

Y 829234

分类号_____密级_____

UDC _____



研究生学位论文

青岛地区沙尘天气的特征 及成因分析

研究生姓名 耿 敏

指导教师姓名 盛立芳教授

申请学位级别 硕 士 专业名称 气象学

论文答辩日期 2005年5月30日 学位授予日期 2005年 月

中国海洋大学

青岛地区沙尘天气的特征及成因分析

摘 要

浮尘、扬沙和沙尘暴统称为沙尘天气。沙尘天气自古就有,但具有不同的年代特征。进入 21 世纪,沙尘暴出现频次高、发生时间提前,而且发生期较长,沙尘天气再次引起世人关注。发生于干旱、半干旱地区的沙尘暴不仅对当地的环境造成重大影响,而且对下游经过地区的大气环境造成不同程度影响。

本文利用青岛地区七个站 1961~2004 年的气象资料,分析了青岛地区沙尘天气的时空分布特征。青岛的沙尘天气主要以浮尘天气为主,扬沙次之,沙尘暴很少出现。浮尘天气在 60-70 年代出现较多,在 80-90 年代相对较少,到了 90 年代末期又突然增多,2002 年为历年来之最。春季为沙尘天气的多发期,其中 4 月出现的日数最多。从空间上看,青岛西部(胶州、胶南)沙尘日数多于东部(崂山),这可能与沙尘来源和空气湿度等因素有关。

按照沙尘的源地和起因,青岛地区的沙尘天气大体可分为三种类型:外地漂移型、本地生成型以及外地漂移在本地加强型。其中,外地漂移型沙尘天气最多。外地漂移型中沙尘天气移动路径大体有三个方向:偏北路径、西北路径、偏西路径。其中,大多数影响青岛的沙尘天气是西北路径的沙尘天气。偏北路径是沙尘从蒙古国爆发后,经科尔沁沙地,过辽东半岛,最后影响青岛地区;西北路径是沙尘天气从蒙古国或内蒙西部沙漠起源,东移经黄土高原加强后,从济南到青岛;偏西路径是沙尘经新疆、甘肃、河套地区、华北南部到达我市。

青岛地区沙尘天气的出现与高空大气环流形势密切相关。在 500hPa 高空环流形势图上,亚洲东部沿海地区是一稳定的深槽区,亚洲西部是一个稳定的高压脊,中国北方正处于脊前槽后的西北气流下,这股强劲的西北气流将俄罗斯新地岛附近的寒冷空气源源不断地向东南方向输送,这也是中国北方出现沙尘天气时典型的高空环流形势。地面形势则一般是蒙古气旋形成后东移,其南部的冷锋携带大量冷空气入侵中国北方,引起地面大风,导致沙尘天气的出现。

用非静力中尺度 MM5 模式对 2002 年 3 月 18-22 日沙尘暴天气进行模拟,利用地面风场、垂直速度等要素的变化,初步判断沙尘暴的爆发时间、持续过程、移动路径,表明该模式对强气旋过程有较好的预报能力,在此基础上可以进一步发展沙尘暴数值预报方法。

关键词: 青岛地区; 沙尘暴; 沙尘天气成因; 气旋; MM5 模式

Study of the characteristics and formation of sand-dust weather of Qingdao area

Abstract

According to the definition of Meteorological Observing Criterion, Sand-dust weather is classified as floating dust, blowing sand, sandstorms and strong sandstorms 4 categories. Sand-dust weather has been existing since the old time, it has the chronology characteristics. Sand-dust weather was paid much attention again since 21th century since sandstorms happened more frequently, more early and persisted more longly than before. Sandstorms from arid and semi-arid areas not only has strong influence on the local environment but also has impact on the atmospheric environment of the downwind areas.

Spatial and temporal characteristics of sand-dust weather in Qingdao area was analyzed based on meteorology observations in 7 meteorological stations from 1961 to 2004. Statistics show that floating dust weahter is the dominating categories, and then blowing sand, sandstorm was seldom to be observed. Comparatively, for the floating dust weather, there was more in 1960-1970s, less in 1980-1990s. But the days of floating dust weather suddenly increased since the end of 1990s, and arrived the maximum untill 2002. Most sand-duat weather happened in Spring seasons, especially in April in Qingdao. From the spatial distribution, there were more sand-dust weather days in the west part (Jiaonan, Jiaozhou) than the east(Laoshan), which may be caused by the source of the sand-dust and the air humidity.

According to the origin of sand-dust, sand-dust weather in Qingdao region can be classified into three types: drifting from other region, originating in the local and strengthening after drifting, in which the first type is the most happened. There were there routes of sand-dust drifting from other regions to arrive in Qingdao: The north, northwest and the west, belong of them the northwest routine was dominated. Sand-dust from the north route was outbreaked in Mongolia, passed through Ke Er Qing Sand-land, Liaodong peninsula to Qingdao. Sand-dust from the northwest route was originated from Mongolia or the desert in the west of inner Mongolia, passed

eastward through Loess plateau, Jian to Qingdao. Sand-dust from the west route was transported through Xinjiang , Gansu and Hetao region.

The sand-dust weather was closely related with the general circulation of upper air. At the 500hPa altitude, there was a steady deep pressure trough along the east coastal area in the east of Asia, and a steady high pressure ridge in the west of Asia. North of China was controlled by the northwest flow between the ridge and the trough. The strong northwest flow transport cold air from the Novaja Zeml's to the downwind southeast area. This circulation pattern is very typical for the sand-dust weather of north China. On the ground, Mongolia cyclone was generated and moved eastward, cold air travelling with the clod front in the south of the cyclone caused huge winds in the surface and the sand-dust weather.

The non-hydrostatic mesoscale model MM5 was adopted to simulate the sand-dust weather in March 18-22, 2002. The outbreaking time, persisting processes and moving routes were explained with the modelled surface wind field, vertical wind velocities, etc. It is shown that MM5 can simulate well the strong cyclone weather, the sandstorm's forecasting may be made with the help of it.

Key words: Qingdao area; sandstorm; formation of sand-dust weather; cyclone; MM5 model

0 前言

随着社会经济的快速发展和工业化水平的提高,人类活动对环境产生的影响越来越大。环境问题是当今世界各国面临的重大问题,全球性的资源短缺和环境危机,对人类的生存和发展构成了现实的威胁,保护环境,实现“可持续发展”成为当今世界的历史潮流。近年来,频繁的沙尘天气,特别是强沙尘暴,给国民经济、生态环境、人们的生命财产和交通运输等诸多方面造成灾害性影响,我国的沙尘天气越来越受到社会各界和国际上的关注,沙尘暴已成为一个重要的地球环境问题^[1]。

全球沙尘暴通常发生于沙漠,及邻近由于气候变异和人为活动等因素,引起的干旱、半干旱或亚湿润地区的土地退化形成的荒漠化区域。现在世界上旱地面积占 40%左右,如图中黄色区域(图 0.1),大都分布在赤道两侧(25°S — 25°N)副热带低纬地区,即哈得莱环流圈中下沉气流所控制的干旱气候区。

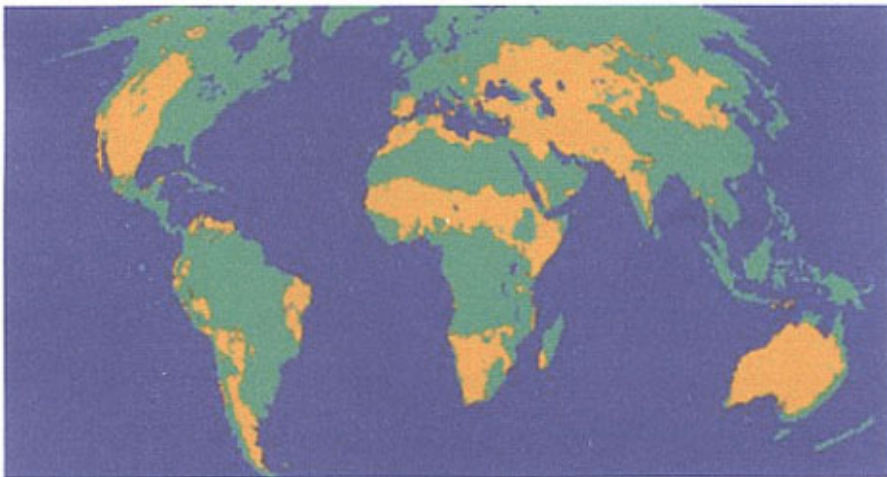


图 0.1 世界干旱地区分布图

其中北美洲的沙漠主要分布于美国西部和墨西哥的北部。由于土地利用不当、持续干旱等原因,20 世纪 30 年代美国西部大平原就曾发生了一场特大的沙尘暴,又被称为黑风暴,在这场美国历史上最严重的沙尘暴中,大平原损失了 3 亿吨的肥沃土壤,浩劫之后,几百万平方公里的农田废弃,几十万人流离失所,众多城镇成为了荒无人烟的空城,许多人被迫向加利福尼亚迁移,引发了美国历史上最大的移民潮。干旱和半干旱地区占陆地面积 75%的干旱国家澳大利亚,其中部和西部海岸地区沙尘暴最为频繁,每年平均有 5 次之多。中东地区的沙尘暴则主要在非洲撒哈拉沙漠南缘地区,从 20 世纪 70 年代初到 80 年代中期,由于连年旱灾以及过量放牧和开垦,造成草场退化,田地荒芜,沙漠化土地蔓延,沙尘

暴加剧,人们的生活环境急剧恶化。频繁的沙尘暴还殃及其它地区,有的沙尘被风带过大西洋到达了南美洲亚马逊地区,甚至还有沙尘被吹到了欧洲南部。

亚洲中部的荒漠区也在不断扩大,中亚五国是荒漠化比较严重的地区,总面积有近 400 万 km^2 。而中国荒漠化土地面积也已超过 262.2 万 km^2 (含沙漠面积为 168.9 万 km^2), 占国土总面积的 27.3%, 最新的卫星遥感图片显示, 在我国的北方, 西起塔里木盆地, 东至松嫩平原西部, 主要分布在西北、华北、东北 13 个省区市的一条东西长约 4500km、南北宽约 600km 的黄色带正呈扩展趋势, 并日益呈现出面积大、分布广、类型多的特点, 其中尤以我国西北地区荒漠化最为严重, 已成为四大沙尘暴高发地区之一的中亚沙尘暴区的重要组成部分, 是东亚沙尘天气的主要发源地, 也是世界上中纬度 (35°N — 45°N) 地区发生沙尘暴频率较高的区域。20 世纪 80 年代, “风沙紧逼北京城” 的警告曾引起了上至党中央, 下到普通百姓对首都生态环境的关注。从那时起, 以护卫京津为主要目的的大规模国土绿化工程开始启动。经过 20 多年的不懈努力, 现京津周围的森林植被覆盖率显著提高。然而, 正当人们为绿化成就欢欣鼓舞时, 久已不见的强沙尘暴天气近几年来却又卷土重来。

0.1 沙尘天气的变化与危害

0.1.1 沙尘天气及其变化趋势

沙尘天气是一种自古以来就存在的天气现象, 通过对海地岩心和冰盖沉积物的测定, 可知早在距今 7000 万年以前的白垩纪末就有沙尘暴的发生^[2]。我国历史文献中有关沙尘暴天气的记载不绝于书。张华的《博物志》中就有公元前 16 世纪的沙尘纪录^[3]。张德二^[4, 5]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 3 世纪以来的“雨土”年表。他发现中国历史上共出现过大约 5 个沙尘暴频发周期, 分别是 1060 年~1090 年、1160 年~1270 年、1470 年~1560 年、1610 年~1700 年和 1820 年~1890 年, 每个频发时期大约为九十年左右。

近 50 年来, 中国华北地区一般沙尘天气发生的日数呈减少趋势, 例如 20 世纪 50 年代北京平均沙尘暴日数、扬沙日数和浮尘日数分别是 90 年代的 8.5 倍、14.5 倍和 3.2 倍^[1]; 但另一方面, 中国北方强沙尘暴天气却有加重趋势: 强风沙灾害, 10 世纪前平均每 100 年 1 次, 20 世纪 50、60 年代发展到每两年 1 次, 进入 90 年代, 已发展到每 1 年 1 次以上^[1, 6]。年均受旱灾面积由 20 世纪 50 年代 1.2 亿亩

增加到 20 世纪 90 年代的 3.8 亿亩^[7]。2002 年春季,中国北方特别是华北地区连续多次出现沙尘暴天气,其频率之高,范围之广,为历史同期所罕见。钱正安等研究表明^[8]:我国沙尘暴频数总体呈波动下降趋势,其中 60~70 年代略显上升:60 年代特大沙尘暴在我国发生过 8 次,70 年代发生过 13 次;80~90 年代中期明显下降,但到 90 年代后期又开始回升:80 年代发生过 14 次,而 90 年代至今已发生过 20 多次;2000 年急剧增加,春季共出现 16 次大风、沙尘和沙尘暴天气,并且波及的范围愈来愈广,造成的损失愈来愈重。2001 年中国北方共出现了 19 次沙尘天气,沙尘暴天气不仅出现频次高,而且在我国沙尘天气出现时间之早是历史上罕见的,新世纪第一场沙尘暴,从 2000 年 12 月 31 日从北疆和内蒙西部发生,在 2001 年 1 月 1 日影响到我国北方大部地区,北京也出现了扬沙和浮尘天气。2001 年最后一次沙尘暴天气于 12 月 11—13 日伴随着一股强冷空气和蒙古气旋的东移发展出现在内蒙古中西部地区。2002 年,我国出现了 17 次沙尘天气过程,其中强沙尘暴过程 5 次、沙尘暴过程 7 次、扬沙过程 5 次。2003 年春季出现了 7 次沙尘天气过程,其中强沙尘暴过程和沙尘暴过程各 1 次、扬沙过程 5 次。2004 年春季我国共出现 13 次沙尘天气过程,其中 1 次为强沙尘暴、4 次沙尘暴过程。

0.1.2 沙尘天气的危害

沙尘暴作为一种高强度风沙灾害,并不是在所有有风的地方都能发生,只有那些气候干旱、植被稀疏的地区,才有可能发生沙尘暴。在我国西北地区,森林覆盖率本来就不高,由于风蚀使该地区土壤荒漠化不断加快,可不少贫穷的西北人民还靠挖甘草、搂发菜、毁林开矿发财,这些掠夺性的破坏行为更加剧了这一地区的沙尘暴灾害。裸露的土地很容易被大风卷起形成沙尘暴甚至强沙尘暴,使得生态环境被严重破坏,造成的间接经济损失难以估量。

据统计沙尘暴降尘中至少有 38 种化学元素,这些化学元素大大增加了大气固态污染物的浓度,给起源地、周边地区以及下风地区的大气环境、土壤、农业生产等造成了长期的、潜在的多方面危害,直接影响着人类的生存环境,主要表现在风蚀土壤,破坏植被,掩埋农田等几个方面。沙尘暴发生时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,

¹ 1 亩=666m²

埋压农田、村庄、工厂、铁路、公路、水源等形成沙瓣、沙堆和沙丘等，其大风经过干旱地区时，将疏松土壤的表土刮去一层，使农作物赖以生存的土壤变贫瘠，扩大沙化的区域，严重影响农作物的产量；其强风有时拔树毁物、刮翻火车，破坏农业设施，甚至造成人畜伤亡，所以讲沙尘暴对人畜和建筑物的危害绝不亚于台风和龙卷风。例如，据国家环保总局的监测网显示，2002年3月20日强沙尘暴当天，仅北京每平方米的落尘量达到了20克，总悬浮颗粒物达到了每立方米11000微克，超过了国家标准的十几倍，超过正常值的100倍，并由于能见度很低，严重影响城市交通，甚至影响高速公路的正常运行，掩埋了部分铁路造成火车中途遇阻。又如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，死亡和丢失牲畜120万头（只），农作物受害560万亩，沙埋干旱地区水渠总长2000多公里，直接经济损失达5.5亿元^[9]。

沙尘暴还会造成空气污染、水源污染，而可吸入颗粒物更是在多方面直接地危害人体健康。皮肤、眼、鼻和肺是人最先接触沙尘的部位，受害最重，其中肺部表现则更为严重和广泛。7年前美国健康学家首先提出，细微污染颗粒与肺病和心脏病死亡之间存在关系。澳大利亚《时代报》称由于土壤被风蚀而引起的沙尘暴是导致该国200万人哮喘的元凶。

沙尘暴在引起天气和气候变化方面也起很大作用，能影响太阳辐射和地球长波辐射的传输，影响区域气候，尤其是地气系统的辐射收支和能量平衡。如2002年3月20日前后的一次沙尘暴影响的范围不仅涉及到我国13个省份，而且影响到了韩国和日本；1998年9月起源于哈萨克斯坦的一次沙尘暴，经过我国北部广大地区，并将大量沙尘通过高空输送到北美洲；2001年4月起源于蒙古的强沙尘暴掠过了太平洋和美国大陆，最终消散在大西洋上空。如此大范围的沙尘，在高空形成悬浮颗粒，足以影响天气和气候。因为悬浮颗粒能够反射太阳辐射从而降低大气温度。随着悬浮颗粒大幅度削弱太阳辐射(约10%)，地球水循环的速度可能会变慢，降水量减少；悬浮颗粒还可抑制云的形成，使云的降水率降低，减少地球的水资源。可见，沙尘可能会使干旱加剧。近几年来，我国每年因风沙危害造成的直接经济损失达540亿元，相当于西北5省区1996年财政收入的3倍。总之，沙尘暴的危害是十分严重的。

0.2 国内外对沙尘天气的研究现状

0.2.1 国外研究状况

国外对沙尘暴的研究较早。20 年代初, Hankin(1921)首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了研究^[10]。随后, Sutton(1925)对“*Haboob*”型沙尘暴也进行了分析研究^[11]。之后, Sur (1938)、Bhalotra (1954)、Lawson (1971)和 Idso (1972)先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴中湿度场差异, 沙尘暴的平均风速及其发展的地理区域和频数等等进行了研究^{[12] [13]}。上世纪 80 年代以来, Brazel(1986)对 1965~1980 年发生在美国亚利桑那州沙尘暴的天气类型作了统计分析, 并将其划分为四种类型: 即锋面型、雷暴和对流型、热带扰动型和上部低压型或切断低压型^[14]。Jauregui (1989)对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究, 并指出 3 月份沙尘暴出现的频率最大^[15]。Ott S.T.和 A.Ott (1991)曾利用卫星和 GATE 资料对撒哈拉尘暴的爆发作过分析^[16]。Karyampudi 和 Carlson^[17]以及 Westphal^[18]进一步发展了对撒哈拉沙尘暴的三维数值模拟研究。Yaping Shao 等(1997)对澳大利亚 1996 年 2 月发生的沙尘暴作了风蚀作用的评估和预测^[19], 之后(1999)还对因沙尘暴造成的沙尘起尘量建立了一个预报模式^[20]。

0.2.2 国内研究状况

我国近代沙尘暴的研究是首先在地质学领域开展起来的, 主要从第四季地质学的角度研究黄土与粉尘沉降。张德二根据我国史料中的降尘记载, 历史气候资料 and 现代气象纪录, 给出了我国近 3000 年降尘地点分布图和近 1700 年降尘频数曲线, 并指出我国西北干燥沙漠地带是沙尘的源地^[5]。专家学者们自上世纪 70 年代对沙尘暴和沙尘气溶胶进行了广泛的研究, 80 年代对沙尘暴的研究逐步深入, 90 年代的研究开始系统化。从沙尘暴的天气气候学特征、分析预报、遥感监测、成份分析、数值模拟、灾害预防等方面作了深入探讨。研究了沙尘暴源地、发生规律及天气过程的关系, 沙尘气溶胶的光学特征, 沙尘气溶胶的谱分析和化学成分, 以及沙尘气溶胶的输送过程等。

而对沙尘暴天气的个例研究见徐国昌等(1979)对“1972.04.22”甘肃的特大沙尘暴天气过程的研究。徐国昌等对这次发生在甘肃河西走廊的特大沙尘暴过程进行了较为详细的研究, 初步揭示了沙尘暴的大尺度天气成因、沙尘输送过程和

0.2 国内外对沙尘天气的研究现状

0.2.1 国外研究状况

国外对沙尘暴的研究较早。20年代初, Hankin(1921)首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了研究^[10]。随后, Sutton(1925)对“*Haboob*”型沙尘暴也进行了分析研究^[11]。之后, Sur (1938)、Bhalotra (1954)、Lawson (1971)和 Idso (1972)先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴中湿度场差异, 沙尘暴的平均风速及其发展的地理区域和频数等等进行了研究^{[12] [13]}。上世纪 80 年代以来, Brazel(1986)对 1965~1980 年发生在美国亚利桑那州沙尘暴的天气类型作了统计分析, 并将其划分为四种类型: 即锋面型、雷暴和对流型、热带扰动型和上部低压型或切断低压型^[14]。Jauregui (1989)对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究, 并指出 3 月份沙尘暴出现的频率最大^[15]。Ott S.T.和 A.Ott (1991)曾利用卫星和 GATE 资料对撒哈拉沙尘暴的爆发作过分析^[16]。Karyampudi 和 Carlson^[17]以及 Westphal^[18]进一步发展了对撒哈拉沙尘暴的三维数值模拟研究。Yaping Shao 等 (1997)对澳大利亚 1996 年 2 月发生的沙尘暴作了风蚀作用的评估和预测^[19], 之后 (1999)还对因沙尘暴造成的沙尘起尘量建立了一个预报模式^[20]。

0.2.2 国内研究状况

我国近代沙尘暴的研究是首先在地质学领域开展起来的, 主要从第四季地质学的角度研究黄土与粉尘沉降。张德二根据我国史料中的降尘记载, 历史气候资料 and 现代气象纪录, 给出了我国近 3000 年降尘地点分布图和近 1700 年降尘频数曲线, 并指出我国西北干燥沙漠地带是沙尘的源地^[5]。专家学者们自上世纪 70 年代对沙尘暴和沙尘气溶胶进行了广泛的研究, 80 年代对沙尘暴的研究逐步深入, 90 年代的研究开始系统化。从沙尘暴的天气气候学特征、分析预报、遥感监测、成份分析、数值模拟、灾害预防等方面作了深入探讨。研究了沙尘暴源地、发生规律及天气过程的关系, 沙尘气溶胶的光学特征, 沙尘气溶胶的谱分析和化学成分, 以及沙尘气溶胶的输送过程等。

