

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_ 编号 \_\_\_\_\_

中国科学院研究生院  
博士学位论文

沙尘暴监测与预警技术研究

鞠洪波

指导教师 徐冠华 中科院院士 中国科学院遥感应用研究所

唐守正 中科院院士 中国林科院资源信息研究所

申请学位级别 博士 学科专业名称 地图学与地理信息系统

论文提交日期 2004 年 11 月 论文答辩日期 2004 年 12 月

培养单位 中国科学院遥感应用研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

2004 年 12 月

# 沙尘暴监测与预警技术研究

## 摘要

近年来，我国北方连续发生大范围的沙尘暴，给交通运输、生态环境、人们的日常生活和工作带来了不利影响，沙尘暴问题成了全社会关注的焦点。而沙尘暴监测与预警技术的研究在防灾和减灾中就显得尤为紧迫和重要。

本文概述了沙尘暴的基本定义和特征，研建了我国受沙化影响地区的生态环境数据库，包括沙尘暴发生、发展及影响的主要地区，典型地区（重点地区）的地理环境、气候条件和自然资源与人为活动数据库，为沙尘暴的监测与预警奠定了数据基础。

探讨了以地面气象台站、气象卫星和资源卫星等多源信息为基础，沙尘暴发生、发展以及危害机理。建立了沙尘暴发生、运动、作用模型，提出了沙尘暴遥感图像特征提取技术标准规范，研究了沙尘暴信息提取技术方法、沙尘暴监测标准同一化与强度标定方法、静止气象卫星监测沙尘暴信息提取方法。从而进行浮尘、扬沙、沙尘暴到强沙尘暴的精确识别。

根据卫星遥感获取的沙尘信息主要体现沙尘在垂直方向的分布情况，建立了卫星遥感获取的沙尘垂直分布信息和地面水平能见度之间的对应关系，探讨了估测沙尘强度的方法。使用两年的卫星遥感资料和地面观测资料进行对比分析，利用计算得到的归一化沙尘分布指数作为沙尘垂直分布的强度指标与水平能见度作回归分析，结果表明，用遥感资料可以准确的表示沙尘暴强度。

本文通过对二十年来，我国主要沙尘暴过程的卫星云图与天气形势，进一步分析沙尘暴产生的冷空气路径，天气形势产生沙尘暴的动力条件，研究沙尘暴的影响范围，在分析沙尘暴形成的机制基础上找出预报着眼点，进而确定相应的天气图关键区，选择关键区内的气象站的高空与地面要素，建立分类模型、热力模型和动力模型，最后形成了沙尘暴短时预警模式。

在沙尘暴预警方法研究中，不仅考虑沙尘暴产生的动力因子—气象因子，也充分考虑沙尘暴发生的物质因素—地面状况。研究了地表植被状况与沙尘暴天气的发生强度之间的密切关系。本研究中用归一化植被指数作为预报因子对沙尘暴天气进行预报，提高了预警的准确率。

研究结果表明，利用卫星遥感技术，结合地面观测数据对沙尘天气的形成、发展和扩散进行跟踪观测，通过分析可判明沙尘暴起源、路径、强度和影响范围，是形成实用的沙尘天气监测与预警系统的可行方法之一。本研究为沙尘暴监测与预警系统的业务运行探索了一条可行之路。

关键词：沙尘暴、监测、预警、遥感

# **Study on Sand and Dust Storms Monitoring and Early Warning**

**Ju Hongbo**

**Directed by Prof. Xu Guanhua and Prof. Tang Shouzheng**

## **Abstract**

In recent years, large scale of sand and dust storms have continuously taken place in the north of China, which made a bad impact on traffic, environment and people's normal life, especially made people's casualty in few area. Moreover, with the fast improvement of citified level and fast development of traffic and civil aviation, the loss made by the same sand and dust weather largely increased. The problem of sand and dust storms becomes the focus greatly concerned by the world, so it is very urgent and important to research the technology of sand and dust storms monitoring and early warning.

The definition and characters of sand and dust storms are generally described at first in the paper. Then, the environment database of desertification-affected area including the main areas of its occurrence, development and affected, and the database of geography, climate, natural resources and people activities in typical area are build, which lay a foundation on sand and dust storms monitoring and early warning.

The principal of its occurrence, development and damage are discussed based on multi-sources information such as spot data, tiros and resource satellites etc.. And then the models of its occurrence, movement and action are established. Therefore, the standard and criterion of remote sensing image processing and character classifying are put forward. Moreover, the techniques of sand and dust storms information extracting, assimilation of its monitoring standard, intensity demarcation. At last, weather from floating, dust to normal and violent dust storms is accurately identified.

Based on the fact that sand and dust information from remote sensing processing mainly show its distributing status on the vertical direction, the relation between the information on the vertical direction and horizontal visibility on the ground is established. And the monitoring technique of sand and dust density is also discussed in the paper. The remote sensing resources and the ground observation data in two years are used to compare with and analyze. And then the calculated assimilation index of sand and dust distribution is used as density index of its vertical distribution to make regression analysis with horizontal visibility. The results indicate that the remote sensing resource can be used to exactly show the density of sand and dust storms.

With the data of satellite cloud maps and climate status of main sand and dust storms process for about twenty years in China, the cold aerial paths and dynamic conditions which it produces sand and dust storms are analyzed, and the affected area of sand and dust storms is also studied firstly. Secondly, the forecasting respect is found by analyzing the formation mechanism of sand and dust storms, and then the corresponding key areas of climate maps are confirmed. Thirdly, the high altitude and ground factors in meteorologic stations of key areas are selected to establish the classification models, thermodynamic models and dynamic models. At last, the short-term forecasting and warning model of sand and dust storms are formed.

On the research of sand and dust storms forecasting and warning methods, not only the dynamic - meteorologic factors, but also material factors – ground status are well considered, so the close relation between ground vegetation status and sand and dust climate are studied. The assimilation index of vegetation are used as a factor to forecast sand and dust storms climate in the paper, which improved the accuracy of forecasting and warning.

The results indicate that it is a feasible method to realize sand and dust monitoring, forecasting and early warning by using the technique of remote sensing, tracking and observing the formation, development and extending of sand and dust climate combined with ground observation data and analyzing and conforming the genesis, path, density and effected area. The study also explores a feasible way to operate the system of sand and dust storms monitoring, forecasting and early warning.

Key words: sand-dust storm, monitoring, early warning, remote sensing

## 第一章 引言

沙尘暴是一个世界性的灾害性天气，具有很长的历史，也必将继续存在下去。

### 1.1 背景

近年来，我国北方连续发生大范围的沙尘暴。2000 年春天，我国北方，特别是华北地区，出现沙尘天气时间之早、频率之高、范围之广、强度之大，为历史同期所罕见，给华北地区的交通运输、环境治理、人们的日常生活和工作带来了不利影响，个别地方甚至造成了人员伤亡。加之近年来我国城市化水平迅速提高，高速公路交通和民用航空迅速发展，使同样沙尘天气下对于国民经济造成的直接和间接损失大幅度增加。由于华北地区强沙尘天气过程多次直接影响北京和天津等大城市，对首都及周边地区造成直接危害。因此更引起各界广泛关注，党中央和国务院也给予了高度的重视。

沙尘暴是一种重要的环境问题 (Jauregui, 1989)，是沙漠化的主要过程（植被退化、风蚀、水蚀、盐渍化、土壤板结、有机物减少和毒物积累）之一，也是在沙漠及其边缘等特殊下垫面条件下产生的一种灾害性天气。沙尘暴发生的物理机制相当复杂，但必须具备下面三个必要条件：沙源、大风、低层大气层结构不稳定，而且三者必须密切配合，缺一不可。丰富的沙源是沙尘暴的物质基础，它是一个地理条件，长时间的干旱缺雨的天气将加强这一条件；强风是不可缺少的动力，它是一个大、中尺度天气条件；不稳定大气有利于强对流的发生和发展，从而加强对流性天气过程，它是小尺度的局地条件。这三者主要是与脆弱的自然生态环境、一定的天气系统过程、独特的地貌结构有关，是自然天气现象和人类活动对生态系统扰动结合的结果。

沙尘暴多发生在沙漠附近，世界上有中亚、北美、中非及澳大利亚四大沙尘暴区。我国西北地区处于欧亚大陆的腹地，有着世界著名的大沙漠，属中亚沙尘暴区的一部分。特别是新疆南部的塔克拉玛干大沙漠，其影响范围波及到青藏高原的北部及其以东地区。甘肃和内蒙古西部的地形、地表更加复杂，巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库尔齐沙漠、毛乌素沙地和浑善达克沙地等，都是沙尘暴的源地。值得注意的是，在我国东北平原、华北平原某些河滩沙化地带，如西滹沱河的沙地、黄河下游的开封地段及入海处，都是沙尘暴的易发区，年沙尘暴的日数多达 10-15 天。在许多沙质草原特别是农垦区和农牧交错区，以及干松的农田都可以发生沙尘暴。

沙尘暴天气作为一种天气现象是自古以来就有的，并不是近几年才产生的。只是由于近年来人类对自然资源的不合理开发利用，加剧了土地沙化，尤其是农

牧交错区的乱垦滥伐，造成生态环境的逐步恶化，加剧了近年来沙尘暴灾害的频繁发生。生态环境的逐步恶化是沙尘暴灾害频繁发生的重要原因之一。

据气象部门统计，20世纪前50年代我国有记载的有17次。建国以来，50年代共发生过5次；60年代共发生过8次；70年代共发生过13次；80年代共发生过14次；90年代共发生过23次。2000年入春以来，我国北方地区连续发生了数十次扬沙、沙尘暴天气，其影响范围之广，造成危害之重，实属历史罕见。

沙尘暴是我国现今最重大的气象和环境灾害之一。造成了严重的风害、沙积害、风蚀、环境污染等一系列灾害。另外，沙尘暴的频繁发生还会引发气候学效应，如大气光学特征，地学辐射平衡，局地气候乃至风积地貌形成的影响，以及导致自然生态环境的破坏等。沙尘暴已不仅是一种严重的气象灾害，更是不可忽视的生态环境问题之一。

据有关专家预测，未来几十年内，在全球增暖的影响下，北半球中纬度内陆地区降水量变化不大，但温度显著升高，地表蒸发加大，土壤变干。这是有利于沙尘暴发生的不良气候背景，再加上土地资源利用不合理的局面短期内难以根本扭转，草地资源退化和减少的状况难以根本改变，以及水资源短缺的矛盾日趋严重，形势不容乐观，已引起有关部门的高度重视，沙尘暴问题成了全社会关注的焦点。

## 1.2 国内外研究现状及发展趋势

国内外对尘暴天气的研究已逐步系统化，从沙尘暴的天气气候学特征、分析预报、遥感监测、沙尘暴成分分析、数值模拟、灾害预报等方面都作了一些探索性研究。1994年以来，国家自然科学基金先后资助了多项沙尘暴方面的研究项目，部分省、市的有关科技部门也立项支持对沙尘暴进行研究。

在沙尘暴监测方面，项续康（1997）利用G M S 静止气象卫星红外资料，对我国西北地区1990年以来爆发的6次强沙尘暴天气的成因做了中尺度分析。张宁（1997）对近十多年来发生在我国西北地区的较大沙尘暴，及其对甘肃大气背景值的影响、沙尘暴降尘的沉降量、区域分布、化学组份、粒度分布，应用卫星遥感技术监测沙尘暴和沙尘暴的危害等内容，进行了为期二年的调查、取样和研究。徐希慧（1997）利用美国N O A A - N 系列卫星1978—1987年的云图资料和近几年的遥感图像资料，对塔里木盆地沙尘暴的卫星云图特征进行分析，对沙漠沙尘暴的时空分布特征进行探讨。李虎（1999）探讨了塔克拉玛干沙漠及其周边地区沙尘暴的时空分布特征，并对塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴卫星云图的解译方法和类型分型进行了讨论，建立了目视解译和数字解译相结合的解译模式。郑新江（2000）利用我国新近发射的风云-1C 极轨气象卫星，对1999年5月13~14日发生在塔里木盆地至河西走廊西部的沙尘暴与浮尘扬沙天气进行分

析。发现本次沙尘暴过程仅发生在盆地南部并沿昆仑山、阿尔金山等山脉北麓向偏东方向移动，后影响到敦煌附近并逐渐减弱为浮尘扬沙天气。同时进行天气气候学分析和解释。说明风云 -1C 在环境监测方面可以发挥很好的作用。高庆先 (2000) 利用 G M S 卫星遥感资料，结合地面气象观测资料和中尺度每小时数值模拟，对 1998 年 4 月和 2000 年 4 月发生的强沙尘暴演变过程进行了详细的分析，初步确定了影响我国的沙尘暴起始源地，并将我国的沙尘暴天气划分为 U 变化型（停滞型）和移动型（锋面气旋型等）。分析了低涡型沙尘暴和东北低涡型沙尘暴的发生、发展的宏观机制。孙司衡等 (2000) 论述了我国北方地区造成严重影响的沙尘天气，特别是沙尘暴及其危害，探讨了研建沙尘暴的卫星遥感监测与灾情评估系统的重要性。

在沙尘暴分析预报方面，邱新法等 (2001) 利用 1971~1996 年的地面气象记录月报和地面天气图资料，系统分析了我国沙尘暴的年际变化趋势及其时空分布规律，研究了沙尘暴的移动路径和源地。结果表明：1971~1996 年，除青海、内蒙古的部分地区及北京等地外，我国各地沙尘暴发生的总次数呈明显的下降趋势；根据沙尘暴的起源，可将发生在我国的沙尘暴天气过程分为外源型和内源型沙尘暴 2 类；外源型沙尘暴的移动路径主要包括北路和西路 2 条，其中北路沙尘暴入侵我国的范围在西起新疆东部的哈密，东至内蒙古锡林郭勒盟的中蒙边境，西路沙尘暴入侵我国的范围在南疆和北疆的部分地区；我国沙尘暴源地主要集中在南疆和北疆的沙漠及其周边地区，甘肃河西走廊和内蒙古干燥沙漠及青海柴达木盆地等地。高涛等 (2001) 在大量分析了历史上 40 年发生在内蒙古中西部地区的 37 场沙尘暴天气过程的基础上，结归纳了其大气环流特征，将他们划分成 4 个环流类型。参考 Saaty T.L. 提出的综合选优的方法建立判别矩阵，然后计算归类判别预报，根据判别函数值判断实时待判样本的归属。参照归属类历史沙尘暴的天气形势和实况出现的范围以及强度作出沙尘暴天气预报，并设计了一个沙尘暴天气的归类判别分析预报模式。赵光平等 (2001) 通过对产生强沙尘暴天气三大因子的实时诊断，从强冷空气、热力不稳定和近地层环境分析入手，依据宁夏强沙尘暴天气预报的着眼点，在产生强沙尘暴天气的三维空间物理结构和动力过程所进行的动力过程相似检验前提下，建立对宁夏强沙尘暴有实际预报能力的综合指标和组合模型，在天气系统自动识别技术的支持下，应用螺旋度修正方案确定强沙尘暴落区，在建立强沙尘暴天气监测和预报系统方面做了尝试。张小玲等 (2001) 在对 2000 年 4 月 6 日沙尘暴过程进行了天气分析的基础上，用非流体静力中尺度数值模式进行预报和模拟研究。

1997 年我国出版了一本《中国沙尘暴研究》专辑。介绍了用卫星遥感方法监

测沙尘暴发生、发展的初步探索。最近两年来曾召开过多次有关沙尘暴的国际学术会议：1997年11月2-7日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1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4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。2003年中国、日本、韩国、蒙古开始联合开展沙尘暴的研究。

虽然在近半个世纪以来各国科技工作者从各方面做了大量卓有成效的研究工作，取得了一系列非常有价值的研究成果，为今后进行更为深入的研究奠定了良好的基础。但是，随着世界人口的不断增加，全球变化的日益加剧，有限的资源（特别是水资源）和环境条件与人类需求量的迅速增长之间的矛盾日趋突出，如果不尽快采取切实有效的措施，某些地区的自然生态环境状况也将渐趋恶化。沙尘暴的发生和发展可能会更加频繁，强度有可能越来越大，影响范围也将越来越广，需要进一步研究的问题会越来越多，沙尘暴的研究仍然任重而道远（王式功等，2001）。而沙尘暴监测与预警技术的研究就显得尤为重要。

2000年国家科技部在公益性专项资金课题指南中专门设立了“沙尘暴监测技术”研究项目（课题编号：2000DIA10002），开展有关沙尘暴发生、发展和影响的机制分析、动态监测以及预测预报等方面的研究，本文就是在该项目的支持下完成的。

### 1.3 沙尘暴的基本特征

#### 1.3.1 沙尘暴的定义

沙尘暴（sand-dust storm）是沙暴（sand storm）和尘暴（dust storm）两者兼有的总称。是大量沙尘物质被强风吹到空中，使空气很浑浊（水平能见度<1000M）的严重风沙天气现象。其中沙暴是指8级以上的大风把大量沙粒吹入近地面气层所形成的携沙风暴；尘暴则是指8-9级以上大风把大量尘埃及其他细粒物质卷入高空所形成的风暴（赵兴梁，1993）。

沙尘暴不同的国家或地区有不同的名称，如在印度西北部地区，将季风到来之前的季节内出现的对流性沙尘暴，称其为安德海（Andhi）；在非洲和阿拉伯地区称之为哈布（Habob）（Joseph et al., 1980）；也有的地区称之为“phantom”，即“鬼怪”的意思（Wolfson et al., 1986）。

在气象学中，将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴3个等级。浮尘指在无风或风力较小的情况下，尘土、细沙（颗粒直径约0.001mm）均匀地浮游在空中，使水平能见度小于10km；浮游的尘土和细沙多为远地沙尘经上层气流传播而来，或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的沙尘。扬沙指由于风力较大，能将粉沙（颗或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的沙尘。扬沙指由于风力较大，能将粉沙（颗

粒直径 0.001-0.05mm) 吹扬于空中, 使空气相当浑浊, 水平能见度在 1-10km。沙尘暴指强风把地面大量沙尘 (颗粒直径  $> 0.05\text{mm}$ ) 卷入空中, 使空气特别浑浊, 水平能见度低于 1km, 沙尘天气的分类和气象学定义参见表 1-1。

表 1-1 沙尘天气的分类和气象学定义

名称	成因	能见度	天空颜色	天气条件
浮尘	远地或本地产生沙尘暴、扬沙后, 尘沙等细粒浮游空中而形成。俗称“落黄沙”	小于 10 千米, 垂直能见度较差	远物呈土黄色, 太阳呈苍白色或淡黄色	无风或风较小
扬沙	本地或附近尘沙被风吹起,	1-10 千米	天空混浊,	风较大
沙尘暴	使能见度显著下降	小于 1 千米	一片黄色	风很大

### 1.3.2 沙尘暴等级划分

对沙尘暴强度的等级划分, 一般采用风速和能见度两个指标。如 Joseph 对发生在印度西北部的沙尘暴划分为三个等级: 即 4 级  $<$  风速  $\leq 6$  级,  $500\text{m} \leq$  能见度  $< 1000\text{m}$ , 称为弱沙尘暴; 当 6 级  $<$  风速  $\leq 8$  级,  $200\text{m} \leq$  能见度  $< 500\text{m}$ , 称为中等强度的沙尘暴; 而风速  $\geq 9$  级, 能见度  $< 200\text{m}$ , 则称之为强沙尘暴。我国对沙尘暴的定义, 与上述的定义大体相同 (见表 2) 只是在强沙尘暴的等级范畴内, 又划分出了强与特强沙尘暴, 当水平能见度小于 500m 时, 称为强沙尘暴, 在西北省区当其达到最大强度 (瞬时最大风速  $\geq 25\text{m/s}$ , 能见度  $< 50\text{m}$ , 甚至降到 0m= 时, 称为特强沙尘暴 (或黑风暴, 俗称“黑风”) (徐国昌等, 1979)。

### 1.4 研究内容

已有的研究表明, 沙尘的时空分布和强度变化很不均匀, 常规观测几乎无法获取其三维时变信息, 遥感便成为监测沙尘天气最为有效的手段。在种类繁多的民用遥感卫星当中, 气象卫星的覆盖范围宽广, 观测频次稳定, 是监测沙尘暴最为有力的工具。从气象卫星遥感资料中提取沙尘天气的各种物理信息, 不仅有助于加深对沙尘天气发生、发展和传播过程的理解, 而且能够为沙尘天气的预报以及综合治理方案的提出提供科学依据。因而, 利用现代遥感技术和模型模拟技术深入开展沙尘暴监测和预警技术的研究具有重要的意义和应用前景。

本文针对沙尘暴发生、发展、传播和影响的全过程, 开展沙尘暴监测与预警技术的研究。研建我国受沙化影响地区的生态环境数据库, 包括沙尘暴发生、发展及影响的主要地区, 典型地区 (重点地区) 的地理环境、气候条件和自然资源与人为活动等数据库。以地面气象台站、气象卫星和资源卫星等多源信息为基础,

研制沙尘暴发生、发展以及危害机理。建立沙尘暴发生、运动、作用模型,沙尘暴遥感图像特征提取技术标准规范,沙尘暴监测网络系统和沙尘暴监测与预警系统。

#### 1.4.1 我国受沙尘暴影响地区生态环境数据库建设

为了沙尘暴监测技术研究和监测预警分析提供基础数据,必须建设研究区的生态环境数据库。内容包括土地利用现状、气象、建国以来我国沙尘暴发生及危害状况等数据和图面资料,各主要气象台站观测。覆盖新疆、内蒙、甘肃、宁夏、河北北部、天津和北京地区等我国沙尘暴多发区。

##### 1、数据库系统结构设计

包括数据库分类、各数据库的功能及其独立性和相互依存关系。数据库分布形式,包括分布式和集中式以及相结合的形式。

##### 2、软硬件环境建设

沙尘暴监测所涉及的数据类型多,数据量大,而且要求快速、准确。因此,应具备与沙尘暴监测要求相适应的数据库管理和提供信息服务支撑的软件和硬件平台支持,包括遥感图像处理系统、数据库管理系统、网络信息服务系统等。

##### 3、数据库建立

确定采集的数据内容,包括遥感数据、气象数据、资源与环境数据,规范数据分类与编码,进行数字化,建立数据库管理和信息服务系统。

##### 4、数据重组与数据集成

为完全满足本研究的要求,对过去的科学的研究和生产中积累了大量的数据,进一步加工、整合,提取本研究所需要的相关信息。将不同类型、分布于不同地区或不同系统下的数据,按照一定的标准规范,形成一个有机的整体,为沙尘暴监测与预警技术的研究提供基础数据。

#### 1.4.2 沙尘暴遥感监测技术

在沙尘暴发生及影响地区生态环境数据库的基础上,根据典型沙尘暴发生的时间分布序列、空间分布序列以及沙尘暴运动轨迹等遥感监测信息,进行以下有关沙尘暴遥感监测技术研究。

##### 1、利用气象卫星监测沙尘暴方法研究

使用NOAA-16和FY-1D资料,研究沙尘暴信息提取技术、沙尘暴监测标准同一化与强度标定方法、静止气象卫星监测沙尘暴信息提取方法。利用卫星遥感技术,综合研究沙尘暴影响范围提取技术,并进行个例分析。

##### 2、沙尘暴短时预警方法研究

通过对二十年来,我国主要沙尘暴过程的卫星云图与天气形势合成分析,分析沙尘暴产生的冷空气路径,天气形势产生沙尘暴的动力条件,研究沙尘暴的影响

范围,确定地形对沙尘暴的影响。利用全国地表信息,研究地表等环境因素对沙尘暴的影响与作用。

在对几十次强沙尘暴天气个例分析的基础上,将沙尘暴天气进行分类,建立短时天气预警模型。在分析沙尘暴形成的机制基础上找出预报着眼点,进而确定相应的天气图关键区,选择关键区内的气象站的高空与地面要素,建立分类模型、热力模型和动力模型,最后形成沙尘暴短时预警模式。应用卫星资料,完成沙尘暴信息提取,生成沙尘暴监测图像、沙尘暴影响范围示意图及面积估算、沙尘暴强度分析图。配合天气图和地表资料,开展沙尘暴短时预警工作。

#### 1.4.3 沙尘暴监测网络系统建设

集成国内外先进技术和产品,构建基于 Internet/Intranet 的沙尘暴监测网络系统。该网络系统将实现为沙尘暴监测预警系统的运行提供生态环境信息、气象信息、遥感信息等,并通过该系统发布监测预警结果。

#### 1.4.4 沙尘暴监测与预警系统

利用卫星遥感技术,结合地面观测数据对沙尘天气的形成、发展和扩散进行跟踪观测,形成一个实时的沙尘天气监测、预警系统。并及时发布沙尘暴起源、路径、强度、影响范围等信息。

将不同类型、分布于不同地理空间或系统或时间下的数据,监测预警模型集成在一起,通过网络这条纽带,为沙尘暴监测预警系统的业务运行实时提供信息支持。

### 1.5 技术路线

首先制定信息收集方案。受沙化影响的主要地区(9省市)全面采集基础地理、土地利用现状、社会经济状况、气象、沙尘暴灾情等资料。典型区(新疆塔里木、甘肃河西走廊和北京或京津地区)将采集序列土地利用状况、沙尘暴灾害卫星监测与实地调查资料、植被和土壤变化资料、气候变化资料以及社会经济发展变化资料等。

在此基础上建立相应的数据库,包括基础地理数据库、遥感影像数据库、土地利用数据库、沙尘暴灾情数据库、社会经济数据库、气象数据库等。开展沙尘暴遥感图像色标、多源遥感图像的处理分析和沙尘暴发生及影响区域地表特征分析,进而进行沙尘天气成分(包括沙源、运动过程中沿途增加和降尘、气溶胶成分及其浓度)分析和沙尘暴运动轨迹分析(主要分析风或气流的运动方向与范围以及地形影响)。根据沙尘暴强度及有害物质等对环境的影响进行沙尘暴危害分析。通过沙尘暴监测与预警模型和建立的沙尘暴监测系统,开展沙尘暴监测与预

警实验。沙尘暴监测与预警技术研究结构框图请参见图 1-1。

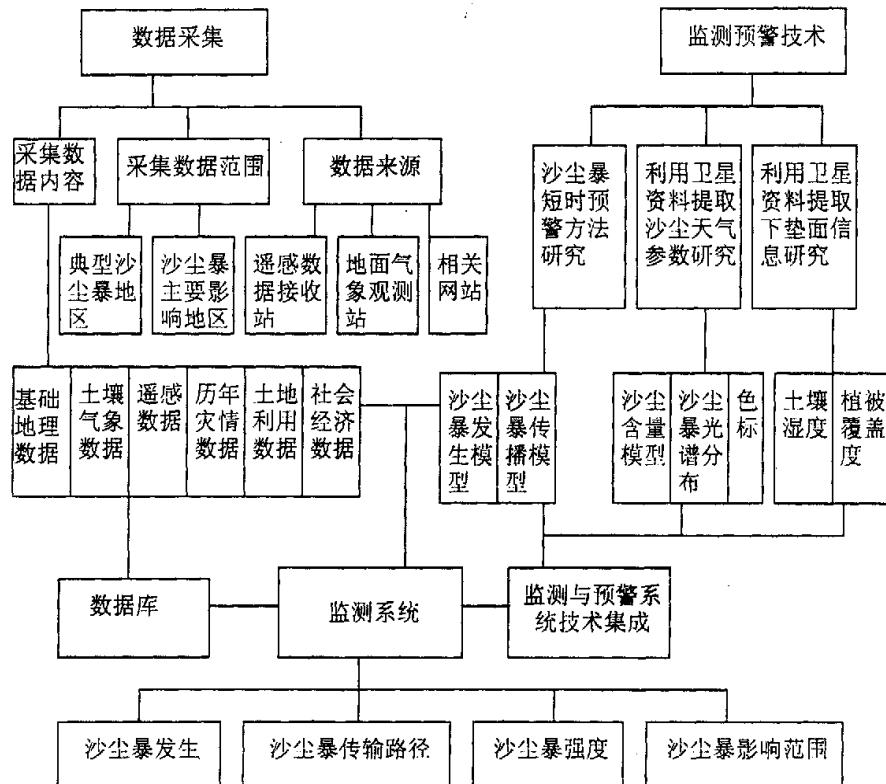


图 1-1：沙尘暴监测与预警技术研究结构图

## 1.6 本章小结

本章概述了沙尘暴的基本定义和国内外研究现状，针对沙尘暴发生、发展、传播和影响的全过程，确定了研究内容和技术路线。

### 主要参考文献：

- 1 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
- 2 邱新法, 曾燕, 缪启龙。我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径。地理学报 2001 年 03 期
- 3 徐国昌。甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]。气象学报, 1979, 37(4): 26-35
- 4 郑新江, 罗敬宁, 刘征。FY-1C 气象卫星在沙尘暴监测中的应用。上海航天, 2000 年 01 期
- 5 徐希慧。塔里木盆地沙尘暴卫星云图特征分析, 甘肃气象 1997 年 02 期
- 6 Joseph, P.V., Raipal, D.K. and Deka, S.N. 1980, "Andhi," the convective dust storms of Northwest India. *Mausam*, 31989, 1, 431-442.

