暴雨预报有着重要的意义^[72]。螺旋度与垂直运动密切相关,是垂直运动估算的重要方法。

螺旋度是一个用来衡量风暴入流气流的强弱及沿入流方向的涡度分量大小的参数。1961年 Betch 首先提出了螺旋度的概念,1978年 Moffert 将螺旋度定义为风速度矢和涡度矢点积的体积分,而将风速度矢和涡度矢的点积称为局地螺旋度。后来,Brandes(1981年)提出了风暴相对螺旋度的概念螺旋度方法如果以网格点的形式,则很容易在预报中得到应用,螺旋度本身可以在很多层计算和显示,在剖面图或时间和高度图中也可以显示螺旋度的垂直分布。螺旋度分析方法可以作为一种诊断工具用于短期天气预报业务,建立一个微机诊断系统,用于实际天气个例分析,将分析结果与有限区域数值预报进行比较。螺旋度是一个对天气发展过程诊断和预报相当有用的物理量。

螺旋度是一个描述环境风场气流沿运动方向的旋转程度和运动强弱的物理参数,它反映了大气的运动场特征,能够很好地描述大气运动的性质和特点。通常人们所说的螺旋度是局地螺旋度 H , 定义为 $H = \vec{V} \cdot (\nabla \times \vec{V})$ 。螺旋度的重要性还在于它比涡度包含了更多风的效应,更能体现大气的运动状况,其值的正负情况反映了涡度和速度的耦合程度。

关于螺旋度的研究很多。自20世纪80年代以来,气象学者将螺旋度应用到对强对流风暴的旋转发展维持机制和其他相关的大气现象研究中,并对其在强对流天气分析预报中的应用进行了数值试验和诊断分析。Lilly^[73,74]最早将螺旋度正式地引入到强对流风暴研究中。他的研究指出强对流风暴具有高螺旋度特征,

它的螺旋度从环境场中获得并在浮力效应下增强。同时,高螺旋度阻碍了扰动能量耗散,对超级单体风暴的维持有重要作用;稳定的强对流风暴常发生在螺旋度值大的地方。Etling^[75]讨论总结了大气中存在的几种典型螺旋流,并指出流体稳定性与螺旋度密切相关。Wu^[76]等对切变热对流扰动中螺旋度的产生以及螺旋度与非线性能量传输之间的关系进行了研究。Woodall(1990年)将螺旋度应用于龙卷的预报;Robert Davies - Jones(1990年)等人的观测研究得到螺旋度量值的大小对实际业务工作中不同强对流天气预报的指示意义;美国国家风暴中心(NSSFC)开发了应用于业务的螺旋度分析和预报程序(HAFP)。中国气象学者也较早对螺旋度的性质、应用做了研究,基于螺旋度的理论研究及后来的数值模拟结果和观测资料分析,螺旋度逐渐成为引入天气分析预报中的一个重要物理量。伍荣生^[77]等推导完全的螺旋度方程,并指出若不计摩擦、准地转运动中,大气的螺旋度具有守恒的性质。Tan^[78]等讨论、研究了螺旋度在边界层和锋区的动力性质,所得出的结论表明:在边界层中由于摩擦效应,螺旋度通常是正的,反气旋中边界层螺旋度比气旋中的大。在一定条件下,大气中的螺旋度可被表示为温度平流,因而螺旋度可用来描述锋生和锋的结构。在锋生过程中螺旋度振幅随时间增加。刘式适^[79]等研究指出定常准地转模式中的螺旋度紧密地与大气垂直运动有关,即对应于定常的大气大尺度运动,稳定层结下的上升运动对应正螺旋度,下沉运动对应负螺旋度;同样,螺旋度也紧密地与温度平流有关,暖平流对应正螺旋度,冷平流对应负螺旋度。陆慧娟、高守亭^[80]从无摩擦的运动方程出发,利用量纲分析的方法,导出简化了的螺旋度方程和不同方向上的螺旋度方程,并对影响它们变化的各因子进行了讨论。在国内,将螺旋度用于天气系统研究的有:杨越奎^[81]等对梅雨锋期间的暴雨进行了螺旋度分析,得出了一些有意义的结果,发现螺旋度作为一个新的诊断量,在暴雨研究中是有一定应用价值的;李英^[82]用螺旋度对1997年3月中下旬春季滇南大风冰雹天气进行了分析,指出螺旋度是一个反映动力条件的物理参数,在一定假设下,它也相当一个热力因子;陈华、谈哲敏^[83]将螺旋度的概念引入热带气旋,对热带气旋螺旋度的结构特征及其在热带气旋发展过程中的演变过程进行了研究。结果表明,热带气旋这种具有较强螺旋性的天气系统,其发展过程也就是螺旋度增强的过程,螺旋度对热带气旋稳定过程的维持及其长久的生命期具有重要的作用。这些研究表明:螺旋度作为一个

物理诊断量,它对暴雨和强对流天气的预报具有一定的指示意义。有人将螺旋度结合其他物理量综合诊断分析,谭志华^[84]等应用螺旋度理论结合湿度和不稳定条件对“99.8”山东特大暴雨过程进行分析,发现螺旋度的变化对天气系统的移动、发展及暴雨强度有一定的指示意义。侯瑞钦、程麟生、冯伍虎^[85]对“98.7”特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析,发现强动能及其强梯度区和强螺旋度区基本一致,强动能及其强梯度对螺旋度变率及其通量有重要贡献。刘惠敏、郑兰芝^[86]利用 T106 数值预报产品,分别计算高、低空的 Z 螺旋度结合相对湿度、Q 矢量等物理量场,采用动态逐步回归统计方法预报未来 6h 的降水雨量。郑传新^[87]运用螺旋度和位涡分析 0103 号和 0104 号台风暴雨过程,结果表明:暴雨位于正螺旋度中心右侧,当负螺旋度转为正螺旋度并增加时,将出现台风低涡暴雨,当螺旋度减小并由正转负时,暴雨也趋于结束;正螺旋度中心位于登陆台风移动路径的前方,台风中心上空对应正的干位涡 (PV)大值中心,而湿位涡 (MPV)与暴雨的关系更为密切。陆慧娟、高守亭^[80]指出:将中尺度模式和螺旋度计算结合起来,可能提高风暴路径和雨区的预报准确度。

