

浙江大学理学院

硕士学位论文

2003年4月一次沙尘暴事件的数值模拟研究

姓名：戚丹青

申请学位级别：硕士

专业：气象学

指导教师：谭季青

20060301



中 文 摘 要

本文利用 HYSPLIT-4 传输, 扩散模式和 MM5V3 中尺度预报模式, 采用美国 NWS 为 NCEP 业务运行 FNL 数值预报模式提供的初值场资料和从 NOAA 的 CDC 网上获取的全球 NCEP/NCAR 气压层再分析资料, 对 2003 年发生在我国西北的强沙尘暴进行长距离输送和天气系统的数值模拟研究, 进行轨迹和浓度分析。研究结果表明: 2003 年 4 月的强沙尘暴过程的沙尘来源并非单一地区, 一部分来源于临近的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠, 另一部分来自长距离输送的塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠; 在这个过程中有两个高浓度中心向东传输, 一个在北纬 40 度附近, 爆发时间较晚规模较大, 另一个在北纬 35 度附近, 爆发时间较早规模较小; 这次沙尘暴主要是有一地面冷涡发展导致的强冷空气引发大风, 外加该地区处于干燥区, 有利于沙尘的起沙, 高空 500mb 层有很大的斜压能量释放; 4 月 9 日以后我国北方大部分地区处于平直的西风气流中, 有利于沙尘暴的长距离输送。

关键词: HYSPLIT-4 模式, MM5V3 中尺度模式, 数值模拟, 沙尘暴



ABSTRACT

The model HYSPLIT-4 is used to simulate the long distance transportation of a dust storm occurring on 9 April 2003 in Northwest China, with the data offering from the result of the Global final (FNL) numerical simulation (NCEP, NWS, US) and the model MM5V3 is used to simulate the weather of the dust storm with the data from Internet of Climate Diagnostics Center (NOAA, US).

Results show that: The original airborne dust, which is responsible for the dust storm event on 9 April, 2003, came from not only one desert area. One part of the airborne dust is from BaDanJilin desert and TengGeLi desert, another is from TaKeLaMaGan desert and KuMuTaGe desert; In the process of the long distance of this dust storm event, there are two high concentration centers transporting eastward. One is located in the latitude 40. The time of the dust storm happened later and the scale is larger than the other. The other is located in the latitude 35. The time of the dust storm happened earlier and the scale is smaller than the other. The synoptic status of the dust storm is that there is a cold vortex leading strong cold low and strong wind. The wind and the lasting several days of dry air is helpful to startup of the dust storm. And in the high altitude, the energy of baroclinic process help the dust storm last. After April 9, westerly wind play a leading role in the great part of North china, and this situation is helpful to the long-distant transportation of dust particles.

Key words: HYSPLIT-4 Model, MM5V3 Model, Numerical Simulation, Dust storm

浙江大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得浙江大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：_____日 期：_____

浙江大学学位论文使用授权声明

浙江大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆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。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）授权浙江大学研究生部办理。

研究生签名：_____导师签名：_____日 期：_____



第一章 绪论

近年来,中国北方频繁发生的沙尘暴事件引起了国内和国际的关注,沙尘暴已经成为一个重要的地球环境问题^[1]。

沙尘暴的危害是多方面的:沙尘暴下层的沙粒在狂风的驱动下滚滚向前,当遇到障碍物或风力减弱时,大量的沙尘粒子落到地面,埋压农田,村庄,工厂,铁路,公路,水源等形成沙瓣,沙堆和沙丘;大风经过干旱地区,将疏松土壤的表土刮去一层,使土壤变贫瘠,扩大沙化的区域;其强风有时拔树毁屋,刮翻火车,破坏农业设施,甚至造成人畜伤亡;沙尘暴还造成空气污染,水源污染,而且吸入细粒子,更直接危害人体健康;沙尘暴还影响太阳和长波辐射,影响区域气候,尤其是地气系统的辐射收支和能量平衡;由于沙尘暴来临时,能见度很低,严重影响城市交通,甚至影响高速公路的正常运行等。1993 年 5 月 5 日西北地区黑风暴中共死亡 85 人,伤 264 人,失踪 31 人,此外,死亡和丢失大牲畜 12 万头,农作物受害 560 万亩,沙埋干旱地区水渠总长 2000 多公里,直接经济损失和间接经济损失难以估量。1995 年 11 月 7 日,山东 40 多个县市遭受暴风袭击,35 人死亡,121 人失踪,320 人受伤,直接经济损失 10 亿多元。1996 年 5 月 29 日至 30 日,自 1965 年以来最严重的强沙尘暴袭掠河西走廊西部,黑风骤起,天地闭合,沙尘弥漫,树木轰然倒下,人们呼吸困难,遭受破坏最严重的酒泉地区直接经济损失达两亿多元。1998 年 4 月 5 日,内蒙古的中西部,宁夏的西南部,甘肃的河西走廊一带遭受了强沙尘暴的袭击,影响范围很广,波及北京,济南,南京,杭州等地。2002 年 3 月 18 日至 21 日,20 世纪 90 年代以来范围最大,强度最强,影响最严重,持续时间最长的沙尘天气过程袭击我国北方 140 多万平方公里的大地,影响人口达 1.3 亿。总之,沙尘暴的危害十分严重。

沙尘天气分为浮尘,扬沙,沙尘暴和强沙尘暴四类。沙尘暴是指强风将地面大量沙尘吹起,使空气很浑浊,水平能见度小于 1 公里的天气现象。强沙尘暴是指大风将地面大量沙尘吹起,使空气很浑浊,水平能见度小于 500 米的天气现象。

三分之二的沙尘天气起源于蒙古国南部地区,在途经我国北方时得到沙尘物质的补充而加强;境内沙源仅为三分之一左右。沙尘源区虽然主要是沙漠,干枯的湖床以及半干旱的沙漠边缘,但是植被覆盖减少的源区主要分布在北半球的沙漠地区,而南半球的沙尘释放则相对较少。因此,对于亚洲的沙尘暴研究来说,主要的源区主要包括:(1)我国八大沙区:塔克拉玛干沙漠,古尔班通古特沙漠,库姆达格沙漠,巴丹吉林沙漠,腾格里沙漠,毛乌素沙漠,浑善达克沙地,科尔沁沙地等。(2)河湖干枯土壤类型区:主要有塔里木河下游区,叶尔羌河下游区,艾比湖区,玛纳斯湖区等,以及蒙古的戈壁沙漠等类似地区。(3)绿洲内农田:主要有不同土质,不同利用和耕作方式下的农田。(4)胡杨林土壤区:主要是南



疆胡杨林分布区和黑河下游的额济纳旗地区。(5) 土壤表面受到人类活动干扰的地区, 主要是地县, 乡级城镇居民人为活动的无覆盖土壤区。

沙尘暴天气过程主要分为三个阶段: 起沙过程, 长距离输送过程, 沉降过程。

研究认为: 在极有利的大尺度环境、高空干冷急流和强垂直风速、风向切变及热力不稳定层结条件下, 引起锋区附近中小尺度系统生成、发展, 加剧了锋区前后的气压、温度梯度, 形成了锋区前后的巨大温压梯度。在动量下传和梯度偏差风的共同作用下, 使近地层风速陡升, 掀起地表沙尘, 形成沙尘暴或强沙尘暴天气。

近 4 年春季影响我国的沙尘天气路径可分为西北路径、偏西路径和偏北路径: 西北 1 路路径, 沙尘天气一般起源于蒙古高原中西部或内蒙古西部的阿拉善高原, 主要影响我国西北、华北; 西北 2 路路径, 沙尘天气起源于蒙古国南部或内蒙古中西部, 主要影响西北地区东部、华北北部、东北大部; 偏西路径, 沙尘天气起源于蒙古国西南部或南部的戈壁地区、内蒙古西部的沙漠地区, 主要影响我国西北、华北; 偏北路径, 沙尘天气一般起源于蒙古国乌兰巴托以南的广大地区, 主要影响西北地区东部、华北大部和东北南部。

尽管国内外已经对沙尘暴进行了大量的观测和研究, 但是有于客观条件的限制, 研究大多是分散的, 不系统的, 而且未达到一定的科学深度。到目前为止, 在沙尘暴观测和研究方面还有大量问题有待解决。沙尘暴研究涉及到气象, 水文, 地质, 地理, 化学和遥感等多种学科, 其影响涉及到气候, 环境, 生态以及社会和经济等部门。无论是在沙尘暴的发生机制, 还是在输送过程中所发生的物理和化学特征的变化方面, 我们仍然知之甚少。所以对沙尘暴事件的研究, 从发生源地, 天气背景包括动力和热力诊断, 长距离输送, 到最后沉降过程都有必要进行进一步研究。

本文拟采用美国 NWS 为 NCEP 业务运行 FNL 数值预报模式提供的初始场资料, 利用 HSPLIT-4 传输, 扩散模式对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的强沙尘暴进行长距离输送的数值模拟研究, 并进行轨迹和浓度分析。然后采用从 NOAA 的 CDC (NOAA-CIRES 气候诊断中心) 网上获得的全球 NCEP/NCAR 气压层再分析数据, 利用美国 PSU/NCAR 发展的有限区域中尺度预报系统 MM5V3, 对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的沙尘暴事件进行天气模拟, 寻找此次沙尘暴发生的天气原因。



第二章 文献综述

2.1 国内外研究综述

国际上,现代关于沙尘暴的研究,开始较早,主要围绕两个大的观测计划 BOMEX(1996)和 GATE(1974)年而展开。上世纪 20 年代初 Hankin^[2]首先对印度的“An-dhi”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了分析。之后,Idso^[3]和 Jesepe^[4]先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴中湿度场的差异等作了多方面的研究。20 世纪 80 年代以来研究有了进一步的深入, Brazel^[5]对发生于美国亚利桑那州的沙尘暴天气类型作了详细分析。Jauregui^[6]对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究。Ott^[7]等曾利用卫星和 GATE 资料对撒哈拉沙尘暴的爆发作过分析。此外,利用数值模拟方法研究起沙率的做法,也渐渐发展起来,并得到越来越广泛的应用。Schutz, L^[8]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^[9-10]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。近年来,随着对土壤风蚀过程认识的不断加深, Shao^[11,12]等将地理信息系统(GIS)、气象模式与起沙模式耦合起来,对澳大利亚墨累河—达令河流域(Murray-Darling Basin)和澳大利亚大陆的土壤风蚀做了模拟; Marticorena^[13]等将设计的起沙方案用于模拟撒哈拉的沙尘暴天气的起沙过程,模拟结果与卫星云图比较一致。上述两种模式在模拟沙尘源和起沙率方面都有较好的能力。目前,国际上已经有大量从区域模式到全球模式的沙尘输送模式。近年来,国际上有关沙尘暴的研究主要聚焦在沙尘暴天气与全球气候,生物化学和环境的相互作用上。Joseph M. Prospero^[14]等研究表明大量非洲沙尘暴粒子在过去几年里越过大西洋来到加勒比地区,从 1965 年到 1998 年在巴巴多斯岛的信风测量表明在从 1970 年开始变的很干的 Soudano-dahel 地区一年内的变化与降雨量是高度不相关的。这一衰退证明长期的降水数据表明在 20 世纪 1970 年以前降水很正常时沙尘浓度是很低的。因为沙尘散发的高度敏感性对气候而言,更多的改变从非洲和其他干旱区域的散射导致大量的改变对大范围地区气候的影响。T. D. Jickells^[15]等从能量的角度研究了沙尘暴对全球环境系统,特别是对全球气候所产生的巨大影响。

我国历史文献浩瀚,有关沙尘暴天气的记载不绝于书。有书记载:康熙十四年(公元 1675 年)三月二十六日,冀州起异风,“黄霾蔽天,屋瓦皆飞”。雍正元年(公元 1723 年)四月初七,“献县风霾,昼晦”;恩县“夜起大风,飞石拔木有顷,黑霾如墨,良久复变为红霾,乍明乍暗,逮晓方息”等等。降尘现象在历史文献中常被称为“雨黄土”,“雨砂”,“土霾”,“黄雾”等等。在近代气象记录中则相当于严重的沙尘暴和浮尘现象。表明我国人民从古代以来对于天气一直



给予了高度的关注。张德二^[16]曾根据历史文献的记载,对我国从唐朝以来的沙尘暴事件进行了系统分析,并给出了公元三世纪以来的“雨土”年表。

然而,我国真正采用近代科学技术监测、模拟、研究和预测沙尘暴,却相对起步较晚。上世纪70年代,我国对沙尘暴的研究大多集中在沙尘(暴)事件活动时间和空间分布的统计分析及气候学研究方面,对沙尘天气学的研究主要是分析造成沙尘暴的影响系统。有关数值预报的研究,也多数集中于模拟造成沙尘暴的天气系统。此外,也开展了一些沙尘输送的模拟研究。石广玉^[17]曾对20世纪80年代的中国黄沙研究做过简短评述。对于东亚地区黄沙输送的研究已有一些有意义的工作。徐国昌^[18]等对甘肃1977年4月22日的特大沙尘暴进行了诊断分析,对沙尘暴发生时的天气要素场演变特征及其成团作了分析。

目前,我国在沙尘(暴)气溶胶的物理化学特性研究等方面已取得了进展。周明煜^[19]等曾研究了1980年4月18日袭击北京的一次沙尘暴的黄沙粒子的浓度和粒径分布,特别是他们发现了镉、钽和钕等元素只存在于黄沙粒子中。曲绍厚^[20]等则讨论了这次强沙尘暴的来源,结果表明这次沙尘来源比较复杂,它不止来源于某一单一地区。石广玉^[21]等报道了利用太阳华盖辐射计对1991年春夏之交的北京地区大气气溶胶光学特性的测量结果、发现当沙尘暴袭击北京时,整层大气气溶胶的光学厚度、大粒子浓度以及粒子散射相函数等均有大幅度增加。邱金桓^[22]等采用激光雷达和光度计对1988年4月北京地区的三次沙尘暴天气过程进行了综合测定。张仁健^[23]等对2000年4月6日北京地区发生的特大沙尘暴化学元素成分的分析表明,北京春季沙尘污染极为严重。方宗义^[24]等根据卫星探测的特点,针对2000年4月6-7日华北地区大范围沙尘天气,具体探讨了用星载扫描辐射仪监测沙尘暴的原理和方法。最近,岩坂^[25]等报告了亚洲大陆沙漠地区自由大气中的沙尘粒子数浓度及谱分布的气球观测结果。在数值模拟方面,赵琳娜^[26,27]对华北和北京沙尘暴产生的有利环境场进行了研究。与我国西部地区沙尘暴起因的冷空气活动及冷锋锋生作用,以及偏东风“倒灌”等不同。赵琳娜等注意到,近年来发生于我国东部地区的沙尘暴却多与快速气旋的发生发展有关,其中又主要是蒙古气旋。他们的分析表明,这类气旋有其特殊性,它们与夏季降水期的江淮气旋不同、斜压强迫是主要的影响因子,而又与海上爆发性发展的海洋气旋不同,凝结潜热的作用不很明显,属于“干气旋”一类。但是,对流层低层和高层位势涡度的大值区的分布却很明显,甚至出现对流层顶“下陷”,涡柱上下贯通,连成一体结构。为了了解该类气旋发生发展的过程,他们采用中尺度非静力模式,对该类气旋进行了数值模拟,模式可复制出该类气旋从无到有发生发展的过程,特别是位势涡柱的演变特征,证明了大气动力因子起主导作用,解释了沙尘暴大风来源于有效位能向动能的转换。这从另一角度表明,引发华北沙尘暴的系统与我国西部的系统似乎存在着显著的不同。这对于我们进一步认识沙尘



(暴)气象环境场的多样性提供了帮助。黄美元^[28]和王自发在比较国内外起沙机制模刑的基础上,结合我国北方大量气象台站的有关起沙过程的观测资料,提出了一个适合我国北方地区用于黄沙长距离输送模拟与预报的起沙模型。模式中尽可能地考虑了微物理过程和粒子分谱。另外,在输送过程中还考虑沉降和降水清除过程的参数化,得到了令人鼓舞的结果。

2.2 国内外有关沙尘暴的国际会议和研究项目

近年来曾召开过多次有关沙尘暴的国际学术会议:1997 年阿拉伯国家联盟和世界气象组织在叙利亚大马士革召开了第一届国际沙尘暴学术会议(ISSDS-1),1998 年 7 月联合国教科文组织和国际地质科学协会在英国牛津召开了第四届国际风成研究学术会议(ICAR-4),会议上有多篇学术论文涉及到沙尘输送、沙尘暴发生和沙尘沉降等问题。2002 年 10 月 31 日到 11 月 2 日在北京召开了国际沙尘暴研讨会,共有来自中国、日本、韩国、蒙古、俄罗斯、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦以及美国和法国等 9 个国家的 60 多名科学家参加。会议讨论并初步通过了国际沙尘暴科学研究计划(DUST),发表了北京宣言,呼吁有关国家的政府和科学家进一步关心沙尘暴问题。该计划的重点放在沙尘暴的科学研究上,共分为 8 个课题:(1)沙尘暴发生机制的研究;(2)沙尘输送过程的研究,特别是输送过程中沙尘粒子所发生的物理、化学特性变化;(3)沙尘暴气候效应的研究;(4)沙尘气溶胶对海洋环境的影响;(5)沙尘气溶胶的生态环境效应及其对社会——经济的影响;(6)沙尘暴对人类健康和生活的影晌;(7)预警和预报系统的研究;(8)沙尘暴防治战略的研究。2004 年 9 月国际沙尘暴学术研讨会在北京召开,会议主题分别为“沙尘暴的观测与分析”、“沙尘暴的起沙机制和沙尘气候学”和“沙尘暴模式与预报”。