## 第二章 我国受沙化影响地区生态环境数据库研建

沙尘暴发生与发展主要是两个因素，首先是沙源和大风，沙源的形成主要是生态环境（包括基础地理环境、温度、湿度等）自身条件形成的。因此，进行沙尘暴监测与预警技术的研究，首先应采集沙尘暴发生区的生态环境数据，建立相应的数据库。

### 2.1 数据采集的原则、方法和途径

本研究使用的数据种类繁多，包括遥感数据（ETM、NOAA AVHRR、MODIS）、专题数据（土地利用、土壤、地形）、气象数据和社会经济数据。因而，数据采集的原则是充分考虑数据的权威性、现实性、代表性、系统性。数据采集的方法是充分利用现有工作条件和成果，结合沙尘暴监测预警的实际需要，进行合理的数据分类、编码，数据库结构设计，数据存储优化等研究。

数据获取的途径主要是通过无偿或有偿的方式，从国土资源部、农业部、国家林业局、国家气象局和中国科学院等部门和单位获得，包括数字化和非数字化的数据。

### 2.2 数据库设计

数据库设计的基本思想和目的是便于管理、更新和维护，数据利用高效，最大限度的节省计算机空间，满足沙尘暴监测与预警的实际需求。总体设计包括数据库组织、数据库结构与存储格式设计、数据库管理应用和数据库平台设计四个方面，每个方面又包含若干个具体内容。详见图 2-1：

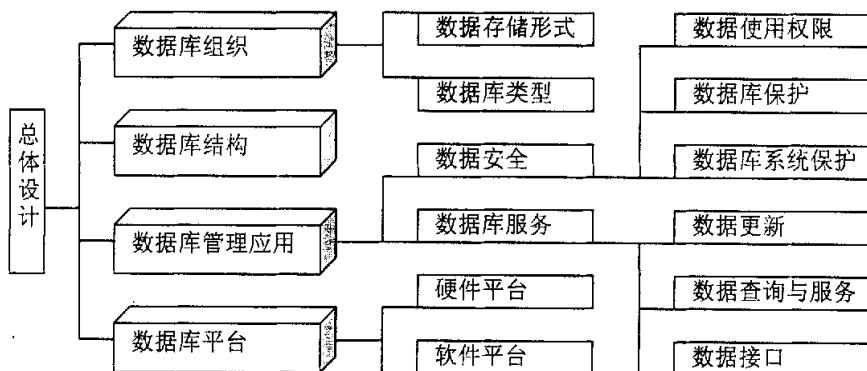


图 2-1：数据库总体设计图

#### 2.2.1 数据库组织

沙尘暴影响地区生态环境数据库包含的数据类型多样，数量大，来自多种渠

道,而且时效性高。为此,根据数据库建立的原则和目标,实行数据库的集中分布式存储形式,数据库类型包括空间矢量数据库(基础地理数据库、土地利用分布图库、土壤分布图库、气候图库等);空间栅格数据库(各种遥感数据库);观测与统计数据库(各气象站点观测数据库、沙尘暴影响地区社会经济统计数据库等);文本数据库(历次沙尘暴发生、发展及影响评价数据库)。

### 2.2.2 数据库结构与存储格式设计

不同的数据库类型,其数据库字段的数量、数据类型、要求的存储空间大小等是不同的。由于数据库(表)太多,在此不对每数据库(表)的具体字段进行描述,详细情况见相关数据库(表)。在此只说明数据各类数据库的存储格式,数据库的存储格式不同,在进行数据应用时往往要求不同的平台(软件系统或硬件)的支持,为了使数据易于交换和共享,数据存储格式有基本格式和特殊格式,特殊的格式要能转换为基本格式。基本格式是能满足沙尘暴监测预警各种硬件和软件使用的格式,具体要求为:矢量数据为E00格式,栅格数据为1B(NOAA)、IMAGE(TM)格式,观测数据和统计数据为EXCEL格式,文本数据WORD格式。其他特殊格式要求能转换为上述个对应的格式。

### 2.2.3 数据库管理与应用系统设计

包括数据库安全、数据库应用与服务功能两个方面,在数据库安全设计方面考虑数据库不能受到操作者的错误操作、软硬件平台的坍塌以及数据保密等方面的问题。为此,在进行数据库操作功能设计时首先将数据库系统划分为数据库管理员层和数据库应用层,只有数据库系统管理员才有更新、修改数据库的权力,其它一切用户只能进行数据读取操作,不能进行存储或修改操作。为了解决数据保密问题,对不同的用户给予不同的查询权限。数据库应用系统功能主要是实现各种要求的数据查询与服务等服务,满足任意条件的查询、输出,提供网络共享服务,设计满足多用户的数据交换借口。

### 2.2.4 数据库平台设计

为满足数据库建立、管理和提供各种服务。沙尘暴影响地区生态环境数据库的软硬件平台包括:

软件系统:空间数据库建立采用Germidea和Arc/info系统,文本数据库建立采用Word系统,观测和统计数据库建立采用Excel系统和Oracle大型数据库管理系统。

## 2.3 数据库建立

数据库的建立包括数据分类编码,数据录入、扫描、矢量化、编辑、输出以及

已有数据库的重新整合等工作。

### 2.3.1 数据结构分类

沙尘暴影响区生态环境数据库，根据数据的性质划分为 6 个数据集。具体结构如下：

#### 1、基础地理数据集

主要包括：高程数据、道路数据、水系数据、城镇居民点数据、区划线、土地类型、各类管线、网格线。

#### 2、空间专题数据集

主要包括：土地利用分布数据、森林资源分布数据、土壤类型分布数据、气候类型分布数据。

#### 3、遥感监测数据集

主要包括：气象卫星遥感数据、资源卫星遥感数据。

#### 4、气象数据集

#### 5、沙尘暴数据集

主要包括：沙尘暴历史数据、沙尘暴新闻动态、沙尘暴监测数据。

#### 6、社会经济统计数据集

主要包括：人口、国内生产总值、农业总产值、工业总产值、耕地面积和粮食产量、畜牧业生产情况、固定资产投资、财政金融及物价、科教卫生、农业基本情况、就业情况等。

## 2.4 数据库及主要技术指标

### 2.4.1 气象数据库

该数据库包括最新地面气象数据，站点统计数据等内容，并不断增大。数据来源于全球电信系统（GTS），全国地面 194 站台站实时信息，包括当天 02 时、08 时、20 时气压，日平均气压，02 时、08 时、14 时、20 时气温，日平均气温，日最高气温，日最低气温，日平均相对湿度，02 时、08 时、14 时、20 时云量，日平均云量，02 时、08 时、14 时、20 时风速，日平均风速，日降水量。

全国约 670 站点（南方有的台站没有浮尘和扬沙）1998-2002 年 1-8 月每次浮尘和扬沙出现时间，每次浮尘、扬沙过程中最具代表性的能见度、气压、气温、相对湿度、地面温度、蒸发量、风速、风向及当日最大风速、风向。

全国约 670 站点（南方有的台站没有沙尘暴）1997-2002 年每次沙尘暴、每次大风出现时间，每次沙尘暴过程中最具代表性的能见度、气压、气温、相对湿度、地面温度、蒸发量、风速、风向及当日最大风速、风向。

全国约 670 站点各站点 1997-1998 年的日降水量(有的台站 98 年降水量没有)。

## 2.4.2 空间专题数据

### 1、森林分布图

包括沙尘暴研究地区森林分布状况数据。

数据比例尺: 1: 250 万;

数据时间: 全国第四次森林分布数据;

数据范围: 北京、天津、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆十省市;

数据格式: Arc/Info-Coverage;

数据类型: 落叶针叶林、常绿针叶林、针叶混交林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、阔叶混交林、针阔混交林、竹林、经济林、林网、疏林、灌木林。

### 2、土地利用数据

包括反映沙尘暴研究地区地面覆盖状况的数据。

数据源: Landsat TM 影像;

比例尺: 1: 25 万;

投影类型: 等面积双标准纬线割圆锥投影;

数据时间: 1996 年;

数据范围: 北京、天津、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆十省市;

数据格式: Arc/Info-Coverage;

数据类型: 包括耕地(水田、旱地)、林地(有林地、灌木林、疏林地、其它林地)、草地(高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地)、水域(河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地)、城镇建设用地(城镇用地、农村居民点、其它建设用地)和未开发土地(沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其它)共 6 大类, 25 小类。

### 3、土壤数据

包括反映沙尘暴研究地区的土壤类型数据。

数据源: 全国土壤普查办公室 1995 年编制, 西安出版社出版发行的《1: 100 万中华人民共和国土壤图》;

比例尺: 1: 100 万;

投影类型: 等面积双标准纬线割圆锥投影;

数据源时间: 1995 年;

数字化制图时间: 2003 年;

数据范围: 北京、天津、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆十省市;

数据格式: Arc/Info-Coverage;

数据类型: 制图基本单元大部分为土属, 共有 12 个土纲, 61 个土类, 235 个亚类和 909 个土属。

4、气候类型分布图, 比例尺: 1: 1000 万

#### 2.4.3 基础地理数据 (地形数据)

包括反映沙尘暴研究地区的地形起伏状况数据。

1、数据源: 中华人民共和国国家测绘局编制的中国 1:25 万地形图。

投影类型: 等面积双标准纬线割圆锥投影;

数据范围: 北京、天津、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆十省市;

数据格式: Arc/Info-Coverage;

数据内容: 行政区、居民地、地貌、地理格网等。

2、数据源: 中华人民共和国国家测绘局编制的中国 1:100 万地形图

投影类型: 等面积双标准纬线割圆锥投影;

数据范围: 北京、天津、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆十省市;

数据格式: Arc/Info-Coverage;

数据内容: 行政区、居民地、地貌、地理格网等。

#### 2.4.4 遥感影像数据

包括监测沙尘暴的 NOAA 数据和用来研究地面植被的 TM 数据等。

1、NOAA 卫星 AVHRR 遥感影像图数据库。

数据分辨率: 1 公里;

数据时间: 2001、2002、2003、2004 年沙尘暴易发月份部分数据;

数据范围: 全国;

数据格式: BSQ。

2、分县 TM 遥感影像图数据库

分辨率: 30 米;

投影类型: 等面积双标准纬线割圆锥投影;

数据时间: 1996 年;

数据范围: 北京、天津、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古、新疆十省市;

数据波段: 4、3、2 波段假彩色合成;

数据格式: ERDAS IMG。

#### 2.4.5 社会经济数据

包括沙尘暴研究地区社会经济统计数据。

#### 2.4.6 沙尘暴发生、影响及监测数据

##### 1、沙尘暴监测数据

包括对沙尘暴进行监测和预警研究的各类数据。

利用卫星资料,结合常规气象资料和地理信息,对沙尘暴天气进行监测,生成沙尘暴监测图像、沙尘暴强度分析图像和环境评估分析(包括沙尘暴覆盖区域的地表特征和面积等)。

##### 2、沙尘暴监测技术数据

包括对沙尘暴进行监测的各种技术和方法数据。包括:常规监测数据、遥感监测数据、特种监测数据、沙尘预警数据。

##### 3、沙尘暴历史数据

包括对已发生的沙尘暴统计数据。从1952年-2004年历史沙尘暴天气情况、灾情等数据。

##### 4、沙尘暴资料数据

包括沙尘暴研究的各种文献、论文等文档资料,沙尘组成、发生、传输、影响、监测、预报等研究文档资料。

##### 5、新闻数据

包括各类沙尘暴相关新闻数据。

##### 6、沙尘暴科普知识数据

包括沙尘天气、沙尘监测等内容的相关科普知识数据。

##### 7、植被指数数据库,2000—2002年。

##### 8、土壤湿度数据库,2000—2002年。

### 2.5 本章小结

本章介绍了用于沙尘暴研究的背景数据库,根据数据的性质划分为6个数据集。数据库包括空间矢量数据库(基础地理数据库、土地利用分布图库、土壤分布图库、气候图库等);空间栅格数据库(各种遥感数据库);观测与统计数据库(各气象站点观测数据库、沙尘暴影响地区社会经济统计数据库等);文本数据库(历次沙尘暴发生、发展及影响评价数据库)。以上数据的获取和数据库的建成为本研究的开展奠定了数据基础。

## 第三章 沙尘暴监测方法

探索利用多种气象卫星（NOAA、FY-1C、GMS-5、EOS）多通道遥感信息监测沙尘暴的途径、计算沙尘暴指数与强度，提取沙尘暴的光谱特征。

### 3.1 沙尘暴遥感监测方法概述

自1960年美国第一颗气象卫星上天以来，遥感对地观测技术取得了很大的发展，基于不同遥感平台的遥感数据应用理论和方法都积累了丰富的研究成果。目前气象卫星数据是沙尘暴遥感监测主要数据源，包括NOAA/AVHRR、Terra/MODIS、GMS/VISSR数据和FY-1C/D数据，空间分辨率从250m~5km，光谱范围覆盖可见光、近红外和红外，其中MODIS数据的光谱分辨率有了显著的提高，通道数增加到了36个。

NOAA-16系列卫星是由美国NOAA和NASA联合研制的新一代极轨气象卫星，1998年第一颗此系列卫星NOAA-15发射成功，目前已经先后发射了NOAA-16和NOAA-17。NOAA-16 AVHRR/3探测器共有6个探测波段，但只有5个波段同时工作，波段3A和3B选择工作，目前在中国过境时只有波段3A出于工作状态。

FY-1C/D是我国自行研制的三轴稳定太阳同步极地轨道业务气象卫星。其主要功能是用于天气预报、气候研究及环境监测。多通道可见红外扫描辐射计(MVIRS)是风云一号的主要探测仪器，共有10个探测波段。

在利用多通道气象卫星数据监测和定量分析沙尘暴的方法中，选用NOAA KLM和FY-1C/D的5个对沙尘信息反应敏感的波段，表3-1是这5个波段的具体参数。

表3-1：NOAA-16和FY-1C/D波段参数

NOAA-16	波段号	CH1	CH2	CH3A	CH4	CH5
	波长(μm)	0.58-0.68	0.725-1.0	1.58-1.64	10.3-11.3	11.5-12.5
FY-1C/D	波段号	1	2	4	5	6
	波长(μm)	0.58-0.68	0.84-0.89	10.3-11.3	11.5-12.5	1.58-1.64

随着美国新一代地球观测卫星EOS-AM的发射，在精确获取沙尘暴信息的研究中拥有了全新的手段。EOS-AM卫星主要用于获取每日全球有关云、气溶胶、辐射平衡及陆地生态系统特征。星载主要探测器包括中等分辨率成像光谱仪(MODIS)、高级空间热辐射热反射辐射计(ASTER)、多角度成像光谱仪(MISR)等。在获取沙尘暴信息方面主要应用中等分辨率成像光谱仪(MODIS)36波段资料，通过多光谱数据融合技术，提取下垫面反射和辐射特征，形成更为精确和直观的沙尘暴监测图像和分析信息。

### 3.2 气象卫星资料沙尘暴信息提取

在遥感数据中，可见光和近红外通道可用来测算下垫面的反射率，对地表植被、云和水体较为敏感。在 NOAA/AVHRR 数据的可见光通道，大气沙尘对它的影响往往要高于对近红外通道的影响，尤其在地表植被盖度较高时更为明显。热红外通道可以用来测算下垫面的亮度温度。由于沙尘与云系、地表在反射率和温度上均有差异，利用这些特征可以从遥感数据中将沙尘暴信息分离出来。利用 NOAA/AVHRR 数据分析了下垫面、云和沙尘区的光谱特征，在每一光谱波段沙尘信息都有明显反应，但通过各单波段监测图像对比（图 3-1），发现沙尘区与云、下垫面分界不是非常清晰，因此在沙尘区的识别过程中，并不能简单的在各单波段取相应的阈值，必须利用多波段融合技术动态的获取沙尘区信息。

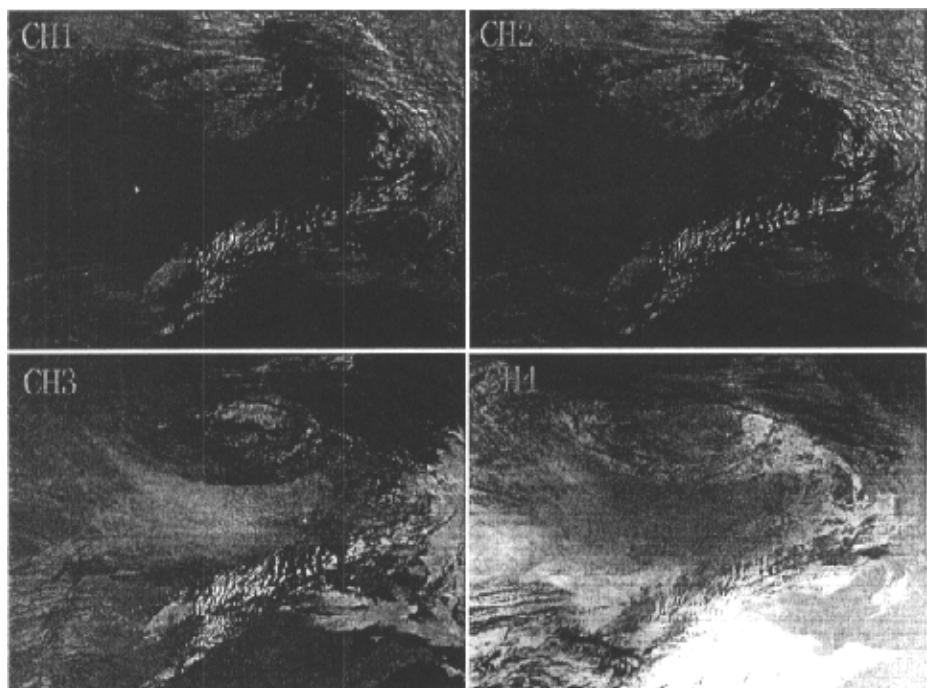


图 3-1：单通道图像上反映的沙尘与物表信息

通过研究表明在 NOAA-16 卫星的 3A 波段或 FY-1C/D 的 6 波段，对较强沙尘暴的反映相当敏感，在直方图分析中我们可以看出在 NOAA-16 卫星波段 2 上云区和沙尘区的分界非常模糊，经常呈单峰或不明显的双峰结构，而在波段 3A 上呈现非常明显双峰结构，这为准确的区分云区和沙尘区提供了非常有用的信息（图 3-2）（郑新江等，2001）。

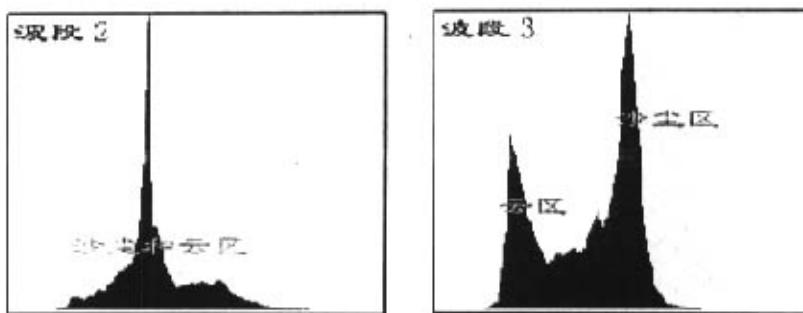


图 3-2 NOAA-16 CH2 与 CH3 直方图

在沙尘区与地表的区分方面,以前经常使用波段 4 的辐射值取阈值的方法,但通过直方图分析(图 3-3),在波段 4 上沙尘区和地表的双峰结构并不明显,而且会经常随季节的不同发生变化,无法准确的定义阈值。而在波段 3A 上沙尘区和地表的双峰结构非常明显,波谷很深,可以非常清晰的区分这两种目标景观。

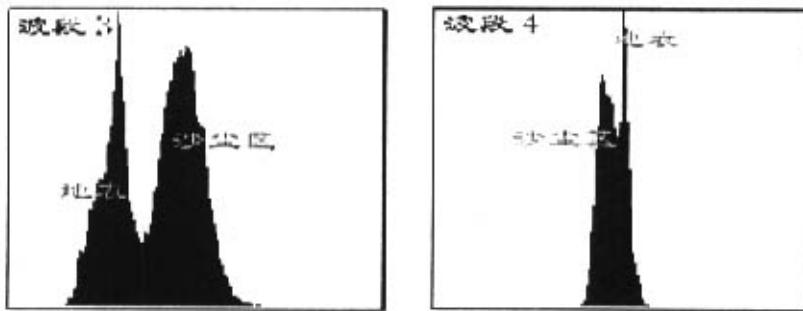


图 3-3 NOAA-16 CH3 与 CH4 直方图

虽然波段 3 在强沙尘暴识别方面优势明显,但当沙尘暴强度很弱,仅是扬沙或浮尘时波段 3A 对沙尘信息的反映就不是非常敏感。

为了解决这个问题我们引入波段 4 和波段 5 的差值作为新的沙尘识别依据,由于波段 4 和波段 5 位于大气红外辐射窗区,在正常情况下两波段测值基本一致,但当大气水汽含量较大或有气溶胶混合时,两波段的测值就会有明显的差异。

利用这个原理,分析了多年的资料,发现在沙尘区上这两个波段的测值的差值较大,在直方图上沙尘区与地表或云分布也呈现明显的双峰结构。(图 3-4)

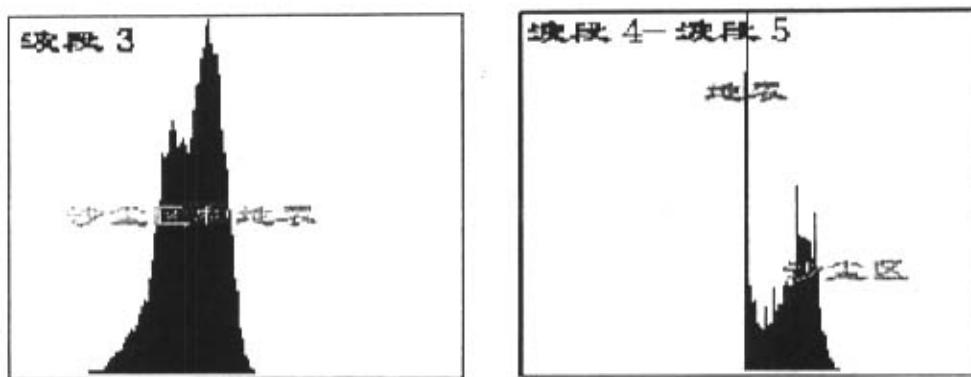


图 3-4: NOAA-16 CH3 与 (CH4-CH5) 直方图

综合上述沙尘信息提取方法, 在实际应用中以波段 3A、波段 4 和波段 5 的差值作为沙尘信息提取的标准, 同时利用其它波段排除中低云的干扰, 建立准确的沙尘信息提取模型。以下是沙尘信息提取模型的基本方案:

1、卷云检测: 卷云高度很高, 云顶温度低, 由冰粒子组成, 具有半透明特性, 根据 Planck 的非线性原理, 使用  $T_{CH4}-T_{CH5} > 0$  来检测卷云的存在 ( $T_{CH4}$   $T_{CH5}$  代表两个通道的亮温)。

2、低云(雾)的检测: 低云由水粒子组成, 光学厚度厚,  $CH1$  比  $CH2$  对太阳光的反射能力更明显, 有一反射峰值区在。使用  $CH2/CH1 < 1$  来检测低云 ( $CH1$   $CH2$  代表两个通道的反照率)。

3、地表的判识: 直接使用晴空条件下  $CH4$  测量的地表亮度温度代替 ( $T_{CH4}$ ), 主要用于提高沙漠地表和沙尘区区分的精度。

4、沙尘暴区的判识: 以波段 3A (NOAA-16) 的测值为主, 给与最大权重, 同时加入波段 4 和波段 5 的差值, 这样就可以完成从浮尘、扬沙、沙尘暴到强沙尘暴的精确识别。以上方法对于 FY-1C/D 和 EOS/MODIS 资料同样适用, 因为它们都具有进行沙尘信息提取相同光谱的波段。下面两幅图像就是在实际应中的结果。

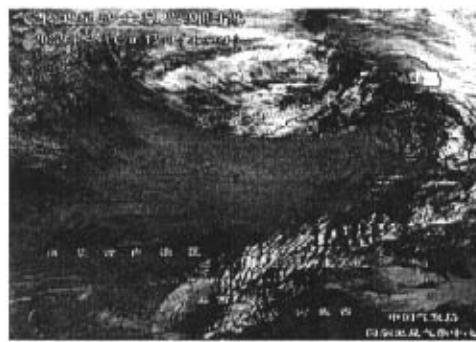


图 3-5: NOAA-16 卫星沙尘暴监测图像



图 3-6: NOAA-16 卫星沙尘暴监测图像

### 3.3 沙尘暴监测标准同一化与强度标定方法

#### 3.3.1 沙尘暴监测标准统一化研究

利用不同卫星监测沙尘暴在定性分析已经达到比较高的精度,但当需要获取沙尘暴监测的定量信息时,往往需要通过不同卫星获得一致的结果。针对 NOAA KLM 和 FY-1C/D 两种系列卫星,完成了沙尘暴监测同一化标准的研究。卫星监测沙尘暴的标准会受到多种因素影响,比较明显的是探测波段的差异、过境时间的不同、太阳光照条件的区别等,以前的一些研究主要集中于沙尘信息的定性提取方面,大多使用了可见光波段,但可见光波段对过境时间和太阳光照的差异反映相当明显,即使同一颗卫星也会因此产生不一致的监测结果。研究主要内容是摆脱可见光波段的影响,因此在探测波段选取上选择位于近红外附近的  $1.6 \mu\text{m}$  波段。

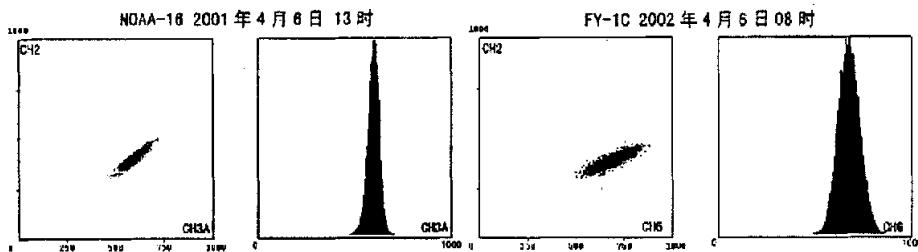


图 3-7: NOAA-16 沙尘区统计图

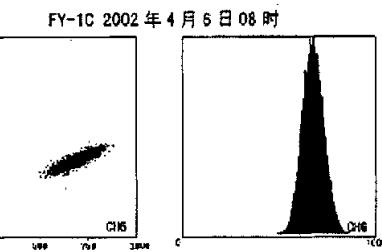


图 3-8: FY-1C 沙尘区统计图

首先在两大系列极轨气象卫星上都有这个探测波段,探测的光谱基本一致(图 3-7, 图 3-8),以上两图就是 NOAA-16 和 FY-1C 卫星在不同时段获取数据后,经沙尘信息提取获得的沙尘区统计图,左侧为  $1.6 \mu\text{m}$  波段与波段 2 的沙尘区散点分布图,右侧为  $1.6 \mu\text{m}$  波段的沙尘区直方图。从图中可以分析出在  $1.6 \mu\text{m}$  波段两颗卫星的沙尘区测值的动态变化范围基本一致,反照率值位于 0.45 至 0.85 之间。

其次,沙尘信息在  $1.6 \mu\text{m}$  波段上受时空影响较小,使用 NOAA-16 卫星 2001 年 4 月 7 日 12 时(图 3-9)东北地区的沙尘区统计信息和 2002 年 4 月 23 日(图 3-10)南疆地区的沙尘区统计信息进行分析,由于这两次沙尘监测在时间、空间、太阳光照条件等方面都存在很大差异,但在  $1.6 \mu\text{m}$  波段与波段 2 散点图以及  $1.6 \mu\text{m}$  波段直方图上,沙尘区的分布却非常一致。

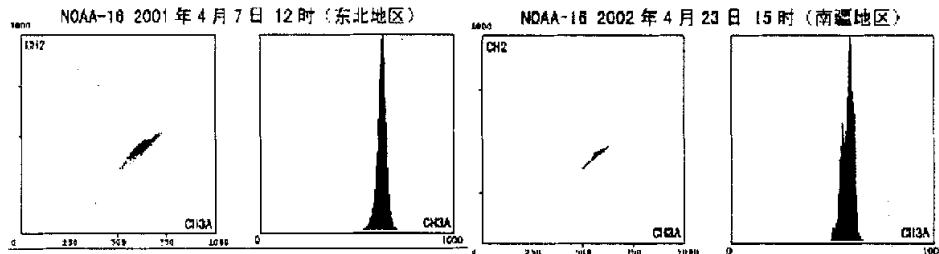


图 3-9: NOAA-16 沙尘区统计图

图 3-10: NOAA-16 沙尘区统计图

综合以上分析,  $1.6 \mu\text{m}$  波段在沙尘暴监测中具有较好的稳定性, 在多颗卫星资料  $1.6 \mu\text{m}$  波段都具有较固定的沙尘信息反映范围, 利用  $1.6 \mu\text{m}$  波段可以很好的解决沙尘监测的标准同一化问题。

### 3.3.2 归一化沙尘指数的研究和计算

沙尘指数在这里定义为一组使用多通道卫星资料获取的代表沙尘分布信息的无量纲数值, 同时它还可以线性的描述沙尘强度的变化。

沙尘指数主要是使用  $1.6 \mu\text{m}$  波段对强沙尘暴的敏感反映和波段 4 与波段 5 差值对较弱沙尘暴的有效反映两种特性。通过  $1.6 \mu\text{m}$  波段和波段 2 的散点图可以看出, 在沙尘暴区散点图呈非常清晰的线性分布, 基本可以代表沙尘的强度信息, 但如果直接引用  $1.6 \mu\text{m}$  波段的测值作为沙尘指数, 因为定标曲线的不同, 必然会在不同卫星资料间造成沙尘指数的不可对比, 因此使用指数分布函数, 将  $1.6 \mu\text{m}$  波段测值作为变量 ( $v_{ch3}$ ) 引入函数进行计算, 这样基本可以消除由于定标不同造成  $1.6 \mu\text{m}$  波段测值变化的影响, 得到  $1.6 \mu\text{m}$  波段归一化指数 ( $y_{ch3}$ )。

$$y_{ch3} = a \cdot e^{(b \cdot v_{ch3})}$$

以下 4 张图是 NOAA-16 和 FY-1C 卫星在不同时间、不同地区得到的沙尘区统计分布图 (图 3-11、12、13、14), 左边图像是  $1.6 \mu\text{m}$  波段与波段 2 的散点分布图, 右边图像是经过归一化计算得到的  $1.6 \mu\text{m}$  波段与波段 2 散点分布图。对每张图我们进行一元线性回归分析, 发现没有经过归一化处理的  $1.6 \mu\text{m}$  波段与波段 2 散点拟和直线的斜率变化较大, 对时间和空间的变化很敏感, 而经过归一化处理后拟和直线的斜率基本一致, 受时间和空间的影响非常小。

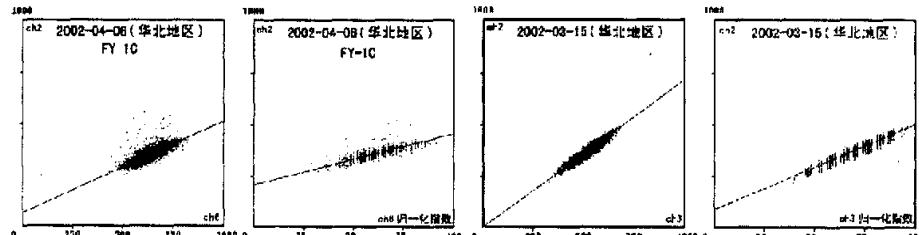


图 3-11: FY-1C 图像

图 3-12: NOAA-16 图像

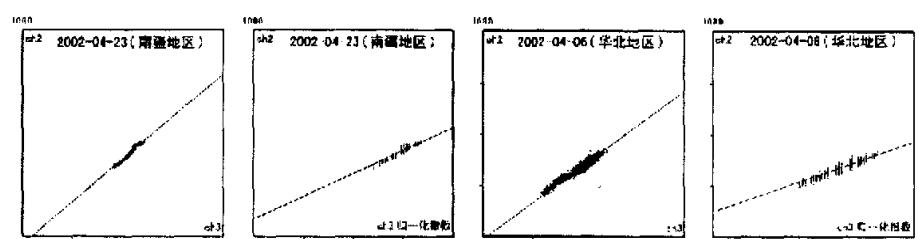


图 3-13: NOAA-16 图像

图 3-14: NOAA-16 图像

当沙尘暴强度较弱时, 沙尘区和地表在  $1.6 \mu\text{m}$  波段的区分不是非常明显, 这时需要引入波段 4 和波段 5 的差值作为沙尘区识别因子, 但波段 4 和波段 5 的差值在散点图上的分布呈非线性变化, 进一步研究发现当沙尘暴强度较低时它的分布按线性变化, 而当沙尘暴强度增加到一定程度时它的分布呈明显的非线性变化, 这时波段 4 和波段 5 的差值无法表示沙尘暴的强度。下面两图 (图 3-15, 3-16) 是沙尘区波段 4 和波段 5 的差值分布状况, 左侧图像是波段 4 与波段 5 的差值和波段 2 散点图, 右侧图像是波段 4 与波段 5 的差值和沙尘强度变化的散点图。从图中可以看到随着沙尘暴强度的增强, 波段 4 和波段 5 的差值被明显分成两个区域, 低强度区随强度线性变化, 而高强度区不随强度线性变化。

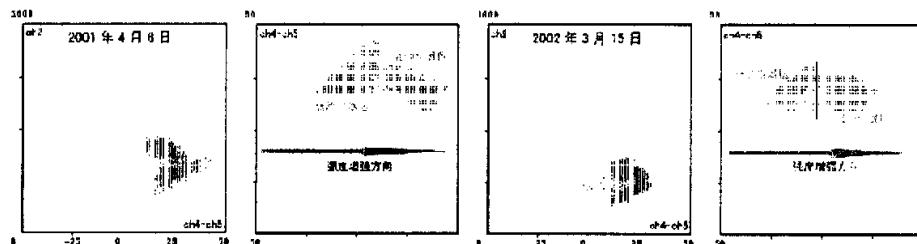


图 3-15 NOAA-16 通道差值散点图      图 3-16 NOAA-16 通道差值散点图

根据上述分析结果, 我们在计算归一化沙尘指数时以  $1.6 \mu\text{m}$  波段归一化指数为主要因子, 同时为精确表示较弱沙尘信息, 使用波段 4 和波段 5 差值作为调节因子, 最终得出归一化沙尘分布指数 (NDDI), 计算公式如下:

$$NDDI = a \cdot e^{(b \cdot v_{ch3})} \cdot (ch4 - ch5)$$

式中 a、b 为调节因子, 使用多年资料进行统计分析, 为了保证归一化沙尘分布指数前后一致性, 对于 b 的取值固定为 0.8, 由于 b 主要影响指数的分散和集中程度, 在将来的应用中可以不用改变。而 a 的取值主要影响指数数值大小, 它还需进一步分析来确定最佳取值, 但 a 在指数计算中只是起到简单权重调节作用, 因此它的变化并不影响沙尘指数前后一致性。以下图 (3-17、18、19、20) 是归一化沙尘分布指数在实际监测中的结果:

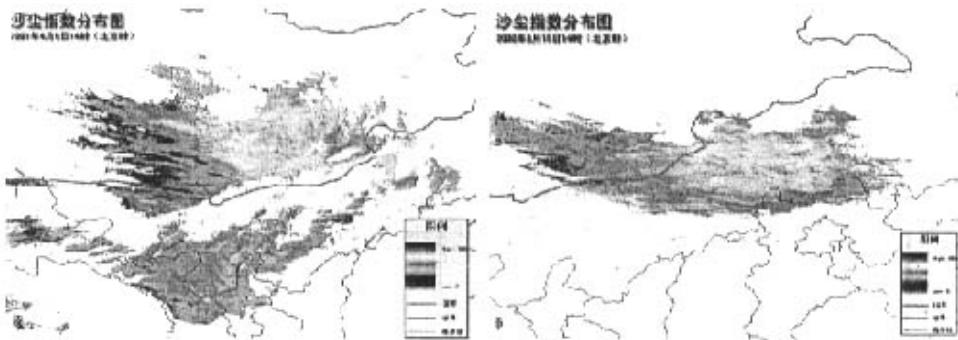


图 3-17 归一化沙尘分布指数图

图 3-18 归一化沙尘分布指数图

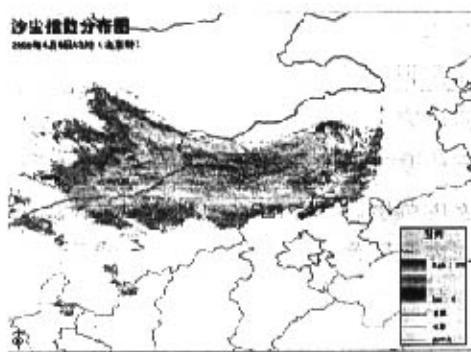


图 3-19 归一化沙尘分布指数图

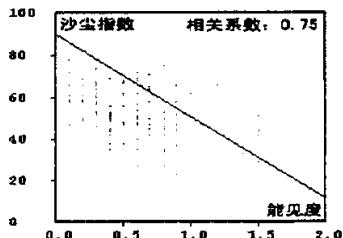


图 3-20 归一化沙尘分布指数图

### 3.3.3 沙尘暴强度计算

根据气象学定义,沙尘暴按强度分为浮尘、扬沙、沙尘暴,其定义标准主要依据水平能见度和风速。当水平能见度为1-10Km、风速较小时为浮尘天气;水平能见度为1-10Km、风速较大时为扬沙天气;水平能见度小于1Km、风速很大时为沙尘暴天气,当能见度小于0.1Km为强沙尘暴。通过气象学定义分析,可以表示沙尘暴强度的定量信息只有水平能见度,其它指标都不具有定量分析的属性,因此我们在定量计算沙尘强度时主要以水平能见度为标准。

通过卫星遥感获取的沙尘信息主要体现沙尘在垂直方向的分布情况,为了计算沙尘强度,必需建立卫星遥感获取的沙尘垂直分布信息和地面水平能见度之间的对应关系。使用两年的卫星遥感资料和地面观测资料进行对比分析,利用计算得到的归一化沙尘分布指数作为沙尘垂直分布的强度指标与水平能见度作回归分析,结果表明当能见度小于2Km时,二者之间有较好的相关性,而当能见度大于2Km时相关性较差,分析原因主要由于能见度的测量方法主要以目视为主,在测量较大能见度时误差很大,因此在作回归分析时只选用能见度小于2Km的沙尘发生区站点。下图(图3-21)是我们使用190个站点资料与沙尘指数的回归分析结果,根据分析结果,计算出沙尘指数和能见度的转换对照表,可以精确的由遥感资料定量表示沙尘暴强度。图(3-22、23、24、25)是对2002年几次沙尘天气的计算结果,为日常业务之中计算沙尘暴强度提供了方法。



沙尘指数	1-10	11-30	31-50	51-70	71-85	>90
能见度	<2.0	2.0-1.5	1.5-1.0	1.0-0.5	0.5-0.1	<0.1

图 3-21 沙尘指数图



图 3-22 沙尘暴能见度分布图

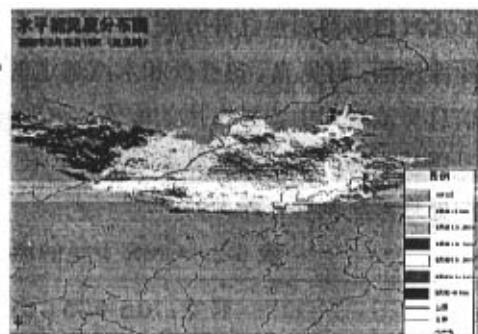


图 3-23 沙尘暴能见度分布图

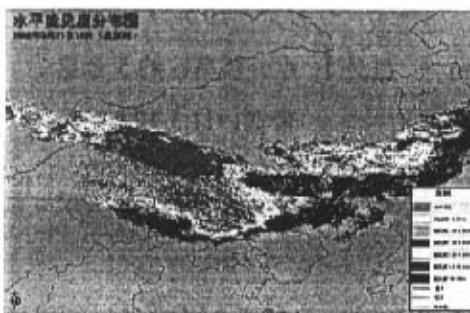


图 3-24 沙尘暴能见度分布图



图 3-25 沙尘暴能见度分布图

### 3.3.4 静止气象卫星沙尘暴信息提取方法

日本 GMS-5 卫星, 有 5 个图形通道, 可用来逐时监测沙尘暴天气的发生、发展与移动等重要信息。下图是 1998 年 4 月 14—15 日造成北方强沙尘暴天气逐时沙尘监测图像。

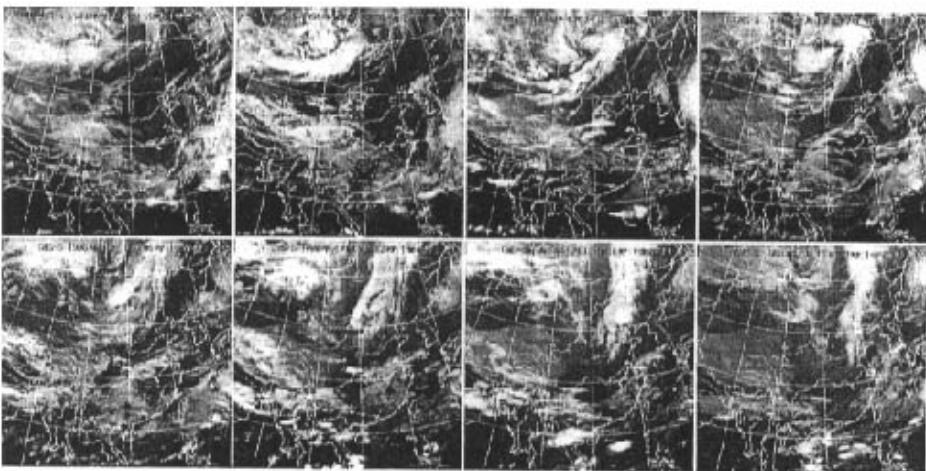


图 3-26 GMS-5 沙尘逐时监测图 (1998 年 4 月 14-15 日)

GMS-5 是 GMS-4 的接替星, 已于 1995 年 3 月 18 日发射成功。GMS-5 增加

了水汽传感器和热红外分裂窗传感器，即将现在的热红外通道分成了两个。S-ISSR 图像包括：可见光、热红外和水汽通道的资料。新增加的数据将被放入现在 GMS-4 信息传输格式中未被占用的段落。这对现在的 MDUS 用户几乎没有影响，他可以只用接收的可见光和红外两种图像。在 MDUS 用户打算使用新增数据时，MDUS 的处理系统则要作修改。

表 3-2: GMS 卫星的通道光谱带宽和空间分辨率

带宽: 0.5-0.75 $\mu\text{m}$	带宽: 10.5-12.5 $\mu\text{m}$
GMS-4: 可见光 星下点分辨率: 约 1.25km	红外 点分辨率: 约 5 公里
带宽: 0.5-0.75 $\mu\text{m}$	带宽: 10.5-12.5 $\mu\text{m}$
GMS-5: 可见光 星下点分辨率: 约 1.25km	红外 I 点分辨率: 约 5 公里
带宽: 6.5-7.0 $\mu\text{m}$	带宽: 11.5-12.5 $\mu\text{m}$
水汽通道 星下点分辨率: 约 5 公里	红外 II 分辨率: 约 5 公里

### 3.3.4.1 从 S-VISSL 数据获得亮温值

#### 1、定标表的使用

通过查阅在 DOC 段贮存的定标表可以得到精确的亮温值，定标表是一个计数值与亮温值所对应的数据表，通过计数值可以转换成亮温值 TBB。

#### 2、换表的使用

使用与目前相同的方法查阅转换表，可以从 S-VISSL 数据中得到亮温值。由于转换表的制定没有考虑亮温计数值和亮温之间周日与周年的变化关系，在使用转换表的过程中，周日和周年的变化可能导致亮温值中存在误差。

### 3.3.4.2 从 S-VISSL 数据获得辐射值

辐射值可以用定标系数利用转换方法计算得到，这种量值以“ $\text{W}/\text{cm}^2\text{sr}$ ”为单位。在定标数据中，定标系数位于第 12 至 147 字，电压 V 可以从 S-VISSL 计数值  $C'$  计算得到

$$C = 255 - C' + C_0 \quad (1)$$

$$C = \sum_{i=0}^n (\beta_i \cdot v_i) = \beta_0 + \beta_1 v + \beta_2 v^2 + \dots + \beta_6 v^6 \quad (2)$$

$$R = (v - v_0)/G \quad (3)$$

C: 亮度计数值 (0-255), V: 电压 (V),  $C'$ : S-VISSL 计数值, G: 斜率  $v_0$ : 截距,  $C_0$ : 计数值偏差,  $\beta_0$ - $\beta_6$  系数 1-系数 7, R: 辐射值 ( $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ) 其中  $C', G, v_0, C_0$ ,

$\beta_0$ ~ $\beta_6$  是存放定标数据块。

### (1) 简易定位方法

在  $(\psi, \lambda)$  和  $(L_{IR1}, P_{IR2})$  间的坐标转换是利用简易定位数据 2 中的转换矩阵类完成的, VIS, IR2 和 IR3 的线号和象号是根据 IR1 的坐标计算的。

$$L_{VIS} = (L_{IR1}-1) * 4 + 2.5 + X_1$$

$L_{VIS}$ : VIS 探测器线号

$$P_{VIS} = (P_{IR1}-1) * 4 + 2.5 + Y_1$$

$P_{VIS}$ : VIS 探测器线号

$$L_{IR2} = L_{IR2} + X_2$$

$L_{IR2}$ : IR2 探测器线号

完成以上数值处理后, 使用多通道判识技术, 可以提取沙尘信息。

## 3.4 沙尘暴光谱分布半定量方法

沙尘中含有大量的矿物质(沙尘气溶胶), 它通过吸收和散射太阳辐射及地面和云层长波辐射来影响地球辐射收支和能量平衡, 同时影响着大气的浑浊度(能见度), 在 AVHRR 的各通道上表现出了光谱特征的差异。由于沙尘的光谱特性与下垫面背景是有区别的, 这为沙尘暴的监测提供了可能。沙尘粒子的辐射特性主要体现在沙尘粒子的粒径大小、形状、质地上。随着沙尘性天气强度的不同, 沙尘的粒径差异也较大, 从浮尘天气到沙尘暴, 其沙粒半径可以从  $0.01 \mu m$  到  $100 \mu m$  以上, 其中造成影响的沙尘暴天气中,  $5 \mu m$  以上半径的沙尘粒子占绝大多数。粒子半径越大, 散射能量越集中在前向方向, 吸收消光也同时增加, 散射比下降。即当天空中大粒子沙尘增多时, 光线被强烈吸收, 能见度急剧下降。根据不同光谱波段上沙尘粒子的散射和辐射特性, 可以有效地将沙尘层、云、地面等遥感目标物和干扰因素加以区分。沙尘粒子对太阳短波辐射的作用介于瑞利散射(大气分子)和 Mie 散射(云滴等)之间。在卫星遥感探测器上感应到的沙尘区的反射率也介于晴空(瑞利散射)和云之间。同时认为悬浮在空中的沙尘粒子的发射特性不但与粒子的构成(直径大小和分布)有关, 也与粒子的浓度有关。

在遥感数据中, 可见光和近红外通道可用来测算下垫面的反射率, 对地表植被、云和水体较为敏感。在 NOAA/AVHRR 数据的可见光通道, 大气沙尘对它的影响往往要高于对近红外通道的影响, 尤其在地表植被盖度较高时更为明显。热红外通道可以用来测算下垫面的亮度温度。由于沙尘与云系、地表在反射率和温度上均有差异, 利用这些特征可以从遥感数据中将沙尘暴信息分离出来。利用 NOAA/AVHRR 数据分析了下垫面、云和沙尘区的光谱特征, 从以下给出的直方图上(图 3-27、28、29、30), 可以清楚的反映出三者在光谱特征上的明显差异, 在 1~4 通道的反射率(或亮温)特征中, 下垫面数值分别集中在 17%、18%、25% 和 290K 处, 沙尘区数值分别在 28%、25%、50% 和 265K 处, 云区数值分别集中在 50%、

45%、25%和230K处。

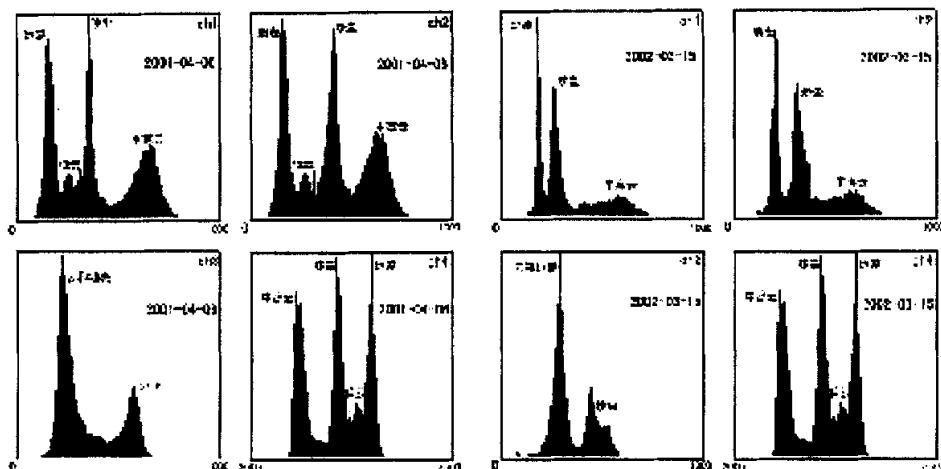


图 3-27、28、29、30 沙尘等目标物的光谱特征图

### 3.5 EOS/MODIS 资料在沙尘暴监测中的应用研究

#### 3.5.1 地球观测系统 (EOS)

EOS 是一个用一系列低轨道卫星对地球进行连续、综合观测的计划，目的是通过对全球变化的直接观测，对地球系统进行深入研究，加深对自然过程如何影响人类，而人类又如何影响自然过程的理解。这种深入研究，将改进当前的天气预报，有助于管理农业和森林，为国家和当地政府提供信息，并且最终增强人类预报未来气候变化的能力。

EOS 计划中的主要卫星都是目前世界上最大的对地观测卫星平台，都是太阳同步轨道，有三个系列，即 EOS-AM (上午轨道) 系列，降交点时间为 10:30am; EOS-PM (下午轨道) 系列，降交点时间为 13:30 分；专门用于大气化学测量的下午太阳同步卫星，称为 EOS-CHEM 系列，降交点时间为 13:45。EOS-AM, PM 和 CHEM 系列卫星都是三轴稳定卫星平台，98.2° 倾角，高度 705Km，16 天 (233 条轨道) 的完全重周期。在上述主卫星之外，还有一系列的中、小卫星也归属 EOS 卫星系列。

经过长达 8 年的制造和前期预研究准备工作，1999 年 12 月 18 号 EOS 的第一颗上午轨道卫星发射升空，发射成功后卫星命名为 TERRA (拉丁语“地球”的意思，因为此卫星在上午当地时间 10:30 全球云量最少时过境，主要目的是观测地球表面)。地球一大气系统反射的太阳辐射 (可见光和近红外)，或接收地球一大气系统发射的热辐射 (红外、微波等)，这些辐射能专门设计的探测器上，这些探测器对电磁波能量谱的某些频段很敏感。

EOS 的第二颗卫星 (下午轨道) 也于 2002 年下半年发射 (发射成功此卫星将

被命名为 *Aqua*, 拉丁文“水”, 因为此卫星是在全球云量最多时进行观测, 主要用于水循环观测)。

EOS 卫星系统的先进性在于它先进的观测仪器系统。TERRA 卫星共载有 5 个遥感有效载荷即:

- 1、先进的星载热发射和反射辐射计 (ASTER)
- 2、云和地球辐射能量系统观测仪器 (CERES)
- 3、多角度成像光谱辐射计 (MISR)
- 4、对流层污染测量仪 (MOPITT)

5、中分辨率成像光谱仪 (MODIS): 这些仪器都将是世界上首次进行星载飞行的仪器。CERES 和 MOPITT 则通过对云和对流层污染气体的监测而研究全球气候问题。

### 3.5.2 中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 特色和优势

在 EOS 系列卫星上, 不论仪器如何配置, 但都必须有 MODIS 仪器, 而且全部对全世界以实时观测数据通过 X 波段直接广播, 其他仪器数据和全球 MODIS 数据主要由美国在极地附近的高纬度全球观测接收站接收, 然后由中继卫星传到位于美国本土的 EOS 数据和信息系统 (EOSDIS)。(参考张文建、刘玉洁有关材料)。

36 个光谱通道的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 是 EOS 卫星系列上的最主要的仪器。详见表 3-3。其特点是:

1、多通道同时观测: MODIS 仪器有 36 个离散光谱波段, 光谱范围宽, 从 0.4 (可见光) 到 14.4 (热红外) 微米全光谱覆盖; 同时多通道观测大大增强了对地球复杂系统的观测能力和对地表类型的识别能力;

2、高分辨率观测: MODIS 有两个通道最高空间分辨率可达 250 米 (面积分辨率比 NOAA/AVHRR 仪器高 18 倍), 大大增强了对地球大范围区域细致观测的能力; 5 个通道为 500 米, 29 个通道为 1 公里, 全球均一分辨率观测;

3、大范围观测: 扫描观测宽度达 2330 公里, 在纬度 25 度以上区域一颗卫星一次就可以全部覆盖全球中、高纬度地区, 同时获取地球多种环境信息;

4、每日全覆盖、多频次观测: EOS 下午轨道卫星发射后, 两颗卫星每天可以对我国绝大部分地区每天进行 4 次观测, 这对多种突发性、快速变化的自然灾害有很强的实时监测能力;

5、高精度观测: MODIS 仪器是目前世界上最高精度的辐射观测仪器。主要体现在两个方面。一是仪器各通道输出的量化等级为 12 比特, 温度分辨率可达 0.03 度, 量化等级比 NOAA 仪器 (10 比特) 高四倍, 适用于高精度测量和观测。二是先进而精确的定标系统。

表 3-3: MODIS 仪器性能参数和通道光谱特性表

轨道: 705 公里高度, 降交点地方时 10:30am (上午轨道) 或升交点地方时 13:30 (下午轨道), 近极地太阳同步圆形轨道, 卫星重量: 5600 公斤; 设计寿命: 6 年。 仪器: 扫描速率每分钟 20.3 转; 扫描宽度: 2330 公里 (横跨轨迹) × 10 公里 (沿轨迹); 望远镜: 主镜直径 17.78cm; 1.0 × 1.6 × 1.0 米; 重量: 250 公斤; 功率: 平均 225 瓦。 数据速率: 11Mbps (白天峰值时间); 量化等级: 12bits (比特)。 空间分辨率 (星下点): 250 米 (1-2 通道); 500 米 (3-7 通道); 1000 米 (8-36 通道)				
主要应用目的	通道	带宽 (nm)	光谱辐射率	信噪比
陆地、云边界	1	620-670	21.8	128
	2	841-876	24.7	201
陆地、云特性	3	459-479	35.3	243
	4	545-565	29.0	228
	5	1230-1250	5.4	74
	6	1628-1652	7.3	275
	7	2105-2155	1.0	110
	8	405-420	44.9	880
	9	438-448	41.9	838
海洋水色/浮游植物	10	483-493	32.1	802
	11	526-536	27.9	754
	12	546-556	21.0	750
	13	662-672	9.5	910
	14	673-683	8.7	1087
	15	743-753	10.2	586
	16	862-877	6.2	516
大气水汽	17	890-920	10.0	167
	18	931-941	3.6	57
	19	915-965	15.0	250
主要应用目的	通道	带宽 (μm)	光谱辐射率	等效噪声温差
表面和云顶温度	20	3.660-3.840	0.45	0.05
	21	3.929-3.989	2.38	2.00
	22	3.929-3.989	0.67	0.07
	23	4.020-4.080	0.79	0.07
大气温度	24	4.433-4.493	0.17	0.25
	25	4.482-4.549	0.59	0.25
卷云	26	1.360-1.390	6.00	150 <sup>4</sup>
水汽	27	6.535-6.895	0.16	0.25
	28	7.175-7.475	2.18	0.25
	29	8.400-8.700	9.58	0.05
臭氧	30	9.580-9.880	3.69	0.25
表面/云顶温度	31	10.780-11.280	9.55	0.05
	32	11.770-12.270	8.94	0.05
云顶高度	33	13.185-13.485	4.52	0.25
	34	13.485-13.785	3.76	0.25
	35	13.785-14.085	3.11	0.25
	36	14.085-14.385	2.08	0.35

MODIS 将扩展以前著名仪器（如 AVHRR 和 CACS 等）的数据集；这些仪器一直用于气象学，监测海面温度，海冰和植被。MODIS 将是 EOS 卫星系列用于全球变化研究的最主要、最有用的工具。在沙尘天气监测中也将发挥更大作用。

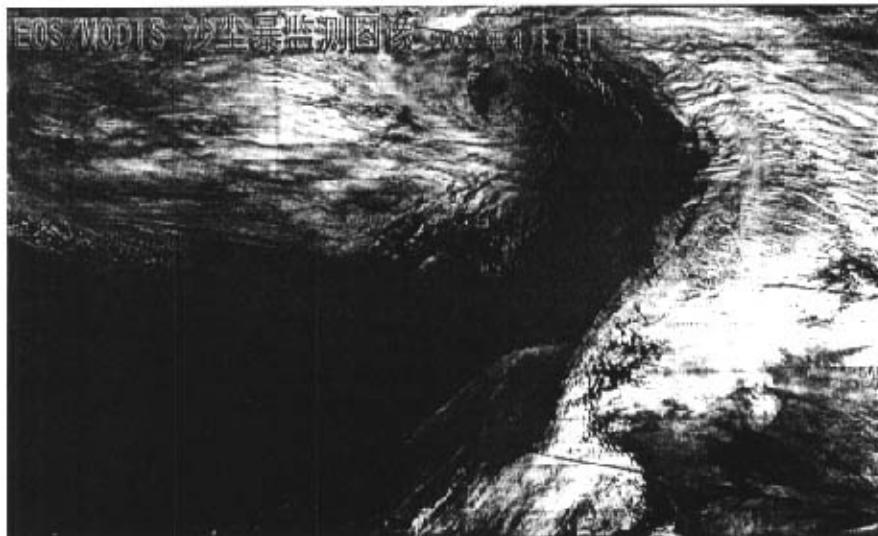


图 3-31 2000 年 4 月 7 日 MODIS 沙尘监测图像

### 3.6 沙尘暴遥感监测结果精度检验

利用 2001 和 2002 年的资料对卫星遥感监测沙尘天气和沙尘暴的结果进行了精度检验，沙尘天气监测准确率稳定在 88% 以上，沙尘暴监测准确率稳定在 95% 以上（见表 3-4）。从表中可以看出，云对沙尘暴监测的准确率影响很大。

表 3-4: 2001-2002 年沙尘暴遥感监测结果检验

日期	沙尘报告站点总数	云覆盖数	识别数	未识别数	沙尘暴报告总数	云覆盖数	识别数	未识别数
2001.04.02	3	0	2	1	0	0	0	0
2001.04.06	59	12	44	3	32	7	23	2
2001.04.07	20	12	8	0	8	3	5	0
2002.03.15	38	10	27	1	14	0	14	0
2002.03.16	25	4	21	0	1	0	1	0
2002.03.20	285	201	80	4	56	30	26	0
2002.03.21	89	21	58	10	26	4	20	2
2002.03.24	15	0	13	2	10	0	10	0
2002.03.29	92	24	61	7	9	3	5	1
2002.03.31	11	1	7	3	2	0	2	0
2002.04.01	2	0	1	1	1	0	0	1
2002.04.06	54	7	31	16	23	3	20	0
合计	693	292	353	48	182	50	126	6
百分比		42.1%	50.9%	6.93%		27.5%	69.2%	3.3%
准确率(去掉云影响)		88.3%	11.9%			95.5%	4.5%	

### 3.7 本章小结

本章概述了沙尘暴遥感监测方法, 探讨了利用气象卫星数据提取沙尘暴信息的方法, 并对沙尘暴遥感监测结果的精度进行了检验。

#### 主要参考文献:

- 1 方宗义, 张运刚, 郑新江等。用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果。第四纪研究, 2001 年 01 期
- 2 徐希慧。塔里木盆地沙尘暴卫星云图特征分析, 甘肃气象 1997 年 02 期
- 3 郑新江, 徐建芬等。利用风云 1C 气象卫星监测南疆沙尘暴研究。中国沙漠, 2000, 20 (3): 286-288
- 4 郑新江, 罗敬宁, 刘征。FY-1C 气象卫星在沙尘暴监测中的应用。上海航天, 2001 年 01 期

## 第四章 沙尘暴短时预警

在对全国较大的几十次沙尘暴天气过程进行综合分析的基础上，提出影响我国沙尘天气的四条冷空气路径，并利用 37 个高空探空天气站和 59 个地面气象观测站的资料开展沙尘暴短时预警研究。

### 4.1 预警的意义

沙尘暴，特别是特强沙尘暴是一种危害极大的灾害天气。当其形成之后，会以排山倒海之势滚滚向前移动，携带砂粒的强劲气流所经之处，通过沙埋、风蚀沙割、狂风袭击、降温霜冻和污染大气等作用方式，使大片农田或受沙埋、或遭风蚀刮走沃土，或者农作物受霜冻之害；致使有的农作物绝收，有的大幅度减产；它能加剧土地沙漠化，对大气环境造成严重污染，对生态环境造成巨大破坏，对交通和供电线路产生重要影响，给人民生命财产造成严重损失。

由于近几年强沙尘暴发生频数有逐年增加的趋势，加之土地资源超载的局面短期内难以改善，随着全球气候的变暖，水资源短缺的矛盾将日趋尖锐。因此，沙尘暴对人类的危害也将随之增大。

表 4-1 列出七十年代以来的五次强沙尘暴天气概况和造成的灾害表明，强沙尘暴的风力可达 12 级以上，与东南沿海登陆台风的最大风力相当。

表 4-1 七十年代以来五次强沙尘暴天气概况和灾害表

日期	影响地区	风力	能见度	主要灾情
1977 年 4 月 22 日	甘肃酒泉、张掖	38 米/秒	0 米	仅张掖地区死亡 54 人，失踪 25 人，大面积农田受灾。
1979 年 4 月 9~11 日	新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙古等省区的部分地区	46 米/秒	0 米	仅新疆死亡 29 人，伤 43 人，死亡牲畜 2.57 万头（只），受灾农田 45 万亩，损坏房屋 1.4 万间，兰新铁路沿线各站损失 4200 万元。
1983 年 4 月 26 ~ 28 日	新疆东部和南部、青海中部、甘肃平凉、宁夏中部、内蒙古河套地区、陕西榆林	>35 米/秒	<100 米	宁夏死亡 14 人，成灾农作物 200 万亩以上；内蒙古伊克昭盟和陕西榆林地区死亡失踪 58 人，死亡丢失牲畜 16 万头（只）。
1986 年 5 月 17 ~ 20 日	新疆和田、哈密，甘肃酒泉地区	35 米/秒	0 米	新疆和田地区死亡 10 人，失踪 9 人；哈密市损失 1900 多万元；兰新铁路多处被掩埋，中断运行 31 小时之久。
1993 年 5 月 5 日	新疆东部、甘肃河西、宁夏大部、内蒙古西部	38 米/秒	0 米	死亡 85 人，失踪 31 人，重伤 264 人，死亡和丢失牲畜 12 万头（只），直接经济损失 5.5 亿元。

全球沙尘暴多发生于沙漠及邻近的干旱、半干旱的地区（图 4-1）。非洲的撒哈拉地区，亚洲的阿拉伯、西南亚、中国西北部、前苏联中亚地区，美国西南部地区、澳大利亚地区等地是沙尘暴发生的地区。

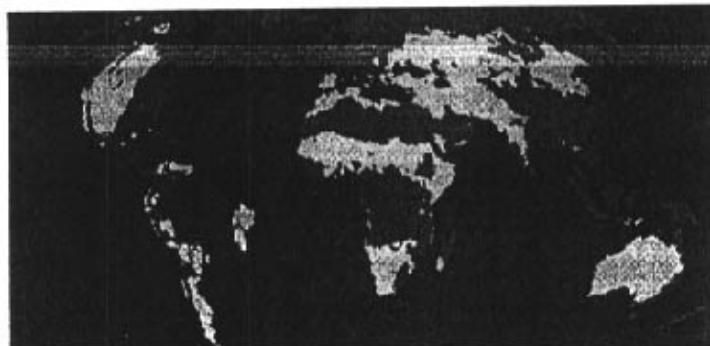


图 4-1 全球主要干旱区分布图（温克刚等 2000 年）

我国西北地区大部分是沙漠、干旱和半干旱地区，每年春季频繁发生的沙尘暴不仅给当地造成了重大的自然灾害，而且也严重危害京津等地，并波及到全国。

目前我国沙尘暴多发区域和主要影响区域已具备以地面气象观测、高空探测、遥感探测（卫星等）所构成的气象综合探测网。地面站距为 50-100 公里，高空站距 300 公里，观测时间间隔一般为 6-12 小时，地面气象观测项目为：温度、气压、湿度、风向、风速、降水、天气现象、云量、能见度、日照、蒸发、地温等常规气象要素；高空探测项目为：规定等压面温、压、湿和风；气象卫星主要用于探测大范围高时空分辨率的云系分布与演变等。对监测形成沙尘暴的天气尺度系统与中尺度系统，十分有利。

通过对 1977-2001 年北方地区几十例强沙尘暴过程进行卫星云图和天气形势综合分析，根据影响沙尘暴发生的冷空气移动路径和云图上云带特征，建立了短时（<24 小时）天气预警模式。该模式在分析沙尘暴形成的卫星与天气的机制基础上找出预报着眼点，进而确定相应的天气图关键区，选择关键区内的气象站的高空与地面要素，建立分类模型、热力模型和动力模型，最后形成沙尘暴短时预警系统。