螺旋度严格的定义为风速与涡度点积的体积分:

$$H = \iiint \vec{V} \cdot (\nabla \times \vec{V}) d\tau$$

螺旋度的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度,其单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

Z 坐标系下的局地螺旋度可表示为:

$$H = \vec{V} \cdot (\nabla \times \vec{V}) = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) u + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) w$$

研究表明:矢量的分解有助于展示气象意义的孤立过程和结构。李耀辉、寿绍文^[88]将实际风分解成无旋风和无散风,而无散风正好表征了实际风中的旋转情况,那么用无辐散风来计算螺旋度,就可以更好地分析螺旋度与暴雨系统之间的关系。事实表明,用无辐散风比实际风更能说明问题。许多学者对螺旋度从三个方向分解,称之为 X-螺旋度、Y-螺旋度、Z-螺旋度分别应用于诊断暴雨等系统,其中 Z-螺旋度应用最为广泛。寿绍文^[89]等通过实例分析,将各层次局地螺旋度水平分布与暴雨的滞后相关关系进行对比分析指出,400hPa、500hPa 的水平分布与暴雨的滞后相关较好,暴雨一般发生在局地螺旋度的大值区里。分析还

表明,螺旋度作为一个诊断量,其极值和暴雨的极值存在大约 2~4h 的滞后相关,其中 400hPa、500hPa 高度的局地螺旋度的这种相关较明显且稳定。此外,寿绍文等还将螺旋度与对流有效位能等其它物理量相结合组成“能量螺旋度”等新参数来使用,对未来暴雨落区的指示意义更为明确。这些结果说明螺旋度对未来暴雨的落区具有一定的预报意义。螺旋度作为强对流天气分析预报中的一个重要物理量,虽然在暴雨的研究中已有了广泛的应用,但在沙尘暴的研究中却应用得很少,对有关螺旋度的特征分析,至今尚未有过详细研究。赵光平^[33]等人指出螺旋度在沙尘暴预报中的重要作用在于刻画激发中- α 尺度干瘪线典型物理量的空间结构,从而对沙尘暴发生发展的落区有很好的指示性。可见,通过对螺旋度特征的细致分析,可以对预报沙尘暴的发生发展起重要作用,因而对螺旋度的研究就显得十分必要。

本文中仅讨论 Z-螺旋度,重新定义局地螺旋度为:

$$H_k = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) w = \xi w$$

下面是沿经度 106°E 作的螺旋度的经向垂直剖面图。图 28 至 31 分别是 4 月 5 日 20 时,4 月 6 日 20 时,4 月 7 日 20 时以及 4 月 8 日 20 时的螺旋度垂直分布情况。从图 (28-31) 中可以看出,6 日螺旋度达到最大,最大值为 $160 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。5 日与 8 日呈上负下正的形式,5 日在 800 百帕以上为负值区,最大负值中心位于 500 百帕,达到 $-120 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。零线在 700 百帕左右。800 百帕以下为正值区。8 日的零线有所下降,在 850 百帕左右。最大负值中心也下降到 700 百帕,但是数值没有变化。根据螺旋度的定义, H_k 螺旋度的正值对应找正涡度区, H_k 螺旋度的负值对应的是负涡度区。以上分析表明在沙尘暴发生时,宁夏上空低层为气旋性涡度辐合区,中高层为反气旋性涡度辐散区,这种垂直结构十分有利于对流系统的的发展,对形成像沙尘暴这样的中尺度系统而言,构成了低空强辐合,高空强辐散的深厚上升运动区,这样螺旋度垂直分布是十分有利于沙尘暴发展的一种形式。

