

南京信息工程大学

硕士学位论文

近2年较强沙尘暴过程诊断及数值模拟研究

姓名：王丽娟

申请学位级别：硕士

专业：气象学

指导教师：寿绍文;王坚红

20100501

中文摘要

本论文对近两年两次发生在我国北方的强沙尘暴进行了研究,通过全面的诊断分析和数值模拟,揭示了沙尘暴天气影响系统的复杂性,力图揭示一些强沙尘暴发生发展的天气背景和特征,为实际的沙尘暴预报提供一定的参考依据。

首先本文介绍了国内外对沙尘暴的研究。然后利用常规观测资料对 2009 年春季 4 月 22~24 日的强沙尘暴过程的近地面气象要素(气温、气压、风速)变化特征和观测 PM10 进行分析,在此基础上对其天气学成因进行诊断分析,最后用 MM5 模式进行了数值模拟。结果表明:沙尘暴过程前后温、压和风速有剧烈变化;PM10 与沙尘暴强度之间有很好的对应关系;蒙古气旋和冷锋是这次强沙尘暴的主要影响系统。数值模拟显示,利用 MM5 模式能较为准确的模拟高空和地面气旋的演变,对地面造成沙尘的强风系统有较好的模拟能力。

其次采用沙尘天气数值预测系统对 2009 年 4 月 22 日~24 日发生在我国广大区域的强沙尘暴过程进行数值模拟,采用模拟结果对地面沙尘浓度的空间分布和起沙分析。结果表明:此次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是南疆塔里木盆地、甘肃、内蒙古的西部及蒙古国南部;不同地区起沙过程贡献最大的沙尘粒子的粒径不尽相同,起沙量贡献最大的是粒径在 $2\mu\text{m} < d \leq 11\mu\text{m}$ 的沙尘粒子;此次过程沙尘被垂直输送的高度在 550hPa 以下;沙尘输送白天强于晚上,起沙后的沙尘粒子的输送主要靠对流层中低层的大风来输送。

最后分别选取具有代表的 2008 年 5 月 26~28 日和 2009 年 4 月 23~25 日这两次强沙尘暴就天气过程形势、影响系统以及起沙、沙尘输送和沉降进行对比分析发现:沙尘暴前期均具有温高雨少,部分地区干旱甚至重旱。这两次由蒙古气旋冷锋引发强沙尘暴过程中始终伴有高空急流,它有利于气旋的发展;气旋发展初期和发展成熟期温度平流均为气旋发展的主要因子,涡度平流也起了作用;两次过程气旋发展最旺盛的时刻,都存在高低空位涡大值区相接的位涡柱,高低空系统有明显的相互作用。08 年这次过程沙尘靠对流层低层风速长距离的输送,大部分大量沉降,而 09 年这次过程大风将沙尘远距离的输送,影响下游我国的南方部分地区。

关键字:沙尘暴, 诊断分析, 数值模拟, PM10

Abstract

Serious dust storm of the past two years in northern China was studied in the thesis. This paper revealed the complexity of sandstorm weather system through comprehensive diagnostic and numerical simulation and attempted to reveal some weather background and characteristics of the strong dust storm development. The above can provide a practical reference for the real sandstorm forecast.

Firstly, domestic and abroad studies on dust storm are introduced, and then the relationship between the meteorological variables at surface, PM10 and the intensity of dust storm from April 22, 2009 to April 24, 2009 are analyzed. Based on the analysis of synoptic causes on this dust storm, the numerical simulation with nonhydrostatic MM5 model for this case is conducted. The results show that Mongolian cyclone and its cold front are the main system producing the strong dust storm. The temperature, surface pressure, wind and PM10 are closely related to intensity of the dust storm. And numerical simulation results show that the MM5 model can simulate the development of low vortex in the upper tropospheric and surface cyclone; it can also simulate the strong wind which caused the dust storm.

Secondly, this paper dose a numerical simulation on the strong dust storm process which taken place in the vast region from April 22, 2009 to April 24, 2009 by using an integrated dust storm numerical modeling system, and dose some analysis on the spatial distribution and sand analysis of ground dust concentration. The result shows that the dust emission areas are Tarim Basin, Gansu province, western Inner Mongolia and southern Mongolia. The particle size which contributes significantly to the dust emission is different due to the variety of land, however, the quantities of particles with diameter from 2 μ m to 11 μ m is predominated. It is also noticed that the dust could be transported vertically up to 550hPa, and transport in daytime is stronger than evening. Sand dust particles transportation depends mainly on the lower tropospheric winds to transport.

Finally, we select a representative of May 2008 26~28 and in April 2009 23~25, and use these two strong dust storm to conduct comparative analysis. Weather process, dust transportation and deposition are analyzed. The results show that these two strong dust storms triggered by a Mongolian cyclone are always accompanied by

the upper-level jet, which is conducive to the development of cyclone. Temperature advection and vorticity advection play an important role in Mongolian cyclone development. The potential vorticity analysis shows that there are high value areas of the potential vorticity, in other words, the potential vorticity column link with upper and lower troposphere during strong period of cyclone development. Also show that there are distinct interactions between systems of the upper and lower troposphere. In 2008, this process of dust transports through the lower troposphere wind speed with long-distance, most of the dust deposition. While in 2009, the process of high wind deliveries the dust with a long-distance has affected the downstream of some areas of southern China. In the last chapter, the main conclusions are given.

Keywords: Dust storm, diagnostic Analysis, numerical simulation, PM10

学位论文独创性声明

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： 王丽娟

签字日期： 2010.6.3

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部办理。

☐ 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： 王丽娟

签字日期： 2010.6.3

指导教师签名： 程石文

签字日期： 2010.6.5

第一章 绪论

1.1 前言

沙尘暴的产生通常要满足以下 3 个条件：丰富的沙尘源、强风和不稳定的大气层结。强风是沙尘暴产生的动力，沙源是物质基础，不稳定的热力条件更利于风力加大、对流发展。而蒙古气旋的活动范围正是东亚地区几大沙漠、沙地、戈壁之所在，这里有丰富的沙源，且由于春季北方地面升温迅速、大气干燥，使得地表土质疏松，起沙要求的临界摩擦速度降低，因此，只要在气旋发展过程中配合有利的物理条件就可能引发沙尘暴。目前，对于蒙古气旋已有一些研究的结果表明，造成不同强度沙尘天气的原因比较复杂。我国北方地区沙尘天气较多，扬起的沙尘能输送到日本、北太平洋以及更远的地方^[1]。观测和研究表明，近年来中国发生的沙尘暴的次数在减少，但强和特强沙尘暴却呈现增加趋势^[2]。沙尘暴已经引起了国内外的广泛关注。从 2000 年 1 月到 2009 年 5 月 26 日这 9 年多共有 147 次沙尘天气，其中 54 次强度达沙尘暴以上的天气^[3]。沙尘暴天气，特别是强沙尘暴，具有风沙大，影响范围广，破坏力强等特点，不仅污染了空气，危害了交通，损害了公物，更是加大了沙化土地，破坏了气候环境，可以说沙尘暴天气带来的重要影响是不容忽视的。

气象上沙尘的定义如下：浮尘、尘土、细沙均匀的浮游在空中，水平能见度小于 10 公里天气现象；扬沙：风力较大，风将地面沙尘吹起，使得空气混浊，水平能见度 1~10 公里的天气现象；沙尘暴：强风将大量地面沙尘卷入空中，使得空气特别混浊，水平能见度小于 1 公里的天气现象；强沙尘暴：大风将地面沙尘吹起，空气非常混浊，水平能见度小于 500m 的天气现象。

1.2 国内研究进展

我国对于沙尘暴的研究始于 20 世纪 70 年代，目前我国沙尘暴的研究主要有以下几个方面：（1）有关沙尘暴的天气，气候特征研究；（2）沙尘暴天气的天气分析；（3）沙尘暴天气系统的数值模拟研究；（4）有关沙尘起沙起尘、传输、沉降的数值模拟研究。

1.2.1 有关沙尘暴的天气、气候特征研究

关于沙尘暴气候学的统计研究工作有很多,这方面的研究主要利用大量沙尘暴的个例资料对沙尘暴发生时的气象要素的变化进行研究;对沙尘暴的发生时间、空间分布以及变化作出分析,从而对沙尘暴发生的时空变化、成因以及趋势作出预测。

● 沙尘暴天气来临时,气象要素的变化特征

已经有研究表明,当沙尘暴发生时,单站气象要素会发生剧烈的变化。气压上升,气温剧降,湿度上升,能见度下降,风速增大。对于春季沙尘暴过境时地面气象要素的响应研究较多^[4,5],胡泽勇等^[4]分析 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素变化指出,沙尘暴天气来临前夕,地面空气呈干热状态,处于低气压控制之下,这有利于把大量沙尘扬起,而在沙尘暴过境时和过境后,地面空气显得相对湿冷,地面气压急剧上升,并处于高压控制之下。可以看出,春季沙尘暴过境时气象要素具有气压跃升、风速猛增、气温下降和湿度增加等特征。

● 我国沙尘暴的时间、空间分布特征

我国沙尘暴主要发生在与北方沙漠及沙漠化土地相联系的极干旱、干旱和半干旱区内^[6]。其中西北、华北大部、青藏高原和东北平原地区沙尘暴年发生日数一般超过 1d,是沙尘暴的主要影响区,110° E 以西、天山以南大部分地区沙尘暴超过 10d,是沙尘暴的多发区;塔里木盆地及其周围地区、阿拉善和河西走廊东北部是沙尘暴的高频区达 20d 以上,局部接近或超过 30d,如新疆民丰 36d、柯坪 32d、甘肃民勤 30d 等^[2]。

1.2.2 有关沙尘暴的天气学分析研究

天气系统也是造成沙尘暴天气的原因之一,方宗义^[7]等人对 2002 年 3、4 月我国沙尘暴发生的环流形势特征分析表明,东亚大槽发展和加深是造成该年沙尘暴偏北路径多的主要成因,并且是影响华北、东北甚至华中的一种主要环流形势。东北低涡维持期间生成的副冷锋次天气尺度系统,可以产生强局地沙尘暴,王锡稳^[8]对 2003 年 7 月 20 日甘肃河西走廊一次历史上少见的区域性夏季沙尘暴天气分析发现:高空小槽、切变线、热低压是引发夏季沙尘暴的主要系统。屠妮妮等^[9]对造成 2002 年 4 月 5~9 日东亚地区一次引发强沙尘暴天气

过程的蒙古气旋发生发展过程进行了动力学分析,研究表明:引发本次强沙尘暴过程的蒙古气旋是在有利的大尺度环境、高空急流和强垂直风速切变的条件下生成,蒙古气旋的生成、发展和加深过程加剧了锋区前后的气压、温度梯度,形成了锋区前后的强温、压力梯度。在动量下传和梯度偏差风的共同作用下,地面湍流加强,使近地层风速陡升,造成起沙,形成此次沙尘暴或强沙尘暴天气。东亚大槽是容易产生沙尘暴的行星尺度大气环流系统之一。因受高空波动及下垫面的影响,近地面大气环流往往表现出季节性或全年性的高压或低压系统,如西伯利亚高压和印度低压。在冬季海平面气压图上,整个亚洲大陆几乎全为西伯利亚高压(蒙古高压)控制。包括西北和内蒙古在内的我国大部分地区气候都受其显著影响,当高压强时,冷空气活动频繁,强度大^[10]。这样易出现沙尘暴爆发的高峰期。

1.2.3 有关引发沙尘暴天气系统的数值模拟研究

由于数值模式能对大气的动力和物理过程有较好的描述,其成为沙尘暴研究的一种重要手段。沙尘暴数值模拟研究主要有两个方面的内容,一是对引发沙尘暴天气的天气系统的数值模拟,二是对沙尘的起沙、传输和沉降的模拟,其中一些是仅用于研究的,用于业务的沙尘暴数值模拟系统还不多见。为了研究实时预报沙尘天气的起沙和输送过程,赵琳娜等发展了耦合精度较高的地理信息数据、具有风蚀物理学基础的起沙模式^[11,12]与中尺度气象模式 MM5 的沙尘暴数值预报模式系统(IAPS1.0)^[13,14]。雷航等^[15]在 IAPS1.0 的基础上选用了更为先进的陆面模式(Noah LSM),发展了新的中国科学院大气物理研究所沙尘(暴)数值预测系统(IAPS2.0)。孙建华等^[16]利用该系统对 2006 年春季一次在华北地区发生强沉降的强沙尘暴过程进行了模拟研究,结果表明该沙尘天气预测系统对此次强沙尘暴过程的起沙和输送过程有较好的模拟能力,基本模拟出了这次强沙尘暴的发生和移动,并且模拟出了沙尘受到对流层中低层偏西风的作用输送到华北沉降的过程。

1.2.4 有关沙尘起沙起尘、传输、沉降的数值模拟研究

关于起沙、沉降、的数值模拟的研究,我国起步较晚,纪飞等^[17,18]在有限区域模式 MM4 的基础上,发展了一个沙尘暴传输模式,对模式的源汇的处理做了考虑。利用该模式模拟了一个发生在东亚的沙尘暴的天气过程,得到了沙

尘暴的起沙、传输沉降的具体特征。分析了粒子浓度随时间的变化，并将模拟结果与同期的实际观测比较，证明该模式对沙尘天气过程有较好的模拟能力。

孙建华等^[14]将澳大利亚南威尔士大学（UNSW）邵亚平发展的具有清晰物理学概念的起沙数值模式、输送模式与 PSU/NCAR 的中尺度气象预报模式 MM5 进行耦合，以高精度中国区域的 GIS 数据为基础，建立了一个较完整的沙尘暴起沙和输送过程的预测系统。并采用该系统对 2002 年 3~4 月 3 次影响我国北方大部分地区的沙尘（暴）天气的起沙和输送过程进行了模拟实验。结果表明，模拟的沙尘浓度与地面天气现象及卫星云图的沙尘天气范围比较一致，预测系统对沙尘天气的起沙和输送过程有较好的模拟能力。起沙中贡献最大的粒子粒径为 $2\sim 11\mu\text{m}$ 和 $11\sim 22\mu\text{m}$ ，能够长时间、长距离输送的沙尘也是上述大小的粒子，沙尘粒子的垂直输送高度一般在 500hpa 以下。

孙建华、赵琳娜等^[19]对 2006 年春季 4 月 16~17 日利用沙尘天气预测系统（IAPS 2.0）对该次强沙尘暴过程进行了模拟试验，基本模拟出了这次强沙尘暴的发生和移动。模拟结果表明：沙尘受对流层中低层偏西风的作用输送到华北及其以东地区；主要的沙尘源地是蒙古国南部和我国西北的内蒙古、新疆西部、甘肃、陕西北部，而起尘最大的地区在蒙古国和内蒙古的沙漠、戈壁地区；沉降最严重的地区是沙尘源区及其附近，可达到 $50\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，其他地区的总沉降量在 $10\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。

1.3 国外研究进展

国外对沙尘暴的研究起步比较早。20 世纪 20 年代 Hankin^[20]首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了研究。随后 Idso、Joseph^[21,22]先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴的湿度场地差异，沙尘暴的平均风速以及发生发展的地理区域和频数做了多方面的研究。Joseph 对印度西北部“*Andhi*”型对流沙尘暴的研究结果表明，当沙尘暴过境时，能见度可由 3Km 迅速降低到 200m，甚至 100m，风速可由 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 猛增到 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，气温降低 5°C 左右，相对湿度增加 10% 以上。在 1976 年 5 月 20 日的一次沙尘暴过程中，印度的德里机场在两分钟左右的时间内，能见度由 4000 多米迅速降到 280m；温度从 38°C 迅速降到 25°C ，相对湿度从 31% 快速上升到 70%，风速达到 73-80km/hr，有关对波斯湾和阿拉伯湾地区春季沙尘暴的研究结果^[23]表明，上述几种气象要素也有类似的变化特征。80 年代以来，Brazel^[24]分析了美国亚利桑那州 1965~1980 年期

间沙尘暴爆发时各种环流系统特征,指出形成沙尘暴有锋面系统、雷暴对流、热带扰动和高层切断低压 4 种环流系统类型。Ott^[25]曾利用卫星资料对撒哈拉沙尘暴的爆发作过分析。

沙尘暴的时空分布特征,一直是科学研究的一个重要内容。Jauregui^[26]对墨西哥城的沙尘暴的时空分布做了系统研究, Gelllette^[27]研究了美国由于风蚀引起的沙尘的时空变化, Snow^[28]对美国墨西哥沙尘暴的时空分布用详细的观测资料进行了分析研究。Littmanhn^[29]研究了亚洲沙尘暴的时空分布。

此外,利用数值模拟的方法对研究沙尘暴起沙的做法也渐渐发展起来,越来越得到广泛应用。Marticorena 和 Bergametti^[30]将他们设计的起沙方案,用于模拟撒哈拉地区沙尘暴天气的起沙过程。近年来随着对土壤风蚀过程认识的不断加深, Shao^[31]采用集成的沙尘天气预报系统对亚洲东北部 2002 年 3 月和 4 月进行实时预报,并把预报结果与观测的 TSP 浓度和能见度反演的浓度对比,检验模式结果的准确性。Soon-Ung Park, Eun-Hee Lee^[32]利用改进了土壤粒径分布资料的 Asian Dust Aerosol Model (ADAM) 模式对韩国 2002 年 3 月的沙尘天气进行模拟,并把结果与单站观测的光谱质量浓度进行定量比较,更能反映模式结果的特点。

20 世纪 80 年代以来,一些学者开始采用数值模拟的方法研究沙尘气溶胶的输送、沉降问题。SCHUTZL^[33]发展了一个二维稳态沙尘输送模式,研究了撒哈拉地区沙尘在赤道大西洋上空的远距离传输。WESTPHAL^[34,35]等在 1987 年将 NCAR 的有限区域动力模式和 NASA 的气溶胶远距离传输模式相结合,发展成二维动力沙尘输送模式,并且后来发展成三维模式。Tegen^[36]运用所建立的全球三维沙尘输送模式成功模拟出全球沙尘季节分布特征。Ginoux^[37]利用全球臭氧化学气溶胶辐射与传输模式 (GOCART) 模拟粒径在 $0.1\sim6\mu\text{m}$ 的粒子起沙传输和沉降过程,用模拟结果的大气柱沙尘浓度量计算了大气光学厚度,并与 NOAA 的 AVHRR 气溶胶光学厚度的卫星遥感资料进行对比,模式模拟的结果与观测基本一致,但模拟结果较观测偏大。

1.4 本文研究的资料来源、方法和目的

(1) 资料和方法 在沙尘暴的大气环流和天气形势分析方面,使用了常规的地面观测资料、沙尘(暴) PM₁₀ 观测资料和 NCEP 的再分析资料。

本论文使用的沙尘暴数值预报模式系统是由孙建华等人发展的新的沙尘

(暴)数值预测系统(IAPS2.0),该模式包含了更为先进的陆面模式(Noah LSM)MM5 系统与邵亚平发展的起沙模式和输送模式耦合。

(2) 目的 沙尘(暴)的形成和输送的机理方面还有许多问题没有搞清楚。目前,在荒漠化预防和治理工作中也迫切需要解决这些问题。因为,东亚沙尘暴既是一种天气现象,又是一个生态环境问题。对沙尘暴形成机理和预测方法的深入研究,有利于政府部门协调人类可持续发展中的一些问题,也为气象部门提高对沙尘暴的监测预报服务水平提供了新的手段和依据。

关于沙尘暴的研究比较分散,关于沙尘暴的起沙过程的定量化研究很少,而作为沙尘天气数值预报的基础,对沙尘过程起沙、输送和沉降的定量研究尤为重要。本论文对近 2 年产生沙尘暴的气候背景、天气形势进行了诊断分析,对沙尘暴过程起沙、输送和沉降进行定量化数值模拟,揭示影响沙尘暴的天气系统发展机制、沙尘源地分布、沙尘空间分布和演变特征,以及沙尘沉降的一些特点,为进一步了解沙尘天气的起沙和输送机制做一些有益的尝试。

1.5 本文研究的方法和主要内容

本论文对近两年 2 次强沙尘暴天气气候特征研究的基础上,通过全面的诊断分析揭示沙尘暴的天气成因和主要影响系统的特征,通过详细、全面的数值模拟对起沙和输送定量的模拟研究。

本研究主要从以下几方面展开工作:

(1) 通过对 2009 年 4 月发生在我国的北方几次强沙尘暴过程利用客观分析与诊断方法,对几次沙尘暴过程进行全面的诊断分析,揭示造成沙尘的天气系统相关要素和物理量的时空分布特征,以及沙尘天气发生有利的气象环境条件。

(2) 利用数值模拟方法,对引发沙尘暴的蒙古气旋以及起沙、输送、沉降过程的数值模拟研究。

(3) 分别选取具有代表的 2008 年和 2009 年两次强沙尘暴来进行对比分析。就干旱气候背景、天气过程形势、影响系统以及起沙、沙尘输送和沉降进行对比分析。

本论文主要包括如下几个部分:

第一章 绪论

第二章 2009 年 4 月北方一次强沙尘暴过程的天气特征分析

第三章 一次强沙尘暴天气过程的起沙、输送和沉降的数值模拟研究

第四章 2008 年和 2009 年两次最强沙尘暴的诊断、模拟对比分析

第五章 结论和讨论

第二章 2009 年 4 月北方一次强沙尘暴过程的天气特征分析

关于引发沙尘暴的天气系统已经有了一些研究,不同的地区沙尘暴的影响系统也不相同。王式功等^[38]研究了我国西北地区几次大范围强或特强沙尘暴天气过程,指出易产生沙尘暴的主要环流形势和天气系统有:经纬环流调整、冷锋活动、低空东风急流和中尺度系统等。张高英等^[39]的分析指出2000~2002年春季(3~5月)中国北方的12次强沙尘暴天气过程有11次与蒙古气旋有关。刘景涛等^[40]分析了2001年4月6~7日中国北方强沙尘暴过程,指出蒙古气旋强烈发展是形成这次强沙尘暴的主要环流系统。

本文首先对2009年春季4月22~24日发生的强沙尘暴过程的影响系统、发生沙尘暴地区的气象要素以及沙尘浓度PM₁₀的变化进行分析,然后对引发此次过程的蒙古气旋进行热力和动力的诊断分析。在此基础上利用MM5模式模拟此次过程高空和地面的环流形势,通过研究为沙尘暴天气的预报提供参考依据。

2.1 资料及过程概况

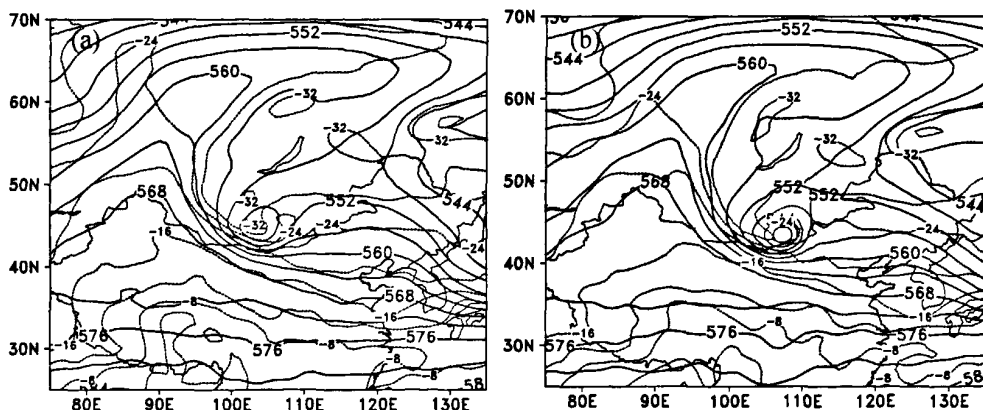
本文研究所用的资料包括每天共4次 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ NCEP再分析资料;地面每3h一次的观测资料,每小时一次的自动气象站资料。沙尘定量观测资料采用器测能见度,PM₁₀浓度以及卫星遥感监测图像。为方便叙述,文中的时间均采用世界时。

2009年4月23~25日,我国出现2009年的第6次、也是该年最强的一次沙尘天气过程。这次沙尘暴的特点是:强度大、范围广、持续时间长。4月23日凌晨至24日早晨,内蒙古中西部、甘肃中西部、宁夏、陕西北部、山西中北部、新疆南疆盆地等地出现扬沙或沙尘暴,甘肃中西部、内蒙古中西部的局部地区出现了强沙尘暴,其中甘肃敦煌出现特强沙尘暴。24日白天,沙尘影响的区域继续东移南下,河北中南部、山东北部、河南东北部及渤海湾等地上空都出现了浮尘或扬沙天气。这里主要分析的时段为4月22日12时~24日12时。

2.2 沙尘暴过程的天气形势和观测分析

2.2.1 高空环流形势

2009 年 4 月 22~24 日 500 hPa 高空环流形势(图 2.1)显示, 22 日 00 时弱高压脊位于 90°E 以西的新疆北部和哈萨克斯坦地区, 贝加尔湖地区为一切断低压, 其中心强度为 5400gpm (图略)。22 日 12 时(图略)是两槽一脊的环流形势, 贝加尔湖的切断低压中心南移到蒙古北部, 中心高度为 5400gpm 的冷涡(50°N, 105°E)稳定维持, 伴随有-34℃的冷中心; 贝加尔湖以西的高压脊稳定少动, 影响着新疆及其以北地区。22 日 18 时(图 2.1a), 蒙古冷涡逐渐南压东移, 贝湖高压脊东移北进, 西西伯利亚冷低压略有北抬; 温度场落后于高度场, 位于蒙古国西南部的槽后有明显的冷平流使得蒙古冷涡加强南压。23 日 00 时蒙古冷涡中心高度 5440gpm, 贝湖高压脊继续北伸(图 2.1b)。高压脊不断向北发展, 在 23 日 12 时(图略)开始分裂成两个主体, 分别在西西伯利亚和贝湖以东形成阻高, 23 日 18 时(图 2.1c)阻高加强形成闭合中心, 蒙古冷涡继续东移。在 24 日 00 时中心强度有所减弱(图 2.1d)。蒙古冷涡的东移, 此次沙尘天气过程均发生在槽前。正是这个不断南压的低压槽造成了本文讨论的沙尘天气过程。



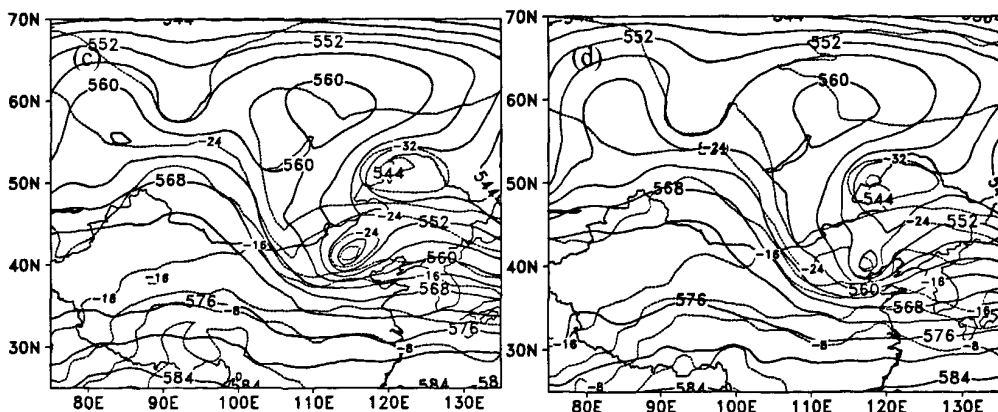


图 2.1 2009 年 4 月 22 日 18 时~24 日 00 时 500 hPa 高度场（实线，单位：10gpm）和温度场（虚线，单位：℃）（a）22 日 18 时；（b）23 日 00 时；（c）23 日 18 时；（d）24 日 00 时。

2.2.2 地面天气系统

分析造成 2009 年 4 月 22~24 日沙尘暴的天气过程的地面影响系统，首先分析海平面气压场的演变。22 日 18 时（图 2.2a）中心位于 43°N , 107°E 的蒙古气旋，中心气压达 1000hPa。此时地面冷锋后出现大范围的大风区，最大风速达到 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此时蒙古国南部的戈壁地区出现了强沙尘暴天气，对我国的影响很小。23 日 00 时（图 2.2b），蒙古气旋东移到蒙古国的东南部，发展到最强，中心气压达 997.5hPa。此时冷锋前后有 -4hPa 和 $+12\text{hPa}$ 的 3h 变压中心，较强的气压梯度，导致地面大风。此时地面沙尘观测我国共有 57 个站出现沙尘天气，其中 16 个站达到沙尘暴、强沙尘暴。其中敦煌能见度仅有 400m，风速超过了 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。23 日 06 时（图 2.2c），蒙古气旋受到高空冷涡的冷空气引导东移，气旋中心位于 43°N , 113°E 。冷锋东移，前后有 -5hPa 和 $+10\text{hPa}$ 的 3h 变压中心，蒙古气旋西部出现 $24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速大值。风速的增强和大范围大风区的形成使沙尘的范围加大，甘肃中部、宁夏、内蒙古中部和陕西北部大部分地区均出现沙尘天气，该时次地面沙尘观测我国共有 137 个站出现沙尘天气，其中 33 个站达到沙尘暴、强沙尘暴。23 日 12 时（图 2.2d），蒙古气旋中心位于内蒙古苏尼特左旗附近，强度减弱为 1007.5hPa。南疆低压不断南压，强度也开始减弱，沙尘天气减弱。同时次地面沙尘观测我国仅有 15 个站达到沙尘暴、强沙尘暴，大部分地区是浮尘、扬沙天气。24 日开始蒙古气旋逐渐消亡，沙尘暴逐渐消失。此次过程强沙尘暴主要出现 23 日。上述分析表明：沙尘暴的强度，范围与蒙古气

旋的发展和移动有着密切的关系,强沙尘暴主要出现在冷锋前后的气压梯度区和平均风速超过 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风区,说明气压梯度造成的超地转偏差在大风的形成中起了很重要的作用,大风为此次沙尘暴提供了动力因子。

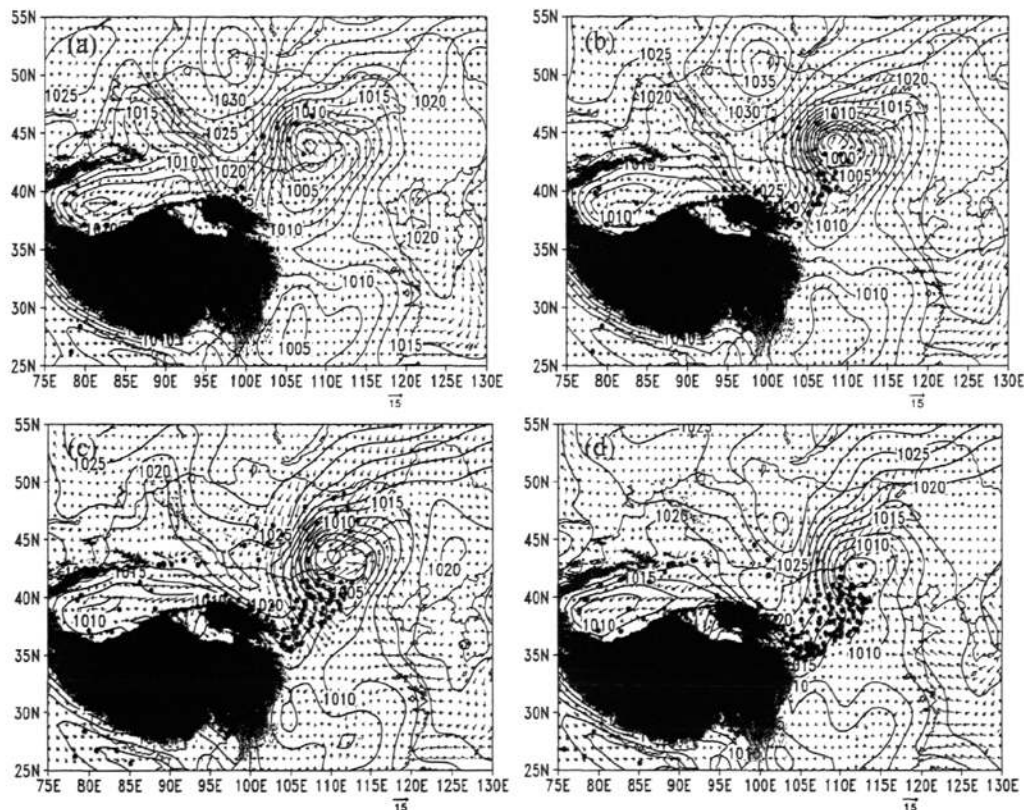


图 2.2 2009 年 4 月 22 日 18 时~12 时地面天气图,实线为海平面气压(单位: hPa),圆点为有沙尘天气(浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)出现的测站 (a) 22 日 18 时; (b) 23 日 00 时; (c) 23 日 06 时; (d) 23 日 12 时。阴影地区地形高度大于 3000m。