## 4.2 沙尘暴的成因分析

### 4.2.1 我国沙尘天气发生频次的历史演变

从公元 300 年以来我国沙尘事件的频数曲线（图 4-2 温克刚等，下同）。可见近千年期间，沙尘频发期大约有 5 个，即 1060~1090, 1160~1270, 1470~1560, 1610~1700, 1820~1890，每个频发期大约为 90 年左右，目前我国进入频发期。

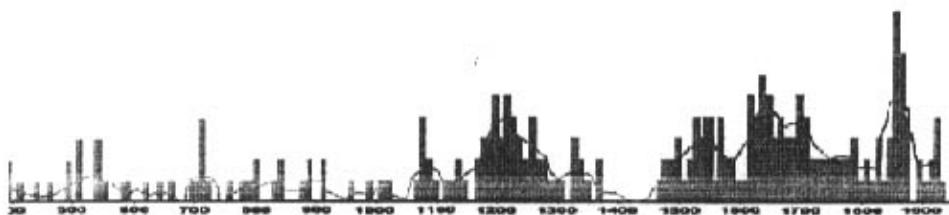


图 4-2 公元 300 年以来我国沙尘事件频数曲线

#### 4.2.2 近 50 年来我国沙尘天气地理分布和变化趋势

沙尘天气是大气运动和自然地理环境的综合产物。从近 50 年气象台站的观测结果分析，我国长江以北大部地区都曾出现过扬沙和沙尘暴天气，并以西北地区最为突出。沙尘的多发区主要集中在塔里木盆地周围，敦煌-河西走廊-宁夏平原-陕北一线，内蒙古阿拉善高原、河套平原和鄂尔多斯高原（图 4-3）。



图 4-3 我国扬沙、沙尘暴地理分布

#### 4.2.3 沙尘灾害在我国分布的一般特点

沙尘灾害在我国的分布具有以下三个显著特点：

首先，影响面积大。西起新疆，东抵沿海，受沙尘暴、扬沙和浮尘不同程度影响的省市区分别为 17 个、25 和 27 个。

其次，强多发区集中。在我国西北部集中着两个主要强多发区：塔克拉玛干沙漠及附近地区；巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠及其邻近地区。

再次，与沙漠和沙地密切关连。古尔班通古特、塔克拉玛干、库姆塔格、柴达木盆地、巴丹吉林、腾格里、乌兰布和毛乌素等沙漠，以及散布在黄河河套、青藏高原、蒙古高原的沙地为沙尘天气的出现提供了极为丰富的物质源。

此外，沙尘的分布还受到天气系统分布、植被分布、降水分布等的显著影响。沙尘暴往往与其它自然灾害相伴发生，如干旱、冷空气入侵、龙卷风等，研究

表明，沙尘暴和扬沙的运动路径与冷空气入侵路径有相当一致性。

#### 4.2.4 沙尘暴的成因分析

##### 4.2.4.1 宏观条件

据有关研究指出，沙尘暴的形成有三个基本条件：

一是大风，这是形成沙尘暴的动力条件。沙尘暴是强风的产物，但它发生频率及强度又多与降水有关。从千年气候变化的背景分析，沙尘暴高发期对应于少雨干旱的气候背景（下图中的斜线所示）。图（4-4）中 1060-1270 年、1470-1920 年两段沙尘暴高发期与这一时期的干旱是相对应的。另外，近年来强沙尘暴发生频率趋高，与厄尔尼诺事件频繁发生、1998 年 6 月以来赤道东太平洋又出现了较强的拉尼娜事件以及人类活动排放温室气体的增加导致的气候变暖等有关。

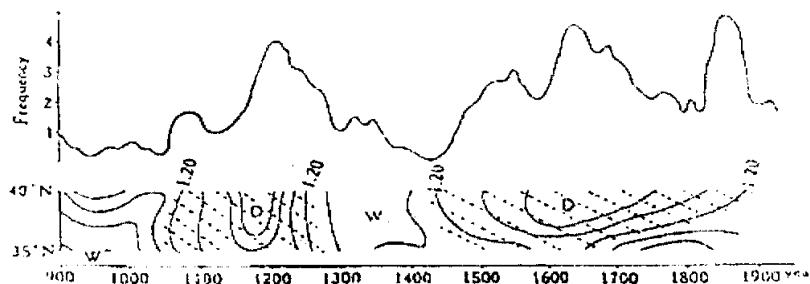


图 4-4 千年湿度指数曲线（下）与沙尘暴发生频率（上）对比图

图 4-4 千年湿度指数曲线（下）与沙尘暴发生频率（上）对比图

二是不稳定的空气状态，这是重要的局地热力条件。沙尘暴多发生在午后至傍晚时段内，就充分说明了大气不稳定状态的重要性。

三是地面上的沙尘物质，它是沙尘暴的物质基础。根据国家林业局提供的信息，我国的环境总体上恶化。图 4-5、图 4-6 为沙尘暴的发生提供了丰富物质。



图 4-5 我国沙化土地监测体系

图 4-6、我国沙尘暴源区

下面是 4 个沙尘暴源区的基本情况（图 4-7 至图 4-14）。

## 1. 新疆塔克拉玛干沙漠周边地区

新疆塔克拉玛干沙漠周边地区包括2省(区)、15个县、总面积81.3万km<sup>2</sup>，其中沙漠土地36.7万km<sup>2</sup>，流动沙地26.7万km<sup>2</sup>，半固定沙地19.3万km<sup>2</sup>，固定沙地2.6万km<sup>2</sup>，其余类型21.3万km<sup>2</sup>。

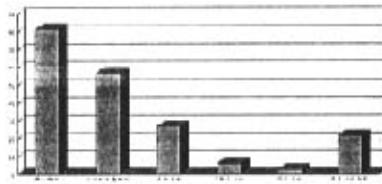


图 4-7 新疆塔克拉玛干沙漠周边地区

## 2. 河西走廊及阿拉善地区

该地区包括甘肃、内蒙古自治区、河西走廊土地31.0万km<sup>2</sup>，流动沙地1.6万km<sup>2</sup>，半固定沙地1.7万km<sup>2</sup>，固定沙地0.5万km<sup>2</sup>，其余类型16.2万km<sup>2</sup>。

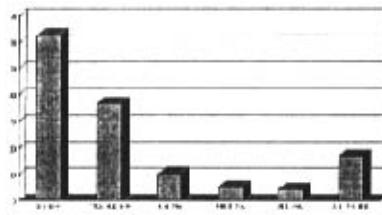


图 4-9、河西走廊及阿拉善地区

## 3. 蒙陕宁长城沿线

该地区包括3省、15个县，总面积31.0万km<sup>2</sup>，其中沙漠土地9.3万km<sup>2</sup>，流动沙地1.6万km<sup>2</sup>，半固定沙地1.7万km<sup>2</sup>，固定沙地0.5万km<sup>2</sup>，其余类型19.5万km<sup>2</sup>。

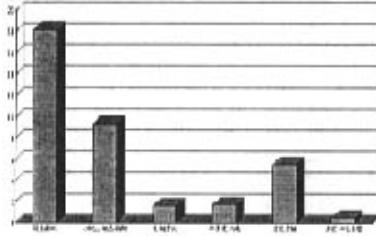


图 4-11、蒙陕宁长城沿线

## 4. 乌盟后山和浑善达克沙地

该地区包括2省、24个县，总面积31.0万km<sup>2</sup>，其中沙漠土地11.4万km<sup>2</sup>，流动沙地0.5万km<sup>2</sup>，半固定沙地0.9万km<sup>2</sup>，固定沙地0.1万km<sup>2</sup>，其余类型18.6万km<sup>2</sup>。

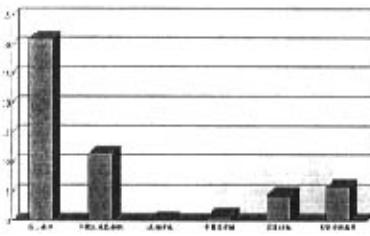


图 4-13、乌蒙后山和浑善达克沙地

## 植被状况：

该地区植被综合度≤5% 的面积43.1万km<sup>2</sup>，占76.0%；≤5% 和≤10% 的面积4.7万km<sup>2</sup>，占8.2%；≤10% 和≤20% 的面积3.1万km<sup>2</sup>，占5.4%；≤20% 和≤30% 的面积1.6万km<sup>2</sup>，占2.8%；≤30% 和≤50% 的1.8万km<sup>2</sup>，占3.3%；≤50% 的面积0.2万km<sup>2</sup>，占0.3%。

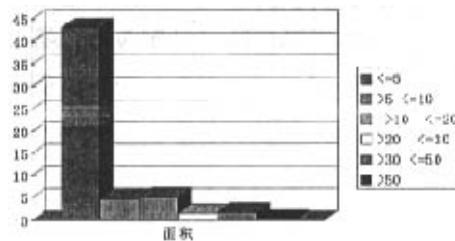


图 4-8 植被状况

## 植被条件：

该地区植被综合度≤5% 的面积14.2万km<sup>2</sup>，占沙化土地面积的7.5%；≤5% 和≤10% 的面积4.5万km<sup>2</sup>，占21.8%；≤10% 和≤20% 的面积3.5万km<sup>2</sup>，占16.3%；≤20% 和≤30% 的面积2.9万km<sup>2</sup>，占7.8%；≤30% 和≤50% 的面积3.2万km<sup>2</sup>，占13.5%；≤50% 和≥50% 的面积0.7万km<sup>2</sup>，占3.5%。

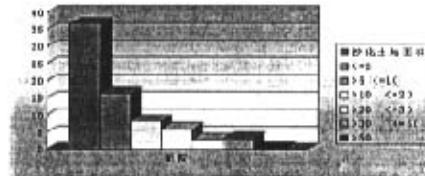


图 4-10、植被条件

## 植被状况：

该地区植被综合度≤5% 的面积0.7万km<sup>2</sup>，占沙化土地面积的7.5%；≤5% 和≤10% 的面积1.3万km<sup>2</sup>，占14.0%；≤10% 和≤20% 的面积1.0万km<sup>2</sup>，占11.1%；≤20% 和≤30% 的面积0.8万km<sup>2</sup>，占8.3%；≤30% 和≤50% 的0.9万km<sup>2</sup>，占22.7%；≤50% 的面积0.7万km<sup>2</sup>，占7.3%。

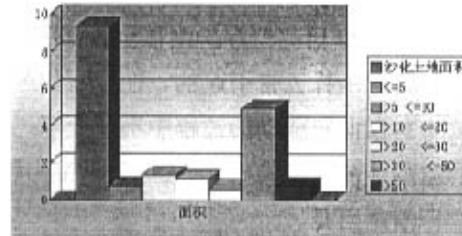


图 4-12、植被状况

## 植被状况：

该地区植被综合度≤5% 的面积1.1万km<sup>2</sup>，占沙化土地面积的9.3%；≤5% 和≤10% 的面积0.4万km<sup>2</sup>，占3.5%；≤10% 和≤20% 的面积0.6万km<sup>2</sup>，占5.3%；≤20% 和≤30% 的面积1.1万km<sup>2</sup>，占28.1%；≤30% 和≤50% 的0.9万km<sup>2</sup>，占34.2%；≤50% 的面积2.1万km<sup>2</sup>，占19.3%。

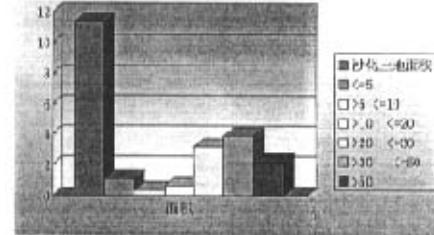


图 4-14、植被状况

王式功（1996）等通过对沙尘暴形成的宏观天气气候条件和下垫面状况的系统分析，认为沙尘暴主要发生在春季和初夏季节有五方面的原因：第一，丰富沙尘源的下垫面和特殊的地形条件；第二，冬半年长时间的干燥和冻结，到春季解冻后地表土质变得很疏松；第三，春季高空急流轴所处位置是北方地区易吹大风的重要原因；第四，春季大气层结不稳定度增大，午后易产生对流，有利于高空动量下传；第五，春季是北方地区冷锋活动最频繁的季节，锋后大风也是产生沙尘暴最重要的因素之一。

#### 4.2.4.2 主要影响系统

沙尘暴是多种因素共同作用的产物。尤其是特强沙尘暴的发生发展，在具备宏观的气候和下垫面条件的前提下，还需有利的环流形势和天气系统相配合，Brazel 分析了美国亚利桑那州 1965-1980 年期间沙尘暴发时的各种天气特征后指出，四种天气系统：锋面系统、雷暴与对流、热带扰动和上层切断低压易导致沙尘暴的产生。通过对我国北方地区几次大范围强或特强沙尘暴天气过程的分析，总结出了我国产生沙尘暴过程的四种云型特征。

##### 1、冷锋云系型沙尘暴天气云图特征

与冷锋云系相伴的沙尘暴是我国西北地区出现次数最多的一类。在云图上，冷锋云系呈带状分布十分明显。引起沙尘暴的冷锋云带，在云图上又可分为宽云带和狭云带两种，宽云带引起沙尘暴较强，狭云带移动速度较快引起沙尘暴范围较广。例如，1983 年 4 月 27~28 日西北地区出现大范围沙暴天气（最大风速大于 35m/s），29 日高空浮尘漂移至长江下游，30 日到达日本上空。此次过程主要是由一条狭的冷锋云带引起的，在 27 日 08 时的云图上，云带位于新疆东部（图略），云带自西向东移动的过程中不断变窄；到 14 时（图 4-15）影响河西走廊，由于地形阻挡（内蒙古雅布赖山脉），云带出现断裂。在云图上，云带尾部沙尘暴区与浮尘区清晰可见。

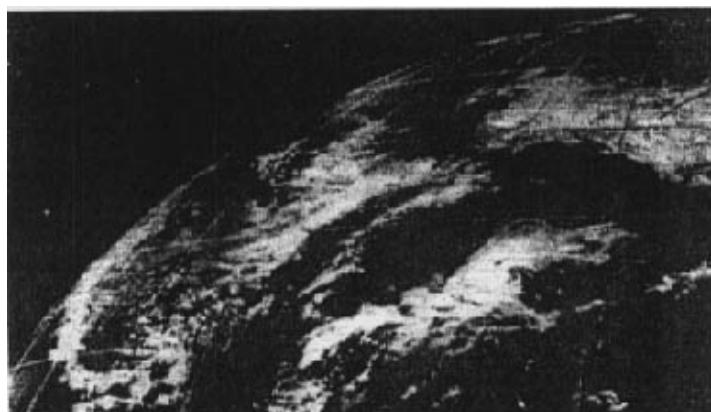


图 4-15、1983 年 4 月 27 日 14 时 VIS GMS-2

天气形势：1983年4月27~28日，在贝加尔湖有低压槽加深，槽后冷平流很强，地面有冷锋配合。图4-16给出了700hPa急流轴位置，地面冷锋和冷高压移动位置及沙尘影响范围。从图上可以分析出，27日08时地面强高压中心(1040hPa)在阿尔泰，28日08时移至祁连山区，29日08时到达秦岭(1030hPa)。高压前面的冷锋向东南方向移动较快，平均移速50km/h，锋后出现大范围沙尘暴及浮尘天气。

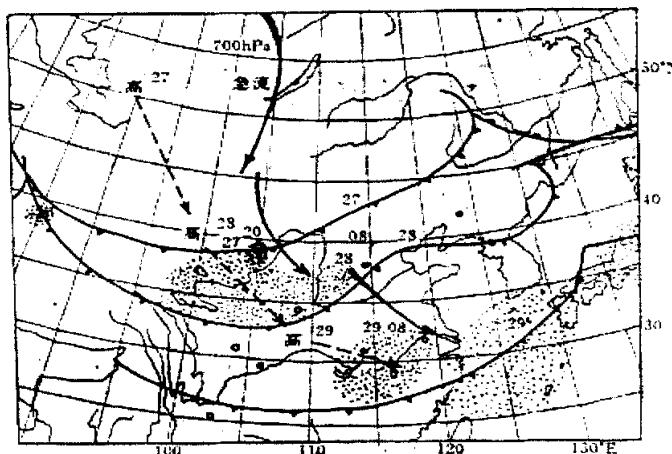


图4-16、1983年4月27-29日综合天气图

预报要点：关键是掌握冷锋云系东移中是否发展。在云图上，从云带演变本身可以判断；另外从云带后面的晴空区范围是否加强也可以判断未来冷锋云系是否发展，由于锋后晴空区对应中亚脊，当中亚浅脊与沿北支锋区东移的北欧高压脊或新地岛南下登陆的小高压脊同位相叠加后将强烈发展，使晴空区范围扩大，其前部的冷锋云带也将发展。

## 2、蒙古气旋云型沙尘暴天气云图特征

每年春季，我国北方地区多蒙古气旋活动，因此蒙古气旋是造成北方沙尘暴的重要天气系统之一。尤其是2000年—2002年春季，华北、东北地区的强沙尘暴天气均与蒙古气旋的发生发展有关。下面以2001年4月6-7日强沙尘暴过程为例做一分析。

首先，沙尘暴时空演变和主要灾情：4月6日02时，西西伯利亚冷空气开始侵入新疆，在吐鲁番出现扬沙，同时甘肃省马鬃山出现7级大风。08时冷空气东移侵入内蒙古西部阿拉善盟，阿拉善盟开始出现大范围扬沙。14时沙尘天气迅猛加强，内蒙古阿拉善盟、巴彦淖尔盟北部、包头市北部、乌兰察布盟北部和锡林郭勒盟西部出现大范围沙尘暴和特强沙尘暴，水平能见度下降到200m到300m，其中阿拉善盟的额济纳旗沙尘暴从8点25分持续到16点17分，持续时间近8个小时，能见度下降到0m，风力达到7-9级（巴彦淖尔盟乌拉特后旗定时风速24m/s，

满都拉庙定时风速 22m/s)。6 日 20 时, 阿拉善盟、巴彦淖尔盟沙尘暴减弱停止, 包头市北部、乌兰察布盟北部、锡林郭勒盟西部沙尘暴仍在持续, 其范围向东扩展到锡林郭勒盟中东部, 能见度下降到 200m 以下。7 日 02 时, 沙尘暴和强沙尘暴区稳定少动。其间在 6 日 16 时到 7 日 02 时, 沙尘暴强度达到最强, 内蒙古中部偏北地区 5 个气象站点能见度降至 0m, 形成特强沙尘暴(黑风暴)。7 日 08 时包头市北部、乌兰察布盟北部, 沙尘暴减弱停止, 沙尘暴区继续向东扩展到内蒙古赤峰市北部、通辽市北部、兴安盟北部, 其中兴安盟北部的胡尔勒、索伦、扎赉特旗出现了强沙尘暴, 能见度下降到 50m 到 300m。7 日 14 时上述地区沙尘暴仍然持续, 同时黑龙江和吉林省开始出现沙尘暴。7 日 20 时除赤峰市北部和黑龙江省少数地区仍有沙尘暴外, 横扫我国西北、华北、东北 7 个省、区及蒙古国南部, 历时 40 多个小时的沙尘暴才告停止。

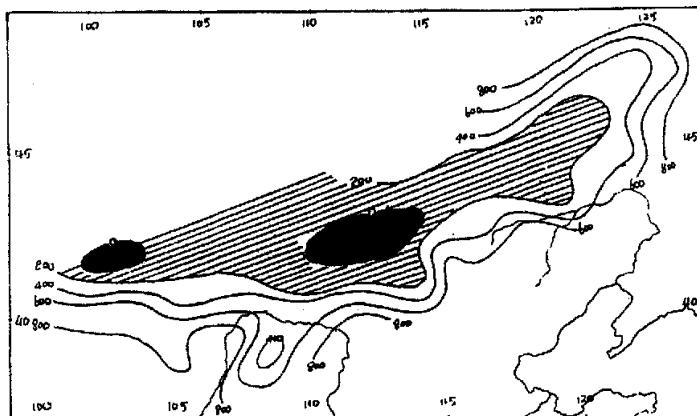


图 4-17: 2001 年 4 月 6-7 日内蒙古、黑龙江、吉林沙尘暴最小能见度分布(单位: m)

图 4-17 是 6 日 14 时到 7 日 20 时各站最小能见度分布图。由图上可见, 这次沙尘暴过程, 最强中心位于内蒙古中部偏北地区。强沙尘暴区主要位于 42° N 以北, 且呈东西带状, 这与造成强风的蒙古气旋活动和高空急流活动有着密切关系。表 3 是各级能见度出现站数。由表中可见此次沙尘暴过程非常猛烈, 影响范围非常广阔。阿巴嘎旗特强沙尘暴(能见度 0m)自 6 日 20 时一直持续到 7 日 02 时, 持续时间长达 6 小时之久。利用地理信息系统和卫星遥感图象分析此次沙尘暴在中国境内影响面积约 103 万平方公里。

表 4-2 4 月 6-7 日各级水平能见度出现站数

分级	$V \leq 50m$	$50m < V \leq 200m$	$200m < V \leq 500m$	$500m < V < 1000m$
站级	7	13	14	15

这场强沙尘暴给我国北方, 造成了严重环境灾害, 给农牧业造成巨大损失,

也严重影响了交通安全和人的身体健康。据不完全统计,仅内蒙古巴彦淖尔盟乌拉特后旗农区刚播种的2.3万亩小麦有95%被风刮出地表。锡林郭勒盟北部和西部5个旗成幼畜死亡30783头(只),走失3万多头(只),倒塌和损坏棚圈4310间,被沙埋没草场3000亩,大部分牧民住房屋顶瓦被刮掉,大量蒙古包被损坏。苏尼特右旗旗政府所在地赛汗塔拉,因强沙尘暴造成医院人满为患,有的人病情严重至死。齐齐哈尔因沙尘暴机场被迫关闭8个小时。

其次,蒙古气旋爆发性发展和强冷空气入侵:蒙古气旋的生成发展和移动,这次大范围强沙尘暴与蒙古气旋爆发性发展关系密切。蒙古气旋4月5日02时生成于蒙西山地西侧,中心位于 $51^{\circ}\text{N}, 82^{\circ}\text{E}$ ,中心气压1003hPa。后向东偏南方移动,6日02时中心位于 $49^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}$ ,中心气压加深到995hPa,此时气旋冷锋开始影响新疆、甘肃,形成大风沙尘天气。6日08时越过蒙西山地,移到乌兰巴托附近,气旋中心加深到991hPa,在气旋冷锋袭击下,内蒙古西部的阿拉善盟出现大范围扬沙。其后气旋沿 $48^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$ 纬带东移,气旋冷锋和副冷锋扫过内蒙古,内蒙古出现大范围强沙尘暴。6日20时到7日02时气旋爆发性发展,6个小时气旋中心气压急剧下降了6hPa,气旋中心移动缓慢(只移动了100km,而气旋自5日02时生成到7日20时消亡,6小时平均移动速度为246km),在锡林郭勒盟引发了最猛烈的沙尘暴,二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗,6日20时到7日02时能见度为0m。显然气旋爆发性发展使地面风迅速加大,造成沙尘暴猛烈加强。7日08时气旋锢囚,中心东移到 $48.5^{\circ}\text{N}, 118.5^{\circ}\text{E}$ ,沙尘暴开始影响我国东北黑龙江省和吉林省,沙尘暴带环绕在冷锋后气旋中心南部。气旋中心加深到977hPa(24小时内气旋中心加深了14hPa)。这一记录不仅是本次强沙尘暴过程蒙古旋中心气压的最低值,也是2001年1—5月份18次蒙古气旋沙尘暴过程气旋中心气压的最低值。强沙尘暴和特强沙尘暴就发生在6日08时到7日08时这一时段。这一事实说明,沙尘暴强度、范围和持续时间与蒙古气旋的强度和持续时间有着密切关系。7日14时期蒙古气旋开始填塞,20时消亡。

图4-18、图4-19分别是4月6日14时NOAA-16和4月7日08时FY-1C气象卫星监测到的沙尘暴遥感图象。由图4-18可以看出有两条沙尘暴带,分别与蒙古气旋冷锋和副冷锋相联系,配合地面测站沙尘暴观测记录,可以确定沙尘暴主要出现在地面冷锋和副冷锋之后(与副冷锋相联系的强沙尘暴带,后由蒙古侵入我国),紧跟地面锋线。另外在气旋暖区中(图中A区)有一强沙尘暴区,水平尺度约300km。这一中尺度强沙尘暴区位于内蒙古锡林郭勒盟西部的二连浩特和朱日和,水平能见度为200m是中尺度天气系统造成的。由图4-19配合地面气旋分析,可以看出此时蒙古气旋已发展到鼎盛期,形成锢囚气旋。强沙尘暴区仍位于气旋冷锋和副冷锋之后,紧跟地面锋线。就天气尺度系统而言,冷锋后的大风是形成

沙尘暴起沙的主要动力。在本例中由于气旋的强烈发展，冷锋后的大风为西风或西南风，与通常是西北风或偏北风不同。

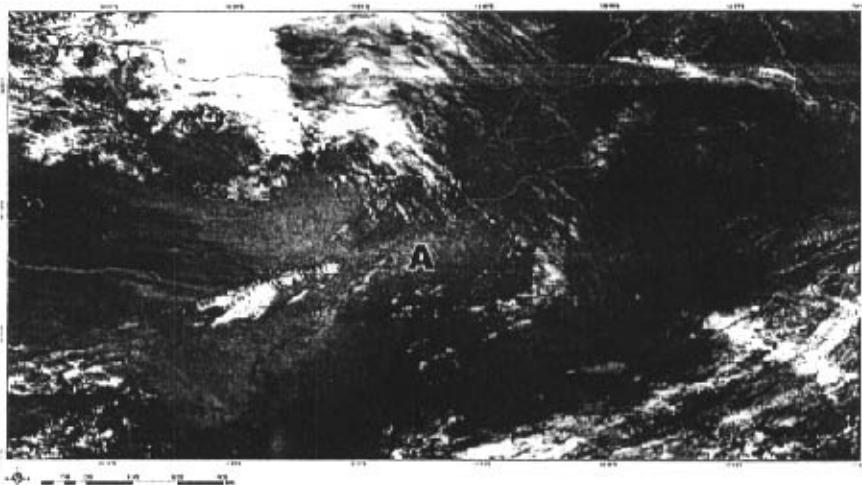


图 4-18、2001 年 4 月 6 日 14 时 NOAA-16 卫星图像

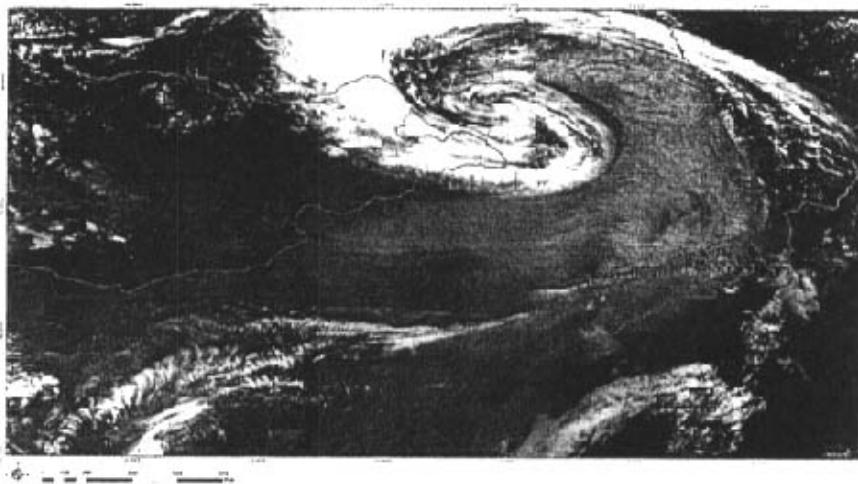


图 4-19、2001 年 4 月 7 日 08 时 FY-1C 卫星图像

### 3、强对流云团型沙尘暴天气云图特征

过去对中尺度对流云团产生的沙尘暴天气了解较少，随着卫星云图的广泛应用，使我们对这类天气系统的认识不断加深。伴有中尺度系统的沙暴过程约占总数的 1/3。云图上云团可以分为三种云型：(a) 椭圆型，如图 4-20 为 1993 年 5 月 5 日 16:33 时 GMS-4 可见光云图，云团 (A 处) 形成在冷锋云带前方，地面有飑

线配合,使金昌出现了“黑风暴”过程。(b)对流云线型,云图上沙尘暴过程是由一条条排列规则的中尺度对流云线引起的,如1984年4月4日过程。(c)涡旋状型,发生在锋前暖区,云图上表现为大量的对流云团围绕着一个中心呈涡旋状分布,涡旋中心一般对应着低层的热低压。下面以1986年5月18~20日过程为例进行分析。

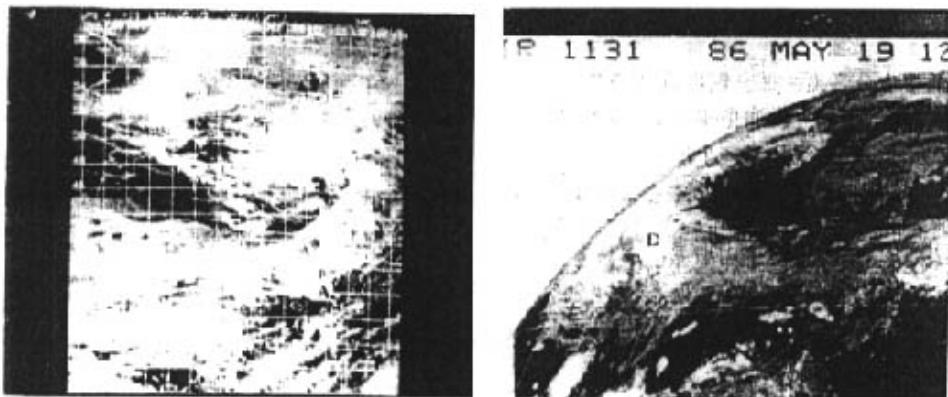


图4-20、1993年5月5日16:33时 VIS GMS-4 图4-21、1986年5月19日20时 IR GMS-3

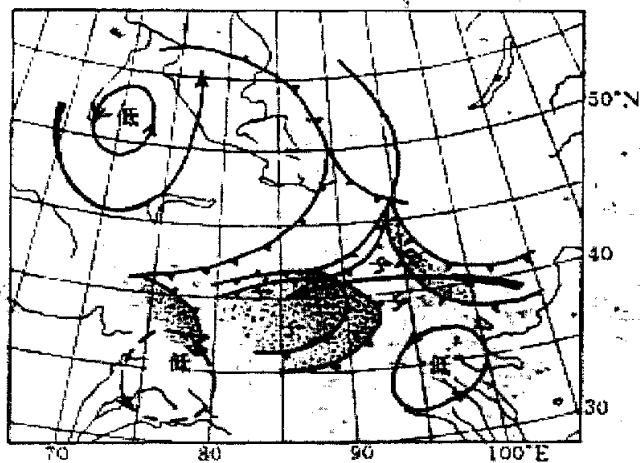


图4-22、1986年5月19日08时综合天气图

过程简述:1986年5月18日20时和田地区出现强沙尘暴天气,极大风速大于25.1m/s。19日14时影响到敦煌、西安等地,出现大风,能见度为零的时间长达4~5个小时,农田被沙覆盖达20~30cm。直到酒泉后才减弱。

云图特征:在5月18日云图上(图略),南疆沙漠上空有大量对流云团发展,云团直径大约在50~100km,产生的降水不大,却有着完整的环流系统。到19日12UTC(图2-21),对流云团群移至敦煌附近,其涡旋状排列更加明显(图2-21中D处)。

天气形势：5月18日的地面图上（图略），在南疆有热低压发展，低压中心与云图上涡旋中心有较好对应关系。图2-22是19日08时各层综合天气图。从图中可见由中亚进入我国的冷空气主力主要影响天山以北地区，故冷平流的加压作用仅限于北疆等地；而南疆处于锋前强西南气流中，仍为暖平流区，其引起的动力性减压有利于锋前热低压在南疆西部生成。