而对沙尘暴天气的个例研究见徐国昌等 (1979)对“1972.04.22”甘肃的特大沙尘暴天气过程的研究。徐国昌等对这次发生在甘肃河西走廊的特大沙尘暴过程进行了较为详细的研究, 初步揭示了沙尘暴的大尺度天气成因、沙尘输送过程和进行了较为详细的研究, 初步揭示了沙尘暴的大尺度天气成因、沙尘输送过程和

移动路径, 首先提出了“黑风暴”的定义及判别标准^[21]。高凤荣^[22] (1988)、陈敏连^[23] (1993)、江吉喜^[24] (1995)、王式功^[24] (1995)、徐建芬^[26] (1996) 等先后对发生在我国西北地区的几次典型的特强沙尘暴个例作了分析研究。特别是1993年“5.5”特大沙尘暴发生后, 沙尘暴灾害引起了社会各界的关注, 西北各省、区和有关科研机构相继开展了大量的沙尘暴研究。方宗义等编辑的《中国沙尘暴研究》较为系统地汇集了近年来我国在沙尘暴研究上所取得的进展^[27], 主要表现在以下几个方面: ①历史时期沙尘暴记载的统计整理; ②沙尘暴典型个例分析; ③沙尘暴天气形势分析; ④沙尘暴发生源地、移动路径及沉降范围; ⑤沙尘气溶胶理化特征; ⑥沙尘暴遥感监测与预报; ⑦沙尘暴防治对策。

通过对当代沙尘暴和大气活动研究表明, 中高纬度冷高压活动、东亚温带气旋活动、中亚内陆干旱地带与黄土高原上空西风带活动、季风活动的强弱等都可能影响沙尘暴天气的发生频率。研究结果显示: 我国沙尘暴主要发生在西北地区、且有两个多发中心, 即塔克拉玛干沙漠的西南部和甘肃河西走廊东部; 就整个北方地区而言, 沙尘暴出现日数总的趋势是波动式减少, 但不同干旱气候区略有差异; 沙尘暴主要发生在春季, 尤其以4月份最多; 沙尘暴的形成是地形、地表沙尘物质、有利的锋区位置、低层大气的不稳定和锋面过境后的大风五种基本因素相互作用的结果。

上述对沙尘暴的研究, 大部分局限于个例、局域性分析, 主要是对我国西北地区, 特别是新疆和河西走廊一带沙尘暴的研究。而对于青岛地区沙尘天气的综合性研究相对较少。青岛处于上游沙尘向下游传输路径中的入海通道上, 近几年来频繁受到西北和东北沙尘暴和沙尘天气的影响, 例如2002年3月18日前后爆发于新疆西部和北部、内蒙古大部、甘肃中部的沙尘暴过程和2005年3月14日爆发于内蒙古的沙尘天气过程都对青岛的环境造成了影响。

0.3 本文的研究内容和研究意义

本文利用青岛地区七个站1961~2004年的《中国地面气象记录月报》中所记录的沙尘天气的常规观测资料, 统计分析青岛地区沙尘天气的时空分布特征。为了确定沙尘天气的类型和移动路径, 查阅了1961~2004年之间有沙尘天气发生时的地面天气图和部分高空天气图, 提出了影响青岛沙尘天气的天气模式。并结

合 Micaps 常规数据资料以及国家气象中心 T106L19 模式资料对近年来的部分沙尘天气过程进行了个例分析和数值模拟,找出沙尘天气发生的规律和特征,以及触发沙尘天气的动力学机制。

1 青岛地区沙尘天气特征分析

1.1 沙尘天气的定义

根据气象观测规范定义,浮尘、扬沙和沙尘暴统称为沙尘天气。其中,浮尘天气是指在无风情况或者风力很小的情况下,尘土细粒均匀地浮游在空气中,使水平能见度小于 10km 的天气现象;扬沙天气是指较强的风将地面沙尘吹起,使空气相当混浊,水平能见度在 1km 到 10km 之间的天气现象;沙尘暴是由于强风将地面大量尘沙卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度小于 1km 的风沙天气现象^[28]。浮尘多由外地或本地沙尘暴、扬沙天气出现后尚未下沉的尘土和细沙引起。沙尘暴是沙暴和尘暴两者兼有的总称,当局部区域能见度大于等于 50m 且小于 200m 时,称为强沙尘暴;达到最大强度(瞬时最大风速大于等于 25m/s,能见度小于 50m)时,称为特强沙尘暴^[21]。

1.2 沙尘天气发生的时间分布特征

统计分析 1961~2004 年青岛地区 7 个气象站的逐日观测资料可以发现,沙尘暴、扬沙、浮尘这三种沙尘天气现象在青岛地区的历史上都有发生。青岛地区沙尘天气发生的总数总体呈减少的趋势,在 21 世纪初则又明显增多^[29, 30],年际分布规律与我国北方大部地区的沙尘天气分布规律是一致的,但又有其独特的分布特点。

1.2.1 沙尘天气发生日数的多年变化规律

为了体现沙尘日数统计的合理性,我们规定只有同一天内有两个或两个以上站次同时出现浮尘天气,则定为一个浮尘日;同样,有两个或两个以上站次同时出现扬沙天气,则定为一个扬沙日;但沙尘暴由于在青岛地区出现的较少,因此则定为有一个站出现过,即是一个沙尘暴日。

图 1.1 给出了 1961 年~2004 年青岛市三种沙尘天气出现的总日数的年际变化曲线,可以看出:上世纪 60 年代到 70 年代沙尘天气出现的日数比较多,80 年代到 90 年代沙尘天气出现的日数比较少。从 1999 年开始,沙尘日数又开始增加,到 2003 年、2004 年又相对减少。

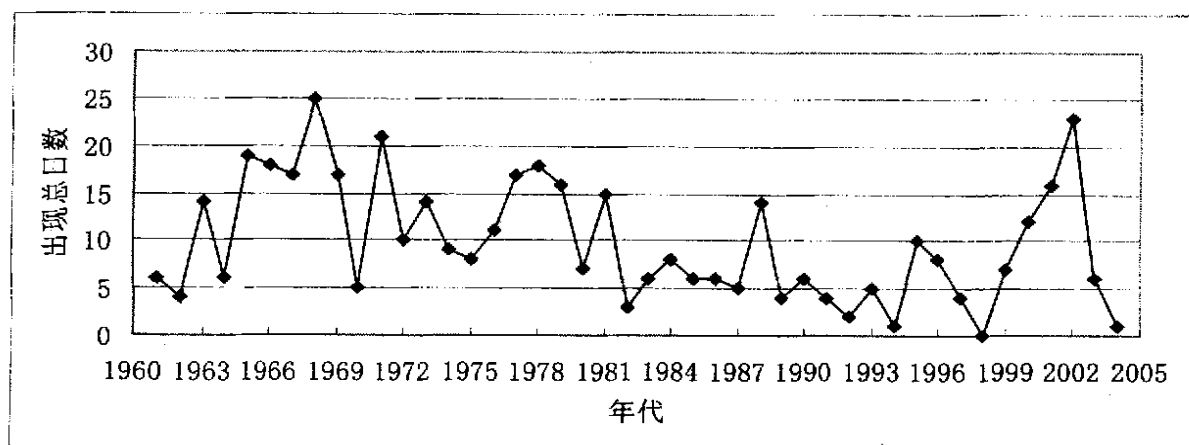


图 1.1 青岛地区出现沙尘天气日数的年际变化

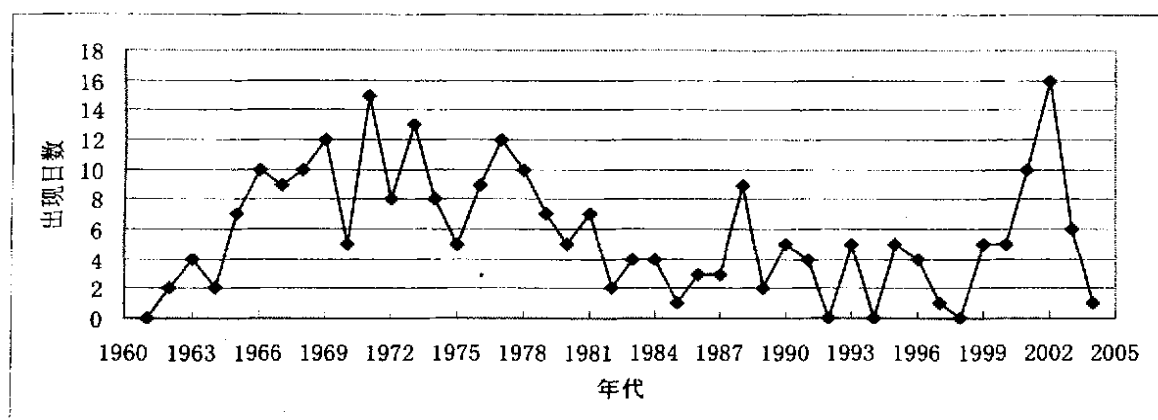


图 1.2 青岛地区浮尘天气发生日数的年际变化

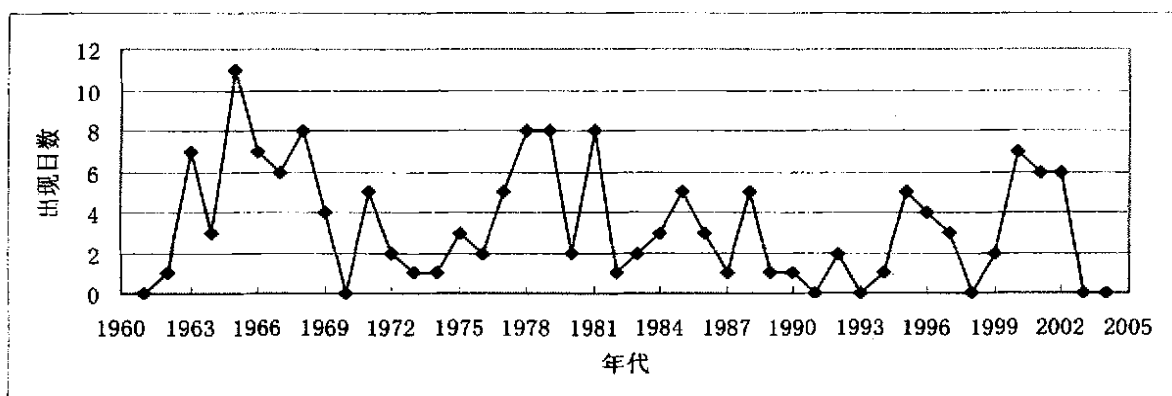


图 1.3 青岛地区扬沙天气发生日数的年际变化

图 1.2 和 1.3 分别是青岛地区（7 个站）1961 年~2004 年出现的浮尘天气和扬沙天气日数，从图中可以看出：浮尘天气在上世纪六、七十年代出现的较多，在八、九十年代相对较少，到了九十年代末期又突然增多，2002 年竟然达到 16 天，

是历年来之最；而扬沙天气则是六、七十年代出现的较多，在八、九十年代相对较少，到了九十年代末期又增多，但还没有七十年代多。从表 1.1 可以看出：青岛地区的沙尘暴也是在六十年代最多，九十年代一个站次也没出现，而 2001~2004 年全区七个站也只出现过一次。这与周自江等在文献[30]中阐述的相同，近 47 年来我国北方大部分地区扬沙和沙尘暴出现的日数是以减少为主的，但到了 90 年代末期又开始呈增加趋势。这种变化趋势说明，沙尘暴有其自身演变规律，这种演变规律可能主要受气候因素制约，人对土地的改造作用并不是沙尘暴爆发的主要原因，最多只是起了缓解或加重的作用。另外，风力条件的变化对沙尘暴变化趋势的也有影响。研究成果表明，沙尘暴的发生一般需要足够强劲持久的风力和地表丰富的松散干燥的沙尘^[6]。亦即风和沙尘是形成沙尘暴的两个主要因素。研究成果还表明，我国沙化土地面积自 20 世纪 50~60 年代中期始平均每年扩展 1560km²，90 年代每年扩展达 2460 km²。这意味着我国地表覆被整体在恶化，沙尘暴的物质源越来越丰富，其发生日数理应呈增多趋势。这显然与上述的沙尘暴普遍减少趋势不吻合，甚至是矛盾的。在这种情况下，沙尘暴的减少意味着风的因素可能起了主导作用，沙尘暴与大风的年际振荡及多年变化趋势具有一致性。

表 1.1 1961 年~2004 年青岛地区三种沙尘天气出现的总日数统计

年代	浮尘	扬沙	沙尘暴	合计
1961-1970	61	47	23	131
1971-1980	92	37	2	131
1981-1990	40	30	3	73
1991-2000	29	24	0	53
2001-2004	33	12	1	46
合计	255	150	29	434

根据 1961~2004 年青岛地区 7 个气象站的逐日观测资料分析，以 10 年为一个阶段划分可以看出（见表 1.1）：青岛地区沙尘天气出现的总日数 1961~1970 年与 1971~1980 年最多，有 131 天；1981~1990 年有 73 天；90 年代最少，只有 53 天；从上个世纪末 1999 年开始，沙尘天气出现的日数明显增多，2001 年~2004 年，青岛地区各站总共出现了 46 天沙尘天气，接近 1991 年~2000 年的十年总和。

1.2.2 沙尘天气发生的季节变化规律

分析青岛地区 44 年沙尘天气发生的季节变化规律,沙尘天气各月分布特点如图 1.4 所示,沙尘天气的发生日数有着明显的季节差别,3、4、5 月,也就是春季,为沙尘天气的多发期,其中 4 月出现的日数最多;6、7、8、9 月,也就是夏季,几乎很少出现过沙尘天气;其它的月份,也就是秋、冬季节,出现沙尘天气的日数相对于春季少一些。

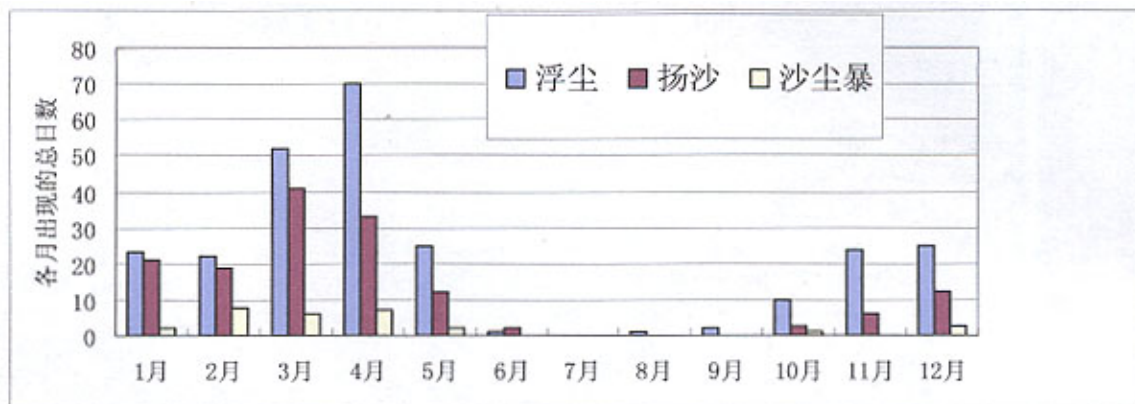


图 1.4 青岛地区沙尘天气各月分布特点

沙尘天气的季节分布上这种春多夏少现象,主要是因为春季我国北部地区冷空气活跃,多西北大风,空气干燥,加之地表裸露,容易起沙。到了夏季,青岛受副热带高压的控制,地面盛行东南风,降水增多,土壤较湿润,故不易起沙;秋冬季虽然降水减少,但由于土壤含水率还比较高,所以起沙较少。

1.3 沙尘天气发生的空间分布特征

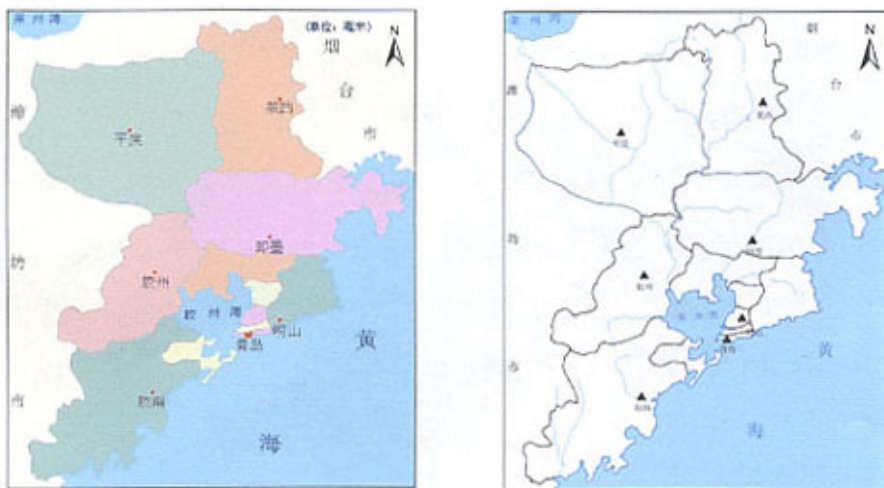


图 1.5 青岛地图 (左: 行政区域划分图 右: 站点位置)

从表 1.2 可以看出：青岛地区出现的沙尘天气总的来说都是浮尘天气较多，扬沙次之，沙尘暴最少。但具体情况各站也是不相同的，其中总日数最多的是胶南站和胶州站，最少的是即墨站。浮尘天气是胶南最多，而平度最少；扬沙天气是胶州最多，崂山最少；沙尘暴是平度最多，而青岛市最少。由于扬沙和沙尘暴出现时一般都与大风天气有关，胶州站是除青岛站外出现大风日数较多的站，因此扬沙和沙尘暴出现的日数也较多；青岛站虽然大风较多，但由于这个站离海较近，空气相对湿度较高，加上本身此站位于城市中，沙土较少，所以扬沙和沙尘暴出现的日数较少。

表 1.2 1961 年~2004 年青岛各站三种沙尘天气分别出现的总日数

项目	青岛	崂山	胶南	胶州	即墨	平度	莱西	合计
浮尘	104	86	174	151	57	45	75	692
扬沙	53	46	70	95	59	86	50	459
沙尘暴	1	2	3	4	6	10	9	35
合计	158	134	247	250	122	141	134	1186

1.4 沙尘天气的类型和移动路径

1.4.1 沙尘天气的类型

从这 44 年中青岛地区出现的沙尘天气分析来看，按照沙尘的源地和起因，青岛地区的沙尘天气大体可分为三种类型：

第一种是外地漂移型：单纯的由于上游地区出现沙尘天气，卷入高空的沙尘经西北气流的输送，在本地沉降，这种类型的天气以浮尘天气为主，在青岛出现的比较多，且影响范围较大，一般全地区都会受其影响，其中青岛市区发生的这种类型的沙尘天气有 144 次，占 68.6%。例如 2001 年 3 月 1 日、2002 年 3 月 19 日—22 日发生的浮尘天气等等。第二种是本地生成型：在青岛本地生成，影响范围比较小，强度比较弱，以扬沙天气居多，扬沙产生后在下游地区产生浮尘天气，其中青岛市区共有 54 次沙尘天气是这种类型的，占 25.7%。例如 2000 年 4 月 17 日、2001 年 5 月 28 日发生的扬沙天气等等。第三种是外地漂移在本地加强型：上游地区先出现沙尘天气，随着地面气旋一起移动，经过本地时将大量的沙尘带起，使沙尘天气得到发展和加强，这种类型在青岛市区发生的比较少，只有 12

次，占 5.7%。例如 2001 年 3 月 21 日—22 日发生的浮尘和扬沙天气过程就是这种类型。

1.4.2 沙尘天气的移动路径

沙尘天气出现时经常与气旋和冷空气相伴出现，一般影响的范围比较大，全地区都会不同程度地出现沙尘天气。移动路径大体有三个方向：

(1)偏北路径，冷空气来源于极地，以 120°E 为中心南下，经内蒙东部、东北地区后再影响我市。例如 2001 年 4 月 24 日发生的扬沙天气就是冷空气从蒙古国爆发后，携带沙尘从科尔沁沙地，过辽东半岛，最后影响青岛地区（图 1.6）。

(2)西北路径，冷空气来源于贝加尔湖以西的广大区域，经蒙古国、内蒙沙漠，东移经黄土高原、河北到达山东半岛影响青岛。例如 2000 年 4 月 7 日发生的浮尘天气就是冷空气从蒙古国爆发后，携带沙尘从浑善达克沙地西部，经张家口、北京、天津，最后影响青岛地区（图 1.6）。

(3)偏西路径，冷空气来源于我国新疆北部，经新疆、蒙古国、甘肃、河套地区、华北南部到达我市。例如 2002 年 4 月 3 日发生的浮尘天气就是冷空气从腾格里沙漠爆发后，携带沙尘从黄土高原，经河西走廊，过太原、邯郸、济南，最后影响青岛地区（图 1.6）。

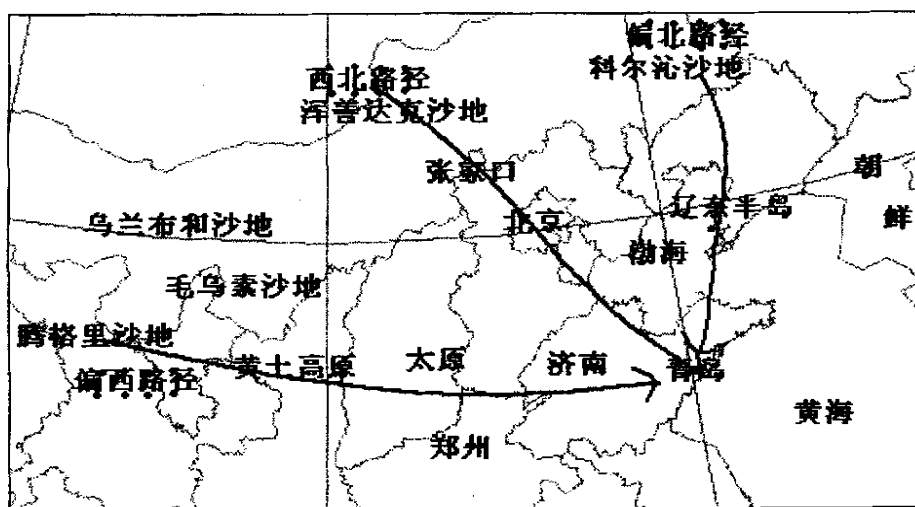


图 1.6 影响青岛的沙尘移动路径

据统计 1961~2004 年青岛站出现的沙尘天气，158 天中有 131 次是从外地移过来的，占 82.9%。其中西北路径沙尘最多，有 77 次；偏西路径次之，有 44 次；偏北路径沙尘最少，只有 10 次。