近年来,比较系统的国际大气气溶胶研究计划是已于 2001 年结束加强观测(IOP)的亚洲气溶胶特征试验(ACE-Asia),其中曾将矿物(沙尘)气溶胶作为其主要研究内容之一^[29];而于 2001 年开始的中国科学院—日本文部科学省的“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境影响的研究(ADEC)”的合作项目^[30],可能是系统性地研究亚洲沙尘暴的第一个科学计划,目前正在顺利执行。其目标是:阐明亚洲风送沙尘的发生、输送实况及其模式化;评价过去半个世纪以来沙尘向大气与海洋中的输送量;并在全球规模上,将亚洲沙尘对气候系统的影响定量化。与以往的国内外沙尘(暴)研究相比,这一研究项目有以下特点:(1)三维地、综合地、系统地进行大陆尺度的沙尘发生、长距离输送的观测分析;(2)提供定量评价风送沙尘对气候系统影响的各种数据;(3)定量评价过去半个世纪



以来的气候变化与风送沙尘的关系。

2.3 有关沙尘暴数值模拟专题文献综述

王劲松等^[31]利用 MM5 中尺度数值模式, 以 T106 实况资料作为初值场和侧边界值, 对甘肃河西走廊 2000 年 4 月 12 日强风天气形势和地面风场进行了数值模拟。模式试验: 粗网格区域格距为 60km, 格点数为 61×61 , 细网格区域格距为 20km, 格点数为 59×76 , 垂直方向为 σ 坐标, 模拟中取 σ 为不等距的 23 层。主要物理过程为 GRELL 积云对流参数化方案, BLACKDAR 高分辨率 PBL 方案, DUDHIA 云辐射方案。采用可流入流出侧边界条件。模拟过程积分 48h, 每隔 3h 输出一一次预报结果。每 24h 输入一次新的侧边界值。模拟和诊断分析结果表明: MM5 中尺度能模拟出产生这次强沙尘暴的强风天气形势和上升运动; 沙尘暴爆发前 3h 河西走廊出现西北大风, 并有大风向这一地区的明显辐合; 沙尘暴发生在地面处于暖状态的地区; 位涡的水平分布特征对沙尘暴的出现时间合落区有一定的指示意义。沙尘暴上空螺旋度垂直分布为高层负值, 低层正值。螺旋度正值的演变与沙尘暴的出现有一定的对应关系。

许东蓓等^[32]也是利用非静力 MM5 模式对这次沙尘暴天气进行了数值模拟。水平方向格距 60km, 格点数 55×51 , 中心点选 (40N, 100E), 模式顶层为 100hpa, 垂直方向取 σ 坐标, 为不等距 24 层。初始场和侧边界值均取 T106 模式 1×1 经纬网格点资料和探空资料。模拟过程从 1998 年 4 月 17 日 20 时开始, 积分 48 小时, 采用干过程。进行了风场模拟, 850pha 形势场模拟。结果表明西西伯利亚强冷空气迅速东移, 在新疆西部上空形成强锋区, 对应的地面冷锋东移至前期增暖显著的新疆、内蒙古、甘肃、宁夏等地形成了本次大风、强沙尘暴天气。用非静力 MM5 模式较好地模拟出了此次强沙尘暴天气过程的地面强风系统、高空锋区的发生发展。

康风琴^[33]等利用 MM5 中尺度气象模式对 2001 年 4 月 7 至 9 日发生在新疆南部, 青海北部, 甘肃大部等的强沙尘暴天气过程进行模拟研究。中心点 (40N, 100E), 粗细网格点数分别为 61×61 和 121×121 , 格距分别为 60km, 20km。模式垂直方向为 σ 坐标, 取不等距的 23 层。初始条件采用目前国家气象中心业务运行的 t106L19 分析场。云和降水物理过程选择混合云显示方案和积云对流参数化方案; 对格距为 60km 的大网格, 选用 betts-miller 方案, 对格距为 20km 的小网格, 选用 Grell 方案。行星边界层物理过程采用 blackadar 高分辨 PBL 参数化。云辐射方案采用 Dudhia 长短波辐射方案, 考虑云和大气之间的长波, 短波辐射交互作用。地面稳定由浅层模式和有云效应的能力收支预报获得。地表特征取



13 类。结果表明: MM5 中尺度模式能够模拟出这次天气过程的系统变化, 小网格尺度的模拟结果比较大网格更能够反映出系统的特征; 在地形、地貌相对稳定的情况下, 特殊的天气环流形势造成的强而持久的大风和激烈的中尺度垂直对流是这次天气过程的主要原因; 从空中槽脊形式的配合、发展趋势, 地貌、地形特征, 地面大风、降温、降压等特征综合分析, 提前 24h 就能预示出这次大范围的大风、寒潮和沙尘天气的出现。这次过程的特殊之处是: 整个模拟过程中模拟区域内在 200hPa 以上有弱的层结不稳定状态出现, 对流层中、低层层结稳定; 沙尘暴发生区域的主要上升气流出现在上午。

孙军等^[34]利用 MM5 中尺度气象模式对 1995 年 5 月 16 日我国西北地区发生的一次沙尘暴天气个例进行了锋生函数和地表热通量的诊断分析。结果表明, 沙尘暴过程是冷锋在移至我国西北地区时产生的一种强烈锋生过程; 地表感热通量明显大于地表潜热通量; 有无地面热通量对比试验表明, 热力因子在沙尘暴产生过程中具有重要作用。

孙建华等^[35]利用 MM5V3 中尺度气象模式结合起沙和输送模式, 对 2001 年 4 月 6 至 10 日和 2002 年 3 月 19 至 22 日发生的 2 次较强沙尘天气的起沙及输送过程进行了数值预测。模式格距为 45km, 预测区域大致为 (25° — 60° N, 80° — 140° E), 中心点为 (40° N, 115° E)。气象背景场采用 1×1 INCEP 格点资料。结果表明有明显的日变化, 沙尘暴下午最多, 凌晨最少。然后, 采用集成的沙尘天气预测系统对 2001 年 4 月 6 至 10 日、2002 年 3 月 19 至 22 日发生的两次强沙尘暴过程进行了预测试验, 将沙尘浓度的模拟结果与实况观测进行了对比。对沙源和起沙过程的深入分析表明: 两次过程主要的沙尘源地是蒙古国南部, 内蒙古中西部、河北北部、山西东北部、甘肃和青海北部等地区; 起沙中贡献最大是粒径为 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 和 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的粒子, 华北北部的荒漠化地区 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 和 $11 \sim 22 \mu\text{m}$ 的起沙量相当, 而内蒙古西部和蒙古国南部沙地附近的起沙以 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 为主, 总的起沙量中 $2 \sim 11 \mu\text{m}$ 粒径组的贡献占 90% 以上。

王夕华等^[36]利用有限区域动力模式 MM5 和沙尘暴传输扩散模式相耦合的基础, 重点讨论在沙尘暴传输过程中, 热飘移应力对沙尘粒子的作用。变量在水平和垂直方向的配置均为跳点格式, 采用 Brown—Campana 时间积分和 Asslin 时间过滤方案。

赵琳娜等^[37]在对气象背景场进行诊断分析的基础上, 集中对一次沙尘(暴)天气的起沙机制进行了数值模拟, 具体做法是先将澳大利亚新南威尔士大学 (UNSW) 邵亚平博士发展的具有清晰物理概念的起沙数值模式(非参数化方案), 与 PSU / NCAR 的中尺度气象预报模式 MM5 进行耦合, 使用该模式系统, 根据陆面状况和大气条件, 定量模拟出沙尘(暴)起沙的过程, 对 2000 年 4 月 6 至 7 日发生在华北和北京的一次沙尘暴过程的数值试验结果表明, 该模式对沙尘天气的



起沙过程有较好的模拟能力。

赵琳娜等^[38]使用非静力中尺度模式,对 2000 年 4 月 5 至 7 日引发北方沙尘暴大风天气的蒙古气旋快速发生发展过程做了 48h 的预报试验,发现含全物理过程时,该模式基本可再现出大尺度背景场演变和蒙古气旋快速发展的过程;气旋发展前期冷暖空气相当活跃,有很强的斜压性,锋生函数辐散项对气旋的发展作用最大;对流层高层的位涡大值区在向下向东传递过程中,中低层出现气旋快速发展,气旋达最强盛时,对流层中形成一个上下贯通的垂直涡柱;对流层顶“下陷”,高层位涡大值区(即高空冷涡低槽的发展)与低层锋区出现相互作用,这可能是导致斜压扰动发展及气旋初始生成的重要机制;潜热释放在本次气旋发生发展过程中作用不显著。这与梅雨锋上低压(扰动)等系统的情况有很大差别。

张小玲等^[39]采用二重水平套网格非静力平衡动力框架,预报中心区域中心(40°N , 116°E),水平格距分别为 45km, 15km, 水平网格数分别为 101×101 , 103×103 , 垂直方向为 σ 坐标,取 23 层。时间积分步长取 120s, 预报时效为 36h, 每 3h 输出一次。主要物理过程为: GRELL 积云对流参数化方案, BLACKADAR 高分辨 PBL 方案, DUDHIA 云辐射方案。采用流入流出侧边界条件, 初估场资料采用了国家气象中心 T106L19 模式的分析及预报结果, 实时观测资料则包括常规地面, 探空资料及北京和周边地区地面加密观测资料。结果表明, 此次沙尘暴天气是高空小槽延大槽后强西北气流东移的发展加深, 引导一次强冷空气南下所致; 数值模式对沙尘暴到达北京地区的时间, 地面风速, 风向的突变都做出了很好的预报; 沙尘暴发生时中低空有很强的垂直上升运动和正涡度中心, 其形成, 发展和移动与沙尘暴的过境时间和移动方向基本一致。

王宝鉴等^[40]从天气事实, 地面形势, 中小尺度天气系统及高空环流形势等方面将 2000 年 4 月 12 日青海省北部及甘肃河西走廊出现的一次强沙尘暴天气和 1993 年 5 月 5 日黑风进行对比分析。分析结果表明: 这两次黑风天气均是由强冷空气沿西北路径爆发而引发的, 但由于两次黑风天气的冷空气强度, 锋区南压程度, 高低空急流配置等不同, 因此造成两次黑风天气影响范围, 强度也有所不同; 中小尺度低压系统对扬沙, 浮尘及沙尘暴天气转化为黑风起了重要的作用。



第三章 方法和资料介绍

3.1 HYSPLIT-4 模式

由NOAA(ARL)的Draxler等开发的HYSPLIT-4(混合单粒子拉格朗日积分)传输、扩散模式能较好的应用于PM₁₀污染物(粒径<10 μm)扩散和传输的数值模拟^[41],其平流和扩散计算采用Lagrangian方法,而浓度计算采用Eulerian方法,即采用Lagrangian方法以可变网格定义污染源,分别进行平流和扩散计算;采用Eulerian方法在固定网格点上计算污染物浓度。模式采用地形sigma坐标,模式的水平网格与输入的气象场相同,垂直方向分为28层。模式将气象要素线性内插到各sigma层上。

HYSPLIT-4能广泛应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散,对世界各地的沙尘暴事件也能做较好的数值模拟,从文献[42]中该模式成功地模拟了2001年4月和2002年3月发生在中国的沙尘暴事件可以推断该模式对中国的沙尘暴事件具有一定的适应性,并可进一步获取有关该模式对沙尘暴事件的具体应用。

3.1.1 起沙处理

对沙尘暴天气过程的模拟,首先要解决的就是沙尘源的问题,较为常用的方法有参数化法及起沙数值模拟法。整合进HYSPLIT模式的起沙通量用文献^[43]中的公式:

$$F = 0.01 \times u_*^4, \quad (1)$$

其中 u_* 为摩擦速度。由于没有十分精细的地表特征数据, HYSPLIT-4 粗略地使用 1×1 度经纬网络的地表类型数据,仅当格点所在处的地表特征为沙漠时,才认为可能是一沙尘源。当局地风速超过当地地表粗糙度所决定的临界风速并且此格点所对应的地表特征为沙漠时,则认为该格点会起沙。实际上是在扩散模式和传输模式启动前, HYSPLIT 用上述方法预先计算出模拟区域中的所有潜在点源。

3.1.2 扩散方程

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial \sigma c}{\partial \sigma} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_v \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) = S + R, \quad (2)$$

其中 u, v, σ 为风场, c 为污染物浓度, S 为源, R 为汇(包括各种沉降、化学反应)



σ 为垂直方向地形sigma坐标定义如下:

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}) \quad (3)$$

其中, Z_{top} 是模式层顶高度, Z_{gl} 是地面高度, Z_{msl} 是要计算的垂直层高度。垂直方向不同层间间隔可以取定任意值, 模式中预先给定 Z_{msl} 和垂直层指数间的定量关系:

$$Z = aK^2 + bK + c \quad (4)$$

式中 $a=30$, $b=-25$, $c=5$ 。在这一关系式约束下, 越上层垂直分辨率越小, 当 $K=1, 2, 3$ 时, 层高度分别为 10, 75, 200m, 依次类推, 当 $K=20$ 时, 层高度为 11500m, 此时, 层间间隔达到了 1200m。通过修改上述等式中的系数, 可以得到任何精度的垂直分辨率。

3.1.3 平流方程

任何拉格朗日模式的根本都是根据各个粒子或烟羽来计算扩散的, 即各个粒子互不依赖。因此一旦 U 、 V 、 W 基本气象背景场确定下来并且插值到了模式格点上, 平流就可以确定了。HYSPLIT 模式对平流的处理如下:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t) * \Delta t, \quad (5)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + \frac{1}{2} [V(P', t + \Delta t) + V(P, t)] * \Delta t, \quad (6)$$

其中 P 为污染物位置, V 为三维风矢, Δt 为可变时间步长, $\Delta t < 0.75$ 格距 / U_{max} (U_{max} 为最大风速), 即一个时间步长内气团的移动不超过 0.75 个格距。

3.1.4 沉降

沉降机制可分为干沉降、湿沉降及辐射衰减。干沉降可以显式定义一个沉降速度, 对粒子来说为一个与重力相关的速度, 也可以用抗阻方法求得。可溶性气体的湿沉降用 Henry 定律求得。粒子湿沉降通过计算云内清除率和云底以下显式清除系数求得。模式为了计算简便, 将沉降过程用一个统一的表达式表示:

$$D = m \{ 1 - \exp[-\Delta t (\beta_{\text{dry}} + \beta_{\text{gas}} + \beta_{\text{inc}} + \beta_{\text{bel}})] \} \quad (7)$$

m 为污染物质量, 随着沉降过程而减少; β_{dry} 、 β_{gas} 、 β_{inc} 、 β_{bel} 分别为干沉降常数、气体沉降常数、云内清除常数、云底以下清除常数。

3.1.5 气象场资料



本次模拟气象场采用美国 NWS 为 NCEP 业务运行 FNL 数值预报模式提供的初始场资料。每天共有 4 个时次：00、06、12、18UTC，格距为 $190\text{km} \times 190\text{km}$ ，垂直方向共 14 层，从地面至 50 hPa 的气象场。地面要素场包括：地面气压、温度，6 h 累计降水量，地面 U, V 方向动量通量，感热通量，潜热通量，地表向下短波辐射通量，地形高度，2 m 高度的温度、相对湿度，10 m 高度的风向、风速，土壤湿度，总云量。高空要素场包括：水平、垂直风场，温度，高度，相对湿度。

3.2 MM5V3 模式

第五代 NCAR/Penn State 中尺度模式是一种目前广泛使用的有限区域中尺度预报系统，它较成功地模拟了把北太平洋和北大西洋上的爆发气旋，高原涡旋，西南涡及其引发的暴雨，强风暴和中尺度对流复合体等。特点包括多重嵌套的能力，非静力动力模式以及四维同化的能力和具有云物理和行星边界层等多种物理选项。地形和气压场上的气象数据从经纬度格点水平插值 (TERRAIN 和 REGRID) 到一个可变的高分辨率区域上。所采用的投影方式可以是：麦卡脱投影，兰勃脱投影或极地投影。因为插值过程并不能够提供中尺度信息，所以可以使用标准的地面和高空测站数据来提高插值数据的质量 (通过程序 RAWINS/little-r)。这些程序中使用了具有连续 (循环) 扫描功能的 Cressman 和 multiquadric 两种客观分析方法。程序 INTERP 把气压层上的数据转换为 MM5 程序所需要的 sigma 层上的数据。由于 MM5 模式应用广泛，在此不做更多地介绍。