另外，在700hPa（图2-22）柴达木盆地有另一低压发展，其北侧（40°N附近）维持一条较强的东风气流带（图2-22中长箭头），促进东边的冷空气西侵。这支低空偏东急流的存在，加剧了南疆低层的气旋性能辐合，对热低压加强极为有利。

在500hPa高空，位于克什米尔上空的低压（图2-22断线表示）作用下，较湿的空气越过昆仑山脉进入南疆，促使热低压周围有大量云团发展。

18日20时，从中亚低槽中分裂出的部分弱冷空气经高原进入南疆西部，并生成弱冷锋，随着这股弱空气的入侵，热低压开始东移，并使和田等地偏西风增强，出现沙尘暴天气。

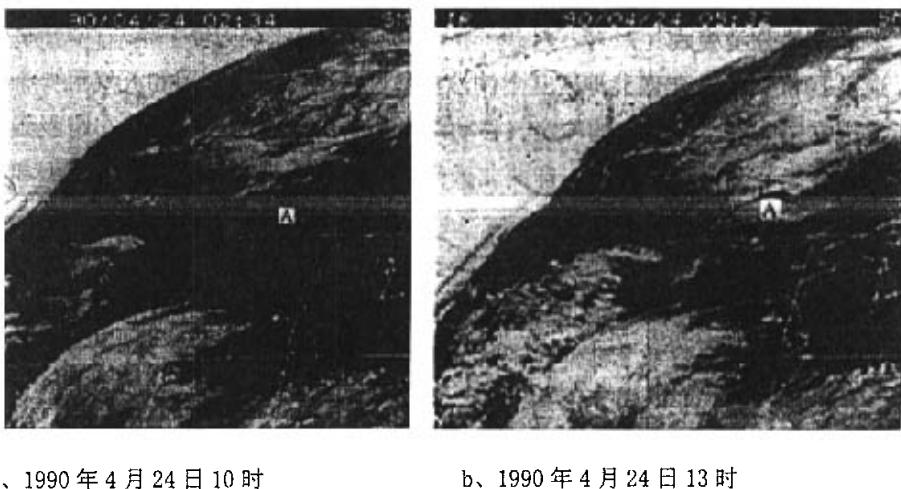
④预报要点：涡旋状云系的发展与维持是产生沙尘暴天气的关键系统，在相应的天气图上，与塔里木热低压的发生发展相对应。而热低压的发生发展受以下三个环流系统影响：（a）在高层（500hPa）新疆脊强大（有时在北疆出现闭合高压中心）、移动缓慢（每日东移速度不超过5个经度）；（b）在高压脊后部有一支强西南气流位于我国西部国境及帕米尔高原西侧，且较稳定；（c）在中、低层，从河西走廊到南疆东部有一支偏东急流存在。

#### 4、其它型沙尘暴过程云图特征

此类过程云型表现很复杂，难以分型，要深入研究。例如有的沙尘暴天气发生在晴空区，在云图上无云系影响，单靠卫星云图是难以分析的，以1990年4月24日过程说明。

在24日10:34时的云图上（图4-23a），赤塔至乌兰巴托一线有强低槽冷锋云系维持，云带前方（华北等地）为大范围晴空区。在天气图上（图略），晴空区位于锋前较强的西南气流控制下，而700hPa（图略）有西北至东南向的低空急流轴存在。

当天下午，内蒙古中南部的张北戈壁沙滩地已经发生相当规模的沙尘暴（图4-23a中A处），在云图上可以清晰地看到沙尘暴起始区（上游）的边缘整齐，而扩散区（下游）边缘松散。3小时后（图4-23b），这一长条沙尘区明显扩大、加强。



A、1990年4月24日10时

b、1990年4月24日13时

图 4-23、GMS-4 红外云图

### 4.3 沙尘暴短时预警

#### 4.3.1 沙尘天气过程

在中国气象局预测减灾司关于沙尘天气预警业务服务暂行规定（2002年10月）中指出：

沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴三类。

1、浮尘：悬浮在大气中的沙或土壤粒子，是水平能见度小于10公里的天气现象；

2、扬沙：风将地面尘沙吹起，使空气相当浑浊，水平能见度在1-10公里以内的天气现象。

3、沙尘暴：强风将地面尘沙吹起，使空气相当浑浊，水平能见度小于1公里的天气现象。当水平能见度小于500米时，为强沙尘暴。

沙尘天气过程分为四类：浮尘天气过程、扬沙天气过程、沙尘暴天气过程和强沙尘暴天气过程。

1、浮尘天气过程：在同一次天气过程中，我国天气预报区域内相邻5个或5个以上国家基本（准）站同时出现了浮尘天气。

2、扬沙天气过程：在同一次天气过程中，我国天气预报区域内相邻5个或5个以上国家基本（准）站同时出现了扬沙天气。

3、沙尘暴天气过程：在同一次天气过程中，我国天气预报区域内相邻3个或3个以上国家基本（准）站同时出现了沙尘暴天气。

4、强沙尘暴天气过程：在同一次天气过程中，我国天气预报区域内相邻3个或3个以上国家基本（准）站同时出现了强沙尘暴天气。

### 4.3.2 沙尘暴分类模式

通过1977—2001年西北地区几十例沙尘暴过程进行卫星云图和天气形势合成分析,根据影响沙尘暴发生的冷空气移动路径和云图上锋面云带特征,将我国北方地区沙尘暴分为三种类型。即西北云带类、北方云带类(含蒙古气旋)和西方云带类。分析表明,沙尘暴形成的天气机制主要有以下几个方面:

1、在关键区内有一条明显的冷锋云带,云带由密实的中高云系组成,云顶温度一般低于-40°C;锋面云带前边界比较模糊,而后边界较整齐,反映了高空风速较大;有时云带前边界或其前部有中尺度对流云团和中尺度飑线。冷空气移动路径不同,锋面云带的走向有所区别。西北类锋面云带多为东北、西南走向,自西北方沿北疆向东南直冲河西走廊;北方类云带走向呈准东、西向,从贝加尔湖经蒙古国南压至河套一带;西方类云带一般近于南北向,云带尾部伸至35°N以南。

2、500hpa关键区有低压槽发展,南北跨度大于8个纬度,并有24小时负变高和冷温度中心与低槽配合,槽前锋区较强,温度梯度大,低槽斜压性强,槽后有一支强风速带,易引起扰动动能的加强和动量下传。

3、地面关键区有冷锋过境,有时出现锋生冷锋。地面冷高压较强,高压中心达1025hpa以上,冷锋后部有+△P3,锋前-△P3。变压梯度大。锋前热低压或蒙古冷性气旋发展强烈,与锋后冷高压之间形成明显的气压梯度。

4、沙尘暴爆发前期,西北区东部增暖显著,持续增温大于10°C,有时24小时增温达7—8°C,当冷空气移至西北区上空时,形成上冷下暖强烈的热力对流不稳定大气层结,从而激发沙尘暴。

### 4.3.3 预报关键区的划分

据分析在短期预报时效,影响沙尘暴的天气系统和云带主要集中在35—60°N、65—120°E范围内,因此将上述区域划分为若干关键区。

关键区 范 围		各区代表站点(区站号):					
G1 区	40—55°N	28698	35394	35796	36096	36177	36870
	65—95°E	51133	51076	51431	52203	51463	51495
G2 区	43—60°N	30710	(36096)	44292	51288	(52203)	
	85—120°E	51495	52267	52323	53463	53068	
		54102	50527				
G3 区	35—50°N	(35796	36870)	38457	(51431)	(51463)	
	65—95°E	51709	51828	51777	(52203)	52418	
G4 区	35—45°N	(52203)	52323	52267	52533	52681	
	90—120°E	52818	52889	52495	53614	53845	
		(53463)	54511				

D1 区	42—55° N	28898	35394	35796	36177	36231	36535
	70—95° E	36259	36870	44218	51076	51133	51243
		51288	51431	51463	51495	52203	
D2 区	42—55° N	36307	44218	(51288)	(51495)	(52203)	
	90—115° E	44231	44277	44287	44285	44292	44298
		44347	30925	30710	53068		
D3 区	35—50° N	38457	51711	51709	51644	51656	51765
	70—95° E	51811	51818	51828	51931	51855	51777
		52418	52818				
D4 区	35—45° N	(52418)	52323	52267	52533	52652	52674
	90—115° E	52681	52787	52895	52495	53614	53513
		52836	53336	53845	53772	54511	

注: G 区、D 区分别代表高空和地面关键区; 高空共选 37 个站点, 有“()”的 6 个站点重复使用, 地面选取 59 个站点, 其中“()”的站点重复使用。各关键区代表站高空一般为 10—12 个, 地面为 14—17 个。分布比较均匀, 具有较好的代表性。

#### 4.3.4 沙尘暴知识库

在分析西北沙尘暴天气成因基础上, 吸收我国北方各省区及卫星中心等众多研究成果和经验, 从云图特征、环流背景、影响系统、气象要素特征诸方面筛选出物理意义明确、相关好的预报因子, 建立较为客观定量的分类规则和预报规则, 形成沙尘暴预警知识库。知识库包括预报因子和预报规则两部分。客观地反映了形成大风沙尘暴天气的热力、动力和不稳定度天气条件。

#### 4.3.5 预报因子

TB 云顶亮温; H、T、TD 分别为 500hpa 高度、温度、露点;  $\Delta H_{24}$ 、 $\Delta T_{24}$  为 24 小时变高、变温; P、 $\Delta P_{3}$ 、 $\Delta P_{24}$  为海平面气压、3 小时变压、24 小时变压; T—Td 为温度露点差; DDFP 为风向风速等。

#### 4.3.6 预报知识与规则

##### 1、西北冷锋云带类:

- 1) G1 区有冷锋云带, 云顶亮温  $TB \leq -44^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) G1 区 500hpa  $\Delta H_{24} < -6$  位势什米。冷中心  $T \leq -32^{\circ}\text{C}$ 。
- 3) 500hpa  $HG1-HG2 < 4$  位势什米(关键区最低值); 或  $H35229-H36177 \geq 12$  同时  $H52533-H36177 \geq 16$ ; 或  $(H28698+H35796+H29634+H51706) / (444292+H30710+H36096+H44212) / 4 \leq 8$  位势什米。

- 4) G1 区 500hpa 有 5 站及以上  $FF \geq 20 \text{m/s}$  强风带 (风向  $DD \geq 270^\circ$  )。
- 5) 地面  $\Delta P3$  (D1 区最大正值) —  $(\Delta P3)$  (D4 区或 D2 区最小值)  $\geq 9 \text{hpa}$ 。
- 6) 地面 D1 区  $\Delta P24 \geq 15 \text{hpa}$ , 同时 D4 区  $\Delta P24 < -10 \text{hpa}$  或 D2 区  $\Delta P24 < -20 \text{hpa}$
- 7) 地面地面 P (D1 最大值) — P (D4 最小值)  $\geq 35 \text{ hpa}$   
或 P (D1 最大值) — P (D2 最小值)  $\geq 30 \text{ hpa}$
- 8) 地面 D1 区冷高压中心  $P \geq 1025 \text{ hpa}$ 。
- 9) 地面 D2 区低压中心  $P \leq 1000 \text{ hpa}$ 。
- 10) 地面 D4 区  $P < 1005 \text{ hpa}$ 。
- 11) 地面 D1 有 3 站大风区 ( $FF \geq 12 \text{m/s}$ )。
- 12) 500 hpa G4 区  $\Delta T24 \geq 4^\circ\text{C}$ ; 或 500hpa TG4 (最高值) — TG1 (最低值)  $\geq 16^\circ\text{C}$ ;  
或 52533 52681 52495 53845 53614 5 站 T (最高值) — TG1 (最低值)  $\geq 15^\circ\text{C}$
- 13) 08 时或 14 时地面 D4 区  $\Delta T24$  (最高值)  $\geq 5^\circ\text{C}$ ; 或 T52533—T44218  $\geq 7^\circ\text{C}$ ;  
T52533—T44272  $\geq 12^\circ\text{C}$ ;
- 14) 地面 D4 区 ( $T - T_d$ ) (最大值)  $\geq 15^\circ\text{C}$

分类规则: a 条件 1、2、3 满足进入分类模型;  
b 条件 5、6、7、8、9、10、11 满足 3 条, 同时符合 4 进入动力模型;  
c 条件 12、13、14 满足 2 条进入热力模型;  
a、b、c 同时满足, 西北、华北地区有西北路径类沙尘暴。

## 2、北方冷锋云带类:

- 1) G2 区有冷锋云带, 云顶亮温  $TB \leq -44^\circ\text{C}$ 。
- 2) G2 区 500hpa  $\Delta H24 < -8$  位势什米 冷中心  $T \leq -36^\circ\text{C}$ 。
- 3) 500hpa 1)  $HG2 - HG1 \leq 6$  位势什米 (关键区最低值); 或 2)  $H35796 - H51076 \geq 7$  位势什米; 或  $(H28698 + H35396 + H29634 + H51706) / 4 \geq 4$  位势什米。
- 4) G1 或 G2 区 500hpa 有 5 站及以上  $FF \geq 20 \text{m/s}$  强风带 (风向  $DD \geq 270^\circ$  )。
- 5) 地面  $\Delta P3$  (D2 区最大正值) —  $(\Delta P3)$  (D3 区或 D4 区最小值)  $\geq 10 \text{hpa}$ 。
- 6) 地面 P (D2 最大值) — P (D4 最小值)  $\geq 35 \text{ hpa}$  或 P (D2 最大值) — P (D3 最小值)  $\geq 30 \text{ hpa}$
- 7) 地面 D1 区或 D2 区冷高压中心  $P \geq 1025 \text{ hpa}$
- 8) 地面 D3 区或 D4 区低压中心  $P \leq 1000 \text{ hpa}$
- 9) 地面 D1 或 D2 有 3 站大风区 ( $FF \geq 12 \text{m/s}$ )
- 10) 500 hpa TG4 (最高值) — TG2 (最低值)  $\geq 16^\circ\text{C}$ ; 或 52533 52681 52495

53845 53614 5 站 T (最高值) — TG2 (最低值)  $\geq 16^{\circ}\text{C}$

11) 08 时或 14 时地面 D4 区  $\Delta T24$  (最高值)  $\geq 5^{\circ}\text{C}$  或  $T52533—T44218 \geq 9^{\circ}\text{C}$  或  $T52533—T44272 \geq 12^{\circ}\text{C}$

12) 地面 D4 区 (T—Td) (最大值)  $\geq 16^{\circ}\text{C}$

分类规则: a 条件 1、2、3 满足进入分类模型;

b 条件 5、6、7、8、9 满足 3 条, 同时符合 4 进入动力模型;

c 条件 10、11、12 满足 2 条进入热力模型;

a、b、c 同时满足, 西北东部、华北地区有北方路径类沙尘暴。

3、西方冷锋云带类:

1) G3 区有冷锋云带, 云顶亮温  $TB \leq -40^{\circ}\text{C}$ 。

2) 500hpa G3 区  $\Delta H24 < -6$  位势什米, 冷中心  $T \leq -28^{\circ}\text{C}$ 。

3) 500hpa HG1—HG3  $\geq 4$  位势什米 (关键区最低值); 或  $H51777—H35394 \geq 25$  位势什米, 同时  $H51076—H36870 \geq 6$  位势什米。

4) G1 区 500hpa 有 5 站及以上  $FF \geq 20\text{m/s}$  强风带 (风向  $DD \geq 270^{\circ}$  )。

5) 地面  $\Delta P3$  (D3 区最大正值) —  $\Delta P3$  (D4 区最小值)  $\geq 9\text{hpa}$ 。

6) 地面 P (D2 最大值) — P (D3 最小值)  $\geq 30\text{ hpa}$  或 P (D1 最大值) — P (D3 最小值)  $\geq 25\text{ hpa}$

7) 地面 D1 区或 D2 区冷高压中心  $P \geq 1020\text{ hpa}$ 。

8) 地面 D3 或 D4 区  $P \leq 1000\text{ hpa}$ 。

9) 地面 D3 或 D1 有 3 站大风区 ( $FF \geq 12\text{m/s}$ )。

10) 500 hpa G3 或 G4 区  $\Delta T24 \geq 6^{\circ}\text{C}$  或 500hpa TG4 区最高值—TG1 区最低值  $\geq 14^{\circ}\text{C}$ ; 或  $52533 52681 52495 53845 53614 5$  站 T (最高值) — TG3 (最低值)  $\geq 16^{\circ}\text{C}$

11) 08 时或 14 时地面 D3 或 D4 区  $\Delta T24 \geq 6^{\circ}\text{C}$ ; 或  $T52533—T44218 \geq 7^{\circ}\text{C}$ ; 或  $T52533—T44272 \geq 12^{\circ}\text{C}$

12) 地面 D4 区 (T—Td) 最大值  $\geq 15^{\circ}\text{C}$

分类规则: a 条件 1、2、3 满足进入分类模型;

b 条件 5、6、7、8、9 满足 3 条, 同时符合 4 进入动力模型;

c 条件 10、11、12 满足 2 条进入热力模型;

a、b、c 同时满足, 西北地区有沙尘暴。

#### 4.3.7 建立预报模型

如图 4-24 所示, 预报模型包括历史资料库和各类实时资料库。沙尘暴预报智能模型通过分类模型、动力模型和热力模型进入网络推理, 分别预报西北、北方、西方冷锋云带三类沙尘暴。然后输出我国北方地区沙尘暴预报结果。

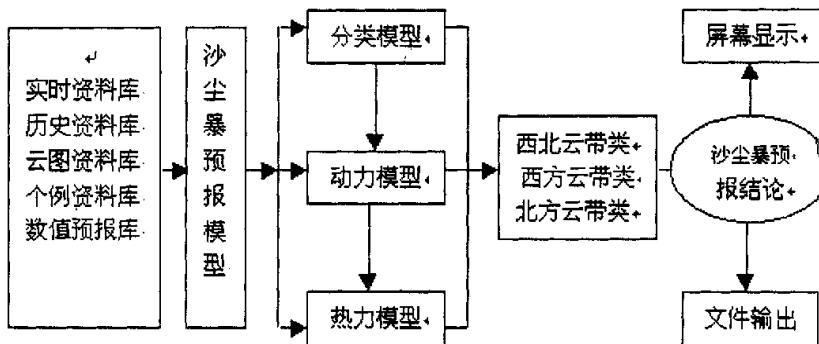


图 4-24: 沙尘暴预报模型

#### 4.3.8 试预报结果

2002 年 3 月-4 月全国共出现沙尘暴天气过程 11 次, 本方法试报出 8 次(见表 4-3), 准确率达 73%; 其中共出现强沙尘暴 4 次, 本方法试报出 4 次, 准确率达 100%。因此, 本方法对强沙尘暴有较强的预报能力。

表 4-3、2002 年 3 月-4 月沙尘暴天气试报结果

序号	起止时间	过程类型	试报结果
1	3.1-2	扬沙	无资料
2	3.15-17	沙尘暴	预报正确
3	3.18-22	强沙尘暴	预报正确
4	3.24-25	强沙尘暴	预报正确
5	3.28-30	沙尘暴	未报出
6	3.30-31	沙尘暴	未报出
7	4.1-3	沙尘暴	未报出
8	4.5-8	强沙尘暴	预报正确
9	4.11	沙尘暴	预报正确
10	4.13-17	沙尘暴	预报正确
11	4.19-20	沙尘暴	预报正确
12	4.21-24	强沙尘暴	预报正确

#### 4.4 本章小结

本章列举了沙尘暴的危害, 对全国较大的几十次沙尘暴天气过程的成因进行了综合分析, 将影响我国沙尘天气的过程概括为四条冷空气路径, 利用 37 个高空探空天气站和 59 个地面气象观测站的资料建立了预报模型, 开展了沙尘暴短时预警研究, 并对预报结果进行了检验。

#### 主要参考文献:

- 1 王式功, 董光荣, 杨德保等。中国北方地区沙尘暴变化趋势初探, 自然灾害学报 1996, 5 (2): 86-94。
- 2 江吉喜等。以卫星资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探。中国沙尘暴研究 [C]。北京: 气象出版社, 1997, 98-102

## 第五章 沙尘暴天气统计预报模型

以浑善达克地区的沙尘天气为例, 建立沙尘暴天气的统计预报模型。

### 5.1 研究区域概况

作为京津周边的重点沙源区, 浑善达克的名字对人们来说并不陌生。据中科院兰州沙漠所对北京风沙天气的跟踪调查, 北京就地起沙已得到基本控制, 北京现在的沙尘主要来自外地。而距北京不足 180 公里的浑善达克沙地, 是京津地区风沙危害的主要尘源地之一。

浑善达克沙地的位置正好处在锡林郭勒大草原的中部, 位于首都北京的西北部, 是距北京市最近的一块沙地, 是京津地区的风源和沙源。浑善达克沙地从大兴安岭南部山地西麓的克什克腾旗向西一直延伸到苏尼特右旗。地理位置位于东经  $112^{\circ} 22'$  至  $117^{\circ} 57'$ , 北纬  $41^{\circ} 56'$  至  $44^{\circ} 24'$ 。东西延伸约 450 公里, 南北宽约 300 公里。浑善达克沙地在锡盟的 12 个旗(县市)里都有不同程度的分布, 沙地占据了锡林郭勒盟  $1/3$  的土地面积。浑善达克沙地海拔多在 1000 至 1400 米之间, 南部为阴山山地隆起区, 东部为大兴安岭低山丘陵, 沙地间具有较广阔的丘间低地, 并分布有 100 多个面积大小不等的湖泊。在长期的风力吹蚀搬运作用下, 构成了现代沙地地貌。

浑善达克沙地地处中纬度西风带, 属温带大陆性气候。冬季漫长寒冷、夏季短暂温热, 全年寒冷期长达 7 个月之久; 降水不均, 干旱少雨, 风大沙多, 是该沙地区的主要气候特征。冬春季风强而多, 4~5 月风速较大, 高可达 12 级, 为沙尘天气的产生提供了有利的动力条件。

浑善达克沙地的主要土壤类型以栗钙土为主, 其次为棕钙土, 非地带性土壤为风沙土。浑善达克沙地植被以草原植被为主, 针阔叶乔木、榆树树林等超地带性植被明显。浑善达克是东西向延伸的巨型沙地, 东端深入到大兴安岭南段西麓的草甸草原地带; 西端楔入荒漠草原区, 中间广大沙区处于半干旱草原带, 植物种类繁多, 植被类型丰富, 同时因沙丘固定成簇、发育阶段等不同, 形成的植被结构系统也有明显的超地带性分异特征。

浑善达克沙地的扩张蔓延速度相当惊人。据监测, 浑善达克沙地的面积从 1949 年以来, 每年以 1 万多公顷的速度在递增, 其中仅流动沙地就在近 40 年间增加了 17 倍。从 1987 年、1999 年的两期 TM 卫星图片上可以看到, 在短短的 12 年间, 流动沙地年均增加率高达 63%; 半固定沙地的年均增加率 7%; 而固定沙地则以每年 3534 公顷的速度在减少。浑善达克沙地面积扩张、沙地活化与近些年我国干旱

半干旱地区降雨量减少，气候干旱加剧有直接的关系。同时，更应该看到人类不合理的获取财富的手段直接破坏了环境，并影响到当地经济的可持续发展。

浑善达克沙地沙漠化和风沙化的严峻态势，不仅严重制约了沙区经济的发展，而且对沙地以外的地区，特别是京津唐地区危害越来越严重，给邻近地区的生态环境造成了严重的不良后果。浑善达克沙地生态环境的日趋恶化已经成为迫在眉睫的重大问题，加之浑善达克沙地存在着大量的粉沙，极易借助大风迁移，形成沙尘暴。

## 5.2 研究方法

天气预报的方法大致可分为两类：一类是定性预报，例如，用合理的逻辑对事物作分析和综合，用因果关系进行联系，用分类、对比等方法进行定性预报，例如龙卷风、暴雨、大风、台风等的预报。另一类预报方法是定量预报，即用数学方法作数值预报，例如气压、气温、风速、降雨量等的预报。沙尘暴天气的预报主要是对是否产生沙尘暴、沙尘暴的强度大小的预报，因而是一种定性预报。下面详细介绍用判别分析法进行定性预报的原理。

### 5.2.1 动力预测方法

动力预测方法是一种强调物理因果关系推断的方法，它利用大气运动变化是受来自太阳的辐射、地球自转和下垫面热力作用的结果，用微分方程来描述并外推作预测。这种方法认为现在大气是过去大气发展的必然结果，其演变过程可以用流体动力学方程来描述。对一组确定的初值，其动力系统未来演变过程是确定的。这种预报方法常由数值预报来实现。数值天气预报就是主要运用流体力学、热力学的基本原理来描写大气运动，从而得出数学物理方程组。然后，将起始时刻的天气图资料输入计算机，通过计算机程序计算出未来某一时刻、各个地点和各高度上的等压面高度、温度、湿度和风速矢量的预报值，从而得到未来的天气图，进而作出各气象要素的预报。

### 5.2.2 统计预测方法

统计预测方法即从天气现象（或天气过程）具有偶然性的一面出发，通过大量历史资料，去探索它内部隐藏着的必然性，即大量天气现象之间的关联及其自身的演变规律性，从而作出天气预报。它把天气系统、天气现象看成为一个随机事件，不去理会它们个别的演变行为，研究它们大量现象的总体行为，由此发现其规律性。统计天气预报就是运用概率统计方法分析天气演变的统计规律性以及分析预报因子和预报量之间的数量关系，建立数学模式，预报未来天气。

### 5.2.3 判别分析预报

#### 5.2.3.1 判别分析预报的定义

在气象预报中,为了使用需要,一些预报量常分成若干级别或类别。例如把降水量的资料划分成不同的级别或类别;如:暴雨、大雨、中雨、小雨和无雨;或者划为更为简单的两类:有雨和无雨。然后根据预报量不同类别,选择一些前期因子,在不同类别的样本内,寻找因子与预报量的关系,建立针对不同类别的预报量的方程式,选择适当的判别规则,判别某个因子观测样品所属的类别来实现对预报量的预报。这种方法就称为判别分析,也称为类别预报。这种预报方法的预报量取离散状态、预报因子取数量性值。

### 5.2.3.2 判别分析预报的原理

本研究采用 Fish's 判别分析法对沙尘天气进行预报。即用 Fish's 判别准则建立判别函数,然后利用贝叶斯定理求后验概率建立判别函数的判别规则,以确定预报量该归为哪一类别。

Fisher's 判别准则是判别分析中经常用来确定判别系数的判别准则。

假设要预报晴、雨两类天气,选择两个前期因子  $x_1$  及  $x_2$ 。为了综合  $x_1$  与  $x_2$  预报晴雨的作用,我们可用一种最简单的线性组合形式把  $x_1$  与  $x_2$  组合起来,构成一个新的变量  $y$ ,表示为:

$$y = c_1 x_1 + c_2 x_2 \quad (2.1)$$

式中  $y$  是  $x_1$  与  $x_2$  的函数,称为(线性)判别函数,  $c_1$  与  $c_2$  称为判别系数。该式称为判别方程。如果找到一个差别值  $y_c$ ,计算出任一判别函数值  $y_0$ ,若  $y_0 > y_c$ ,就预报晴,  $y_0 < y_c$ ,就预报雨。

对上面的例子,可用几何图形来说明。对于(2.1)式的判别方程可看成为三维空间中的一个平面方程(见图 5-1)。平面上的点满足(2.1)式。在图 2.1 中,空间平面上的点“○”点表示未来是晴类的  $y$  值点;“×”点表示未来是雨天类的  $y$  值点。我们总可以找到一个平行于  $x_1ox_2$  的平面  $y = y_c$ ,截(2.1)式的平面为两部分,使上半部的  $y$  值大于  $y_c$ ,下半部的  $y$  值小于  $y_c$ 。如果把空间平面上的点以及  $y = y_c$  与  $y = c_1 x_1 + c_2 x_2$  平面的交线分别投影到  $x_1ox_2$  平面上,就构成常见的点聚图形式。交线投影线就称为分辨线,或称为判别线。

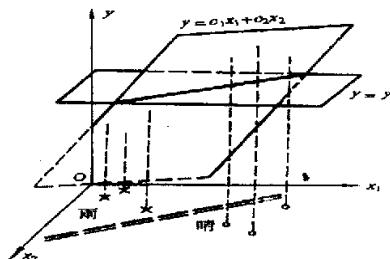


图 5-1 判别函数

设选取晴类的样本容量为  $n_1$ ，雨类样本容量为  $n_2$ ，总样本的容量为  $n = n_1 + n_2$ 。根据 (2.1) 式，用不同因子值可算出不同类别的判别函数值  $y_{1i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_1$ ) 及  $y_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_2$ )。我们希望构成形如图 2.1 中的空间平面，使得平面上晴天的判别函数值对应的点比较集中，雨天类的点亦比较集中，但是两类点之间距离较远，从而使得  $y = y_c$  平面容易地将两类点区分开来。衡量点集中程度的量就是方差。因此，类间的方差与类内的方差比值为最大可作为判别方程建立的原则，这就是 Fisher's 判别准则。即要求下面函数

$$\lambda = \frac{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2}{\sum_{i=1}^{n_1} (y_{1i} - \bar{y}_1)^2 + \sum_{i=1}^{n_2} (y_{2i} - \bar{y}_2)^2} \rightarrow \text{最大} \quad (2.2)$$

式中  $\bar{y}_1$  与  $\bar{y}_2$  为晴类与雨类的判别函数平均值。式中判别函数的平方和具有方差的意义。

利用贝叶斯定理求后验概率建立判别规则。

当前期因子已出现时，要确定预报量该判为哪一类（组）通常用后验概率进行预报。即将已出现的  $p$  个因子的样品， $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{p0}$ ，代入到判别函数中，进一步计算其值出现的条件下，第  $g$  类出现的概率，从  $g = 1, 2, \dots, G$  中选择出现最大概率的类别作为预报量的类别。假设已得到一个判别方程，由因子样品算出判别函数为  $y_0$ ，根据贝叶斯公式可计算在  $y_0$  出现后，发生的各类概率，即

$$P(g|y_0) = \frac{q_g f(y_0|g)}{\sum_{g=1}^G q_g f(y_0|g)} \quad g = 1, 2, \dots, G$$

式中  $q_g$  为预报值出现的  $g$  类先验概率，它通常由频率来估计，即

$$\hat{q}_g = \frac{n_g}{n} \quad g = 1, 2, \dots, G$$

$f(y_0|g)$  为判别函数值  $y_0$  在  $g$  类中出现的概率密度。通常假定判别函数遵从正态分布，在计算中用样本均值和标准差估计。

#### 5.2.4 因子筛选

由于影响天气变化的因素极其繁多，如何从与某种天气现象发生有关的一大堆前兆因子中挑选出主要的因子，舍弃一些次要的、效果不显著的因子，显得尤为重要。在选择因子时，一般选取有物理意义、有依据的因子作为前兆因子，然后进行因子的筛选。挑选因子的方法有一次筛选与逐次筛选法。本研究采取简单方法，先对前兆因子进行初选，从中挑选出一部分重要的作为预报因子，这些预报因子或直接进入预报方程；或者再用比较精确的方法进行精选，使精选出的少

数因子进入预报方程。

#### 5.2.4.1 筛选方法

对于预报量和预报因子取不同状态时, 选用不同的因子筛选方法。本研究中预报量取离散状态, 而预报因子为连续变量, 对于这种情况, 常采用判别式法来选取预报因子。我们用  $G$  表示预报量的状态数,  $N$  为样本容量, 对应于  $y$  的  $G$  类情况, 前兆因子  $x$  的样本可以分为  $g$  组:

对应  $y$  为第 1 类时,  $x$  共有  $N_1$  个个例

$$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1N_1}$$

对应  $y$  为第 2 类时,  $x$  共有  $N_2$  个个例

$$x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2N_2}$$

.....