2.2.3 单站气象要素和观测 PM₁₀

已有研究表明,沙尘暴过境时气象要素的变化较明显,但不同的天气系统其变化特征有较大不同,分析地面气象要素的变化对于判断沙尘暴的天气过程特征有重要意义。根据逐日 8 个时次的地面沙尘观测,23 日凌晨开始,甘肃省西北部出现沙尘暴天气,其中玉门、景泰、白银等地出现沙尘暴,民勤和敦煌达强沙尘暴。图 2.3 是 2009 年 4 月 22 日 12 时~24 日 12 时民勤、额济纳旗两站气象要素演变。民勤的海平面气压在 22 日 21 时突然上升到 1010.7hPa,此后

气压一直不断升高, 23 日 03 时达到 1020.7hPa。强烈的变压形成的变压风使地面风速增加, 这一时段风速从 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增加到 $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大风是沙尘暴产生的主要原因之一。温度也由沙尘暴发生前的 23°C 下降到 7°C 。额济纳旗从 22 日 14 时开始受到此次沙尘暴的影响, 整个沙尘过程也有海平面气压上升、气温下降、风速增大的特点。可见这两站沙尘暴过境时各个气象要素具有气压跃升、风速猛增、气温降低等特征。

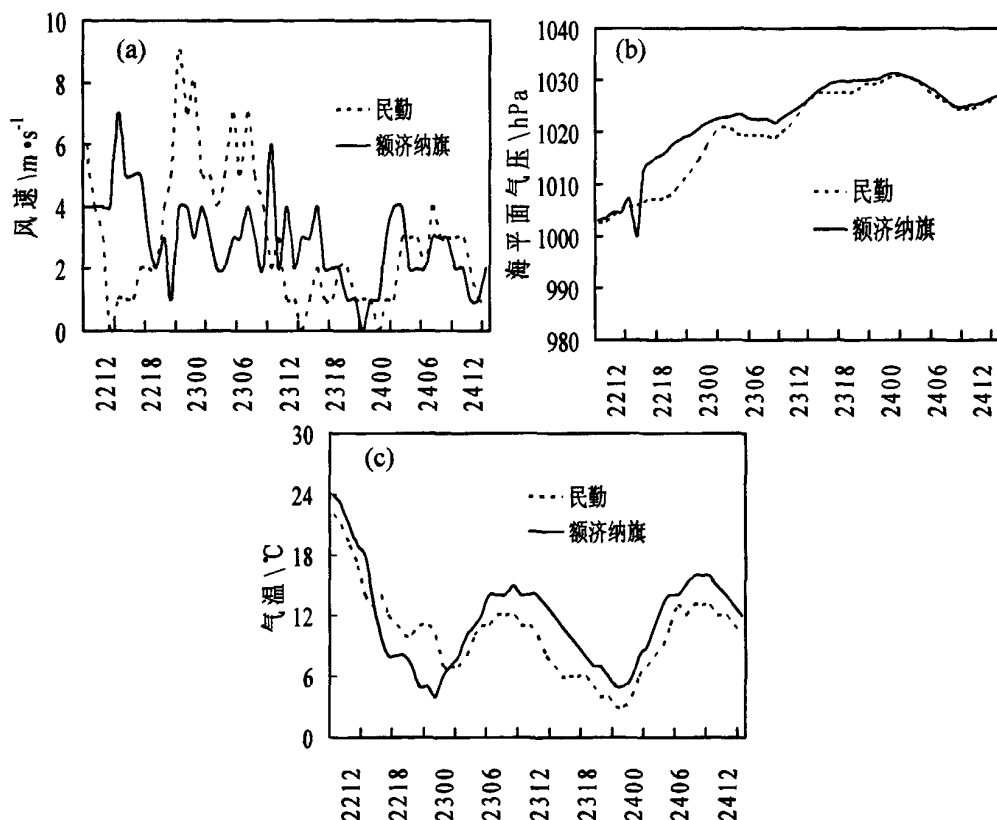


图 2.3 2009 年 4 月 22~24 日民勤、额济纳旗两站气象要素演变: (a) 风速 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) 海平面气压 (单位: hPa); (c) 气温 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。

中国环境监测总站万本太^[41]等人参考国外有关标准, 通过统计近年来我国沙尘天气过程中的颗粒物浓度, 结合我国沙尘天气发生的情况和特点, 提出了基于沙尘浓度的沙尘天气分级标准 (表 1)。本文采用这种基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准来进行对比分析。图 2.4 给出了民勤、额济纳旗两个站的沙尘暴前后的 PM₁₀ 的变化情况。民勤站 (图 2.4a) 22 日 12 时之前, PM₁₀ 的值为 $100\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右, 22 日 20 时达到 $2063.9\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, 一直到 23 日 13 时, PM₁₀

一直维持在 $2000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上, 根据万本太的标准达到了沙尘暴级别。在这段时间民勤记录的天气现象为强沙尘暴。23 日 18 时 PM10 的值降低到了 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下, 24 日 04 时以后 PM10 又降低了很多, 处于 $200\sim 300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间, 25 日沙尘天气逐渐结束。从 (图 2.4b) 可以看出: 22 日 06 时之前内蒙古西部的额济纳旗站 PM10 的值较小, 22 日 08 时, PM10 为 $2025.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, 22 日 14 时, 额济纳旗 PM10 值急剧增大到达 $2505.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, 一直到 23 日 07 时, PM10 的一直维持在 $2000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上, 根据万本太的标准达到了沙尘暴级别。在这段时间民勤记录的天气现象为沙尘暴。23 日 10 时 PM10 的值降低到了 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下, 24 日 11 时开始, PM10 的值降低很多, 均在 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下, 沙尘天气逐渐结束。与 (图 2.3) 比较分析得知, PM10 浓度峰值的出现较地面风速峰值出现的时间滞后, 这与岳平等人^[42]的研究结果相符。

表 1: PM10 浓度与沙尘暴定义的关系 (引自万本太等, 2004)

	PM10 浓度限值单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$	持续时间
浮尘	$600 \leq \text{PM10} < 1000$	≥ 2 小时
扬沙	$1000 \leq \text{PM10} < 2000$	≥ 2 小时
沙尘暴	$2000 \leq \text{PM10} < 4000$	≥ 2 小时
强沙尘暴	≥ 4000	≥ 1 小时

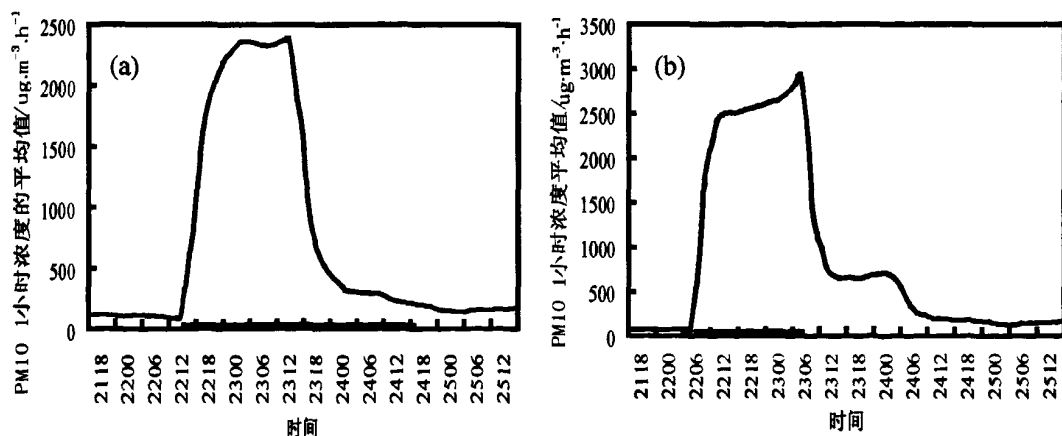


图 2.4 2009 年 4 月 22~24 日沙尘暴过程 PM10 (单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$) 的变化特征: (a) 民勤 (b) 额济纳旗 (横坐标上加粗的部分表示沙尘出现的时间段)。

2.3 蒙古气旋与沙尘暴发展的动力、热力过程分析

以上分析表明,此次沙尘暴过程与蒙古气旋的发生发展有关,而且在沙尘暴发生时,气象要素有剧烈的变化,下面针对蒙古气旋和沙尘暴发展过程中的动力和热力过程进行讨论。

2.3.1 涡度平流和温度平流特征

由于温度是表征大气的重要的物理属性之一,温度平流除了能直接引起大气热力结构变化外,还可以引起其他大气物理属性的变化。温度平流在天气系统的发生发展中起着重要的作用。在准地转位势倾向方程中:

$$(\nabla^2 + \frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2}) \frac{\partial \phi}{\partial t} = -f \bar{V}_g \cdot \nabla (f + \frac{1}{f} \nabla^2 \phi) + \frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} (\bar{V}_g \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial p})$$

上式中 σ 是静力稳定度,是地转风 $\bar{V}_g$ 向量,可用位势高度 ϕ 表示。对于中纬度的波动,上式可看成 $\partial \phi / \partial t$ 成比例,但与其反号。右端第一项为地转风涡度平流与地转涡度(f)的平流。这两项符号相反。对于天气尺度的短波,前者重要,系统以纬向平流的速度迅速向下游运动,气旋性涡度平流将造成局地气压下降。右端第二项为温度平流随高度改变引起的气压变化。当冷平流随高度减弱时,等压面高度降低,有利于气旋的发展。

在 23 日 00 时 500hPa 温度平流图上(图 2.5a),乌拉特后旗附近(107°E),存在一个较强的冷平流中心(最大温度平流中心 $70^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)和正涡度平流中心($20 \times 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)。在同一时次 500hPa 位势高度图(图 2.1b)比较可以看到在 105°E 中蒙边境处有一个槽,由于槽后强冷平流和槽前强暖平流以及在槽前正涡度平流的配置,使得槽在强的温度平流和涡度平流作用下加深发展。

22 日 18 时温度平流和涡度平流的纬向剖面图上(图略),在 500hPa 以下冷平流,以上为暖平流,有两个冷平流中心,一个位于 650hPa 附近,中心达 $-80^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,一个位于 800hPa 附近中心达 $-100^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以看出很明显,高空为暖平流,低层是冷平流,温度平流随高度是减弱的。由地面气压的发展方程得知地面到无辐散层的平均暖平流有利于地面气旋的发展。到了 23 日 00 时可以看到(图 2.5c),蒙古气旋的上空几乎整层为冷平流,存在三个冷平流中心。一个

位于 700~850hPa 之间, 达 $-90^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, 一个位于 350hPa 附近, 中心值也是 $-90^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, 还有一个位于 200~300 hPa 之间, 中心值达 $-70^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于冷平流较强, 且与低层锋区相配合, 在地面气旋后部的加压作用增强, 气压梯度增大。当冷空气前锋入侵时, 就利于大风及沙尘天气的出现。在气旋的右侧, 存在一个强的暖平流中心, 位于 300~400hPa 之间, 中心值为 $130^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。涡度平流的分布也有类似的特点, 气旋中心上空为大范围的正涡度平流区(图 2.5bd), 从 850hPa 一直延伸到 200hPa, 中心在 300~400hPa 附近, 中心达 $32\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; 这种冷平流和正涡度平流是有利于气旋发展的。在气旋发展最强烈的阶段, 温度平流和涡度平流共同作用。

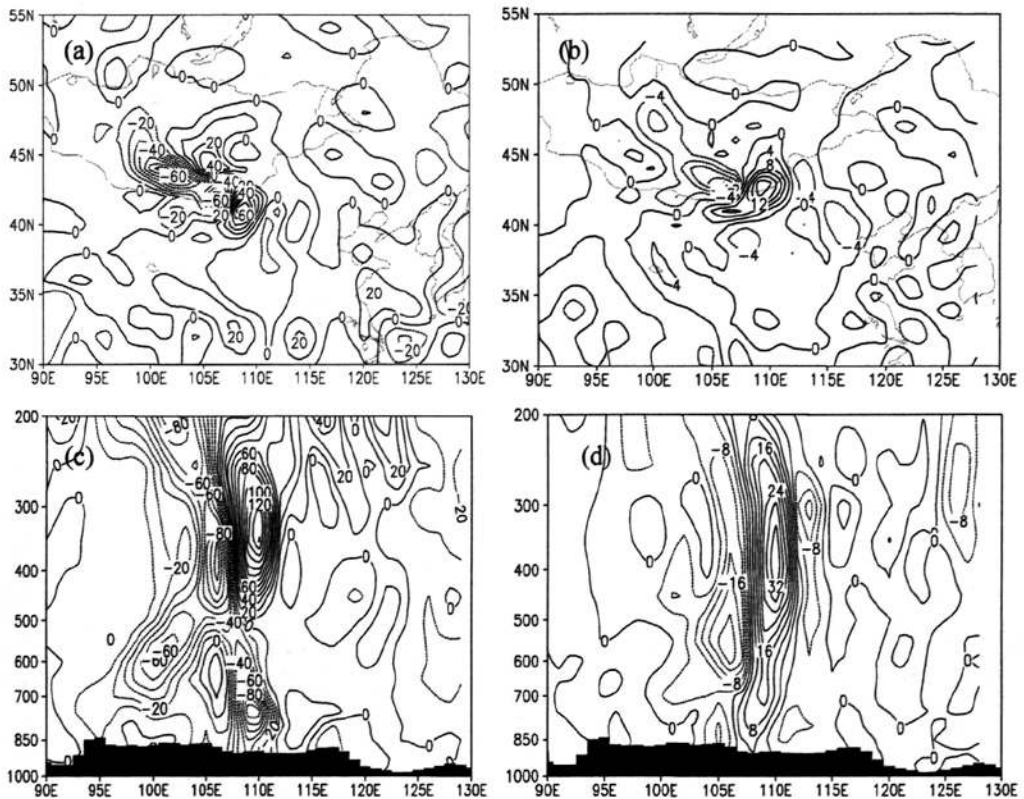


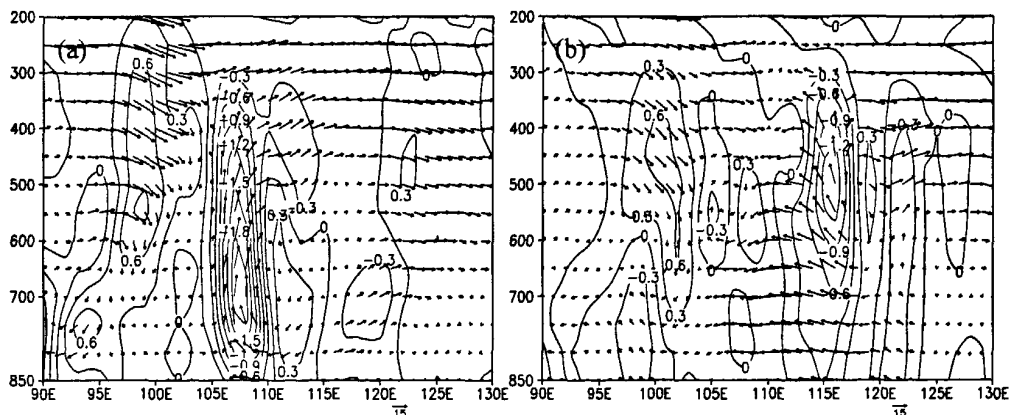
图 2.5 (a) 23 日 00 时 500hPa 的温度平流 (单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) 23 日 00 时 500 hPa 时涡度平流 (单位: $10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) 分布图; (c) 23 日 00 时温度平流沿着 43°N 的纬向剖面图; (d) 23 日 00 时涡度平流沿着 43°N 的纬向剖面图。

2.3.2 垂直速度场分布特征

对流层的层结状态和垂直运动状况与沙尘暴的输送与沉降有很大关系, 强

烈的干上升气流是大量沙尘向高空输送的主要动力。可以看出, 在 2009 年 22 日 18 时在 $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 垂直速度呈现一上升运动区, 中心达 $-1.8\times\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, 这一个上升区正好与此时蒙古国的沙尘天气对应 (图 2.6a)。23 日 00 时, 上升区向东移动到了 110°E 附近, 中心强度维持 (图略)。23 日 06 时上升区位于 $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$, 从地面一直到 300 hPa, 强度依然维持, 此时沙尘天气最为剧烈, 影响了我国的很多地区。23 日 12 时, 上升区从 600~300hPa 之间, 上升速度减弱为 $-1.2\times\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2.6b)。此时地面气旋位于 113°E 附近, 在地面气旋冷锋的前部是上升运动。从 23 日 18 时开始, 上升运动区逐渐减弱, 沙尘天气也逐渐的开始消失 (图略)。由此可见, 若垂直上升区与地面沙尘天气相配合, 垂直上升速度的强弱变化与此次沙尘暴从发展到衰亡的发展过程有很好的对应。

为了解沙尘区垂直运动的演变特征, 我们计算 ($103^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$, $42^{\circ}\sim 47^{\circ}\text{N}$) 的平均垂直速度 (图 2.6c)。区域平均来说, 垂直上升运动主要发生在 22 日 12 时~23 日 06 时, 最大值出现在 22 日 18 时 600 hPa 附近, 为 $-0.4\times\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, 而在 24 日开始整层都是下沉运动, 这就很不利于沙尘暴的输送。上升运动与沙尘暴发生的时间对照可以看出, 强沙尘暴发生时上升运动加强, 一方面是由于整层上升运动的出现和维持, 为沙尘向上输送提供动力机制; 一方面是由于地面冷锋前部的垂直上升运动引起的。



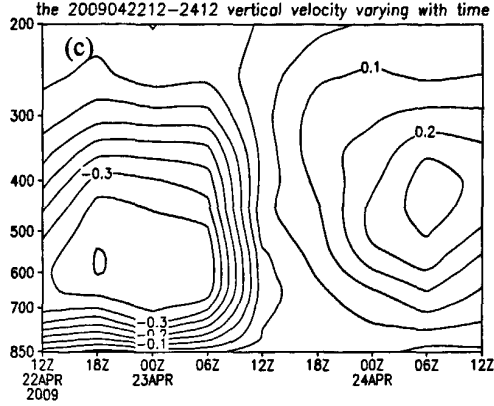


图 2.6 沿着 45°N 垂直速度 (单位: $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) 以及 u 风和 ω 风纬向剖面图:
(a) 22 日 18 时; (b) 23 日 12 时 (c) 22 日 12 时~24 日 12 时 ($103^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$, $42^{\circ}\sim 47^{\circ}\text{N}$) 区域的平均垂直速度 (单位: $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) 时间演变。

2.3.3 锋生过程分析

蒙古气旋发展的过程中伴有锋生, 且冷锋对起沙有一定的作用, 因此我们用位温计算了锋生函数^[43], 以考察大气斜压性对气旋发生发展的贡献。

$$F_G = \frac{d}{dt} |\nabla \theta| = F_{G1} + F_{G2} + F_{G3} + F_{G4}$$

$$F_{G1} = \frac{1}{|\nabla \theta|} ((\nabla \theta) \cdot \nabla \left(\frac{d\theta}{dt} \right))$$

$$F_{G2} = -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} (\nabla \theta)^2 D$$

$$F_{G3} = -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} (\nabla \theta)^2 \left(\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right) A + 2 \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} B$$

$$F_{G4} = -\frac{1}{|\nabla \theta|} \frac{\partial \theta}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

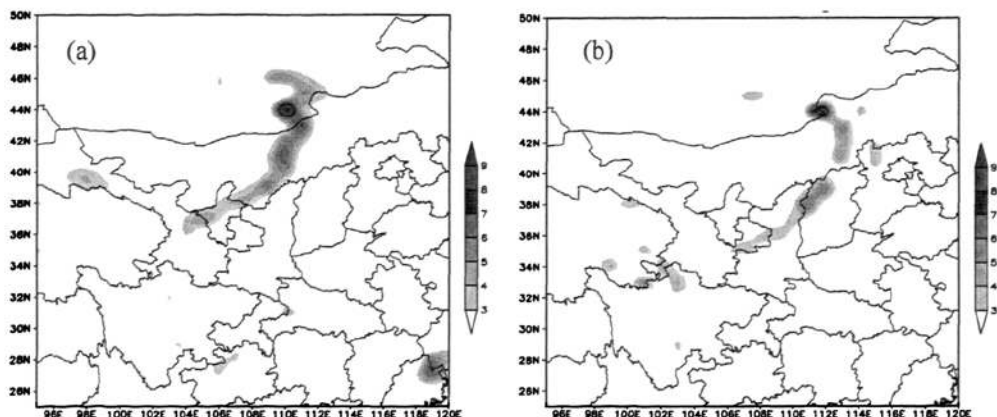
其中: θ 是位温, D 是水平散度, $A = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$, $B = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 。严格来讲, 锋

生函数应包含 4 项, F_{G1} 是非绝热加热项; F_{G2} 是水平辐散项; F_{G3} 是形变项; F_{G4} 是与垂直运动有关的倾斜项。

考虑到非绝热加热计算的精度问题,只计算水平散度、形变项、以及垂直速度有关的倾斜项三项。850hPa 的锋生函数显示,从 23 日 00 时(图 2.7a),蒙古国和我国边境到二连浩特一带存在一个近似南北方向的锋生区,锋生中心位于中蒙边境处,中心达 $9 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。表明该区域有很强的斜压性。此刻蒙古气旋位于 110°E 附近,锋生区位于蒙古气旋的前部,蒙古气旋发展强烈。此后锋生区随着蒙古气旋南压东移。到了 23 日 06 时(图 2.7b),锋生区的强度略有减弱,锋生中心达 $8 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,此后锋生区一直伴随着气旋,直到气旋消亡。

分析气旋发展各个阶段气旋中心附近的锋生函数的垂直剖面发现:在 22 日 12 时(图略),气旋中心附近有较强的锋生函数,到了 22 日 18 时(图略),气旋前后部均有的锋生,集中在 750hPa 以下,强度都不强。到了 23 日 00 时(图 2.7c),气旋发展最旺盛,此时气旋后部的锋生显著增大,锋生一直到了 600hPa 附近,两个锋生中心分别出现在 850hPa 和 1000hPa,达 $10 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。气旋前部的锋生函数明显的小很多,锋生中心只有 $3 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。到了 23 日 06 时(图 2.7d),锋生集中在 750hPa 以下,气旋后部的锋生减弱到 $8 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。气旋前部的锋生函数增强,锋生函数一直到 600hPa 附近,锋生中心位于 700hPa 达 $5 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。从 23 日 12 时(图略)开始,此后锋生函数逐渐消失。

分析气旋中心沿着 45°N 的相当位温以及 u 风和 ω 纬向剖面图(图略)可知,在气旋发展最旺盛的 23 日 00 时,在锋前的暖区里,这里有较强的上升气流;锋后的冷空气堆后部存在下沉气流,强度弱于暖区的上升气流。位温面的倾斜的程度较大,反映了冷锋强度较强,这与锋生函数的分析一致。



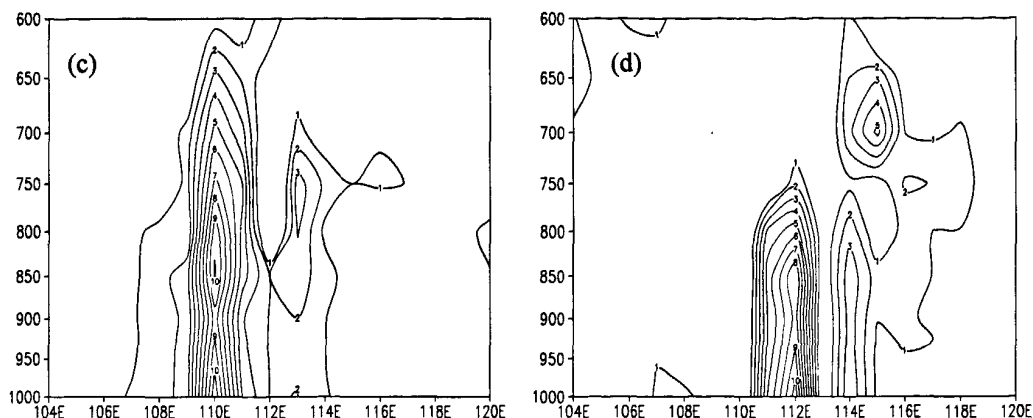


图 2.7 850hPa 的锋生函数 (单位: $10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$): (a) 23 日 00 时, (b) 23 日 06 时; 沿着 44°N 的锋生函数 (单位: $10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 垂直剖面: (c) 23 日 00 时, (d) 23 日 06 时。

2.3.4 急流作用

有关研究表明, 高低空急流耦合对气旋的发生、发展有重要的影响^[44]。在急流出口区将发生质量调整, 在出口减速区有指向其右侧的非地转分量, 它引起质量的向南输送, 出口区非地转风所引起的质量调整使其左下方减压, 有利于低压的发展。刘景涛^[40]等分析了强沙尘暴与蒙古气旋和高空急流活动的关系, 指出蒙古气旋中心强度与气旋中心和高空急流核的相对位置有密切关系, 当气旋中心位于急流核出口区左前方适当距离时(5~15 个经距), 气旋处于加深阶段; 若气旋中心与急流核基本处于同一经度位置时, 气旋加深到鼎盛期; 若气旋中心位于急流核左后方时, 气旋开始填塞。

300hPa 等压面上的全风速, 22 日 12 时 (图略), 高空急流中心位于阿巴坎—额济纳旗附近, 中心强度 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 到 22 日 18 时 (图略), 急流中心达 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 位置变化不大。23 日 00 时 (图 2.8a), 急流中心加强, 急流中心达 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 位置东移到达伊尔库茨克—乌拉特后旗一带。22 日 12 时, 气旋在 97°E , 中心位于 300hPa 的高空急流核出口区左前方 9 个经距, 22 日 18 时, 气旋在 107°E , 中心位于急流核出口区左前方 5 个经距。23 日 00 时, 气旋发展最强烈, 此时气旋中心位于急流核出口区左前方 3 个经距。到了 23 日 06 时 (图 2.8b), 气旋的中心与急流核基本在相同的经度位置, 气旋填塞。气旋开始减弱阶段, 高空急流分裂出多个急流核, 气旋位于南部急流核的左前方。由于急流核向东南移动, 所以气旋中心一直位于高空急流核以北。

本次蒙古气旋冷锋引发强沙尘暴过程中,高空急流的作用是不可忽视的。高空急流的主要作用是在急流的出口区的左侧减压,促进气旋的发展,而气旋的强烈发展会形成地面大风,为沙尘暴发生提供很好的动力条件。

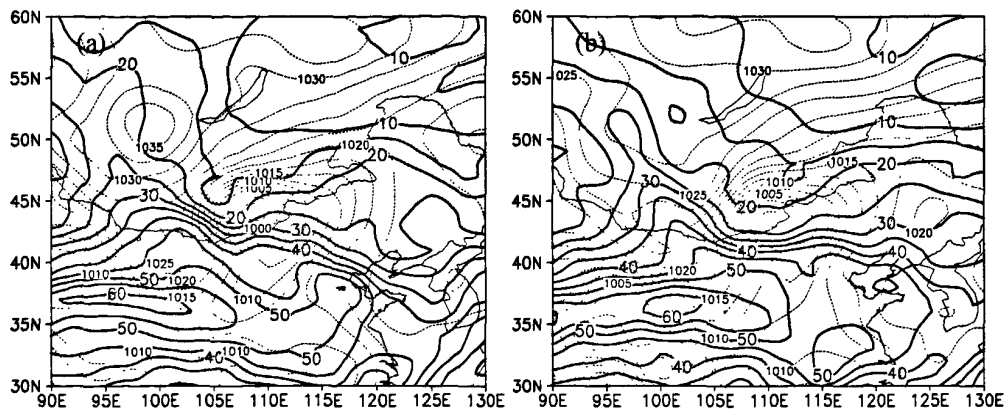


图 2.8 300hPa 急流分布(实线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和海平面气压(虚线,单位: hPa): (a) 23 日 00 时; (b) 23 日 06 时。

2.4 数值模拟分析

2.4.1 模式方案选取

采用 MM5V3 有限区域中尺度数值模拟系统,设计的范围是选择模拟区域大致是 ($25\sim 60^{\circ}\text{N}$, $80\sim 140^{\circ}\text{E}$),中心点取为 (40°N , 115°E)。这里水平格局采用 45km,垂直分层 22 层,行星边界层方案采用 MRF 方案,上边界采用简单的辐射上边界条件,侧边界条件采用张弛的流入(流出)侧边界条件,路面过程才用 OSU/Eta 陆面过程模式。初始场采用每 6 小时水平分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料。模拟的时段是 2009 年 4 月 22 日 12 时~24 日 12 时,共积分 48h,每 3 小时输出一次。

2.4.2 模拟结果分析

(1) 高空形势场模拟

比较 2009 年 4 月 23 日 00 时 500hPa 位势高度场的分析场和模拟结果发现,模式对高空形势场有较强的模拟能力。模拟的 500hPa 位势高度场上(图 2.9b),成功模拟出了位于中蒙交界处的高空低涡,这与分析场(图 2.9a)的位置具有

较好的一致性。低涡的中心强度略有差异。

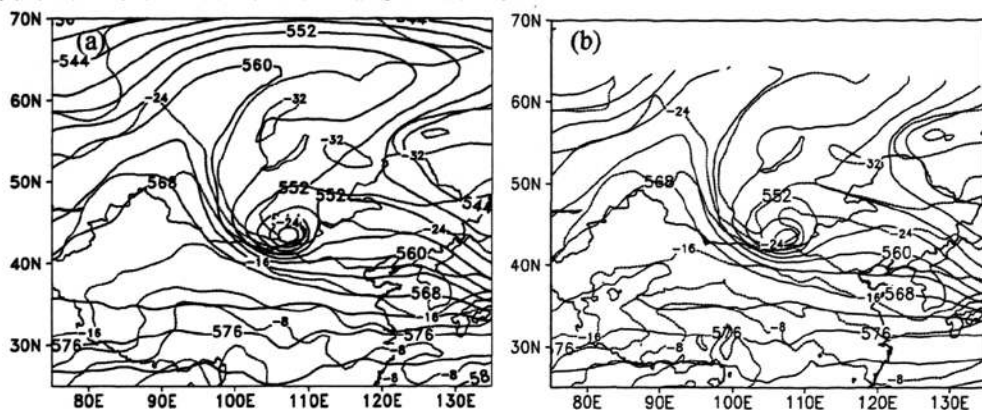
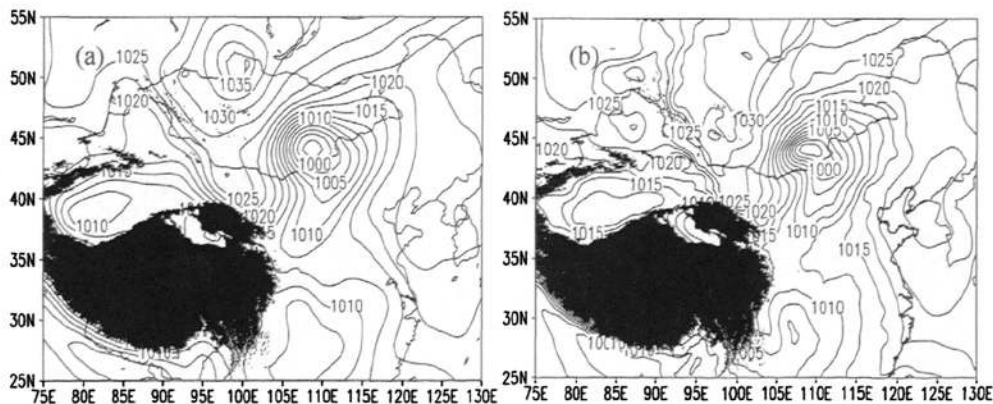


图 2.9 2009 年 4 月 23 日 00 时高空形势场 (a) 500hPa 分析场; (b) 500hPa 模拟场。

(2) 海平面气压模拟

对比 2009 年 4 月 23 日的海平面气压的模拟结果和分析场 (图 2.10a-h), 不难发现, 模拟与实况有很好的 consistency, 无论是地面气旋的位置还是中心强度均比较接近。分析每 6 小时的模拟气压场, 我们发现地面气旋的演变有比较明显特点: 从 22 日 18 时开始蒙古气旋加强, 在 23 日 00 时, 气旋达到最强, 中心强度 997.5hPa, 随后逐步填塞减弱。