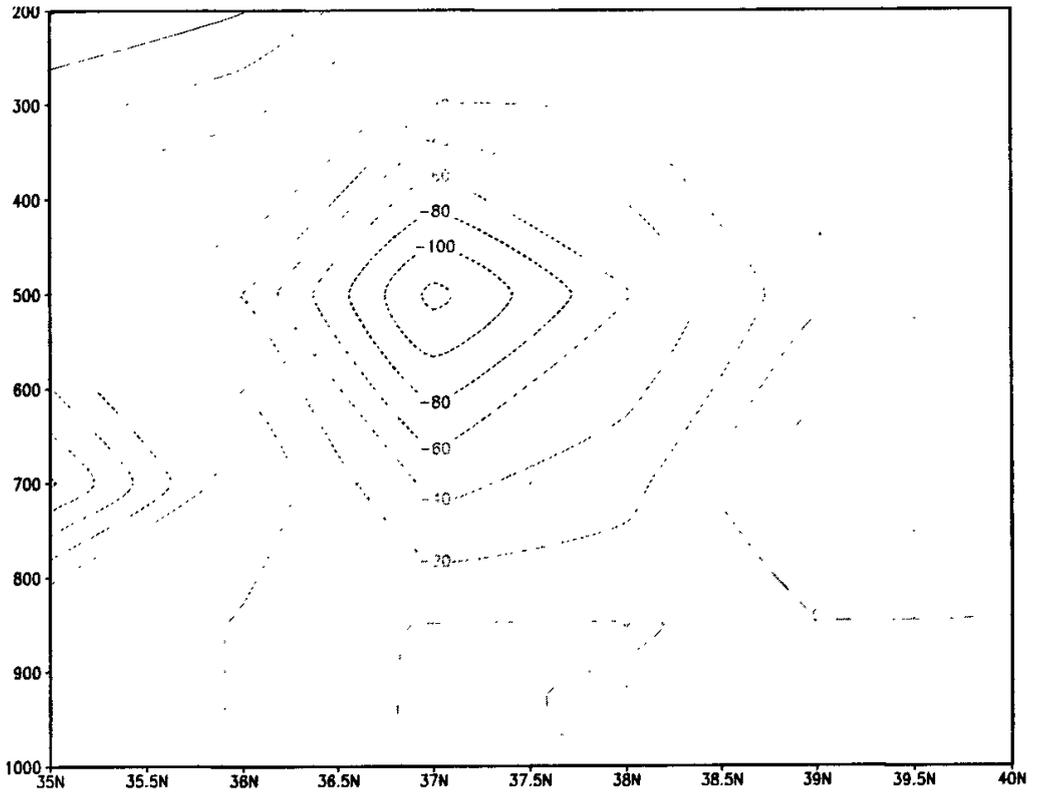


图 28 4月5日20时沿经度106E螺旋度的经向垂直剖面图

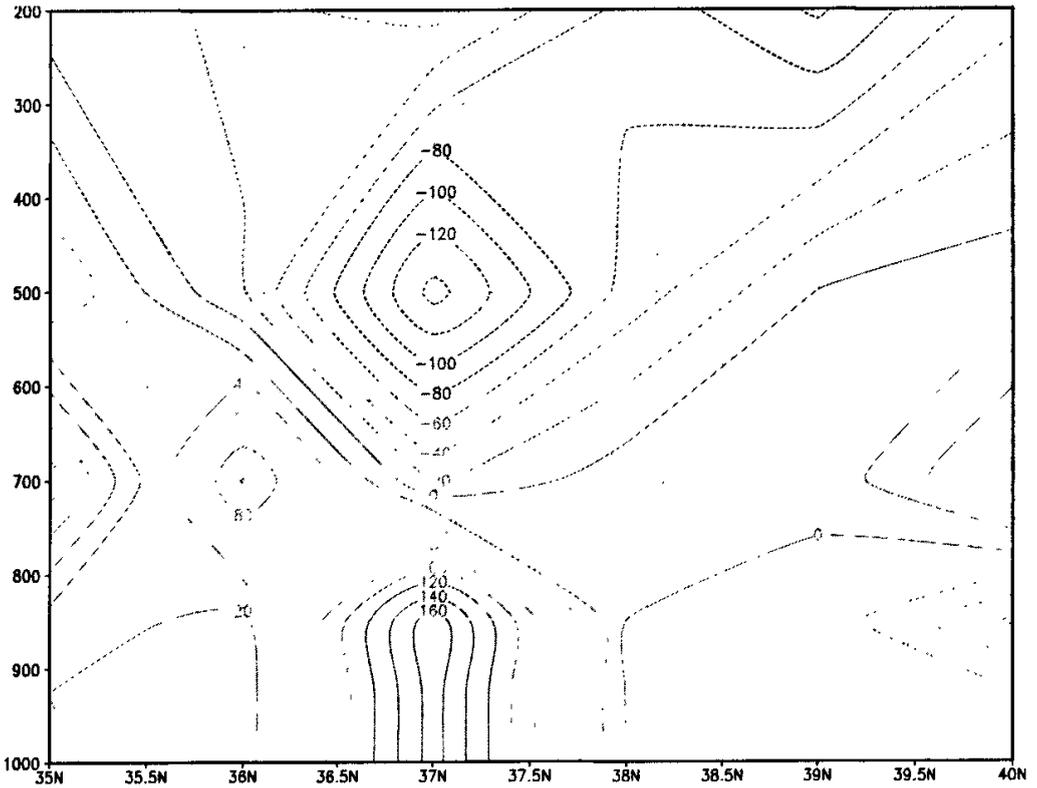


图 29 4月6日20时沿经度106E螺旋度的经向垂直剖面图

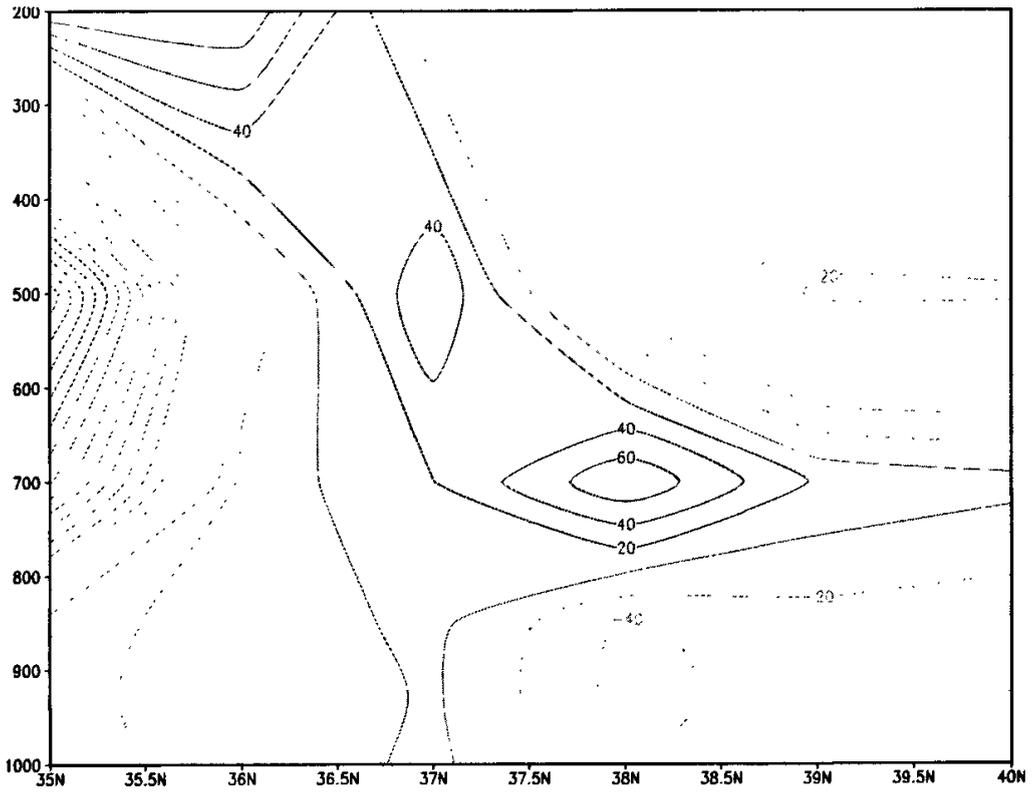


图 30 4月7日20时沿经度106E螺旋度的经向垂直剖面图

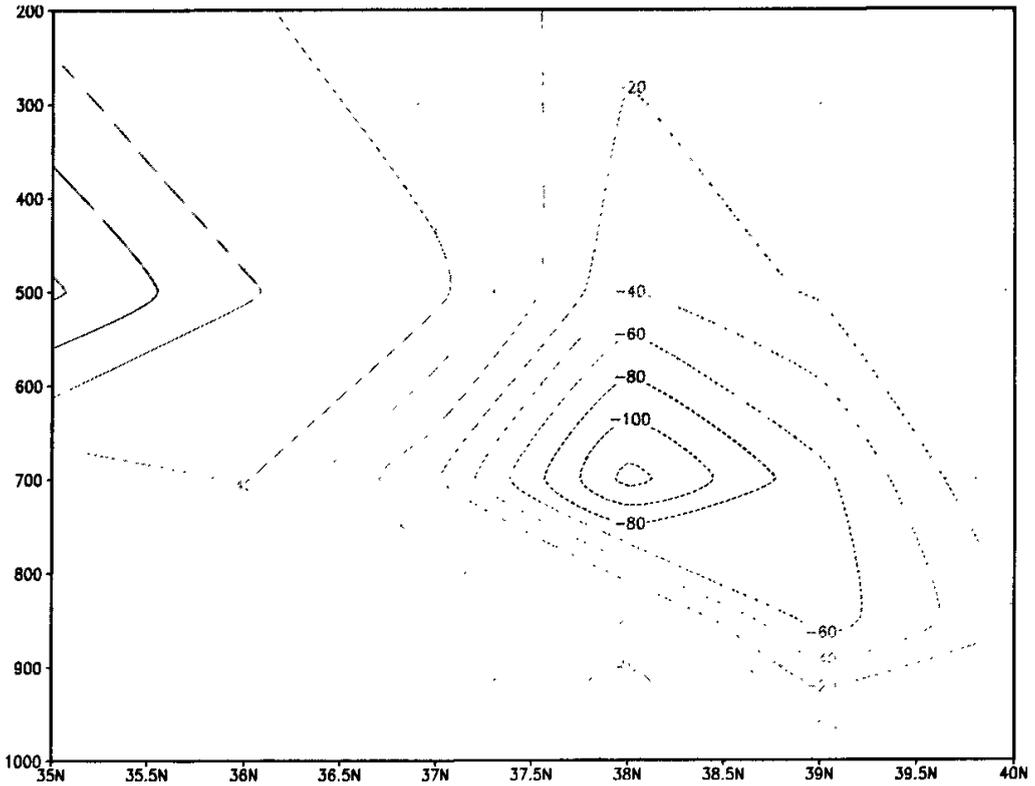


图 31 4月8日20时沿经度106E螺旋度的经向垂直剖面图

4.2 大气稳定度与 K 指数

一般而言,大气稳定度是和对流发展与否密切相关的,大气稳定度是衡量大气是否稳定的物理量。

大气中稳定与不稳定程度的强弱,通常采用测算各种稳定度指数的方法来诊断。这种指数,种类很多,各有侧重不同。这里主要讨论 K 指数的计算和应用。

K 指数定义为:

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - [T_d - T]_{700}$$

其中第 1 项为 850hPa 与 500hPa 的温度差,代表温度递减率,第 2 项为 850hPa 的露点,表示低层水汽条件,第 3 项为 700hPa 的温度露点差,反映中层饱和程度和湿层厚度。K 指数是反映中低层稳定度和湿度条件的综合指标。可见, K 指数除了表示温度垂直递减率外,还包含大气中、低层的湿度与饱和程度,它是综合垂直温度梯度、低层水汽含量和湿度厚度的一个气团物理量。显然, K 指数越大表示大气越不稳定和越潮湿。K 指数的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

下面是 K 指数的分布图,图 32 至图 35 分别是 4 月 5 日 20 时,4 月 6 日 20 时,4 月 7 日 20 时以及 4 月 8 日 20 时的 K 指数分布情况。在宁夏省境内, K 指数最大值只有 22°C 。根据 K 指数的定义,可以得知在宁夏附近的大气层结还是比较稳定,空气比较干燥。