对应  $y$  为第  $G$  类时,  $x$  共有  $N_G$  个个例

$$x_{G1}, x_{G2}, \dots, x_{GN_G}$$

各组的平均数

$$\bar{x}_g = \frac{1}{N_g} \sum_{k=1}^{N_g} x_g k, \quad g = 1, 2, \dots, G$$

总平均数

$$\bar{x}_{..} = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^{N_g} x_g k$$

决定前兆因子  $x$  是否入选的判别式为

$$F = \frac{\sum_{g=1}^G N_g (\bar{x}_g - \bar{x}_{..})^2 / (G-1)}{\sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^{N_g} (x_{gk} - \bar{x}_g)^2 / (N-G)} \quad (2.3)$$

其分子表示类间差异, 分母表示类内差异。 $F$  值越大, 即类间差异越大, 类内差异越小, 分类的性能越好, 因此, 可将  $F$  超过某一数值作为前兆因子入选标准。取某一显著水平  $\alpha$ , 查  $F$  分布表, 其中分子自由度为  $G-1$ , 分母自由度为  $N-G$ , 得到的  $F_\alpha$  即判断的临界值。用判别式法来选取预报因子时, 显著水平以不超过 0.20 为适宜。

### 5.3 研究数据

#### 5.3.1 气象数据

本研究所采用的气象数据由我国气象部门所提供, 包括浑善达克沙地及其周

围地区 1988-2001 年部分大风天气和几乎全部沙尘天气过程中最具代表性的能见度、气压、气温、相对湿度、地面温度、风速以及当日最大风速数据。

每次浮尘和扬沙出现时的能见度、气压、气温、相对湿度、地面温度、风向、风速是在四个观测时次（一般为 02 时、08 时、14 时、20 时四次观测）中能见度出现最小时对应的时次；每次沙尘暴和大风出现时的能见度、气压、气温、相对湿度、地面温度、风向、风速是指最接近时次的定时观测值（一般为 02 时、08 时、14 时、20 时四次观测）。如果沙尘暴出现时间缺测，那么就在四个观测时次中找出风速出现最大时对应的时次，然后得到相应时次的能见度、气压、气温、相对湿度、地面温度、风向、风速。蒸发量观测是头天 20 时至今日 20 时的观测。最大风速是从风速自记记录（观测时段：头天 20 时至今日 20 时）中挑选出的十分钟平均最大风速。

首先，通过运用 ArcGIS 按照预先确定的经纬度范围对气象站点进行筛选，共筛选出 15 个气象站点。然后根据研究区域内选定的站号筛选实时数据。由于资料中存在着无数据或数据缺少太多的站点，通常将这些站点剔除。因此，最终筛选出的气象站点如下：53068（二连浩特；44°13'，111°32'），53195（苏尼特左旗；43°52'，113°38'），53276（朱日和；42°24'，112°54'），53391（化德；41°54'，114°00'），54102（锡林浩特；43°57'，116°04'），54208（多伦；42°11'，116°28'）。

表 5-1 试验区各气象站点的地理位置、沙化土地类型与植被类型

站号	站名	海拔 (m)	纬度	经度	沙化土地类型	植被类型
53068	二连浩特	965.961	43°39'	111°58'	潜在沙漠化土地、风蚀化沙地、固定沙地	草地
53195	苏尼特左旗	1036.761	43°52'	113°38'	潜在沙漠化土地、风蚀化沙地、固定沙地	草地
53276	朱日和	1151.961	42°24'	112°54'	潜在沙漠化土地、风蚀化沙地、固定沙地	草地
53391	化德	1484.661	41°54'	114°00'	风蚀化沙地（20%）、潜在沙漠化土地	草地（低盖度）
54102	锡林浩特	990.861	43°57'	116°04'	固定沙地（80%）、潜在沙漠化土地	草地（中盖度）
54208	多伦	1247.061	42°11'	116°28'	固定沙地（60%）、半固定沙地（20%）、潜在沙漠化土地、流动沙地	草地、未利用地

### 5.3.2 植被信息提取

植被具有明显的年、季节变化特点，并且是联结土壤、大气和水分的自然“纽带”。因此，在一定程度上它能够代表土地覆盖的变化。自然植被比较客观的反映了生态环境，而植被指数则是自然植被的数值化体现，是反映地表植被种类情况的间接指标，也是反映植物生长状态及植被空间分布密度的最佳指示因子。因此，

可利用植被指数作为土地覆盖的一种量化指标。同时,由于 NOAA 影像的时间分辨率高, 2-4 次/天, 可以增大获取无云资料的能力, 有利于捕捉地面动态信息, 实现同步监测。

本研究所采用的植被指数数据是对 NOAA/AVHRR 卫星接收数据进行图像处理来获取的, 该影像数据是以 1B 格式保存的原始 5 通道数据, 并以每日 4-6 轨白天数据为主要信息源 (N-14, N-15)。数据的时间序列是 1988.1 — 2001.12 沙尘天气或沙尘天气出现前后几天的遥感数据。一方面是因为卫星接收数据不全, 不能保证所有沙尘天气出现时都有影像; 另一方面受云体或沙尘的影响地面植被部分受影响, 无法计算其植被指数; 且短时间内植被指数不会有太大的变化, 可以采用与沙尘天气出现比较接近的时间内的植被指数来近似地代替。

### 5.3.2.1 归一化植被指数 (NDVI) 的计算

所谓植被指数是由多光谱数据, 经线性和非线性组合构成的对植被有一定指示意义的各种数值, 是根据绿色植物叶绿素对蓝光、红光有一强吸收峰值和对近红外有一强反射值这一特性计算出来的。从 NOAA/AVHRR 传感器 CH1 和 CH2 数据资料中, 可以获得多种形式的植被指数, 其中归一化植被指数 (NDVI) 被广泛应用于植被覆盖的定量研究。该指标对植被盖度的检测幅度较宽, 当植被盖度小于 15% 时, 能将土壤背景与植被区分开; 当植被盖度为 25-80% 时, 随植被盖度的增加而呈线性增强; 当植被盖度大于 80% 时, 检测能力逐步下降。由于研究区域的盖度不高, 所以采用归一化植被指数 (NDVI) 进行检测的灵敏度较高。其计算方法如下:

$$NDVI = (CH2 - CH1) / (CH2 + CH1)$$

上式中, CH1、CH2, 代表第一、第二通道的光谱反射比。

### 5.3.2.2 NOAA 影像处理

影像处理过程是通过极轨卫星资料接收与处理系统和 ERDAS 图像处理系统来完成的。

首先对其进行校正, 包括地理校正和辐射校正。在地理校正中, 采用阶数为 2 阶的多项式几何校正模型, 变换矩阵参数是由 AVHRR 数据所提供的地面控制点 (GCP) 来计算的, 并根据卫星高度进行扭曲校正。辐射校正则包括用辐射校正参数和太阳天顶角进行校正。最终将获得粗略校正的带有 WGS72 地理坐标系的 NOAA 影像数据, 因此可得到影像上任一点的地理坐标 (Lat 和 Lon)。然后按照研究区域的坐标范围 (40-46°, 110-118°) SUBSET NOAA 影像, 并逐气象站点 SUBSET 影像 (通常将站点所在的 1 经纬度区域作为各气象站点附近的植被研究区域)。最后对影像进行 INDICE 计算。(见图 5-2)

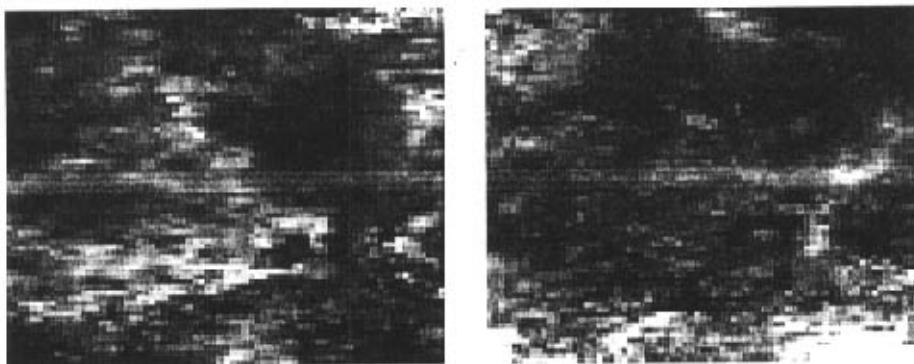


图 5-2 从 NOAA AVHRR 图像计算的指被指数

由于通常情况下气象站点位于城市或近郊,因此该站点的植被状况并不能代表其周围区域的植被状况,因此研究将各气象站点所在的 1 经纬度区域作为站点附近的植被研究区域,同时根据该站点的主风向作适当调整,调整后的站点研究区域范围如下:

表 5-2 调整后的研究站点区域范围

站号	53068	53195	53276	53391	54102	54208
经度	111°-112°	113°-114°	112°-113°	113°-114°	115°10'-116°10'	115°40'-116°40'
纬度	43°30'-44°30'	43°30'-44°30'	42°-43°	41°40'-42°40'	43°-44°	42°40'-43°40'

## 5.4 数据预处理

### 5.4.1 数据分组

在本研究中,将预报量分成 4 个类别,即大风天气、扬沙天气、浮尘天气和沙尘暴天气。在划分预报量类别的同时,对预报因子也进行相应地分组,即按照预报量的类别,将预报因子相应地分为 4 组。划分标准参照表 5.1 最低能见度的沙尘暴强度分级标准。

### 5.4.2 数据标准化

统计天气预报的一个特点是不管物理量的量纲怎样,变化多大,都可以放在同一个预报式中。如果不做一些处理,有可能突出变异较大资料的作用。因此,需对观测数据进行规格化,使各要素的取值范围变得大致相同。

研究采用的标准化处理的公式如下:

$$x_t = \frac{x_t - \bar{x}}{s}$$

$x_t$  — 各气象要素值;

$\bar{x}$  — 气象要素值的平均数;

$s$  — 气象要素值的标准差;

$x_i$  — 气象要素值的标准化数据;

新数据的平均数为 0, 标准差为 1, 处理后的数据称标准化数据。

## 5.5 沙尘暴天气预报方程的研建

沙尘暴天气的预报是一种定性的天气预报。本研究分别采用逐步判别分析法和典型判别分析法对其进行预报, 然后对两种方法进行比较。同时, 在对预报量进行分类预报时分别采用多级预报和二级预报。多级预报即将预报量划分为大风天气、浮尘或扬沙天气和沙尘暴天气; 二级预报对预报量分两级预报, 即先预报有无沙尘天气; 然后在预报有沙尘天气的情况下再预报是浮尘或扬沙天气还是沙尘暴天气; 如果是浮尘或扬沙天气, 可通过风速预报因子进一步预报是浮尘天气还是扬沙天气。

典型判别分析法即将判别式法筛选后的预报因子直接进入判别函数式建立判别方程; 而逐步判别分析法则对判别式法筛选后的预报因子进一步筛选, 以保证用最少的因子建立最佳的判别方程。

### 5.5.1 预报量和预报因子的确定

#### 5.5.1.1 预报量的确定

本研究在对沙尘暴这一灾害性天气进行预报时, 分别进行多级预报和二级预报。

在多级预报时, 将预报量分为四个等级。它们依次是: 大风天气、扬沙天气、浮尘天气和沙尘暴天气。二级预报是将预报量划分为多级, 每步仅预报两级, 分多步预报。即先预报是否沙尘天气, 然后在预报是沙尘天气的情况下, 再预报是浮尘或扬沙天气还是沙尘暴天气。如果是浮尘或扬沙天气, 可通过风速因子(以风速 4m/s 为临界值)进一步预报是浮尘还是扬沙天气。

关于沙尘暴强度的分级有不同的标准, 因地区而异。多数情况下采用最小能见度和瞬间极大风速相结合作为划分沙尘暴强度的分级标准。但从充分利用各气象站观测资料, 便于统计分析以揭示不同强度沙尘暴的特征和规律来看, 用最低能见度作为强度分级标准比较适宜。因为采用最低能见度和风速两者结合作为分级指标, 特强和强沙尘暴在各气象站正式记录中很少, 且事实上, 也存在无风但能见度极低的沙尘暴天气(沙尘暴影响区)。仅采用最低能见度作为强度分级标准, 标准较宽, 既便于强度分级, 同时可以大大减少上述问题的出现。因此, 参照已有的分级标准, 本研究所采用的最低能见度的沙尘暴强度分级标准将预报量分级如下:

表 5-3 最低能见度为标准的预报量分级

报量	最低能见度 $VV$ (0.1km)	风速 $v$ (m/s)
大风天气	$100 \leq VV < 300$	
浮尘天气	$10 \leq VV < 100$	$v < 4$
扬沙天气	$10 \leq VV < 100$	$v \geq 4$
沙尘暴	$0 \leq VV < 10$	

### 5.5.1.2 预报因子的确定

站点气象资料是前兆因子的主要来源。同一气象要素的历史变化有一定规律性，不同气象要素的前后期资料也有一定的相关关系。我们可以利用这种规律性或相关性进行预报，因此大量的前期气象资料是提供前兆因子的重要源泉。然而，地表下垫面也是不容忽视的前兆因子。因为，尽管气象条件在沙尘暴的形成、发展的全过程中起了很重要的作用，但它只是一个动力因素，而植被稀疏，土质干燥疏松的下垫面则为沙尘暴提供了丰富的尘源，是沙尘暴产生的物质因素。尤其是近年来人类不合理地开发利用干旱区自然资源，破坏植被，造成土地荒漠化，是造成沙尘暴频繁发生的重要原因之一。

1. 强风是沙尘暴发生的不可缺少的动力条件，风力越强，越有利于形成沙尘暴。因此，研究选择风速、最大风速作为前兆因子。

2. 温度和降水量决定着一个地区的干旱程度。持续的少雨、高温很容易造成地表干燥，表层土疏松，易被风吹起。另外，通过对沙尘暴个例的分析可知，临近沙尘暴发生日，通常至少有 3 日的连续增温现象，气压很低，空气非常干燥。因此，研究选择气温、地面温度、蒸发量以及相对湿度作为前兆因子。

3. 地表植被状况与沙尘暴发生的关系极大。有调查表明，凡是林草植被盖度在 30%以上的地带没有发生沙割、沙埋，只有降尘，灾情轻。与此相反，植被盖度在 15%以下，没有林网庇护的农田，沙割、沙埋非常严重，有的农田几乎绝产。另外，在世界许多植被覆盖率高、生态环境良好的国家和地区有时也出现 12 级大风，但不发生沙尘暴的事实，也说明了地表植被盖度与沙尘暴发生的密切关系。当然地面植被分布与沙尘暴多发区并不一致，地面植被状况好的地区，如果近周边是严重沙化地区，同样会受到沙尘暴的危害，例如兰州、银川等地区。

研究选用判别式法（见式 2.3）分别对 1988-2001 年浑善达克及其周围地区部分大风天气和几乎全部沙尘天气过程中最具代表性的气压、温度、相对湿度、地面温度、风速、最大风速和植被指数数据进行因子筛选，以确定预报因子。

以气压因子为例，将其判别分析结果列出如下表：

表 5-4 气压因子的判别分析表

差异来源	SS	df	MS	F	$F_{0.10}$
组间	152606.8	2	76303.4	3.00	2.32
组内	8818619.5	347	25413.9		
总计	8971226.3	349			

表 5-4 气压因子的判别分析结果表明,  $3.00 > 2.32$ , 所以  $F > F_{0.10}$ , 说明气压因子组间差异较大, 组内差异较小, 对预报量的分类性能显著。其 F 值超过前兆因子入选的临界, 所以气压因子可入选为预报因子。

用同样的方法对其他因子进行判别筛选, 最终入选的预报因子有气压、温度、相对湿度、地面温度、风速、最大风速、和植被指数 (NDVI)。表 5.3 列出各预报因子的分析结果 (临界值  $F_{0.10}=2.32$ )。

表 5-5 判别式法因子筛选结果

因子	气压	温度	相对湿度	地面温度	风速	最大风速	植被指数 (NDVI)
F 值	3.00	2.80	4.85	3.35	129.31	42.64	7.66
是否可选	是	是	是	是	是	是	是

通过表 5-5 可以看出用判别式法对因子进行筛选时, 气压、温度、相对湿度、地面温度、风速、最大风速和植被指数因子的 F 值均超过临界值, 所以皆被入选为预报因子。按照判别式法入选因子的客观标准, 各入选因子的组间差异较大, 组内差异较小, 对预报量的分类性能显著, 其显著水平  $\alpha=0.10$ 。

综上所述, 初步确定预报因子如下表 5-6。

表 5-6 预报因子列表

编号	预报因子	物理意义
1	$X_1$	气压
2	$X_2$	气温
3	$X_3$	相对湿度
4	$X_4$	风速
5	$X_5$	最大风速
6	$X_7$	地面温度
7	$X_8$	植被指数

### 5.5.2 预报模型建立

沙尘暴天气的预报主要是对能否产生沙尘暴、沙尘暴的强度大小的预报, 是

一种定性的天气预报。本研究分别采用典型判别分析法和逐步判别分析法对其进行预报，在对预报量进行分类预报时分别进行二级预报和多级预报。并对它们的分类结果进行对比，选出最佳判别函数。

研究对 1988-2000 年部分大风天气和几乎全部沙尘天气数据进行判别分析，建立不同类别的线性预报方程。并利用 2001 年 3-4 月份的部分大风天气和沙尘天气数据对预报方程进行检验。从对研究数据的分析情况来看，采用逐步判别法分析 1988-2000 年历史数据建立沙尘暴天气的预报模型要比采用典型判别分析法建立预报模型的准确率高，而且，对预报量的二级预报要比多级预报效果好。因此，下面仅给出采用逐步判别分析法建立沙尘暴天气的二级预报模型的分析过程。

由于预报因子间常常存在一定的相关关系，因此随着某些预报因子的引入，判别函数的分辨率并不提高，有时反而会减少。这时可采用逐步判别的方法确定最终引入判别函数式的因子。逐步判别法要求对因子进行逐步检查时，不仅考虑每个因子对预报量的相关性，而且要求几个因子组合对预报量有最好的相关作用。根据各预报因子对预报量判别贡献的大小进一步筛选，以选择能较好对预报量进行预报的因子，确立最佳判别函数。其实质是对因子的进一步筛选。

逐步判别分析的过程就是一步步引入重要因子的过程，每一步都使 Wilks'  $\lambda$  值统计量最小的进入判别函数。因此，每一步都计算该变量进入方程使 Wilks'  $\lambda$  值降低的数值，并选择能使总的 Wilks'  $\lambda$  值达到最小的变量进入判别函数。同时还要进行 F 检验，即方程内 F 检验的 F 值小于临界值的自变量要从方程中移出，方程外的自变量若 F 值大于临界值，则可以进入方程，直到不再有因子的移入与移出。（研究分别采用 3.84 和 2.71 作为因子进入和移出时的 F 临界值）。（赵峰，2004）

### 5.5.2.1 建立大风天气和沙尘天气的线性分类判别函数

预报量为大风天气和沙尘天气。预报因子选用气压 ( $X_1$ )、气温 ( $X_2$ )、相对湿度 ( $X_3$ )、风速 ( $X_4$ )、最大风速 ( $X_5$ ) 地面温度 ( $X_6$ ) 和植被指数 ( $X_7$ )，由于逐步判别分析过程中对因子进行了进一步筛选，经筛选后最终入选的因子有气压和风速。表 5-75 列出了大风天气和沙尘天气的线性判别函数的各常数项及系数。

表5-7 大风天气和沙尘天气的Fish's线性判别函数的系数表

预报因子	y	
	大风天气 ( $f_1$ )	沙尘天气 ( $f_2$ )
气压 ( $x_1$ )	0.335	0.332
风速 ( $x_4$ )	-0.129	-0.081
(常数)	-1471.477	-1452.964

根据表 5-7 得到大风天气和沙尘天气的分类判别函数为：

大风天气：

$$f_1 = 0.335 \times \text{气压} - 0.129 \times \text{风速} - 1471.477$$

沙尘天气:

$$f_2 = 0.332 \times \text{气压} - 0.081 \times \text{风速} - 1449.964$$

根据上述两个分类判别函数可直接计算观测量属于某一类的概率，并将其判入概率最大的一类。

表5-8 1988-2000年大风天气和沙尘天气预测分类统计表

预报量分类	预测分类		总计
	大风天气	沙尘天气	
1988-2000年数据统计 (次)	大风天气 90 沙尘天气 21	37 150	127 171
1988-2000年数据回代统计 (%)	大风天气 70.9 沙尘天气 12.3	29.1 87.7	100.0 100.0

从上表中用判别函数回代的统计结果可以看出，大风天气的错判概率为 29.1%，有 37 个观测量被错判为沙尘天气；沙尘天气的错判概率为 12.3%，有 21 个观测量被错判为大风天气。经计算线性判别函数的历史拟合率为 80.5%。

### 5.5.2.2 建立浮尘或扬沙天气和沙尘暴天气的线性分类判别函数

预报量为浮尘或扬沙天气和沙尘暴天气。预报因子选用气压 ( $X_1$ )、气温 ( $X_2$ )、相对湿度 ( $X_3$ )、风速 ( $X_4$ )、最大风速 ( $X_5$ ) 地面温度 ( $X_6$ ) 和植被指数 NDVI ( $X_7$ )。逐步判别分析过程对因子进行进一步筛选，最终入选的因子有气压、风速和植被指数 (NDVI)。扬沙或浮尘天气与沙尘暴天气的线性分类判别函数及分类结果分别见表 5-9、5-10。

表 5-9 扬沙或浮尘天气与沙尘暴天气的 Fish's 线性判别函数的系数表

预报因子	y	
	大风天气 ( $f_1$ )	沙尘天气 ( $f_2$ )
气压 ( $X_1$ )	0.513	0.509
风速 ( $X_4$ )	-0.215	-0.182
NDVI ( $X_7$ )	2294.768	2270.757
(常数)	-2290.404	-2255.182

根据表 5-9 得到扬沙或浮尘天气与沙尘暴天气的分类判别函数为：

扬沙或浮尘天气:

$$f_1 = 0.513 \times \text{气压} - 0.215 \times \text{风速} + 2294.766 \times \text{NDVI} - 2290.404$$

沙尘暴天气:

$$f_2 = 0.509 \times \text{气压} - 0.182 \times \text{风速} + 2270.757 \times \text{NDVI} - 2255.182$$

根据上述两个分类判别函数可直接计算观测量属于某一类的概率，并将其判

入概率最大的一类。

表 5-10 1988-2000年扬沙或浮尘天气与沙尘暴天气预测分类统计表

预报量分类	预测分类		总计
	扬沙或浮尘天气	沙尘暴天气	
1988-2000年数据统计(次数)	扬沙或浮尘天气	60	26 86
	沙尘暴天气	24	64 88
1988-2000年数据回代统计(%)	扬沙或浮尘天气	70.0	30.0 100.0
	沙尘暴天气	27.3	72.7 100.0

从上表中用判别函数回代的统计结果可以看出, 扬沙或浮尘天气的错判概率为 30.0%, 有 26 个观测量被错判为沙尘暴天气; 沙尘暴天气的错判概率为 27.3%, 有 24 个观测量被错判为扬沙或浮尘天气。经计算线性判别函数的历史拟合率为 71.3%。

### 5.5.3 沙尘暴天气的分类预报

表 5-11 分别列出了用典型判别分析法和逐步判别分析法建立的各类判别函数对历史数据的拟合率及建立判别函数的预报因子。

表 5-11 沙尘暴天气的线性判别函数二级预报分类

数据分组		预报因子		分类准确率(%)	
		典型判别分析法	逐步判别分析法	典型判别分析法	逐步判别分析法
1988   2001 年	1-2	气压、气温、相 对湿度、风速、 最大风速、地面 温度、NDVI	气压、风速	79.9	80.5
	2-3	同上	气压、风速、 NDVI	71.8	71.3

备注: 1-2 代表大风天气和沙尘天气; 2-3 代表扬沙或浮尘天气和沙尘暴天气

根据表 5-11, 可对沙尘暴天气的线性判别函数二级预报做如下分析:

- 判别方法分析

典型判别分析和逐步判别分析的区别在于逐步判别强调对于进入预报方程的最佳预报因子的筛选。在对因子进行逐步检查时, 不仅考虑每个因子对预报量的相关要好, 而且要求几个因子组合对预报量有最好的相关作用。从表 11 的分类统计结果可以看出, 两种分析方法建立的判别函数对沙尘暴天气的分类预报效果无明显差异。说明存在因子组合对判别函数的贡献显著。因此在计算复杂、计算任务较大的情况下, 建议采用逐步判别分析法进行预报。

- 预报因子对判别方程贡献分析

逐步判别分析是根据各预报因子对判别函数贡献大小来筛选因子的，因此从表 11 中逐步判别分析法所入选的因子中可以看出，气压和风速因子在沙尘暴天气的预报中起着十分重要的作用，这与沙尘暴发生时的大气不稳定状态有关。另外植被指数因子对判别函数的贡献也不容忽视。归一化植被指数是用来定量反映地表下垫面植被生长及分布状况的常用指标。下垫面状况的好坏直接影响到沙尘的起源，是沙尘的物质因素。从表 5-11 中可以看出植被状况对沙尘天气过程中沙尘强度有显著影响。

综上所述，研究最终确定沙尘天气的线性二级预报方程如下：

i) 大风天气与沙尘天气的预报方程

大风天气：  $f_1 = 0.335 \times \text{气压} - 0.129 \times \text{风速} - 1471.477$

沙尘天气：  $f_2 = 0.332 \times \text{气压} - 0.081 \times \text{风速} - 1449.964$

ii) 扬沙或浮尘天气与沙尘暴天气的预报方程

扬沙或浮尘天气：

$f_1 = 0.513 \times \text{气压} - 0.215 \times \text{风速} + 2294.766 \times \text{NDVI} - 2290.404$

沙尘暴天气：

$f_2 = 0.509 \times \text{气压} - 0.182 \times \text{风速} + 2270.757 \times \text{NDVI} - 2253.182$

预报为扬沙或浮尘天气以后，再根据风速的大小，即风速大于或等于 4m/s 为扬沙天气，否则为浮尘天气。

#### 5.5.4 沙尘暴天气预报模型检验

采用 2001 年 3-4 月份浑善达克地区逐日气象观测数据作为预报样本输入到预报模型中进行预报准确率的检验。

2001 年 3-4 月份浑善达克地区总共有 40 次记录有沙尘天气，按每次天气过程中至少有 3 个相邻台站同时出现沙尘天气计算，该地区 3-4 月份共出现 10 次沙尘天气过程。其中预报有 12 次沙尘天气过程，有 9 次天气过程预报正确，只有 1 次天气过程没有预报出。有 2 次没有发生沙尘天气预报有沙尘天气发生。在正确预报有沙尘天气发生的情况下，有 2 次沙尘天气过程类型不准确，即有 1 次扬沙天气过程预报为沙尘暴天气过程，有 1 次沙尘暴天气过程被预报成扬沙天气过程（见表 5.10）。因此，可以计算出，沙尘天气发生的准确预报率为 75%，漏报率 10%，沙尘天气类型的准确预报率为 78%。分析该模型没有准确预报出沙尘天气的原因，主要是部分沙尘天气发生过程中，尽管能见度很低（小于 1 或 10 公里），但是风速不够大，在预报检验样本数据中没有预报出的记录的风速一般都小于 10 米/秒，而且，有些台站记录的风速超过 10 米/秒时，有可能预报有沙尘天气发生。

表 5.12 2001 年 3-4 月份沙尘天气试报结果

序号	起止时间 (月.日)	实际过程类型	试报结果
1	3.2-3	扬沙天气	沙尘暴天气
2	3.17	大风天气	沙尘暴天气
3	3.19	沙尘暴天气	沙尘暴天气
4	3.21	沙尘暴天气	沙尘暴天气
5	3.23	沙尘暴天气	沙尘暴天气
6	4.6-7	沙尘暴天气	沙尘暴天气
7	4.9	沙尘暴天气	沙尘暴天气
8	4.10	大风天气	沙尘暴天气
9	4.15	扬沙天气	未预报出
10	4.17	沙尘暴天气	沙尘暴天气
11	4.27	沙尘暴天气	扬沙天气
12	4.29-30	沙尘暴天气	沙尘暴天气

## 5.6 本章小结

本研究中用归一化植被指数作为预报因子对沙尘暴天气进行预报，不单纯从天气角度进行考虑，同时将地表下垫面因子直接作为预报因子，说明用地表植被状况对沙尘暴天气进行预报的可行性。气象因子是沙尘暴发生的动力因子，因此在对沙尘暴天气进行预测预报时，须结合典型的天气形势，根据不同机制下产生沙尘暴的天气形势对预报因子进行分组，以保证预报因子确切反映预报量的信息，提高预报准确率。

由于数据资料受限，本研究在因子选择方面存在不少缺陷，例如沙尘暴天气里对流层低层的强烈不稳定状态应特别重视，大气是否稳定取决于大气的压温垂直梯度的大小，仅用当日气温和气压不很确切。另外，地表土壤干湿状况、土壤表面硬度以及土壤含沙量等都是沙尘移动路径中的地表起沙量的重要因素。

## 主要参考文献：

- 孙军、李泽椿。西北地区沙尘暴预报方法的初步研究。气象, 2001, 27 (1): 19-24
- 唐守正编著。多元统计分析方法。北京: 中国林业出版社, 1984
- 腾卫平, 杜惠良。浙江东风暴雨天气的一种诊断统计预报方法。科技通报, 1995, 11 (4), 209-212
- 赵峰, 鞠洪波, 陈永富。沙尘暴天气统计预报模型的研究, 林业科学, 2004, 17 (3): 300-304。
- 朱爱荣。陕西北部春季沙尘暴预报探讨, 陕西气象 1994 年 01 期

## 第六章 沙尘暴移动路径概率预报

根据统计学原理, 利用 1952-2001 年的历史资料对扬沙和沙尘暴天气过程进行统计, 以对受沙尘暴影响的气象站点进行预报。

### 6.1 背景

沙尘暴是在沙漠及其边缘等特殊下垫面条件下产生的一种灾害性天气。沙尘暴发生的物理机制相当复杂, 但必须具备下面三个必要条件: 沙源、大风、低层大气层结构不稳定, 三者必须密切配合, 缺一不可。在沙尘暴的发展过程中也离不开这三个必要条件。因此从某种意义上讲, 沙尘暴的形成机理也是路径的形成机理, 沙尘暴的起发地也是其路径的起始地。我国北方春季的沙尘天气几乎都与冷空气活动产生的大风相伴出现, 根据冷空气的移动路径, 大致可以分析出沙尘暴的移动路径。当然, 沙尘暴移动路径不但与气象状况有关, 地理条件等诸多因素也影响其移动方向。

目前, 我国气象局有关专家通过对我国北方地区几十例沙尘暴天气过程进行卫星云图和天气形势的综合分析, 提出了影响我国沙尘天气的四条冷空气移动路径, 并初步推断出我国境内沙尘暴路径。专家认为, 影响我国的沙尘暴路径主要有三条: 第一条偏西路径是翻越帕米尔高原后进入南疆盆地, 然后向东移动继续影响青海和甘肃; 第二条西北路径是经北疆和蒙古国西部进入我国, 影响新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古以及陕西等地区; 第三条偏北路径是由贝加尔湖或蒙古国中部、东部进入我国, 主要影响内蒙古、甘肃、宁夏、陕西以及华北地区。而影响北京地区的沙尘暴主要来自内蒙古的阿拉善盟、巴彦淖尔盟、乌兰察布盟和锡林郭勒盟, 河北北部和黄土高原等地。影响北京地区的沙尘暴路径也有三条, 分别从内蒙古的朱日和、河北黑河及山西东部进入北京地区。