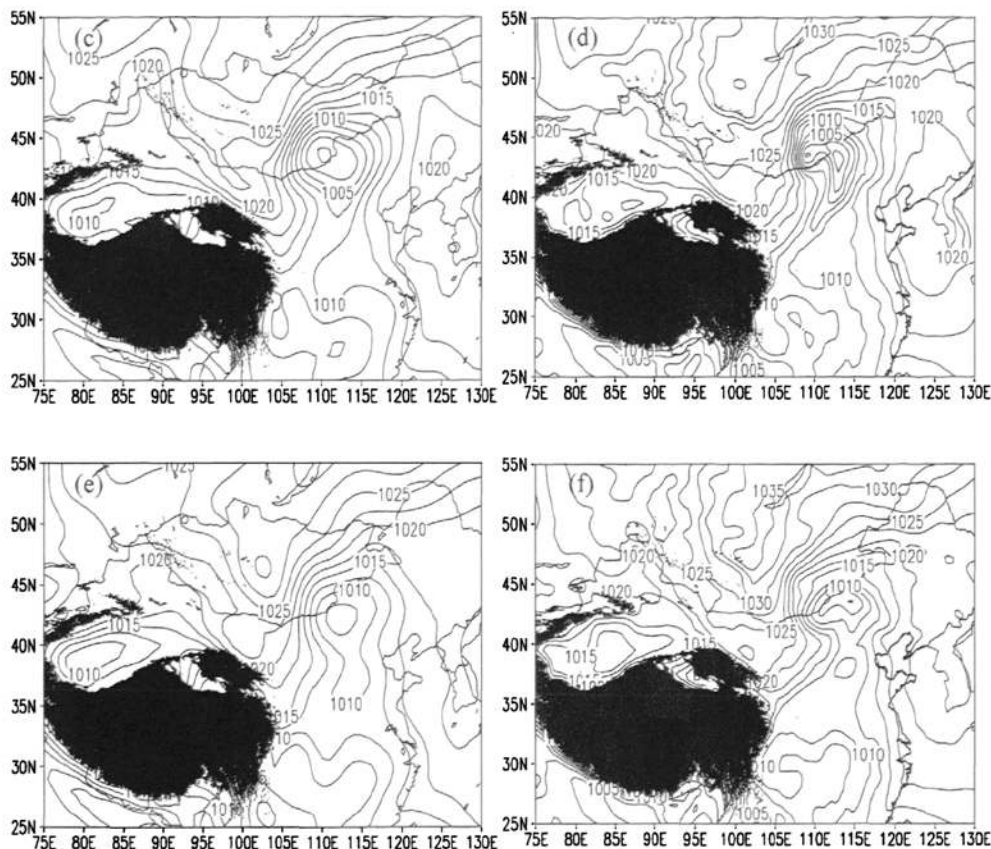


图 2.10 2009 年 4 月 23 日海平面气压的分析场和模拟场 (单位: hPa) (a) 00 时分析场; (c) 06 时分析场; (e) 12 时分析场; (b) 00 时模拟场; (d) 06 时模拟场; (f) 12 时模拟场。阴影部分的地形高度大于 3000m。

(3) 地面风场分析

在每隔 3 小时的地面风场的图 (图 2.11a-d) 上可以看到, 积分 15 小时后, 23 日 00 时两个气旋性环流附近出现大风区。该气旋性环流是造成内蒙古中西部地区、蒙古国中部的强沙尘暴的影响系统, 位于南疆、青海一带的气旋性环流是造成甘肃北部地区出现沙尘暴的系统。到了 23 日 03 时大风区的范围加大, 出现了大于 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风。在气旋性环流的底部、上部出现沙尘暴天气。上部的沙尘天气可能是由贝加尔湖附近的冷空气引起的。南疆附近的大风减弱。到了 06 时风速大值区东移, 依旧影响我国内蒙古的中西部地区, 造成沙尘暴天气。09 时强风速范围明显减小, 沙尘暴的强度开始减弱。

比较两个气旋性环流系统共存的地面风场的模拟结果发现, 位于中蒙交境处的气旋性环流减弱的过程中地面风速逐渐加强, 而位于南疆附近的大风随气

旋减弱而减小。这种地面气旋性环流的水平空间分布造成了地面沙尘天气的水平分布差异。

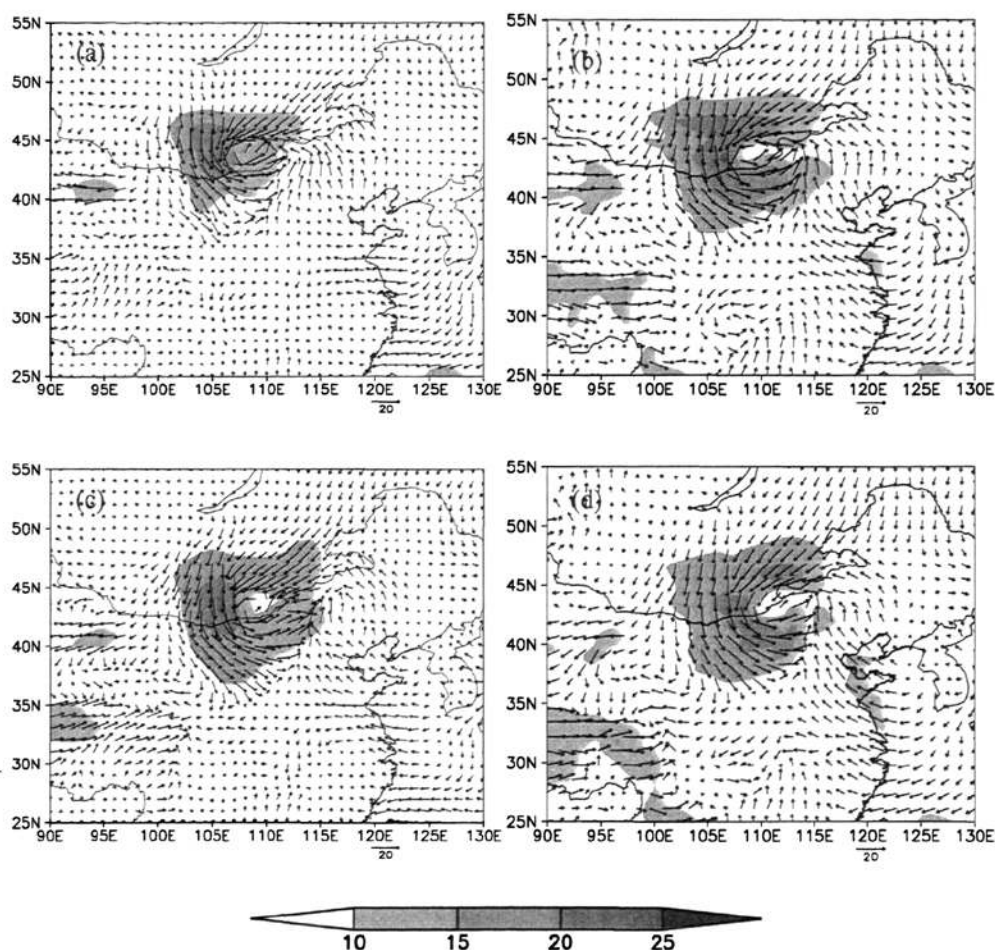


图 2.11 模拟的 2009 年的 23 日地面风场和大风区(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) 00 时分析场; (b) 03 时模拟场; (c) 06 时分析场; (d) 09 时模拟场。

(4) 变压、变温分析

根据研究表明, 蒙古气旋造成的沙尘天气往往与冷空气的强弱以及侵入有关。我们从 24 小时变温来分析冷空气的影响。(图 2.12a-d) 给出了模拟的 23 日地面 24 小时变温场分布, 从图中来看, 23 日 00 时内蒙古的大部分地方出现负变温区, 其中内蒙古的中部以及东部地区出现了一 8°C 的变温。23 日 03 时, 负变温的范围增大, 在二连浩特以及呼伦贝尔附近出现了一 16°C 的降温区。06 时, 负变温的范围减小, 而强度维持, 在呼伦贝尔附近出现一 20°C 的降温区。09 时变温的强度范围都有所减小。从 24 小时变温的分布和时间演变图看, 地面

冷空气的侵入造成地面大风，大风又引起沙尘天气。

3 小时变压可以反映出地面气旋移动过程。模拟的 23 日 00 时 3 小时变压场的分布(图 2.13a-d)，减压中心基本与蒙古气旋中心的位置一致。中心达 -3hPa 。此时，在蒙古国西南部、内蒙古西部、甘肃北部处于正变压区，中心达 6hPa ，并且在甘肃北部、内蒙古中西部、蒙古国中部出现沙尘暴。此后，正变压范围逐渐增大，负变压的范围和强度逐渐变小。可以看出气旋的发展并不快速。

分析了地面变温、变压，可以发现沙尘暴基本都发生在正负变压区之间，气压梯度较大的区域。24 小时的变温区也和地面气旋后部冷锋后的冷空气对应，进而冷空气造成大风，为沙尘天气提供动力条件。

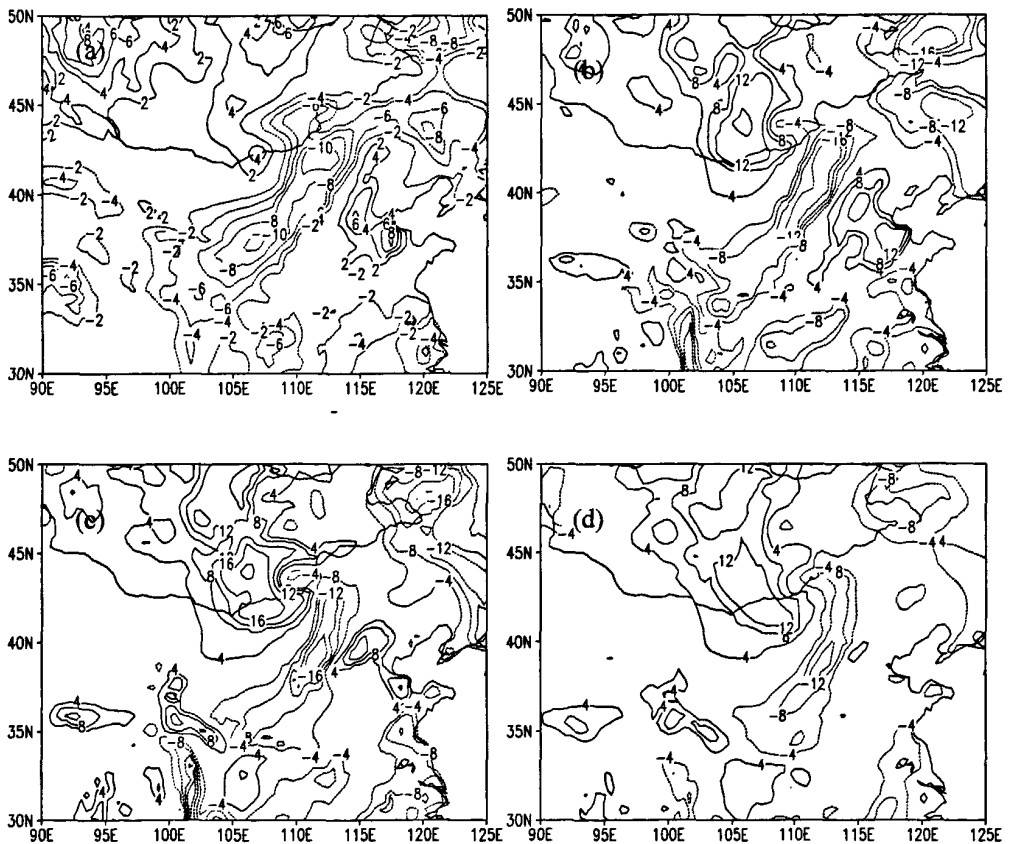


图 2.12 模拟的 2009 年 23 日地面 24 小时变温 (单位: $^{\circ}\text{C}$) (a) 00 时 (b) 03 时 (c) 06 时 (d) 09 时

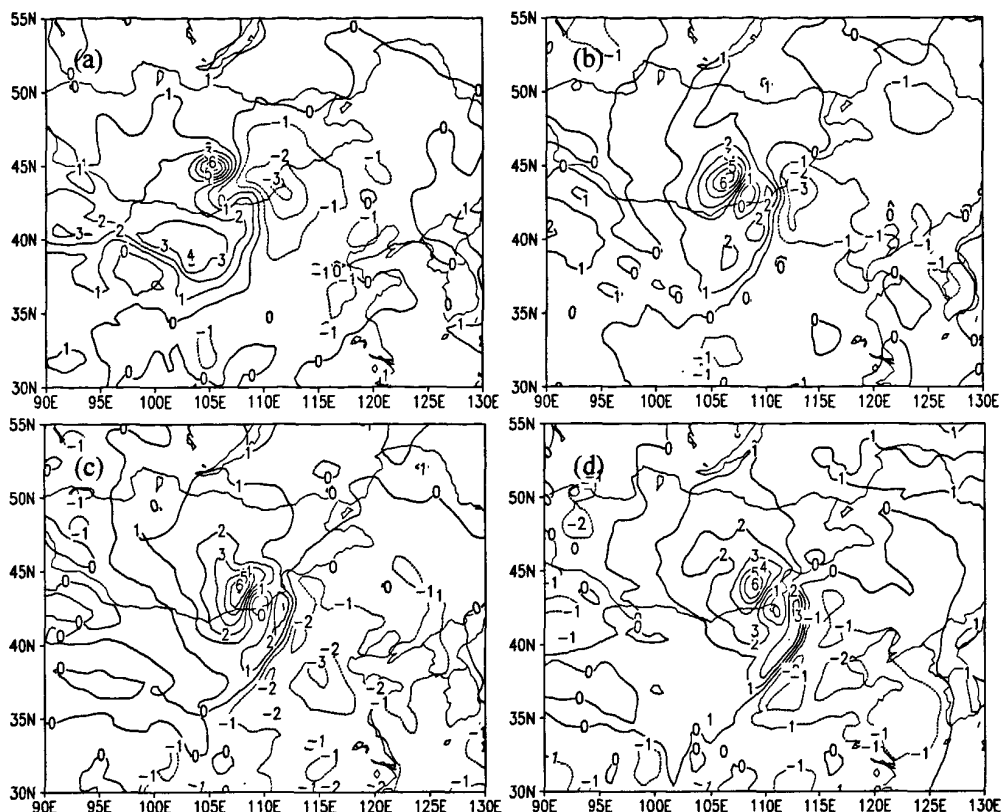


图 2.13 模拟的 2009 年 23 日地面 3 小时变压(单位: hPa) (a) 00 时 (b) 03 时 (c) 06 时 (d) 09 时

2.5 小结

本文对造成 2009 年春季一次强沙尘暴过程(4 月 22~24 日)进行了诊断分析和数值模拟。主要结论如下:

此次强沙尘暴天气是蒙古国引导冷空气东移南下, 在南下过程中经过南疆盆地、内蒙古中西部, 甘肃等地均出现沙尘天气。沙尘暴经过前后地面的温、压和风速有剧烈变化, 观测的 PM10 强度能较好的反映沙尘暴强度。

温度平流和涡度平流在气旋的发展过程中发挥重要作用。垂直上升区与地面沙尘天气相配合, 垂直上升速度的强弱变化与此次沙尘暴从发展到衰亡的发展过程有很好的对应。通过分析锋生函数, 发现斜压性与气旋的发生发展有很密切的关系。

在本次蒙古气旋冷锋引发强沙尘暴过程中, 高空急流的作用是不可忽视的。高空急流的主要作用是在急流的出口区的左侧减压, 促进气旋的发展。

利用 MM5V3 模式能够比较准确的模拟出高空冷涡的发展以及地面气旋的演变特征，对于造成沙尘天气的地面大风区也有较好的模拟能力。

第三章 一次强沙尘暴过程起沙和输送的数值模拟研究

国外对沙尘暴的研究起步比较早,从30年代开始对沙尘暴的时空分布、形成、监测和对策进行了系统研究。Iwasaka^[45]等对亚洲沙尘云的输送以及空间尺度做了个例研究。Cautenet^[46]利用中尺度模式对西非尼日尔首都尼亚美上空来自撒哈拉沙尘暴的热力影响进行了数值模拟,获得了令人满意的结果,认为大气中的沙尘含量和辐射特征是最有意义的参数。Slobidan^[47]对1985年7月发生在地中海西部的沙尘远程输送进行三维空间的数值模拟,模拟了沙尘在大气中剧烈得垂直混合、侧面扩散、水平和垂直移动及降尘过程,沙尘输送模拟结果与卫星观测一致。

我国对于沙尘暴的起沙以及输送机制的研究更晚一些。纪飞等^[48]在有限的区域模式MM4基础上,发展了一个沙尘暴传输模式,利用该模式模拟了一个发生在东亚的沙尘暴天气过程,得到了传输和沉降的具体特征。分析了例子粒子浓度随时间的变化,并且将模拟的结果与观测的比较,证明了模式有较好的模拟能力。刘毅^[49]运用MM4中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式,模拟一次沙尘暴天气及沙尘输送过程。显示蒙古气旋冷锋后的大风是沙尘扬起的主要动力,锋区强烈的上升气流将沙尘输送到高层,沙尘的水平输送主要随冷锋一起向下游扩散。

本章采用具有清晰物理学概念的起沙模式、输送模式与PSU/NCAR的中尺度气象预报模式MM5耦合的沙尘模式,对2009年4月22日~24日影响我国北方大部分地区的沙尘暴天气的起沙和输送过程进行了模拟研究。希望对此次沙尘暴的起沙、输送和沉降过程的物理机制和时空演变特征有所了解。

3.1 沙尘暴数值预报系统的简介

沙尘大气的形成是一个复杂的物理过程,涉及到地表状况等多种因素。沙尘暴的数值模拟中,关键是对起沙源的模拟,沙尘源的范围、地表特征、沙尘粒子的通量以及尺度分布又是十分复杂的。国内多沙尘暴传输的研究开始的较晚,且多采用参数化方法,这种方法难以满足实际应用的需要。一个具有完善物理概念的沙尘数值预报模式应该包括:(1)运行并且调试中尺度数值预报模式,为提供起沙模式和陆面模式需要的大气变量的空间以及时间分布值,例如

摩擦速度等；(2) 采用合理的陆面过程方案，为起沙模式提供土壤水分等重要信息；(3) 起沙模式主要预报沙尘的水平和垂直通量；(4) 分辨率高的遥感和地面信息资料。这无论对于陆面过程还是起沙源地的数值模拟都是十分重要的，因为地表性质对风蚀过程的特征有决定的作用，包括临界摩擦速度和土壤向空中释放土壤颗粒的能力。

该沙尘数值预报系统，采用的中尺度气象模式是 MM5V3（包含有陆面过程），起沙模式是澳大利亚新南威尔士大学邵亚平博士发展的具有风蚀物理学基础的起沙模式和输送模式耦合而成。它是以数值预报模式为核心，以高精度的中国区域的地理信息系统提供的地表和陆面状况信息为基础，以卫星观测和实时气象资料为背景的沙尘天气预报系统。该系统的结构如下图 3.1 所示。下图给出了沙尘天气数值预报系统业务流程图，该流程图实现了模式初始资料、边界条件的自动读取、生成。模式自动运行、产品自动生成。

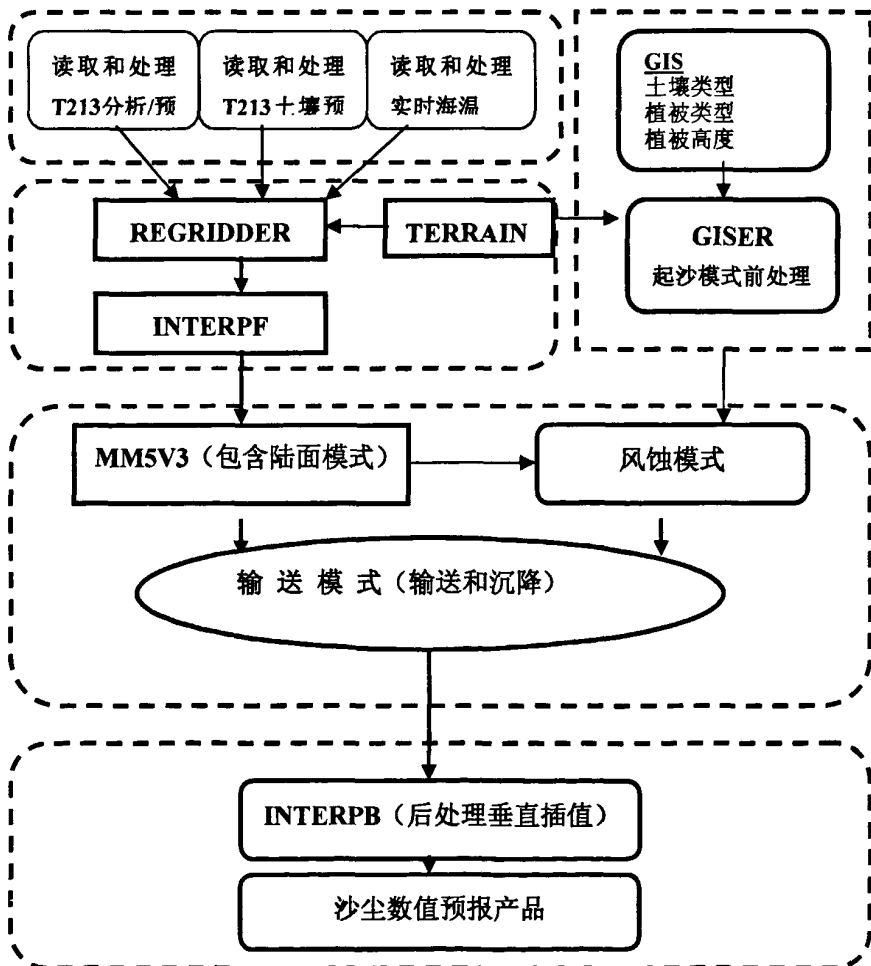


图 3.1 沙尘天气预报模式流程图

3.2 数值模拟方案介绍

该设计模拟的计算范围为 $25^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$; 模式的格距为 45km, 模式垂直积分 22 层。中尺度气象模式采用全物理过程非静力方案; 行星边界层方案采用 MRF (NCEP MRF 模式); 降水物理显式方案采用简单的冰相过程, 隐式方案采用 Grell 积云对流参数化方案; 上边界条件采用简单的辐射上边界条件; 侧边界采用张弛的流入(流出)侧边界条件, 陆面模式采用 OSU/Eta 陆面过程模式。

起沙模式和输送模式需要输入陆面参数为: 土壤类型、植被类型、植被高度、叶面指数和植被覆盖率。其中土壤类型和植被类型数据国外部分是取自美国地质勘察(USGS)资料, 国内部分取自中国 1: 400 万中国土壤图数据资料, 其他植被资料是由遥感数据转化而来。所有 GIS 数据的分辨率为 $3'\times 3'$ 。

气象资料的背景场: $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ NCEP 再分析资料, 时间间隔 6 小时。

模拟时间: 2009 年 4 月 22 日 12 时~24 日 12 时 (UTC), 积分时间 48 小时, 每 3 小时输出一次结果。

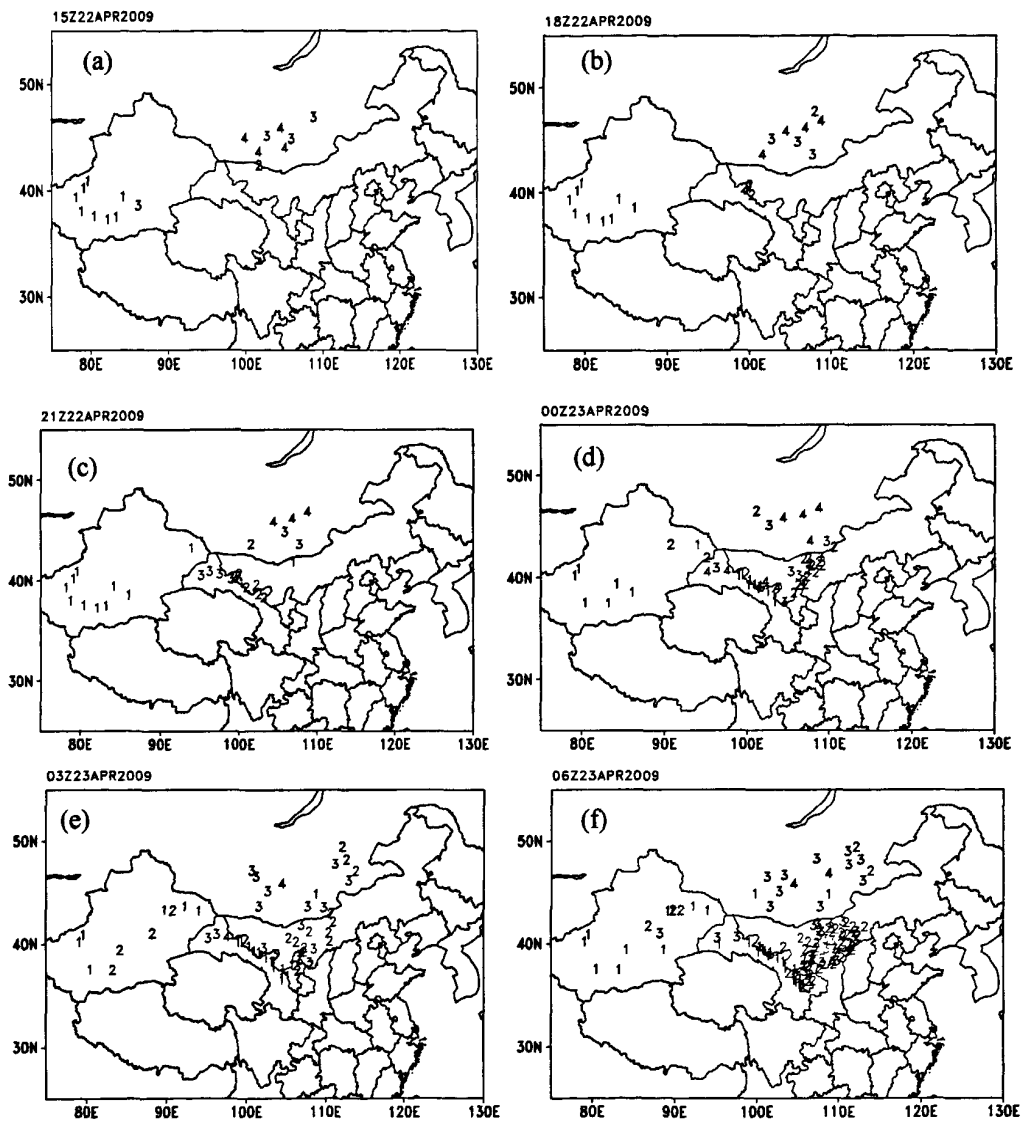
初始沙尘浓度为 0, 初始土壤湿度由 NCEP 再分析资料提供。

3.3 起沙过程分析

3.3.1 起沙源的模拟

由起沙模式输出, 描述沙尘源地的物理量记为 F , 它表示沙尘能够从地表面垂直向上的沙尘垂直通量, 其单位是: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 即单位时间、单位面积由地面向上“排放”到大气中的沙尘质量通量。它可以用来表征每日、每平方公里面积上的起沙量为多少吨。并且 F 随时间与空间变化, 就是沙尘源地随时间与空间的变化。鉴于目前没有地面起沙量的观测数据, 本文采用每 3h 的地面观测现象与起沙量的模拟结果对比分析。地面观测天气现象是大气底层沙尘浓度、起沙、输送和沉降的综合效果, 采用地面天气观测现象与模拟沙尘浓度比较虽然不是很严格, 但是不失为一种检验模拟结果的方法^[16]。因此, 我们在进行比较时, 只能定性的分析空间分布, 从而初步了解沙尘源地的空间特征。

图 3.2 给出 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时地面沙尘天气现象, 从图中不难看出, 此次过程最早出现在蒙古国的南部, 从 23 日开始观测到的沙尘站开始增多。



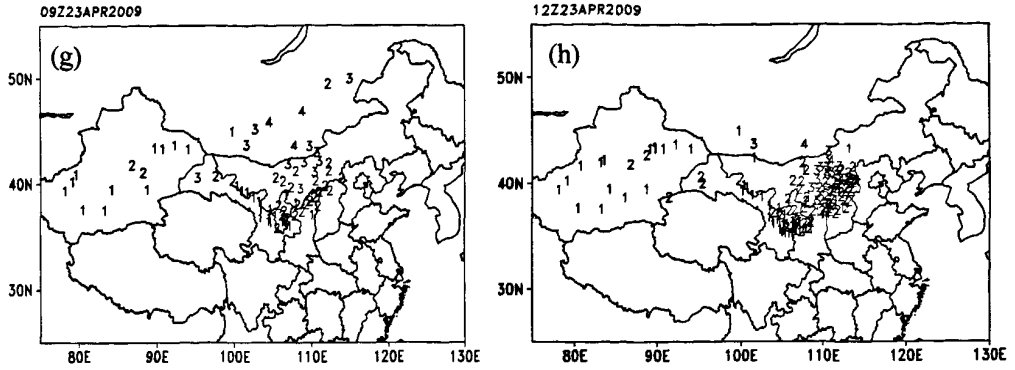
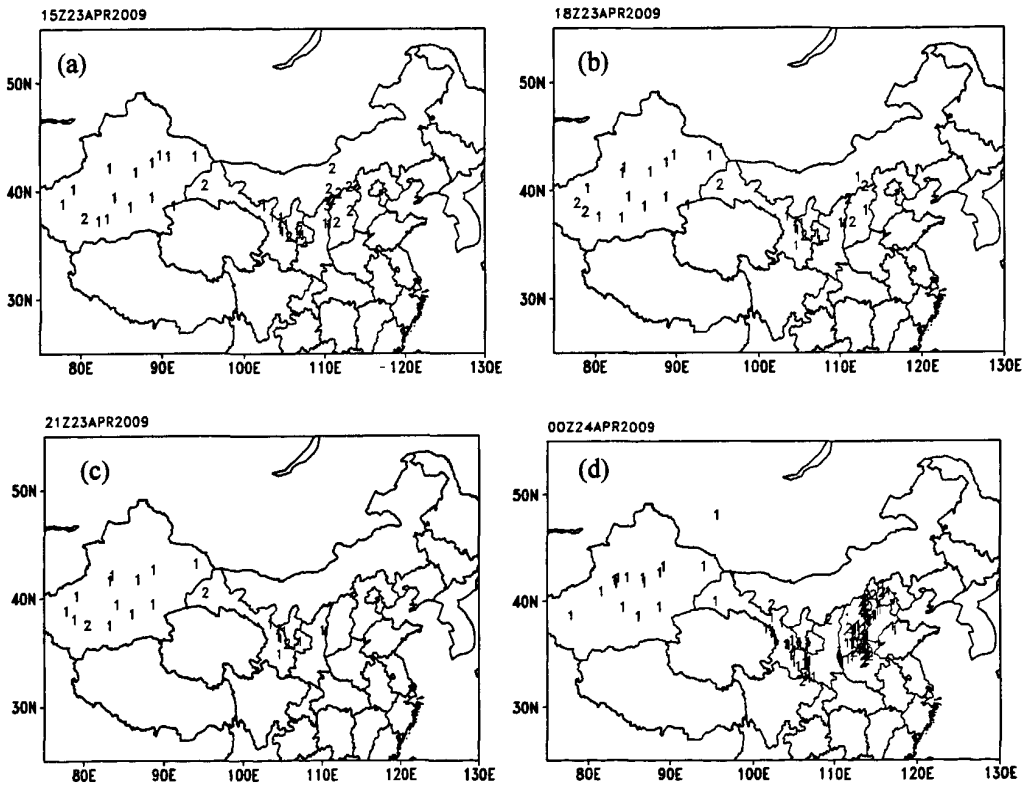


图 3.2 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时每隔 3h 的地面沙尘天气现象。1 代表地面观测的浮尘，2 代表扬沙，3 代表沙尘暴，4 代表强沙尘暴。