3.2.1 数据资料介绍

用于 MM5 模式模拟的是数据是全球 NCEP/NCAR 气压层再分析数据存档文件，可从 NOAA 的 CDC (NOAA-CIRES 气候诊断中心) 网上获得。数据时间范围从 1948 年到现在，每隔 6 小时输出一次，气压层有：1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 共 17 层， 90°N - 90°S ， 0°E - 357.5°E 范围内的 144×73 个点。分辨率是 2.5 经度 $\times$ 2.5 纬度，以一个月作为一个文件来存档。一个气象数据文件由一个或多个时间段构成。每一个时间段是一个或者多个 ASCII 码记录 (用以包括有效时间，格点定义，变量和层的信息) 开始的。接下来的每一个记录包括一个水平数据场，由包含记录的时间，变量和层信息的 50 个 ASCII 码字节构成 ($X \times Y$ 个字节的数据， X 和 Y 分别是水平方向和垂直方向的数据点)。对于浮点或者整型数据，每一个变量作为一个字节来打包。精度是根据包装邻近格点间的差别，而不是绝对值来维持的。在每一时



间段内,地面数据场均放在高层数据场之前。所有的记录是同样的长度,允许模式可以用“直接存取”的方式来读取文件。数据文件可在大多数的计算平台上读取,不需要任何的转换。

使用 MM5 模式模拟绝对需要输入的变量有以下五个:T, U, V, RH, HGT, PMSL, SST or TSEASFC or SKINTEMP。T 指空气温度,U 指水平风与格点相关的 U 分量,V 水平风与格点相关的 V 分量,RH 指相当湿度,HGT 指地形高度,PMSL 指海平面气压,SST or TSEASFC or SKINTEMP 指海表面温度或地表温度。

将 CDCnetCDF 转换到 ARL HYSPLIT 格式的转换格式可向 ARL 提出申请得到。这个程序相当复杂,且处理时需要足够的存储空间。



第四章 2003 年 4 月沙尘暴事件长距离输送 的轨迹和浓度分析

4.1 我国八大沙区

中国是世界上沙漠和沙漠化土地最多的国家之一。沙漠、戈壁、沙漠化土地及风沙化土地总面积为 153.3 万平方公里, 占国土总面积的 15.9%。主要分布于北纬 35 度—50 度, 东经 75 度—125 度间的内陆盆地和高原, 形成一条西起塔里木盆地西端, 东迄松嫩平原西部, 横贯西北、华北和东北地区, 东西长达 4500 公里, 南北宽约 600 公里的断续弧形沙漠带。

该沙漠带包括八大沙区: 塔克拉玛干沙漠, 位于我国最大的内陆盆地——新疆塔里木盆地中央, 是我国最大的沙漠, 也是世界上第二个流动性沙漠; 古尔班通古特沙漠, 位于新疆准噶尔盆地的中央, 是我国第二大沙漠; 巴丹吉林沙漠, 位于阿拉善荒漠的中心, 主要分布在内蒙古西部与甘肃东北部, 是我国第三大沙漠。腾格里沙漠, 位于内蒙古与宁夏之间, 是我国第四大沙漠; 毛乌素沙漠, 位于鄂尔多斯高原的中心, 主要分布在内蒙古伊克昭盟南部、陕西的北部和宁夏东部。库姆达格沙漠, 位于新疆东部, 向东可延伸到甘肃敦煌的西部; 浑善达克沙地位于锡林郭勒盟南部和赤峰市克什克腾旗西部, 东起大兴安岭南段西麓, 西至集二铁路, 东西长约 340 公里, 南北宽 30—100 公里, 总面积为 2.14 万平方公里, 地面起伏不大, 多为固定和半固定的沙垄和蜂窝状沙丘; 科尔沁沙地位于内蒙、沈阳和辽宁三省的交界处, 大部分地区为沙丘和沙岗。分布见下图:

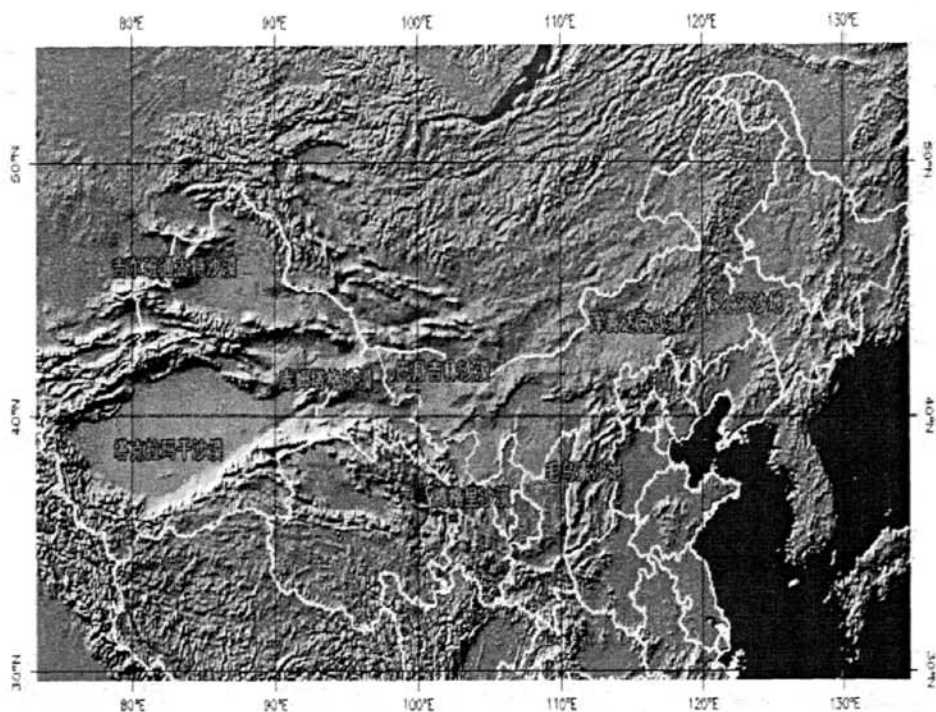


图 4.1 我国八大沙区分布图

4.2 2003 年 4 月沙尘暴事件概述

2003 年 4 月 9 日, 受新疆东移强冷空气影响, 甘肃河西、白银、兰州等地先后出现了大范围的大风、沙尘天气, 其中金塔、张掖、民勤、兰州等地出现沙尘暴, 能见度普遍在 900m 以下, 金塔为强沙尘暴, 最大风速达到了 25 m/s (10 级), 能见度 300m。内蒙西部有 6 站出现沙尘暴, 最大风速一般在 20 m/s 左右, 最低能见度达到 400m。青海有 6 站出现沙尘暴, 最大风速一般在 20—28m/s, 其中茫崖出现黑风天气, 最大风速为 28m/s, 最低能见度达到 10m。宁夏也先后出现了沙尘天气, 风速一般在 12—16 米/秒。本次模拟就是针对这次沙尘暴进行的。



表 1 我国北方部分地区沙尘暴天气实况（陕西、新疆 4 月 9 日均未出现沙尘暴）

序	地名	能见度/m	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风向/度	天气现象	出现时间
1	张掖（甘肃）	900	18	西北	沙尘暴	10时00分
2	金塔（甘肃）	300	25	西北	强沙尘暴	13时07分
3	民勤（甘肃）	800	21	西北	沙尘暴	13时07分
4	兰州（甘肃）	600	10	北风	沙尘暴	15时20分
5	泽库（青海）	小于200	24	偏西风	特强沙尘暴	16时30分
6	玛多（青海）	小于100	25	偏西风	特强沙尘暴	16时42分
7	共和（青海）	小于800	19	偏西风	沙尘暴	18时16分
8	达日（青海）	小于100	28	偏西风	特强沙尘暴	18时45分
9	甘德（青海）	小于300	29	偏西风	特强沙尘暴	18时44分
10	玛沁（青海）	小于100	24	偏西风	特强沙尘暴	19时01分
11	曲麻莱（青海）	注：以电话方式确定该站无具体记录，但出现了沙尘暴				
12	巴音毛道（内蒙）	900	20	西北	沙尘暴	14时32分
13	头道湖（内蒙）	600	20	西北	沙尘暴	15时01分
14	锡林高勒（内蒙）	700	17	北北西	沙尘暴	15时05分
15	额济纳旗（内蒙）	800	18	东南东	沙尘暴	15时15分
16	阿拉善左旗（内蒙）	800	18	北西	沙尘暴	16时15分
17	拐子湖（内蒙）	900	21	西北西	沙尘暴	16时45分

4.3 2003 年 4 月沙尘暴事件后向轨迹分析

为了解 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的这次强沙尘暴的源地, 利用 HYSPLIT-4 轨迹扩散模式, 以 4 月 9 日 12UTC 为起点, 6 小时间隔, 对以上站点进行后向追踪, 共追踪 10 个时次。

从图 4.2 中可以看出甘肃省 4 个站点途经甘肃北部, 内蒙西部和新疆东北部, 向西北方向移动, 但具体站点轨迹方向略有偏差。从图 4.3 中可以看出内蒙古自治区 5 个站点途经内蒙西北部和新疆东北部, 一直向西北方向移动, 而且轨迹路线基本一致。从图 4.4 中可以看出青海省 6 个站点轨迹明显不同于以上两省, 站点轨迹随着时间向前推移, 途经青海西北, 向西方向移动, 进入新疆南部, 其中有部分站点途经西藏北部。

在垂直方向上, 甘肃省 4 个站点中有 3 个轨迹线一直在 800 pha 以下, 说明沙

沙尘的长距离输送一直稳定在低层, 其中一个站点在 7 号 12 时左右局地垂直对流加大, 沙尘传输进入中层。内蒙古自治区 5 个站点轨迹一直稳定在 800 pha 以下传输, 说明沙尘一直在低层稳定气流中进行长距离输送。青海省大部分站点都稳定于 550 pha 传输, 其中有个别站点一开始在 700 pha 层传输, 到 7 号 18 时上升并稳定于 550 pha 传输, 说明在 8 号左右局地抬升较为明显, 之后气流较为稳定。考虑到甘肃省, 内蒙古自治区和青海省在我国西北部, 海拔较高, 所以轨迹传输基本都在近地面层进行。

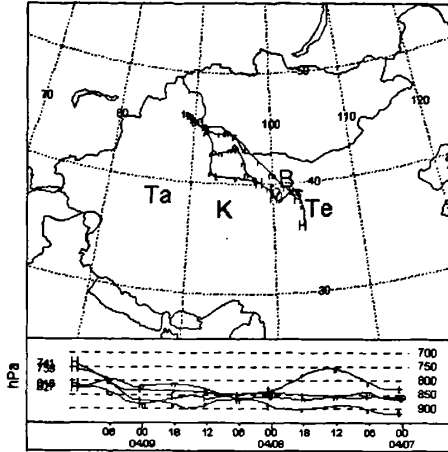


图 4.2 甘肃省站点后向轨迹图

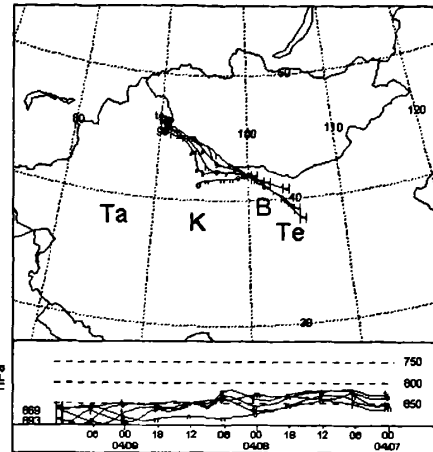


图 4.3 内蒙古自治区站点后向轨迹图

(H 表示站点位置; Ta 表示塔克拉玛干沙漠; K 表示库姆塔格沙漠; B 表示巴丹吉林沙漠; Te 表示腾格里沙漠)

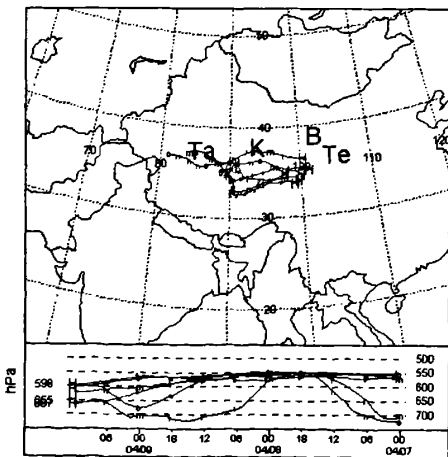


图 4.4 青海省站点后向轨迹图



表 2 后向轨迹中各时刻落入八大沙区站点统计表

时间	4 月 9 日 12 时	4 月 9 日 06 时	4 月 9 日 00 时	4 月 8 日 18 时	4 月 8 日 12 时	4 月 8 日 06 时	4 月 8 日 00 时	4 月 7 日 18 时	4 月 7 日 12 时	4 月 7 日 06 时	4 月 7 日 00 时	合计
塔克 拉玛 干沙 漠	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	6
吉尔 班通 古特 沙漠	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
库姆 达克 沙漠	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
巴丹 吉林 沙漠	2	5	6	3	2	0	0	0	0	0	0	18
腾格 里沙 漠	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
毛乌 素沙 地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
浑善 达克 沙地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
科尔 沁沙 地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	4	7	6	3	2	0	0	2	2	2	2	

从表 2 统计图中可以看出, 在进行后向轨迹追踪的整个过程中, 站点总共经过 4 个沙区, 分别为塔克拉玛干沙漠 (Ta), 库姆塔格沙漠 (K), 巴丹吉林沙漠 (B)



和腾格里沙漠(Te)。在进行后向追踪的前期,即 4 月 9 号左右,沙尘粒子主要来源于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,其中巴丹吉林沙漠在 4 月 9 号 00 时有 6 个站点沙粒来源于此,达到最高峰,腾格里沙漠在 4 月 9 号 12 时和 06 时也有沙尘来源于此。在后向轨迹追踪的后期,沙尘粒子则主要来源于另两个沙区塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠。整个过程沙尘来源巴丹吉林沙漠为最多,其次依次为塔克拉玛干沙漠,腾格里沙漠和库姆塔格沙漠。

经过以上分析,得到以下结论,这次沙尘暴过程沙尘来源并非单一,其中 73.3%的降尘来源于短距离输送的临近的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,另外 26.7%的降尘来源于长距离输送的塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠。

由于资料精度较低,在确定沙尘起源地区时有一定误差。要解决这一误差,要求提高资料精度,同时对目前沙区位置需要更为精确的 GIS 数据。

4.4 2003 年 4 月沙尘暴事件长距离输送浓度分析

为了解 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北部的沙尘暴浓度以及长距离传输过程变化,选定北纬 35 到 70 度,东经 70 到 120 度该区域为沙尘源潜在区域,此矩形区域包含了东亚地区八大沙区的其中七个沙区(未包含的科尔沁沙地在内蒙古、吉林、辽宁三省的交界处,远离此次沙尘事件的影响区域,并且面积为一极小的沙区)。此选定的矩形区域中,共有 224 个格点对应的地表特征为沙漠,此 224 个点中的局地风速大于当地条件下临界风速的点即被认为沙尘暴源区。选定 2003 年 4 月 7 日 00 时为模拟初始时间,积分总时间设定为 144h,即从 2003 年 04 月 07 日 00 时至 13 日 00 时,时间步长设为 6h。模式层顶设置为 10,000m,当粒子碰到上下边界时,模式视其从边界完全反弹。

此次沙尘暴天气主要影响我国北方地区,所以选定积分区域中心为(40° N, 100° E)。X 向、Y 向跨度接受模式默认值,分别为 180 个经度和 90 个纬度。如此选定的积分区域包含了整个东亚地区,可以将此次沙尘暴置身于东亚地区考虑。由于沙尘暴的长距离输送主要集中在 3,000m 以下高度,所以研究主要集中在 0~1500m 和 1500~3000m 两地面高度层。