2 沙尘天气的成因机制

我国北方地区沙尘天气一般是由大、中、小三种不同尺度的天气系统相互作用形成的。大尺度天气系统表现为欧洲大槽东移,引发西西伯利亚强冷空气南下,经北疆东移形成大风。它的尺度为 3~4 天。这些系统可分为二类,一类为叠加在长波扰动上或平直西风带上的尺度为 2000~3000km 的短波系统,包括短波槽(高空槽)、切变线、低涡、地面对应锋面气旋(低压);另一类为几百公里至一千公里尺度的锋面上的小波动(气旋波)。中尺度天气系统为地面急行冷锋前飚线产生的强烈上升气流及环流系统。它的水平尺度在几十 km 至 100~200km,时间尺度在几小时之间。小尺度天气系统常称为对流尺度系统,它的水平尺度在 10km 以下,时间尺度在 1 小时以下,如雷暴、龙卷、积云单体等天气系统及冷锋前后仅地面层的小涡旋运动,它们对阵风起加大作用。

2.1 气候背景变化

沙尘暴发生的物理机制相当复杂,必须具备下面 3 个条件,即沙源、强风和大气层结的不稳定,三者缺一不可。其中,强风是不可少的动力条件;不稳定大气有利于强对流的发生和发展^[33]。

近 40 年来的气象记录表明,中国北方春季大风日数的增减与沙尘暴日数的增减是一致的^[31],东亚季风有明显的 10~50 年尺度的变化。亚洲冬季风与厄尔尼诺事件有密切关系,在厄尔尼诺年,冬春季大风天气较少,而在反厄尔尼诺年,大风天气出现频繁^[32]。20 世纪在 70 年代,反厄尔尼诺事件占优势,中国北方寒潮大风天气出现很频繁;在 80~90 年代,厄尔尼诺事件占优势,寒潮大风天气出现相对较少。到了 2000 年,正处于 20 世纪最强的一次厄尔尼诺事件以后的反厄尔尼诺事件的高峰期^[1],这一大范围的海洋—大气过程,其变化速度和强度均超过往年,造成近年来中国北方冬、春季寒潮大风的频繁出现,为沙尘暴的频繁发生提供了动力学条件。

一般中国北方大部分地区若 12 月—2 月干旱少雨,温度明显高于常年,土地植被覆盖减少;加之次年春季气温回暖较快,导致大地土壤含水率较低,土质疏松干燥,干热的地面加剧了西伯利亚与中国北部地区之间的气压差异,加强了冷空气的南下,同时使气旋频繁生成并急剧发展东移,产生风沙天气。

表 2.1 青岛 1999~2002 年冬季（上年 12 月到当年 3 月）降水量和气温统计

时间	降水量合计（单位：毫米）	平均气温（单位：℃）
30 年气候平均值	56.6	2.0
1999 年	8.0	4.1
2000 年	48.4	2.5
2001 年	66.6	3.0
2002 年	51.5	4.2

从表 2.1 中可以看出，青岛地区从九十年代末以来冬春季降水量基本上均比正常年份偏少，而这段时间的平均气温又高于常年，因而导致空气干燥，土壤蒸发较快，又正是一年中大风日数最多的季节，因此风沙天气也较多（图 2.1）。

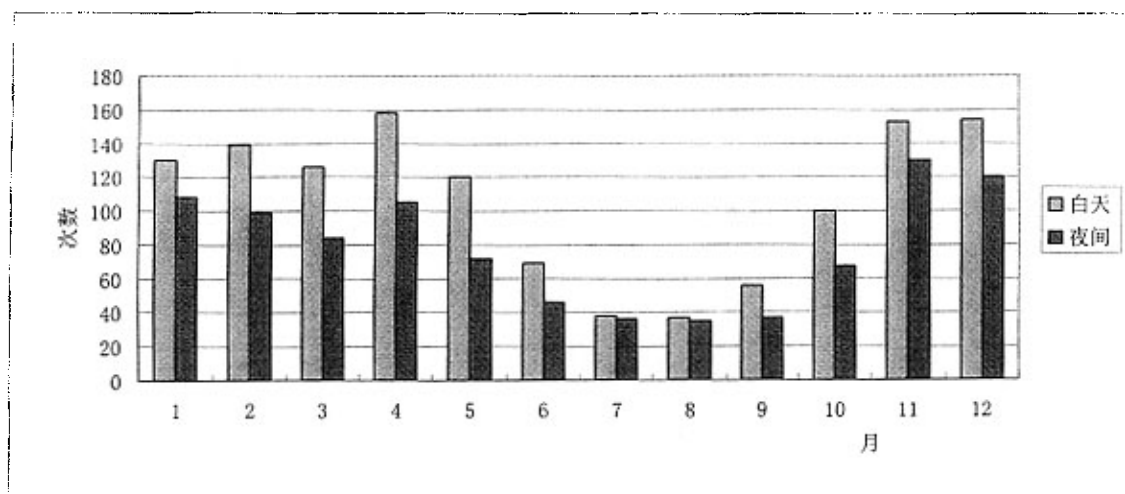


图 2.1 青岛市各月出大风日数 30 年合计

2.2 青岛地区沙尘天气形势分析

2.2.1 三条路径的天气模式

青岛地区的外来移动型沙尘天气一般都与冷空气活动有联系，但三条路径各自有着不同高空、地面天气模式。

(1)偏北路径，冷空气来源于极地，以 120°E 为中心南下，经内蒙东部、东北地区后再影响我市。这时高空冷涡位置偏北、偏东，地面上蒙古地区有一个高压，东北气旋位置偏北、偏东（图 2.2）。

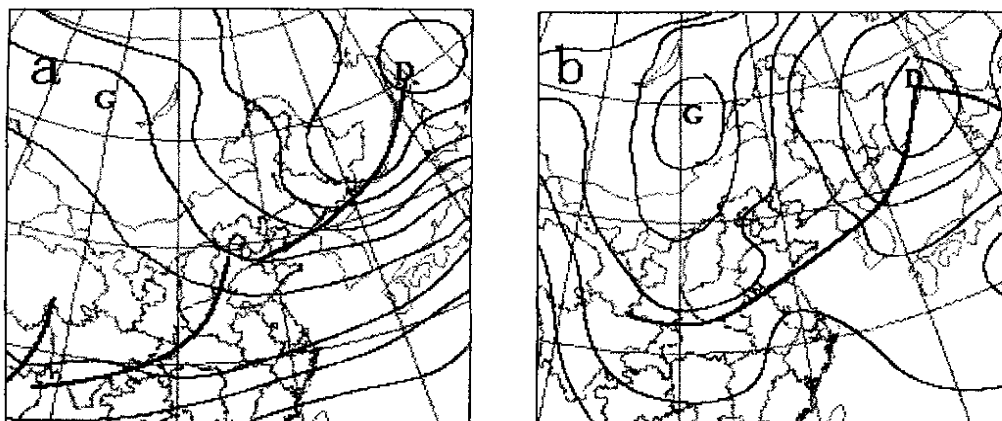


图 2.2 偏北路径沙尘天气的天气模式 (a: 500hPa, b: 地面)

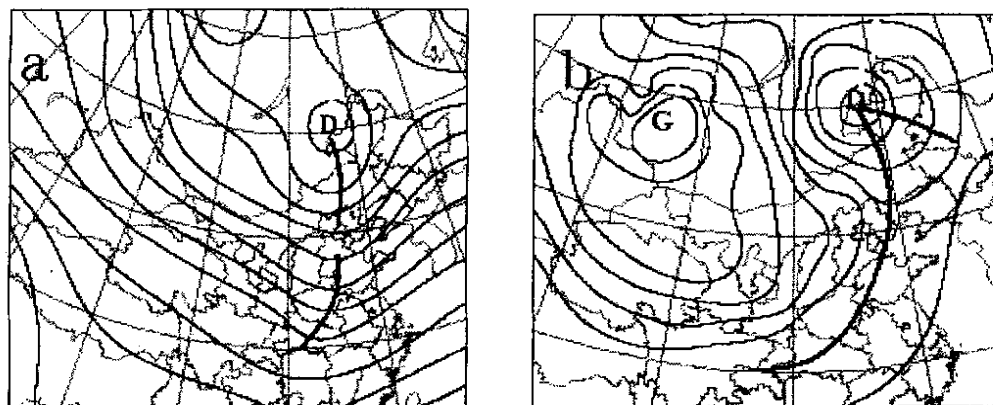


图 2.3 西北路径沙尘天气的天气模式 (a: 500hPa, b: 地面)

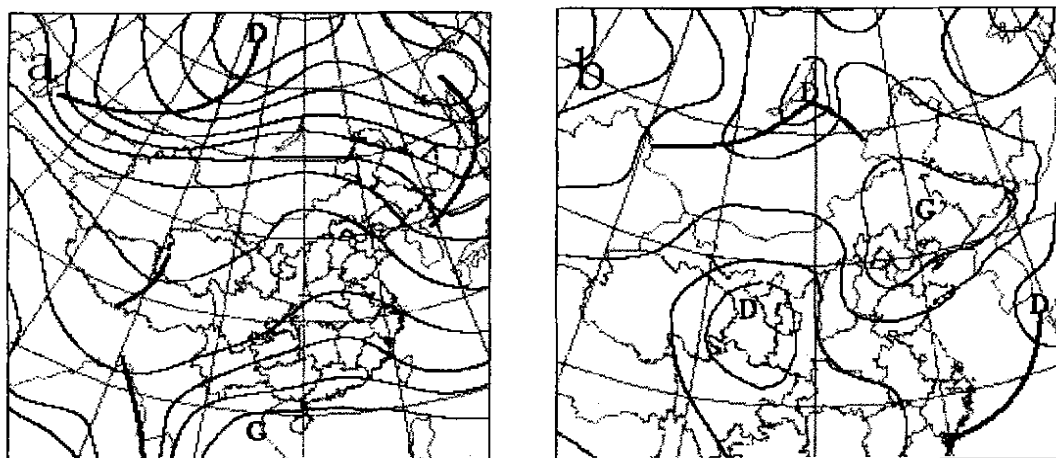


图 2.4 偏西路径沙尘天气的天气模式 (a: 500hPa, b: 地面)

(2)西北路径, 冷空气来源于贝加尔湖以西的广大区域, 经蒙古国、内蒙沙漠, 东移经黄土高原、河北到达山东半岛影响青岛。这时整个亚洲地区高空为一槽一脊, 东亚槽较深厚, 位置在 120°E 附近, 地面上冷高压中心在蒙古国西部, 蒙古

气旋中心进入内蒙北部（图 2.3）。

(3)偏西路径，冷空气来源于我国新疆北部经新疆、蒙古国、甘肃、河套地区、华北南部到达我市。这时亚洲中高纬度为两槽一脊型，东亚槽在 130°E 以东，高原上空有南支槽，地面上高原东部有热低压发展东移（图 2.4）。

2.2.2 高空环流形势

青岛地区沙尘天气的出现与高空大气环流形势密切相关。一般在 500hPa 高空环流形势图上，亚洲东部沿海地区是一稳定的深槽区，亚洲西部是一个稳定的高压脊，中国北方正处于脊前槽后的西北气流下，这股强劲的西北气流将俄罗斯新地岛附近的寒冷空气源源不断地向东南方向输送，这也是中国北方出现沙尘天气时典型的高空环流形势。前一章已经提到，青岛地区的外来移动型沙尘天气主要以西北路径为主。下面就根据不同的天气形势，对西北路径的两个沙尘天气过程做出个例分析，找出其成因机制。

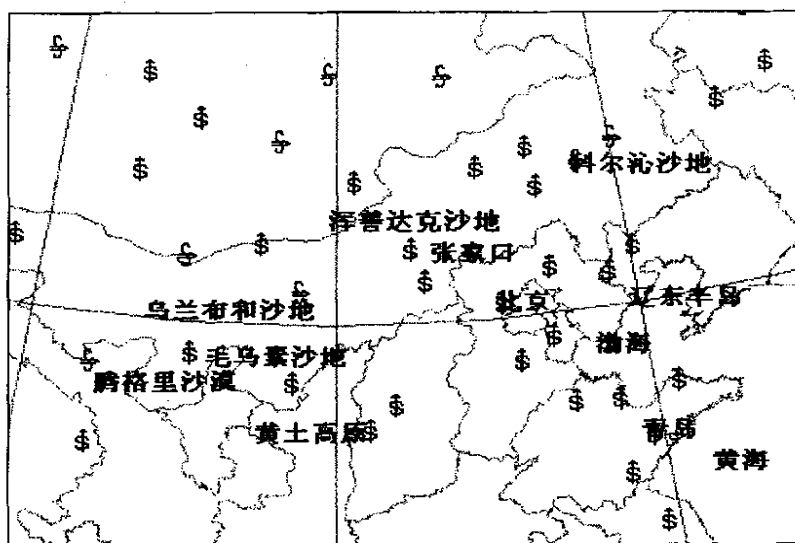


图 2.5 2000 年 4 月 4-8 日中国东部发生沙尘的区域（图中 '\$' 指扬沙， '\$\$' 指沙尘暴）

2000 年 3 月份以来冷空气活动异常频繁，同时伴有温带气旋在内蒙古到东北一带强烈发展，导致风力显著加大。生成于蒙古地区的蒙古气旋，由于源地水汽少，下垫面较干燥，当气旋发展较强时，则在其周围出现大范围的大风天气，在蒙古中西部以西北风为主。当蒙古气旋进入东北后，往往强烈发展，此时在华北、东北、内蒙南部均会出现大风天气。其中 4 月 4 日在华北出现扬沙和浮尘，内蒙古中西部出现沙尘暴天气，风力达 5-7 级，阵风达 8-9 级。4 月 6 日的沙尘天气最

为强烈，内蒙古、河北、辽宁西部、京津地区普遍出现了拌有扬沙或沙尘暴的天气，风力达 5-7 级，阵风为 8-10 级的偏北大风，北京地区出现了严重的扬沙或局地沙尘暴天气。随着蒙古气旋向东移动沙尘天气也随着冷空气向东南移去，到 4 月 7-8 日青岛出现大风扬沙天气（图 2.5）。

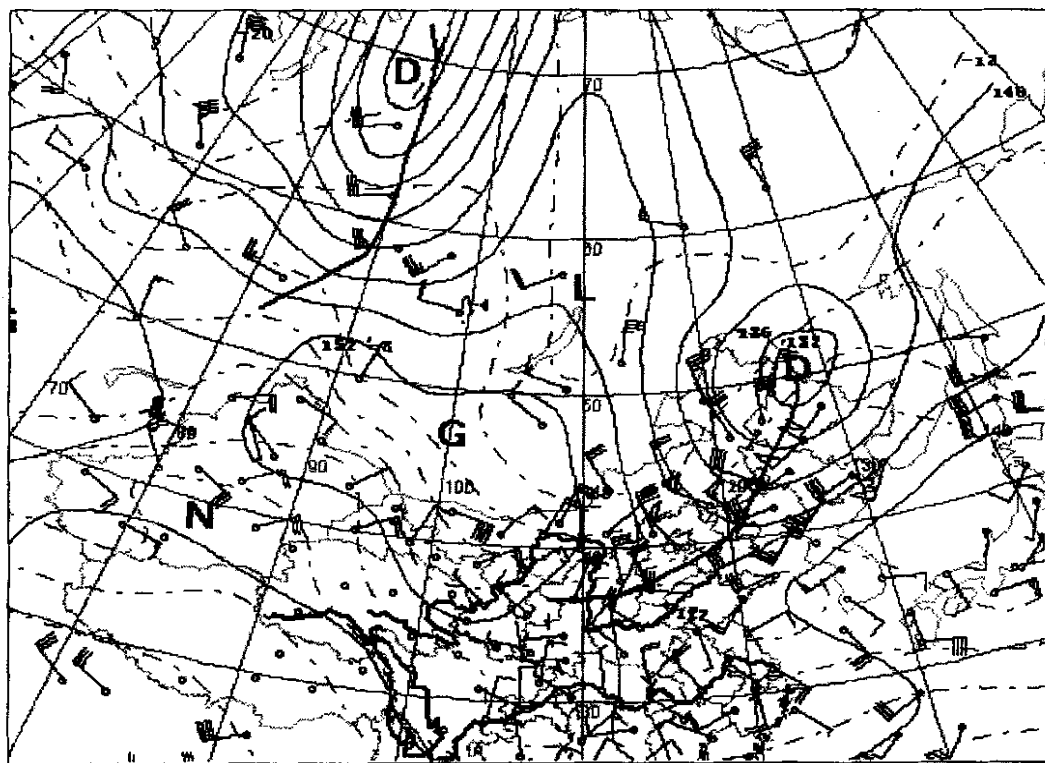


图 2.6 2000 年 4 月 4 日 08 时 850hPa 高空图

4 月 4 日 08 时，850hPa 上低涡中心位于 49°N ， 129°E 附近，等高线密集，位势梯度较大。槽线位于长春—济南—西安一线。槽后贝加尔湖附近有一强冷中心，此冷中心与地面冷高压相对应。在冷中心周围等温线密集，温度梯度较大，槽后风向与等温线垂直，表明有很强的冷平流，有利于槽的强烈发展。850hPa 高空槽后以西北风、偏北风为主(图 2.6)，平均风速 16m/s，最大风速 20m/s。北京站位于槽后，风速达 20m/s。在北京上游，西北—东南向一线各站，张家口、二连浩特、乌兰巴托均为西北风，风速平均 12m/s。低涡的东南象限有 26m/s 的偏南大风区，表明气旋前部有非常强的气压梯度。700hPa 图上，低涡中心位于 50°N ， 125°E 附近，中心值为 2809 位势米，冷中心位于贝加尔湖附近，中心最低值为 -22°C 。等高线与等温线均比较密集，槽前西南气流风速最大为 24m/s，槽后平

均风速为 18m/s ，最大风速达到 20m/s ，存在较强的冷平流(图 2.7)。

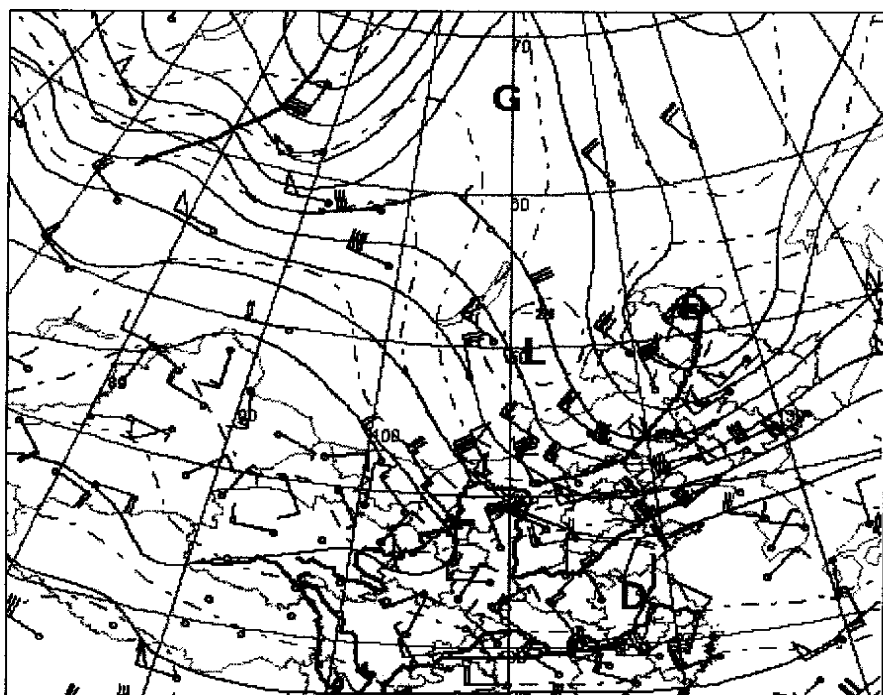


图 2.7 2000 年 4 月 4 日 08 时 700hPa 高空图

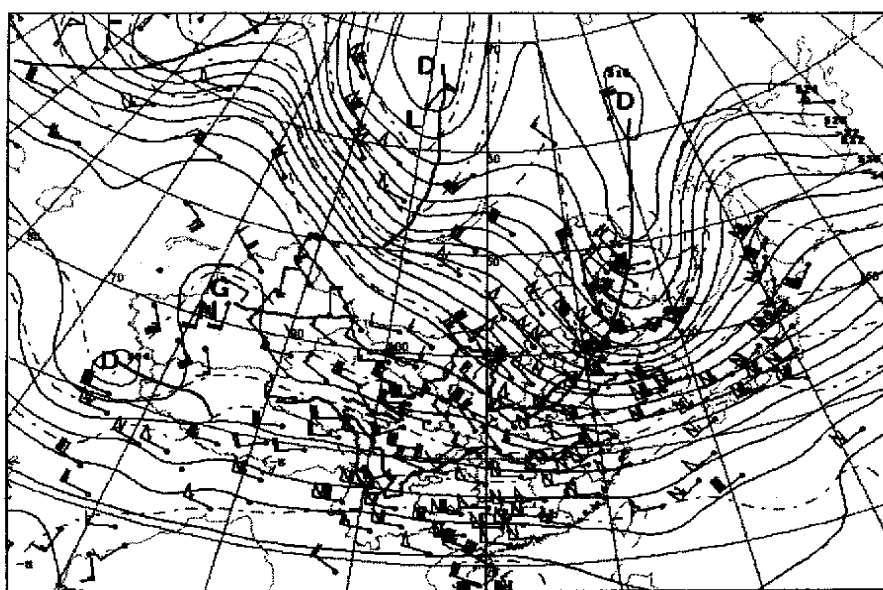


图 2.8 2000 年 4 月 5 日 08 时 500hPa 高空图

在 5 日 08 时 500hPa 的高空天气图上 (图 2.8)，西部的西北-东南走向的脊区位于巴尔喀什湖东北部附近，东部南-北走向大槽位于大兴安岭西南侧至华北平原北侧，槽后有一个 -38°C 的冷中心。5 日 20 时在 32°N 以北，亚洲大陆的上空，天气系统呈现两槽一脊型，在 32°N 以南，均为西风气流(图 2.9)。