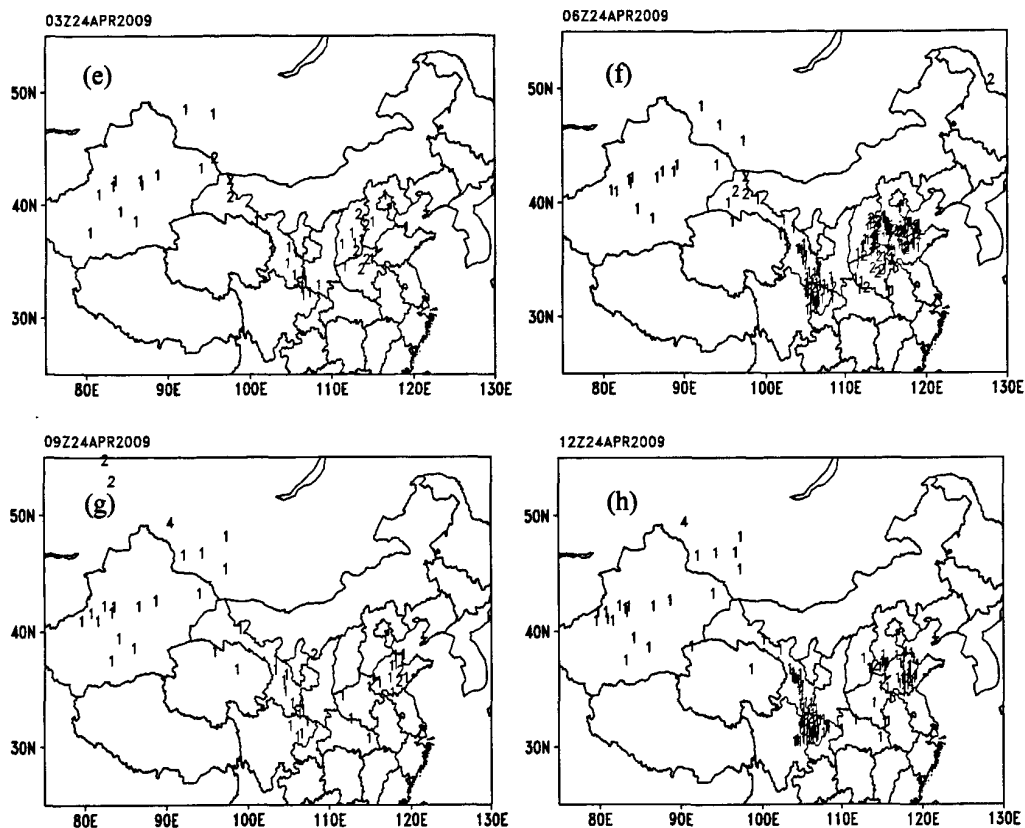
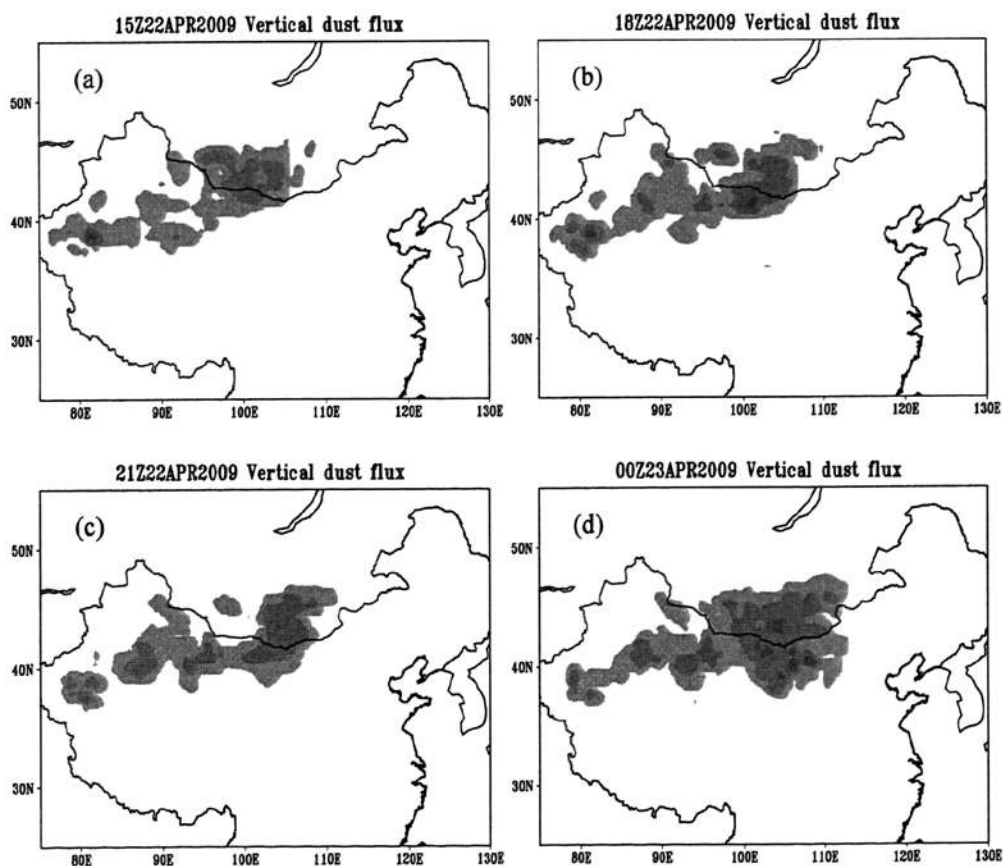


图 3.2 (续) 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时每隔 3h 的地面沙尘天气现象。1 代表地面观测的浮尘, 2 代表扬沙, 3 代表沙尘暴, 4 代表强沙尘暴。

图 3.3 给出了 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时每隔 3 小时的垂直尘通量的水平空间分布模拟结果。可以看出, 积分 3 小时后, 地面出现两个起沙中心, 一个位于新疆南部的塔里木盆地, 一个位于蒙古国与内蒙古西部的交界处的戈壁沙漠地区。模拟是比较理想的, 与同时次的地面观测天气现象 (图 3.2a) 比较发现, 确实在这两个地区出现了沙尘天气。当积分 6 小时后, 位于蒙古国与内蒙古西部的起沙中心范围东扩, 在甘肃部分地区、新疆西部地区出现新的起沙中心, 塔里木盆地的起沙中心也有所扩大。与同时次的地面观测的沙尘天气现象 (图 3.2b) 相比, 新疆地区的起沙范围偏大, 新疆地区的东北部没有出现沙尘暴。内蒙古地区此时也没有出现沙尘天气。观测表明, 中蒙交境处南部的戈壁地区出现强沙尘暴天气, 甘肃的酒泉地区出现沙尘天气, 塔里木盆地有扬沙天气。观测与模拟的结果偏离不大。到 23 日 00 时, 起沙范围和地面观测沙尘天气现象的范围也基本符合, 并且甘肃地区的敦煌、玉门等地以及内蒙古中西部的强沙尘暴地区都较好的模拟出来。同样, 23 日 03 时、06 时、09 时的,

模拟的尘通量和观测也有较好的一致性。综合 22 日 15 时~24 日 12 时的模拟结果,发现模拟对白天到傍晚的这段时间的有较好的模拟能力,而对夜间的模拟能力相对较弱,24 日白天逐渐扩散到我国河北中南部、山东北部、河南东北部及渤海湾等地上空出现了浮尘或扬沙天气,几乎没有模拟出来。这可能是因为模式对地表的考虑比较简单,对于我国比较多样的地形构造、下垫面的情况的没有细分造成的。总的来说,起沙的时间演变与观测到的沙尘天气出现的时间大体相符。

通过模拟发现,这次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是我国南疆盆地、甘肃、内蒙古的西部以及蒙古国南部。从起沙的量来看,在内蒙古巴彦淖尔盟附近的起沙量超过了 $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,塔里木盆地地区也有一个超过 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大值中心。其次在新疆东部、甘肃北部、蒙古国南部也出现了超过 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的小中心。



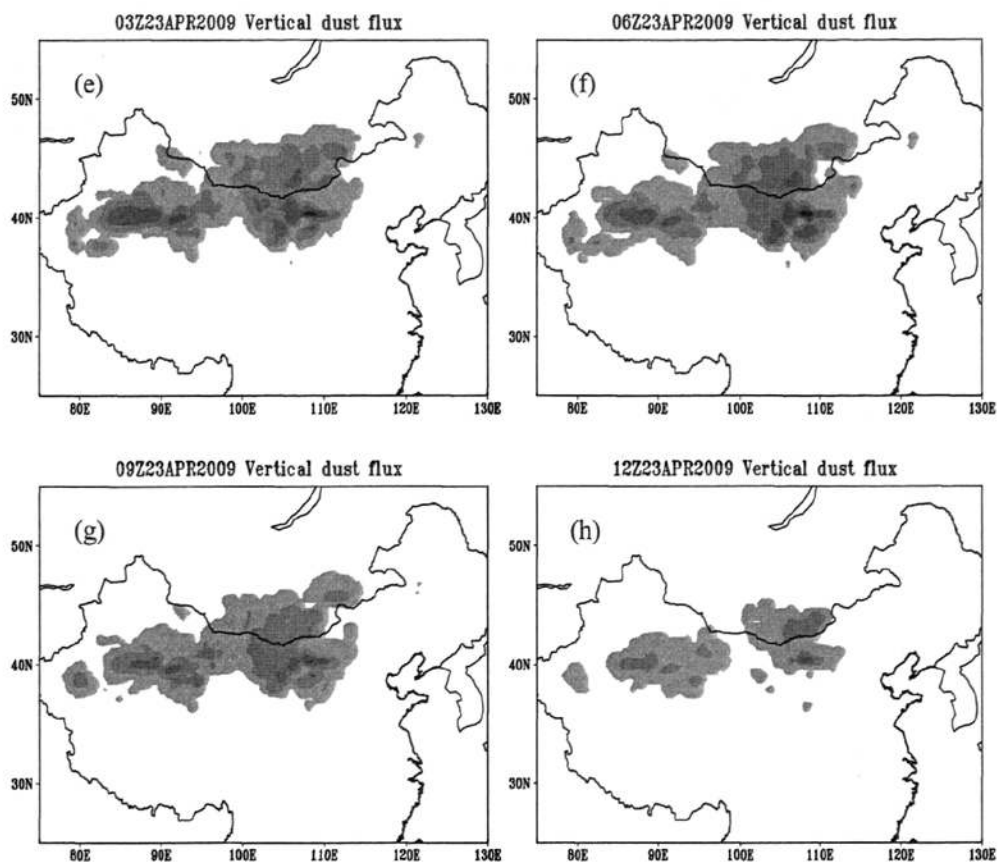
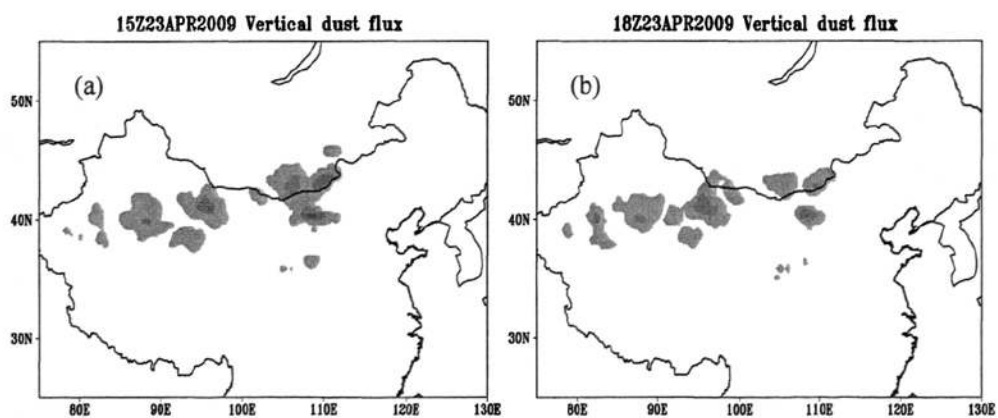


图 3.3 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时垂直尘通量 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。



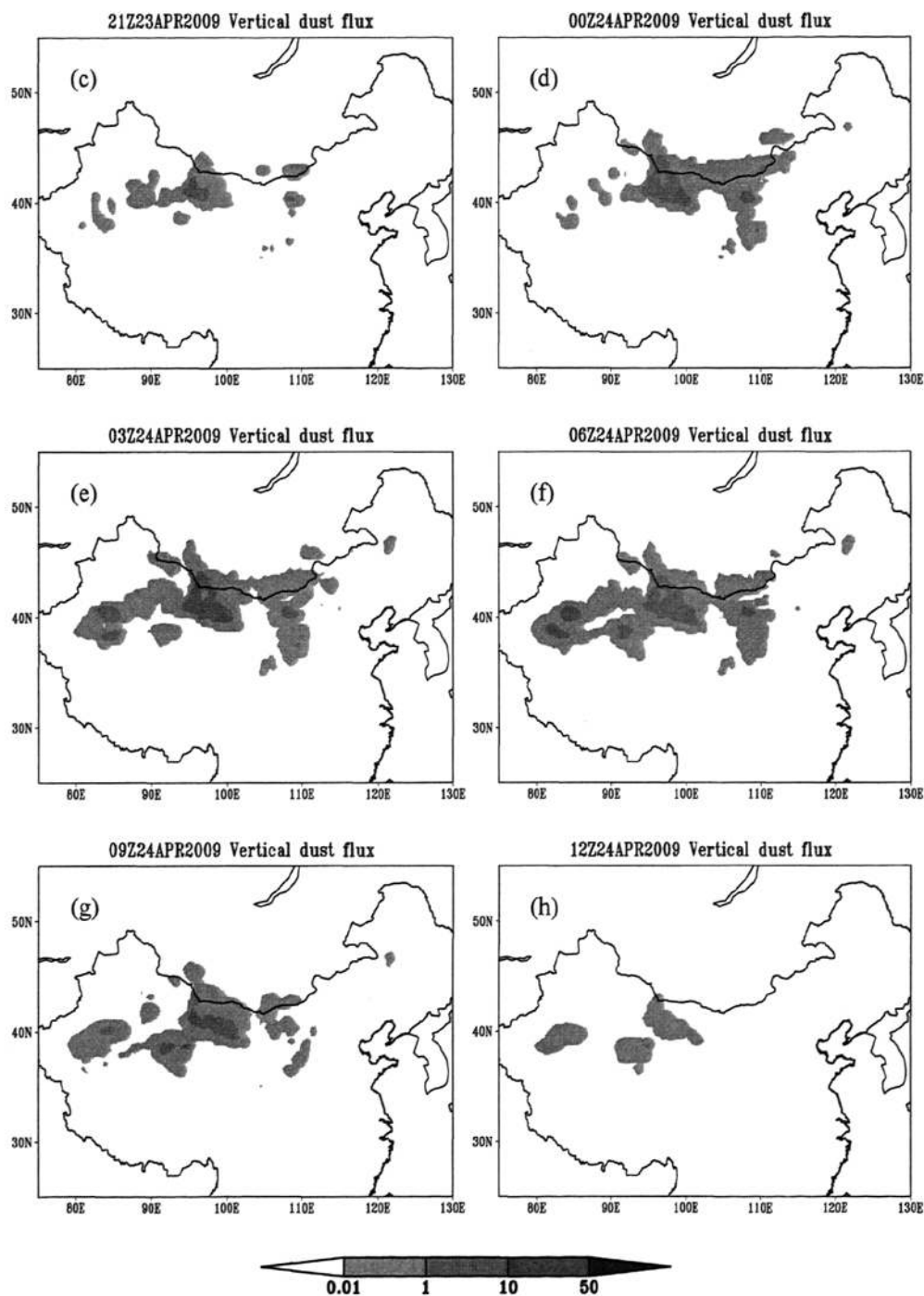


图 3.3(续)2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时垂直尘通量(单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

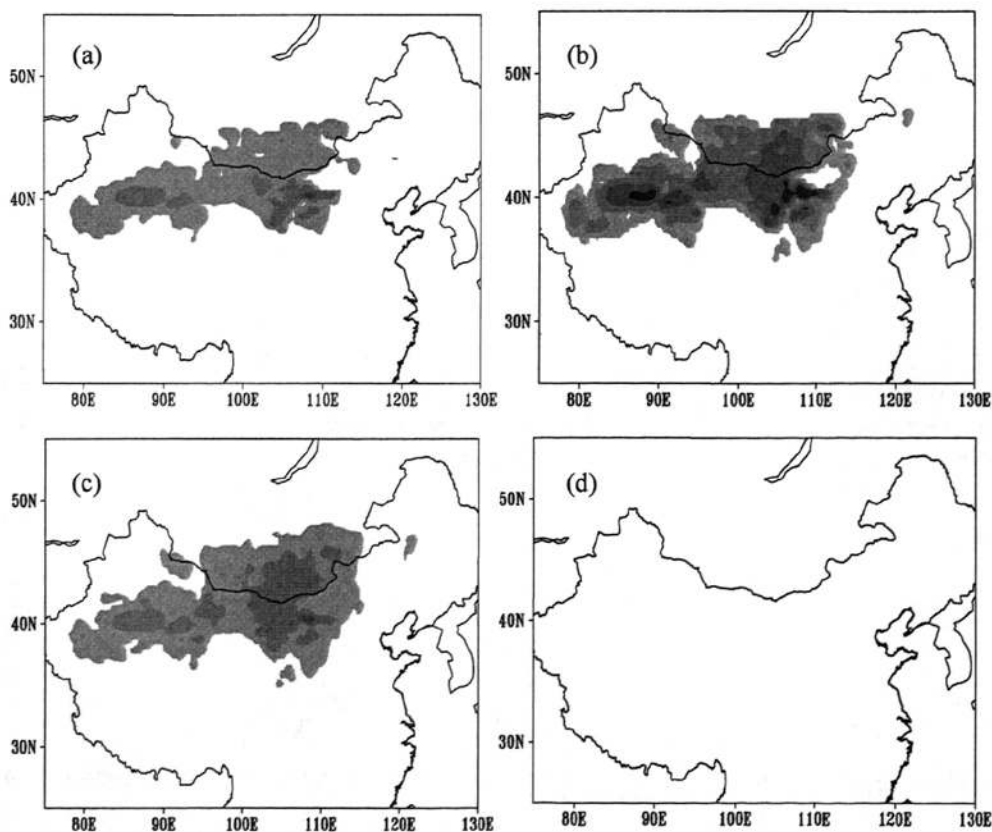
3.3.2 各粒径起沙特征分析

为了更好地理解起沙机制,首先应弄清地表特征和土壤粒子的大小关系密切。起沙主要是由粒子在气流中的两种运动形式跃移和悬浮造成,粒子处于何种运动状态主要与粒子的大小和气流的状态有关。本文采用的起沙模式中,沙尘按粒径分为6组: $d \leq 2 \mu\text{m}$ (黏土), $2 < d \leq 11 \mu\text{m}$ (细粉土), $11 < d \leq 22 \mu\text{m}$ (中粉土), $22 < d \leq 52 \mu\text{m}$ (大粉土), $52 < d \leq 90 \mu\text{m}$ (细沙), $90 < d \leq 125 \mu\text{m}$ (中沙),采取这种分组是根据大气中观测到的尘粒的粒径分布。

我们采用模式输出的每隔3小时的垂直尘通量来分析各粒径组尘通量的空间分布以及起沙最大时次的各粒径组特征。我们选取了此次过程沙尘最强、范围最大的2009年4月23日00时~24日00时这段时间各粒径组粒子总的垂直尘通量。图3.4给出了本次过程各沙尘粒径组的粒子的总的垂直尘通量,垂直尘通量表示由地面向上的瞬时起沙量。显然,粒径大于 $22 \mu\text{m}$ 的粒子垂直尘通量为零。也就是说粒径大于 $22 \mu\text{m}$ 的沙粒没有起沙,但小于 $22 \mu\text{m}$ 的粒径均有起沙。从各粒径的起沙强度来看粒径在 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的粒子起沙量最大,中心值均超过 $10 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其次是 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 粒径组。从粒径的起沙的空间分布特征来看,小于 $11 \mu\text{m}$ 的粒子垂直尘通量有两个大值中心。一个位于塔里木盆地地区,另一个位于内蒙古西南部地区。 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 和 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 这两个粒径组起沙范围均较大,蒙古国南部、内蒙古中西部、新疆东部、甘肃、陕西等地都受到了影响。赵琳娜^[16]在对2006年春季最强沙尘暴起沙模拟中发现,起沙量最大的是粒径 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的沙尘粒子,与本文的得到的结果一致。

由于地面植被类型、土壤等差异造成了各个沙尘源起沙强度不同。研究了各粒径组粒子起沙空间分布特征后,为了解沙尘源随时间的演变特征,我们又研究了几个主要沙尘源各粒径组粒子起沙量随着时间的演变(图3.5a-d)。我们选取了沙尘源中有代表性的不同的区域,计算区域平均内垂直尘通量的空间平均值,来分析时间演变特征。代表地区分别是:蒙古国南部($42 \sim 47^\circ \text{N}$, $103 \sim 115^\circ \text{E}$),内蒙古西部($38 \sim 44^\circ \text{N}$, $100 \sim 105^\circ \text{E}$),甘肃西部($39 \sim 43^\circ \text{N}$, $93 \sim 100^\circ \text{E}$),新疆中南部($35 \sim 40^\circ \text{N}$, $85 \sim 94^\circ \text{E}$)。由于粒径大于 $22 \mu\text{m}$ 的粒子对起沙几乎没有贡献,我们选取粒径小于 $22 \mu\text{m}$ 的3个粒径组和总的起沙量加以讨论。蒙古国的南部地区(图3.5a),从时间演变来看,整个沙尘过程有一个峰值,出现在2009年4月23日03时,这与同时刻地面观测天气现象(图3.2e)中该地区出现沙尘暴最强时间一致。起沙量贡献最大的是 $2 < d \leq 11 \mu\text{m}$ 的粒子,

达到 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 占到该时刻总的起沙量的 80% 以上。贡献最小的是 $d \leq 2 \mu\text{m}$ 的粒子, 其次是 $11 < d \leq 22 \mu\text{m}$ 的粒子, 这两组粒径的沙尘粒子的尘通量均小于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。内蒙古的西部地区(图 3.5b), 也只有一个峰值, 达到 $4.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与同时刻地面观测到的沙尘暴天气出现的时间也基本吻合。同样, 起沙量贡献最大的是 $2 < d \leq 11 \mu\text{m}$ 的粒子; 甘肃西部地区(图 3.5c), 整个沙尘过程有两个峰值, 分别出现在 23 日 00 时和 24 日 03 时, 这与同时次地面观测的沙尘天气现象出现的时间有很好的对应。两个峰值的起沙贡献最大还是 $2 < d \leq 11 \mu\text{m}$ 的粒子, 整个过程最大的尘通量约是 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。新疆中南部地区(图 3.5d)也是有一个峰值出现在 23 日 03 时~23 日 06 时这一时段, 这与同一时段的地面观测天气现象出现在这一地区基本吻合。起沙贡献量最大的依然是 $2 < d \leq 11 \mu\text{m}$ 的沙尘粒子, 最大值约为 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以看出: 就起沙量来看, 甘肃西部地区的起沙贡献较小, 最大值也只有 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 内蒙古的西部地区起沙贡献最大, 超过 $4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。说明了内蒙古西部的沙漠、戈壁是我国北方的主要沙源地。



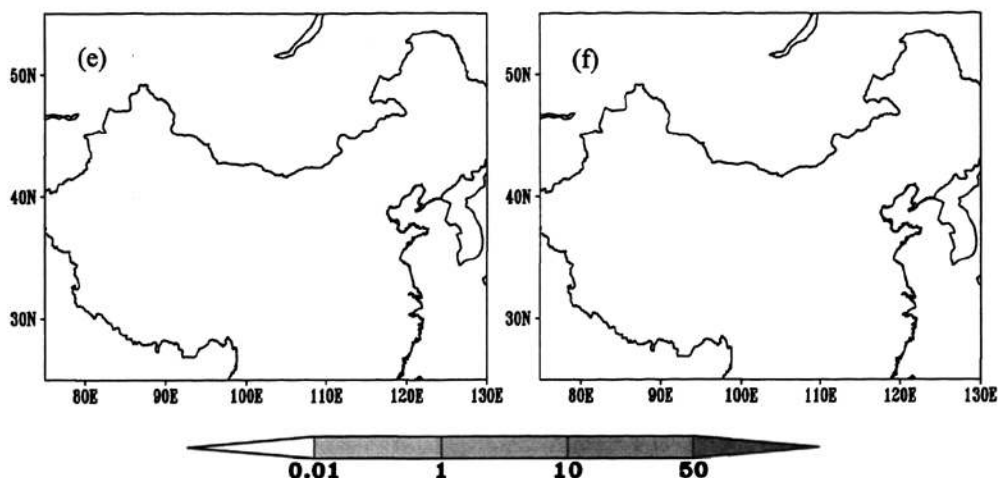


图 3.4 2009 年 4 月 23 日 00 时~24 日 00 时垂直尘通量 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$):
(a) $d \leq 2\mu\text{m}$; (b) $2\mu\text{m} < d \leq 11\mu\text{m}$; (c) $11\mu\text{m} < d \leq 22\mu\text{m}$; (d) $22\mu\text{m} < d \leq 52\mu\text{m}$; (e) $52\mu\text{m} < d \leq 90\mu\text{m}$; (f) $90\mu\text{m} < d \leq 125\mu\text{m}$ 。

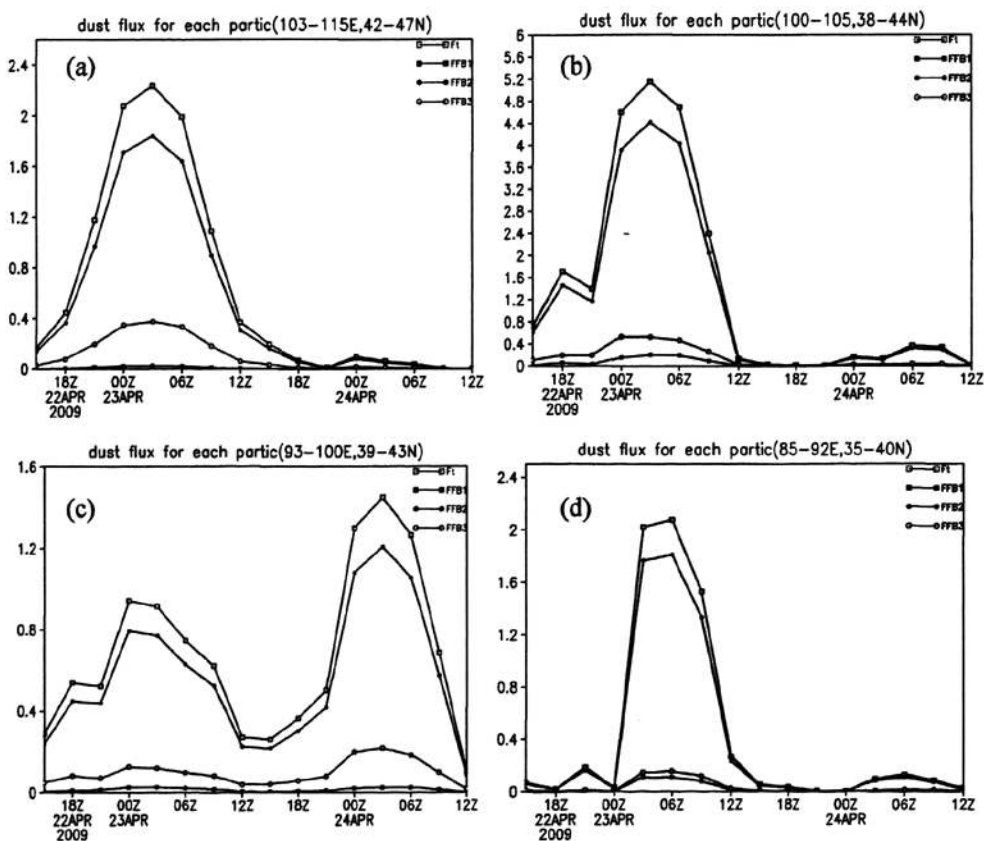
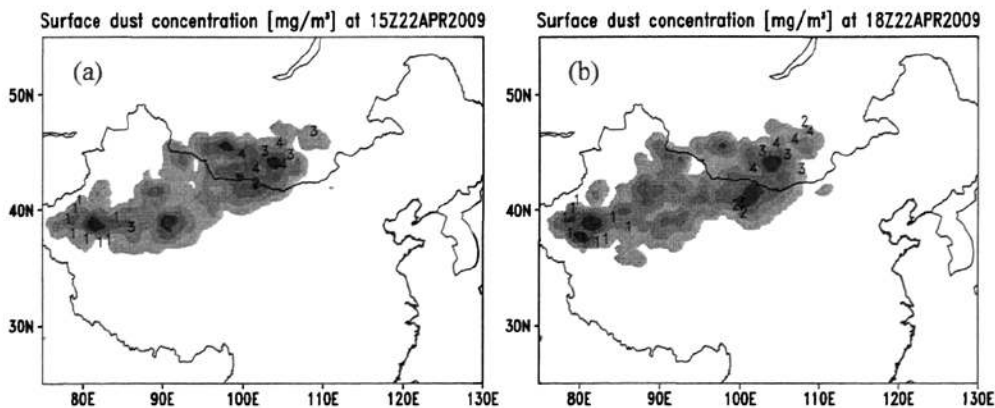


图 3.5 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时各粒径组区域平均起沙量随时间的演变 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

3.4 地面沙尘浓度模拟

3.4.1 沙尘浓度的模拟分析

本文仍采用地面观测的沙尘天气现象来定性的表征地面沙尘浓度的大小。图 3.6 是 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时模拟的沙尘浓度与同时刻地面沙尘天气现象对比。从地面沙尘记录看, 22 日沙尘暴发生在蒙古国西南部的阿尔泰山和杭爱山之间的戈壁, 然后东移南下影响我国的新疆、甘肃、内蒙古等地, 并在内蒙古中部加强(图略)。23 日 00~09 时, 沙尘范围扩大到内蒙古中西部、甘肃中西部、宁夏、陕西北部以及山西中北部等地。其中在甘肃的敦煌、内蒙古中西部局部地区出现了强沙尘暴, 蒙古国的南部戈壁部分地区仍有特强沙尘暴。模拟的沙尘浓度的范围、强度与地面天气现象较为一致, 对于敦煌地区附近强沙尘暴也模拟出来了。经上述检验表明, 模式模拟沙尘的范围和强度(定性的)的时间和空间变化与实况比较一致, 模式具有较高的合理性和可用性。但是可以看到模拟的区域比观测的大, 有些强度达到浮尘和扬沙级别的都没有很好的模拟出来。