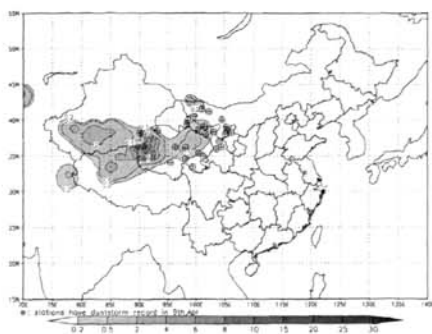


图 4.5 2003 年 4 月 9 日 00 时 0~1,500 m
平均沙尘质量浓度

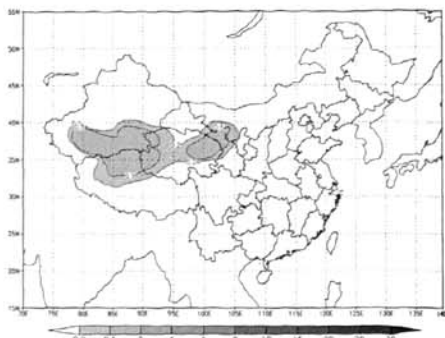


图 4.6 2003 年 4 月 9 日 00 时 1,500~3,000m
平均沙尘质量浓度

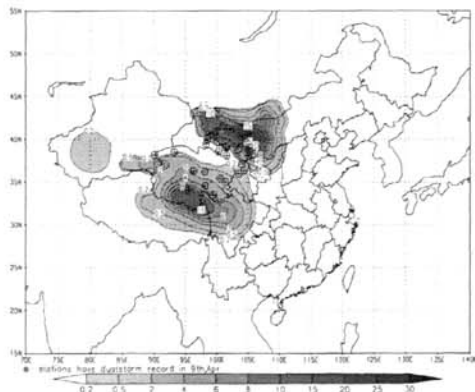


图 4.7 2003 年 4 月 10 日 00 时 0~1500m
平均沙尘质量浓度

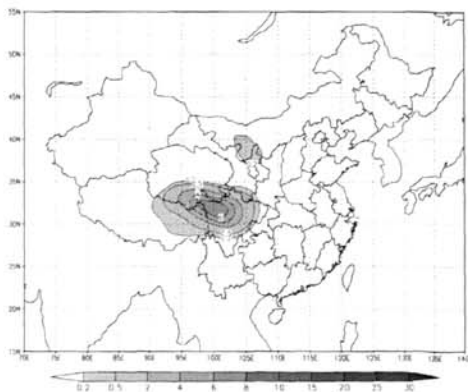


图 4.8 2003 年 4 月 10 日 00 时 1500~3000m
平均沙尘质量浓度

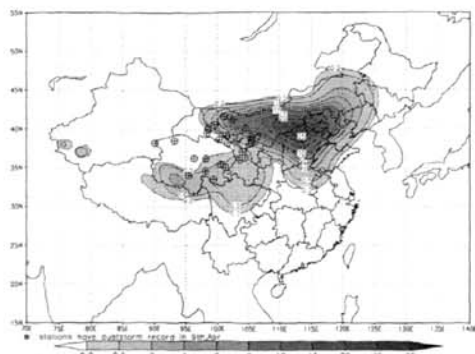


图 4.9 2003 年 4 月 11 日 00 时 0~1500m 平均沙尘质量浓度

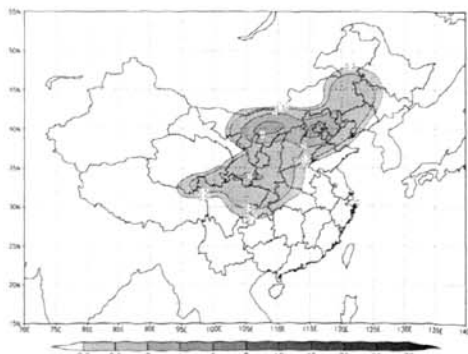


图 4.10 2003 年 4 月 11 日 00 时 1500~3000m 平均沙尘质量浓度

图 4.5, 4.7, 4.9, 分别代表 2003 年 4 月 9~11 日 00 时 0~1,500m 沙尘平均浓度分布, 表 1 所列站点标注在图中。9 日开始在新疆, 西藏北部和青海的交界处已经出现大范围的沙尘区域, 质量浓度在 $0.2\sim6\text{ mg/m}^3$ 。10 号沙尘暴区域大范围扩大, 且沙尘浓度上升。主要是 9 日下午沙尘暴全面爆发引起的。主要分布为两个区域, 一个主要分布于内蒙西部和甘肃, 最高质量浓度中心达 25 mg/m^3 , 高质量浓度中心停留在甘肃省中部, 另一个主要分布于青海省及其邻近边界, 最高中心浓度到 10 mg/m^3 。11 号沙尘暴继续向东移动, 还是分布为两个区域, 其中前一区域范围继续扩大, 高质量浓度中心到达河北山西边界, 最高质量浓度中心维持在 25 mg/m^3 左右。后一区域也向东移动, 但是东移速度明显没有前一区域迅速, 且范围有所减小, 质量浓度有所下降。

图 4.6, 4.8, 4.10, 分别代表 2003 年 4 月 9~11 日 00 时 1,500~3,000 米沙尘平均浓度分布。在该层, 9 号沙尘暴范围和 0~1500m 层相似, 但质量浓度在 $0.2\sim0.5\text{ mg/m}^3$ 。10 号 00 时高层沙尘浓度也有两个区域, 但是前一区域位于内蒙古, 甘肃和宁夏边界, 质量浓度只有 0.2 mg/m^3 , 且范围明显小于低层相应区域, 后一区域范围在青海省和四川, 西藏边界, 但范围和质量浓度都小于低层相应区域, 质量浓度最高只达到 6 mg/m^3 。到 11 号 00 时, 在高层这两个区域联合为一个区域, 范围覆盖内蒙, 山西, 陕西, 河北等多个省区, 但沙尘质量浓度在 $0.2\sim4\text{ mg/m}^3$ 左右。

可见在这次沙尘暴过程中有两个沙尘传输中心, 一个延北纬 35 度传输。另一个沿北纬 40 度传输, 其中前者质量浓度比后者小, 在 0~1,500m 层传输浓度和 1,500~3,000m 高空传输浓度变化不大, 后者主要集中在 1,500m 以下传播, 同时质量浓度大于前一质量浓度中心, 但在沙尘暴发生后期该质量浓度中心于前一质量浓度中心合并为一个整体, 一起东移入海。

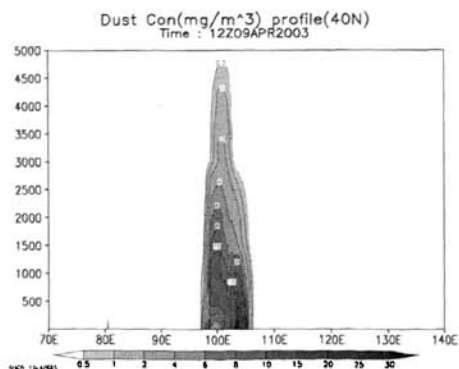


图 4.11 4 月 9 日 12 时 40° N 沙尘浓度
垂直剖面图

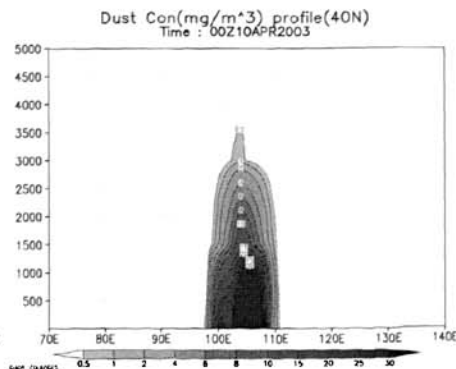


图 4.12 4 月 10 日 00 时 40° N 沙尘浓度
垂直剖面图

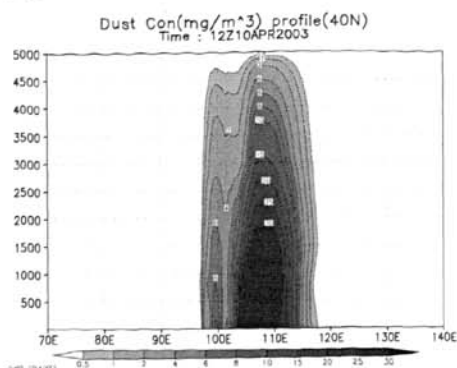


图 4.13 4 月 10 日 12 时 40° N 沙尘浓度
垂直剖面图

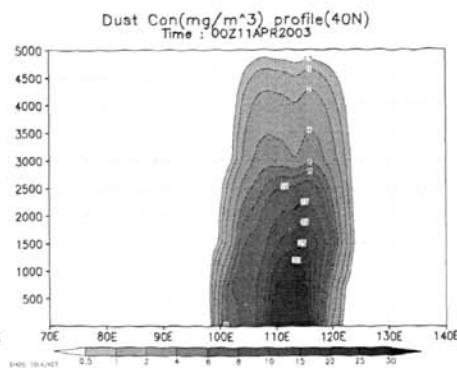


图 4.14 4 月 11 日 00 时 40° N 沙尘浓度
垂直剖面图

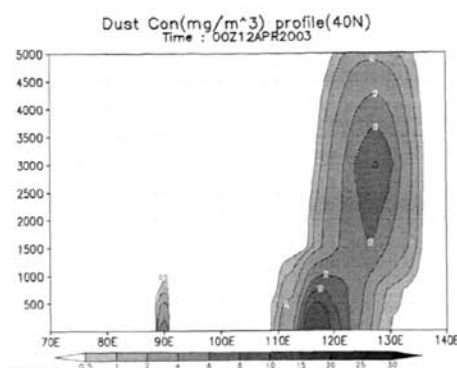


图 4.15 4 月 12 日 00 时 40° N 沙尘浓度
垂直剖面图

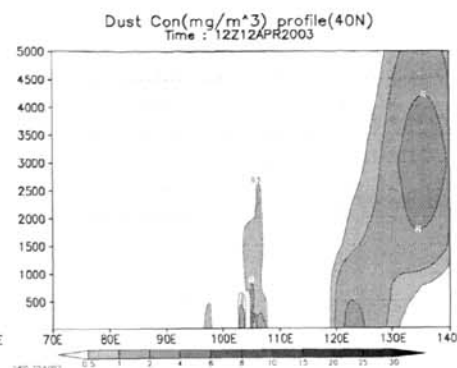


图 4.16 4 月 12 日 12 时 40° N 沙尘浓度
垂直剖面图

从上文分析可得北纬 40 度有一沙尘传输中心,在这一位置进行垂直剖面。从图 4.11 我们可以看到 4 月 9 日 12 时在东经 100 度左右沙尘暴爆发,沙尘墙从地面延伸到 5000 米左右高空,宽度在低空横跨东经 98 度到 106 度左右,越到高空宽度越小,宽度在 3000 米左右是一个转折点,缩小为横跨东经 100 到 102 度左右,浓度分布从 $16\text{mg}/\text{m}^3$ 到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,其中 0—1500 米沙尘浓度在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 左右,1500—3000 米高空 $8-4\text{mg}/\text{m}^3$ 3000 米高空以上则沙尘浓度较低,以 $2-0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 为主。从图 4.12 我们可以看到 4 月 10 日 00 时沙尘暴全面爆发,沙尘墙从地面延伸到 3500 米高空,宽度在低空横跨东经 98 度到 110 度左右,越到高空宽度越小,宽度在 1500 米和 3000 米高空都存在转折点,在 1500 米高空到 3000 米高空宽度有所缩小,但变化不是很明显,在 3000 米以上宽度突然变小,只横跨 103 到 104 经度。浓度分布从 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,其中 0—1500 米沙尘浓度在 $30-15\text{mg}/\text{m}^3$ 左右,1500—3000 米高空 $15-1\text{mg}/\text{m}^3$,3000 米高空以上则沙尘浓度很低,只有 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 左右。从图 4.13, 4.14 我们可以看到在 4 月 10



日 12 时到 4 月 11 日 00 时在东经 98 度到 120 度沙尘墙变宽,高度也延伸到 5000 米高空,宽度在低空横跨东经 98 度到 120 度左右,到高空宽度没有明显变小,基本还是维持在东经 100 到 118 度左右,浓度分布从 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,其中 0—1500 米沙尘浓度维持在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 左右,1500—3000 米高空 $10\text{—}30\text{mg}/\text{m}^3$,3000 米高空以上则沙尘浓度较低,主要为 $10\text{—}0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 左右。这一时期是沙尘暴全面爆发,并逐渐东移的阶段。从图 4.15 到图 4.16 我们可以看到 4 月 12 日 00 时到 12 时沙尘墙逐渐东移,浓度中心从 110 度移至 120 度,沙尘墙虽然还是从地面延伸到 5000 米高空,但浓度明显变稀,并分裂为两个,一个宽度在低空横跨东经 115 度到 130 度左右,越到高空宽度向东倾斜,主要是因为高空西风气流影响,沙尘浓度分布从 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,明显变稀,另一个在东经 100 度左右,而且维持在低空 0—1500 米,沙尘浓度在 $1\text{—}0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 左右。总之,在北纬 40 度附近沙尘墙爆发在 4 月 9 日 12 时,从东经 98 度开始并逐渐东移到 130 度左右,沙尘墙高度随着沙尘暴的全面爆发从 1500 米高空延伸到 3000 米高空,浓度最高达到 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 并基本维持在 1500 米以下位置,越到高空浓度越小。最后沙尘墙分化为两部分,且沙尘墙在高空受西风气流影响向东倾斜。

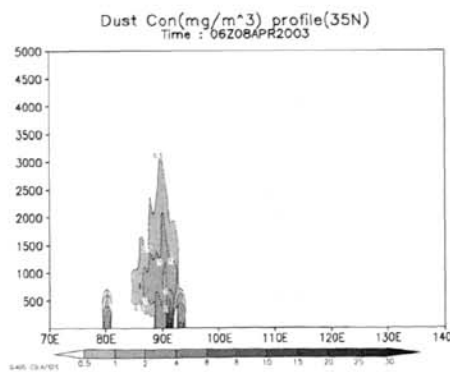


图 4.17 4 月 8 日 06 时 35°N 沙尘浓度
垂直剖面图

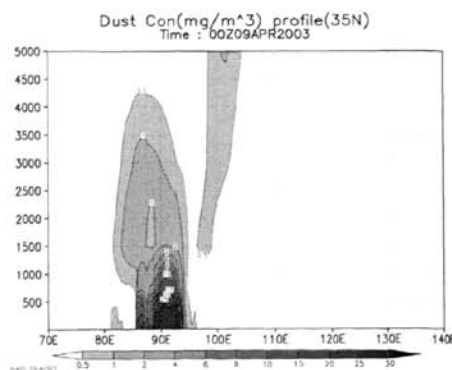


图 4.18 4 月 9 日 00 时 35°N 沙尘浓度
垂直剖面图

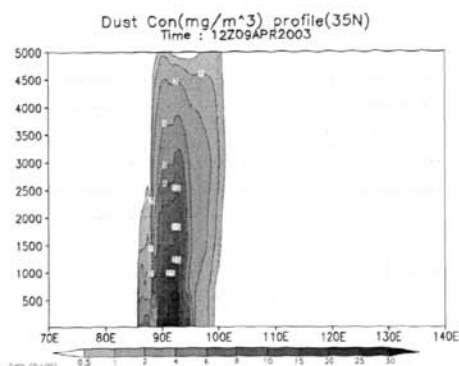


图 4.19 4 月 9 日 12 时 35° N 沙尘浓度
垂直剖面图

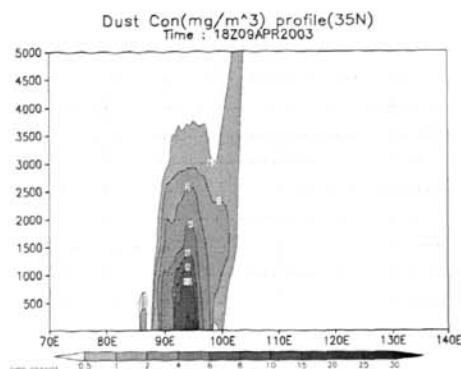


图 4.20 4 月 9 日 18 时 35° N 沙尘浓度
垂直剖面图

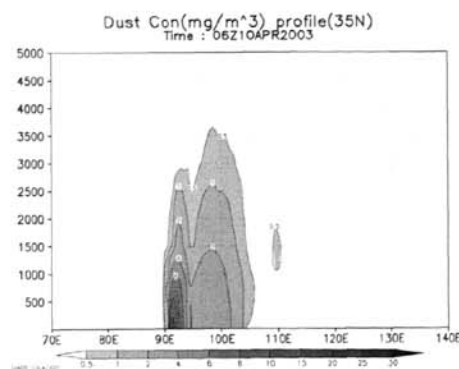


图 4.21 4 月 10 日 06 时 35° N 沙尘浓度
垂直剖面图

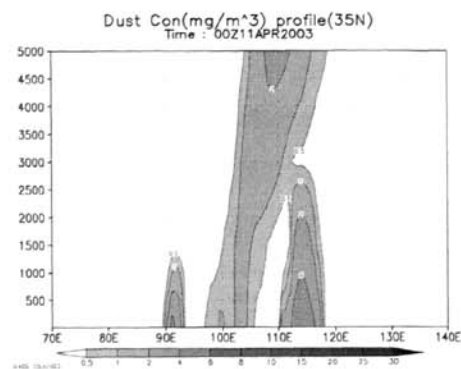


图 4.22 4 月 11 日 00 时 35° N 沙尘浓度
垂直剖面图

从上文分析可得在 35°N 左右也有一沙尘传输中心，在这一位置进行垂直剖面。从图 4.17 我们可以看到 4 月 8 日 06 时在东经 80—90 度左右沙尘暴爆发，沙尘墙从地面延伸到 3000 米左右高空，宽度在低空横跨东经 89 度到 92 度左右，到高空 1000 米宽度最大，横跨 85—92 度，浓度较低分布从 2mg/m^3 到 0.5mg/m^3 ，逐渐向高空递减。从图 4.18 我们可以看到 4 月 9 日 00 时在东经 85 度到 95 度沙尘暴全面爆发，沙尘墙从地面延伸到 4000 米高空，宽度在 1500 米高空最大，浓度分布主要集中在低空 500 米，最高为 25mg/m^3 ，其中 500—1500 米沙尘浓度在 $25-2\text{mg/m}^3$ 左右，1500—4000 米高空浓度为 $2-0.5\text{mg/m}^3$ 。从图 4.19, 4.20 我们可以看到在 4 月 9 日 12 时到 4 月 9 日 18 时沙尘墙东移至在东经 90 度到 110 度，高度也从地面延伸到 5000 米左右高空，宽度在低空横跨东经 85