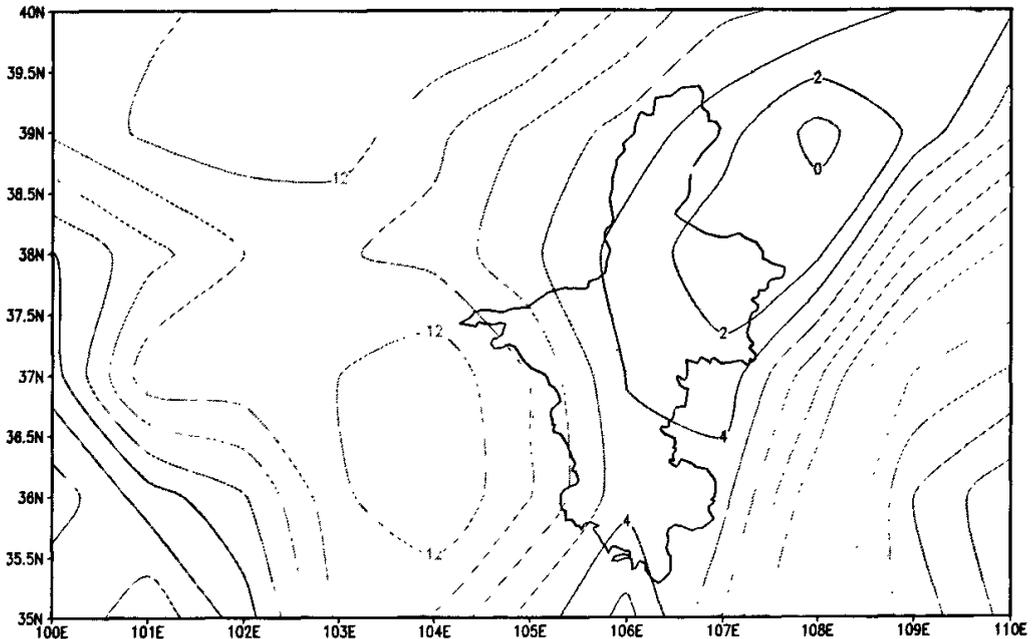


图 32 4 月 5 日 20 时 K 指数分布图

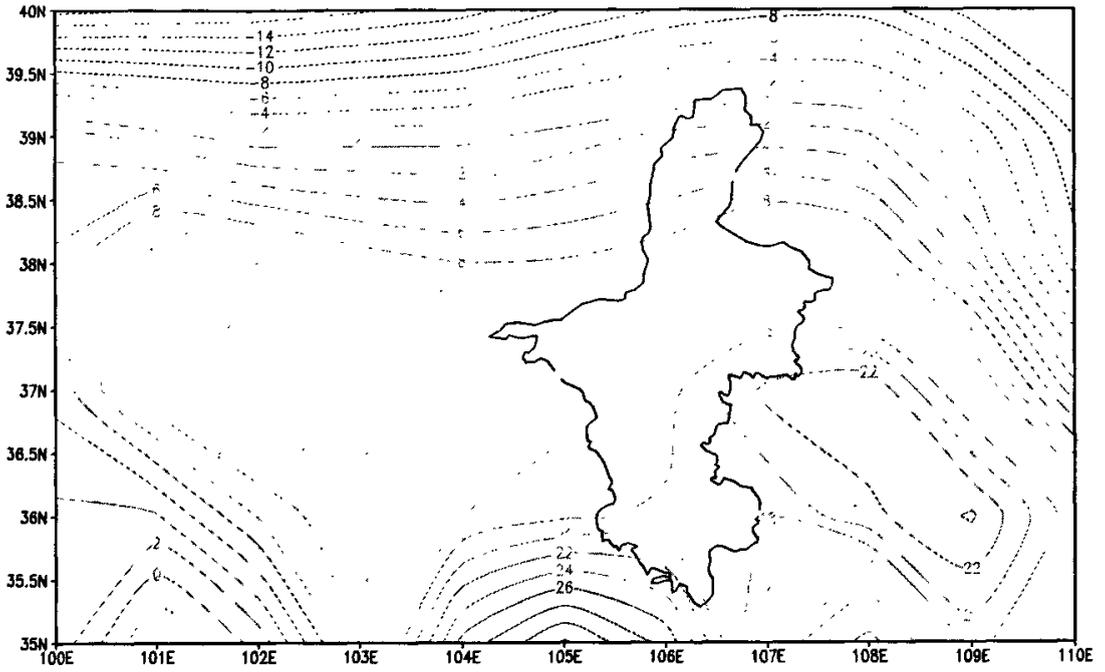


图 33 4月6日20时K指数分布图

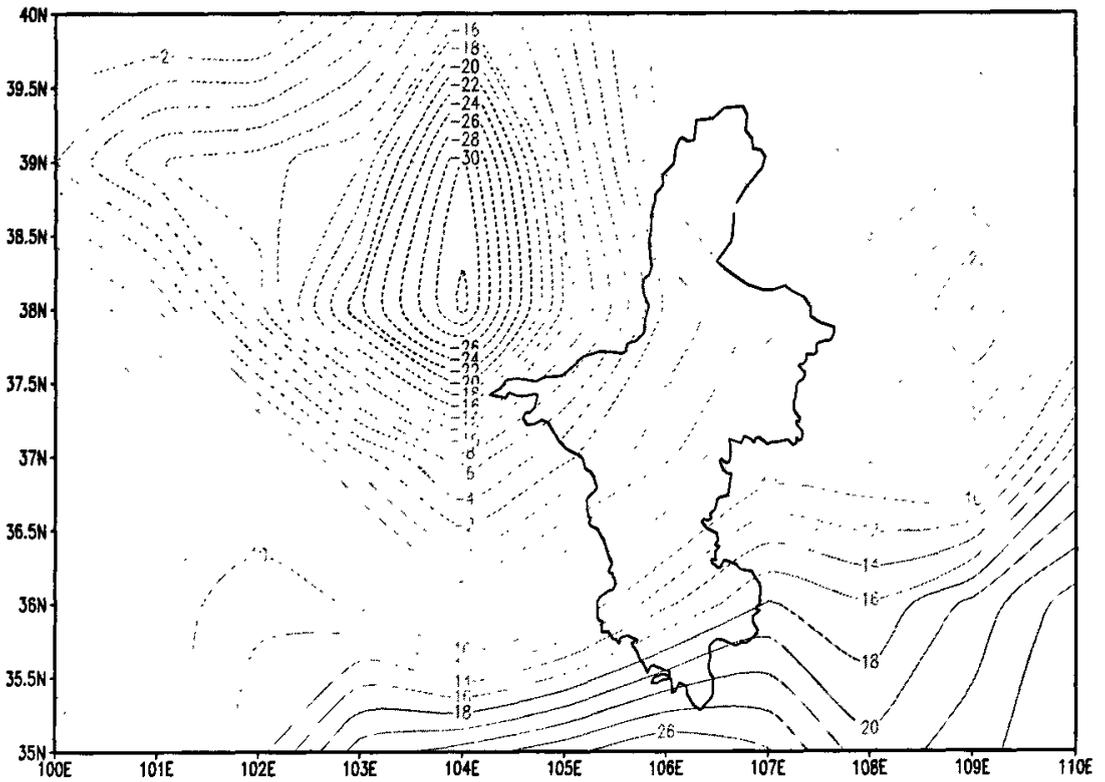


图 34 4月7日20时K指数分布图

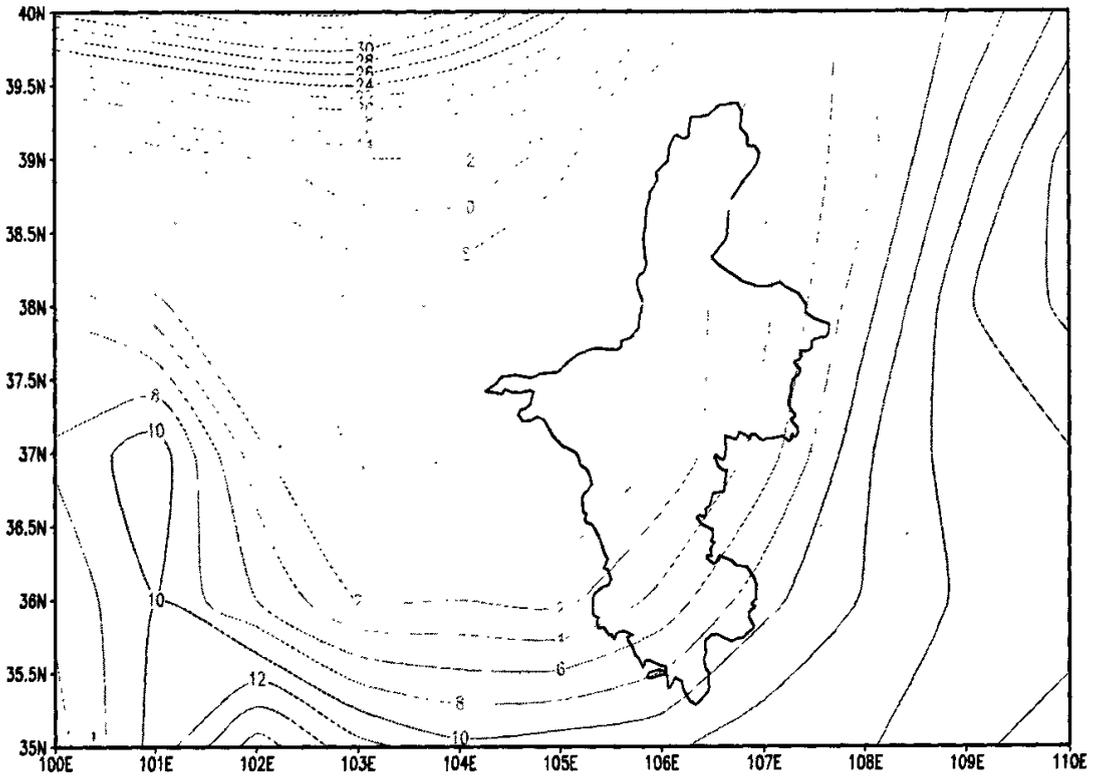


图 35 4月8日20时K指数分布图

4.3 结论

(1)螺旋度：沙尘暴区上空螺旋度垂直分布分为高层负值，低层正值。构成了低空强辐合，高空强辐散的深厚上升运动区，这样螺旋度垂直分布是十分有利于沙尘暴发展的一种形式。

(2)K 指数：宁夏附近大气层结还是比较稳定，空气比较干燥。

第五章 总结与讨论

5.1 结论

沙尘天气是半干旱、干旱和荒漠化地区特有的一种天气现象,是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和某种系统所诱发的一种小概率、危害大的灾害性天气。

宁夏地处黄土高原西北部边缘,境内地势南高北低,地表侵蚀严重。其上游甘肃河西、内蒙古一带沙漠纵横。西部有腾格里沙漠,西北部有巴丹吉林和乌兰布和沙漠,加上特殊的地理、地貌条件,每逢春季几乎都会有较强沙尘暴天气影响本区。

在介绍了宁夏沙尘暴天气一些特点的基础上,利用常规观测资料,对 2001 年 4 月以及 2005 年 4 月发生在宁夏地区的沙尘暴过程进行分析、比较,并对 05 年 4 月发生的这次沙尘暴天气过程进行了诊断分析。

通过对 2001 年 4 月 8 日天气过程与背景分析,得到如下结论:

(1) 沙尘暴发生前后,地面气象要素有很明显的变化。午后地面增温最强,大气层结不稳定度显著增大,有利于高空动量下传产生大风,为沙尘天气的发生提供了动力和热力条件。