### 6.2 数据处理

研究采用的气象资料是由我国气象部门所提供的 1952-2001 年发生在我国境内的逐日沙尘天气记录。

#### 6.2.1 扬沙和沙尘暴天气过程筛选与统计

中国气象局预测减灾司关于沙尘天气预警业务暂行规定 (2002 年 10 月) 中指出: 扬沙天气过程是指在同一次天气过程中, 我国天气预报区域内相邻 5 个或 5 个以上国家基本 (准) 站同时出现了扬沙天气; 沙尘暴天气过程是指在同一次天气过程中, 我国天气预报区域内相邻 3 个或 3 个以上国家基本 (准) 站同时出现了沙尘暴天气; 强沙尘暴天气过程是指在同一次天气过程中, 我国天气预报区域内相邻 3 个或 3 个以上国家基本 (准) 站同时出现了强沙尘暴天气。

按照以上规定，并根据扬沙和沙尘暴天气过程的时间延续性，首先对气象部门所提供的 1952-2001 年的沙尘天气数据进行扬沙和沙尘暴天气过程筛选，将不符合规定的或单个的气象记录去除。然后，根据我国境内的三条主要沙尘暴路径的影响范围，注明每一次扬沙或沙尘暴天气过程所属的沙尘暴路径，并统计出每次天气过程所影响的气象台站。

### 6.2.2 拟定沙尘暴源地和影响区

将一次扬沙或沙尘暴天气过程中，第一天发生扬沙或沙尘暴的所有地区中，处于最上风方向的地区，同时参考下垫面状况如沙漠或沙地，上述地区则被认为是沙尘暴源地；而该天气过程中的其它受影响地区则认为是影响区。

将我国北方地区气象台站分布图和我国北方地区的行政区划图相叠加，参照我国沙漠和沙地分布图，根据各气象台站所在的行政区发生扬沙或沙尘暴的次数分别确定沙尘暴源地和影响区。通常情况下，沙尘暴源地发生扬沙或沙尘暴的次数较多，而影响区内发生扬沙或沙尘暴的次数较少。

三条主要沙尘暴路径源地的气象台站见表 6-1。

表 6-1 沙尘暴路径的发生源地

沙尘暴路径	源地气象站台号	源地气象站名
偏西路径	51705、51711、51709、51716、 51720、51811、51818	乌恰、阿合奇、喀什、巴楚、 柯坪、莎车、皮山
西北路径	51765、51777、51828、51839、 51848、51855、52267、52378、 52495	铁干里克、若羌、和田、民丰、 安德河、且末、额济纳旗、 拐子湖、巴音毛道
偏北路径	53068、53149、53192、 53195、53276、 53352、 54012、54102	二连浩特、满都拉、阿巴嘎旗、 苏尼特左旗、朱日和、 达尔罕茂明安联合旗、 西乌珠穆沁旗、锡林浩特

注：气象站台号和站台名一一对应。

### 6.2.3 扬沙和沙尘暴移动路径上各气象台站发生概率统计

将筛选出的扬沙或沙尘暴天气过程进行分组，分别归属到不同的沙尘暴路径：偏西路径、西北路径和偏北路径；列出每一个天气过程所影响的气象台站；最后，统计每条沙尘暴路径影响的气象台站所在的行政区发生扬沙或沙尘暴的频数。通常情况下，扬沙和沙尘暴天气过程的源区内的气象台站发生扬沙或沙尘暴的频数较高，而影响区内的气象台站的频数稍低。

对于源区内任一气象台站所在的行政区发生扬沙或沙尘暴天气时，若计算影响

区某一气象台站所在地区是否有扬沙或沙尘暴发生，则计算方法为：首先对源区内发生扬沙或沙尘暴天气频数较高的气象台站的频数求平均值，然后计算出影响区内的该气象台站的发生频数和平均值的比值（X），计算得到的百分比即该气象台站出现扬沙或沙尘暴天气的概率（ $p_1$ ）。计算公式如下：

$$p_1 = \frac{m_i}{\bar{m}} \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$p_1$  — 影响区内气象台站所在行政区发生扬沙或沙尘暴概率；

$m_i$  — 影响区内第  $i$  个气象台站所在行政区发生扬沙或沙尘暴频数；

$\bar{m}$  — 源区内发生扬沙或沙尘暴天气频数较高的气象台站的频数平均值；

若已知影响区内处于上风方向的气象台站所处的行政区发生扬沙或沙尘暴天气，预测下风方向的影响区内的气象台站所在的地区是否发生的概率，其方法是：根据式（1）计算分别得到各气象台站发生扬沙或沙尘暴天气的概率  $p_{i-1}$  和  $p_i$ ，然后求  $p_i$  和  $p_{i-1}$  的百分比值，所得到的概率值即下风方向的影响区内的气象台站所在的地区发生扬沙或沙尘暴的概率。计算公式如下：

$$p_2 = \frac{p_i}{p_{i-1}} \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$p_2$  — 影响区内气象台站所在的行政区发生扬沙或沙尘暴概率；

$p_i$  — 影响区内第  $i$  个气象台站所在的行政区发生扬沙或沙尘暴概率；

$p_{i-1}$  — 影响区内第  $i-1$  个气象台站所在的行政区发生扬沙或沙尘暴概率

为了方便预报，需要对各气象台站发生扬沙或沙尘暴的概率进行整值调整，调整结果见表 6-2。

表 6-2 比值和概率的对应

比值 (X)	概率 (p)
0.9 ≤ X < 1.0	90
0.8 ≤ X < 0.9	80
0.7 ≤ X < 0.8	70
0.6 ≤ X < 0.7	60
0.5 ≤ X < 0.6	50
0.4 ≤ X < 0.5	40
0.3 ≤ X < 0.4	30
0.2 ≤ X < 0.3	20
0.1 ≤ X < 0.2	10
0 ≤ X < 0.1	忽略

### 6.3 沙尘暴主要移动路径的分析

通过对 1952-2001 年发生在我国境内的逐日沙尘天气记录进行扬沙和沙尘暴

天气过程筛选及和发生频数统计计算, 最终得出了近 50 年来我国北方地区扬沙和沙尘暴天气的影响区内各气象台站所在行政区发生沙尘天气的统计概率。而且, 可以根据影响区内已发生扬沙或沙尘暴天气的台站预测出影响区内其他气象台站将要发生的概率。例如, 偏西路径上影响区内 51644 (库车) 发生沙尘天气的概率值为 70%, 52818 (格尔木) 的概率值为 50%。若 51644 (库车) 已发生, 则 52818 (格尔木) 发生的概率为 70% (5/7)。

下面将分别用图表的形式列出了不同路径上沙尘天气过程中影响区内气象台站发生扬沙或沙尘暴的概率。见表 6-3、图 6-1、图 6-2 和图 6-3。

表 6-3 1952-2001 年扬沙和沙尘暴天气过程中影响区内各气象台站(站号)发生概率统计表

预报路径	主要覆盖范围	源区(台站号)	影响区	
			概率统计(%)	气象台站号
偏 西 路 径	新疆南部、青海、甘肃、宁夏	51705、51709、51711、51720、51716、51811、51818	90	51828、51839、51855、51777、52681、52424、52418、51628、53723
			80	
			70	51644、51573、51848、52895、52652、52203
			60	53446、52546、52679、52378
			50	52818、51765、53646、52533、52797、53810
			40	52836、53543、53529、53545、52495、52267、52436、53614
			30	52889、51931、51334、53513、53705、52203、53725、52787、53915
			20	53602、53754、51730、53336、52983、52576、53772、51642、52996、54333、52754、53463
			10	53362、51886、52602、52866、54213、53704、53845、56033、53420、57006、52661、54236、53276、53740、54218、52984、53391、53817、52633
西北 路 径	新疆东部、甘肃、青海、内蒙古西部、宁夏、陕西西北部	51828、51839、51848、51855、51777、51765、52267	90	52681、53723、52546、53502、52652、53446
			80	52797、52533、52418、53545、53529
			70	53810、53543、52424、53646
			60	51720、53362、52679、
			50	52436、52895、51811、53602、53276
			40	52576、53614、53391、52818、52203、51573、51628、51644、53336
			30	53704、53352、53513、53463、54213、53068、53705、53754、52754、
			20	53420、53487、53817、51334、52889、54401、52787、52633、53480

		52378 、 52495	10	52957、53915、53772、54236、52836、53845、54218、 52943、54102、53195、53673、52866、51709、51379、 53863、54511、53698
偏 北 路 径	内蒙中 东部、 宁夏、 甘肃东 部、陕 西北部、 山西北 部、河 北、北 京、辽 宁、黑 龙江	53068 、 53149、 53192 、 53195、 53276 、 53352、 54102 、 54012	90	54213、53723、50949、54115、54218、53446、53463、 54236
			80	53391
			70	53362、53502、53545、53529
			60	53646、54027、
			50	50953、53480、53487、53543、50915
			40	54511、53336、54401、52681、53772、53754、54026、 54333、53725、50854
			30	54337、53810、53817、54324、54342、50745、53513、 53845
			20	50756、52378、52495、50658、53602、53798、50557、 54539、53863、53915、53963、54416、57036
			10	53704、53705、53614、53420、53738、53740、53806、 53231、53399、53942、54335、54423、50968、53478、 53519、53673、54308、54527、50527、52797

表 6-4 1952-2001 年扬沙和沙尘暴天气过程中影响区内各气象台站（站名）发生概率统计表

预报路 径	主要覆 盖范围	源区（台 站名）	影响区	
			概率统 计（%）	气象台站名
偏 西 路 径	新疆南 部、 青海、 甘肃、 宁夏	乌恰、喀 什、 阿合奇、 柯坪、 巴楚、莎 车、 皮山	90	和田、民丰、且末、若羌、民勤、安西、敦煌、阿 克苏、盐池
			80	
			70	库车、吐鲁番、安德河、靖远、张掖、哈密
			60	包头、高台、武威、拐子湖
			50	格尔木、铁干里克、榆林、酒泉、景泰、同心
			40	都兰、东胜、鄂托克旗、伊金霍洛旗、巴音毛道、 额济纳旗、玉门镇、银川
			30	兰州、于田、精河、临河、中宁、哈密、定边、乌 鞘岭、平凉
			20	阿拉善左旗、绥德、阿拉尔、乌拉特中旗、榆中、 阿拉善右旗、太原、轮台、华家岭、新民、刚察、 呼和浩特
			10	四子王旗、茫崖、冷湖、西宁、翁牛特旗、天水、 玛多、彭武、赤峰、延安、固原、横山、中卫、杭 锦后旗、化德、临夏、朱日和、山丹、托勒
西北	新疆东 部、 甘肃	铁干里 克、 若羌、 和 田、 肃	90	张掖、高台、民勤、盐池、吉兰太、包头
			80	景泰、酒泉、敦煌、伊金霍洛旗、鄂托克旗
			70	同心、东胜、安西、榆林
			60	柯坪、武威、四子王旗
			50	莎车、玉门镇、靖远、朱日和、阿拉善左旗

路 径	肃、青 海、内 蒙 西 部、 宁 夏、陕 西北部	民丰、安 德河、 且末、 额济纳 旗、 拐子湖、 巴音毛 道	40	吐鲁番、阿克苏、库车、哈密、阿拉善右旗、格尔木、化德、乌拉特中旗、银川
			30	刚察、二连浩特、达尔罕茂明安联合旗、呼和浩特、临河、翁牛特旗、中卫、中宁、绥德
			20	精河、托勒、乌鞘岭、兰州、杭锦后旗、集宁、大同、固原、张家口
			10	奇台、喀什、都兰、西宁、兴海、同德、苏尼特左旗、石家庄、太原、延安、原平、介休、平凉、锡林浩特、赤峰、彰武、北京
偏 北 路 径	内蒙中 东部、 宁夏、 甘肃东 部、 陕西北 部、 山西北 部、 河北、 北京、 辽宁、 黑龙江	二连浩 特、满都 拉、阿巴 嘎旗、 苏尼特 左旗、朱 日和、 达尔罕 茂明安 联合旗、 西乌珠 穆沁旗、 锡林浩 特	90	前郭尔罗斯、呼和浩特、包头、盐池、林西、翁牛特旗、赤峰、彰武
			80	化德
			70	四子王旗、吉兰太、伊金霍洛旗、鄂托克旗
			60	榆林、巴林左旗、
			50	东乌珠穆沁旗、哈尔滨、集宁、大同、东胜
			40	北京、新民、张家口、扎鲁特旗、太原、绥德、定边、乌拉特中旗、民勤、安达
			30	锦州、朝阳、沈阳、延安、同心、固原、临河、齐齐哈尔
			20	嫩江、克山、海伦、拐子湖、巴音毛道、阿拉善左旗、邢台、介休、平凉、候马、密云、乐亭、西安
			10	海拉尔、尚志、景泰、海力素、张北、杭锦后旗、右玉、惠农、原平、银川、中卫、中宁、吴旗、横山、海源、洛川、黑山、承德、丰宁、天津

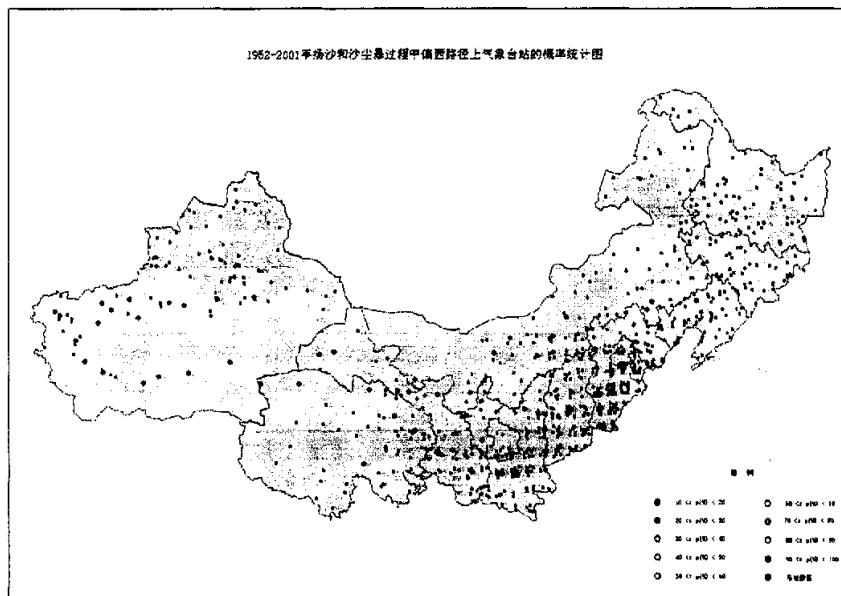


图 6-1 1952-2001 年扬沙和沙尘暴过程中偏西路径上气象台站的概率统计图

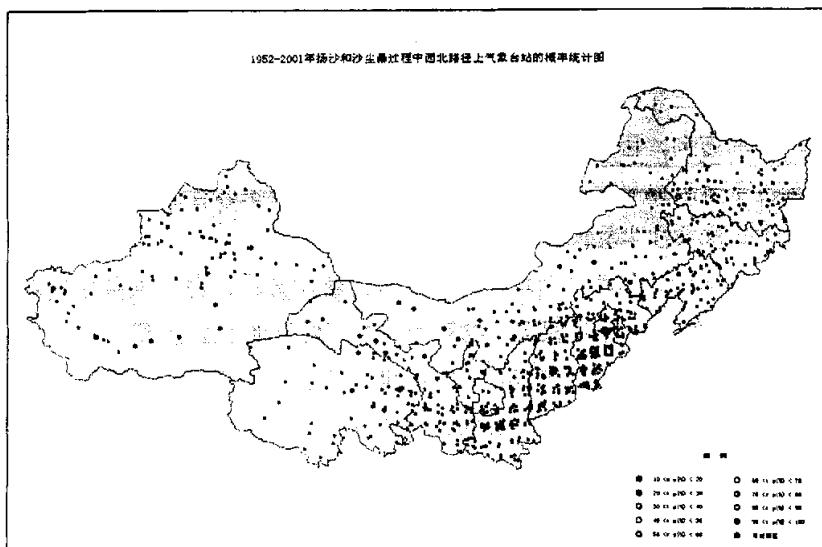


图 6-2 1952-2001 年扬沙和沙尘暴过程中西北路径上气象台站的概率统计图



图 6-3 1952-2001 年扬沙和沙尘暴过程中偏北路径上气象台站的概率统计图

从以上图表中可以初步确定下列地区为我国北方地区春季沙尘天气发生频数较高的地区。

### 6.3.1 塔里木盆地周围地区

该盆地在历史时期经历过绿洲沙漠化和沙尘暴的袭击，由于其所处地理位置不同，所受的危害程度也不一样。

塔里木盆地南缘和西部喀什噶尔冲积平原。本区为塔克拉玛干沙漠向南蔓延地

带, 风沙活动频繁, 极易引发沙尘天气。根据气象资料统计, 多年平均沙尘暴发生频数, 由多到少依次为: 民丰、和田、且末、莎车、若羌和于田。由于该地区主要受西方冷峰云带的控制, 因此属于我国沙尘天气的偏西路径。且由于其位于该路径的上风方向, 因此, 是我国境内偏西路径发生沙尘天气最早的地区。可以根据该地区部分台站发生扬沙或沙尘暴天气的频数计算沙尘暴偏西路径上其他气象台站发生扬沙或沙尘暴的概率。

塔里木盆地北缘和西部柯坪盆地。盆地北缘由天山山前平原和塔里木河平原所组成, 地表组成物质为河流沉积物和风积沙, 由于地下水位高, 一般为 2-3 米, 植物生长较好, 加之由天山屏障, 风力减弱, 风沙运动较盆地南缘轻, 沙尘暴发生频数也相对较少。其中柯坪和巴楚因风大沙多, 扬沙和沙尘暴发生频数相对较多, 但局地性强。

### 6.3.2 吐—哈盆地经河西走廊—宁夏平原至陕北一线

在这条长约 3 000 多公里的风沙线上, 北面临近诺明戈壁、阿拉善高原和鄂尔多斯高原诸大戈壁、沙漠, 地域辽阔, 沙尘源丰富, 又是西伯利亚和蒙古高压干冷空气南下经新疆东部或内蒙古西部, 沿河西走廊, 侵入宁夏平原、陕北长城沿线的必经路径, 沿线大风频繁、风沙肆虐、沙尘暴活动也十分强烈。1993 年“5·5”特大沙尘暴基本上是沿着这条路线进行的。由于各地自然和社会环境的不同, 沙尘暴发生频数和强度也不一样。

吐鲁番—哈密盆地。本地区是天山东部较大的一个山间盆地, 地势低洼、闭塞, 盆地内分布大片风蚀地、戈壁和沙丘。春末夏初, 大风频繁, 每年都发生 10 级以上大风多次, 最大风力达到甚至超过 12 级。然而, 相对于大风日数来说, 沙尘暴日数少, 两者比值为 1.7-8.3。该地区受西方和西北方冷锋云带的影响, 属于我国境内沙尘暴天气的偏西路径和西北路径的影响范围。统计结果表明: 若偏西路径上有扬沙或沙尘暴天气发生时, 吐鲁番和哈密两个气象台站的发生概率为 70%; 若西北路径上有扬沙或沙尘暴天气发生时, 吐鲁番和哈密两个气象台站的发生概率为 40%。

河西走廊及腾格里沙漠南缘。合黎山、龙首山与祁连山之间为一东西狭长平原, 是沟通西域的通道, 因为于黄河之西, 故名河西走廊。它北面临近腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠, 境内还分布有大面积的戈壁、沙地, 沙物质丰富。这里又是北方强冷空气南下的要冲, 因走廊地形引起的狭管效应, 风力明显增强, 加之春旱无雨, 地表十分干燥, 地面沙尘容易被大风卷入空中, 形成沙尘暴天气。该地区也受西北方冷锋云带和西方冷锋云带的影响。因此, 当偏西或西北路径上有扬沙或沙尘暴天气发生时, 该地区部分气象台站的发生概率分别为: 民勤 90%、90%; 张掖 70%、90%; 高台 60%、90%; 景泰 50%、80%; 武威 60%、60%; 酒泉 50%、

80%; 敦煌 90%、80% 以及安西 90%、70%。不论哪条路径上有扬沙或沙尘暴发生, 该地区的发生概率都较大, 尤以民勤的发生概率最高。而且, 民勤地区的沙尘暴发生频数位居全国之首。

宁夏平原及中部盐池、同心地区。本地区地处乌兰布和沙漠和腾格里沙漠的下风侧, 地表为沙质土, 大风频繁, 春季常有沙尘暴发生, 但沙尘暴强度又随地区环境而异。宁夏平原上因黄河灌溉之利, 农业发达, 故沙尘暴活动有所减轻。处于该地区的气象台站中卫所记录的气象资料表明, 不论偏西或西北路径上有扬沙或沙尘暴天气发生, 中卫地区的发生概率皆为 30%, 发生沙尘暴的概率较小。而处于宁夏中部的盐池和同心地区为半农牧地区, 由于近 20 年来人口失控和掠夺式的土地利用方式, 致使植被被破坏、草原退化、土地沙漠化日趋严重。随之而来的沙尘暴也次数增多、频率加快。同心地区的气象资料表明, 该地区发生扬沙或沙尘暴的概率为: 偏西路径上 50%; 西北路径上 70%。盐池地区不同路径上的发生概率则高达 90%。

陕北长城沿线。由神木经榆林、靖边至定边沿长城一线, 北临毛乌素沙地, 由于水分条件较好, 沙地多为植物固定, 经认为强度经济活动, 如滥垦、滥牧, 使植被遭到破坏, 流沙不断南移, 春季沙尘暴经常发生。地处该地的榆林地区发生扬沙或沙尘暴的概率为: 偏西路径上 50%; 西北路径上 70%。因此, 该地区沙尘天气足以引起重视, 适当采取措施对某些经济活动加以限制。

### 6.3.3 内蒙古阿拉善高原、河套平原及鄂尔多斯高原

本区地处我国西北边疆, 地势开阔、平坦, 沙漠、戈壁广布, 气候干旱, 风力强大, 沙尘暴活动强烈, 并且具有频率高、强度大、范围广的特点。

阿拉善高原位于贺兰山以西至新疆边界的广大地区, 巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠分布其间, 西部分布有连片戈壁, 北临蒙古大戈壁。春季北风倾力而来, 沙尘弥漫, 瞬间不见人。该地区主要受西北冷锋云带类的影响, 该地区的额济纳旗、拐子湖和吉兰泰发生扬沙或沙尘暴的概率高达 90% 以上。

河套平原居于阴山山地与鄂尔多斯高原之间, 为一沉降盆地, 东西沿黄河延伸, 黄河两岸有小规模的风积沙层, 西端在贺兰山与狼山之间, 有开阔的缺口, 西北风将阿拉善高原上的砂粒吹入本区, 在春季形成大的沙尘暴。该地区的包头发生扬沙或沙尘暴的概率为: 偏西路径上 60%; 西北路径上 90%。发生频率较高。而临河地区在不同路径上的发生概率则为 30%, 这与临河市的地形有关。

鄂尔多斯高原境内北为库布齐沙漠, 南为毛乌素沙地, 历来为农牧交错区, 沙漠化现象严重。该地区主要受西北冷锋云带类的影响, 据有记录的额托克旗气象台站的气象资料表明, 当西北路径上有扬沙或沙尘暴天气发生时, 额托克旗发生的概率为 40%。

### 6.3.4 京津地区风沙危害的主要尘源地

浑善达克沙地的位置正好处在锡林郭勒大草原的中部,沙地占据了锡林郭勒盟 1/3 的土地面积。它位于首都北京的西北部,是距北京市最近的一块沙地。浑善达克沙地从大兴安岭南部山地西麓的克什克腾旗向西一直延伸到苏尼特右旗。该地区东、西部水分条件相差较大,西部水量较少,东部水资源丰富。冬春季风强而多,4-5 月风速较大,高可达 12 级,是全国沙区最大风区之一。该地区主要受北方冷锋云带类的影响,属于沙尘暴移动路径的偏北路径,是京津地区的沙源之一。

冀北高原沙区北部与内蒙多伦、商都等干旱、半干旱草原地带及荒漠草原地带的锡林郭勒沙漠化发展区为邻;西部与山西的左云、右玉和内蒙的丰镇等在内的长城沿线沙漠化发展区接壤,对本地特别是冀北高原地区形成半圆形包围。尤其是锡盟阴山北部的小腾格里沙地,南北宽 50~150km,东西长达 300km,随盛行的西北风形成强大的风沙流,成为外部入侵沙的主要沙源。风沙流通过冀北高原南部沿线的怀安马市口、万全新河口、张北黑风口、崇礼三龙口和赤城独石口等五大天然隘口,沿峡谷沟道,刮向洋河、桑干河河畔,将河道积沙连同携来的沙尘一起,卷向天空,形成桑、洋河岸数百里风沙线。位于张家口山地的永定河上游怀来县的五大沙地,也对北京的风沙灾害起了推波助澜的作用,因为它们离北京最近。其中南马场沙滩离北京天安门的直线距离只有 72km,而且还在以每年 4~5m 的速度向东移动。承德也是北京的风沙发源地之一。张家口、承德两地区位于北京的上风向,毗邻内蒙古的浑善达克沙漠和黄土高原,干旱少雨,植被稀疏,荒漠化严重,加上地势明显高出华北平原,每年春季,强劲的西北风携沙带土,长驱直入,横扫京津,并殃及河北省其他地区。

### 6.4 本章小结

本章参照我国气象专家提出的影响我国境内的三条沙尘暴移动路径,运用统计学的方法对我国北方地区近 50 年来春季沙尘天气的气象资料分路径进行了统计,拟定出我国境内的沙尘天气的源区和影响区,针对不同沙尘暴路径上的源区和影响区计算出影响区内各气象台站发生沙尘天气的概率。

由于扬沙和沙尘暴天气是一个变化复杂、影响区域广泛、时间上延续的天气过程,其移动路径也是复杂多变的,不可能有明确的区域界限。并且,经常有几条路径上的天气过程同时发生的现象,难免会出现影响区域交叉。因此,分路径统计影响区内各气象台站发生沙尘天气的概率存在一定误差。

由于沙尘天气的移动与地形、地表植被状况等密切相关,因此在具体预报时,还需参考当时地表下垫面有无明显变化的情况,以及沙尘天气发生当时各气象台站的主导风向、风速大小等影响因素对发生概率作适当调整,以便对扬沙和沙尘暴天气的移动路径进行较为准确的预报,及时向有关地区提供预警信息。

## 第七章 基于统计的沙尘强度预报

目前, 利用气象卫星数据动态监测沙尘暴过程, 并及时提供其发展趋势、受灾范围及强度信息是实现环境监测和沙尘暴灾害预警的主要技术手段。

### 7.1 背景

我国西北地区是沙尘暴的多发地, 春季 3、4、5 月份是沙尘暴的多发时段。沙尘暴虽为一种小概率天气事件, 但从近 40 余年中每 10 年间强和特强沙尘暴产生频率的年代变化来看, 从 50 年代至 90 年代沙尘暴出现的频率有增加趋势, 特别是从 60 年代到 70 年代, 这种增加更加明显。沙尘暴发生频数的增高, 而且涉及范围在扩大, 严重程度也大为增强, 这就不能不引起人们的广泛关注。

但是, 由于卫星监测到的沙尘天气数据只能对部分地区(沙尘传输路径的下游地区)进行提前预报, 多数地区只能实时获取沙尘天气状况并及时提供受影响范围、沙尘强度信息等。因此, 需要探索另外一种切实可行的方法来对沙尘天气的强度信息及时预报。

### 7.2 研究方法

本研究主要对近 20 年来我国北方地区发生的沙尘天气过程进行统计, 按照沙尘天气在我国境内的三条传输途径, 分别统计每条路径上主要气象台站在每次扬沙或沙尘暴过程中的沙尘强度, 并总结出在扬沙或沙尘暴天气过程中各台站沙尘强度的分布规律, 为沙尘天气过程预报提供各主要台站可能出现的沙尘强度信息。

研究采用的气象资料是由我国气象部门所提供的 1980-2001 年 3-5 月份发生在我国北方地区的沙尘天气记录。

首先, 按照中国气象局对扬沙和沙尘暴天气过程的规定, 筛选出我国北方地区 1980-2001 年 3-5 月份发生的扬沙和沙尘暴天气过程(采用路径统计中对扬沙和沙尘暴天气过程的筛选结果)。然后, 按照三条不同的传播路径分组(见沙尘统计路径中的传播路径的划分), 统计出各站点发生扬沙或沙尘暴天气的频数及每次沙尘天气过程中受影响地区各站点的沙尘强度(能见度), 计算能见度的平均值, 即每次沙尘天气过程中该站点的平均能见度大小。最后, 比较相邻站点每次沙尘天气过程中平均能见度的大小, 可以看出沙尘天气过程中不同传播路径上受影响地区平均能见度的变化情况。对于能见度变大或减小的台站, 从地表形态、土壤质地以及地表植被状况等方面进行分析, 找出影响该地区沙尘强度的主要因素, 以便采取措施, 减少沙尘天气的发生, 减轻沙尘强度及其所造成危害。

### 7.3 强度分析

### 7.3.1 偏西路径上主要台站沙尘分析

按照偏西路径上受影响地区的范围划分,对偏西路径上有记录的主要台站的1980-2001年3-5月份的扬沙或沙尘暴天气过程进行统计,计算各站点每次平均能见度的大小,计算结果见图7-1。

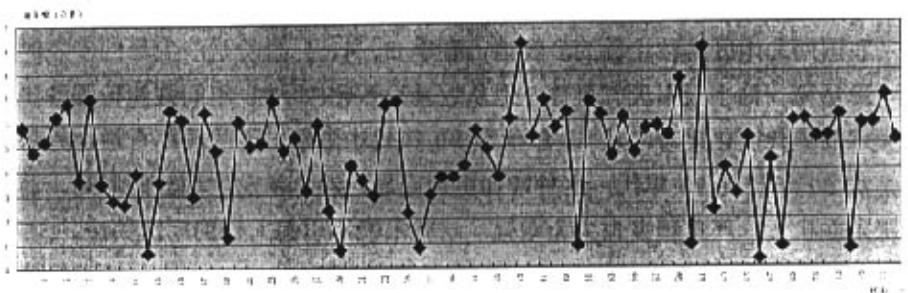


图 7-1 偏西路径上主要台站沙尘暴强度分布图

从图7-1中可以看出,偏西路径上总共选取了78个台站作为预报样点,各台站的平均能见度均在0-10公里之间。

(1) 在78个样点台站中,共有8个台站的能见度小于1公里。它们分别是:民勤(52681)、榆林(53646)、伊金霍洛旗(53545)、阿拉善左旗(53602)、刚察(52754)、翁牛特旗(54213)、玛多(56033)和赤峰(54218)。

其中,民勤和伊金霍洛旗都属沙尘暴特长暴区。民勤地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:41.07、33.41、4754.61、115.78。伊金霍洛旗年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:19.22、14.71、2632.22、136.94。

从全国土地利用图中可以看出,民勤地区有大面积的沙地存在,有林地面积较少,并且零星分布有水浇地和裸岩地。伊金霍洛旗周围有乌兰布和沙漠河毛乌素沙地,这些均为沙尘天气提供了足够的沙源,再加上大风次数较多,很容易形成沙尘暴天气。

榆林地区属沙尘暴长暴区,其年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:12.31、10.04、1400.38、113.74。刚察地区亦属沙尘暴长暴区,其年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:21.14、13.84、963.19、45.57。从全国土地利用图中可以看出,榆林地区紧邻毛乌素沙地,主要土地利用类型包括灌木林地、天然草地和旱地,有林地面积小,天然草地呈破碎状分布。刚察地区80%的面积是天然草地,紧挨青海湖,湖周围有零散的沙地存在,显然有就地起沙的可

能。总之，明显沙源的存在是形成沙尘暴天气的必要条件。

玛多和赤峰地区均属中暴区。其中玛多地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：7.74、5.46、212.22、27.42。赤峰地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：6.90、4.92、379.53、55.02。从全国土地利用图中可以看出，玛多地区绝大部分面积都是天然草地，有湖泊分布，并由少部分裸岩地，因此，该地区沙尘暴天气主要是由于大风携带沙尘所造成的。赤峰地区的沙尘天气主要与浑善达克沙地有关，一方面处于下风向，另一方面浑善达克沙地周围草地退化严重，致使沙地面积在逐年扩张，从而沙尘暴天气比较严重。