度到 100 度左右, 到高空宽度没有明显变小, 基本还是维持在东经 88 到 108 度左右, 浓度分布从 $25\text{mg}/\text{m}^3$ 到 $0.5\text{ mg}/\text{m}^3$, 其中 0—1500 米沙尘浓度维持在 $25-20\text{ mg}/\text{m}^3$ 左右, 1500—3000 米高空 $20-6\text{ mg}/\text{m}^3$, 3000 米高空以上则沙尘浓度较低, 主要为 $6-0.5\text{ mg}/\text{m}^3$ 左右。沙尘浓度随时间的推移逐渐变小, 这一时期是沙尘暴全面爆发, 并逐渐东移, 同时浓度也逐渐减小。从图 4.21 到图 4.22 我们可以看到 4 月 10 日 06 时到 11 日 00 时沙尘浓度中心逐渐东移, 浓度中心从 110 度左右移至 120 度, 沙尘墙虽然还是从地面延伸到 5000 米高空, 但浓度明显变稀, 沙尘浓度在 $6-0.5\text{ mg}/\text{m}^3$ 左右, 并且在低层并不连续, 分裂为多个沙尘墙。总之, 在北纬 35 度附近沙尘墙爆发在 4 月 8 日 06 时, 爆发时间早于前一沙尘浓度中心, 从东经 85 度开始并逐渐东移到 115 度左右, 沙尘墙高度随着沙尘暴的全面爆发从 1500 米高空延伸到 3000 米高空, 浓度最高达到 $25\text{mg}/\text{m}^3$, 小于前一沙尘浓度中心, 并且浓度中心位置基本维持在 500 米以下位置, 明显低于前一沙尘浓度中心, 越到高空浓度越小。最后沙尘墙分化为多个部分, 且在高空受西风气流影响向东偏移。

4.5 小结

采用美国 NWS 为 NCEP 业务运行 FNL 数值预报模式提供的初始场资料, 利用 HSPLIT-4 传输, 扩散模式对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的强沙尘暴进行长距离输送的数值模拟研究, 并进行轨迹和浓度分析。研究结果表明:

- (1) 2003 年 4 月 9 日强沙尘暴过程的沙尘来源并非某一单一地区, 其中 73.3% 的降尘来源于短距离输送的临近的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠, 另外 26.7% 的降尘来源于长距离输送的塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠。
- (2) 此次沙尘暴长距离输送过程中, 主要有两个高浓度中心向东传输。一个在北纬 35 度附近, 爆发时间较早, 在 4 月 8 日 06 时左右, 主要在 1500m 以下传输, 最高浓度达 $25\text{mg}/\text{m}^3$, 1500~3000m 高空传输浓度维持在 $10-25\text{mg}/\text{m}^3$, 3000m 以上高空传输浓度很小, 维持在 $0.5-10\text{mg}/\text{m}^3$, 另一个在北纬 40 度附近, 爆发时间在 4 月 9 日 12 时左右且规模更大, 主要在 3000m 以下传输, 最高浓度达 $30\text{mg}/\text{m}^3$, 1500~3000m 高空传输浓度维持在 $10-25\text{mg}/\text{m}^3$, 3000m 以上高空传输浓度很小, 维持在 $0.5-10\text{mg}/\text{m}^3$ 后期两者合二为一, 在高空受西风气流影响, 沙尘墙向东倾斜。



第五章 2003 年 4 月沙尘暴事件天气过程分析

5.1 非静力中尺度数值模式及试验设计

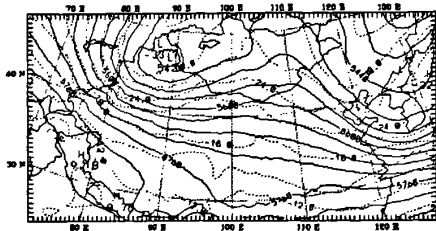
对于沙尘暴的模拟,中尺度气象背景场的描写是非常重要的。模拟系统采用美国 PSU/NCAR 发展的有限区域中尺度预报系统 MM5V3。MM5V3 已经广泛用于各种研究,它较成功地模拟了北太平洋和北大西洋上的爆发气旋,高原涡旋,西南涡及其引发的暴雨,强风暴和中尺度对流辐合体等。

模式计算具体设计为:采用一重水平网格非静力平衡框架,预报区域中心为 (40°N , 100°E),采用兰勃脱投影,水平网格为 91×46 ,水平格距为 60km ,垂直方向为 σ 坐标,取不等距的 23 层。时间积分步长取 180,预报时效是 168 小时,每 3 小时输出一次。采用侧边界条件为松弛/流入一流出,无上次边界条件。由于缺乏同化的站点数据,所以本次模拟没有做同化处理。主要物理过程为: Anthes-Kuo 积云参数化方案(基于水汽辐合,主要应用于较大的格点尺度 $>30\text{km}$ 。倾向于产生较多的对流降雨,较少的可分辨尺度降水,特定的加热廓线以及依赖于相对湿度的增湿廓线。); MRF PBL 高分辨 PBL 方案(或称为 Hong-Pan PBL,适用与高分辨率的 PBL 方案(如同 Blackadar 方案),该方案基于对混合 PBL 中反梯度项和 K 廓线的 Troen-Mahrt 描述,它与 NCEP MRF 模式中的实现过程类似。该方案也要调用 SLAB 程序并使 ISOIL=1。垂直扩散使用一个隐式方案以实现更大的时间步长); 辐射方案采用云辐射方案(该方案较复杂,它涉及长短波与显云和晴空之间的相互作用。该方案除了提供地面辐射通量外,也提供大气温度的倾向变化。该方案也许计算代价比较大,但是几乎没有什么内存需求); 地表温度方案采用 5 层土壤模式(使用垂直扩散方程预报 1, 2, 4, 8, 16cm 的温度,取其下底层固定的温度,热惯性和其他方案相同,但在垂直方向上分辨温度的日变化,从而加快了地面温度的反应速度。); 初估值资料从 NOAA 的 CDC(NOAA-CIRES 气候诊断中心)网上获得,采用了全球 NCEP/NCAR 气压层再分析数据。数据时间为 2003 年,每隔 6 小时输出一次,气压层有: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 共 17 层, 90°N - 90°S , 0°E - 357.5°E 范围内的 144×73 个点,分辨率是 2.5 经度 $\times 2.5$ 纬度, MM5 模式模拟输入的变量有以下五个: T, U, V, RH, HGT, PMSL, SST or TSEASFC or SKINTEMP。T 指空气温度, U 指水平风与格点相关的 U 分量, V 指水平风与格点相关的 V 分量, RH 指相当湿度, HGT 指地形高度, PMSL 指海平面气压, SST or TSEASFC or SKINTEMP 指海表面温度或地表温度。



5.2 2003 年 4 月沙尘暴高度温度要素分析

5.2.1 500mb 高度温度配置分析



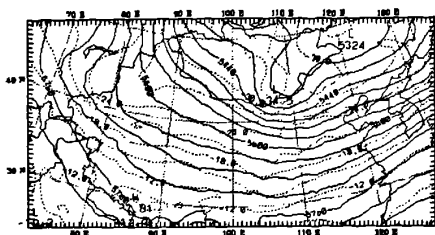


图 5.9 4 月 11 日 12 时 500mb 高度温度配置图

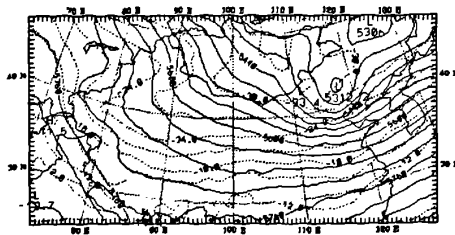


图 5.10 4 月 12 日 00 时 500mb 高度温度配置图

从上图 5.1 到图 5.10, 500mb 高度温度配置图中可以看出在 4 月 8 日 06 时, 在新疆乌鲁木齐附近有一冷低压形成, 低压中心为 5430 位势米, 低温中心为一 33°C , 低压槽位于 88°E 附近, 此时等温线与等压线相对平行, 大气处于相对稳定状态中。到 9 日 00 时, 低压中心为 5452 位势米, 已经移至 100°E 附近, 低温中心为一 32°C , 两者相差 5 个纬距, 虽然已经经过 18 小时, 但冷低压并没有明显减弱, 此时温度槽明显落后于低压槽, 并且低压槽明显向东北方向倾斜, 有可能发展成横槽, 此时等温线与等压线成一定交角, 在槽前 40°N , 96°E 附近有明显的冷平流即在甘肃内蒙, 新疆, 宁夏交界处这一带也就是沙尘暴发生地有明显的冷平流。在 4 月 9 日 06 时, 低压中心为 5433 位势米, 已经移至 105°E 附近, 低温中心为一 30°C , 冷低压没有明显减弱, 温度槽继续落后于低压槽, 槽前等温线与等压线交角变大, 在甘肃这一带斜压性增强, 同时在这一带等温线变密, 温度梯度增加, 地面可能有一冷锋过境。在 4 月 9 日 12 时, 低压中心为 5413 位势米, 已经移至 110°E 前方, 低温中心为一 31°C , 冷低压有所增强, 槽线横穿 100°E , 在槽线附近位置即沙尘暴发生的这一带在 500mb 上等温线继续保持密集状态, 所以在地面附近很可能存在锋区。在 4 月 9 日 18 时, 低压中心为 5397 位势米, 已经移至 110°E 附近, 低温中心为一 30°C , 继续停留在 100°E 附近, 此时等温线与等压线交角在槽前达到最大, 槽后有西北气流补充。在 4 月 10 日 00 时, 低压中心为 5371 位势米, 已经移过 110°E , 低温中心为一 30°C 停留在内蒙和蒙古的交界处, 横槽已经转换, 槽前等温线与等压线交角虽比前一时减小但仍存在说明存在强冷平流。在 4 月 10 日 15 时, 在新疆内蒙以北又出现一冷低压, 低压中心为 5329 位势米, 低温中心为一 37°C , 这一冷低压比前一冷低压强度更强, 在槽前等温线横穿等压线, 在我国北方大部分地区都存在冷平流, 在新疆大部分地区吹西北风, 我国北方大部分地区则盛行西风, 在这两个低压中间较为平直的西风气流有利于沙尘暴的长距离输送。在 4 月 11 日 00 时, 前一冷低压逐渐变弱, 后一低压逐渐东移, 低压中心为 5324 位势米, 低温中心为一 34°C , 在我国北方 100°E 至 120°E 一带西风气流相当平直, 有利于沙尘暴的长距离输送。在 4 月 11 日 12 时, 前一冷低压逐渐变弱并且并入后一低压, 并逐步东移。在 4 月 12 日 00 时, 冷低区逐步东移出海, 在北京一带等温线和等压线虽都较为密集, 但都比较平直, 有利于沙尘暴长距离输送, 整个过



程结束。

5.2.2 700mb 高度温度配置分析

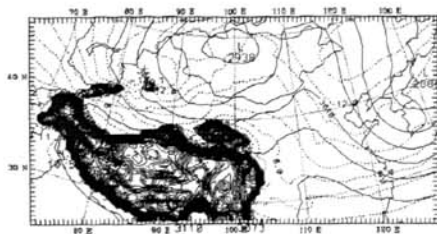


图 5.11 4 月 8 日 06 时 700mb 高度温度配置图

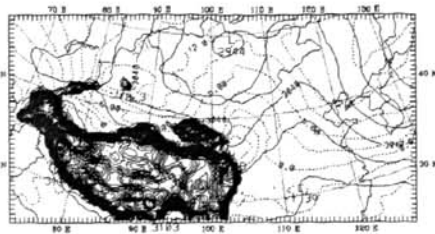


图 5.12 4 月 8 日 15 时 700mb 高度温度配置图

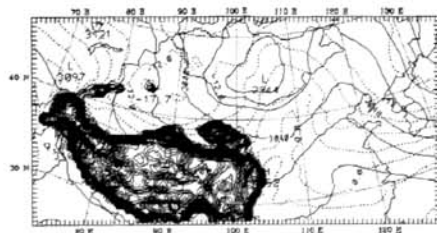


图 5.13 4 月 9 日 00 时 700mb 高度温度配置图

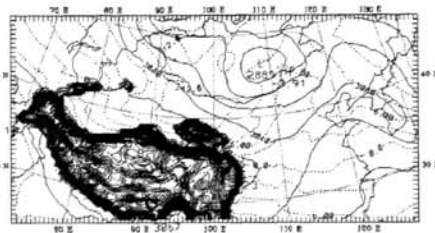


图 5.14 4 月 9 日 12 时 700mb 高度温度配置图

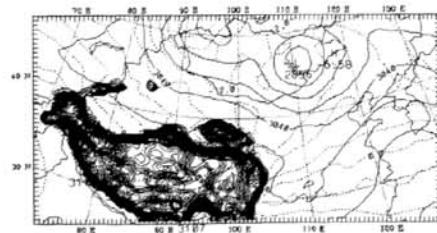


图 5.15 4 月 10 日 00 时 700mb 高度温度配置图

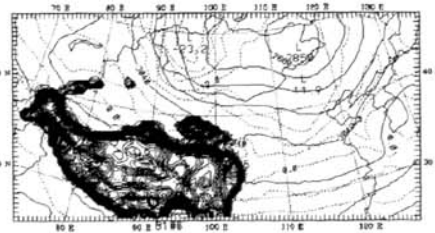


图 5.16 4 月 10 日 15 时 700mb 高度温度配置图

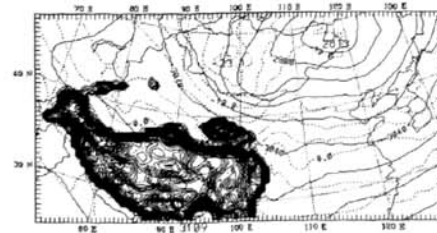


图 5.17 4 月 11 日 00 时 700mb 高度温度配置图

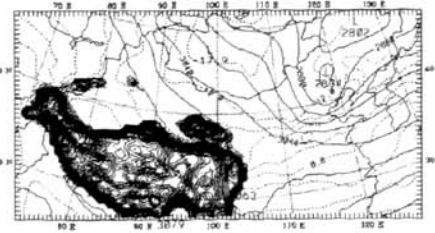


图 5.18 4 月 12 日 00 时 700mb 高度温度配置图

从上图 5.11 到图 5.18, 700mb 高度温度配置图中可以看出在 4 月 8 日 06 时, 在蒙古西北部有一冷低压中心, 低压中心最低气压为 2938 位势米, 而低温中心则停留在我国新疆西北部, 低温中心为 -18.5°C , 在新疆西北边界等温线

比较密集,所以估计在该区域存在冷锋,在我国新疆大部分地区等温线和等压线从呈现垂直状态,说明在这一地区有很强的冷平流,但同时在甘肃一带有较强的暖平流。到 4 月 8 号 15 时,蒙古西北部的冷低压中心略向东移,低压中心最低气压没有明显变化,低温中心还是停留在我国新疆西北部,在新疆西北边界等温线比较密集,冷锋依然存在,在我国新疆和甘肃交界处大部分地区等温线和等压线从呈现垂直状态,说明在这一地区冷平流很强,强冷空气南下,但同时在甘肃南部四川附近却有一暖中心存在,在 35°N , 105°E 附近地区却有暖平流。到 9 日 00 时,低压中心为 2944 位势米,已经移至 105°E 附近,低温中心为 -17.7°C ,还是停留在新疆中部,在 102°E 附近等温线和等压线继续呈现明显的垂直状态,在甘肃这一带也就是沙尘暴发生地有明显的冷平流,同时在 110°E 附近却存在一暖舌。在 4 月 9 日 12 时,低压中心为 2885 位势米,进一步加强,移至 110°E 附近,在低压槽前等温线垂直等压线,在沙尘暴发生区域有明显的冷平流补充,冷空气活动明显。在 4 月 10 日 00 时,低压中心为 2880 位势米,已经移至 110°E 前方,没有明显的低温中心,此时等压线已经逐渐趋向于平缓状态,有利于沙尘暴的长距离输送。冷平流也移动 110°E 附近。在 4 月 10 日 15 时,冷低压已经位于 115°E 附近,低压中心为 2850 位势米,又出现低温中心且明显落后于低压中心为 -23.2°C ,同时在河北一带等压线较为平直,有利于沙尘暴的长距离输送。在 4 月 11,12 日 00 时,冷低压中心已经移过 120°E ,低温中心也逐渐东移,在我国黄河下游大部分地区等压线和等温线都较为平直,在河北山西交界处,温度与气压梯度都较大,冷空气移至 115°E 附近。