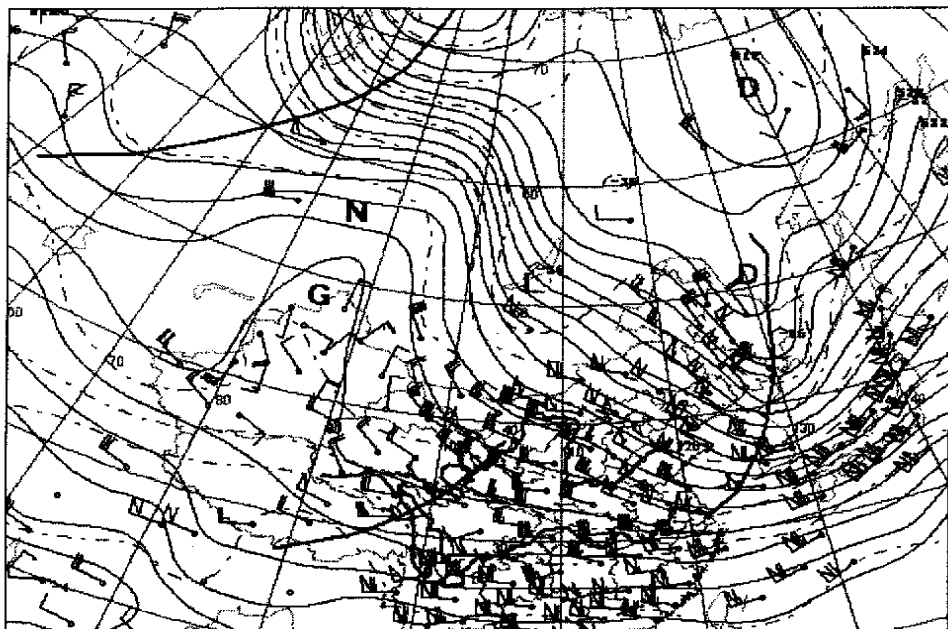


图 2.9 2000 年 4 月 5 日 20 时 500hPa 高空图

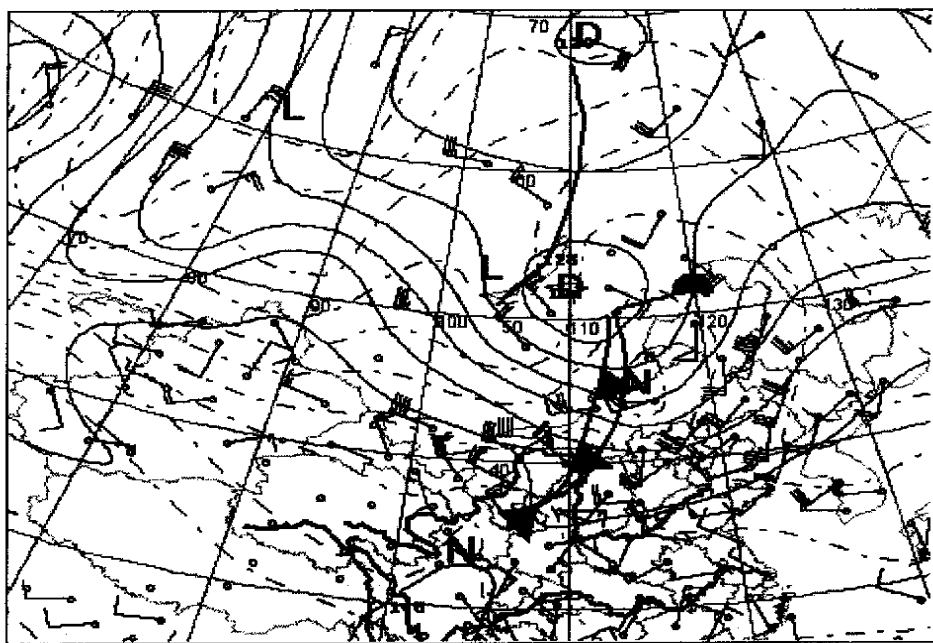


图 2.10 2000 年 4 月 6 日 20 点 850hPa 高空图

到了 6 日 20 时 850hPa 图上有一槽线位于培母沙戈布拉克—张家口西安一线 (图 2.10), 槽线与地面锋线配合较好, 上下位置偏差不大, 这种情形利于动量下传, 形成地面辐散大风。850hPa 图上低涡中心位于贝加尔湖南部, 低压中心后有一冷中心, 槽后西北风与等温线垂直, 不断输送冷空气, 有利于槽加深。850hPa 图上内蒙古中部的风速很大, 二连浩特风速最大, 达 30m/s, 上游平均风速 20m/s。

500hPa 图上槽线后部为大于 32 m/s 的西北大风区,二连浩特风速最大,达 45m/s(图 2.11), 强劲的空中风使沙尘迅速向前方扩展。

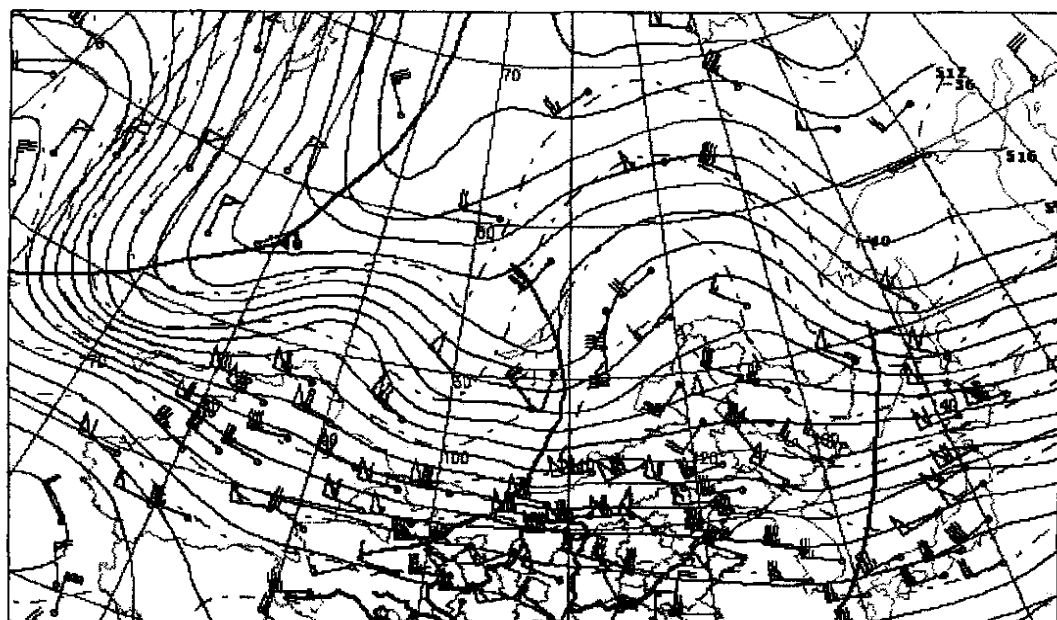


图 2.11 2000 年 4 月 6 日 20 点 500hPa 高空图

从上述高低空流场形势分析看到, 蒙古国高空较强的西北气流带和与之相配合的地面西北风, 都有利于沙尘向东南方向的输送。随着高空和地面系统的东移, 输送带也逐渐东移。这种天气形势和流场分布在近几年沙尘天气特别是沙尘暴期间经常出现, 容易造成沙尘向华北平原以及广大下游地区的远距离输送。同时由于气候异常, 华北、东北、内蒙古地区与往年同期相比温度偏高, 降水偏少, 下垫面干燥加上上述的偏北大风是形成沙尘暴天气的主要原因。

2.2.3 地面影响系统

2001 年 4 月 8~9 日沙尘暴过程是 2001 年西北地区发生的一次大范围沙尘暴天气。沙尘随着冷空气东移南下, 于 10~11 日在青岛出现了连续两天的扬沙天气。

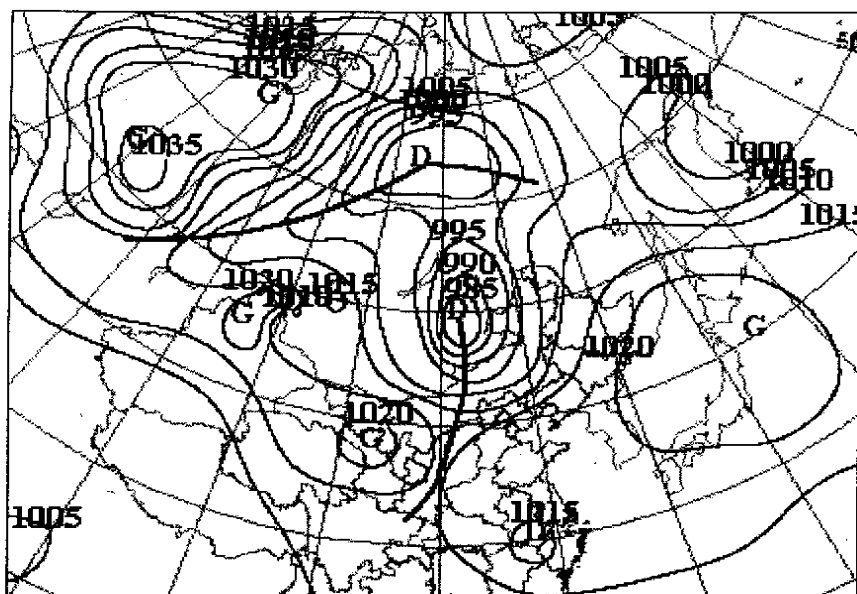


图 2.12 2001 年 4 月 6 日 20 时海平面气压场

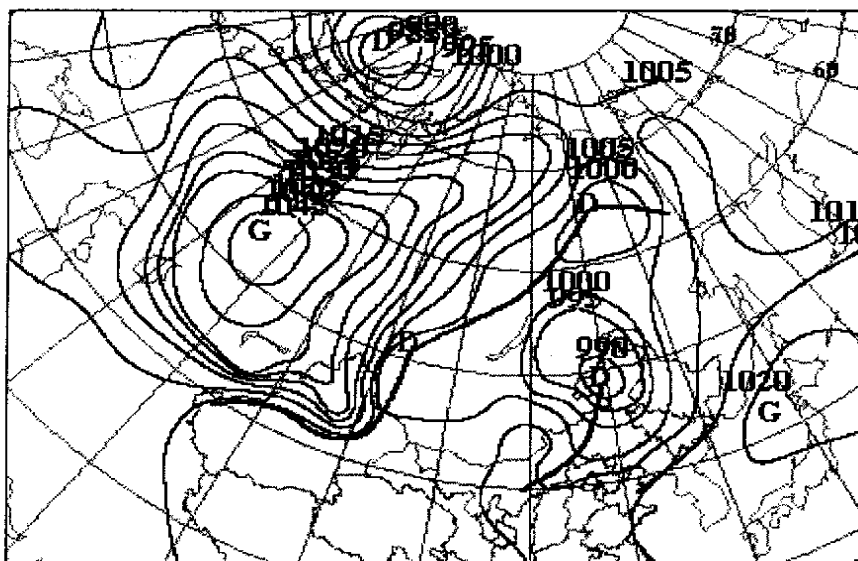


图 2.13 2001 年 4 月 7 日 14 时海平面气压场

6 日 20 时, 新地岛以北的冷空气沿乌山脊南下加强时, 西西伯利亚冷高压形成并东移, 其前部的地面冷锋位于巴湖附近 (图 2.12)。7 日 08 时冷高压东移加强, 中心值达到 1032hPa, 地面冷锋移到新疆西北部, 冷锋前后, 气压梯度加大。到了 14 时, 冷中心在国境线附近, 强度加强, 其前部冷锋迅速东移南下, 进入北疆, 沿天山一线。锋后奇台站 (51379) ΔP_3 达 10.2hPa, 河西西部与天山北部 ΔP_3 差最大达 12.2hPa, 北疆部分地区出现了大风天气 (图 2.13)。7 日 20 时, 冷锋翻越天山, 北段移速较快先进入内蒙古西部, 南段移速缓慢位于天山南部, 锋后

新疆东部至内蒙中西部，风力较大，并出现了沙尘暴天气。8日05时（图2.14），锋面已进入河西走廊，冷锋附近 ΔP_3 差达7.0 hPa，与此同时，一部分冷空气从天山南麓灌入南疆东部，并迅速影响柴达木盆地北缘，锋后 ΔP_3 差达6.5 hPa，这时南疆冷空气东移，青海北部出现了大风、沙尘暴天气，能见度急剧下降。到8日14时，锋面快速移至宁夏、甘肃南部，9日冷空气继续东移，20时锋面到达青岛，引起青岛地区10~11日连续两天出现了扬沙天气（图2.15）。

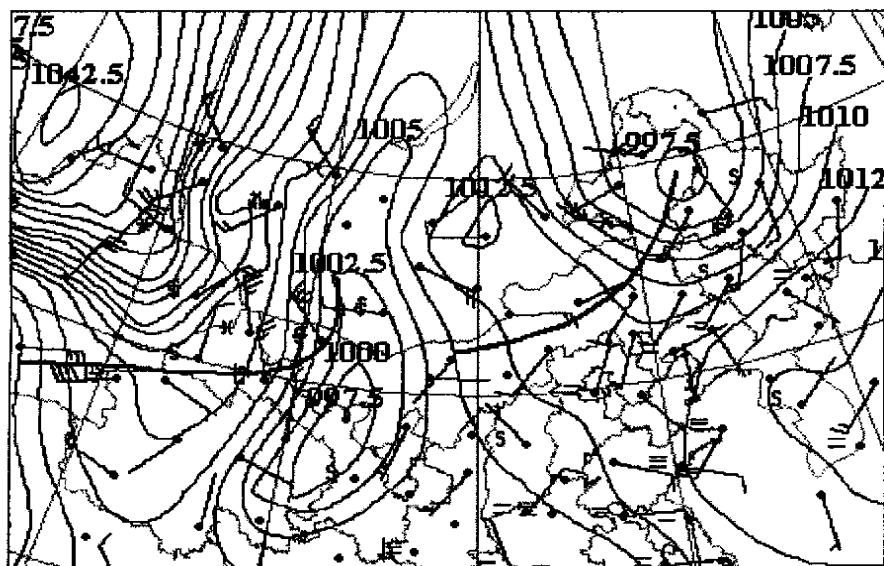


图2.14 2001年4月8日05时地面图

（图中S代表浮尘， $\odot$ 代表扬沙， $\odot\cdot$ 代表沙尘暴，下同）

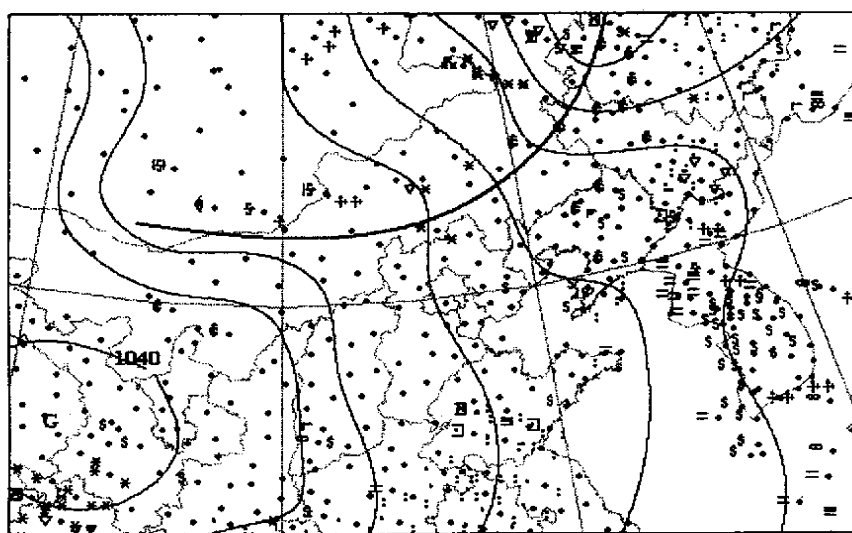


图2.15 2001年4月11日14时地面图

因此，青岛地区西北路径的沙尘天气一般与蒙古气旋和冷锋相联系，沙尘随

着气旋南部的冷锋从内蒙经过华北向青岛吹去。

2.3 人为因素

人类社会活动严重地破坏了植被和地表结构,使地表疏松干燥,抗风蚀能力大幅下降,生态环境日益恶化,使昔日一些森林茂密、水草丰美的地方,今已成为风沙活动频繁的严重沙漠地区。一旦强冷空气过境,大风形成,岂不是扬沙千里。例如位于新疆的塔里木河下游的绿色走廊,古代为“丝绸之路”行经之地,又是沟通南北疆的要道。两千多年前的汉代,在塔里木河下游曾是幅员辽阔、人口上万的楼兰古国和后来的鄯善国,作为通往南疆的一条驿道,当时尚有一定规模的农牧业生产。百年前塔里木河下游也曾是森林茂密,水草丰美,野兽成群,农牧业并存的地方,到了上世纪 40 年代那里还是一片牧场。50 年代以后,特别是 70 年代,由于农垦中重农轻林,农林牧比例失调,加之不合理的经济开发,严重地破坏了原有的天然植被。严重的撂荒弃耕,垦区边缘沙漠化现象日趋严重,导致生态环境的裂变,使本来就很脆弱的生态平衡遭到破坏,沙漠化的过程日益加剧。近年来,被当地人称之为“迷魂阵”的沙尘暴天气频繁发生。

近几十年来,随着人口数量的急剧增加和经济的不断发展,对自然资源的需求以及滥垦、滥牧,全国牲畜占有草地面积从上世纪 60 年代每头牲畜占有 6.2ha^2 ,下降到 90 年代末的不足 2ha 左右³、滥樵和对水资源的不合理应用等等,使地表植被和土壤遭到破坏,风蚀作用加强,对半湿润、半干旱地区和干旱荒漠绿洲带荒漠化加速发展起到了推波助澜的作用。荒漠化的持续发展,为沙尘天气提供了丰富的“沙尘源”。

另外春季正是各地建筑业开工的日子,由于气候干燥,市区内裸地虽不多,但是被覆盖后的路面上仍有大量的浮尘处于游离状态,有较大的风力就会被风吹起,尤其是大量建筑工地的尘土随风四处飘散,这也是市区内沙尘的主要来源。

² ha: 公顷。1 公顷=15 亩

³ 卢欣石,中国草地荒漠化问题与出路,中国科协 2002 年减轻自然灾害研讨会论文集汇编,2002,1

3 一次强沙尘暴过程的天气分析与数值模拟

3.1 概述

从2002年3月18日至22日,我国北方地区自西向东经历了20世纪90年代末期以来最强的一次较大范围的大风、特强沙尘暴、扬沙、和浮尘天气过程,席卷了北方140万 km^2 ,120多个县的428万亩耕地和3540万亩草地,影响人口达1.3亿(图3.1)。这次沙尘暴天气过程影响范围之广,使我国长江以北几乎所有地区均有不同程度遭受沙尘天气的影响,南京、武汉等一些南方城市,甚至相邻的韩国也都受到了不同程度的影响。据韩国环境部的观测,21日汉城天空中微细灰尘的含量 $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$,已超过平常时候的17倍,是历史上的最高纪录,能见度仅有1.2公里。

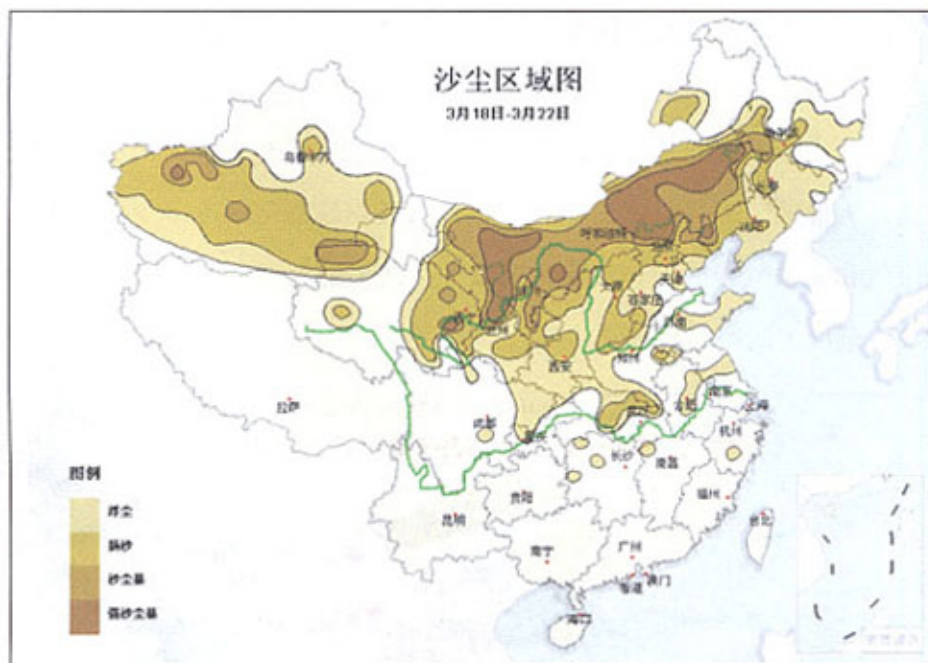


图 3.1 2002 年 3 月 18 日-22 日我国受沙尘天气影响的区域

这是我国20世纪90年代末期以来出现的一场罕见的大范围、持续时间较长、区域性较强的一次沙尘暴天气过程。从3月18日下午5时到21日上午8时,新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、吉林、黑龙江以及山东、河南、湖北、湖南西北部、四川东部等地先后出现了大范围的沙尘天气,在新疆西部和北部、内蒙古大部、甘肃中部、宁夏、河北北部、京津地区和东北南部等地出现了强沙尘暴;其中,甘肃鼎新、金昌等地还出现了罕见

的特强沙尘暴；甘肃鼎新、内蒙古乌拉特后旗的能见度几乎为零。

随着沙尘的向东扩散，它逐渐影响了我国的东部地区，致使青岛市连续出现 5 天浮尘天气，能见度最低还不到 2 公里，这是近 10 年以来较强的一次浮尘天气，并伴有 6 级偏北大风和短时的扬沙天气出现。据青岛市环境监测站检测，3 月 21 日的 PM_{10} (可吸入颗粒物) 污染指数为 470，达到国家 5 级污染标准，与正常天气相比上升了 4 倍；TSP(空气总悬浮微粒) 由沙尘发生以前平日的 $172\mu g/m^3$ 变为 $721\mu g/m^3$ ，已经超过了平均污染量的 4 倍，这也接近历史极值。这次沙尘天气给我市的工农业生产、交通运输以及人民生活带来了极大的不便。