(2) 地形的阻挡作用对冷锋和沙尘暴的移动有较大的影响。

(3) 此次过程属于西北路径冷锋后西北大风引起的沙尘暴天气。高空横槽与强锋区是激发这次沙尘暴的重要动力机制,高空急流区的形成是产生大风、沙尘暴天气的必要条件,蒙古气旋和地面冷锋是造成这次沙尘暴的主要影响天气系统。

通过对 2005 年 4 月 6 日要素特征的分析,得到如下结论:

(1) 温压场:中、低空温度槽落后于高度槽的这种斜压结构,将使该冷槽加深。槽前暖平流和 850 百帕的小低压对沙尘暴的发生有明显的指示意义。

(2) 流场:高低空之间有强烈的切变。切变发生在 500 百帕与 700 百帕之间。

(3) 散度和涡度场:低空强辐合和高空强辐散与深厚正涡度柱的耦合,是沙尘暴生成和发展的一种典型结构。

(4) 垂直速度：垂直速度一般在中空达最大。

(5) 相当位温：低空宁夏省境内相当位温锋区明显，低层存在不稳定的热力条件。

(6) 螺旋度：沙尘暴区上空螺旋度垂直分布分为高层负值，低层正值。构成了低空强辐合，高空强辐散的深厚上升运动区，这样螺旋度垂直分布是十分有利于沙尘暴发展的一种形式。

(7) K 指数：宁夏附近大气层结还是比较稳定，空气比较干燥。

对比这两次沙尘暴天气过程可以看出，二者除了冷空气的环流形势背景不同（01 年的是西北气流型的沙尘暴天气，05 年的是槽脊东移型的沙尘暴天气）以外，其余的如冷空气路径，动力以及热力条件基本相同。

5.2 存在的问题

由于时间有限，所用的资料是用 MICAPS 解开的，还存在一些问题：

- (1) 图的效果不怎么理想，这个跟资料的处理以及软件的运用有关系。
- (2) 做诊断分析的物理量太少，下一步准备做位涡以及 Q 矢量的诊断。
- (3) 没有对此次沙尘天气做模拟，这个是下一步想收集资料后准备做的事情。