5.2.3 200mb 高度温度配置分析

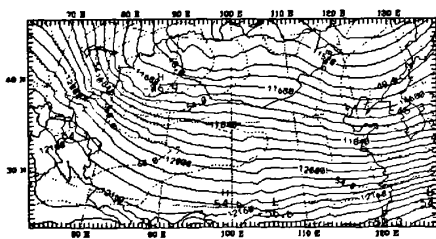


图 5.19 4 月 8 日 06 时 200mb 高度温度配置图

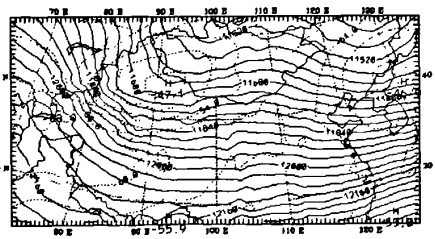


图 5.20 4 月 8 日 15 时 200mb 高度温度配置图

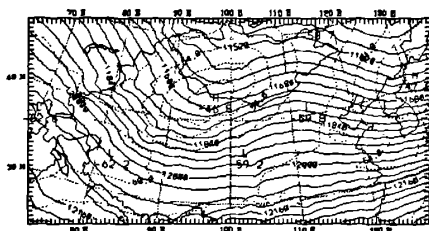


图 5.21 4 月 9 日 00 时 200mb 高度温度配置图

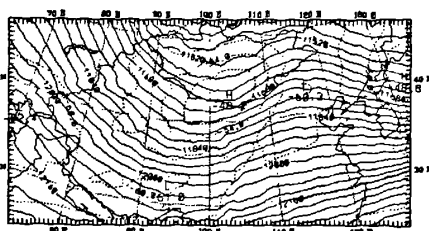


图 5.22 4 月 9 日 09 时 200mb 高度温度配置图

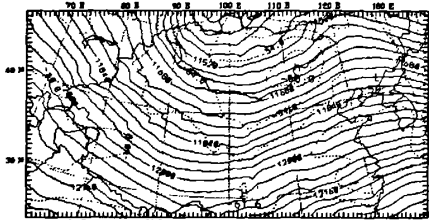


图 5.23 4 月 10 日 00 时 200mb 高度温度配置图

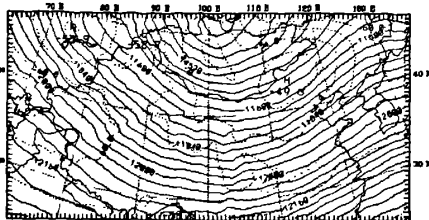


图 5.24 4 月 10 日 15 时 200mb 高度温度配置图

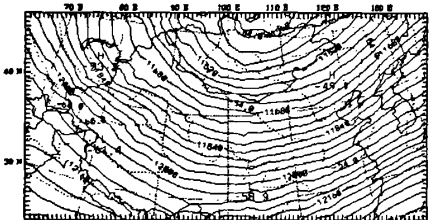


图 5.25 4 月 11 日 00 时 200mb 高度温度配置图

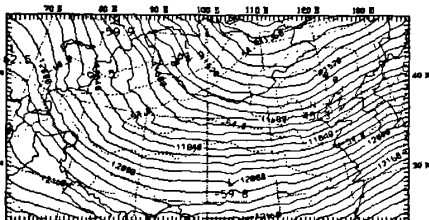


图 5.26 4 月 12 日 00 时 200mb 高度温度配置图

从上图 5.19 到图 5.26, 200mb 高度温度配置图中可以看出在 4 月 8 日 06 时, 在新疆西北边界等压线和等温线都较为密集, 梯度较大, 说明在这一区的高气压变化明显, 在新疆中部有一明显的高温中心, 高温中心为 -46.9°C , 在高空槽前等温线和等压线相交成一定角度, 在我国西北区有暖平流补充。到 4 月 8 号 15 时, 低压槽移入新疆西北边界, 等压线和等温线仍较为密集, 在新疆中部的高温中心也略有东移, 高温中心为 -47.1°C , 槽前仍为暖平流。到 9 日 00 时, 一低压槽移过 90°E 附近, 但移动速度缓慢, 与之相匹配的仍为一高温中心, 高温中心为 -46.8°C , 槽后由于等温线和等压线成直角, 有很强的冷平流入侵我国西北。在 4 月 9 日 09 时, 低压槽移过 100°E 附近, 但移动速度缓慢, 槽后仍为较强的冷平流。大形势没有明显变化。在 4 月 10 日 00 时, 15 时和 4 月 11 号 00 时, 高空形势变化不大, 低压槽继续东移, 高温中心为 -50.0°C 或较小, 等压线趋向于平缓状态, 有利于沙尘暴的长距离输送, 等温线虽然和等压线有一定角度的相交, 但是较为稀疏, 所以平流不明显。在 4 月 12 日 00 时, 在河北地区一带等压线相当平直, 高空的高温中心位于北京地区附近, 进一步减弱



为 -45.3°C , 高空盛行西风。整个过程结束。

5.3 2003 年 4 月沙尘暴风场分析

5.3.1 700mb 风场分析

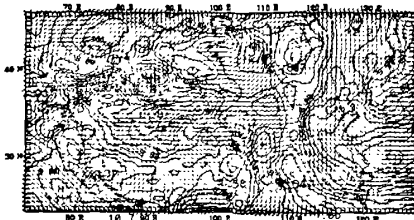


图 5.27 4 月 8 日 06 时 700mb 风场图



图 5.28 4 月 8 日 09 时 700mb 风场图

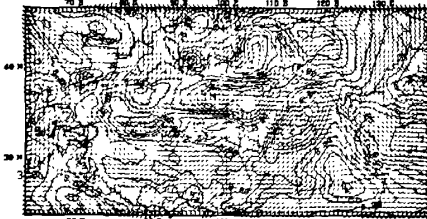


图 5.29 4 月 9 日 00 时 700mb 风场图

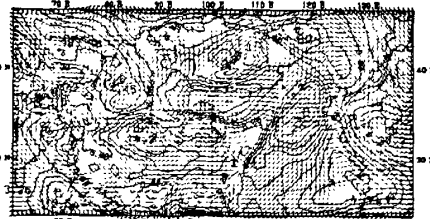


图 5.30 4 月 9 日 06 时 700mb 风场图

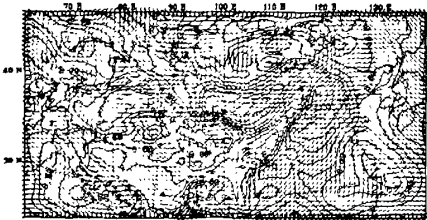


图 5.31 4 月 9 日 12 时 700mb 风场图

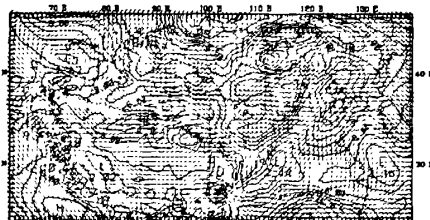


图 5.32 4 月 10 日 00 时 700mb 风场图



图 5.33 4 月 11 日 00 时 700mb 风场图



图 5.34 4 月 12 日 00 时 700mb 风场图

图 5.27 到图 5.34 是 700mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的风速和风矢量配置图。在 4 月 8 日 06 时, 在新疆北部有较强的西北气流入侵, 说明有较强的冷空气入侵; 在新疆中部有一低压中心, 在新疆西北边界有一明显的切变。在 4



月 8 日 09 时, 在新疆北部的西北气流控制中, 在塔克拉玛干沙漠东北部的西风气流则向西传输, 为沙尘暴的长距离输送提供良好的环流场, 同时在甘肃一带由西风转为西南风, 使这一区在冷空气来临之前温度上升。在 4 月 9 日 00 时, 在新疆北部西北气流已经转为北风, 在 $100^{\circ} - 110^{\circ} \text{ E}$, 45° N 附近存在一个明显的局地辐合, 根据前面的分析可知这是一个冷涡。在甘肃一带仍为较强的西风控制。在 4 月 9 日 06 时, 在新疆北部转为西北气流, 冷涡移动到 108° E , 45° N 附近。在甘肃一带仍为较强的西风控制, 为沙尘暴的长距离输送提供良好的环流场背景。在 4 月 9 日 12 时, 冷涡继续停留在原位置, 与 06 时变化不大。在 4 月 10 日 00 时, 冷涡移动到 110° E , 45° N 附近, 强大的西风气流稳定控制山西一带, 为沙尘暴的长距离输送提供了良好的背景场。在 4 月 11 日 00 时, 冷涡逐渐向东北方向移动, 山西一带的西风气流减弱, 同时在甘肃一带西风气流却加强, 这为沙尘暴的长距离输送创造了良好的风场条件。在 4 月 12 日 00 时, 我国北风大部分地区转为西北气流, 在 120° E , 40° N 存在明显的风切变。

5.3.2 500mb 风场分析

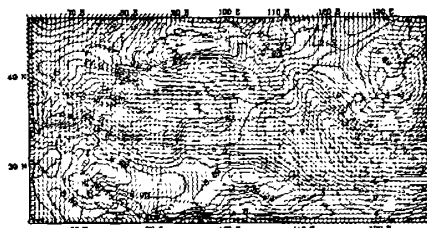


图 5.35 4 月 8 日 03 时 500mb 风场图

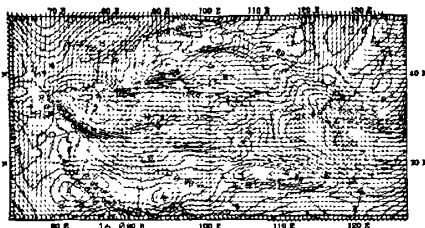


图 5.36 4 月 8 日 12 时 500mb 风场图

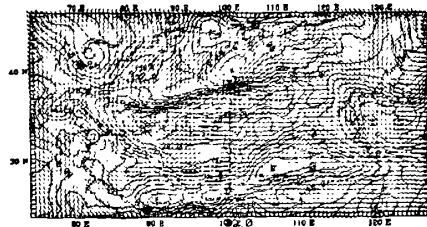


图 5.37 4 月 9 日 00 时 500mb 风场图

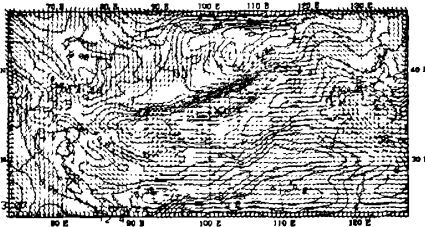


图 5.38 4 月 9 日 06 时 500mb 风场图

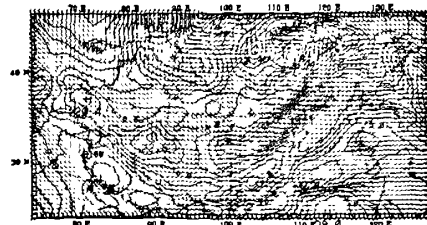


图 5.39 4 月 10 日 00 时 500mb 风场图

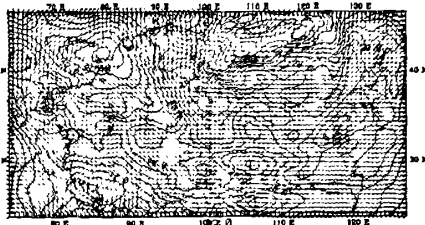


图 5.40 4 月 11 日 00 时 500mb 风场图



图 5.35 到图 5.40 是 500mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的风速和风矢量配置图。在 4 月 8 日 03 时, 在 90°E , 43°N 存在一明显的涡旋气流, 根据上面对 700mb 的分析可见这一冷涡系统一直延伸到 500mb。在新疆西北边界有较强的西北气流入侵, 同时在塔克拉玛干沙漠大部分地区有较强的西风气流。在 4 月 8 日 12 时, 在新疆东部甘肃北部这一大片区域存在强大的西北气流, 为沙尘暴的长距离输送提供的良好的环流场。在 4 月 9 日 00 时, 在新疆北部西北气流已经转为北风, 在甘肃内蒙边界一带有一支强风速区, 很有可能存在急流。4 月 9 日 06 时强风速区在 105°E , 43°N 附近, 在其下方也存在一风速密集区, 这一区即沙尘暴发生区。在 4 月 10 日 00 时, 这一强西风带已经移动到山西附近并且由西北风转为西南风, 在甘肃大部分地区有稳定的西风气流, 为沙尘暴的长距离输送提供了良好的背景场。在 4 月 11 日 00 时, 新疆东北部有一西北气流南下, 在我国北方其他地区普遍受西风气流控制, 这为沙尘暴的长距离输送提供了稳定的背景场。

5.3.3 200mb 风场分析



图 5.41 4 月 8 日 00 时 200mb 风场图

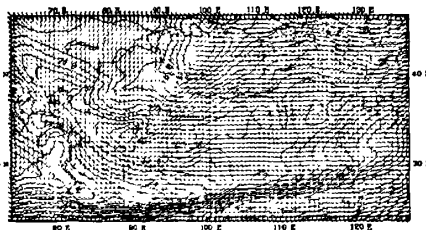


图 5.42 4 月 9 日 00 时 200mb 风场图

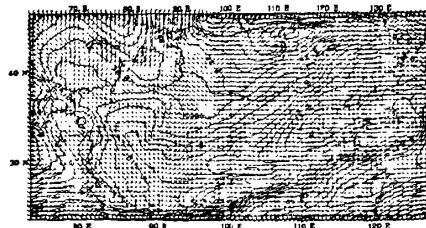


图 5.43 4 月 10 日 00 时 200mb 风场图

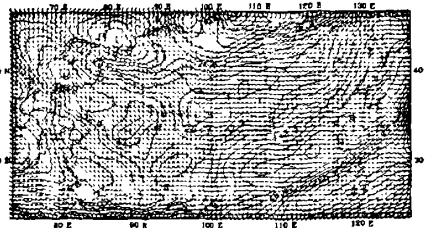


图 5.44 4 月 11 日 00 时 200mb 风场图

图 5.41 到图 5.44 是 200mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的风速和风矢量配置图。在 4 月 8 日 00 时, 在新疆西北边界有较强的西北气流入侵, 风速最大达到 10m/s 以上, 同时在我国西北部基本都在西风气流的控制下。在 4 月 9 日 00 时, 在新疆与甘肃交界处有一明显的风切变, 从西北风切变到西南风, 在切变位置下方风速很大, 最大风速达到 10m/s 以上。在 4 月 10 日 00 时, 我国西北部

分地区都控制在平直的西风气流之下,有利于沙尘暴在高空的长距离输送。在 4 月 11 日 00 时,我国西北大部分地区都控制在平直的西风气流之下,而且风速明显大于 10 日 00 时,非常有利于沙尘暴的长距离输送。