导致这次强沙尘暴天气的因素主要有两个：一是气象条件。入春以后，受南方暖气团影响，北方地区气温普遍升高。与此同时，北方又是冷空气活动极为频繁的地区，强冷空气与暖气团交汇后形成气旋，沙尘正是被气旋中心的垂直上升气流卷起并携带到空中的。二是地面条件。蒙古国及我国内蒙古、宁夏、新疆等地广袤的沙漠和沙地，是形成沙尘暴的主要沙尘源。由于 2001 年冬季到 2002 年春季北方大部地区干旱少雨，“暖冬”气候又使得这些地区冻土少而沙土多，加之强冷空气和蒙古气旋的综合影响，导致这次沙尘暴天气过程与往年相比，呈现出范围广、强度大的明显特征。

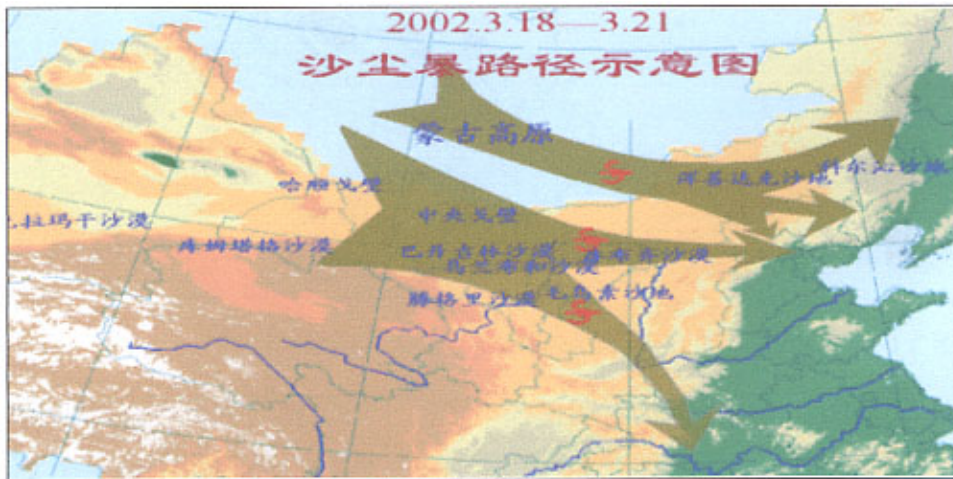


图 3.2 2002 年 3 月 18-21 日沙尘暴移动路径示意图

3.2 过程简介

这沙尘暴天气过程的初始源区位于哈萨克斯坦、俄罗斯，在蒙古国中南部戈壁地区得以加强（图 3.2）。国内监测站于 19 日凌晨 02 是在新疆的哈密首先发现

沙尘迹象，中午 11 时甘肃河西走廊、内蒙的阿拉善盟开始出现浮尘和扬沙天气，其中，民勤、永昌出现沙尘暴天气（图 3.3）。下午 14 时沙尘到达兰州，当天 20 时，沙尘暴到达银川（图 3.4），沙尘来源从巴丹吉林沙漠扩展到腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地。到了 20 日 08 时，沙尘区明显向东偏移（图 3.5），内蒙的乌兰察布盟和锡林郭勒盟、山西、陕西都出现了大范围的沙尘暴、扬沙和浮尘天气，沙尘来源也从内蒙古西部沙漠地区转移到内蒙古中东部的浑善达克沙地和周围戈壁沙地，以及黄土高原。中午沙尘粒子开始影响北京，14 时沙尘天气已对京津地区产生非常强的影响（图 3.6），当时北京沙尘气溶胶的浓度为 $1500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙尘粒子从天津进入渤海，部分沙尘粒子通过高空气流的输送到达青岛，并从青岛进入黄海。下午 17 时，沙尘天气的影响范围继续向南北扩展，北部由于蒙古国沙尘天气的又一次入侵，使得我国东北地区沙尘天气范围扩大、强度增强；南部由于黄土高原上大量微细颗粒的加入，使沙尘天气继续向南延伸，四川、湖北等地出现了大范围浮尘、扬沙天气（图 3.7）。21 日 08 时，辽东半岛的大连、营口和山东半岛的烟台、威海、青岛等许多沿海城市都出现了沙尘天气，邻国的朝鲜和韩国境内也出现了大范围的沙尘区（图 3.8）。14 时，沙尘粒子从辽东半岛、天津、山东的烟台、威海等沿海城市进入渤海，从青岛和朝鲜半岛西部进入黄海，从上海进入东海。部分沙尘粒子从朝鲜半岛东部和南端进入日本海和朝鲜海峡（图 3.9）。同时，在我国青海东部、蒙古国中南部和内蒙的锡林郭勒盟又出现了一次沙尘暴天气过程。晚上 20 时（图 3.10），原沙尘区开始减小并继续向东移动，进一步影响到朝鲜海峡和日本西部沿海的一些城市，更多沙尘粒子进入日本海。到了 22 日 08 时，除了黄土高原和我国北部部分沿海城市上空还飘着沙尘粒子外，其它广大地区的沙尘天气已经结束，沙尘天气从我国转向朝鲜半岛和日本。朝鲜和韩国几乎所有的城市都出现沙尘天气，日本北部和南部的广大区域也出现了大面积的沙尘天气（图 3.11）。22 日 17 时，除黄土高原上的部分城市外，我国其它地区的沙尘天气已基本结束。

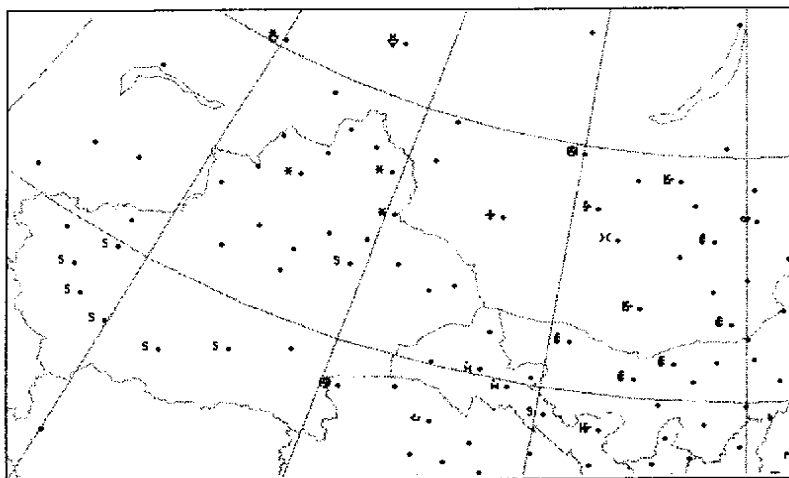


图 3.3 2002 年 3 月 19 日 11 时地面天气现象

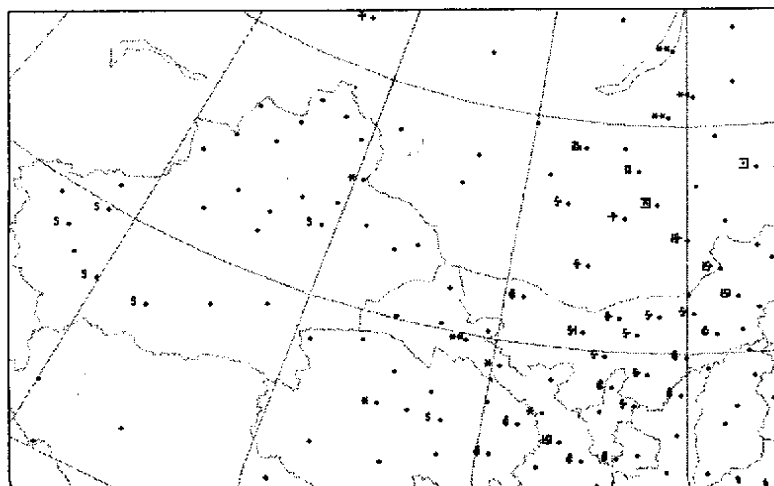


图 3.4 2002 年 3 月 19 日 20 时地面天气现象

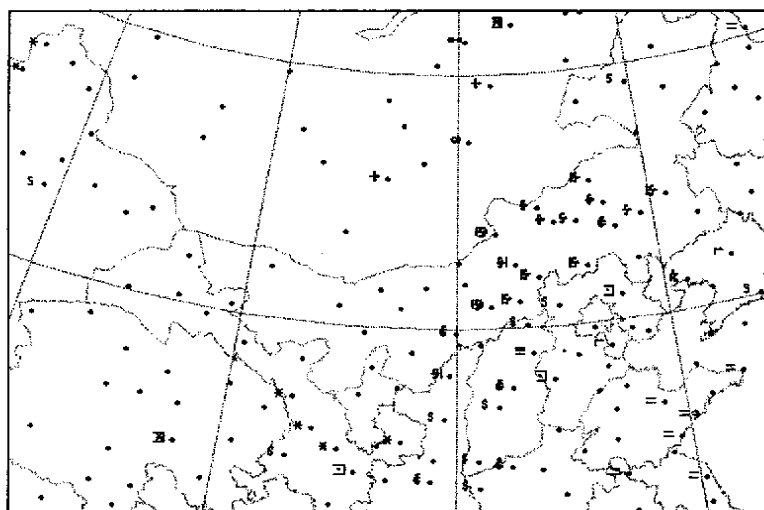


图 3.5 2002 年 3 月 20 日 08 时地面天气现象

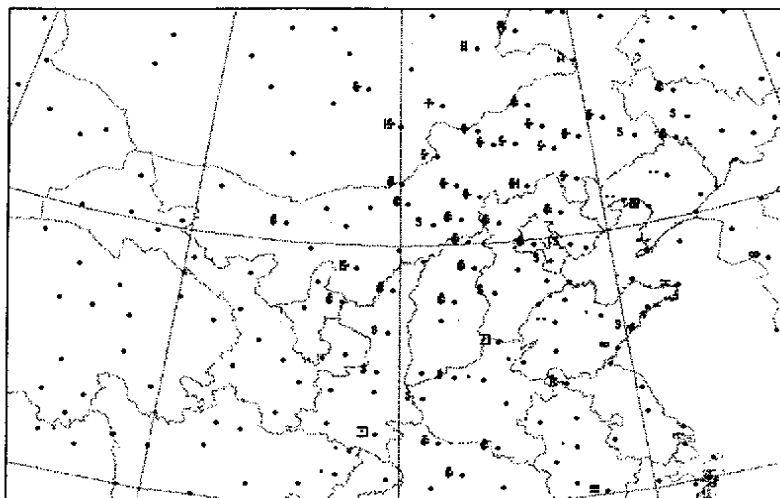


图 3.6 2002 年 3 月 20 日 14 时地面天气现象

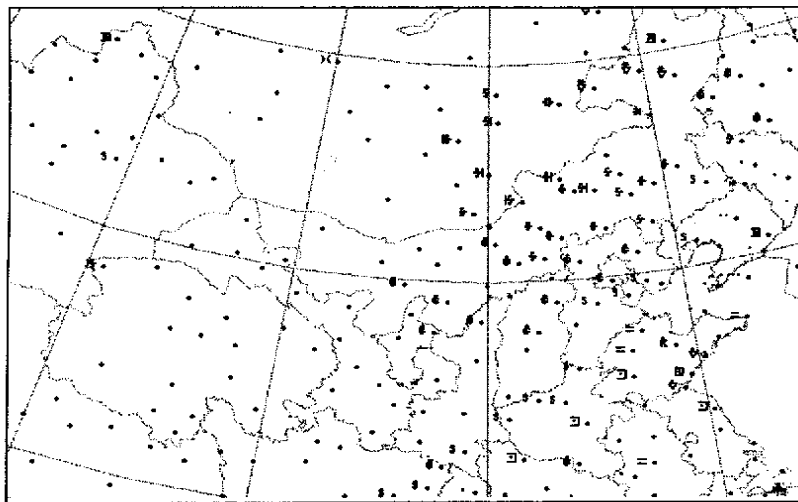


图 3.7 2002 年 3 月 20 日 17 时地面天气现象

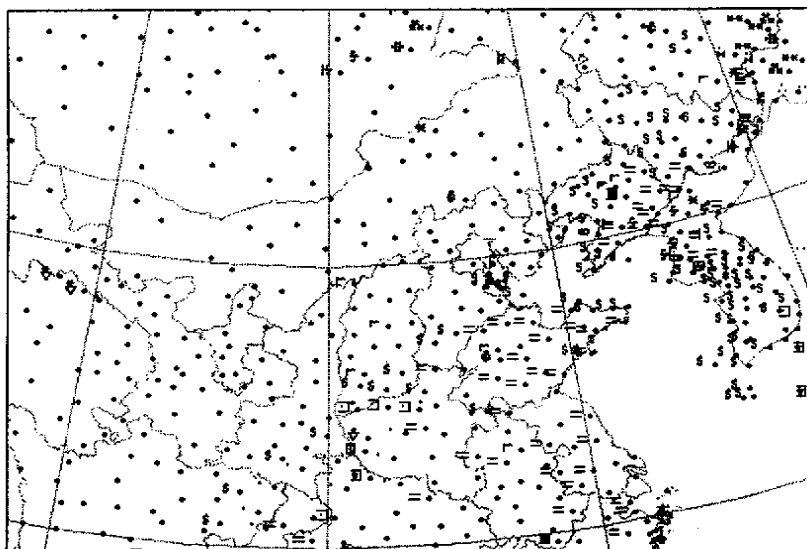


图 3.8 2002 年 3 月 21 日 08 时地面天气现象

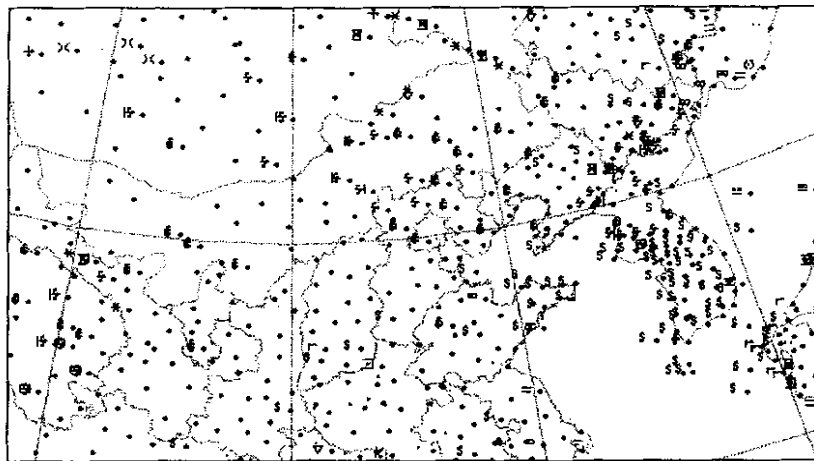


图 3.9 2002 年 3 月 21 日 14 时地面天气现象

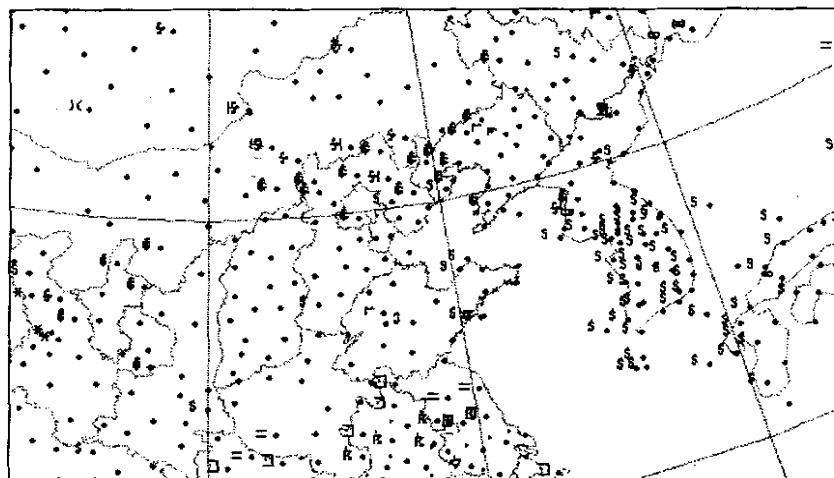


图 3.10 2002 年 3 月 21 日 20 时地面天气现象

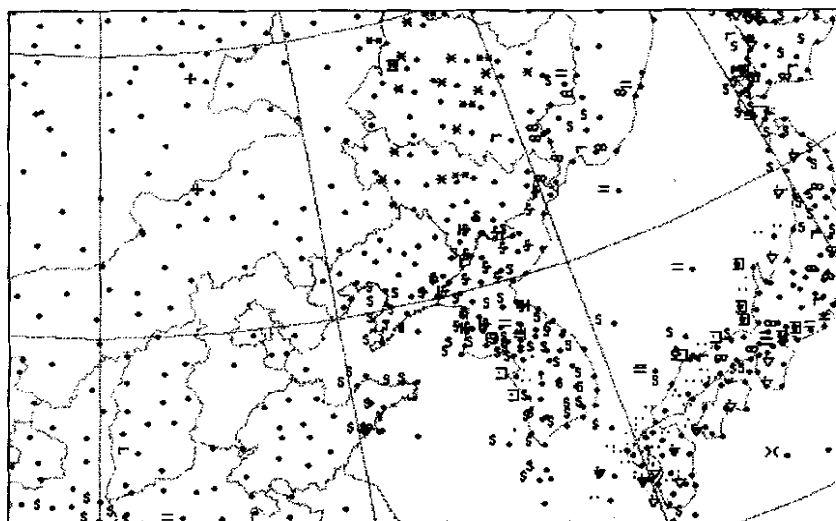


图 3.11 2002 年 3 月 22 日 08 时地面天气现象

3.3 天气形势分析

3.3.1 前期气候背景分析

2001 年冬天至 2002 年春天,我国北方地区气温偏高,降水稀少,特别是西北地区降水量普遍较常年偏少,而平均气温又创历史极值,从而造成土壤含水率低,土壤解冻的时间比往年提前,加速了土壤水分的蒸发和地表干土层的加厚,为此次沙尘暴的发生提供了有利的气候背景和环境场。

3.3.2 高空、地面场分析

3.3.2.1 大尺度环流形式调整

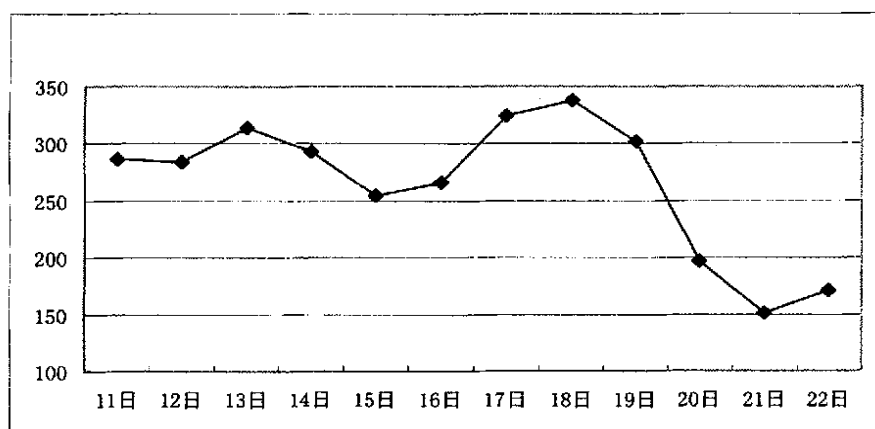


图 3.12 2002 年 3 月中下旬逐日亚洲西风环流指数

沙尘暴天气的发生总是伴随着一次大尺度环流的调整过程。从亚洲西风环流指数演变反映来看,3月中旬中期,亚洲地区西风环流指数呈上升趋势,到18日达到最高值338,19日开始大幅下降,环流经向度明显加大,槽脊发展,有利于冷空气活动,21日下降到最低点151(图3.12),西风环流指数经历了一次由高值向低值演变的过程,此次沙尘暴天气过程正好发生在纬向环流向经向环流调整的过程中。

3.3.2.2 高空环流形势

3月17日08时500hPa图上欧亚地区中高纬度为两槽两脊型,乌拉尔山及贝加尔湖附近各为一低压槽,两槽之间为宽广的高压脊,乌山西部有高压脊发展,脊前有冷空气从新地岛南下;到了18日08时,随着系统有规律的东移,乌山低槽东南移至西西伯利亚附近,由于中亚脊的阻挡作用,冷空气在西西伯利亚堆积加强,形成深厚的高空冷槽和较强的锋区,冷中心达 -44°C ;20时,冷槽加深东

移南压进入新西伯利亚地区，冷槽底部在巴湖到北疆附近形成一支风速大于 20m/s 的强西风急流带，最大风速达到 46m/s（图 3.13）。对应 700hPa，在新西伯利亚地区也有一个冷的低压槽，锋区较强，其前锋已进入北疆，温度槽明显落后于高度槽，槽后冷中心强度为 -29°C （图 3.14），说明有较强的冷平流向南发展。19 日 08 时 500hPa 层（图 3.15）上中纬度维持两槽一脊，脊在贝湖以东，主体冷空气向东南爆发，冷槽移至蒙新一带，槽后有较强的 24h 负变温中心和强西北气流，对应 700hPa（图 3.16），锋区移到蒙古至河西走廊附近并再度加强，温度梯度非常密集，温度场与高度场交角几乎成 90° ，形成强力管；19 日 20 时，强冷空气南下，冷中心移至河套西北部，河西至河套处于槽底强西风急流区里，对应 700hPa 强锋区已完全进入河套，最大风速达 28m/s。20 日 08 时 500hPa 变为一槽两脊型，低压槽移至 110°E 内蒙古的阴山上空，高压脊也移到了原来槽的位置。到 21 日 08 时（图 3.17），在我国的大兴安岭和东北平原形成了闭合的阻塞低压，其南部等高线密集，高空偏西气流十分强大，最大风速为 54m/s。20 时冷空气主体完全南下，本次影响青岛的沙尘天气已完全结束。