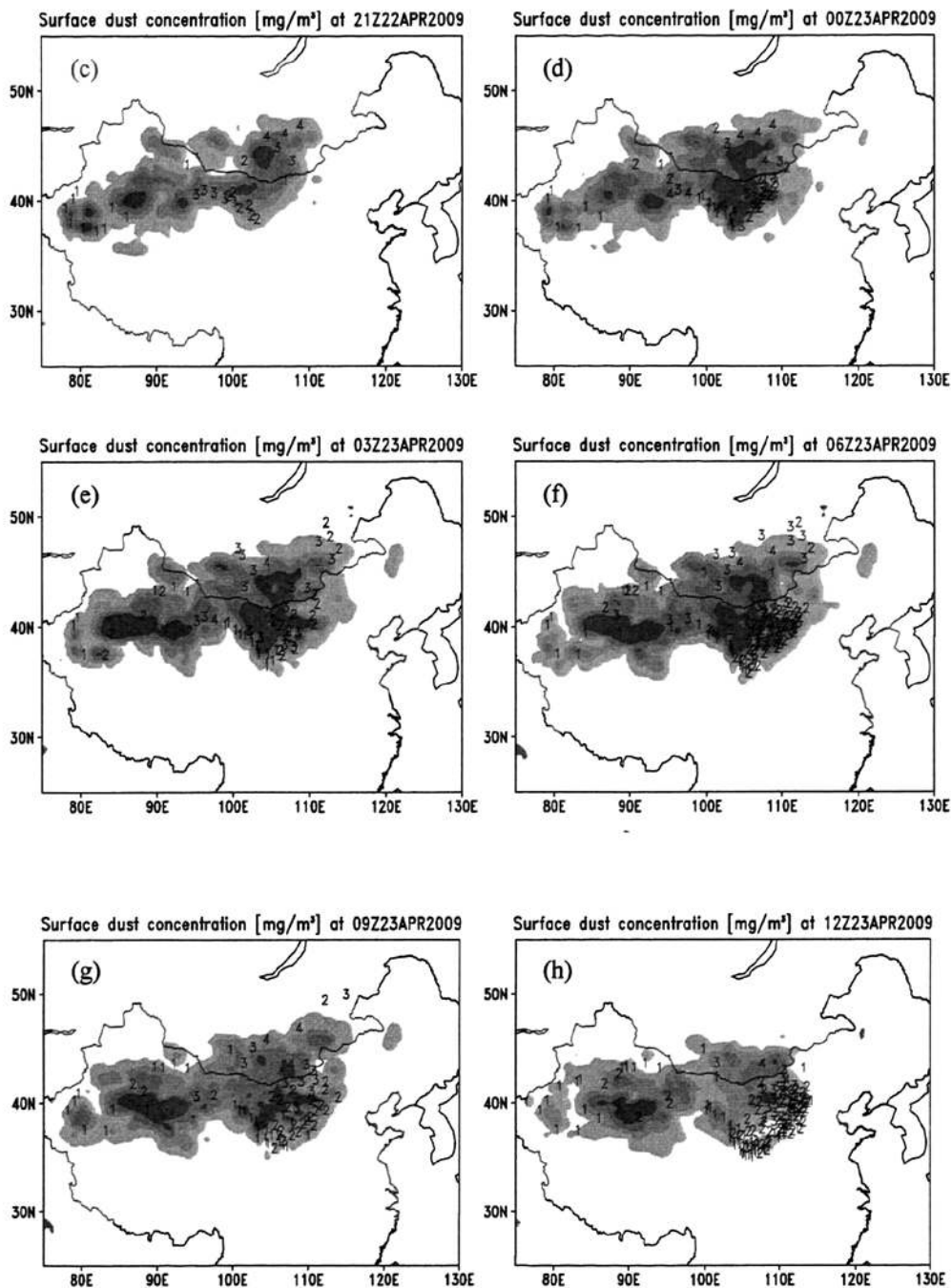
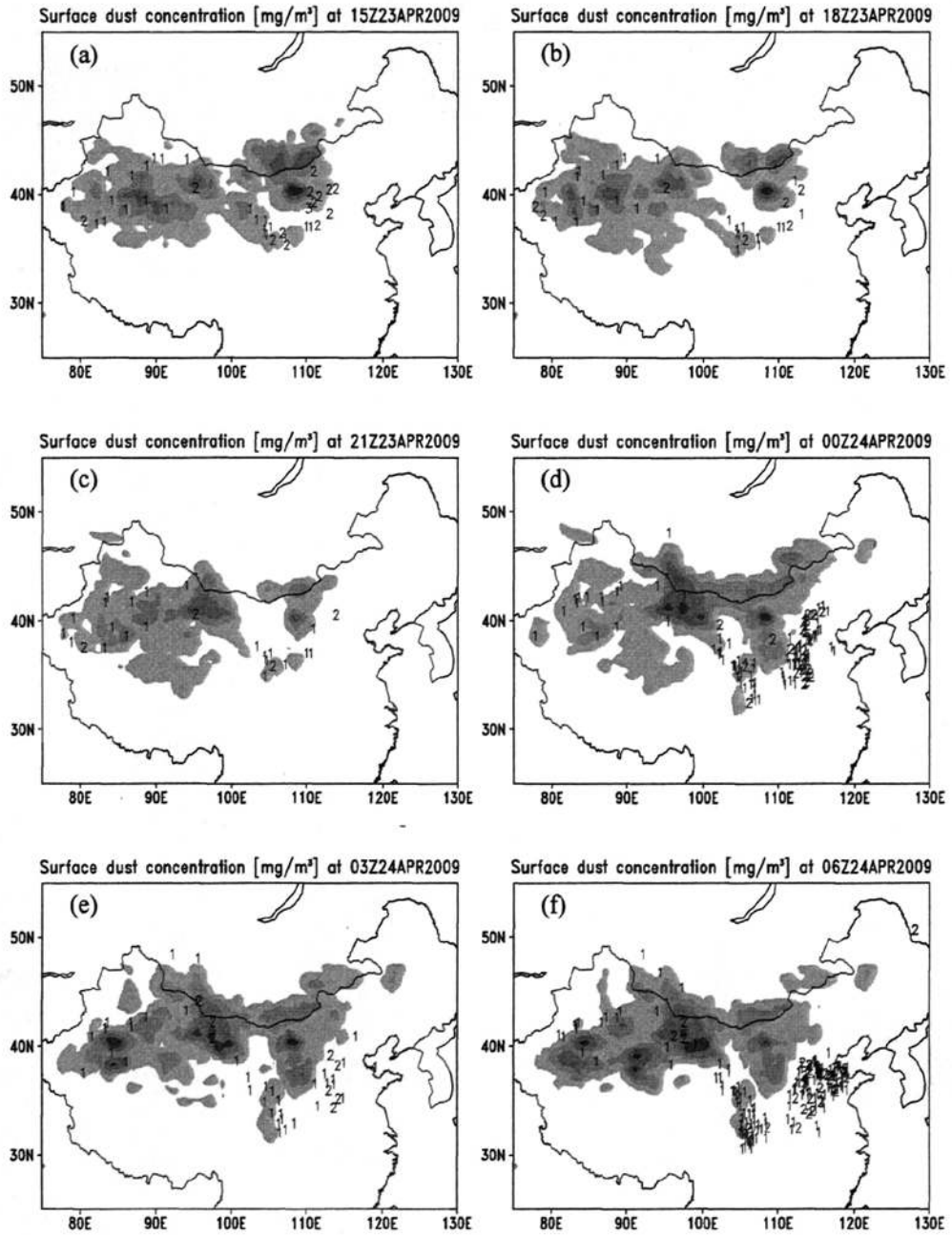


图 3.6 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时日模拟的沙尘浓度(阴影,单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。1 代表地面观测的浮尘, 2 代表扬沙, 3 代表沙尘暴, 4 代表强沙尘暴。



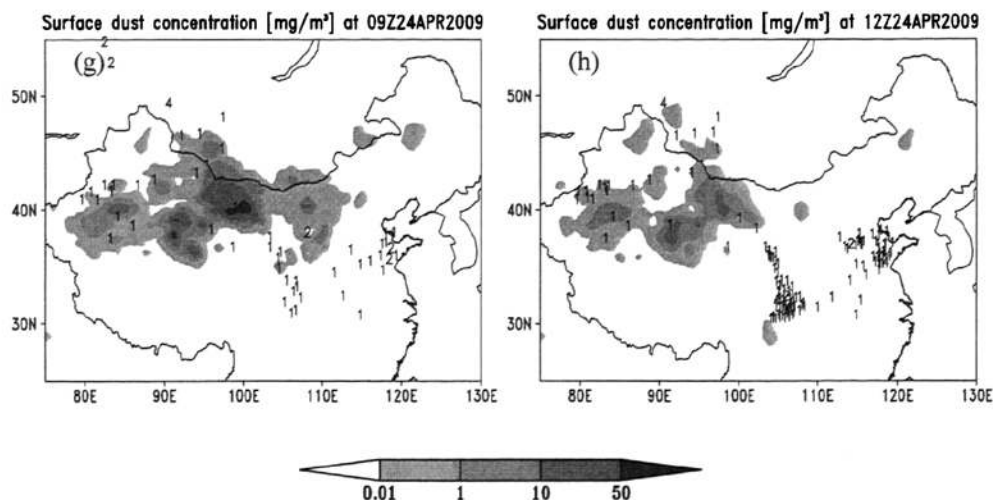


图 3.6 (续) 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时日模拟的沙尘浓度 (阴影, 单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。1 代表地面观测的浮尘, 2 代表扬尘, 3 代表沙尘暴, 4 代表强沙尘暴。

3.4.2 沙尘浓度与卫星云图的对比分析

沙尘暴的监测, 受到传统的地面监测方法和很多因素的制约, 不能很好的跟踪和刻画整个沙尘过程。我们利用卫星云图对沙尘暴的移动发生进行监测和跟踪是目前常用的和最为有效的手段, 这已成为沙尘预警工作的重要组成部分。大气柱沙尘浓度是对各个粒径的总浓度在整层大气上的积分, 单位是 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。利用该量可以将模拟出来的大气柱中的沙尘浓度与卫星监测的沙尘云进行对比。下图 3.7 是模拟的 2009 年 4 月 23 日 02 时整层沙尘含量的积分。由图可见, 沙尘含量较高的地区主要有两个, 一个是位于新疆中南部的塔里木盆地, 一个是蒙古国西南部阿尔泰山戈壁, 另一个是内蒙古的西部地区。这三个地区中心浓度大于 $5000\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这些地区多是沙漠、戈壁地区, 植被覆盖稀疏, 土壤中沙粒占主要, 是主要的沙源地。图 3.8 是 2009 年 4 月 23 日 01: 53 的沙尘监测图, 从内蒙古的中西部一直到蒙古国的南部, 有很长的沙尘带, 受到影响最大的是内蒙古的巴淖尔盟及以北的蒙古国南部。据国家卫星气象中心估算沙尘的影响范围有 23 万平方公里。模拟的沙尘区的范围偏大, 总体上与卫星监测到的沙尘范围一致。

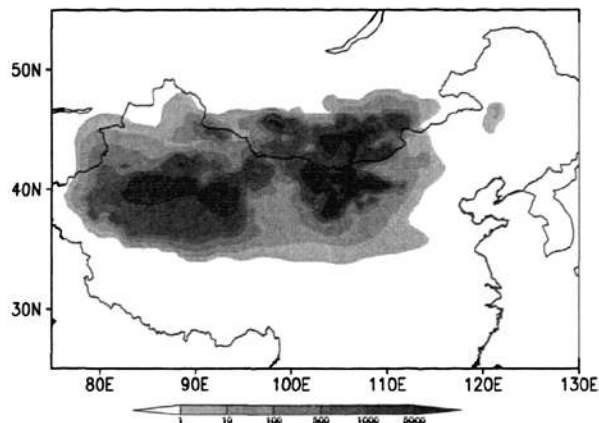


图 3.7 模拟的 2009 年 4 月 23 日 02 时整层沙尘含量 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)



图 3.8 卫星沙尘监测图 2009 年 4 月 23 日 01: 53

3.4.3 各粒径组沙尘浓度分析

分析了单个时次近地面沙尘浓度水平分布的基础上, 为了进一步比较近地面沙尘浓度中各粒径组沙尘浓度的差异, 我们计算了 2009 年 4 月 23 日 00 时~24 日 00 时期间各粒径组平均沙尘浓度 (图 3.9)。从图中我们可以看到, 6 个粒径组中, 小于 $22\mu\text{m}$ 沙尘粒子对近地面沙尘浓度有贡献, 粒径在 $2<d\leq 11\mu\text{m}$ 的沙尘粒子对近地面沙尘浓度的贡献最大, 并且它的影响范围也是最大的。内蒙古中西部、蒙古国南部大范围的沙尘浓度均大于 $10\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 局部地区的沙尘浓度大于 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 $d\leq 2\mu\text{m}$ 的沙尘粒子影响范围最小, $22<d\leq 52\mu\text{m}$ 、 $52<d\leq 90\mu\text{m}$ 、 $90<d\leq 125\mu\text{m}$ 这三个粒径组近地面沙尘浓度均无值。

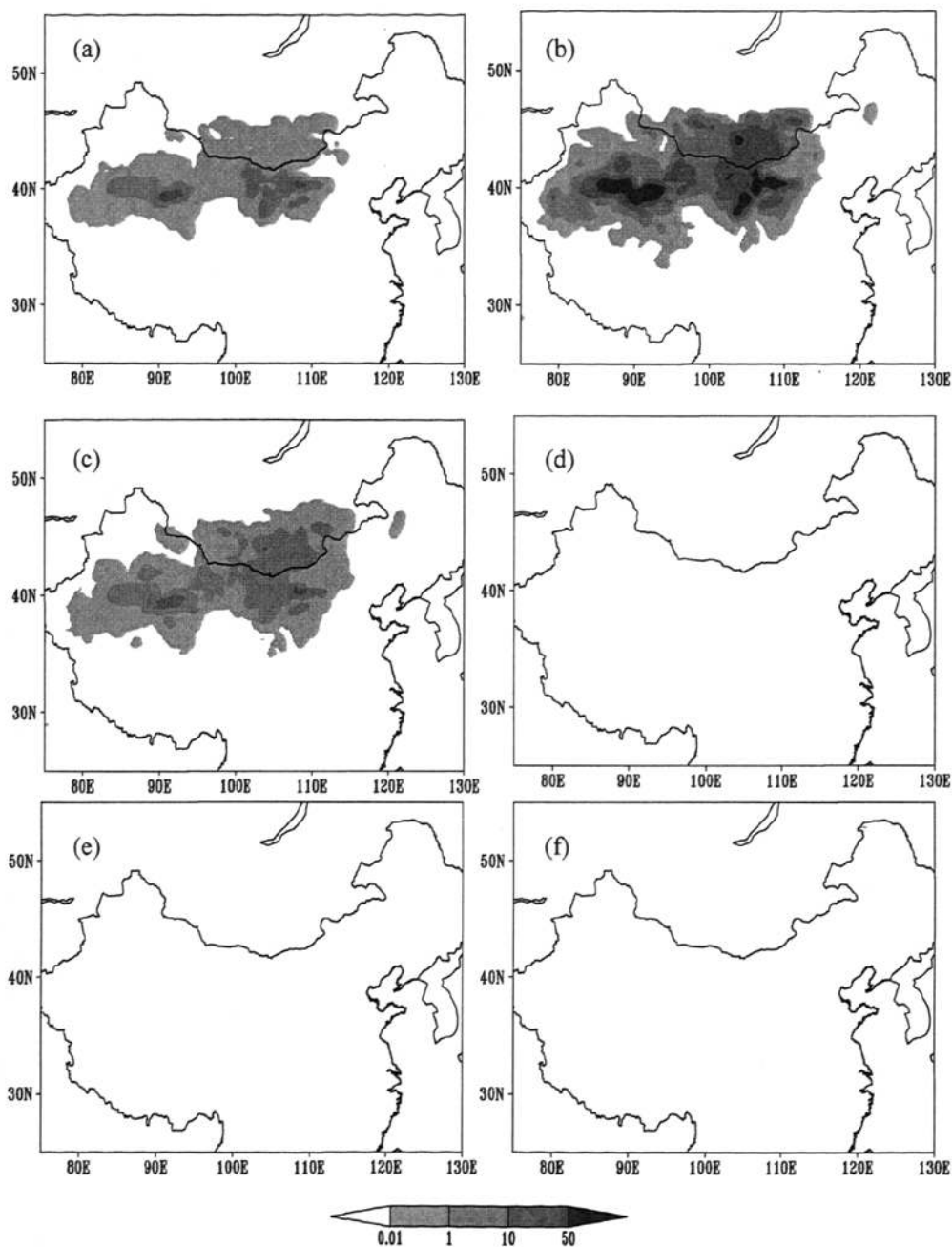


图 3.9 2009 年 4 月 23 日 00 时~24 日 00 时模拟的各粒径平均近地面沙尘浓度 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) (a) $d \leq 2 \mu\text{m}$, (b) $2 \mu\text{m} < d \leq 11 \mu\text{m}$, (c) $11 \mu\text{m} < d \leq 22 \mu\text{m}$, (d) $22 \mu\text{m} < d \leq 52 \mu\text{m}$, (e) $52 \mu\text{m} < d \leq 90 \mu\text{m}$, (f) $90 \mu\text{m} < d \leq 125 \mu\text{m}$ 。

以上分析了各粒径组的平均浓度差异, 可以发现大于 $22 \mu\text{m}$ 的沙尘粒子近

地面浓度几乎没有, 因此分析各粒径随时间演变特征 (图 3.10), 只选取粒径小于 $22\mu\text{m}$ 的粒子分析。我们仍然选取四个代表区域来分析, 从第一个区域 (四个区域的定义见§3.3.2) 蒙古国南部近地面沙尘浓度来看 (图 3.10a), 23 日 00 时, 出现了沙尘浓度的峰值, 约达 $28\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从沙尘浓度贡献来看, 粒径在 $2<d\leq 11\mu\text{m}$ 的浓度达 $23\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 占到总浓度的 80% 左右。分析内蒙古的西部地区近地面沙尘浓度的 (图 3.10b) 的变化, 峰值也同样出现在 23 日 00 时, 达到 $69\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 粒径在在 $2<d\leq 11\mu\text{m}$ 的粒子浓度占到总浓度的 87% 左右。第三个区域位于甘肃西部 (图 3.10c), 在沙尘过程中存在两个峰值, 第一个峰值出现在 23 日 06 时, 达 $27\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 第二个峰值出现在 24 日 06 时, 达 $22\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 两个峰值的浓度相当。与前两个区域类似, 粒径在在 $2<d\leq 11\mu\text{m}$ 的粒子浓度最大。第四个特征区位于我国新疆中南部塔里木盆地附近 (图 3.10d), 出现在 23 日 09 时, 达 $120\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 粒径在 $2<d\leq 11\mu\text{m}$ 的浓度达 $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 占到总浓度的 80% 左右。对比四个区域近地面沙尘浓度大小, 在此次沙尘天气过程中, 我国新疆中南部塔里木盆地附近地区最大, 最小的是第二个区域 (甘肃西部地区)。前者是后者的 4 倍多。

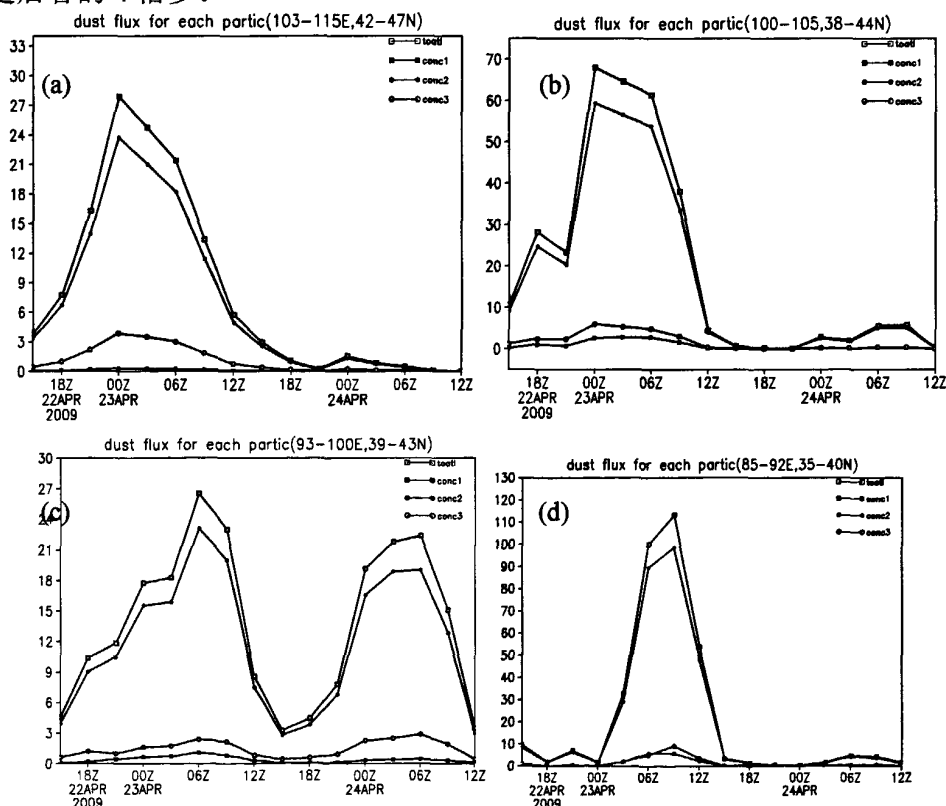


图 3.10 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时沙尘过程各粒径组近地面平均起沙浓度随时间的演变 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

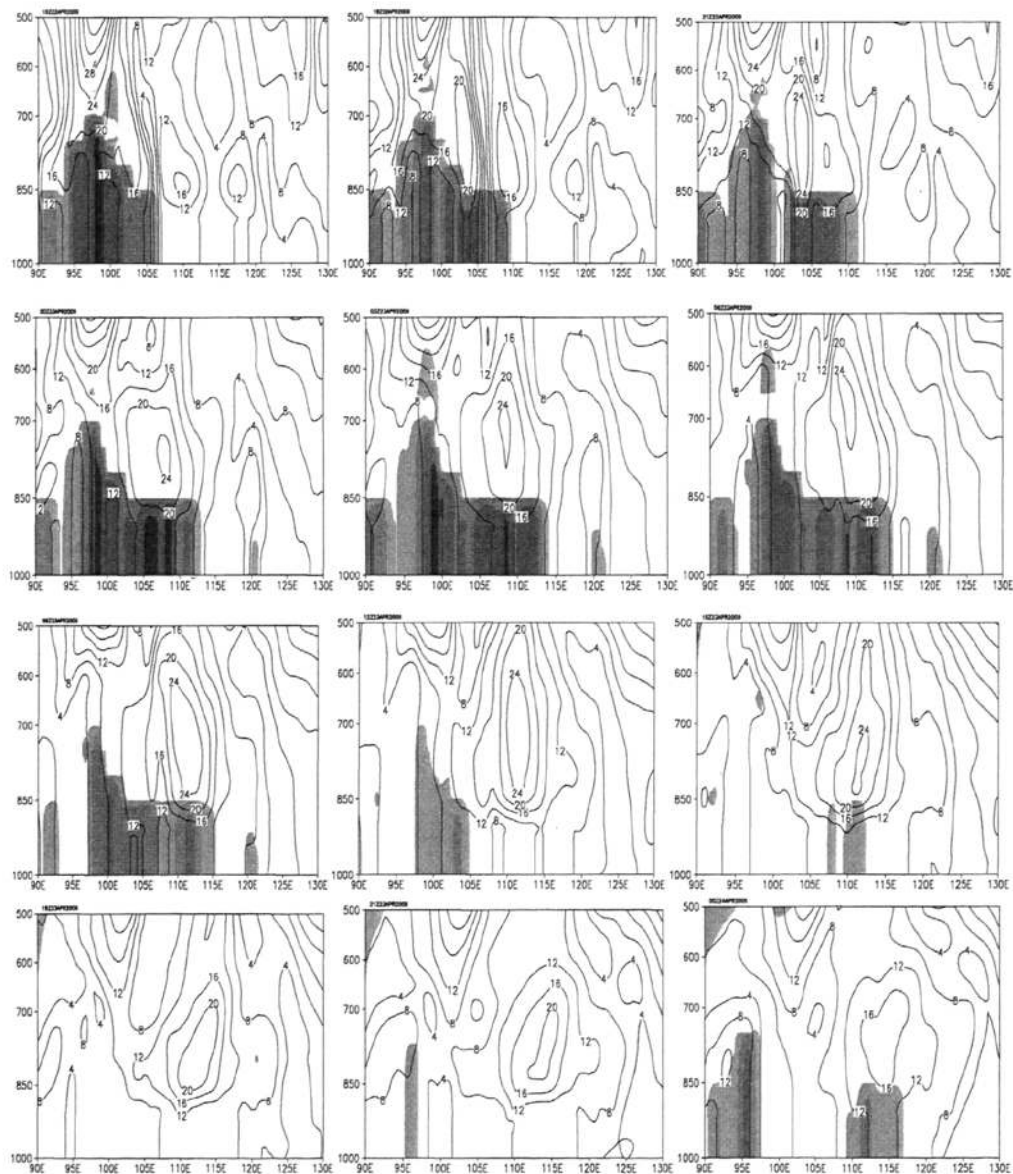
3.5 沙尘输送、沉降过程分析

与起沙过程一样,沙尘在空中的输送也是一个值得关注的问题。关于沙尘输送的研究我国开展的比较晚。黄美元^[50]通过对黄沙输送过程中干沉降过程、降水清除过程的参数化处理,建立了适合东亚地区分谱的黄沙输送模式,对黄沙输送过程有较好的模拟能力。周秀骥^[51]用 HYS2PLIT-4 模式对 2000 年 3 4 月份影响北京的 8 次沙尘暴后向轨迹研究表明:影响北京的沙尘天气在 1000m 上空主要呈 3 个主体输送方向:第 1 条为西北偏北方向;第 2 条为西北方向;第 3 条为偏西方向。这与卫星监测结果较为一致。延昊^[52]利用 SeaWiFS 遥感数据分析东亚沙尘输送的路径,指出:东亚沙尘输送路径有北路、中路和南路三条,北路主要影响中国的东北地区。中路主要影响中国的华北地区,南路主要影响中国的华中和华东地区。但是对沙尘浓度的垂直分布的研究较少。本文利用沙尘预测模式系统(图 3.1)对 2009 年 4 月 22 日 12 时~24 日 12 时沙尘过程的模拟结果来讨论此次沙尘过程的输送与沉降过程,进一步了解沙尘浓度空间分布和时间演变规律。

3.5.1 沙尘输送的模拟分析

沙尘的垂直输送主要是靠气流一定的上升运动和中低层大气流场决定的。为了了解沙尘高低空差异和沙尘输送机制,我们分析沙尘浓度垂直剖面图。图 3.11 给出了 2009 年 4 月 22 日 15 时~4 月 24 日 12 时沿着 45°N 的沙尘浓度垂直剖面。由图可见,积分 3 小时后,开始出现沙尘,主要位于对流层低层,从地面到 600hPa 附近。从纬向分布看,位于 97°~99°E 之间的沙尘浓度最大,均超过 $10\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,垂直输送的高度接近 700hPa 所在的高度,105°E 以西地区大部分沙尘都沉降到地面,中层风速超过 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此,大量沙尘能够长距离的输送。随着沙尘的发展和输送,23 日 00 时,蒙古气旋发展最强,纬向分布来看,三个区域的沙尘浓度大于 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,从地面到 700hPa 之间。此时 105°~110°E 之间低层风速增大,超过 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,沙尘继续向东输送。23 日 03 时,沙尘暴发展最强,沙尘浓度垂直输送从地面一直延伸到 550hPa 附近,110°~115°E 之间,低层风速超过 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,沙尘继续向东输送。23 日 12 时开始,沙尘浓度减小,97°~105°E 之间沙尘浓度均小于 $1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,较前几个时次,垂直输送的高度在 700hPa 附近,较前几个时次垂直输送的高度下降。24 日又出现了较大范围的沙

尘浓度区域, 低层风速减小到 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 沙尘不再被大风向东输送。这些变化与地面观测天气现象的变化趋势是一致的。综合分析整个沙尘浓度的垂直变化, 可以发现: (1) 此次沙尘过程中, 沙尘被垂直输送的高度在 550hPa 以下; (2) 沙尘输送白天强于晚上, 白天的垂直输送一直地面延伸到 600hPa 附近。(3) 起沙后的沙尘粒子的输送主要靠对流层中低层的大风来输送, 大风能将沙尘远距离的输送。



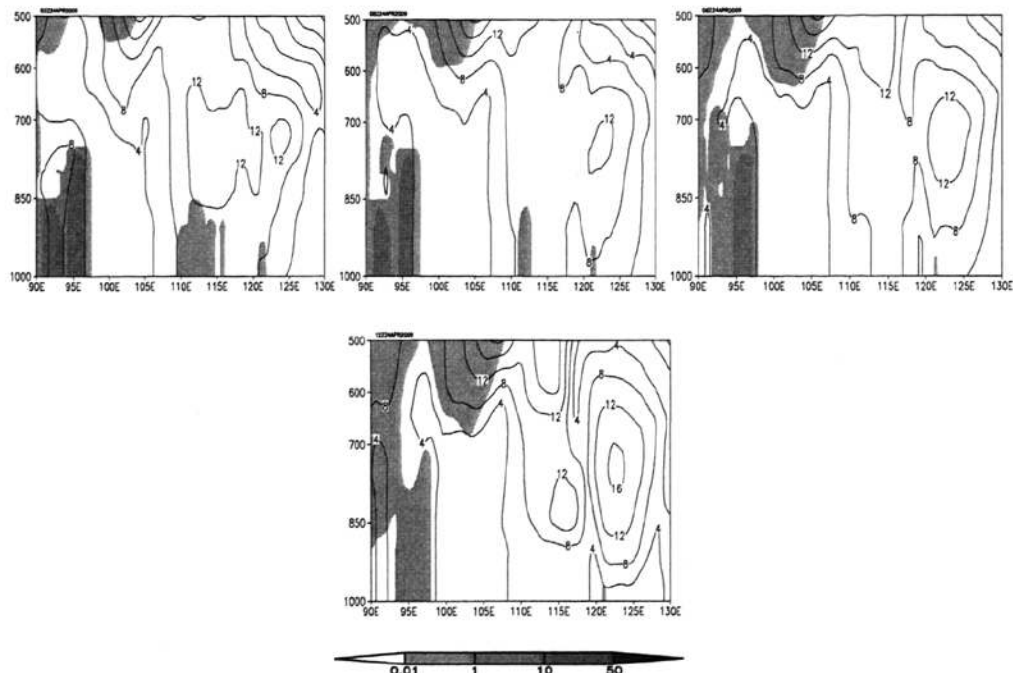
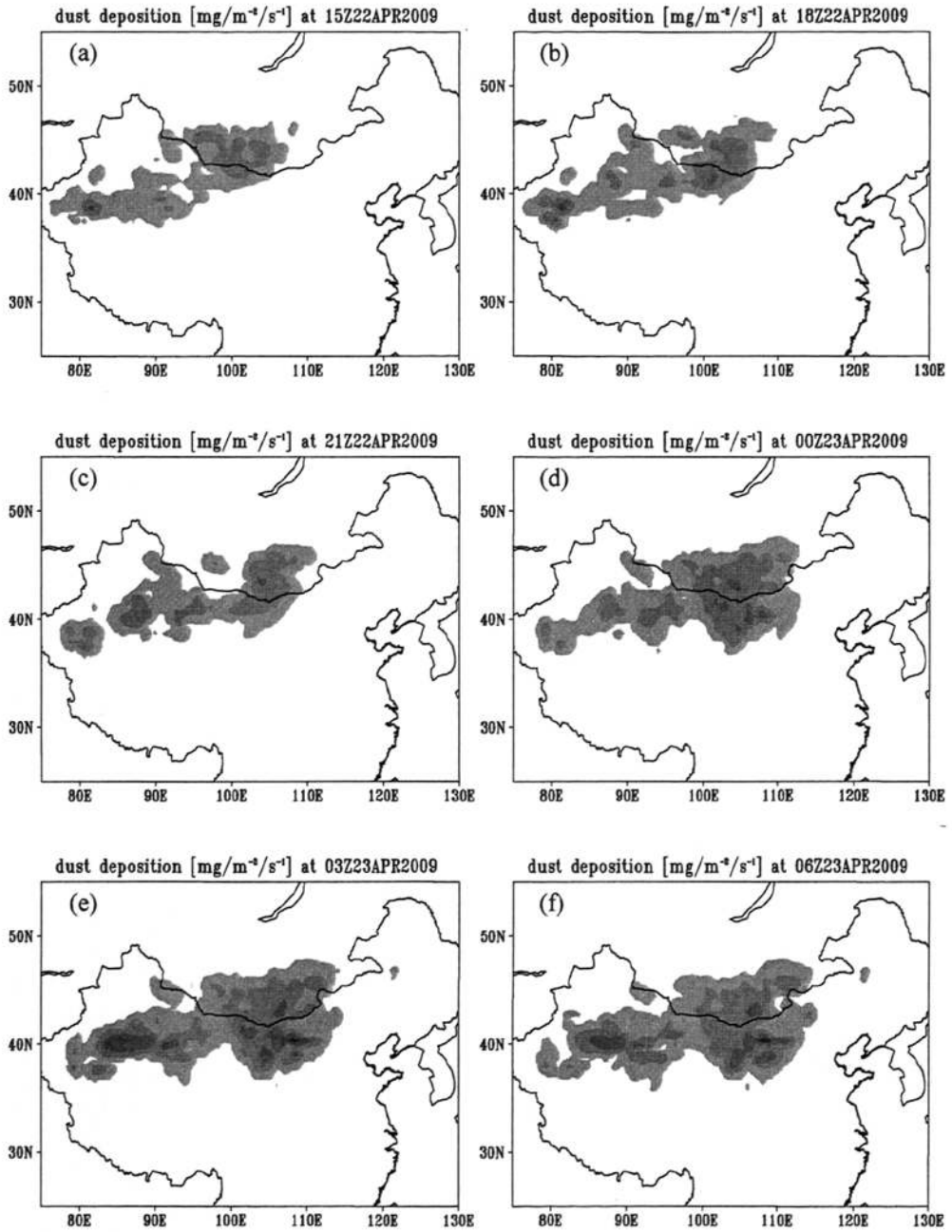