5.3.4 700mbU 分量分析

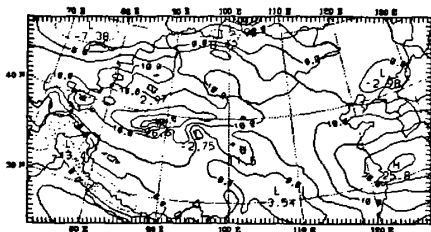


图 5.45 4 月 8 日 00 时 700mbU 分量图

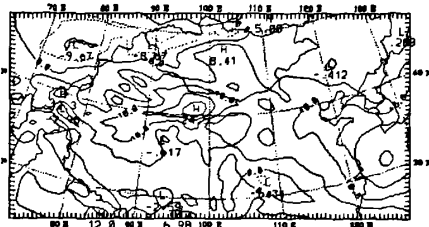


图 5.46 4 月 8 日 12 时 700mbU 分量图

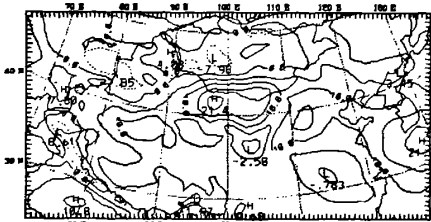


图 5.47 4 月 9 日 00 时 700mbU 分量图

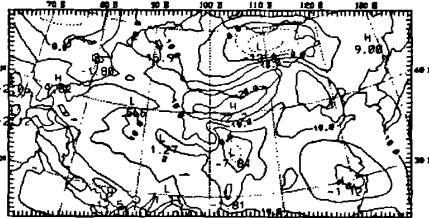


图 5.48 4 月 9 日 12 时 700mbU 分量图

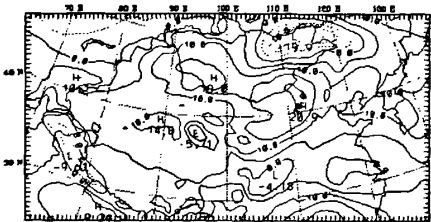


图 5.49 4 月 10 日 00 时 700mbU 分量图

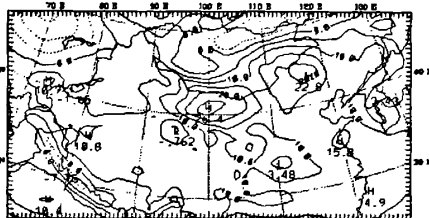


图 5.50 4 月 11 日 00 时 700mbU 分量图

图 5.45 到图 5.50 是 700mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的 U 分量要素图。在 4 月 8 日 00 时,在新疆中部有一 U 分量的高值区,最大风速达到 26.6m/s,同时在其东面有一弱的东风分量,说明在该时刻在该地区附近有辐合发生,有利于沙尘暴的起沙。在 4 月 8 日 12 时,该强风速中心已经移至新疆和甘肃的交界处,中心最大风速达到 24m/s,在其西南面有一弱的东风分量。在 4 月 9 日 00 时,强风速区停留在原位,中心最大风速达到 21.4m/s,在这一强风速中心的北面 and 东南面分别存在一个东风地带,所以在其南北都存在风速切变,在 $100^{\circ}\text{E}40^{\circ}\text{N}$ 附近有一辐合存在,可能有利于沙尘暴的起沙。在 4 月 9 日 12 时,这一强风速带继续东移,中心最大风速达到 22.2m/s,在 $100^{\circ}\text{E}38^{\circ}\text{N}$ 附近有一辐合存在,可能有利于沙尘暴的起沙。在 4 月 10 日 00 时,这一强风速带继续东移过 110°



E, 并且我国北方大部分地区都在西风气流的控制之下, 这种环流形势有利于沙尘暴的长距离输送。在 4 月 11 日 00 时, 在 100° E 附近又出现一西风强风速区, 北方大部分地区都处于西风气流控制之下, 有利于沙尘暴的长距离输送。

5.3.5 500mbU 分量分析

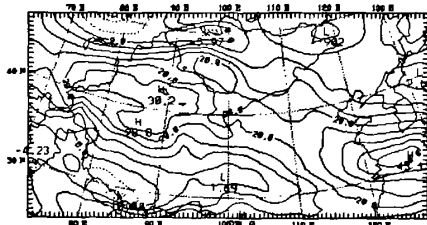


图 5.51 4 月 8 日 00 时 500mbU 分量图

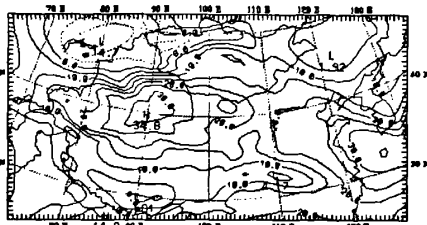


图 5.52 4 月 8 日 12 时 500mbU 分量图

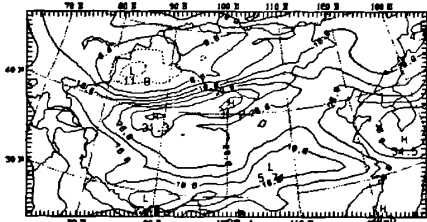


图 5.53 4 月 9 日 00 时 500mbU 分量图

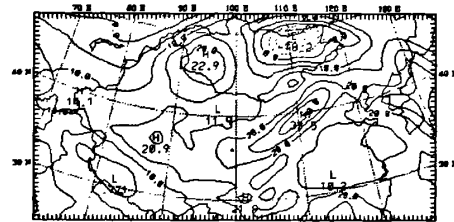


图 5.54 4 月 10 日 00 时 500mbU 分量图

图 5.51 到图 5.54 是 500mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的 U 分量要素图。在 4 月 8 日 00 时, 在新疆中部有一 U 分量的高值区, 最大风速达到 30.2m/s , 说明在高空盛行西风。在 4 月 8 日 12 时, 该强风速中心继续停留在新疆中南部, 中心最大风速达到 34.8m/s 。在新疆北部风速梯度较大, 在贝湖附近有一强东风带, 两个风速带之间有强风切变。在 4 月 9 日 00 时, 强东风区逐渐南移, 已经进入我国新疆北部, 风切变区南压, 在新疆内蒙交界处和甘肃北部存在狭长的风速切变, 梯度较大, 这一区的风速切变为沙尘暴的起沙提供了良好的条件。在 4 月 10 日 00 时, 这一强风速带继续东移过到山西一带, 中心最大风速达到 33.5m/s , 且北方大部分地区处于西风控制之下。

5.3.6 200mbU 分量分析

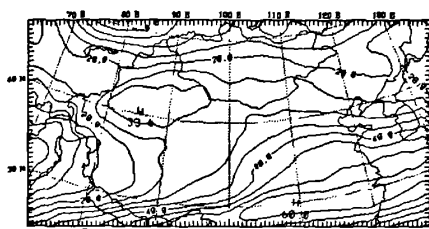


图 5.55 4 月 8 日 00 时 200mbU 分量图

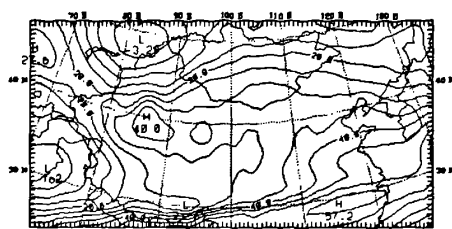


图 5.56 4 月 8 日 12 时 200mbU 分量图

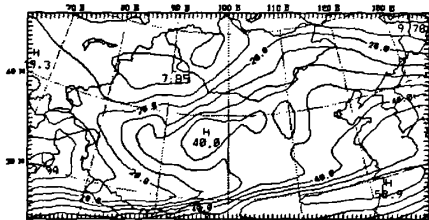


图 5.57 4 月 9 日 00 时 200mbU 分量图

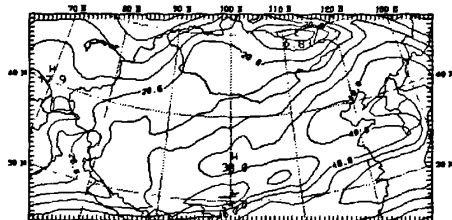


图 5.58 4 月 10 日 00 时 200mbU 分量图

图 5.55 到图 5.58 是 200mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的 U 分量要素图。在 4 月 8 日 00 时, 我国北方大部分地区都控制在稳定的西风气流中, 最大风速区在我国新疆地区达到 33.6m/s。在 4 月 8 日 12 时, 这一区的风速明显增强, 中心最大风速达到 40.0m/s。在贝湖附近有一强东风带, 两个风速带之间有强风切变, 而且在新疆北部风速梯度较大。在 4 月 9 日 00 时, 强东风区逐渐南移, 已经进入我国新疆北部, 风切变区南压, 在新疆内蒙交界处和甘肃北部存在狭长的风速切变且梯度较大, 为沙尘暴的起沙提供了良好的条件。在 4 月 10 日 00 时, 我国北方大部分地区已经恢复平直的西风控制, 有利于沙尘暴的长距离输送。

5.3.7 700mbW 分量分析

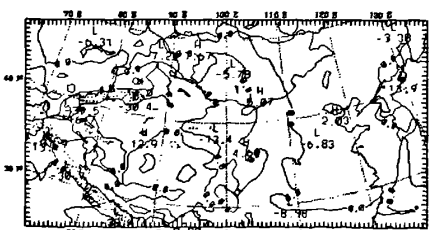


图 5.59 4 月 8 日 00 时 700mbW 分量图

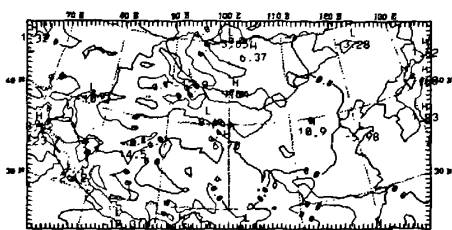


图 5.60 4 月 9 日 00 时 700mbW 分量图

图 5.59 和图 5.60 是 700mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的 W 分量要素图。在 4 月 8 日 00 时, 在我国新疆境内塔克拉玛干沙漠位置有一高 W 分量区, 说明在这一地区有很强的上升气流, 同时在这一中心西北方有一负的 W 分量区, 说明在这一地区这一时刻有一较强的局地环流, 这为沙源地区的起沙提供良好的背

景。在 4 月 9 日 00 时, 在甘肃北部同样存在这一对正负 ω 值区, 最大上升气流风速为 6.70m/s , 其西北面的下沉气流最大风速达到 -8.66m/s , 说明在这一地区这一时刻有一较强的局地环流, 这为沙源地区的起沙提供良好的背景场。这两个时刻的两个局地环流分别对应两个源区的起沙。

5.4 2003 年 4 月沙尘暴涡度散度分析

5.4.1 700mb 涡度分析

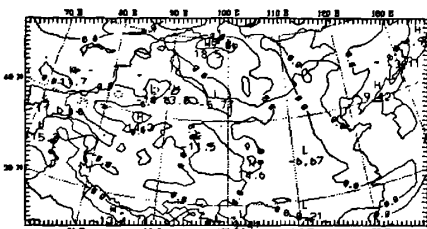


图 5.61 4 月 8 日 00 时 700mb 涡度图

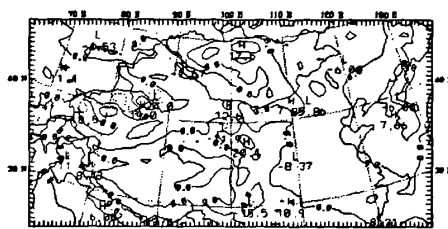


图 5.62 4 月 8 日 12 时 700mb 涡度图

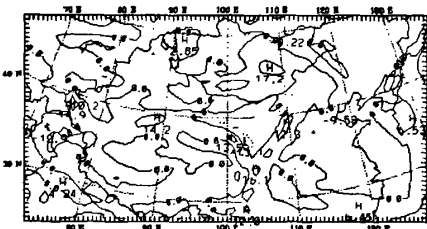


图 5.63 4 月 9 日 06 时 700mb 涡度图

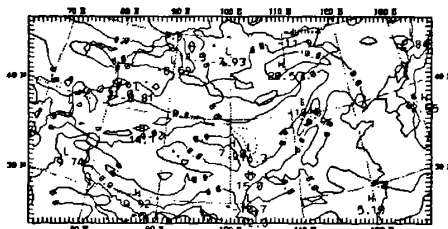


图 5.64 4 月 9 日 15 时 700mb 涡度图

图 5.61 到图 5.64 是 700mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的涡度要素图。在 4 月 8 日 00 时, 在我国新疆境内塔克拉玛干沙漠位置有一高涡度区, 说明在这一区域这一时刻存在强烈的辐合, 同时注意到在这一区域的北部有一负涡度区, 区域中心值与高涡度区域中心值大小差不多, 说明在这一地区有很强的辐合辐散存在, 有利于沙尘暴的起沙。在 4 月 8 日 12 时, 在我国新疆境内塔克拉玛干沙漠位置的高涡度区略有北移, 在这个高涡度区的左右分别有一低涡度区, 说明在这一区域存在强烈的辐合辐散, 同时注意到在 $100^{\circ}\text{E}, 40^{\circ}\text{N}$ 这一地点附近有一负涡度区, 其南北各有一高涡度中心, 说明在这一地区也有很强的辐合辐散存在, 有利于沙尘暴的起沙。这两个地区和前文推测的沙源位置相匹配。在 4 月 9 日 06 时, 在在 $100^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N}$ 这一地点附近存在一正涡度中心和负涡度中心, 中心最大值分别为 $+13.5 (10^{*}5/\text{s})$, $-13.5 (10^{*}5/\text{s})$, 说明在这一地区有强烈的辐合辐散, 这很可能是引起沙尘暴低层起沙的原因。在 4 月 9 日 15 时, 在在 $110^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N}$ 这一地点的正涡度中心和负涡度中心仍停留在原地, 中心最大值分别



为 $+7.68 (10^{**5}/s)$, $-16.3 (10^{**5}/s)$, 说明在这一地区仍有强烈的辐合辐散, 有利于沙尘暴的发生发展。

5.4.2 2003 年 4 月沙尘暴 500mb 散度分析

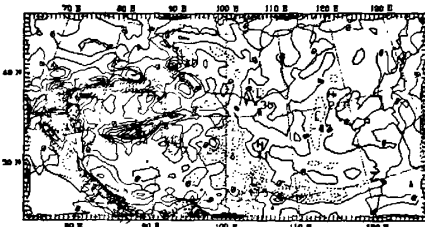


图 5.65 4 月 8 日 00 时 500mb 散度图

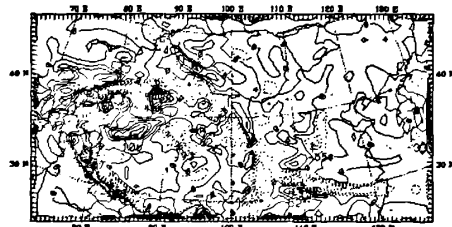


图 5.66 4 月 8 日 12 时 500mb 散度图

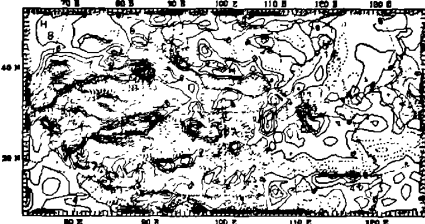


图 5.67 4 月 9 日 00 时 500mb 散度图

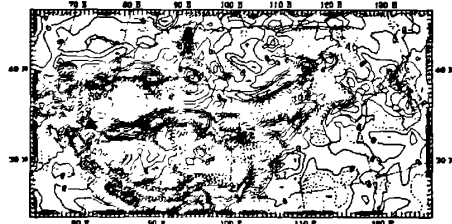


图 5.68 4 月 9 日 12 时 500mb 散度图

图 5.65 到图 5.68 是 500mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的散度要素图。在 4 月 8 日 00 时, 在我国新疆境内塔克拉玛干沙漠位置的北部有一高负散度区, 说明在这一区域 500mb 层该时刻存在强烈的辐合, 南部有一高散度区, 说明在这一区域 500mb 层该时刻存在强烈的辐散, 这与 700mb 层相配合, 所以该垂直系统是向南倾斜的, 有利于沙尘暴的起沙。在 4 月 8 日 12 时, 在我国新疆境内塔克拉玛干沙漠位置约 $82^{\circ} E, 40^{\circ} N$ 位置有一高辐散中心, 在这一高散度区左右各有一个辐合中心, 说明这一系统即使在 500mb 辐合辐散还是很剧烈, 系统深远, 有利于沙尘暴的爆发。同时在 $100^{\circ} E, 40^{\circ}$ 这一个位置也就是另一沙源的位置有一明显的辐散, 与地面的辐合相匹配。这两个地区和前文推测的沙源位置相符合。在 4 月 9 日 00 时, 在 $100^{\circ} E, 37^{\circ} N$ 这一地点附近存在一正散度中心和负散度中心, 而且梯度较为密集, 说明在这一地区有强烈的辐合辐散, 这推断是沙尘暴低层起沙的高空配置。在 4 月 9 日 12 时, 在 $95^{\circ} E, 37^{\circ} N$ 这一地点为正散度中心, 这一散度中心右边有一大片负散度区, 说明在起沙时刻这一地区有强烈的辐合辐散, 有利于沙尘暴的形成。