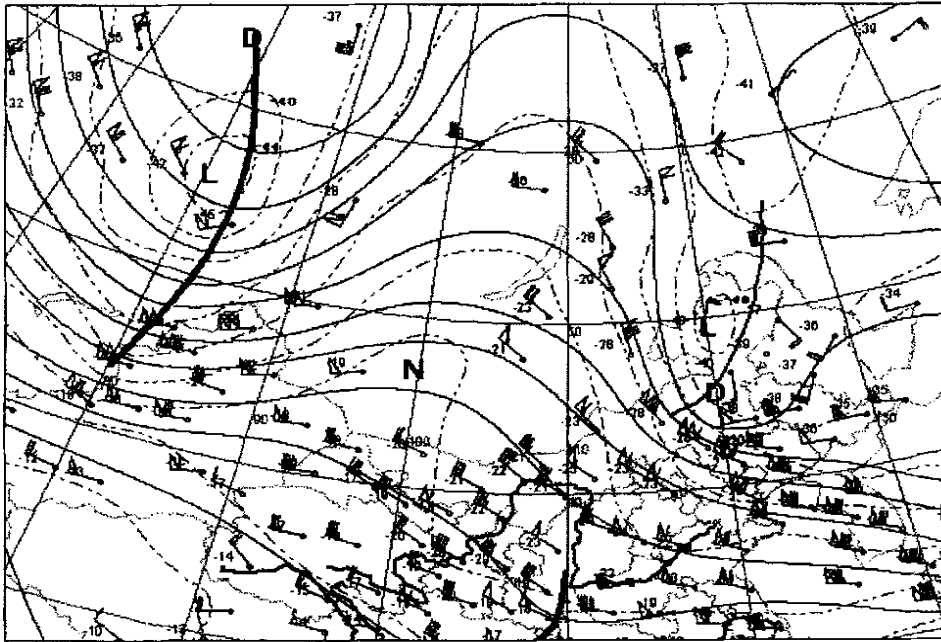


图 3.13 2002 年 3 月 18 日 20 时 500hPa 高空图

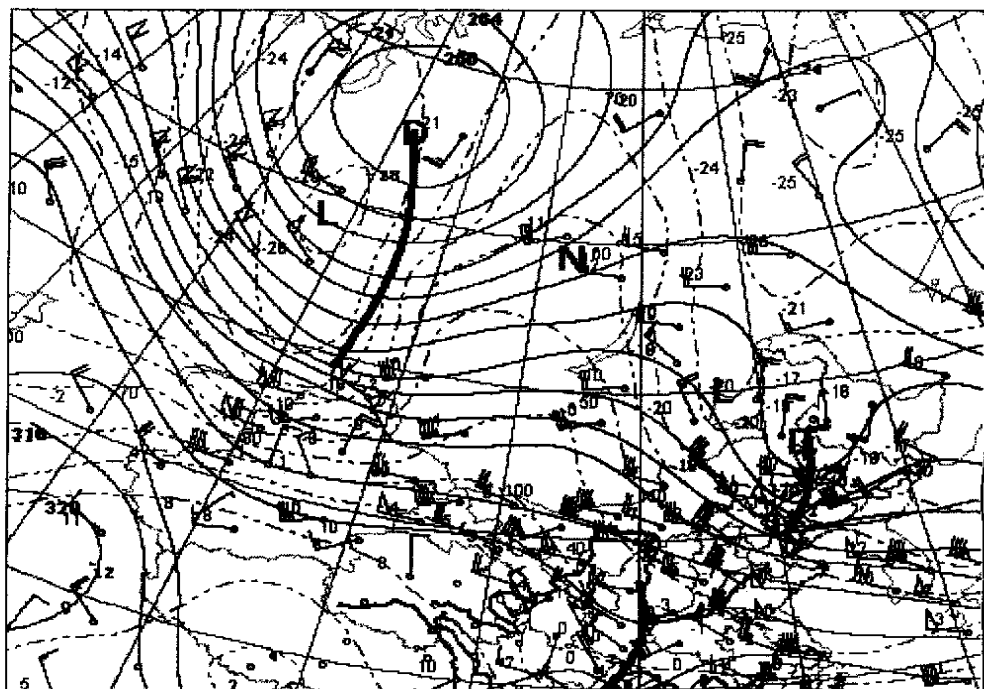


图 3.14 2002 年 3 月 18 日 20 时 700hPa 高空图

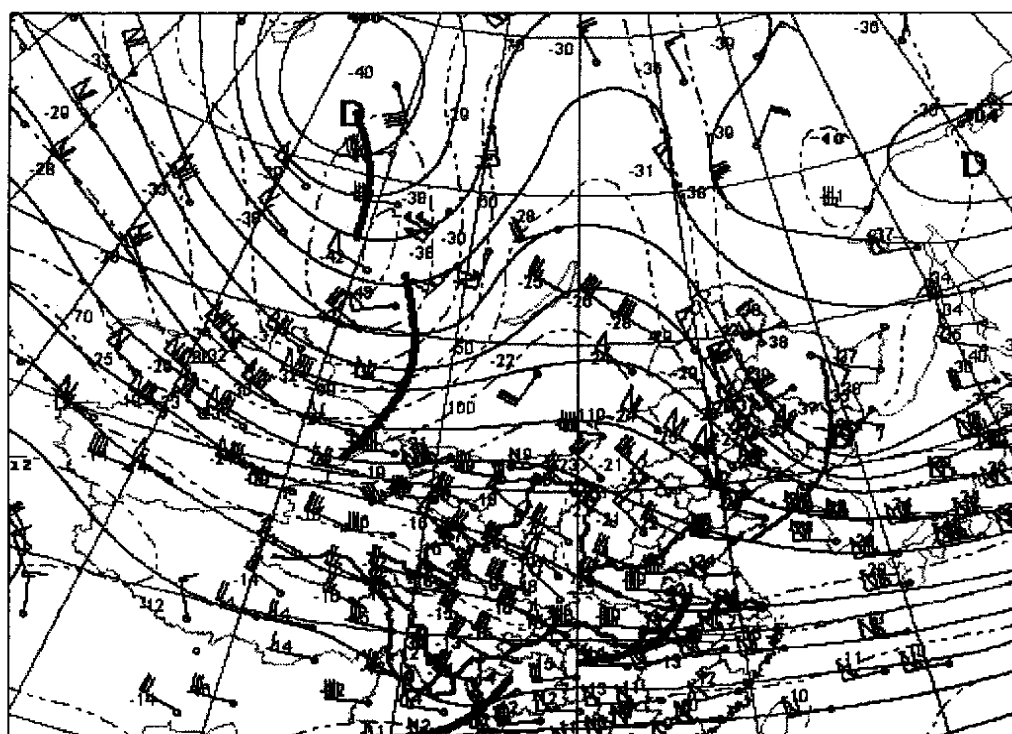


图 3.15 2002 年 3 月 19 日 08 时 500hPa 高空图

3.3.2.3 地面影响系统

3 月 19 日 08 时地面图上(图 3.18), 亚洲中高纬度有两个高压一个低压系统, 西部冷高压在巴湖地区, 我国东北、华北也维持一高压带, 两高之间蒙古气旋强

烈发展，中心在 48°N 、 104°E ，中心强度为 997hPa ，地面冷锋伸展至内蒙西南部到青海北部地区，由于锋前动力和平流减压作用，出现了明显的减压增温，破坏了大气稳定层结，为上、下层之间冷暖空气交换提供了有利条件，而锋后干冷空气绝热下沉，出现加压降温，最大 3h 变压达 $+8.3\text{hPa}$ ，加剧了锋区前后的气压梯度；14 时，冷锋翻越贺兰山，锋面西侧经向等压梯度密集，银川与民勤气压差达 $2.7\text{hPa}/100\text{km}$ ，大风、沙尘天气出现在锋后下沉气流和强气压梯度区。

此后，蒙古气旋和冷锋继续东移南下，到 3 月 20 日 08 时，冷高压到达蒙古国西部，中心值达 1046hPa （图 3.20）。在有利的高空形势下，冷高压前部的蒙古气旋中心到达蒙古国东部和我国大兴安岭西部（ 49°N 、 107°E ），其中心值达到 985hPa 。形成此次沙尘暴最主要的原因就是这种特殊的天气条件——在蒙古气旋之后紧跟着一个冷高压，两个系统之间强大的气压差为生成 6-7 级甚至 8 级大风创造了条件。受高空槽影响，在高低压中间形成的锋面云系东移，云层加厚，华北平原北部，京津地区，黄土高原东部均出现了阵雨天气，由于前期地表严重干旱，降雨量又小，因此当地沙尘天气并没有得以缓解，而是随着冷空气的到来而又加强。以后，冷高压所经之处，我国华北、东北、华南等地区，甚至朝鲜半岛、日本也先后出现沙尘天气。直到 22 日 17 时，冷高压减弱东移，除黄土高原上的部分城市外，我国其它地区的沙尘天气已基本结束。

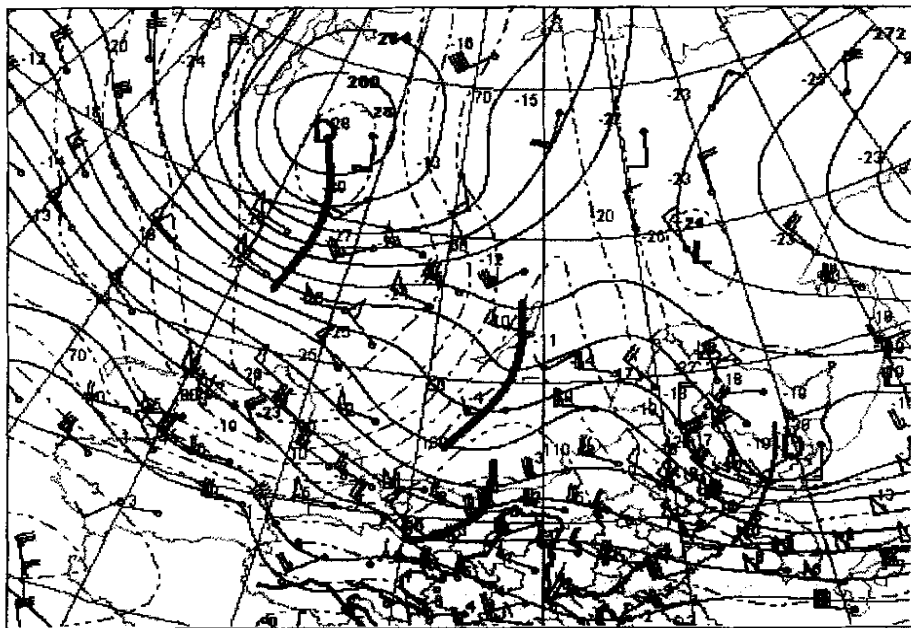


图 3.16 2002 年 3 月 19 日 08 时 700hPa 高空图

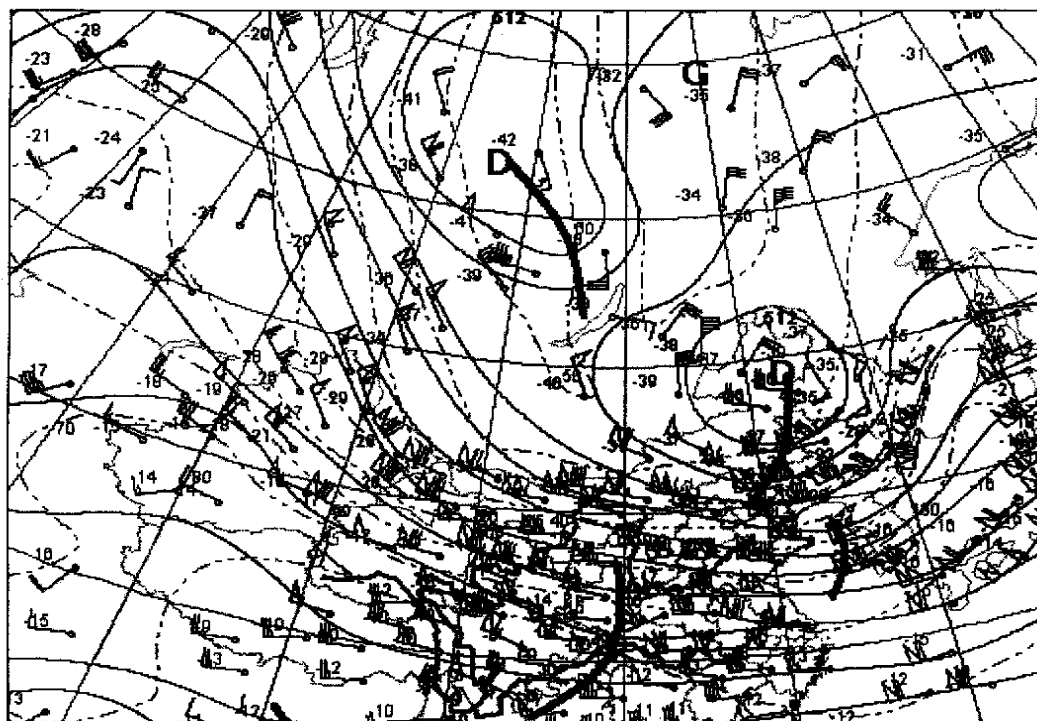


图 3.17 2002 年 3 月 21 日 08 时 500hPa 高空图

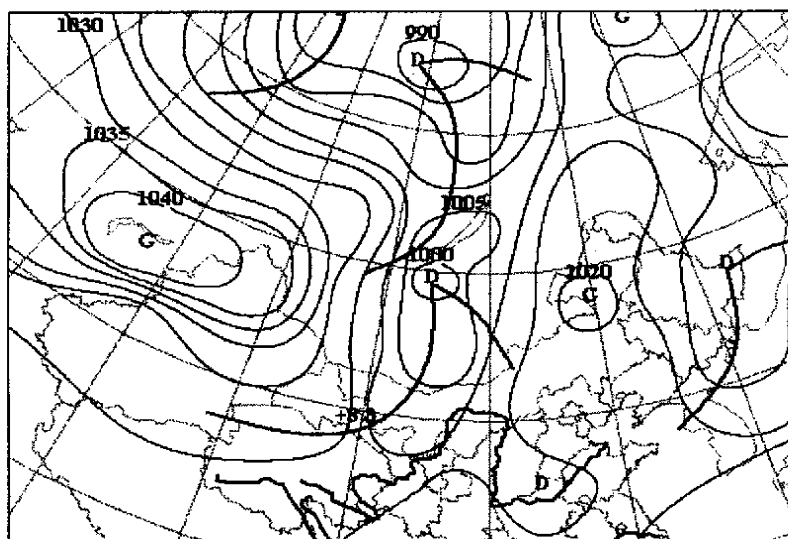


图 3.18 2002 年 3 月 19 日 08 时海平面气压场

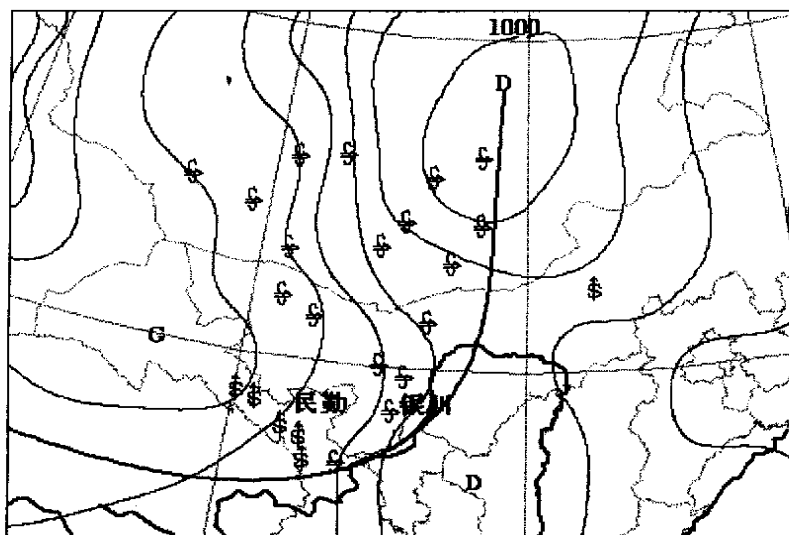


图 3.19 2002 年 3 月 19 日 14 时地面天气图

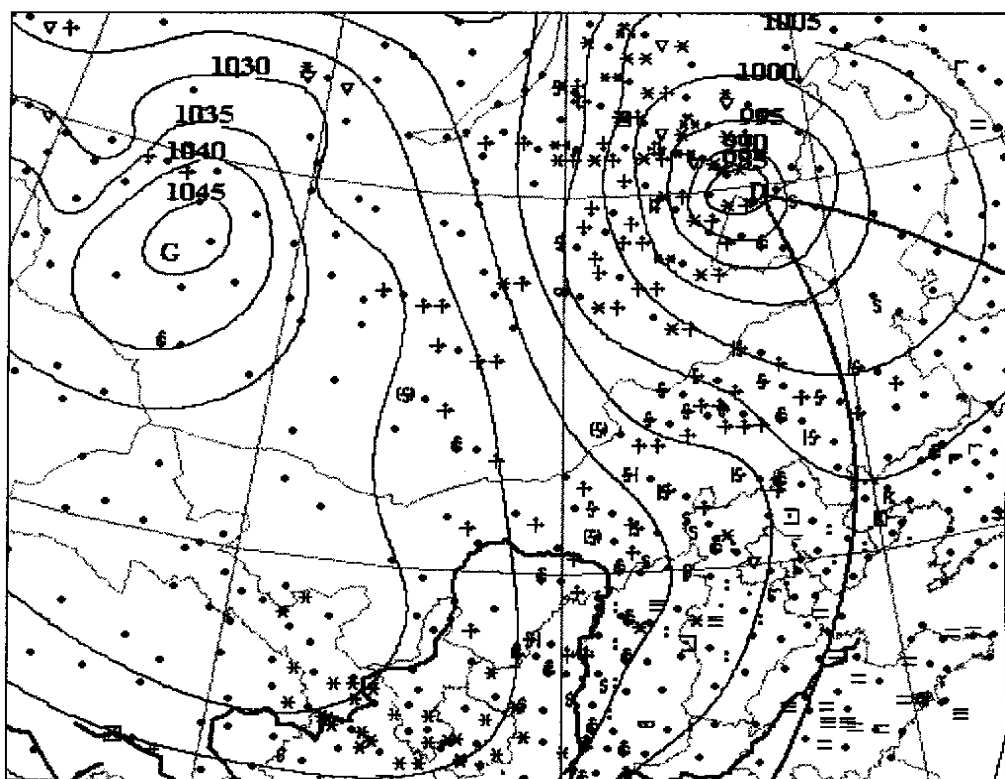


图 3.20 2002 年 3 月 20 日 08 时地面天气图

3.4 卫星云图分析

从 2002 年 3 月 19 日-20 日沙尘天气过程卫星监测到的图像可以看到,造成这次天气的沙尘绝大部分起源于蒙古国中西部 and 内蒙古中西部地区。

从图 3.21 可以看出,受蒙古气旋的影响,3 月 19 日 15 时我国内蒙古中西部

地区和蒙古国中西部均出现了沙尘天气（图中黄色表示沙尘区，白色表示云区，下同）。3月20日早晨，从气象卫星监测到的3月20日08时沙尘图像（图3.22）中可以分析出，19日位于蒙古及甘肃等地的沙尘区继续向偏东南方向扩展，进入我国内蒙古地区。20日中午（图3.23），沙尘继续向东扩展，覆盖了内蒙中部和东部、河北大部，严重影响着京津等地区。20日下午（图3.24）沙尘继续向东发展，范围继续扩大，内蒙古中部和东部、陕西北部、山西西部、河北北部、北京北部、辽宁西北部以及吉林西部等地出现了扬沙和局地沙尘暴天气。