图 3.11 2009 年 4 月 22 日 15 时~24 日 12 时沿着 45°N 的沙尘浓度垂直剖面图（阴影，单位： $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）和风速大小（实线，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）。

3.5.2 沙尘沉降的模拟分析

沙尘沉降过程是以起沙和输送过程为前提的，影响干沉降的因子主要有重力作用和湍流作用。本模式中描述沙尘沉降（干沉降过程）的物理量记为 DT ，它是由于沉降作用所引起的沙尘在地表的垂直通量。与垂直沙通量 FT 一样，即沙尘单位时间、单位面积的质量通量。前几个部分我们主要对 2009 年 4 月 22 日~24 日这次沙尘过程的起沙和输送进行了模拟分析。下图 3.12 给出了 2009 年 4 月 22 日 12 时~24 日 12 时沙尘沉降率的模拟结果。从图中可以看出，主要的沉降区是：内蒙古的巴淖尔盟及以北的蒙古国南部的戈壁沙漠地区、新疆中南部的塔里木盆地。甘肃西北部地区。



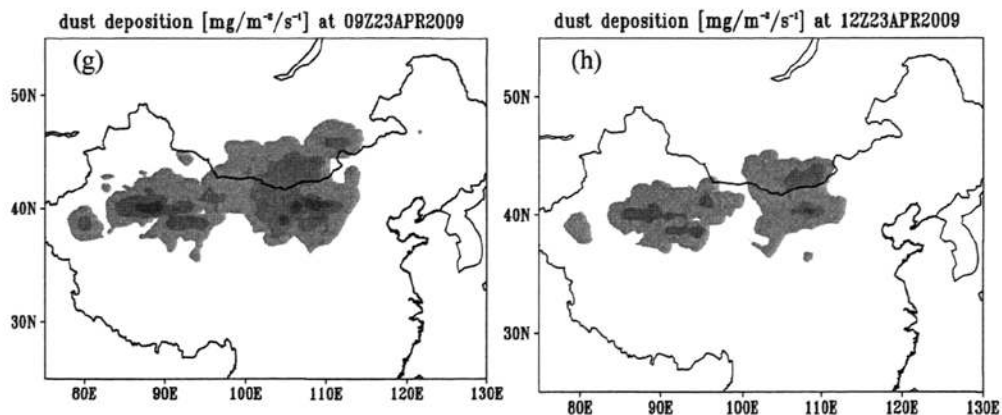
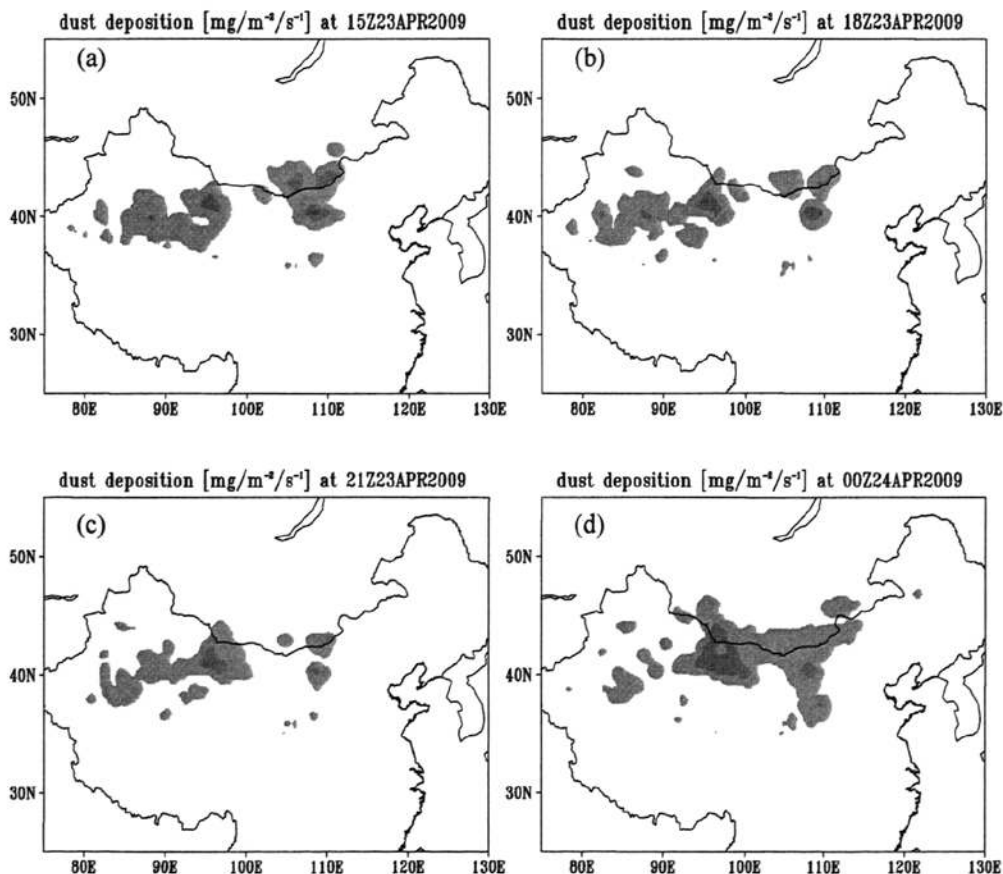


图 3.12 模拟的 2009 年 4 月 22 日~24 日沙尘沉降率 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。



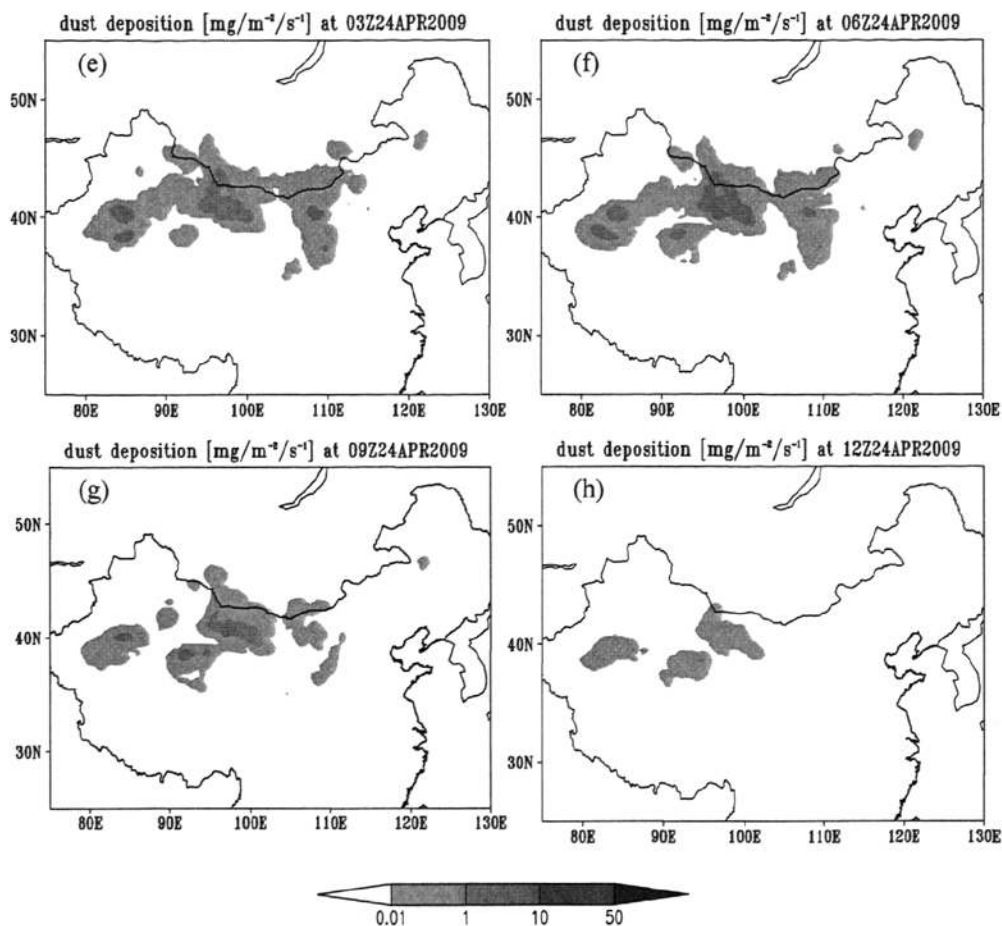


图 3.12 (续) 模拟的 2009 年 4 月 22 日~24 日沙尘沉降率 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

3.6 小结

本章采用沙尘天气数值预测系统对 2009 年 4 月 22 日~24 日发生在我国广大区域的强沙尘暴过程的起沙、输送和沉降过程进行数值模拟研究。结论如下:

采用地面天气观测现象与模拟沙尘浓度比较发现, 模式模拟沙尘的范围和强度 (定性的) 的时间和空间变化与实况比较一致, 模式具有较高的合理性和可用性。

可以看到这次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是我国南疆盆地、甘肃、内蒙古的西部以及蒙古国南部。从起沙的量来看, 在内蒙古巴彦淖尔盟附近的起沙量超过了 $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 塔里木盆地地区也有一个超过 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大值中心。

分析各粒径组平均沙尘浓度,从图中我们可以看到,6个粒径组中,小于 $22\mu\text{m}$ 沙尘粒子对近地面沙尘浓度有贡献,粒径在 $2<d\leq 11\mu\text{m}$ 的沙尘粒子对近地面沙尘浓度的贡献最大。 $d\leq 2\mu\text{m}$ 的沙尘粒子影响范围最小, $22<d\leq 52\mu\text{m}$ 、 $52<d\leq 90\mu\text{m}$ 、 $90<d\leq 125\mu\text{m}$ 这三个粒径组近地面沙尘浓度均无值。

综合分析整个沙尘浓度的垂直变化,可以发现:此次沙尘过程中,沙尘被垂直输送的高度在 550hPa 以下;沙尘输送白天强于晚上,白天的垂直输送一直地面延伸到 600hPa 附近。起沙后的沙尘粒子的输送主要靠对流层中低层的大风来输送,大风能将沙尘远距离的输送。

第四章 2008 年和 2009 年两次最强沙尘暴的诊断、模拟对比分析

对一些具有代表性的沙尘暴个例进行比较分析,来进一步搞清楚不同影响系统下沙尘天气的成因和发生机制也是十分重要的。蒙雪峰等人^[53]对内蒙古地区2004年3月9-10日和2004年3月26-27日发生的沙尘暴天气过程进行了数值模拟和对比分析。分析结果表明:强冷空气活动是内蒙古地区沙尘暴天气发生的主要原因:沙尘暴天气发生时,蒙古气旋和强冷锋锋区的动力机制有所不同。李小龙和方宗义^[54]利用卫星、再分析(NECP)、地面观测等多种资料,针对2006年3和4月影响北京的两次沙尘天气过程,就天气过程形势、云系演变以及沙尘传播和沉降进行分析。本章想要通过对2008年5月26~28日和2009年4月23~25日两次在两年中最强的沙尘暴天气过程对比分析,来进一步认识在蒙古气旋系统和冷空气等的影响下,这两次沙尘暴天气的形成机理等有何异同。

4.1 沙尘暴前期气候背景分析

4.1.1 前期降水偏少、温度偏高

针对这两次强沙尘暴的气候背景,我们分析前期降水以及下垫面的状况有关。2008年4月下旬至5月下旬,西北大部及内蒙古大部等地降水量不足20mm,其中内蒙古中西部、甘肃西部、宁夏北部、青海西北部、新疆南部等地降水量不足10mm或无降水,上述地区降水量普遍较常年同期偏少3至9成。同期,上述大部地区气温较常年同期偏高1~2℃。5月份我国气温起伏较大,月内出现了4次较大范围的降温过程。但进入5月下旬,气温急剧回升,5月21日达茂旗、二连浩特、正蓝旗等地最高气温为15℃,到25日突然上升到27℃。温度显著升高,地表蒸发加大,土壤变干从而有利于沙尘暴的发生。

2009年4月西北大部及西藏、山西中南部、内蒙古东北部等地降水偏少3~8成,同期,全国平均气温为4.5℃,较常年同期偏高1.3℃。其中西北大部以及内蒙古大部、山西北部、西藏中部等地偏高2~4℃,新疆东部等地偏高4℃以上。部分地区气温持续偏高(其中中旬宁夏、甘肃平均气温比常年同期偏高5~6℃,创历史新高),土壤水分蒸发加快,导致干旱迅速发展。2009年4月也有

几次较强的冷空气过程，其中 4 月 20 日开始陕西北部、内蒙古中东部、东北地区大部、华北、黄淮北部等地气温将下降 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，其中内蒙古东部部分地区降温幅度可达 $10\sim 12^{\circ}\text{C}$ 。全国很多地区均有不同程度的降温。但从 23 日开始大风降温的地区气温迅速回升，和 2008 年 5 月下旬类似，温度显著回升，加快土壤变干，地表浮土增多从而有利于沙尘暴的发生。

2008 年和 2009 年这两次沙尘过程前期均具有温高雨少，导致内蒙古、陕西、甘肃、等地在发生沙尘暴前期，干旱持续发展，部分地区达到重旱。旱情严重，土壤墒情很差，地表物质疏松干燥，这一条件为沙尘天气提供了物质基础。另外由于干旱地面植被尚未返青，地表覆盖较差，这一条件成为沙尘天气加强的重要因素。

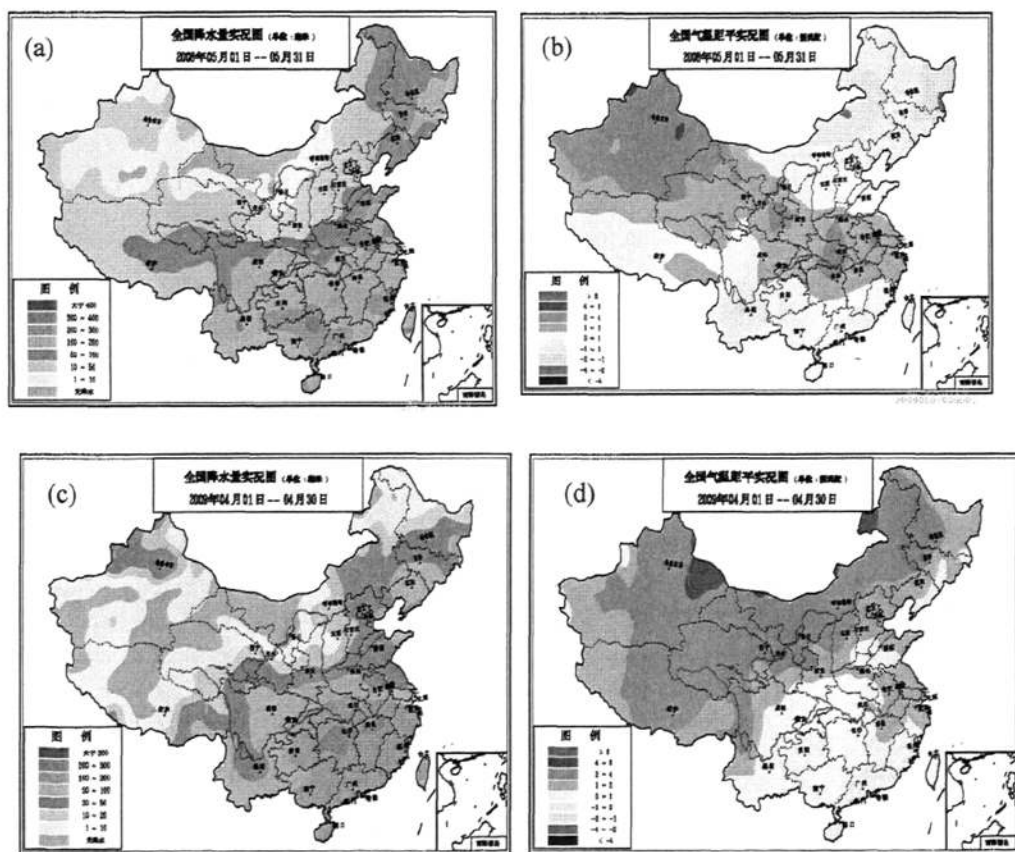


图 4.1 (a)、(c) 2008 年 5 月、2009 年 4 月全国降水量分布 (单位: mm); (b)、(d) 2008 年 5 月、2009 年 4 月全国平均气温距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。

4.1.2 两次沙尘过程概况

2008 年 5 月 26~28 日,我国华北、东北出现了一次强沙尘暴天气过程,其中华北、东北中南部及内蒙古中西部、南疆盆地等地的部分地区出现扬沙或浮尘,内蒙古中部和东部偏南出现了沙尘暴,部分地区出现强沙尘暴。这是 2008 年我国北方地区持续时间最长、影响范围最大的一次沙尘天气过程。据新闻报道内蒙古二连浩特能见度只有 400 米,苏尼特左旗和那仁宝力格能见度同为 600 米,乌拉盖、东乌珠穆沁旗、苏尼特右旗、阿巴嘎旗和克什克腾旗能见度为 700~800 米。

2009 年 4 月 23~25 日,我国出现 2009 年的第六次、也是最强的一次沙尘天气过程。这次沙尘暴的特点是:强度大、范围广、持续时间长。4 月 23 日凌晨至 24 日早晨,内蒙古中西部、甘肃中西部、宁夏、陕西北部、山西中北部、新疆南疆盆地等地出现扬沙或沙尘暴,甘肃中西部、内蒙古中西部的局部地区出现了强沙尘暴,其中甘肃地区玉门、瓜州、肃州、民勤等 5 站能见度低于 500m 的强沙尘暴、敦煌出现特强沙尘暴。24 日白天,沙尘影响的区域继续东移南下,河北中南部、山东北部、河南东北部及渤海湾等地上空都出现了浮尘或扬沙天气。本文为方便叙述,将 2008 年 5 月 26~28 日这次沙尘暴过程简称为过程一,2009 年 4 月 23~25 日这次沙尘暴过程简称做过程二。

4.2 两次沙尘暴天气过程分析

4.2.1 气象卫星沙尘监测图

2008 年 5 月 26 中午前后中蒙边境、内蒙古东南部出现大范围沙尘天气(图 4.2ab),5 月 27 日早晨气象卫星监测显示内蒙古东南部、河北中北部、京津地区等地出现了大范围的沙尘天气。连续监测显示,27 日上午开始,在西北大风的影响下,蒙古气旋的西南侧又出现西北东南走向的沙尘区域,沙尘天气影响到蒙古国东部,我国内蒙古中东部、河北北部、辽宁北部、吉林西部和黑龙江西南部等地。沙尘天气随着气旋东移向东向南扩散。28 日上午气象卫星监测显示:吉林中西部仍然有大范围的沙尘区,华北东部、渤海、山东半岛上空有浮尘区覆盖,中午开始减弱。沙尘主要起源于蒙古国南部的戈壁。

2009 年 4 月 22 日 NOAA~18 的观测显示(图 4.2cd),22 日下午开始,

蒙古国西部、我国新疆东部、河西走廊、内蒙古西部和中部地区等地先后出现了沙尘天气。傍晚前后，沙尘区南移到中蒙边境蒙古一侧，新疆东部的部分地区也受到了沙尘区的影响。连续监测显示 23 日上午，随着蒙古气旋的东移，沙尘影响区已经东移到内蒙古中西部，其中，从监测图像分析，沙尘影响强度最大的地区在甘肃中西部部分地区、内蒙古巴彦淖尔盟及以北的蒙古国南部。这次过程沙尘主要起源于蒙古国西南部的阿尔泰山和杭爱山之间的戈壁。蒙古气旋的发展要比过程一强大一些，云系更加密实结构清晰，有非常完整的气旋结构。

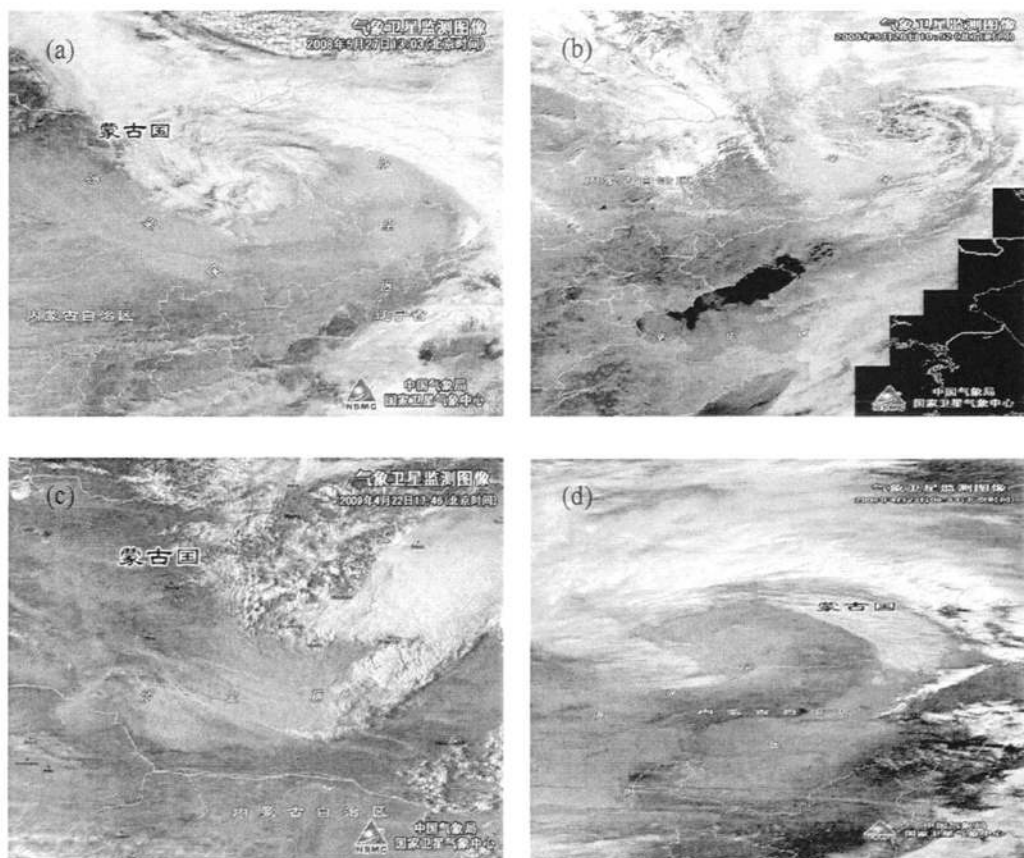


图 4.2 气象卫星沙尘监测图 (LST) (a) 2008 年 5 月 28 日 12:50; (b) 2008 年 5 月 27 日 13:03; (c) 2009 年 4 月 22 日 17:46; (d) 2009 年 4 月 23 日 09:53。

4.2.2 两次沙尘暴的移动路径分析

沙尘暴的研究者对沙尘暴的路径做了很多分析^[55]发现，除南疆盆地外，其他沙尘暴天气过程可以分为偏西路径、西北路径、偏北路径。但是各个沙尘暴

个例并不严格遵循以上路径，此外研究区域不同，分类不同。2008 年的这次沙尘暴过程的路径与 2009 年 4 月的这次过程的路径不同，下面我们来分析一下，图 4.3 (a-d) 08 年 5 月 26 日 09 时 (UTC) ~28 日 12 时 (UTC) 这次沙尘过程的路径是蒙古国—内蒙古—北京转向东北路径，我们利用 500hPa 高空资料 and 地面资料对这条路径的成因进行了分析。我们认为主要原因是：地面低压系统（蒙古气旋）从内蒙古东部地区逐渐移动到东北附近，高压系统由西北向东南方向移动。500hPa 的浅槽线或者低涡底部的气流的偏西分量较大。沙尘暴的爆发区位于锋面附近高低压之间气压梯度密集区，沙尘暴就这样随着低压系统（蒙古气旋）的东移沙尘天气可以继续向东扩散。

2009 年 4 月 22 日至 25 日的这次沙尘暴过程的移动情况，可以看出此次过程的路径是：蒙古国—内蒙古—河西走廊—北京转向东南走向。这次沙尘暴影响范围很广泛，甘肃西部和内蒙古中西部等地的区域性沙尘暴天气为主，局地有强沙尘暴、特强沙尘暴。我国河西走廊北部有巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠，这些地方对我国沙尘暴的发生有重要影响。这种情况下，往往受到天气系统影响，这个地区的沙尘暴能影响我国华北大部分地区。这次过程就是沿着此路径影响下游地区。

图 4.4 (a-d) 显示了 2009 年 4 月 22 日~24 日沙尘暴沿着河西走廊东移的情况。22 日凌晨开始，在河西走廊北部有沙尘暴天气报告。23 日 00 时开始，河西走廊以及河西走廊以东地区出现了大范围的浮尘以及沙尘暴报告。浮尘天气逐渐向偏东南方向扩散。为了解这种沙尘暴的移动路径，我们分析了地面气形势图，2009 年 4 月 22 日 18 时（图 4.4b）海平面气压图上可以看出。我国有两个低压系统一个位于新疆地区，一个位于中蒙交界处，地面低压系统呈现东北—西南走向。新疆地区低压后部巴尔喀什湖附近、贝加尔湖西部有各有一个高压系统。23 日 08 时，巴尔喀什湖附近的高压系统东移与贝加尔湖的高压合并加强，随着系统的演变，高压进一步将两个低压系统分开。相应的沙尘暴地区分成了两部分，一部分向东移动，另外一部分向南移动。实际上这次过程包含了东移和东南移两个路径。我们还发现，500hPa 天气图上偏北气流较强，这也是此次沙尘暴影响我国南方地区的另一原因。

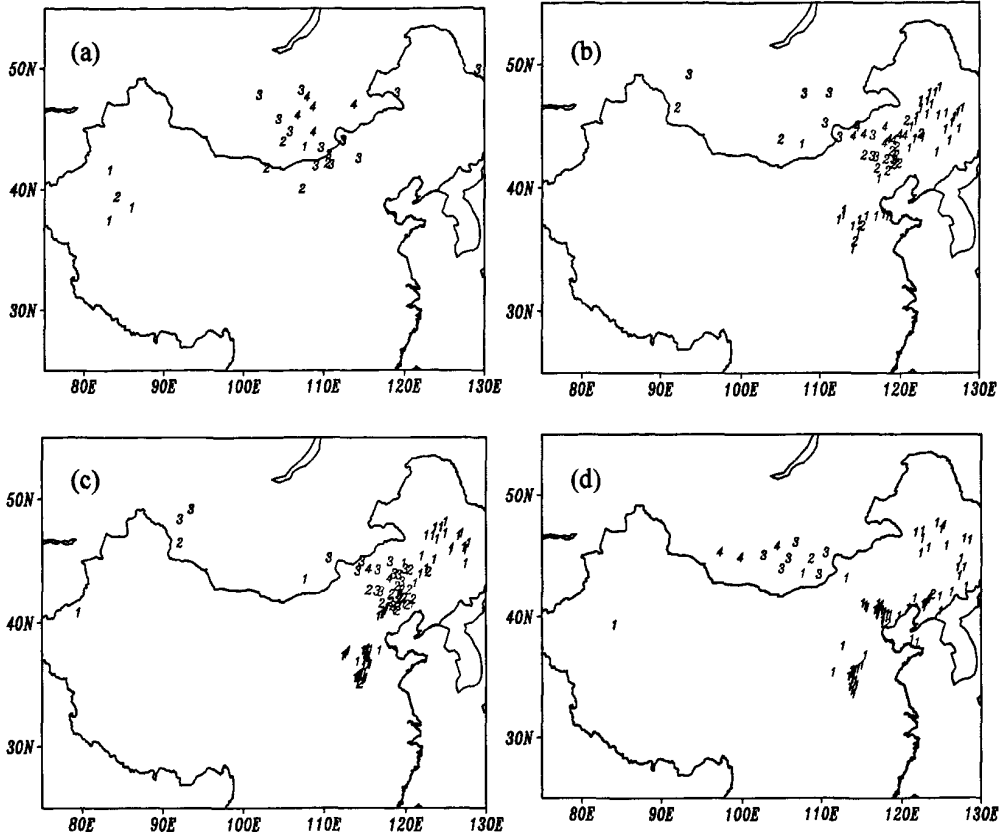
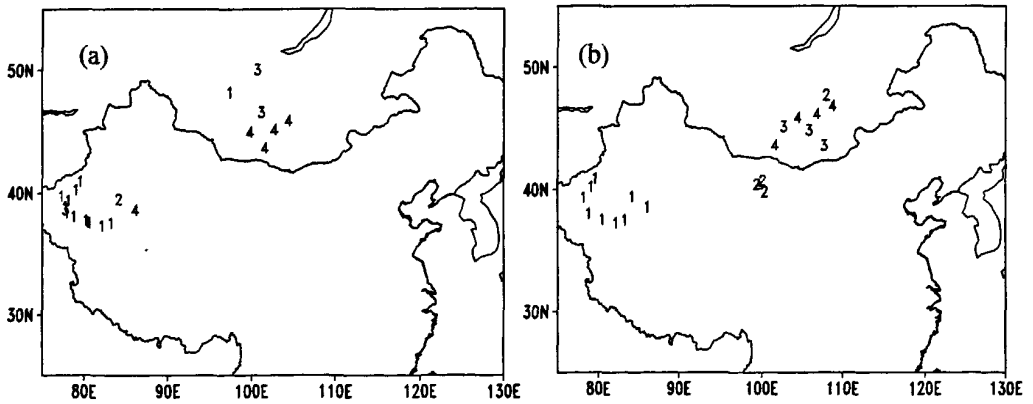


图 4.3 沙尘暴的移动情况 (a) 2008 年 5 月 26 日 09 时; (b) 27 日 09 时; (c) 27 日 12 时; (d) 28 日 00 时。



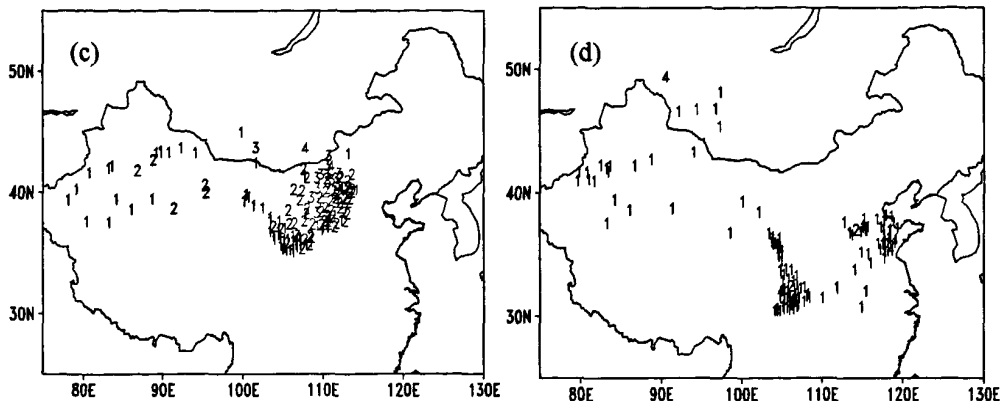


图 4.4 沙尘暴的移动情况 (a) 2009 年 4 月 22 日 12 时; (b) 22 日 18 时; (c) 23 日 12 时; (d) 24 日 12 时。

4.2.3 高空形势分析

2008 年 5 月 26 日 00 时 (图略) 500hPa 高空图上, 中高纬度地区是一槽一脊的环流形势。槽位于贝加尔湖西南侧附近, 配合 -32°C 的冷中心。26 日 12 时 (图 4.5b), 槽上出现了闭合中心, 中心值为 5440gpm, 槽后有冷平流。地面气旋位于蒙古国东部地区。在这种形势下, 蒙古国南部以及内蒙古的二连浩特、苏尼特左旗等地区出现沙尘暴天气, 尤其在蒙古国东南部地区出现强沙尘暴天气。随着地面气旋的移动沙尘暴区继续东移。27 日 00 时 (图略), 槽线延伸到河套地区, 槽线附近的等高线与等温线几乎垂直, 有很强的冷平流。气旋南压影响到华北北部包括河北、山西、东北西部以及内蒙古的中东部并且继续向东向南扩散。27 日 12 时 (图略), 槽线东移加深, 地面气旋强度减弱, 移动到东北地区西部, 受其影响黑龙江西南部、辽宁西北部、内蒙东部地区均出现沙尘暴天气。28 日, 沙尘天气仍在持续扩散, 东北大部、内蒙古中东部和京津地区仍笼罩在浮尘中, 山东半岛及河南也有浮尘。28 日夜间此次蒙古气旋引起的沙尘天气将减弱。