5.5 2003 年 4 月沙尘暴湿度分析

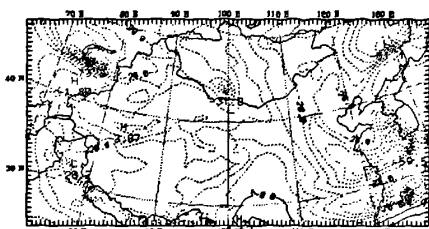


图 5.69 4 月 8 日 00 时 700mb 露点温度图

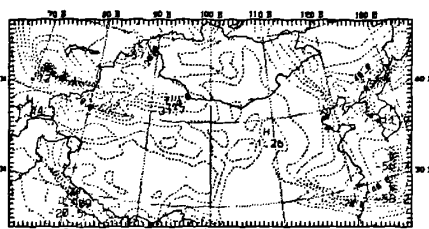


图 5.70 4 月 8 日 18 时 700mb 露点温度图

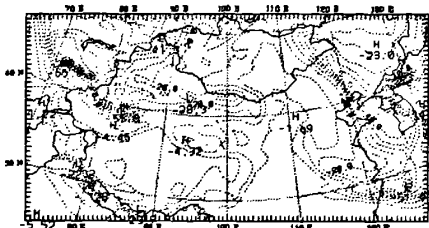


图 5.71 4 月 9 日 00 时 700mb 露点温度图

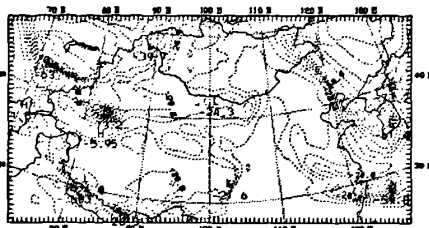


图 5.72 4 月 9 日 03 时 700mb 露点温度图

图 5.69 到图 5.72 是 700mb 层在 4 月 9 日沙尘暴发生前后的露点温度图。露点温度指保持空气中的水气含量不变,而使之降低温度,当水气因降温而达饱和时之温度,即为露点温度。露点温度也可用来表示水气含量的多寡,露点温度愈高,则表示空气中水气含量愈多。在 4 月 8 日 00 时,在我国新疆境内塔克拉玛干沙漠位置露点温度较高为 -3.87°C ,说明在这一区域沙尘暴发生之前水汽较为充沛,同时在 100°E , 42°N 位置有一低值区,较为干燥。在 4 月 8 日 18 时,在我国新疆境内大部分地区都处于露点温度的低值区,说明此时天气相对干燥,使得地表的沙土疏松,有利于沙尘暴的起沙。在 4 月 9 日 00 时,在新疆北部,内蒙西北部已经甘肃北部一带都处于低露点温度带中,在新疆西部最低露点温度达到 -55.8°C ,而在甘肃一带达 -28.3°C 。这一地区在一段时间内天气都相对干燥,有利于地表的沙尘颗粒扬起。在 4 月 9 日 03 时,在新疆北部,内蒙西北部已经甘肃北部一带都处于低露点温度带中,在新疆西部最低露点温度达到 -73.2°C ,而在甘肃一带达 -24.3°C 。这一地区持续干燥,有利于沙尘暴的发生和它在高空的输送。

5.6 小结

采用从 NOAA 的 CDC (NOAA-CIRES 气候诊断中心) 网上获得的全球 NCEP/NCAR 气压层再分析数据,利用美国 PSU/NCAR 发展的有限区域中尺度预报系统 MM5V3,对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的沙尘暴事件进行天气模拟。得到结论如下:



- (1) 在 4 月 9 日左右沙尘暴发生时, 在高空 500mb 有一冷低压入侵我国西北部, 强大的冷平流导致强劲的西北冷空气源源不断地输入我国西北境内。地面冷空气在 500mb 西北气流引导下倾入我国形成大风, 有利于沙尘暴的起沙。地面有一明显的冷涡发展并自西向东移动。在沙尘暴发生的附近存在明显的辐合辐散。
- (2) 在 4 月 9 日前后沙尘暴发生时, 两个沙尘暴的源区塔克拉玛干沙漠, 巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠附近都存在露点温度的低值区, 说明在沙尘暴发生前这些地方都非常干燥。
- (3) 在 4 月 10 日, 11 日, 12 日我国北方大部分地区高空处于平直的西风气流, 这有利于沙尘暴高空的长距离输送。



第六章 总结

在中国北方频繁发生的沙尘暴引起了国内和国际的关注,沙尘暴已经成为一个重要的地球环境问题。对沙尘暴的研究势在必行,我们虽然位于江南地区,受沙尘暴的影响不大,但是对待天气气候应从全球着眼,研究我国北方的沙尘暴事件意义重大。

本文首先采用美国 NWS 为 NCEP 业务运行 FNL 数值预报模式提供的初始场资料,利用 HSPLIT-4 传输,扩散模式对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的强沙尘暴进行长距离输送的数值模拟研究,并进行轨迹和浓度分析。然后采用从 NOAA 的 CDC(NOAA-CIRES 气候诊断中心)网上获得的全球 NCEP/NCAR 气压层再分析数据,利用美国 PSU/NCAR 发展的有限区域中尺度预报系统 MM5V3,对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的沙尘暴事件进行天气模拟。研究结果表明:

- (1) 2003 年 4 月 9 日强沙尘暴过程的沙尘来源并非某一单一地区,其中 73.3% 的降尘来源于短距离输送的临近的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,另外 26.7% 的降尘来源于长距离输送的塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠。
- (2) 此次沙尘暴长距离输送过程中,主要有两个高浓度中心向东传输。一个在北纬 35 度附近,爆发时间较早,在 4 月 8 日 06 时左右,主要在 1500m 以下传输,最高浓度达 $25\text{mg}/\text{m}^3$, 1500~3000m 高空传输浓度维持在 $10-25\text{mg}/\text{m}^3$, 3000m 以上高空传输浓度很小,维持在 $0.5-10\text{mg}/\text{m}^3$, 另一个在北纬 40 度附近,爆发时间在 4 月 9 日 12 时左右且规模更大,主要在 3000m 以下传输,最高浓度达 $30\text{mg}/\text{m}^3$, 1500~3000m 高空传输浓度维持在 $10-25\text{mg}/\text{m}^3$, 3000m 以上高空传输浓度很小,维持在 $0.5-10\text{mg}/\text{m}^3$ 后期两者合二为一。在高空受西风气流影响,沙尘墙向东倾斜。
- (3) 在 4 月 9 日左右沙尘暴发生时,在高空 500mb 有一冷低压入侵我国西北部,强大的冷平流导致强劲的西北冷空气源源不断地输入我国西北境内。地面冷空气在 500mb 西北气流引导下倾入我国形成大风,有利于沙尘暴的起沙。地面有一明显的冷涡发展并自西向东移动。在沙尘暴发生的附近存在明显的辐合辐散。
- (4) 在 4 月 9 日前后沙尘暴发生时,两个沙尘暴的源区塔克拉玛干沙漠,巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠附近都存在露点温度的低值区,说明在沙尘暴发生前这些地方都非常干燥。
- (5) 在 4 月 10 日, 11 日, 12 日我国北方大部分地区高空处于平直的西风气流,这有利于沙尘暴高空的长距离输送。



最后需要指出的是,在这次数值模拟过程中使用地形资料精度较低,在确定沙尘起源地区时有一定误差。要解决这一误差,要求提高地形资料精度,确定沙区位置需要更为精确的 GIS 数据。同时在 MM5V3 模拟过程中由于格距较大,可能遗漏小尺度天气系统,而这些系统也可能是引发沙尘暴发生的原因。沙尘暴发生到它的长距离输送整个过程是非常复杂的物理化学过程,它涉及到沙尘粒子的物理,化学性质,以及输送过程中的碰并,分解等过程,本文对这些过程都做忽略处理。由于探空资料与站点资料的缺乏,MM5 模拟过程中没有进行数据同化,这也给天气系统的模拟造成一定的误差。但是对于沙尘暴发生轨迹的推测,长距离输送过程中浓度的变化和在整个过程中天气情况的分析还是很有意义的,对以后沙尘暴的长距离输送研究有一定的参考价值。



致 谢

本论文是在导师谭季清副教授的悉心指导下完成的。从论文的选题，工作的展开，结果的分析到论文的撰写，谭老师都给予了重要的指点。在这里谨先向谭老师致以最真诚的感谢。三年来，跟随谭老师共同走过的道路上始终充满着理解和支持。正是在谭老师的悉心指导下，使我的科研水平有了一定的提高。

感谢高坤教授，汤燕冰副教授在多年的学习生活中给予的帮助和指导，同时也要感谢邓素清老师等，感谢实验室各位同学，特别是孙长，甘晶晶，于跃飞等同学在工作中提供的帮助和支持，在生活中提供的关心和照顾。

此外，感谢美国空气资源实验室提供的模式和数据，给作者带来了极大的帮助。

最后感谢我的家人多年来给我的生活上和精神上的支持和理解，没有他们作为强大的后盾，就不会有我今天的一切。

本课题可到了国际自然科学基金（项目编号：107404—N10332；项目名称：非连续性污染物长距离输送的数值模拟研究；项目负责人：谭季清副教授；项目起止时间：2004.9—2005.9）的资助，向参加论文评阅和答辩的各位专家，教授致以崇高的敬意和诚挚的感谢。

戚丹青

2006 年 2 月



参 考 文 献

1. 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
2. Hankin, E. H., On dust raining wind sad descending currents, J. India. Met, Memoirs, 1921, 22(1), Part VL
3. Idso, S. B., R. S. Ingram, and J. M. Pritchard, An Amercian Haboob, Bull, AMS, 1972, 50 (2), 930-935
4. Josepl, P. V., D. K. Raipal, and S. N. Deka, " Andhi ", the convective dust storms of Northwest India, J. Mausam, 1980, 31 (1), 431-442
5. Brazel, A. J., and W. C. Nicking, The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona, J. Climatology, 1986, 6 (3), 255-275
6. Jauregui E., The dust storm of Mexico City, J. Climatology, 1989, 9 (2), 169-180
7. 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
8. Schutz L. Saharan Dust Transport in the NE-TradeWind Region Over the North Atlantic Ocean. In: Proc. Sym. Radiatom. 1977. 5 (1): 68-70
9. Westphal, Toon O B, Carlson T N. A Two-Dimension Numerical Investigation of the Dynamics and Microphysics of Saharan Dust storm. Journal of Geophysical Research, 1987, 92 (3): 3027-3049
10. Westphal, Toon O B, Carlson T N. A Case Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust. Journal of Atmospheric Science, 1988, 4 (5): 2145-2175
11. Shao, Y. P., M. Raupach, and D. short, Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Dar-ling Basin, Aust. J. Aiol Res., 1994, 3 (4), 309-342
12. Shao, Y. P., and M. Leslie, Wind erosion prediction over the Australian continent, J. Geophys. Res., 1997., 102 (D25), 30091-30105
13. Marticotena, B., G. Bergametti et al., Modeling the atmospheric dust cycle, Part2: Simulation of Saharan dust sources, J Geophys. Res., 1997, 102 (D4), 4387-4404
14. Joseph M. Prospero and Peter J. Lamb African Droughts and Dust Transport to the Caribbean: Climate Change Implications *Science* 7 November 2003 30 (2): 1024-1027



15. T. D. Jickells, Z. S. An, K. K. Andersen, A. R. Baker, G. Bergametti, N. Brooks, J. J. Cao, P. W. Boyd, R. A. Duce, K. A. Hunter, H. Kawahata, N. Kubilay, J. laRoche, P. S. Liss, N. Mahowald, J. M. Prospero, A. J. Ridgwell, I. Tegen, and R. Torres (2005). Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science* 30(8): 67-71
16. 张德二, 1984, 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析, 中国科学(B 辑), 23, 2, 278—288.
17. 石广玉, 中国—黄沙的大陆, 《黄沙》, 日本名古屋大学水圈科学研究所编, 估计书院出版, 1991, 3(2), 9—16
18. 徐国昌等, 甘肃省 4. 22” 特大沙尘暴分析, 气象学报, 1979, 37(4), 26—35.
19. 周明煜等, 北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征. 环境科学学报, 1981, 1(3), 207—218.
20. 曲绍厚等, 北京地区一次尘暴过程的来源, 环境科学学报, 1984, 3(4), 80—85
21. 石广玉, 许黎, 陈继平等, 北京地区 1991 年春夏之交的大气气溶胶光学特性测量, 第四届全国气溶胶学术会议论文集, 合肥, 1992, 33—37
22. 邱金桓等, 1984, 激光探测沙尘过程中的气溶胶消光系数分布, 大气科学, 8(2), 205—210
23. 张仁建, 王明星等, 2000 年春季背景特点沙尘暴物理化学性的分析, 气候和环境研究, 2000, 2(5), 259—266
24. 方宗义等, 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果, 第四季研究, 2001, 2(1), 48—55
25. WASALKA, Y., Shi Guang et al., Number concentration and size distribution of aerosols in the free atmosphere over the desert areas in the asian continent: Balloon-borne measurements in summer and fall, *Journal of Arid Land Studies*, 2002, 1(1), 347-353
26. 赵琳娜, 2002, 沙尘发生发展的机理及起沙机制的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文, 1—170
27. 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄, 一次引发华北和北京沙尘天气起沙机制的数值模拟研究, 气候和环境研究, 2002, 7(2), 279—294
28. 黄美元, 王自发, 东亚地区黄沙长距离输送模式的涉及, 大气科学, 1998, 2(2), 625—637
29. Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell et al., An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian



- aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, ACE-Asia special Issue A, 2003, 3(2), 68-78
30. Ikami, M., O., Abe, M. Du et al., the impact of aerolian dust on climate: Sino-Japanese cooperative project ADEC, *Journal of Arid Land studies*, 2002, 11(2), 211-222
31. 王劲松, 李耀辉, 康凤琴等, “4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析, *高原气象* 2004, vol23 no:1 P89-96
32. 许东蓓, 康凤琴, 郑新江, 1998 年“4.18”强沙尘暴分析及数值模拟 *气象* 2002 vol 28, no 8, P9-14
33. 康凤琴, 李耀辉, 吕世华, 2001 年 4 月 8 日沙尘暴天气的数值模拟研究 *中国沙漠* 2003, vol. 23 no. 6, P681-685
34. 孙军, 姚秀萍, 一次沙尘暴过程锋生函数和地表热通量的数值诊断, *高原气象* 2002, vol21 no5, P488-494
35. 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄, 华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析, *气候与环境研究*, 2004, vol9, no1, P139-154
36. 王夕华, 张军, 王体健等, 沙尘暴(气体-颗粒)两相流及其并行数值模拟, *工程热物理论*, 2003, vol:24, No:2, P256-258
37. 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, Vol7, No:3, P280-294
38. 赵琳娜, 赵思雄, 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究, *气候与环境研究* 2004, Vo9, No:1, P116-126
39. 张小玲, 王迎春, 北京地区沙尘暴天气分析及数值模拟, *甘肃气象* 2001 vol 19, NO: 2 9-13
40. 王宝鉴, 蔡玉琴, 黄玉霞, 2000 年 4 月 12 日黑风于 1993 年 5 月 5 日黑风的对比分析 *甘肃气象* 2001 vol: 19 No: 2 36-39
41. DRAXLER R R, G D. Hess an overview of HYSPLIT-4 modeling system for trajectories dispersion and deposition[J]. *Aust Met Mag*, 1998, 47(2): 295-308
42. ROLAND R. Draxler, Forecasting Dust Storms using HYSPLIT. Sino-US Workshop on Dust storms and their effects on Human Health, 2002, Nov 25-26, Raleigh, North Carolina
43. WESTPHAL, TOOM O B, CARLSON T N. A Two-Dimension Numerical Investigation of the Dynamics and Microphysics of Saharan Dust storm[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(3):3027-3049



作者简介

姓 名: 戚丹青

出生日期: 1980.03.06

专 业: 地球科学系大气科学

健康状况: 良好

通讯地址: 浙江大学 1118 信箱

性 别: 女

籍 贯: 浙江省绍兴市

学 历: 硕士(2006 年 4 月毕业)

电子邮箱: qidanqing_zju@yahoo.com.cn

邮政编码: 310027

一, 教育背景:

1999.9—2003.6 浙江大学理学院地球科学系大气科学专业, 获学士学位

2003.9—现在 浙江大学理学院地球科学系气象专业, 攻读硕士学位

二, 专业技能:

- A, 精通 Fortran 语言, 掌握 C 语言
- B, 熟练掌握 GrADS, NCARG 专业绘图工具
- C, 掌握 MM5 中尺度气象模式
- D, 熟练掌握 HYSPLIT_4 模式
- E, 掌握 Micaps 天气预报系统

三, 语言能力:

- A, 通过大学英语四级, 六级考试;
- B, 2005 年 6 月参加 GRE 考试;
- C, 2005 年 8 月参加 TOEFL 考试

四, 实习经历:

- A, 2002 年暑假, 浙江省杭州市气象局参加天气预报实习
- B, 2001 年暑假, 浙江省杭州市萧山气象局参加天气测报实习

五, 论文列表:

- A, 参加国际沙尘暴会议, 并发表论文《New Progress on Numerical Simulation of Long Distance Transport of Dust Storm》(第二作者, 导师第一作者)
- B, 研究生阶段参加非连续性污染物长距离输送的数值模拟国家自然科学基金项目, 并发表论文《一次强沙尘暴长距离输送的数值模拟研究》
- C, 大四期间协助老师编写《卫星气象学》

六, 获奖项:

- 2004 学年 研究生一等奖学金
- 2003 学年 浙江大学优秀毕业生
- 2002 学年 浙江大学优秀团干
- 2001 学年 浙江大学二等奖学金, 三好学生
- 2000 学年 浙江大学二等奖学金, 三好学生
- 1999 学年 浙江大学二等奖学金, 三好学生