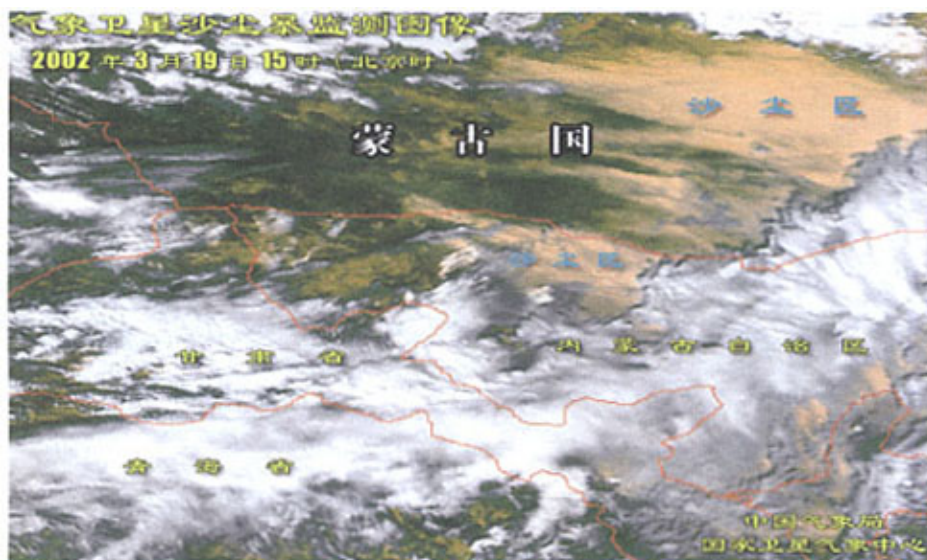


图 3.21 3月19日15时气象卫星沙尘暴监测图像

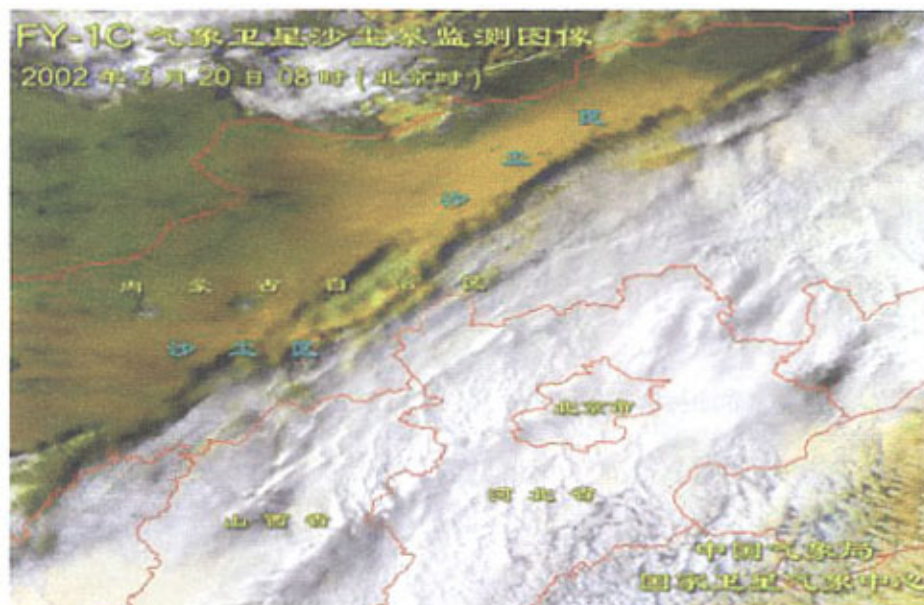


图 3.22 3月20日08时气象卫星沙尘暴监测图像

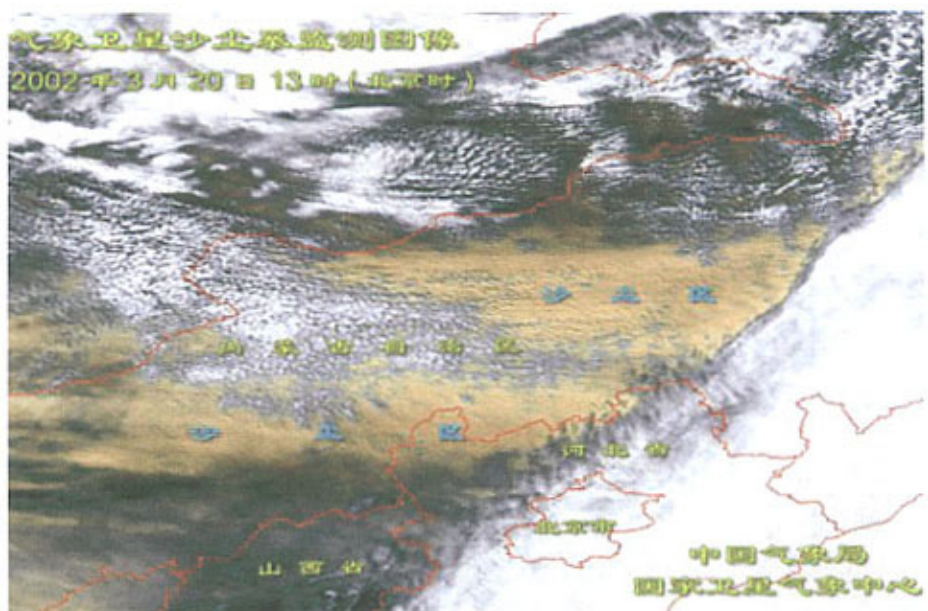


图 3.23 3 月 20 日 13 时气象卫星沙尘暴监测图像

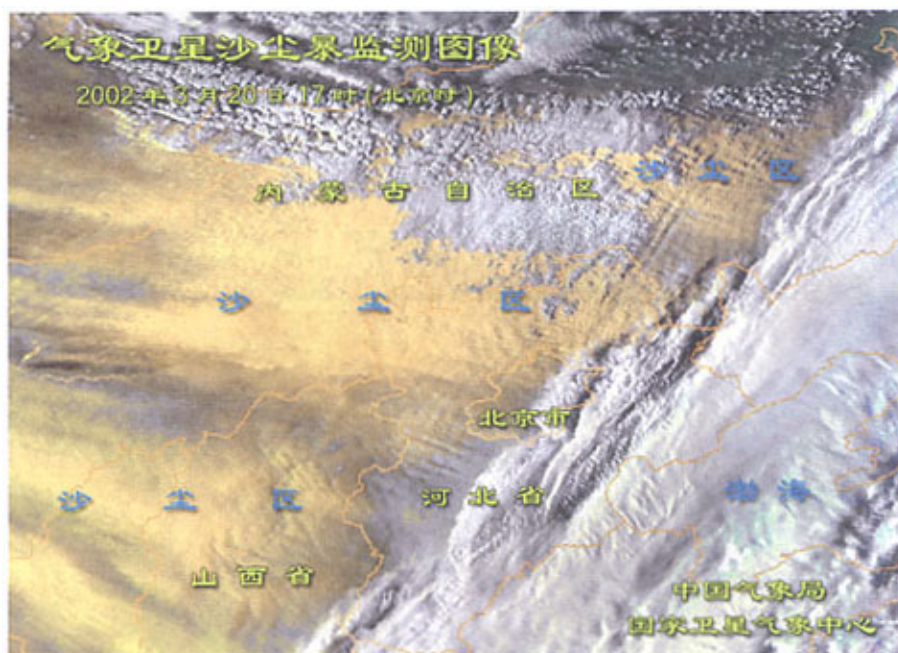


图 3.24 3 月 20 日 17 时气象卫星沙尘暴监测图像

根据气象卫星的识别结果,本次沙尘暴过程的影响总面积为 45.3 万 km^2 (含蒙古国沙尘影响面积),其中内蒙古自治区沙尘影响约为 26.6 万 km^2 ,河北省约 5.2 万 km^2 ,吉林省约 4.9 万 km^2 ,辽宁省约 1.7 万 km^2 ,北京约 0.5 万 km^2 。

3.5 一次沙尘暴过程的数值模拟

3.5.1 资料来源和处理

沙尘暴过程一般为数小时至数十小时,最多为几日。而气象记录一般为每天有四个时次(02时、08时、14时以及20时),有时小规模沙尘暴在两次记录间隙就能完成一次过程,所以仅用气象记录不能适时反映沙尘暴发生、发展的过程。况且气象记录仅仅局限在离散的气象站点,沙尘源地地广人稀,站点密度过小,所提供的数据不能满足研究需要。为此,我们采用国家气象中心发布的T106($1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 经/纬网格)资料作为初始场,运用中尺度模式进行运算,提供24小时的预报场,为沙尘暴的研究提供了详细的气象要素场;实时观测资料包括每日8次的常规地面以及2次高空探测资料(08时、20时)。

3.5.2 数值试验模式的主要特点以及实验设计

MM5 是美国宾西法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合研制的一个非静力中尺度模式。近年来,我国许多气象部门都引进了这个模式,根据不同的实验目的和不同的时效要求,可采用不同的选项(网格重数、范围、分辨率、垂直层次、和次网格物理参数化方案等)。利用该系统可以对发生在中国地区的一些异常天气时间进行高分辨率数值模拟研究。模式分为:TERRAIN、REGRID、LITTLE_R 和 INTERPF 四大子模块。

文献[35]、[36]分别利用 PSU / NCAR 中尺度模式 MM4、MM5 模拟出一次沙尘暴天气过程的形成、发展和移动,并对沙尘暴进行了动力诊断。孙建华、赵林娜、赵思维将澳大利亚新南威尔士大学(NUSW)邵亚平发展的具有清晰风蚀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(Geographic Information System)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^[37]。该预测系统可以预测地面起沙率和大气中沙尘浓度。在此基础上,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试验。试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。因此,本文认为利用 MM5 模拟沙尘暴天气过程是可行的。

在沙尘暴研究过程中, 采用基于 Linux 系统下的 MM5 模式, 模式物理参数化方案和重要参数选区如表 3.1 所示。具体方案如下: 采用二重嵌套网格区域, 区域中心为 (43°N , 107°E)。水平格距分别为 30km 和 10km, 水平网格数分别为 110×110 和 130×130 (图 3.25), 垂直方向为 σ 坐标, 取 25 层。时间积分步长分别取 90s 和 30s, 预报时效为 72h, 每 6h 输出一次。

表 3.1 数值模拟方案及参数选用表

	区域 1	区域 2
水平范围	110×110	130×130
垂直分层和模式顶	25 σ layers/100hPa	
积分时段	0-72hr	
积分步长	90s	30s
显示水汽方案	简单冰相	
积云参数化方案	GRELL	
土壤模式	五层土壤模式	
边界层	MRF 边界层	

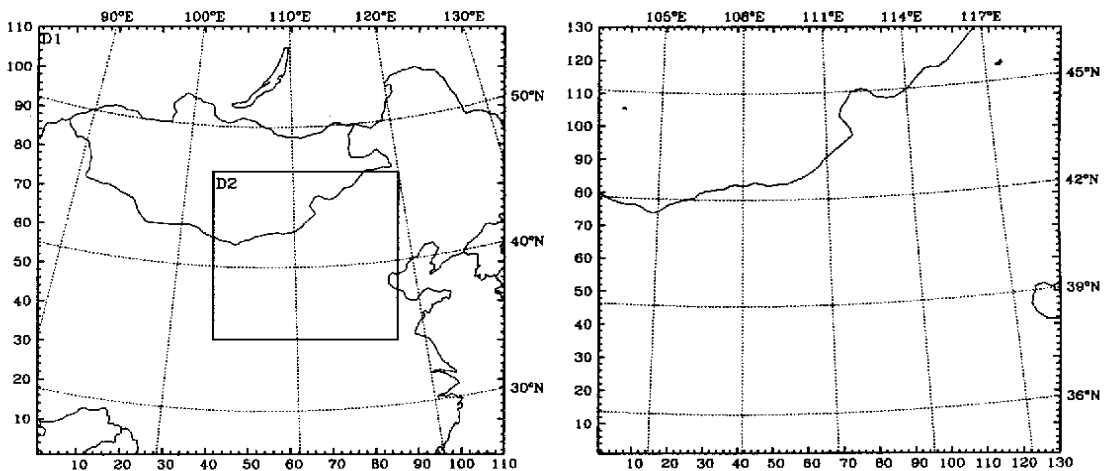


图 3.25 数值模拟区域划分 (左: 大区 1, 右: 小区 2)

为了验证本次模拟所得出的数据与真实大气变化过程的一致性, 用模式输出 19 日 20 时 (24h 预报) 的 500hPa、700hPa、850hPa 高度场和地面海平面气压场 (图 3.26) 与同时刻的高空、地面客观分析资料 (图 3.27) 进行比较。发现模式

对对流层中下层大尺度环流的预报比较准确,如 500hPa、700hPa 高空槽的位置、850hPa 低涡的位置。

3.5.3 模拟结果分析

3.5.3.1 海平面气压及近地面温度

用 3 月 18 日 20 时资料模拟 6h 海平面气压场预报(图 3.28a),发现在蒙古国中部到甘肃西北部有一条低压带,该低压中心在甘肃的酒泉附近,最低值为 976hPa,这时在模拟闭合中心的西北侧出现每百公里约 10hPa 等值线为东北西南向的水平气压梯度,其后部在新疆北部有一个 1005hPa 的冷高压中心。与 19 日 02 时地面实况图相比,这两个中心位置大致相同,但模拟气压强度比实况强度小。而水平气压梯度场较密集的区域正对应一条冷锋,这从前面卫星云图上也可以看出。至 12h,系统继续东移,低压中心移到甘肃的民勤、金昌一带(图 3.28b),中心值为 981hPa,另外在蒙古西南部有生成一个中心值为 985hPa 的气旋,这与 19 日 08 时实况(图 3.18)也基本相同,只是模拟强度偏低 10hPa。至 18h(图 3.28c),系统继续发展,低压范围扩大,其后冷高压中心明显已进入新疆地区,这时(14 时)该冷高压前部的蒙古中部、内蒙西部以及甘肃南部大范围的沙尘天气明显比前一时次加强(图 3.19)。前面已经提到,24h 的地面形势也能较好的模拟出来。

从近地面温度场的模拟可以看出:一直有一个暖温度脊从青海向甘肃发展,到 18h,在甘肃西南部出现一个 35℃的暖中心,且其北部等温线非常密集,水平温度梯度达到每百公里 5℃(图 3.29)。此时,在这个暖中心附近已生成了一个热低压,和后部冷高压之间形成了北高南低的气压场,气压梯度增强。气旋性的热环流使该地区顿起沙尘、扬沙、沙尘暴并有向东扩展之势。

3.5.3.2 近地面风场

为了更好地分析沙尘天气爆发前后的地面风的演变情况,我们用模式模拟输出区域 2 的 12h、24h、36h、48h 细网格的地面 10 米风场。模拟 12h(19 日 08 时),大范围沙尘天气来到我国华北地区之前,蒙古中部有一个较弱的辐合中心(图 3.30a),对应地面这时蒙古气旋还刚刚形成,在气旋南部有少量的沙尘区(图 3.30b);模拟至 24 h(19 日 20 时),气旋性环流东移加强,气旋南部的偏南风的

风速比上一个时次加大（图 3.30c），地面上蒙古气旋加深，沙尘区已到了内蒙中西部和甘肃、宁夏大部地区（图 3.30d）。一般情况下，沙尘天气出现在地面气旋附近以及锋后北风较大的区域。

3.5.3.3 散度场

为了更好的研究系统的发展，应用区域 2 高分辨率模式模拟 700hPa 的散度场。从图 3.31 可以看出：在内蒙西部有大范围的辐散区，而内蒙东南部到河北西北部有一个辐合中心。这与 700hPa 高空槽对应的非常好，一般槽前为辐合场，槽后为辐散场。

3.5.3.4 垂直速度场及垂直速度的垂直结构

应用区域 2 高分辨率模式模拟低层 850hPa 的垂直速度（ ω ）场（图 3.32a），在沙尘天气发生前（图 3.32a），除了河西走廊到中蒙边界位上升运动区外，区域 2 内其它地方基本均为下沉运动区；模拟到 18h 后（图 3.32b），上升区东移到内蒙南部，对应地面这时大范围沙尘暴在此发生（图 3.19）。模式积分到 36h，整个华北地区到东北西南部发展为较强的上升运动，垂直速度最大中心在山西东北部，中心值约为 -13.27dPa s^{-1} ，这时强沙尘暴也东移到华北北部到北京附近（图 3.32c）；至 48h，即 20 日 20 时（图 3.32d），上升区向东扩展，中心东移不大，但上升速度开始减弱，其北方内蒙古地区出现了较强的下沉区，说明冷高压已开始影响此地区。

沿沙尘暴发生中心（ 42°N ， $90^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ ）做纬向垂直速度（ w ）剖面图（图 3.33）。模拟 6h，沙尘天气发生前， $93^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$ 之间，除了 $100^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$ 650hPa 以下有一点弱的上升气流外，其它地区均为弱的下沉气流；而模拟到 18h，在 110°E 以西，基本上为整层的上升气流，最大上升速度为 10.89cm/s ，这时沙尘暴已进入了我国内蒙地区。

通过此次沙尘暴天气过程的模拟试验表明，非静力中尺度 MM5 能较好地模拟出沙尘暴天气的发生发展，分析每 6h 输出的地面风场、垂直速度等要素的变化，就可以初步判断沙尘暴的爆发时间、持续过程、移动路径等，为沙尘暴的准确预报提供依据。

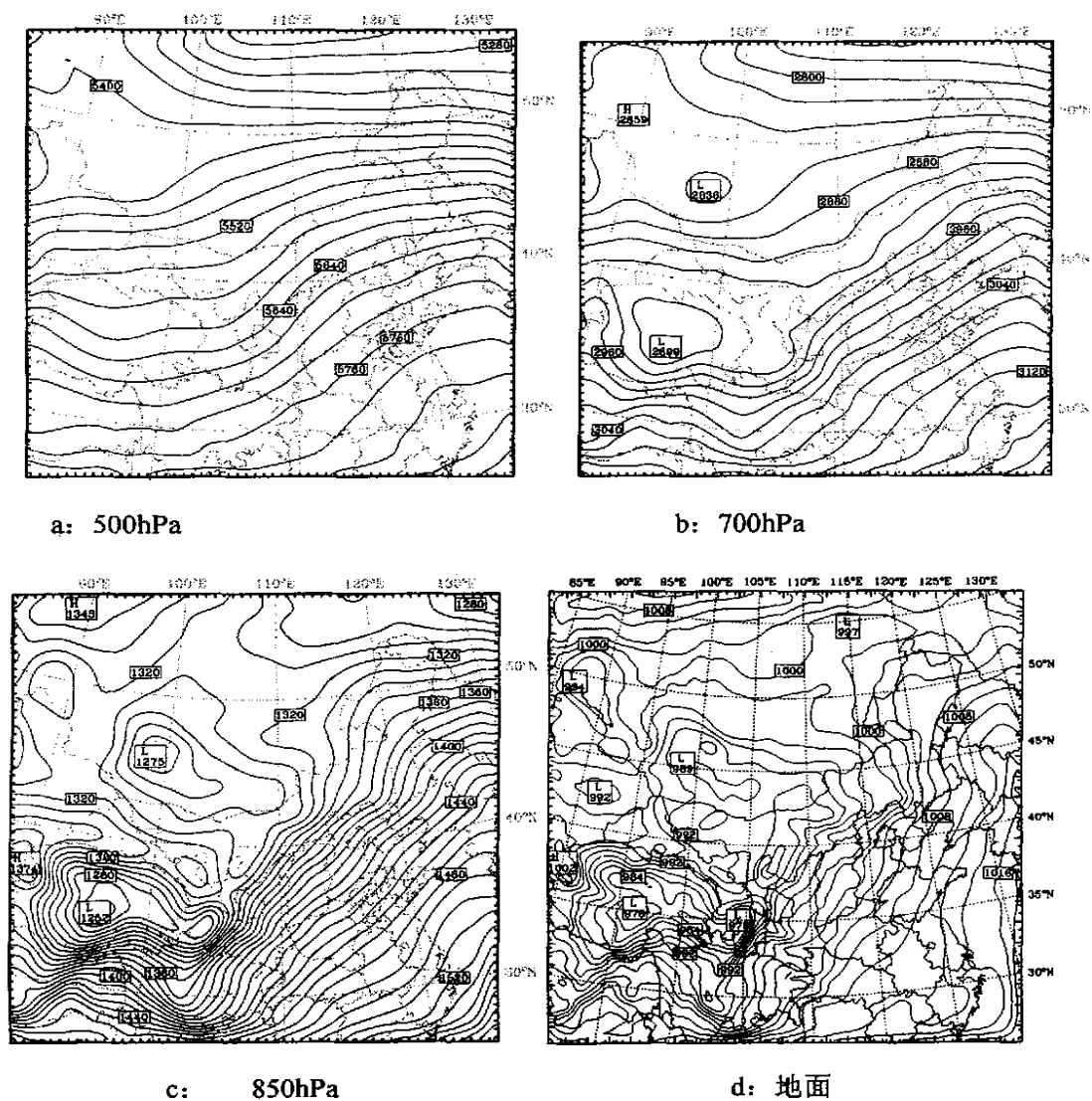
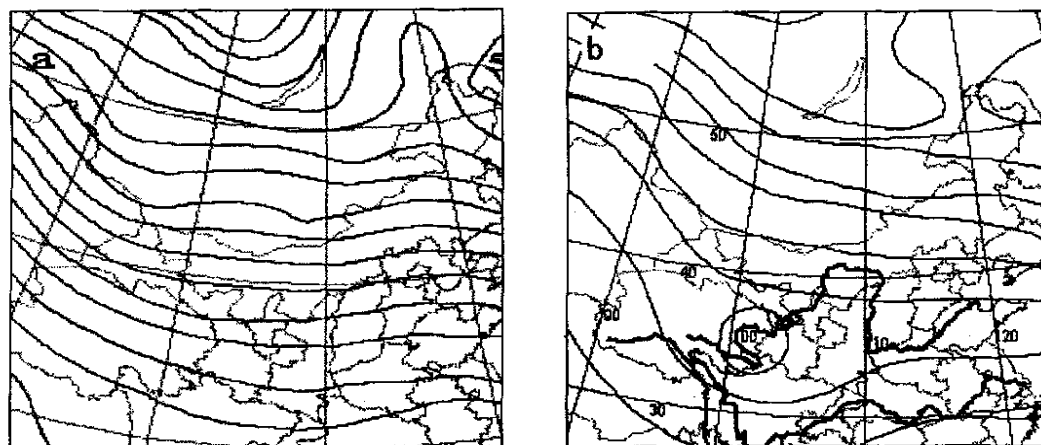


图 3.26 模拟 24 小时的 500 hPa、700hPa、850 hPa 高度（单位：位势米 间隔 20）
及海平面气压场预报（单位：hPa 间隔 2）



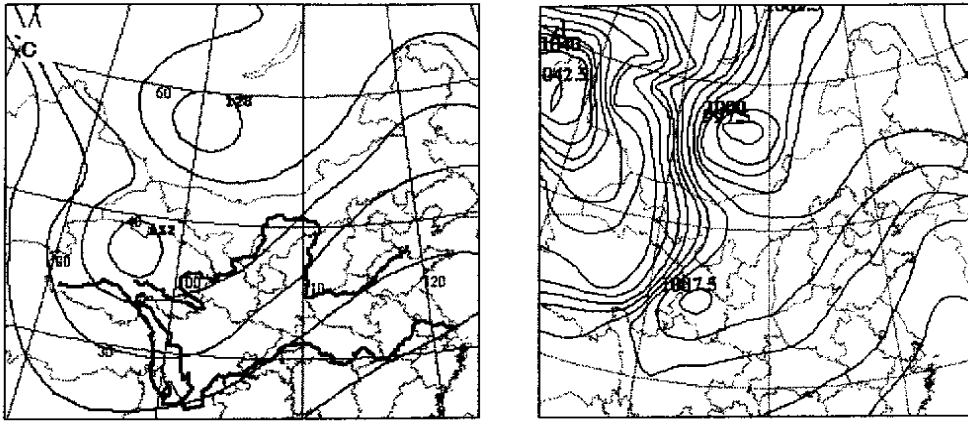


图 3.27 3 月 19 日 20 时高度场和地面海平面气压场实况填图

(a: 500hPa、b: 700hPa、c: 850hPa、d: 地面)