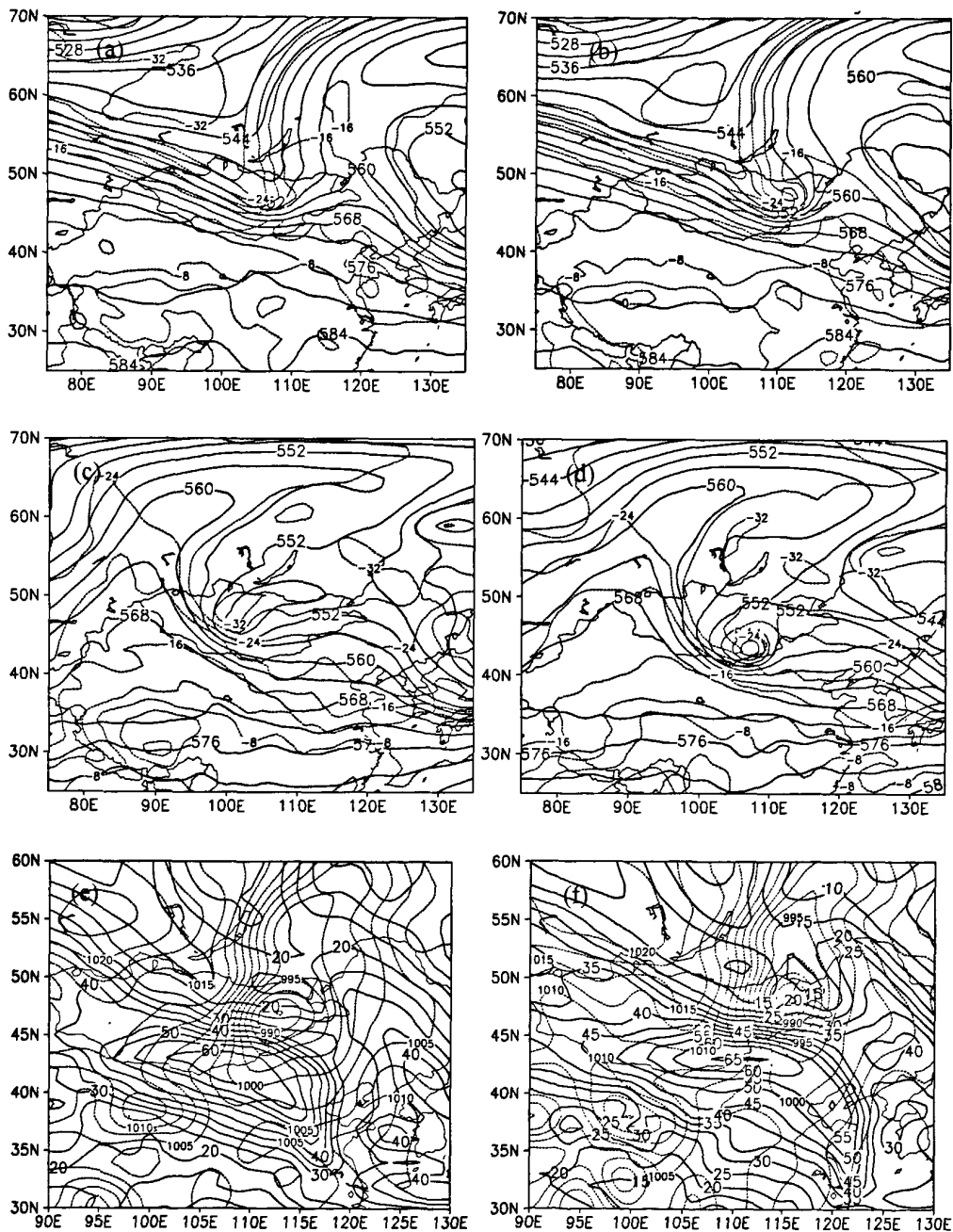
2009 年 4 月 22~24 日 500hPa 高空环流形势 (图 4.5) 显示, 22 日 00 时弱高压脊位于 90°E 以西的新疆北部和哈萨克斯坦地区, 贝加尔湖地区为一切断低压, 其中心强度为 5400gpm (图略)。22 日 12 时 (图 4.5c) 是两槽一脊的环流形势, 贝加尔湖的切断低压中心南移到蒙古北部, 中心高度为 5400gpm 的冷涡 (50°N , 105°E) 稳定维持, 伴随有 -34°C 的冷中心; 贝加尔湖以西的高压脊稳

定少动,影响着新疆及其以北地区。22 日 18 时(图略),蒙古冷涡逐渐南压东移,贝湖高压脊东移北进,西西伯利亚冷低压略有北抬;温度场落后于高度场,位于蒙古国西南部的槽后有明显的冷平流使得蒙古冷涡加强南压。23 日 00 时(图 4.5d)蒙古冷涡中心高度 5440gpm,贝湖高压脊继续北伸。高压脊不断向北发展,在 23 日 20 时(图略)开始分裂成两个主体,分别在西西伯利亚和贝湖以东形成阻高,24 日 02 时(图略)阻高加强形成闭合中心,蒙古冷涡继续东移。24 日 08 时中心强度有所减弱(图略)。蒙古冷涡的东移,此次沙尘天气过程发生在槽前。正是这个不断南压的低压槽造成了本文讨论的沙尘天气过程。与过程一比较,由于槽后高压脊的不断发展,导致槽后的内蒙古中西部地区、西北地区偏北气流非常旺盛,使得冷空气不断补充南下。这也是此次沙尘暴能够影响我国广大区域的一个重要原因。

4.2.4 高空急流

分析过程一 200hPa 等压面上的全风速线发现,2008 年 5 月 26 日 00 时(图略),南支急流稳定少动,中纬度地区有强的西风急流,急流轴位于 45°N 附近,中心风速 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。蒙古气旋的中心处于急流出口区的左侧。研究表明,急流出口区将发生质量调整,在急流出口区将发生质量调整,在出口减速区有指向其右侧的非地转分量,它引起质量的向南输送,出口区非地转风所引起的质量调整使其左下方减压,有利于低压的发展^[57]。另外高空急流出口区左侧气流在地转适应的过程中强烈辐散,形成对流性强的上升气流(次级环流的上升支),形成了沙尘卷起的基本动力,此时在急流核出口区左侧蒙古国南部地区出现强沙尘暴天气。蒙古气旋加深发展,26 日 12 时(图 4.5f),急流中心风速大小不变,急流稳定维持。此时沙尘暴天气东移扩散到中蒙交界处。27 日 00 时,高空急流核随着蒙古气旋的移动到河北北部,中心强度维持在 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时华北大部出现大范围的沙尘天气。分析过程二,200hPa 等压面上的全风速,2009 年 4 月 22 日 12 时(图 4.5g),北支副热带极锋急流存在两个大风速中心,一个位于中心风速 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,西北地区附近,呈西北~东南走向;一个位于山东地区,中心风速 $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,南支急流位于日本岛附近,蒙古气旋位于第一个急流核出口区左侧。23 日 00 时(图 4.5h),南支急流稳定维持,北支急流位于西北地区上空的风速中心也很稳定,呈东西走向。蒙古气旋依然位于急流核出口区左前方 7 个经距。此时在甘肃中西部、内蒙古的巴彦淖尔地区发生了强沙尘暴。

可以看出这两次由次蒙古气旋冷锋引发强沙尘暴过程中, 高空急流的作用是不可忽视的。高空急流的主要作用是在急流的出口区的左侧减压, 促进气旋的发展, 气旋的强烈发展会形成地面大风, 为沙尘暴发生提供很好的动力条件。



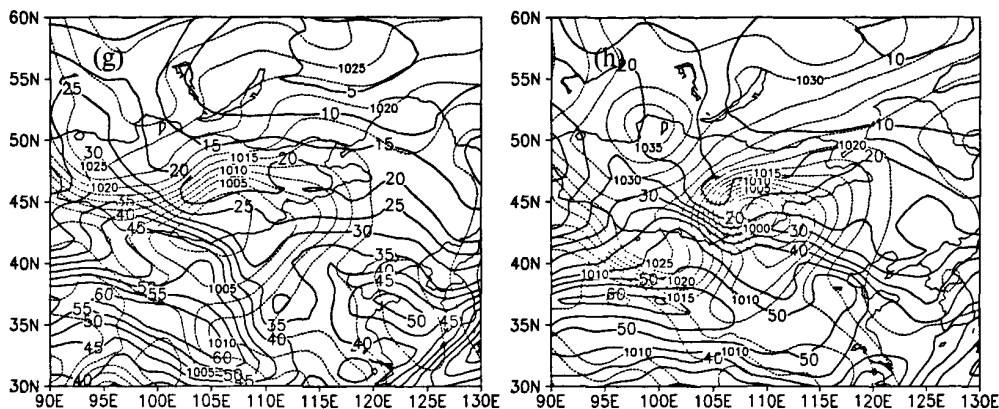


图 4.5 500hPa 高度场（实线）和温度场（虚线）（a）2008 年 5 月 26 日 06 时；（b）26 日 12 时；（c）2009 年 4 月 22 日 12 时；（d）23 日 00 时，200hPa 等风速线（实线）海平面气压（虚线）（e）2008 年 5 月 26 日 06 时；（f）26 日 12 时；（g）2009 年 4 月 22 日 12 时；（h）23 日 00 时。

4.2.5 温度、涡度平流

分析过程一温度平流和涡度平流沿着 47°N 的纬向垂直剖面图（图 4.6a-d），26 日 00 时（图略），对流层中高层主要为暖平流，低层为相对较强的冷平流，冷平流中心值达 $80^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，随着气旋东移，冷平流的在东移过程中加强，暖平流也在加强。26 日 06 时（图 4.6a），冷平流中心强度 $-120^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中心随着高度增加位置西移，这与高空槽的西倾是一致的。26 日 12 时（图 4.6b），低层冷平流中心强度 $-240^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中心位于 900hPa，一直从地面延伸到 200hPa。由于冷平流非常强盛，且与低层锋区相配合，在地面气旋后部的加压作用增强，气压梯度增大。当冷空气前锋入侵时，就利于吹风及沙尘天气的出现。暖平流强度较弱，被冷空气抬升到高空。此时，正涡度平流主要集中在槽前 600hPa 附近，中心值 $20\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，负涡度平流也很强盛，一直从地面延伸到对流层顶。27 日 00 时（图略），槽前暖平流强盛，暖平流最大值在 600~700hPa 之间，最大 $80^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ，槽后的冷平流相对弱，冷平流最大值 $-50^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。分析涡度平流的分布，槽前有正的涡度平流中心，最大值为 $20\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，位于 350hPa 附近，槽后的负涡度平流中心，最大值为 $-12\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，位于 850hPa 附近。

分析过程二的温度平流和涡度平流的纬向剖面图（图 4.7a-d），22 日 18 时（图 4.7ac）在 500 hPa 以下冷平流，以上为暖平流，有两个冷平流中心，一个

位于 650 hPa 附近,中心达 $-80^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,一个位于 800hPa 附近中心达 $-100^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以明显看出,高空为暖平流,低层是冷平流,温度平流随高度是减弱的。23 日 00 (图 4.7bd) 时可以看到,蒙古气旋的上空几乎整层为冷平流,存在三个冷平流中心。一个位于 700~850hPa 之间,一个位于 350hPa 附近,中心值均为 $-90^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,还有一个位于 200~300hPa 之间,中心值达 $-70^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在气旋的右侧,存在一个强的暖平流中心,位于 300~400hPa 之间,中心值为 $130^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。比较过程一 08 年 5 月 26 日 12 时(气旋发展最旺盛),槽前的暖平流要强很多,槽后的冷平流要弱很多。但冷平流发展的更加深厚,350hPa 附近,还有中心值 $-90^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大值中心。涡度平流的分布也有类似的特点,气旋中心上空为大范围的正涡度平流区,从 850hPa 一直延伸到 200hPa,中心在 300~400hPa 附近,中心达 $32\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,比较过程一,08 年 5 月 26 日 12 时槽前 600hPa 附近的 $20\times 10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,要强很多。反映地面气旋的强度相对较强,出现大风沙尘天气的范围要大一些。

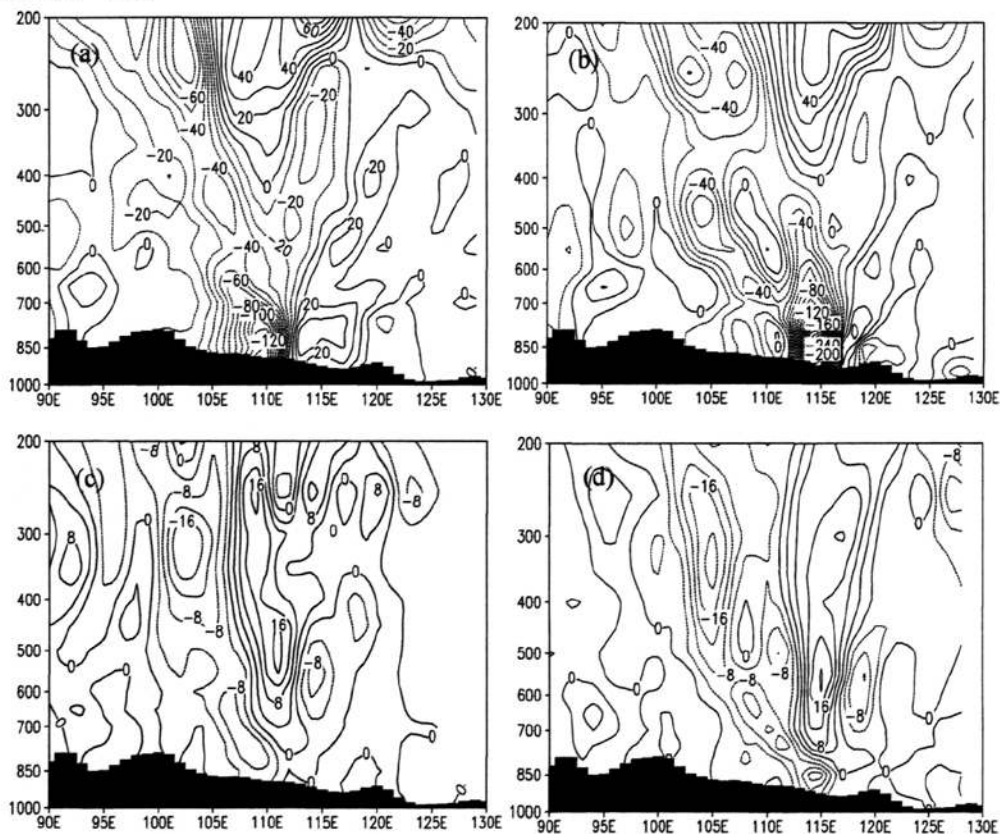


图 4.6 温度平流沿着 47°N 的纬向剖面图 (a) 2008 年 5 月 26 日 06 时; (b) 26 日 12 时; 涡度平流沿着 47°N 的纬向剖面图 (c) 2008 年 5 月 26 日 06 时; (d)

26 日 12 时。

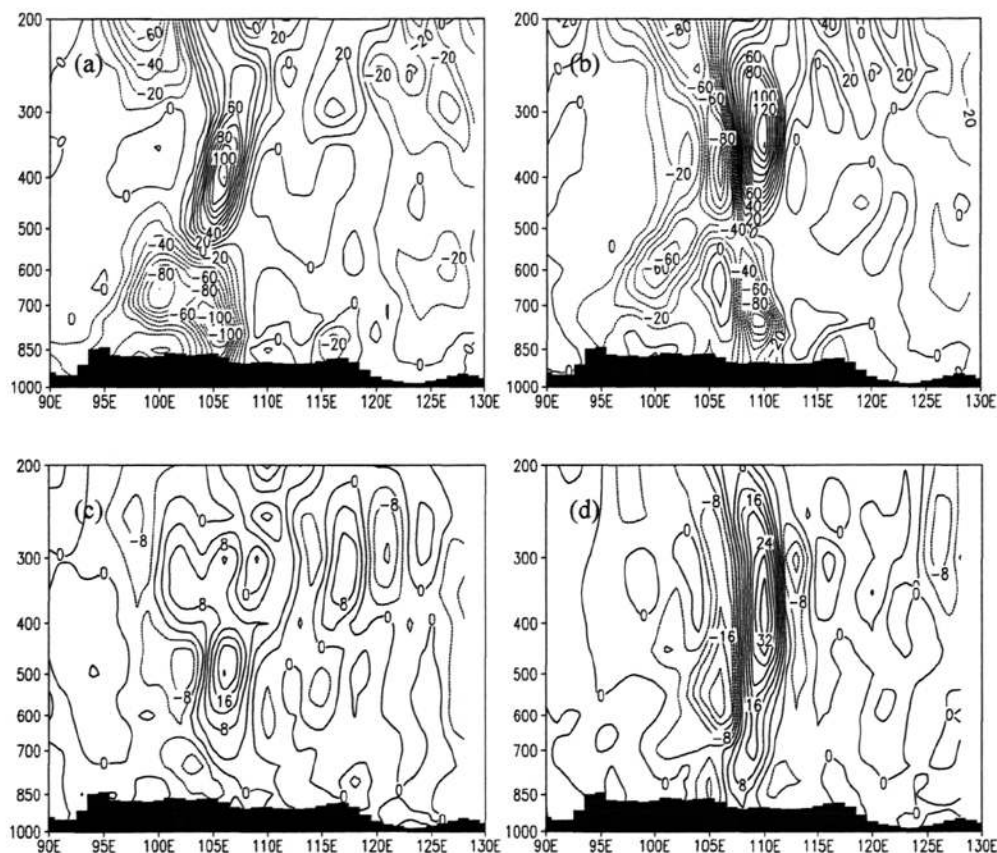


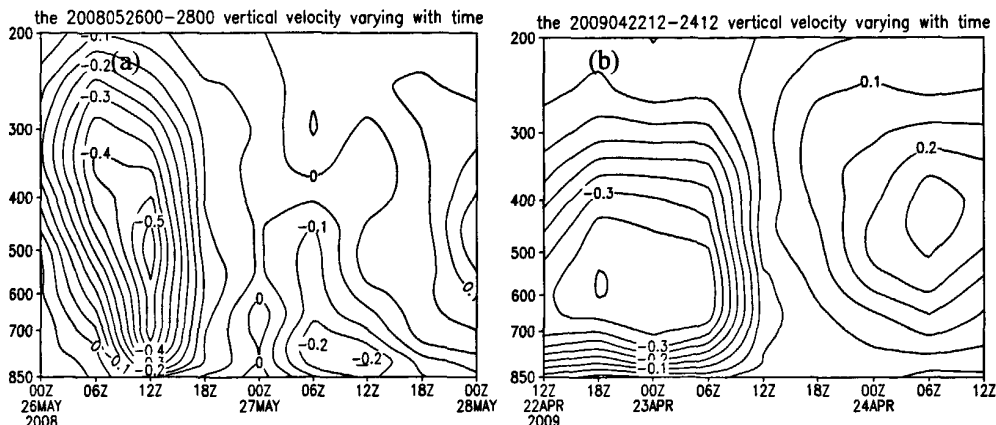
图 4.7 温度平流沿着 43°N 的纬向剖面图 (a) 2009 年 4 月 22 日 18 时; (b) 23 日 00 时; 涡度平流沿着 43°N 的纬向剖面图 (c) 2009 年 4 月 22 日 18 时; (d) 23 日 00 时。

4.2.6 垂直运动

为了解沙尘区垂直运动的演变特征, 对于过程一我们计算 2008 年 5 月 26 日 00 时~28 日 12 时 ($115^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $45^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$) 的这一区域平均垂直速度 (图 4.8a)。很显然, 区域平均来说, 从 26 日 00 时开始整层均为上升运动, 垂直上升运动最大值在 26 日 12 时, 500hPa 附近, 中心强度 $-0.5\times\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, 上升运动一直持续到 27 日 12 时, 对沙尘暴的输送十分有利。从 28 日 00 时开始几乎整层是下沉运动。

过程二, 我们也计算 2009 年 4 月 22 日 12 时~24 日 12 时 ($103^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$,

42°~47°N) 平均垂直速度 (图 4.8b)。垂直上升运动主要发生在 22 日 12 时~23 日 06 时, 最大值出现在 23 日 18 时 600hPa 附近, 为 $-0.4 \times \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 24 日开始整层都是下沉运动, 这就不利于沙尘暴的输送。过程一、过程二垂直速度演变与沙尘暴发生的时间对照可以看出, 强沙尘暴发生时地面上升运动加强, 是由于整层上升运动的出现和维持, 为沙尘向上输送提供动力机制。



带向下与低层的位涡高值区结合。整个高空位涡大值区向下伸展的过程与气旋的加深一致。高空位涡大值区与 θ 垂直梯度的大值区重合，对流层中下层等 θ 线密集倾斜区就是锋生倾斜区，表明这一区域有较强的斜压性。过程二，分析沿着 42°N 的位涡纬向剖面图，2009年4月22日18时（图4.9c），高层位涡大值区位于400hPa，对流层中低层存在两个孤立的位涡扰动，大小都是 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。23日00时（图4.9d），高层位涡大值区延伸到800hPa与低层位涡大值区相接。此时也是这次过程中，蒙古气旋发展最强的阶段。与过程一同样的，高空位涡大值区与 θ 垂直梯度的大值区重合，对流层中下层等 θ 线密集倾斜区，也有较强的斜压性。

我们可以认为：这两次引发强沙尘暴天气过程的蒙古气旋相似，两者高层都有较强的正的位涡平流；高空位涡大值区与 θ 垂直梯度的大值区重合；在气旋发展最旺盛的时刻，都存在高低空位涡大值区相接的位涡柱^[59]。这与赵琳娜^[60]研究的个例也是很相似的。

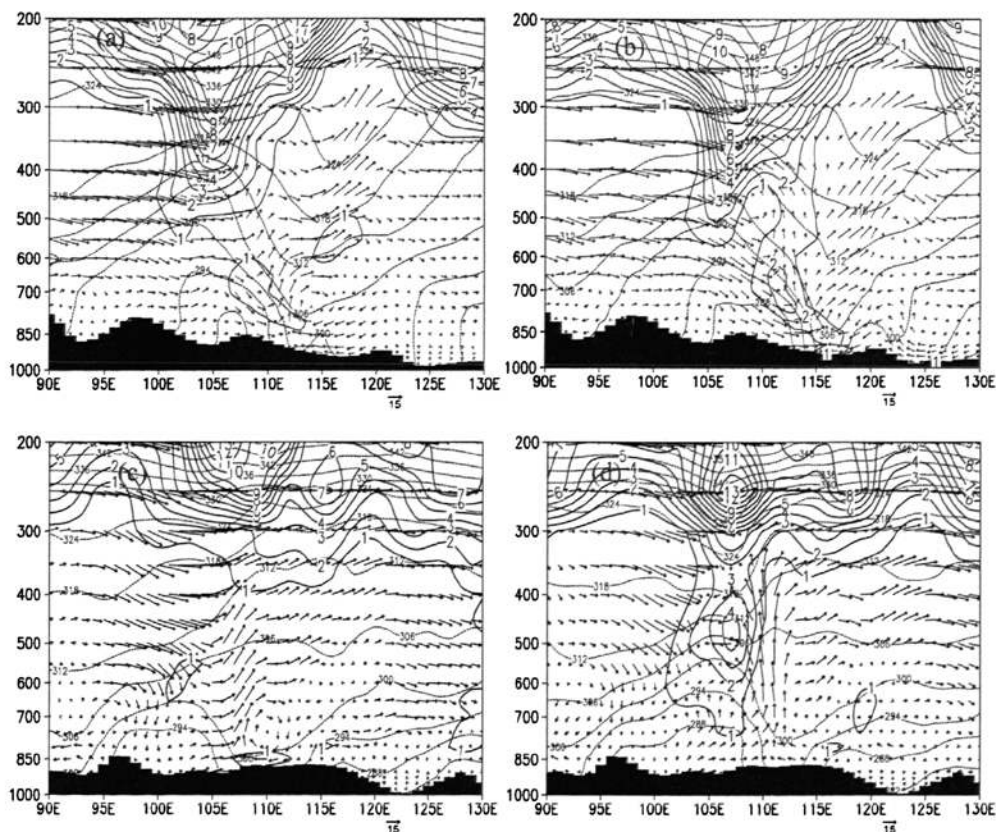


图 4.9 位涡（实线）、位温以及 u 风和 ω 风沿着 48°N 的纬向剖面（阴影为地形）(a) 2008年5月26日06时，(b) 26日12时；位涡（实线）、位温以及

u 风和 ω 风沿着 42°N 的纬向剖面（阴影为地形）（c）2009 年 4 月 22 日 18 时；（d）23 日 00 时。

4.2.8 斜压作用分析

从公式 $F_G = \frac{d}{dt} |\nabla \theta|$ 从这里可以看出，锋生 F_G 大于零代表锋生即是位温梯度随时间变密。根据热成风公式，地转风和位温梯度有如下关系：

$$\frac{\partial v_g}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \frac{\partial u_g}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial y}$$

上式表明，位温梯度增加时，地转风的垂直切变会增大。风速的垂直切变增大，必然引起上下层空气的水平动量交换的增大。因此，风的垂直切变的增大会更加有利于低层大气的风速增加。也就说明了锋生作用加强时有助于地面风速加大。所以，对冷锋的锋生作用的分析，可以帮我们更加深刻的认识沙尘暴的形成过程。

由于位温在干过程中具有保守性。因此我们用位温计算了锋生函数^[61]，以考察大气斜压性对气旋发生发展的贡献。

$$F_G = \frac{d}{dt} |\nabla \theta| = F_{G1} + F_{G2} + F_{G3} + F_{G4}$$

$$F_{G1} = \frac{1}{|\nabla \theta|} ((\nabla \theta) \cdot \nabla (\frac{d\theta}{dt}))$$

$$F_{G2} = -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} (\nabla \theta)^2 D$$

$$F_{G3} = -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} (\nabla \theta)^2 (((\frac{\partial \theta}{\partial x})^2 - (\frac{\partial \theta}{\partial y})^2) A + 2 \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} B)$$

$$F_{G4} = -\frac{1}{|\nabla \theta|} \frac{\partial \theta}{\partial p} (\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y})$$

其中： θ 是位温， D 是水平散度， $A = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ ， $B = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 严格来讲，锋生

函数应包含 4 项， F_{G1} 是非绝热加热项； F_{G2} 是水平辐散项； F_{G3} 是形变项； F_{G4}

是与垂直运动有关的倾斜项。

考虑到非绝热加热计算的精度问题，只计算水平散度、形变项、以及垂直运动有关的倾斜项三项。锋生是锋面加强的过程，上式中 F_G 大于零代表锋生。

对于过程一，2008 年 5 月 26 日 00 时（图略），贝加尔湖附近有中心达 $6 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 的锋生函数，蒙古国的西南部部分地区出现强沙尘暴天气。26 日 06 时（图略），锋生函数东移，中心大值增大到 $7 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，3 小时变压表明气压下降 10hPa，正负变压相差 17hPa，蒙古国南部地区出现了强沙尘暴。26 日 12 时（图 4.10a），锋生函数强烈发展，从贝加尔湖到我国的甘肃南部有一条东北—西南走向的大值锋生带，中心强度 $14 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，锋前 3h 变压达 -9 hPa，锋前出现了明显的减压增温，锋后 3h 变压达 14 hPa，锋后干空气绝热下沉出现明显的增压降温，正负变压相差 23 hPa，冷锋前后气压梯度很大，局地风速达到 8~10 级。此时在蒙古国南部以及内蒙古西部地区出现强沙尘暴天气。26 日 18 时（图 4.10b），锋生函数东移大值中心分成两个，一个位于贝加尔湖东南部，一个位于内蒙古东部到河北一带，冷锋前后正负变压均减小，沙尘暴区域也随着东移。27 日 00 时（图略），锋生函数明显减弱，蒙古气旋开始减弱。沙尘暴维持进一步波及华北以及东北西部。

过程二，2009 年 4 月 23 日 00 时（图 4.10c），蒙古国和我国边境到二连浩特一带存在一个近似南北方向的锋生区，锋生中心位于中蒙边境处，中心达 $9 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。表明该区域有很强的斜压性。此时蒙古气旋位于 110°E 附近，锋生区位于蒙古气旋的前部，锋生函数达到最强，蒙古气旋发展强烈。此后锋生区随着蒙古气旋南压东移。到 23 日 06 时（图 4.10d），锋生区的强度略有减弱，锋生中心达 $8 \times 10^{-10} \text{ k} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，此后锋生区一直位于蒙古气旋的前部，一直到伴随着气旋，直到气旋消亡。

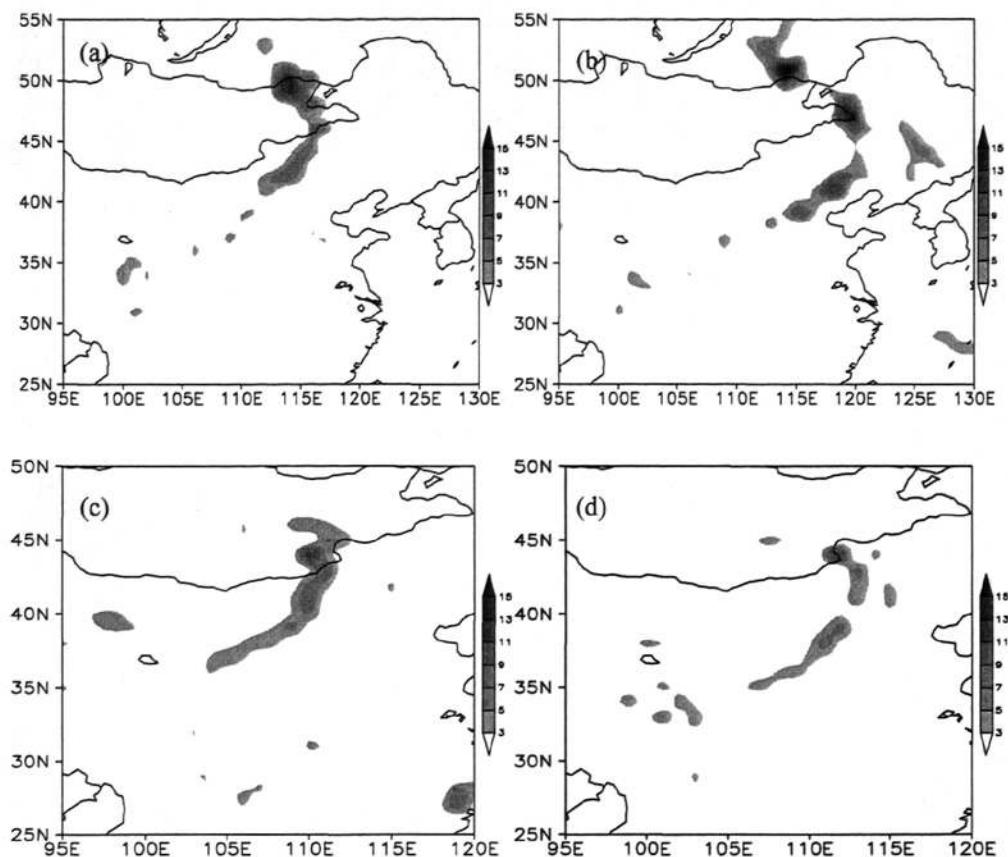


图 4.10 850 hPa 锋生函数 (a) 2008 年 5 月 26 日 12 时; (b) 18 时; (c) 2009 年 4 月 23 日 00 时; (d) 06 时。