参 考 文 献

- [1] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报. 1970, 37 (4): 26—35.
- [2] 王式功, 董光荣, 陈惠忠等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 349—356.
- [3] 赵兴梁. 甘肃特大沙尘暴的危害与对策[J]. 中国沙漠, 1993, 13 (3): 1—7.
- [4] 王式功, 杨民, 祁斌等. 甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响[J]. 中国沙漠, 1999, 19 (4): 354—358.
- [5] Thomas Littman T. Dust storm frequency in Asia: climatic control and variability[J]. International Journal of Climatology, 1991, 11: 393—412.
- [6] Sutton I.J. Haboob Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1925, 51: 25—30.
- [7] Idso S.B. R.S. Ingram and J.M. Pritchard ‘An American Haboob’ Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53(10): 930—935.
- [8] Brazle A.J. and W.C. Nicking The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona J. Climatology, 1986, 6(3): 255—275.
- [9] Wheaton and Chakrvariti. Dust storms in the Canadian prairies. International Journal of Climatology, 1990, 10: 829—837.
- [10] Jauregui E. The dust storms of Mexico City[J]. International Journal of Climatology, 1989, 9(2): 169—180.
- [11] 吴晓京, 陆均天等. 2001年春季沙尘天气分析. 国土资源遥感, 2001, (3): 8—10.
- [12] 高庆先, 李令军, 张运刚等. 我国春季沙尘暴研究[A]. 中国环境科学, 2000, 20 (6): 495—500.
- [13] 方宗义, 王伟. 2002年我国沙尘暴的若干特征分析. 应用气象学报, 2003, 14 (5): 514—521.
- [14] 朱福康, 江吉喜, 郑新江. 沙尘暴天气研究现状和未来. 气象科技, 1999, (4): 1—8.
- [15] 赵广平, 陈楠等. 环流及冷空气类型与宁夏沙尘暴落区的对应关系[A]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 642—645.

- [16] 张德二.我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析.中国科学(专辑)[B].1984, 27(3): 278-288.
- [17] 黄兆华.我国西北地区历史时期的风沙尘暴.中国沙尘暴研究,方宗义等编,北京气象出版社,1997: 31-37.
- [18] 石广玉,赵思雄.沙尘暴研究中的若干科学问题.大气科学,2003,27(4): 591-606.
- [19] 苟日多杰.柴达木盆地沙尘暴气候特征及其预报.气象科技,2003,31(2): 84-87.
- [20] 李林,赵强.青海沙尘暴天气研究.气象科技,2002,30(4): 218-221.
- [21] 尚可政,孙黎辉,王式功等.甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关关系[J].中国沙漠,1998,18(3) 239-243.
- [22] 李海英,高涛,薄玉华.内蒙古中西部春季沙尘暴预测初探.气象,2003,29(10): 22-25.
- [23] 顾卫,蔡雪鹏,谢锋等.植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨——以内蒙古中西部地区为例.地球科学进展,2002,16(2): 107-112.
- [24] 王式功,杨德保,金炯等.我国西北地区沙尘暴时空分布及其成因分析,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).北京:中国科学技术出版社,1995,364-370.
- [25] 全林生,时少英,朱亚芬等.中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J].地理学报,2001,56(4): 477-485.
- [26] 胡金明,崔海亭,唐志尧.中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J].自然灾害学报,1999,8(4): 49-56.
- [27] 李栋梁,钟海玲等.中国北方沙尘暴的气候特征及其对春季青藏高原地面感热异常的响应.高原气象,2003,22(4): 337-345.
- [28] 张平,杨德保,尚可政.2002年春季中国沙尘天气与物理量场的相关分析.中国沙漠,2003,23(6): 675-680.
- [29] 王式功,王金燕,周自江等.中国沙尘天气的区域特征[J].地理学报,2003,58(2): 193-200.
- [30] 史培军,严平,高尚玉等.我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[A].自然灾害学报,2000,9(3): 71-77.
- [31] 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.

- [32] 孙军, 李择椿等.西北地区沙尘暴预报方法的初步研究.气象, 2001, 27 (1): 19—24.
- [33] 赵光平, 王连喜等.宁夏区域性沙尘暴短期预报系统.中国沙漠, 2001, 21 (2): 175—181.
- [34] 夏训城, 杨根生.我国西北地区沙尘暴灾害与防治[M].北京:中国环境科学出版社, 1996, 1-50,118-126.
- [35] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章等.我国西北地区沙尘暴的分级标个例谱及其统计特征.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社, 1997, 1-10.
- [36] 徐建芬, 孙兰东, 许东蓓, 王宝鉴.西北地区一次斜压槽引发的强沙尘暴研究.甘肃气象, 2001,19(2):40-44.
- [37] 杨民, 王式功, 陶健红.新世纪第一场沙尘暴初探.中国沙漠, 2001, 21 (4):408-411.
- [38] 郑乐娟, 张慧琴, 伽帕尔.阿不都热合曼, 张宏新.吐鲁番地区一次强沙尘暴的天气分析.新疆气象, 2002, 25 (3): 16-17.
- [39] 保广裕, 高顺年, 戴升.西宁地区沙尘暴天气的环流特征及其预报.气象: 2002,28(5):27-31.
- [40] 贺哲.沙尘暴天气的成因及其天气形势分析.河南气象, 2000, 4.
- [41] 王革丽, 吕达仁, 李鸿洲.2000年4月5-7日浑善达克沙地沙尘暴天气过程分析.气象, 28 (7):13-17.
- [42] 王锡稳, 李宗义, 王宝鉴. “4. 12” 强沙尘暴中小尺度天气分析.甘肃气象, 2001,19(2):27-30.
- [43] 徐建芬, 牛志敏, 陈伟民.我国西北地区“4.5”沙尘暴天气研究.中国沙漠, 1996, 16(3) (282-287).
- [44] 刘树华.我国西北地区一次特大沙尘暴初步分析.北京大学学报, 1994, 30 (5):583-588.
- [45] 项续康, 江吉喜. 1996 西北地区强沙尘暴成因的中尺度分析.高原气象, 1996, 15 (4):448-455.
- [46] 江吉喜.1993年5月5日甘肃等地特大沙尘暴成因分析.甘肃气象, 1993;11(3):35-39.
- [47] 王可丽, 江翻, 吴虹.2001年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析.高原气象, 2002, 21 (3): 548-552.
- [48] 张玉林, 赵光平, 杨淑萍.宁夏沙尘暴形成机制的探讨和研究.中国沙漠, 1996,16(4): 351-355.

- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 程麟生等. 中国西部“93.5”黑风暴发展成因的动力诊断和中尺度数值模拟.
- [52] 惠小英. “93.5”黑风暴沙尘形成与输送的成因探讨及数值实验. 1995.
- [53] 程麟生, 马艳. “93.5”黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值实验. 应用气象, 1996, 7(4): 386-395.
- [54] 宋振鑫, 程麟生. “93.5”黑风暴扰动能源的诊断分析. 兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 116-122.
- [55] 张小玲, 程麟生. “93.5”黑风暴期间中尺度涡旋发生发展的涡源诊断. 兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 123-131.
- [56] 陈伟民, 王强, 牛志敏等. 中国西北部4.5-沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟. 中国沙漠, 1996, 16(2): 140-144.
- [57] 李艳春, 赵光平, 胡文东. 宁夏中北部地区沙尘暴天气发生过程中主要气象要素变化特征及成因分析[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 212 - 217.
- [58] 赵光平, 郑广芬, 王卫东. 宁夏特强沙尘暴气候背景及其成灾规律研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 420 - 427.
- [59] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 616 - 622.
- [60] 彭维耿, 陈楠. 宁夏多、少沙尘暴年4月平均环流特征的对比分析[J]. 高原气象, 2002, 21(6): 599 - 603.
- [61] 赵光平, 陈楠, 杨建玲等. 环流及冷空气类型与宁夏沙尘暴落区的对应关系[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 642 - 645.
- [62] 杨建玲, 何金海, 赵光平. 宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间的遥相关关系[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 296 - 307.
- [63] 赵光平, 陈楠, 杨建玲等. 宁夏中部干旱带生态变迁与沙尘暴演变趋势[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 477 - 484.
- [64] 马力文, 赵光平, 陈楠等. 宁夏盐池地区沙尘暴发生特征的统计分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 218 - 222.
- [65] 李艳春, 赵光平等. 宁夏沙尘暴天气研究进展[J]. 中国沙漠, 2001, 26(1): 137-141.
- [66] 纳丽, 郑广芬, 王卫东. 近40年宁夏春季沙尘暴分析[J]. 宁夏气象, 2003, (4): 27 - 31.
- [67] 李栋梁, 王涛, 钟海玲. 中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J]. 中国沙漠,

- 2004,24(3):377-379.
- [68] 赵红岩,陈旭辉,王锡稳,等.西北地区春季沙尘暴气候分析及预测方法研究[J].中国沙漠,2004,24(5):638-641.
- [69] 胡文东,纪晓玲等.2001年4月8日宁夏强沙尘暴天气中尺度系统分析[J].南京气象学院学报.2004,27(6):791-799.
- [70] 胡文东,高晓清.“2001.4.6”宁夏沙尘暴过程气象卫星云图分析[J].高原气象,2003,22(6):590-596.
- [71] 林本达.大气中垂直环流的成因和诊断 [M].北方天气文集 (6).北京:北京大学出版社,1987.
- [72] 郑良杰.中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟[M].北京:气象出版社,1989.
- [73] LillyD K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean flow. J Atmos Sci,1986,43: 113~125.
- [74] LillyD K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization. J Atmos Sci,1986,43: 126~140.
- [75] Etling D. Some aspects of helicity in atmosphere flows.Beitr PhysAtmos,1985,58: 88~100.
- [76] WuW S,LillyD K, KerrRM. Helicity and thermal convectionwith shear. J Atmos Sci,1992,49:1800~1809.
- [77] 伍荣生,谈哲敏等.广义涡度与位势涡度守恒定律及应用 [J].气象学报,1989,47(4):436~442.
- [78] Tan Zhe min,Wu Rongsheng. Helicity dynamics of atmospheric flow. Adv At mos Sci, 1994, 11(2): 175-188.
- [79] 刘式适,刘式达等.大气运动的螺极分解及 Beltrami 流 [J].大气科学,1997,21(2): 151~160.
- [80] 陆慧娟,高守亭等.螺旋度及螺旋度方程的讨论[J].气象学报,2003,61(6): 685~691.
- [81] 杨越奎,刘玉玲,万振拴等.“91·7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析[J].气象学报,1994,52(3): 379~384.
- [82] 李英.春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析[J].南京气象学院学报,1998,22(2):164~169.
- [83] 陈华,谈哲敏等.热带气旋的螺旋度特性[J].热带气象学报,1999,15(1):82~85.

- [84] 谭志华,杨晓霞等.“99.8”山东特大暴雨的螺旋度分析[J].气象,2000,26(9):7-11.
- [85] 侯瑞钦,程麟生,冯伍虎等.“98.7”特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断[J].高原气象,2003,22(2):203-205.
- [86] 刘惠敏,郑兰芝等.螺旋度诊断分析与短时强降水雨量预报[J].气象,2003,28(2):37-40.
- [87] 郑传新.0103 号和 0104 号台风暴雨过程的螺旋度和位涡分析[J].广西气象,2002,23(2):7-8.
- [88] 李耀辉,寿绍文等.旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用 [J].南京气象学院学报,1999,22(1):95-102.
- [89] 寿绍文,励申申,姚秀萍等.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003.

在学期间的研究成果:

万明波,程智,王文.青藏铁路沿线气温和降水的小波分析[J],干旱气象,2006,24(4):35-39.

致 谢

转眼之间，三年的研究生学习阶段即将接近尾声，在这里我要感谢我的导师王文副教授。论文是在导师的悉心指导下完成的，导师渊博的学识，朴实的工作作风，严谨的治学态度，宽厚的待人方式，给我留下了深刻的印象，每一次的面授尤为珍贵，跟导师的每一次交流，都给我很大的帮助和启迪，使我终身受益，感谢王老师。

衷心感谢院办公室鲍宏老师，鲍老师对待工作和生活的态度使我受益匪浅。

好友邱晓滨，刘新伟，他们在资料处理上给了我莫大的帮助和支持，在此向他们表示感谢。

感谢邓涛，张德，王金成，师锐，王素萍，王文强，王音淇，王娜，宋薇，韩宵，丁小俊在论文期间的关心和帮助。

特别感谢我的父母和家人，求学生涯中他们始终不渝的理解和支持是我永远的精神支柱。衷心感谢在三年的学习和生活中，给予我帮助的每一个人，谨向他们致以崇高的敬意和诚挚的感谢！

万明波

2007年5月于兰州