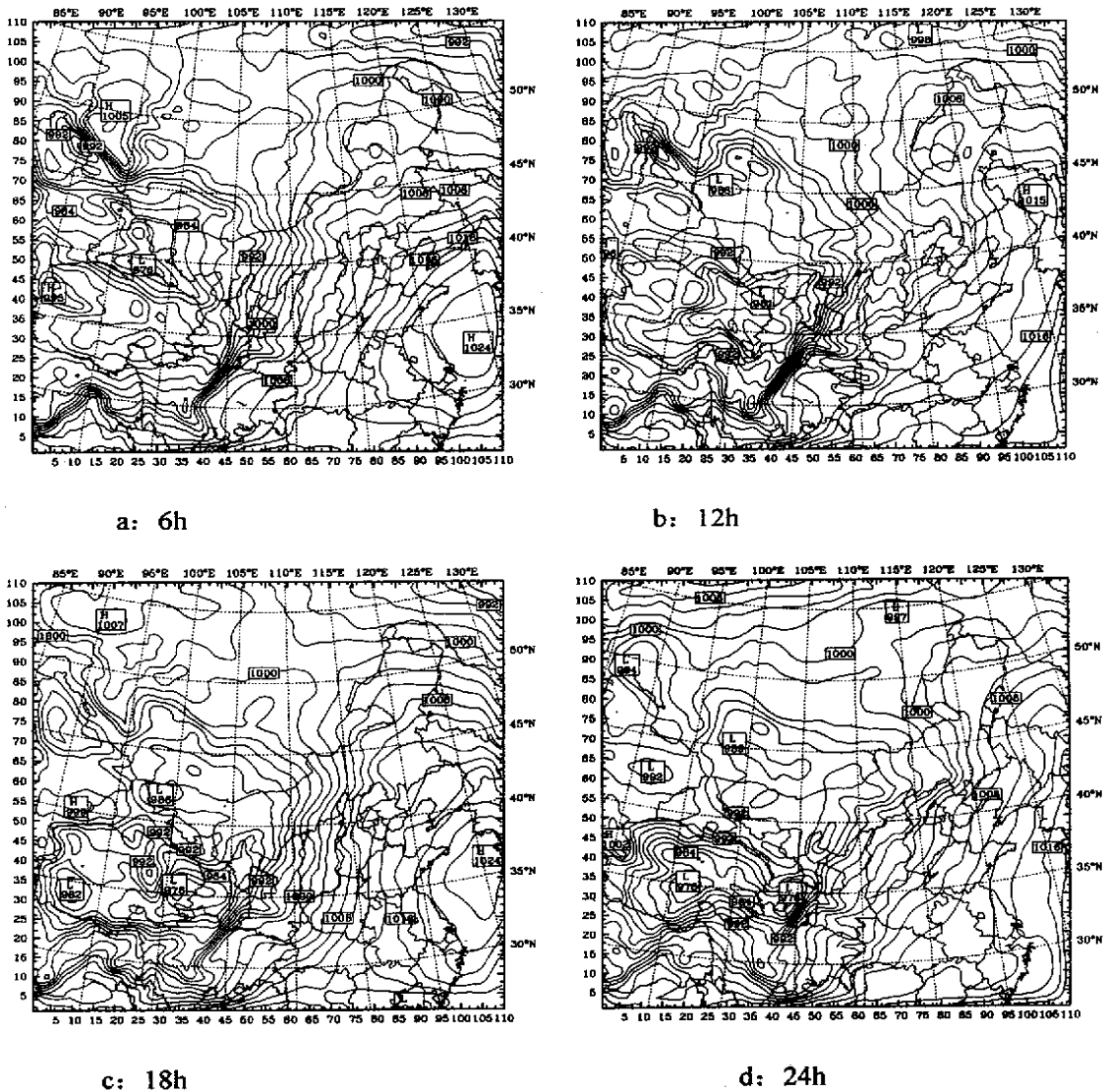


图 3.28 模拟海平面气压场预报 (单位: hPa 间隔 2)

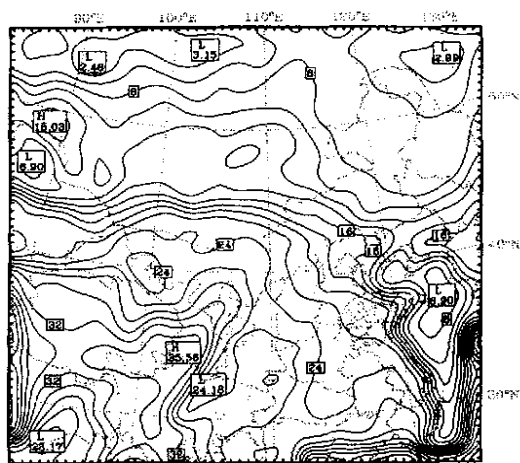
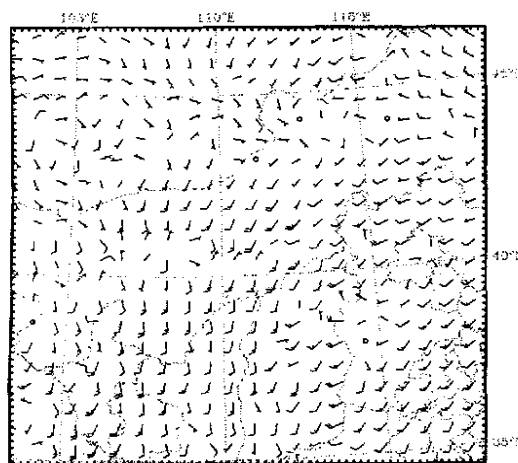
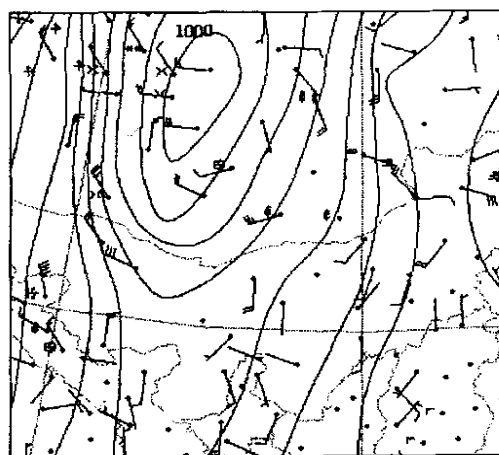


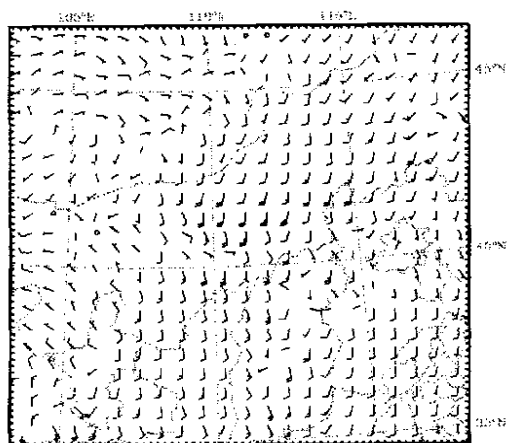
图 3.29 近地面温度模拟 (18h) (单位: $^{\circ}\text{C}$, 间隔: 2)



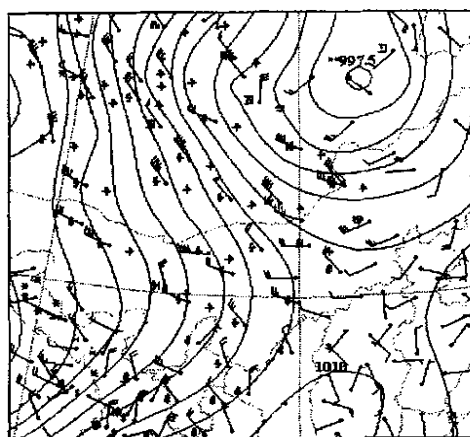
a: 19 日 08 时模拟



b: 08 时实况

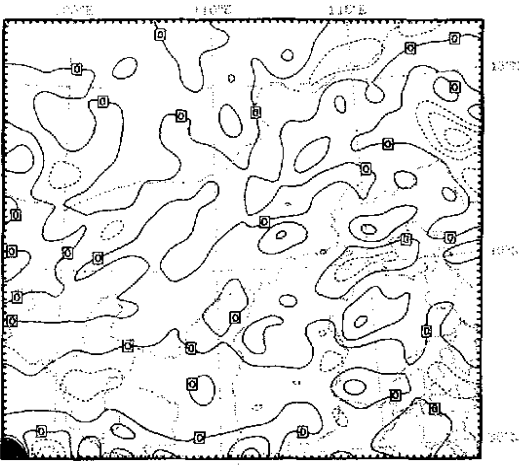


c: 19 日 20 时模拟

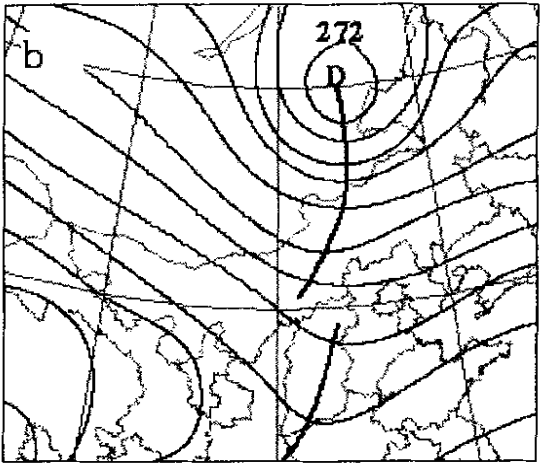


d: 20 时实况

图 3.30 3 月 19 日近地面风场模拟 (左) 与实况 (右)

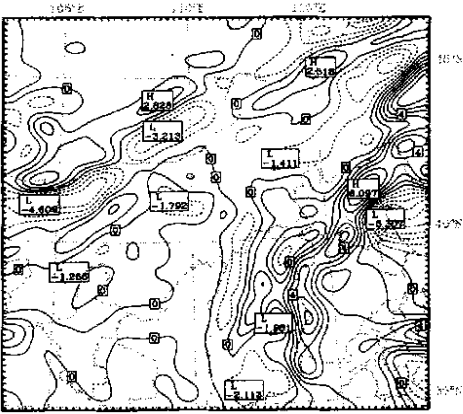


a: 36h (等值线间隔 5)

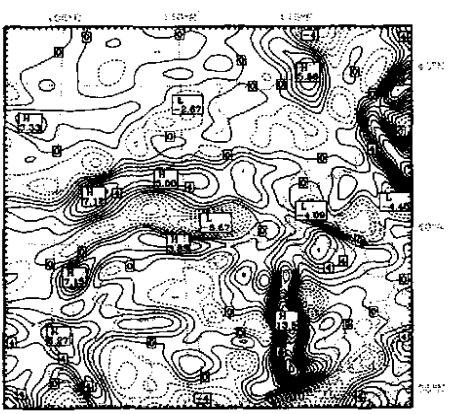


b: 20 日 08 时 700hPa

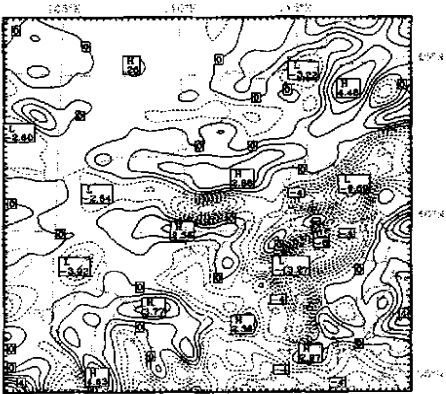
图 3.31 700hPa 散度场模拟(单位: $10^{-5}s^{-1}$)和高度场实况



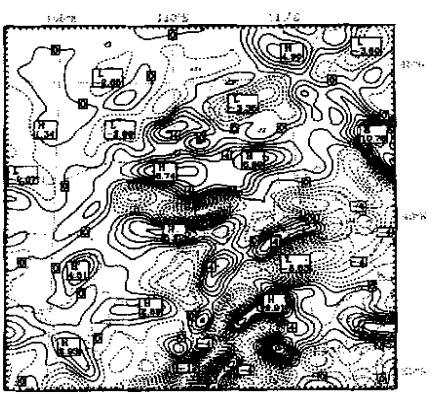
a: 6h



b: 18h

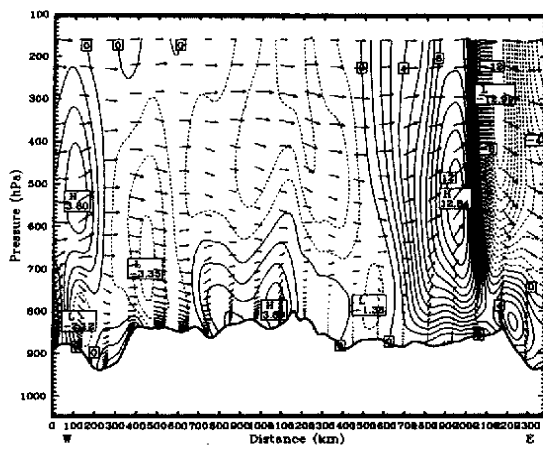


c: 36h

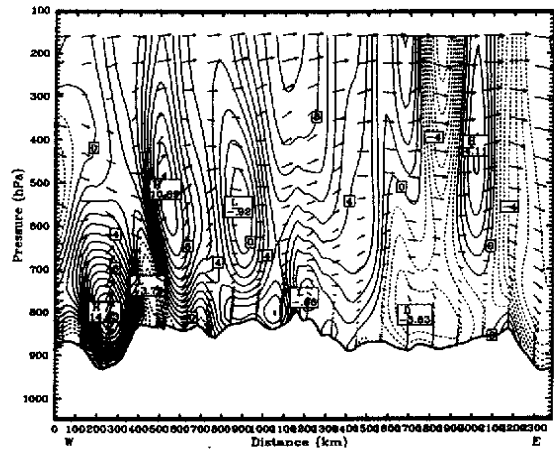


d: 48h

图 3.32 模式输出 850hPa 垂直速度场模拟(单位: $10^{-3}hPa/s$)



a: 模拟 6h



b: 模拟 18h

图 3.33 沿沙尘区域中心(42°N , $90^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)的垂直速度纬向剖面图 (单位: cm/s)

4 结论及讨论

4.1 本文的主要结论

通过对以上几个问题的分析, 本文得出的主要结论有以下几点:

① 分析青岛地区沙尘天气的时空分布特征发现, 青岛地区的沙尘天气主要以浮尘天气为主, 扬沙次之, 沙尘暴很少出现。青岛地区沙尘天气的年际分布规律与我国北方大部地区的沙尘天气分布规律是一致的: 沙尘天气发生的总数总体呈减少的趋势, 在 21 世纪初明显增多, 但又有其独特的分布特征。沙尘天气发生的季节变化规律是春季为沙尘天气的多发期, 其中 4 月出现的日数最多。

② 按照沙尘的源地和起因, 青岛地区的沙尘天气大体可分为三种类型: 外地漂移型、本地生成型以及外地漂移在本地加强型。其中, 外地漂移型沙尘天气最多。外地漂移型的沙尘天气移动路径大体有三个方向: 偏北路径、西北路径、偏西路径。偏北路径是沙尘从蒙古国爆发后, 经科尔沁沙地, 过辽东半岛, 最后影响青岛地区; 西北路径是沙尘天气起源于蒙古国或内蒙西部沙漠, 东移经黄土高原的加强, 从济南到青岛; 偏西路径是沙尘经新疆、蒙古国、甘肃、河套地区、华北南部到达我市。其中, 大多数影响青岛的沙尘天气是西北路径的沙尘天气。

③ 厄尔尼诺年以后的反厄尔尼诺年, 中国北方冬季风加强, 同时赤道东太平洋海温处于弱冷水状态, 有利于出现冬、春季寒潮大风, 为沙尘暴的频繁发生提供了动力学条件。

④ 沙尘天气发生的物理机理相当复杂, 必须具备下面 3 个条件, 即沙源、强风和大气层结的不稳定, 三者缺一不可。其中, 强风是不可少的动力条件; 不稳定大气有利于强对流的发生和发展。

⑤ 青岛地区沙尘天气的出现与高空大气环流形势密切相关。对于中国而言, 在 500hPa 高空环流形势图上, 亚洲东部沿海地区是一稳定的深槽区, 亚洲西部是一个稳定的高压脊, 中国北方正处于脊前槽后的西北气流下, 这股强劲的西北气流将俄罗斯新地岛附近的寒冷空气源源不断地向东南方向输送, 这也是中国北方出现沙尘天气时典型的高空环流形势。地面形势一般是蒙古气旋形成后东移, 其南部的冷锋携带大量冷空气入侵, 引起地面大风, 导致沙尘天气的出现。

⑥ 2002 年 3 月 18-22 日沙尘暴天气过程是我国 20 世纪 90 年代末期以来出现的

一场罕见的大范围、持续时间较长、区域性较强的一次沙尘暴天气过程。它发生在纬向环流向经向环流调整过程中。主要影响系统是蒙古气旋，蒙古气旋后部西伯利亚强冷空气的入侵是引起本次沙尘暴天气过程的动力机制。

⑦ 用非静力中尺度 MM5 能较好地模拟出 2002 年 3 月 18-22 日沙尘暴天气的发生发展，分析每 6h 输出的地面风场、垂直速度等要素的变化，就可以初步判断沙尘暴的爆发时间、持续过程、移动路径等，表明模式对强沙尘暴有较好的预报能力，在此基础上可以进一步发展沙尘暴数值预报方法。

4.2 问题与今后工作

① 本文只是通过地面天气图分析沙尘的源地及移动路径，此方法比较粗略，还应根据不同高度上的风场，进一步确定沙尘粒子来源的层次和移动路径。

② 沙尘暴天气一般多发生在西北地区，那里地面测站稀少，目前无法得到有关沙尘更详细的数据，而应用卫星遥感资料，就可以监测到沙尘的发生发展以及移动路径等等。特别是极轨气象卫星 DVBS/MODIS 资料处理系统的应用，可以更好地揭示沙尘天气的影响时空变化，从而提高对它的预报和预警能力。

③ 本文只是利用 MM5 模式对沙尘天气发生时的高空形势、地面风场、垂直速度等要素的变化进行了模拟，还需应用进一步计算沙尘天气的起沙机制和沙尘输送过程，对沙尘天气的空气质点后向轨迹进行模拟分析，具体计算沙尘粒子的移动轨迹。

④ 本文只是从天气学和动力角度对沙尘天气发生发展的成因进行了分析，未对沙尘气溶胶粒子进行统计分析。为了青岛的天更蓝，环境更美，使 2008 年奥运会能顺利在青岛举行，今后还应对影响青岛的沙尘气溶胶的干沉降量、入海途经及通量进行研究。

参考文献

- [1] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远等. 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] 程道远. 大气尘埃来源与尘暴. 世界沙漠研究, 1994, (1), 15
- [3] 王嘉荫. 中国地质史料. 北京, 科学出版社, 1963, 110
- [4] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析. 科学通报, 1982, 27, 294~297
- [5] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. 中国科学(B), 1984, 27, 278~288
- [6] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章等. 中国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计分析. 见: 方宗义, 朱福康, 江吉喜等主编, 中国沙尘暴研究, 北京, 气象出版社, 1997, 1~10
- [7] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. 第四纪研究, 2001, 21(1), 9~17
- [8] 钱正安, 宋敏红, 李万安. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布与变化趋势分析. 中国沙漠, 2002, 22 (2), 106~111
- [9] 钱正安, 胡隐樵, 龚乃虎. “93.5.5” 特强沙尘暴的调查报告及其分析. 见: 方宗义, 朱福康, 江吉喜等主编, 中国沙尘暴研究, 北京, 气象出版社, 1997, 155~158
- [10] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents[J]. part VI, India Met. Memoirs, 1921, 22 (1): 80~84
- [11] Sutton L J. Haboobs[J]. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1925, 51(2): 25~30
- [12] Idso S B, Ingram R S and Pritchard J M. An American Haboob[J]. *Bull. Ame. Met. Society*, 1972, 53 (10): 930~935
- [13] Joseph P V, Raipal D K, Deka S N, “Andhi” the convective dust storm generation in Arizona[J]. *J. Climatology*, 1980, 31 (3): 431~442
- [14] Brazel A. J. and Nicking. W. C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona[J]. 1986, 6 (3): 255~275
- [15] Jauregui E. The dust storms of Mexico City[J]. *Inter J. Climatology*, 1989, 9 (2): 169~180
- [16] Ott, S. T. and A. Ott, Analysis of a Trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, 119 (8): 1832~1850
- [17] Karyampudi V. M. and T. N. Carlson. Analysis and numerical simulations of the Saharan air layer and its effect on easterly wave disturbances. *J. Atmos. Sci.*[J] 1988, 45, 3102~3106

- [18] Westphal D. L. , O. B. Toon and T. N. Geophys. Res[J] . 1987, 192, 3027~3049
- [19] Yaping Shao and Lance M. Leslie. Wind erosion prediction over the Australian continent. J. Geophys. Res, 1997, 102 (D25): 30, 091~30, 105
- [20] Hua and Yaping Shao. A new model for dust emission by saltation bombardment, J. Geophys. Res, 1999, 104 (D14): 16, 827~16, 842
- [21] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析. 气象学报, 1979, 37 (4): 26~35
- [22] 高凤荣, 李云. 甘肃河西“5.19”黑风分析. 甘肃气象, 1993, 11 (3): 13~17
- [23] 陈敏连, 郭青台, 徐建芬等. 黑风暴天气的研究和探讨. 甘肃气象, 1993, 11 (3): 26~27
- [24] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析. 应用气象学报, 1995, 6 (2): 177~184
- [25] 王式功, 杨德保, 周玉素等. 我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨. 中国沙漠, 1995, 15 (4): 332~338
- [26] 徐建芬, 牛志敏, 陈伟民等. 我国西北地区 4.5 沙尘暴天气研究. 中国沙漠, 1996, 16 (3): 281~286
- [27] 方宗义, 朱福康, 江吉喜等. 中国沙尘暴研究. 北京, 气象出版社, 1997
- [28] 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, 2002, 58(2): 193~200
- [29] 丁瑞强, 王式功, 尚可政等. 近 45a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析. 中国沙漠, 2003, 23 (3): 306~310
- [30] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. 应用气象学报, 2002, 13 (2): 193~200
- [31] 尚可政, 孙黎辉, 王式功等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析. 中国沙漠, 1998, 18(3): 239~243
- [32] 徐启运, 胡敬松. 中国西北地区沙尘暴天气的时间分布特征分析. 见: 方宗义, 朱福康, 江吉喜等主编, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 11~16
- [33] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学, 1997, 21(5): 581~589
- [34] 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. 气候与环境研究, 20002, 1, 22~29

- [35] 陈伟民, 陈敏连, 王强, 李荣庆. 一次黑风暴过程中尺度飚线的数值模拟. 甘肃气象, 1994, 12 (4), 2~7
- [36] 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, 19 (2), 9~13
- [37] 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试验. 气候与环境研究, 2003, 8 (2), 125~142