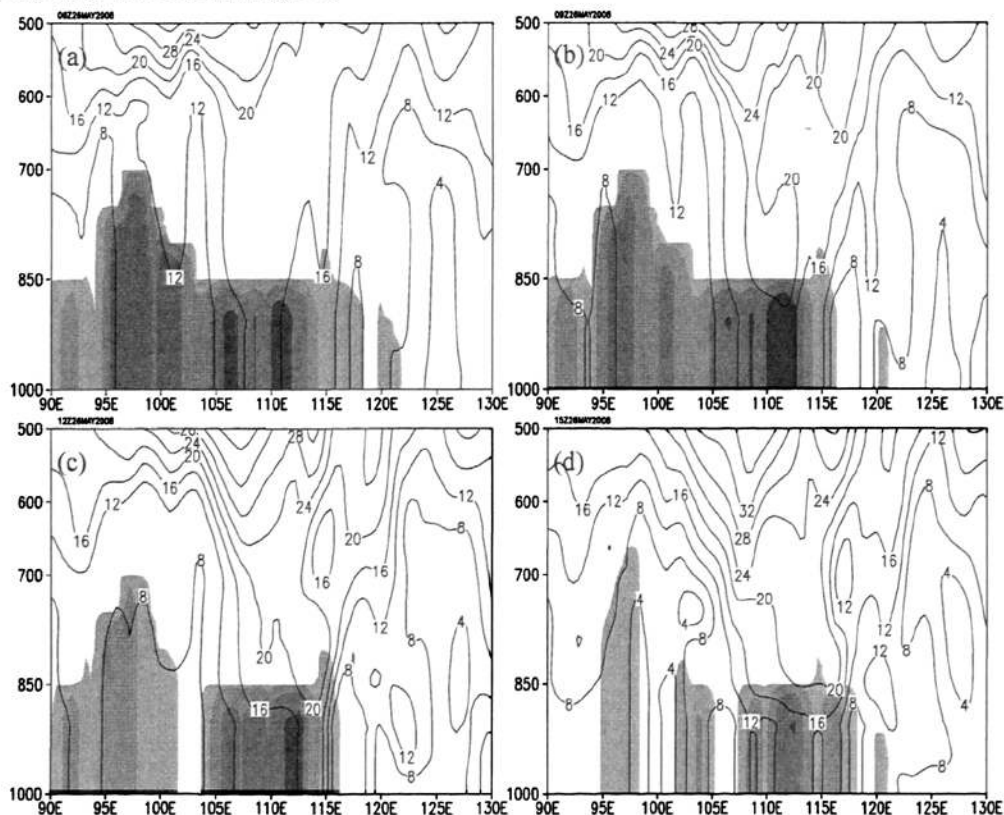
比较两次强沙尘暴沙尘过程的锋生作用可以看出, 过程一的锋生函数的数值要偏大一些。总的说来, 锋生函数对沙尘暴的形成有较大的影响, 当然锋生过程应该不是沙尘暴初始形成的重要因子, 锋生过程只是通过改变热成风平衡来增大地转风, 来促进沙尘暴的发展。

4.3 两次沙尘暴输送、沉降机制数值模拟

4.3.1 沙尘输送

沙尘在空中的输送以及在地面的沉降也是一个值得关注的问题。本文的第三章已经详细的分析了 2009 年 4 月 23~25 日这次沙尘过程的起沙、输送以及沉降的情况。下面对过程一和过程二沙尘输送以及沉降机制对比分析。为了解沙尘高低空差异和沙尘输送机制, 我们分析两次过程的沙尘浓度垂直剖面图:

分别是 2008 年 5 月 26 日 06 时~26 日 12 时 (图 4.11 (a-d)), 2009 年 4 月 23 日 00 时~23 日 09 时 (图 4.11 (e-h)) 沿着 45°N 的沙尘浓度垂直剖面。2008 年 5 月 26 日 06 时, 沙尘浓度垂直输送一直从地面延伸到 700hPa, $106^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ 之间有两个浓度的大值区, 均超过 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 115°E 以西的大部分沙尘都沉降到地面。低层风速比较小, 一般在 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 因此, 大量沙尘没有能够长距离输送。26 日 12 时, 沙尘浓度垂直输送延伸到 700hPa 以下, 低层风速在东、西部均在 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 使得沙尘大量沉降。对于过程二, 2009 年 4 月 23 日 00 时, 蒙古气旋发展最强, 纬向分布来看, 三个区域的沙尘浓度大于 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 从地面到 700hPa 之间。此时 $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 之间低层风速增大, 超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 沙尘继续向东输送。23 日 03 时, 沙尘暴发展最强, 沙尘浓度垂直输送从地面一直延伸到对流层中层 550hPa 附近, $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 之间, 低层风速超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大风携带沙尘向东输送。两次沙尘过程比较看出: 过程一沙尘垂直输送的高度低于过程二; 过程一起沙后的沙尘粒子没有能够靠对流层低层的风速长距离的输送, 大部分大量沉降。过程二沙尘粒子主要靠对流层低层的大风来输送, 大风能将沙尘远距离的输送。



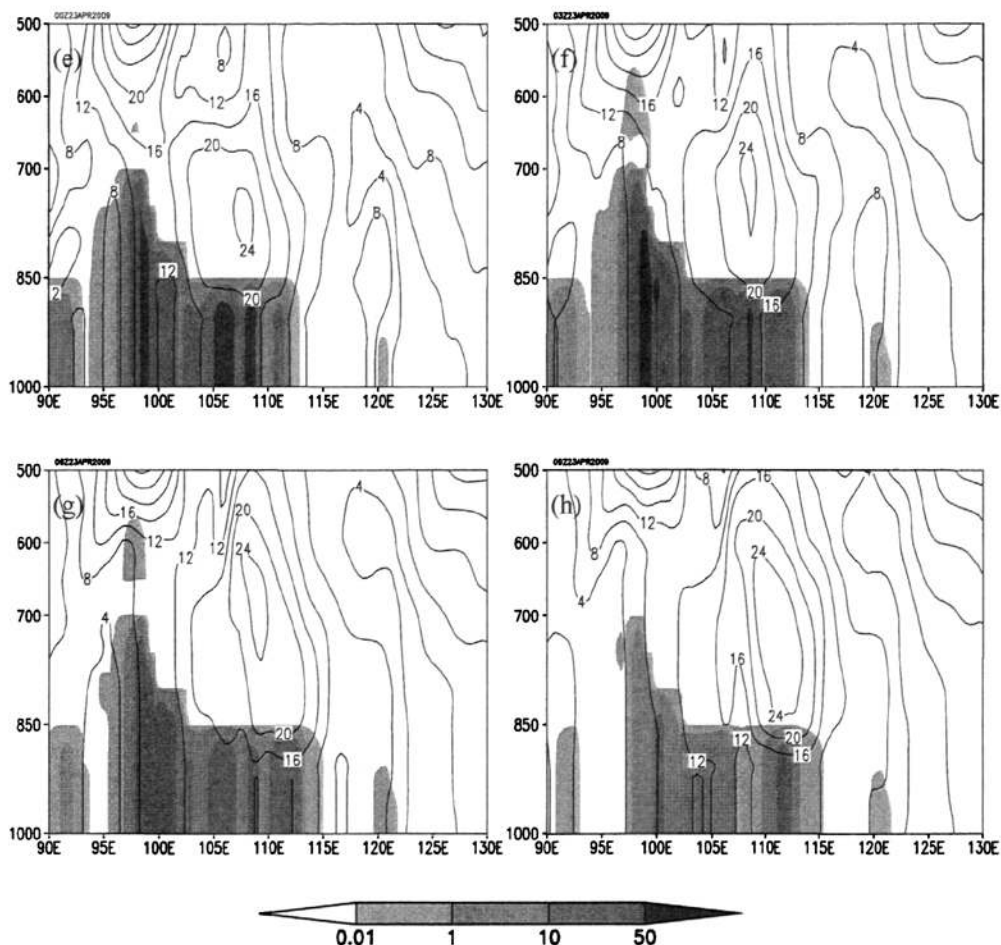
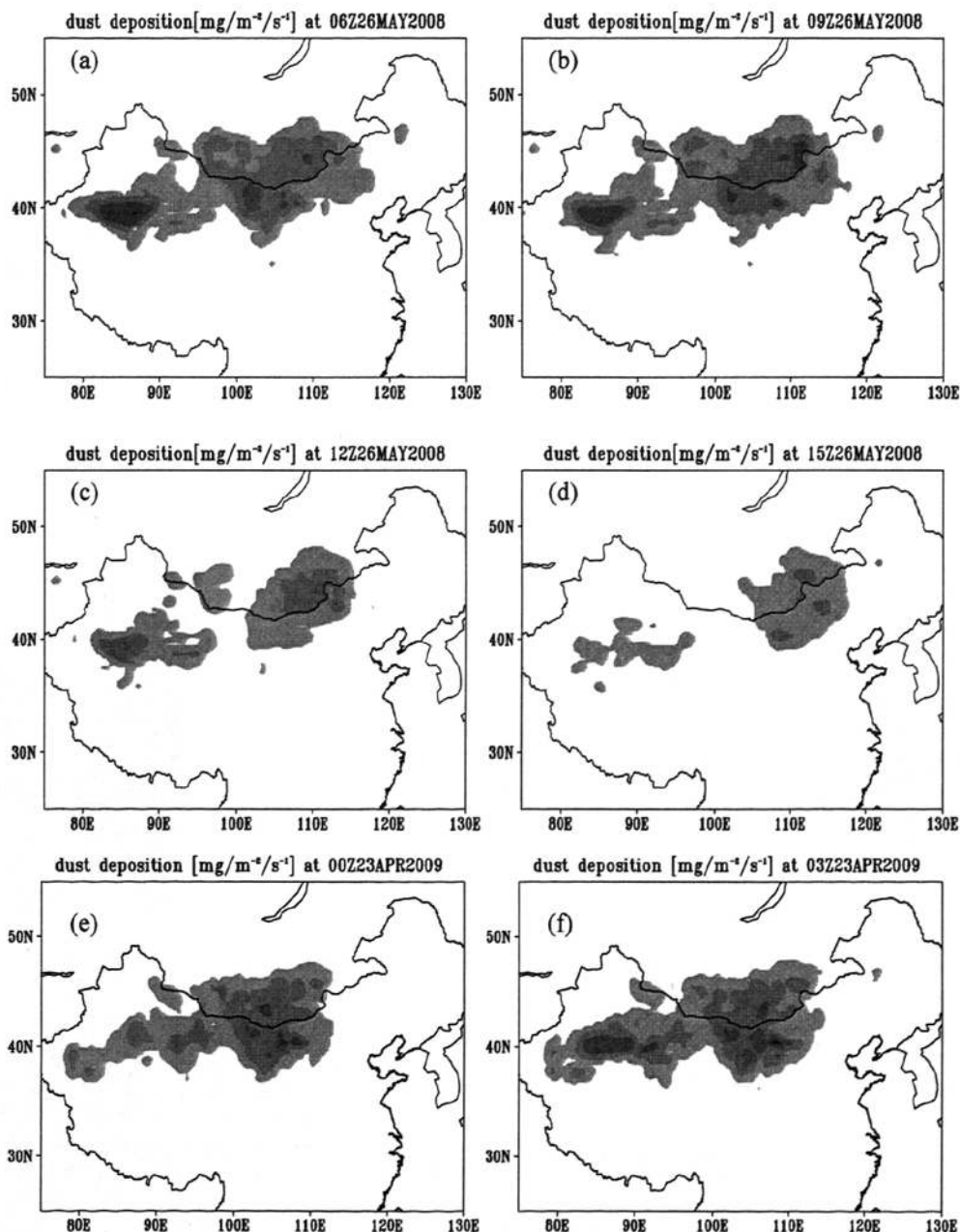


图 4.11 沿着 45°N 的沙尘浓度垂直剖面图 (阴影, 单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和风速大小 (实线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 2008 年 5 月 26 日 06 时~26 日 15 时 (a-d); 2009 年 4 月 23 日 00 时~23 日 09 时 (e-h)。

4.3.2 沙尘沉降

沙尘沉降过程是以起沙和输送过程为前提的, 它是由于沉降作用所引起的沙尘在地表的垂直通量, 即单位时间、单位面积的质量通量。下面给出了 2008 年 5 月 26 日 06 时~26 日 15 时 (图 4.12 (a-d)), 2009 年 4 月 23 日 00 时~23 日 09 时 (图 4.12 (e-h)) 沙尘沉降率的模拟结果。可以看出 2008 年 5 月 26 日 06 时~09 时, 沙尘沉降区域较大, 主要沉降区域是, 蒙古国乌兰巴托东南部地区、塔里木盆地附近以及内蒙古阿拉善盟的额济纳旗附近。26 日 12 时开始, 沉降区域逐渐减少, 减少到蒙古国东南部与内蒙古的中部地区。前面已经提到,

由于对流层低层没有足够的风速将沙尘传输, 所以大部分的沙尘没能远距离的输送, 所以过程一对下游的广大地区影响不是很大。2008 年 5 月 26 日 03 时~27 日 03 时沙尘总的沉降(图 4.13a)中可以看出主要的沉降区, 内蒙古的巴淖尔盟及以北的蒙古国南部的戈壁沙漠地区、南疆的塔里木盆地和甘肃西北部地区。2009 年 4 月 23 日 00 时~24 日 00 时(图 4.13b)总的沙尘沉降看出, 这次过程由于有足够的风速长距离的传输沙尘, 总的沉降量范围要比过程一要小些。



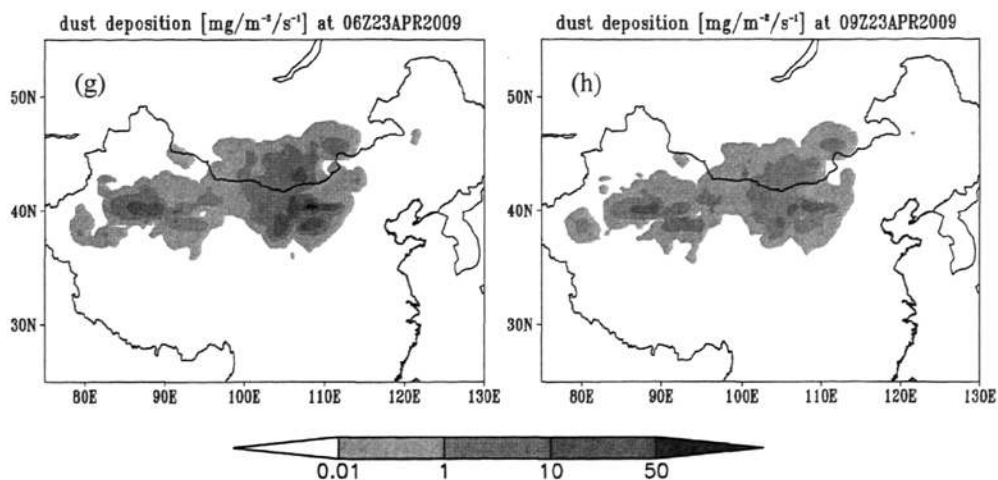


图 4.12 模拟的沙尘沉降率 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 2008 年 5 月 26 日 06 时~26 日 15 时 (a-d); 2009 年 4 月 23 日 00 时~23 日 09 时 (e-h)。

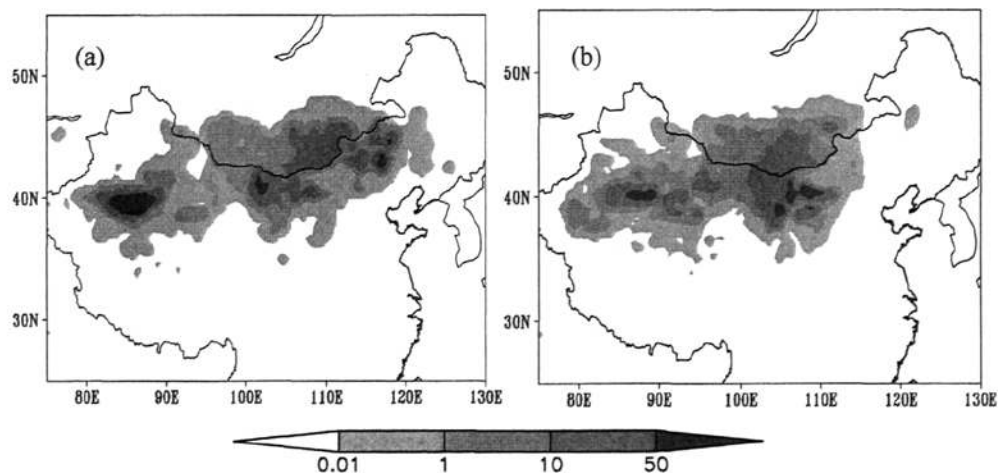


图 4.13 沙尘总的沉降率 (单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) 2008 年 5 月 26 日 03 时~27 日 03 时; (b) 2009 年 4 月 23 日 00 时~24 日 00 时。

4.4 小结

本章分别选取具有代表的 2008 年 5 月 26~28 日和 2009 年 4 月 23~25 日这两次强沙尘暴来进行对比分析。就干旱气候背景、天气过程形势、影响系统以及起沙、沙尘输送和沉降进行对比分析。得出以下结论:

比较两次沙尘暴的气候背景后,我们发现我国北方沙尘过程前期均具有温高雨少,地表干燥,土壤墒情很差,为强沙尘暴的发生提供了丰富的沙源。

两次由蒙古气旋冷锋引发的强沙尘暴过程,路径不同,08 年这次过程的路

径是蒙古国—内蒙古—北京转向东北路径。09 年此次过程的路径是：蒙古国—内蒙古—河西走廊—北京转向东南走向。

这两次由次蒙古气旋冷锋引发强沙尘暴过程中，高空急流的作用是不可忽视的。高空急流的主要作用是在急流的出口区的左侧减压，促进气旋的发展，而气旋的强烈发展会形成地面大风，为沙尘暴发生提供很好的动力条件。

两次过程蒙古气旋发展初期和发展成熟期温度平流均为气旋发展的主要因子，涡度平流也起了作用。垂直速度演变与沙尘暴发生的时间对照可以看出，强沙尘暴发生时地面临上升运动加强，是由于整层上升运动的出现和维持，为沙尘向上输送提供动力机制。

两次过程都存在高低空位涡大值区相接的位涡柱，存在着明显的高低空系统的相互作用。

锋生作用分析，可以发现锋生函数对两次沙尘暴的形成有较大的影响，锋生通过改变热成风平衡来增大地转风，来促进沙尘暴的发展。

比较两次沙尘暴的输送和沉降发现：08 年这次过程，沙尘没能靠对流层低层的风速长距离的输送，大部分沉降，而 09 年这次过程大风能将沙尘远距离的输送。

第五章 结论与讨论

5.1 主要结论

本论文在对近两年两次较强沙尘暴天气气候特征研究的基础上,通过全面的诊断分析和数值模拟,揭示了沙尘暴天气影响系统的复杂性。力图揭示一些强沙尘暴发生发展的天气背景和特征,为实际的沙尘暴预报提供一定的参考依据。

(1) 2009年一次强沙尘暴过程天气诊断特征。对2009年4月这次强沙尘暴过程的近地面气象要素(气温、气压、风速)变化特征和观测PM10进行分析。结果表明:沙尘暴过程前后温、压和风速有剧烈变化;PM10与沙尘暴强度之间有很好的对应关系。此次强沙尘暴天气是蒙古国引导冷空气东移南下,在南下过程中经过南疆盆地、内蒙古中西部,甘肃等地均出现沙尘天气。温度平流和涡度平流在气旋的发展过程中发挥重要作用。垂直上升区与地面沙尘天气相配合,垂直上升速度的强弱变化与此次沙尘暴从发展到衰亡的发展过程有很好的对应。通过分析锋生函数,发现斜压性与气旋的发生发展有很密切的关系。对于由蒙古气旋引发的强沙尘暴过程中,高空急流的作用是不可忽视的。高空急流的主要作用是在急流的出口区的左侧减压,促进气旋的发展。

(2) 2009 年一次强沙尘暴过程天气过程起沙、输送数值模拟结果分析。模拟结果显示,模拟的沙尘浓度和卫星监测图有良好的一致性,结果是合理可信的。在此基础上,对这次强沙尘暴过程的起沙和输送过程进行了定量分析研究,结论如下:这次大范围的沙尘天气的起沙中心分别是我国南疆盆地、甘肃、内蒙古西部以及蒙古国南部。从起沙的量来看,在内蒙古巴彦淖尔盟附近的起沙量超过了 $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,塔里木盆地地区也有一个超过 $50\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大值中心。分析各粒径组平均沙尘浓度,在 6 个粒径组中,小于 $22\mu\text{m}$ 的沙尘粒子对近地面沙尘浓度有贡献,粒径在 $2< d \leq 11\mu\text{m}$ 的沙尘粒子对近地面沙尘浓度的贡献最大。 $d \leq 2\mu\text{m}$ 的沙尘粒子影响范围最小, $22 < d \leq 52\mu\text{m}$ 、 $52 < d \leq 90\mu\text{m}$ 、 $90 < d \leq 125\mu\text{m}$ 这三个粒径组近地面沙尘浓度均无值。分析各粒径随时间演变特征,选取粒径小于 $22\mu\text{m}$ 的粒子分析。对比四个代表区域近地面沙尘浓度大小发现:我国新疆中南部塔里木盆地附近地区最大,最小的是第二个区域(甘肃西部地区),前者是后者的 4 倍多。综合分析整个沙尘浓度的垂直变化,可以发

现：此次沙尘过程中，沙尘被垂直输送的高度在 550hPa 以下；沙尘输送白天强于晚上，白天的垂直输送从地面延伸到 600hPa 附近。起沙后的沙尘粒子的输送主要靠对流层中低层的大风来输送，大风能将沙尘远距离的输送。

(3) 2008、2009 年两次强沙尘暴过程气候、天气诊断、起沙和输送数值模拟结果分析。我国北方沙尘过程前期均具有温高雨少，部分地区干旱甚至达到重旱。旱情严重，地表干燥，土壤墒情很差，为强沙尘暴的发生提供了丰富的沙源。两次由蒙古气旋冷锋引发的强沙尘暴过程，路径不同，08 年这次过程的路径是蒙古国—内蒙古—北京转向东北路径。09 年此次过程的路径是：蒙古国—内蒙古—河西走廊—北京转向东南走向。这两次由蒙古气旋冷锋引发强沙尘暴过程中，高空急流的主要作用是在急流的出口区的左侧减压，促进气旋的发展，而气旋的强烈发展会形成地面大风，为沙尘暴发生提供很好的动力条件。两次过程蒙古气旋发展初期和发展成熟期温度平流均为气旋发展的主要因子，涡度平流也起了作用。垂直速度演变与沙尘暴发生的时间对照可以看出，强沙尘暴发生时地面上升运动加强，是由于整层上升运动的出现和维持，为沙尘向上输送提供动力机制。两次过程都存在高低空位涡大值区相接的位涡柱，存在着明显的高低空系统的相互作用。锋生作用分析可以发现：锋生函数对两次沙尘暴的形成有较大的影响，锋生通过改变热成风平衡来增大地转风，从而促进沙尘暴的发展。比较两次沙尘暴的输送和沉降发现：08 年这次过程，沙尘没有靠对流层低层的风速长距离的输送，大部分沉降；而 09 年这次过程大风将沙尘远距离的向下游输送。

5.2 讨论与展望

本论文对近两年两次发生在我国北方强沙尘暴的分析研究，虽然从诊断分析和数值模拟等多个角度进行了分析，但是研究结果还是有一定局限性的，研究结果也是很初步的。引发我国强沙尘暴的天气系统是多样的、复杂的。本文着重对蒙古气旋的发生发展进行了详细的叙述。这尚未涉及到一些引发沙尘暴的其他某些天气系统。对天气系统的诊断分析，由于资料的局限性，没有对沙尘暴的发生机制做更深入的研究。对于模式模拟沙尘暴，由于缺少沙尘暴的起沙和沉降等实据观测数据，所以只停留在简单的定性分析。另外沙尘模式具有一定的误差，模拟的区域比观测的大，有些强度达到浮尘和扬沙级别的都没有很好的模拟出来。

目前我们对沙尘暴模拟研究,需要的某些资料在国内外若干地区都不完整,例如不同土壤类型和植被资料。为了取得更好的效果,应该不断充实和完善沙尘天气动态监测、预警系统,应用卫星遥感、多普勒雷达、自动气象站以及常规气象观测手段对沙尘暴的形成、发展和移动路径进行跟踪监测,搞好预警和服务。

参考文献

- [1] 全浩. 关于中国西北地区沙尘暴以及其黄沙气溶胶高空传输路线的探讨. 环境科学, 1993, 14(5): 60-64.
- [2] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究, 2001, 21 (1): 9~17.
- [3] 中国气象局. 沙尘天气年鉴(2000-2009)[M]. 北京: 气象出版社, 2001-2009: 1~78
- [4] 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.
- [5] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. 大气科学, 1996, 21(50): 1582~1589.
- [6] 王式功, 王金艳, 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.
- [7] 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.
- [8] 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, 32 (7): 102~109.
- [9] 屠妮妮, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 引发强沙尘暴的蒙古气旋的动力特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 521~526.
- [10] 秦大河. 中国西部环境特征及其演变, 中国西部环境演变评估(第一卷), 北京: 科学出版社, 2002, 35~351.
- [11] Shao Y. A model for mineral dust emission[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106: 20239~20254.
- [12] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity[J]. J. Geophys. Res., 2000, 105: 22437-22443.
- [13] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴) 天气起沙机制的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2002, 7 (3): 279~294.
- [14] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用实验. 气候与环境研究, 2003, 8 (2) :125~142.
- [15] 雷航, 林朝晖, 孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验.

- 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 669~683.
- [16] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2006 年春季一次引起华北地区强沉降的沙尘暴过程的模拟研究. 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 339~349.
- [17] 纪飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴的数值模拟: (1)模式建立, 1996, 23(3): 384~392.
- [18] 纪飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴的数值模拟: (2): 1998, 34(3): 639~645.
- [19] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2007. 2006 年春季一次引起华北地区强沉降的沙尘暴过程的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 12(3): 339~349.
- [20] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents, India Met. Memoirs, 1921, 22: partVI.
- [21] Idso S.B, R.S. Ingram and J.M. Pritchard, "An American Haboob". J.Bull.AMS, 1972, 3, 930~935.
- [22] Joseph P.V., Raipal D.K., and S.N.Deka., "Andi". The convective dust storms of North West Inda. J.Mausam, 1980, 31, 431~442.
- [23] McNaughton, D.L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms. Weather, 1987, 42(1): 8~13.
- [24] Brazel, A.J. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona [J]. J Climatol. 1986, 6(3): 255~275.
- [25] Ott, S. T. and A .ott. Analysis of a Trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data, Mon. Wea. Rev., 1991, 119(8), 1832~1850.
- [26] Jauregui E., The dust storms of Mexico City. Inter.J.Climatol. 1989, 9(2): 169~180.
- [27] Gillette D A., Hanson K J. Spatial and temporal variability of dust production cause by wind erosion in the United States. J. Geophy. Res., 1989, 94(D2), 2197~2206.
- [28] Now J T., McClelland T M., Dust devils at white sand missiles range, New Mexico: 1.temporal and spatial distributes. J. Geophy. Res., 1990, 95(D9), 13707~13721.
- [29] Littmann T., Dust storm frequency in Asia: Climatic control and variability. Inter J Climatology, 1991, 11, 393~412
- [30] Marticorena B., Bergametti G., Modeling the atmospheric dust cycle: Simulation of Saharan dust sources. J. Geophys. Res., 1997, 102: 415~430.
- [31] Shao Y, E Jung, and L M Leslie. Numerical prediction of northeast Asian dust

- storms using an integrated wind erosion modeling system[J]. J. Geophys. Res., 2002, 107: 4814~4836.
- [32] Soon-Ung Park, Eun-Hee Lee. Parameterization of Asian dust Hwangsa particle-size distributions for use in dust emission models[J]. Atmospheric Enviroment. 2004, 38:2155~2162.
- [33] SCHUTZL. SAHARAN. Dust transport in the NE-tradewind region over the North Atlantic Ocean. [J]Proc Sym Radiatom, 1977, 21 (1) : 68~70.
- [34] WESTPHAL, TOOM O B, CARLSON T N. A Two-dimension numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storm [J]. J of Geophysical Research , 1987 ,92 (3): 3027~3049.
- [35] WESTPHAL, TOOM O B, CARLSON T N. A case study of mobilization and transport of saharan dust [J] .J of Atmospheric Science , 1988 ,45 (2): 2145~2175.
- [36] Tegen, I., and R .Miller, A general circulation model study on the interannual variability of soil dust aerosol, J. Geophys. Res., 1998,103, 25975~25999.
- [37] Ginoux, chin, etal, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, J. Geophys. Res., 2001,106, 255~273.
- [38] 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.
- [39] 张高英, 赵思雄, 孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1): 101~115.
- [40] 刘景涛, 郑新江, 康玲, 等. 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8 (2): 218~228.
- [41] 万本太, 康晓风, 张建辉, 等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3): 9~9.
- [42] 岳平, 牛生杰, 沈建国, 等. 一次特强沙尘暴的微气象要素及 PM10 观测分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 122~123.
- [43] Jia Yiqin and Zhao Sixiong. A diagnostic study of explosive development of extratropical cyclone over East Asia and West Pacific Ocean[J]. Adr. Atmo5. Sci. ,1994. 11(3) V2512270.
- [44] Uccellini L W, Johnson D R. 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implication for the development of severe

- convective storms[J]. Mon Wea Rev., 107(4): 682~703.
- [45] Iwasaka, Y. et al, The transport and spatial scale of Asian dust-storm Clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979. Tellus, 1983, 35B, 3: 189~96.
- [46] Cautenet, G., et al. Thermal Impact of Saharan Dust over Land. Part I: Simulation. J. Appl. Meteor. 1992, 166~180.
- [47] Slobdan N, Srdjan. A Model for Long-Range Transport of Desert Dust[c]. Monthly Weather Review, 1996, 2537~2544.
- [48] 纪飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴数值模拟[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1998, 34(5): 639~645.
- [49] 刘毅, 任丽新, 周乐义, 等. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究[J]. 大气科学, 1998, 22(6): 905~912.
- [50] 黄美元, 王自发, 东亚地区黄沙长距离输送设计, 大气科学, 1998, 22(4): 625~637.
- [51] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(4): 327~334.
- [52] 延昊, 王长耀, 牛铮等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究, 地理科学进展, 2002, 21(1): 90~94.
- [53] 孟雪峰, 孔文甲, 张立春, 等. 两次影响内蒙古气度沙尘暴天气的对比分析[J]. 内蒙古气象, 2005, 20(1): 22~24.
- [54] 李小龙, 方宗义. 2006年两次影响北京的沙尘天气对比分析[J]. 气候环境与研究, 2007, 12(3): 321~327.
- [55] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 317~319.
- [56] Uccellini L W, Johnson D R. 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implication for the development of severe convective storms [J]. Mon Wea Rev., 107(4): 682~703
- [57] 丁一汇, 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 177~180.
- [58] Juang, H. M. H. and Y. Ogura. A case study of rapid cyclogenesis over Canada. Part II: Simulations [J], Mon Wea. Rev., 1990, 118: 674~704.
- [59] Bosart. I R. The presidents' Day snowstorm of 18~19 Februarys 1979: A subsynoptic-scale event [J]. Mon Wea Rev., 1981, 109: 1542~1566.

- [60] 张志刚, 赵琳娜, 矫梅燕, 等. 一次引发强沙尘天气的快速发展的蒙古气旋的诊断分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 28~35.
- [61] Jia Yiqin, and Zhao Sixiong, A diagnostic study of explosive development of extratropical cyclone over East Asia and West Pacific Ocean [J]. Adv. Atmos. Sci., 1994, 11 (3) , 251~270.

致 谢

在硕士论文完成之际，我向所有指导、关心、帮助和鼓励过我的师长、家人、同学、朋友由衷地道一声：谢谢！

本论文完成之际，我衷心感谢赵琳娜、孙建华和寿绍文老师的悉心指导，尤其感谢赵琳娜老师和孙建华两位老师，赵琳娜老师给我提供了完整的沙尘预测系统，并且为我细心解答关于沙尘模式一些问题。本论文从选题、构思到具体完成都在两位老师的悉心指导下完成。导师丰富的知识，严谨的治学态度，不断创新的精神，以及对学生真诚的关心和爱护，深刻地影响并教育了我，使我终生受益。在此向两位导师表示衷心的感谢！

在国家气象中心进行论文撰写工作的一年多以来，319 办公室的曹庆、何小东、花丛等同学给予我许多的帮助、关心与鼓励，感谢这个温暖的大家庭。感谢与我朝夕相处的王俊超同学、狄靖月学姐以及我的舍友郭荣给予我学习和生活上的帮助以及 2007 级所有帮助过我的同学们。

感谢我的母亲、父亲和弟弟，正是你们精神上始终如一的支持、生活上无微不至的关心给我无限动力，使我顺利的度过研究生生涯并取得了今天的成绩。

在学生生涯行将结束之际，向我曾经的老师、同学、朋友以及所有给过我帮助和鼓励的人道一声：谢谢！

王丽娟

2010 年 5 月