阿拉善左旗和翁牛特旗，这两个地区的大部分土地利用类型均为天然草地，有小部分沙地存在，并零星分布着水浇地和旱地。但其附近都有较大的沙源存在，例如，阿拉善左旗紧挨腾格里沙漠。因此，虽然从这两个地区发生沙尘天气的次数来看，都属于沙尘暴发生较少的地区，但其每次沙尘暴发生的平均能见度较大，均小于1公里。

（2）在78个样点台站中，有3个台站的能见度均较高，它们分别是：53705-中宁、53463-呼和浩特、54333-新民。其平均能见度的大小（公里）依次为：9.20、7.71、9.00。

中宁和呼和浩特地区均属沙尘暴长暴区。其中中宁地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：5.67、4.84、691.82、121.94。呼和浩特地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：9.32、6.61、526.83、56.54。尽管中宁属沙尘暴长暴区，但由于其风沙天气发生次数较多，而且以能见度大于1公里的扬沙天气居多，因此，该地区发生沙尘天气的平均能见度大于7公里。而呼和浩特地区能见度高主要是因为该地区发生的沙尘暴天气多属于西北路径，属于该路径的沙尘暴天气发生次数较少。

（3）另外，该路径上还有一些属于沙尘暴特长暴区，但其均值能见度并不小于1公里的气象台站，如敦煌（52418）、安西（52424）、巴彦毛道（52495）、包头（53446）、巴楚（51716）、柯坪（51720）、莎车（51811）和皮山（51818）。这些地区年平均发生沙尘暴的次数依次为：17.76、21.78、19.18、28.24、20.50、43.47、20.71和31.20。由于这些地区发生沙尘天气的次数非常多，基本上都是全国发生沙尘天气最多的地区，但是也有相当一部分是能见度在1-10公里之间的扬沙天气，结果，统计后的各站点平均能见度的值均大于1公里。

（4）偏西路径上其它站点每次平均能见度的大小均在1-7公里之间，详见附录1。

总之,偏西路径上发生沙尘天气时,各主要台站的能见度的变化可概括为如下:52681、53646、53545、53602、52754、54213、56033、51848 和 54218 能见度较小,即沙尘强度较大,每次平均能见度小于 1 公里;52418、52424、52495、53446、51716、51720、51811 和 51818 发生沙尘天气的次数较多,应引起足够注意。本文根据偏西路径上 78 个台站在沙尘天气过程中平均能见度的大小和各台站之间能见度的相对高低来推断沙尘天气过程中下风方向的台站可能出现的沙尘强度。

### 7.3.2 西北路径上主要台站沙尘暴强度分析

根据西北路径上受影响地区的范围划分,对西北路径上有记录的主要台站的 1980-2001 年 3-5 月份的扬沙或沙尘暴天气过程进行统计,计算各站点每次平均能见度的大小,计算结果见图 7-2。

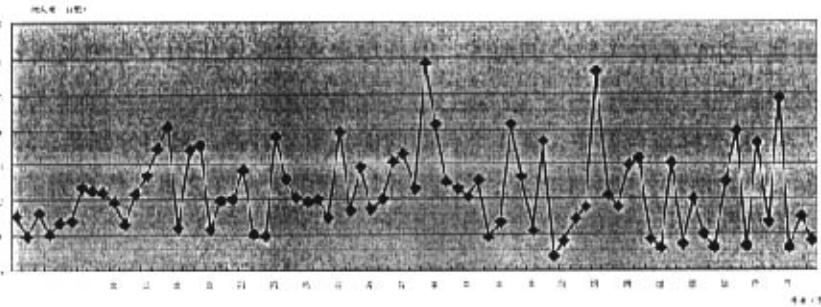


图 7-2 西北路径上主要台站沙尘暴强度分布图

从图 2 中可以看出,西北路径上总共选取了 75 个台站作为预报样点,各台站的平均能见度均在 0-6 公里之间。

1、75 个样点台站中,共有 13 个台站的能见度小于 1 公里。它们分别是:51839-民丰、53646-榆林、53463-呼和浩特、53420-杭锦后旗、53487-大同、53915-平凉、53772-太原、52836-都兰、54218-赤峰、52943-兴海、53673-原平、53863-介休、53698-石家庄。

其中,民丰属沙尘暴特长暴区。民丰地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:46.93、36.26、7402.21、157.73。该地位于我国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠的边缘,并且降雨量少,风沙天气多。

榆林和呼和浩特属沙尘暴长暴区。这两个地区均在偏西路径和西北路径沙尘天气的影响区域。

大同、平凉、太原、都兰、赤峰、兴海、原平、介休以及石家庄属沙尘暴中暴区。大同地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均

持续时间（分钟）分别为：3.43、3.00、347.75、101.33。平凉地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：2.76、2.57、265.73、96.45。太原地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：2.27、2.16、162.29、71.60。都兰地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：9.22、6.56、440.22、47.73。原平地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：2.18、1.82、231.73、106.41。介休地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：1.04、0.93、135.76、129.98。石家庄地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：1.73、1.55、107.77、62.39。大同、太原、原平和介休均在山西境内。

2、在75个样点台站中，有2个台站的能见度相对于该路径上其它台站较高，它们分别是：51628-阿克苏和52889-兰州。其平均能见度的大小（公里）依次为：5.85和5.60。

阿克苏属沙尘暴长暴区。该地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：11.54、9.32、652.95、56.57。

兰州属沙尘暴中暴区。兰州地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：4.92、4.53、131.67、26.77。

3、该路径上也有一些属于沙尘暴特长暴区，但其均值能见度并不小于1公里的气象台站，如吉兰泰（53502）、鄂托克（53529）、东胜（53543）、盐池（53723）、同心（53810）、铁干里克（51765）、若羌（51777）、和田（51828）、安德河（51848）、且末（51855）。这些地区年平均发生沙尘暴的次数依次为：23.95、15.51、16.31、25.80、19.05、10.64、21.40、35.82、27.38、27.74。这些地区每次平均能见度的大小（公里）分别为：2.70、1.98、2.85、1.31、2.03、1.37、1.32、1.55、1.63、1.03。几乎每次西北路径上发生沙尘天气时，这些地区均有沙尘天气发生。其发生强度主要与冷空气活动状况有关，当然地表植被状况及地表干湿状况在一定程度上也减轻空气中沙尘的含量。

4、西北路径上其它站点每次平均能见度的大小均在1-5公里之间。

总之，西北路径上发生沙尘天气时，各主要台站的能见度的变化可概括为如下：51839、53646、53463、53420、53487、53915、53772、52836、54218、52943、53673、53863、53698能见度较小，即沙尘强度较大，每次平均能见度小于1公里；53502、53529、53543、53723-、53810、51765、51777、51828、51848、51855发生沙尘天气的频率较高，每次平均能见度也较低，因此，在预报有沙尘天气发生时，应给予足够重视，可以根据各台站之间能见度的相对高低来推断沙尘天气过

程中下风方向的台站可能出现的沙尘强度。

### 7.3.3 偏北路径上主要台站沙尘暴强度分析

按照偏北路径上受影响地区的范围划分,对偏北路径上有记录的主要台站的1980-2001年3-5月份的扬沙或沙尘暴天气过程进行统计,计算各站点每次平均能见度的大小,计算结果见图7-3。

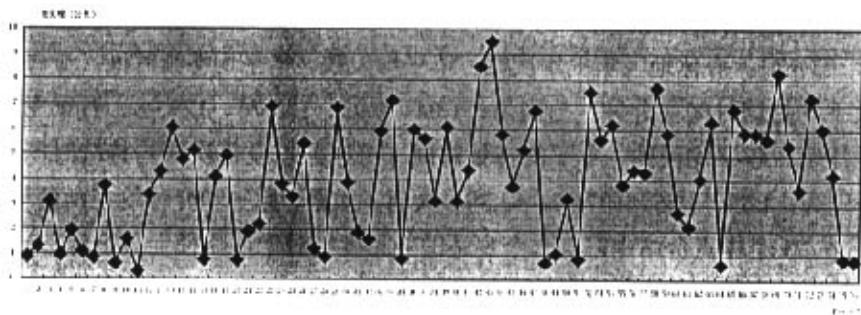


图 7-3 偏北路径上主要台站沙尘暴强度分布图

从图3中可以看出,偏北路径上总共选取了76个台站作为预报样点,各台站的平均能见度均在0-10公里之间。

1、在76个样点台站中,共有14个台站每次平均能见度小于1公里。它们分别是:二连浩特(53068)、苏尼特左旗(53195)、锡林浩特(54102)、翁牛特旗(54213)、前郭尔罗斯(50949)、化德(53391)、伊金霍洛旗(53545)、东乌珠穆沁旗(50915)、扎鲁特旗(54026)、拐子湖(52378)、阿拉善左旗(53602)、海力素(53231)、海拉尔(50527)和景泰(52797)。伊金霍洛旗、拐子湖、海力素、景泰属沙尘暴特长暴区。其中,偏北路径或偏西路径上发生沙尘天气发生时,伊金霍洛旗地区都受其影响,并且每次平均能见度均小于1公里。拐子湖、海力素和景泰地区均位于沙漠边缘或周围地区,因此沙尘强度比较大。二连浩特、苏尼特左旗、化德属沙尘暴长暴区。二连浩特地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:11.00、8.05、1046.75、95.18。苏尼特左旗地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:8.84、6.14、669.72、75.78。化德地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间(分钟)以及每次平均持续时间(分钟)分别为:8.28、6.53、1161.78、140.35。二连浩特和苏尼特左旗地区几乎全被天然草地覆盖,有很少的改良草地,这些地区的草地破坏程度轻。但是其位于边境地区,因此,其发生次数多、沙尘强度大的主要原因是境外源地发生沙尘天气进而影响到我国部分地区。化德地区天然草场大部分被开垦为旱地,年降水量少,裸露地

表干燥，易被风吹起。而且，其北部距离浑善达克沙地不远，沙地周围的草场退化严重，沙地面积扩张，为沙尘天气提供了充分的物质源。

锡林浩特、前郭尔罗斯、东乌珠穆沁旗、扎鲁特旗属沙尘暴中暴区。锡林浩特地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：7.57、5.08、485.78、64.17。前郭尔罗斯地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：0.82、0.78、100.32、82.51。东乌珠穆沁旗地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：6.60、4.37、273.40、41.39。扎鲁特旗地区年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：5.18、3.23、150.95、29.12。这些地区的沙尘天气都与草原沙化、草场退化、草原生态环境的恶化息息相关。

海拉尔属沙尘暴短暴区。其年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：1.23、0.98、56.00、45.55。海拉尔位于呼伦贝尔大草原上，由于过度垦荒，在风力作用下，田间很快出现了风蚀现象，出现了流动沙丘，过去的呼伦贝尔草原就变成了呼伦贝尔沙地，如今成为沙漠化最严重的地方。因此，为沙尘暴天气的发生提供了丰富的沙源。

2、在76个样点台站中，有3个台站每次平均能见度较高，均超过8公里。它们分别是：朝阳（54324）、沈阳（54342）、尚志（50968）。其平均能见度的大小（公里）依次为：8.50、10.00、8.25。

朝阳和沈阳属沙尘暴中暴区。朝阳年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：1.95、1.55、162.17、83.04。沈阳年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：1.08、0.96、70.90、65.55。

尚志属沙尘暴短暴区。尚志年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：0.35、0.30、48.23、139.56。

3、通过对54511-北京台站的资料统计表明，北京地区属于沙尘暴中暴区，其年平均次数、年平均天数、年平均持续时间（分钟）以及每次平均持续时间（分钟）分别为：3.17、2.56、136.25、43.03，每次平均能见度为6.86公里。因此，北京地区沙尘天气以扬沙为主。关于北京地区的沙尘源，目前比较一致的看法是，位于内蒙古和河北面积大约25万平方公里的退化草场和撂荒耕地以及大环境的恶化是北京地区进入沙尘暴频发期的主要原因。

4、偏北路径上其它站点每次平均能见度的大小均在1-8公里之间。

总之，偏北路径上发生沙尘天气时，各主要台站的能见度的变化可概括为如下：53068、53195、54102、54213、50949、53391、53545、50915、54026、52378、

53602、53231、50527、52797, 每次平均能见度小于 1 公里; 54324、54342 和 50968 台站每次平均能见度均在 8-10 公里之间; 53362-四子王旗发生沙尘天气的频率较高, 年平均次数 12.21 次, 每次平均能见度 4.10 公里。

分析结果可概括如下:

1. 偏西路径上发生沙尘天气时, 各主要台站的能见度的变化可概括为如下: 民勤、榆林、伊金霍洛旗、阿拉善左旗、刚察、翁牛特旗、玛多、赤峰能见度较小, 每次平均能见度小于 1 公里; 中宁、呼和浩特和新民每次平均能见度均在 7-10 公里之间; 敦煌、安西、巴彦毛道、包头、巴楚、柯坪、莎车和皮山每次平均能见度在 1-7 公里之间, 但是这些地区发生沙尘天气的次数较多, 属于沙尘暴特长暴区。

2. 西北路径上发生沙尘天气时, 各主要台站的能见度的变化可概括为如下: 民丰、榆林、呼和浩特、杭锦后旗、大同、平凉、太原、都兰、赤峰、兴海、原平、介休、石家庄能见度较小, 每次平均能见度小于 1 公里; 阿克苏和兰州每次平均能见度高于该路径上其他台站, 分别是: 5.85 和 5.60 公里; 吉兰泰、鄂托克、东胜、盐池、同心、铁干里克、若羌、和田、安德河、且末发生沙尘天气的频率较高, 属于沙尘暴特长暴区, 每次平均能见度均在 1-5 公里之间。

3. 偏北路径上发生沙尘天气时, 各主要台站的能见度的变化可概括为如下: 二连浩特、苏尼特左旗、锡林浩特、翁牛特旗、前郭尔罗斯、化德、伊金霍洛旗、东乌珠穆沁旗、扎鲁特旗、拐子湖、阿拉善左旗、海力素、海拉尔、景泰, 每次平均能见度小于 1 公里; 朝阳、沈阳、尚志每次平均能见度均在 8-10 公里之间; 四子王旗发生沙尘天气的频率较高, 属于沙尘暴特长暴区, 年平均次数 12.21 次, 每次平均能见度 4.10 公里。

4. 通过对各主要台站沙尘源地的分析, 可以看出, 沙尘天气途径地带地表裸露状况影响着本地沙尘的降尘和就地起沙问题, 是沙尘强度的关键影响因素。其中农牧交错带草场退化和撂荒耕地现象是沙尘天气加强的主要原因, 偏北路径上受影响台站最为明显。因此, 科学的还林还草, 大范围的恢复自然植被, 从根本上改善地表植被状况, 将会减轻和防止沙尘天气所造成的严重危害。

#### 7.4. 本章小结

沙尘天气是多种因素综合作用的结果, 既有自然因素在起作用, 人类活动的影响也是不容忽视的重要诱因。我国北方春季沙尘天气是特殊的地理环境和气象条件所致的自然现象。本章通过对我国北方地区近 20 年来沙尘天气过程统计, 计算出我国境内沙尘天气的三条主要传输路径上各主要受影响台站每次平均能见度的大小, 并分析其沙尘源。

## 第八章 沙尘暴监测与预警网络系统研建

Internet/Intranet 技术的迅猛发展,使得政府部门、研究机构等开展业务的方式、交流手段与服务手段进行了变革。网络条件下信息的反应快速、及时为灾害监测、实时预报预警等提供了一条极其便利的途径。

### 8.1 建设目标

沙尘暴监测预警系统网络建设的主要目标是:

- 1、立包括土壤、气象、基础地理、遥感影像、相关专题、调查统计等数据的沙尘暴基础网络数据库,为沙尘暴监测和预警提供充足、实时的数据源。
- 2、供多源网络数据库的空间和非空间查询。建立相关数据的实时、自动更新机制,实现网络数据库的及时更新和安全管理。
- 3、提供沙尘暴监测、预报、预警等方面的技术、资料等信息,及时发布沙尘暴监测和预报预警信息。

### 8.2 网络系统建设概述

沙尘暴监测预警系统网络建设是在充分利用现有资源的基础上保证系统的性能稳定,功能强大,全面满足系统需求。

#### 8.2.1 网络结构

网络采用典型的多种模式,包括客户机/服务器 (C/S)、浏览器/服务器 (B/S) 等。系统的运行采用多层结构,用户可以利用浏览器访问本网站,通过服务器程序/应用服务器访问后端数据库,也可以通过客户程序直接操作数据库。系统采用分布式管理,网络服务和数据分布在不同的服务端,分布式数据库和分布式系统管理可以分流系统的服务开销,同时有利于系统的稳定、提高系统的运行效率,网络结构如图 8-1 所示。

#### 8.2.2 运行环境

运行环境建设包括保证整个网络系统运行的硬件设施条件,软件配置以及系统运行的局域网/广域网络运行建设。

##### 1、硬件环境

服务器硬件环境:

数据库服务器, SUN FIREBALL808 两台 (双 CPU, ULTRA SPARC 64 1G, 内存 8G, 硬盘 76\*4), 双备份。用于数据的存储管理, 数据的分析和处理等工作。

WEB 服务器, DELL 6400 一台 (四 CPU, 内存 4G, 硬盘 36\*4)。用于提供 WWW 服务、FTP 服务等。

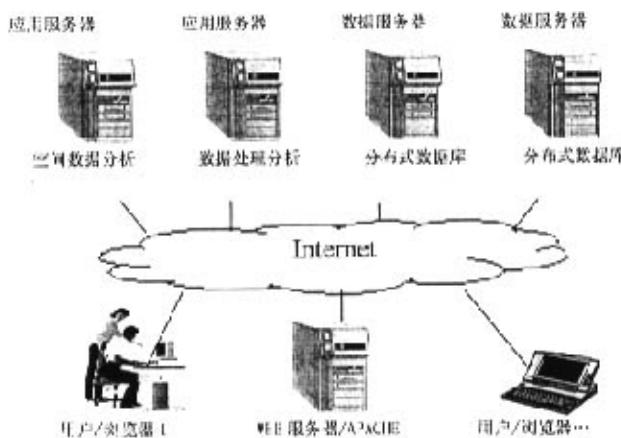


图 8-1 沙尘暴监测预警系统网络结构图

开发工作站：微机 PIV1.4（内存 512M, 120G 硬盘），负责网络和数据库程序开发，以及部分图形图像处理。

## 2、软件环境

网络运行操作系统使用性能稳定、功能强大的 SUN SOLARIS 8 和 WINDOWS2000 SERVER。数据库软件采用大型网络数据库 ORACLE9.2，分布式数据存储，以保证系统数据的海量存储、数据的高速访问和安全。网络开发环境基于 WINDOWS2000 系统，开发工具软件为：JDK（JAVA 开发工具），PDK 等。矢量数据处理和发布软件为 GEOMEDIA PROFESSIONAL 4, GEOMEDIA WEBMAP4。

## 3、网络环境

系统内部建立了 100/1000 兆局域网，在局网内部之间可以进行数据的批量转换、高速备份等，便于数据的快速网络管理；同时系统通过 4M 带宽和 INTERNET 互联。因此，该系统的网络环境保证系统的多种模式运行和多层运行结构。

### 8.2.2.4 数据传输

系统将国家卫星气象中心信息网、中国林科网、国际气象网作为数据节点，以进行监测数据、遥感数据、气象数据和地面数据的交流和传输，以到达数据和结果的充分共享，实时数据自动更新功能。

系统与其节点通过国际互联网 INTERNET 进行连接，利用 TCP/IP 通信协议，自动查询和提取网络数据库中的数据，自动更新。

系统与节点带宽为 4M。

数据传输见图 8-2。

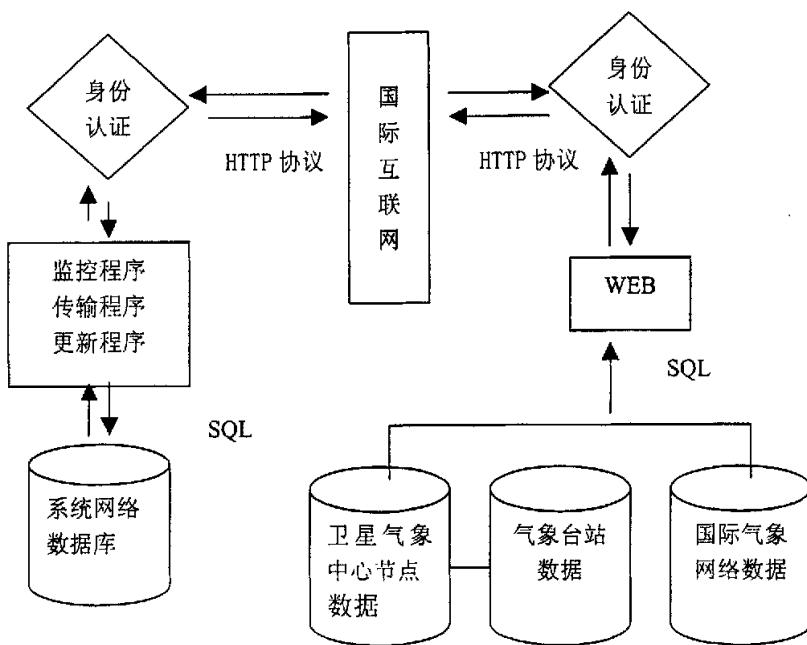


图 8-2 数据传输

### 8.2.3 网络数据库

#### 8.2.3.1 数据库范围和内容

沙尘暴研究地区数据主要包括十个省：北京、天津、河北、陕西、宁夏、甘肃、青海、内蒙、新疆、山西。沙尘暴监测和预警网络数据库包括的数据内容有：

1、气象数据

2、空间专题数据

森林分布图、地利用数据、土壤数据、气候类型分布图。比例尺：1：1000万。

3、基础地理数据（地形数据）

（1）数据源：中华人民共和国国家测绘局编制的中国1:25万地形图。

（2）数据源：中华人民共和国国家测绘局编制的中国1:100万地形图。

4、遥感数据

包括监测沙尘暴的NOAA数据和用来研究地面植被的TM数据等

（1）NOAA卫星AVHRR遥感影像图数据库。

（2）分县TM遥感影像图数据库。

5、社会经济数据库

6、沙尘暴发生、影响及监测数据

包括：尘暴监测数据、沙尘暴监测技术数据、沙尘暴历史数据、沙尘暴资料数据、新闻数据、沙尘暴科普知识数据。

### 8.2.3.2 数据分类和组织

根据沙尘暴研究的特点和数据管理的便利, 将沙尘暴网络数据库分为基础数据、监测预警数据、相关技术数据和沙尘暴资料数据四类。

其中: 基础数据包括用于研究沙尘暴监测预警的相关因子数据, 包括研究土壤、植被、地形、气象等因子的数据。监测预警数据包括各种监测预警的报告、监测图等数据。相关技术数据包括各种监测预警相关的方法、手段、技术等数据。沙尘暴资料数据包括各种历史数据、科普数据和各种统计数据等。

按照数据的空间属性, 沙尘暴网络数据可以分为空间数据和非空间数据, 空间数据包括土地利用数据、土壤数据、地形数据、遥感影像数据等; 其它属于没有空间属性的非空间数据。由于空间数据和非空间数据的管理、存储、显示、处理和查询存在较大的差别, 因此在数据分类时将其分开, 但是由于数据的查询和处理时设计到多维和多源数据的综合分析和查询, 因此数据的组织必须考虑两类数据的关系。数据分类图如图 8-3。

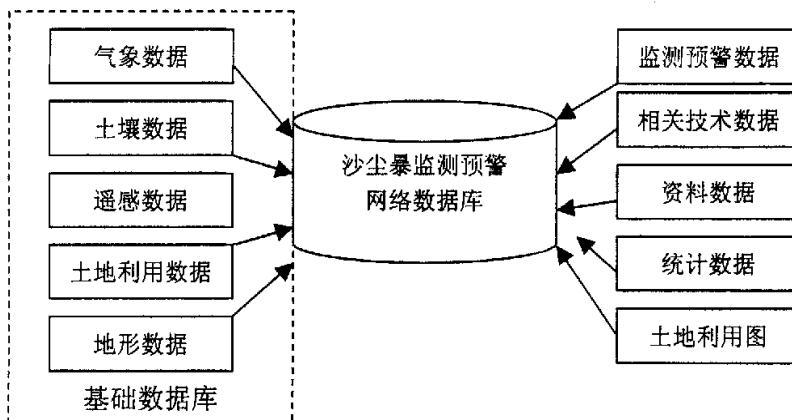


图 8-3 沙尘暴监测预警网络数据分类

### 8.2.3.3 数据命名和编码

在数据分类和组织的基础上进行数据的命名和编码工作, 设计数据模型, 从而建立沙尘暴监测预警网络数据库。

(1) 命名和编码原则, 遵循:

- 唯一性: 所有的数据库、数据集和数据表均有唯一名称, 互相不重复。
- 明确性: 由任一表名即可确定此数据表所属的数据集和数据库, 由任一数据集名可确定其所属的数据库。
- 简练性: 名称尽量简练。
- 扩展性: 数据库、数据集和数据表名满足数据库扩充的需要, 留有可扩展的余地。

分级性：命名原则反映数据库、数据集、数据表的分级层次。

## (2) 数据表命名

数据表名长度不限；

前两位为数据分类缩写；

从第四位开始为字母、数字“0”-“9”或下划线组成。见图 8-4 所示。

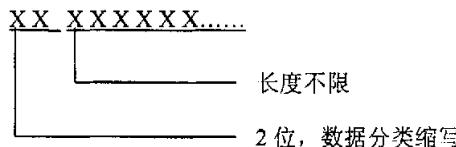


图 8-4 数据表的命名原则

## (3) 字段编码定义：

字段编码由 1-20 位字母、数字“0”-“9”或下划线组成，无空格。同一表内不同数据项的前 8 位字符不重复。

### 8.2.3.4 网络数据库建立

#### 1、质量控制

在进行网络数据库建立前，对数据进行一致性检查，包括：数据使用的单位、数据表示方法、数据的分类和编码、数据的地理范围和地理位置、数据内容的一致性，以此保证数据的逻辑关系的一致性。同时对数据表或数据集中的数据内容、范围、位置的完整性，地理特征属性的完整性等进行检查。

#### 2、格式/坐标投影转换

规定入库前的数据格式为：

遥感影像数据：1B (NOAA), ERDAS IMG (TM)

矢量数据：ARCINFO (Coverage,shapefile)

图像数据：JPG, GIF, GEOTIF (空间图像)

属性数据：ACCESS MDB、文本型

空间数据空间参考信息转换为：

大地基准为 1954 北京坐标系，高程基准为 1956 黄海高程系，投影方式采用双标准纬线等角割圆锥投影，参考椭球体系采用克拉索夫斯基椭球体 (1940)。

#### 3、数据转入

将属性数据、矢量数据，通过 Intergraph Geomedia 4 professional 导入 ORACLE9I 网络数据库，影像和图像数据建立栅格索引表。

### 8.3 网络功能设计

#### 8.3.1 网络系统功能设计

图 8-5 为网络系统在整个沙尘暴监测和预警系统中与其他系统的关系及其功能结构图。

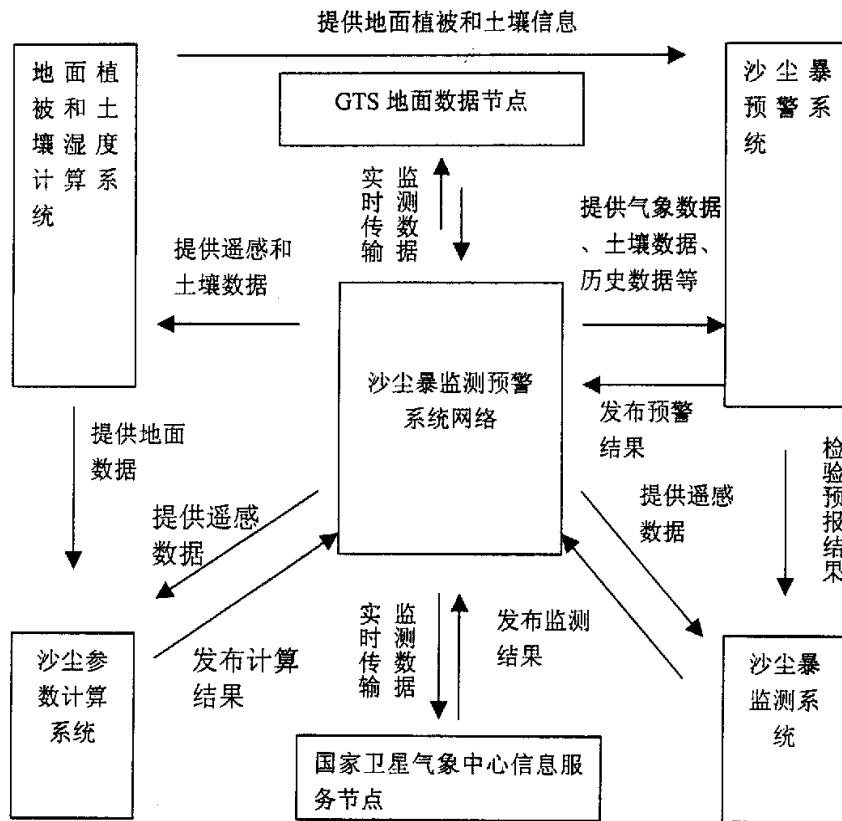


图 8-5 沙尘暴监测预警网络功能设计

### 8.3.2 信息发布

- 1、各种沙尘暴相关动态新闻的网络实时发布;
- 2、各种沙尘暴监测预警数据的网络实时发布;
- 3、各种沙尘暴相关的气象数据的网络实时发布;
- 4、各种沙尘暴空间信息（矢量数据和栅格数据）的查询发布。

网络信息发布采用三层网络机构，浏览器，应用服务器和数据库服务器的相互操作和交互。

### 8.3.3 数据集成和综合查询

#### 1、数据集成

数据的集成通过建立多维数据立方体来实现，将沙尘暴监测预警数据库中的空间数据和非空间数据统一存储在 ORACLE 数据库中，围绕沙尘暴监测预警主题，定义数据表之间的关系，设计数据模型，实现在 ORACLE 数据库中根据一点、一面、或一地区可以同时提取相关的土地利用、气象、土壤、地形、监测预警技术、文档和相关统计数据。从而，数据的集成做到了：第一，多数据源的集成，多源数据的统一格式、单位、质量和统一存储；第二，数据的使用集成，数据的综合查

询、提取和多维数据立方体的实现。数据的集成见图 8-6。

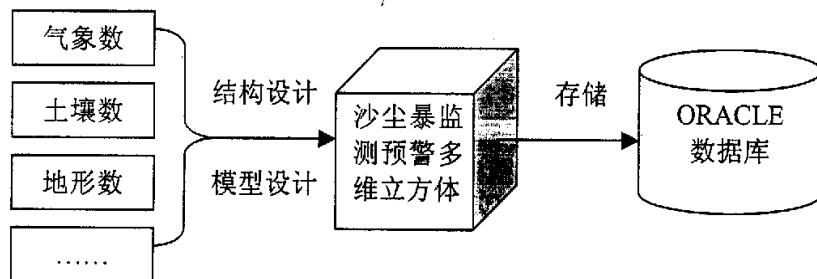


图 8-6 沙尘暴监测预警数据集成

## 2、综合查询

在沙尘暴监测预警网络系统中，用户可以通过浏览器，或通过客户端软件对存储在 ORACLE 中的多维数据进行各种查询和检索，包括：

多条件查询：对数据库中的数据进行多条件选择进行检索。

模糊查询：多数据库中的数据进行关键字查询。

空间和属性综合查询：实现图查属性和属性查图，将空间数据和非空间进行综合分析，综合查询。

综合查询通过开发客户端程序，访问 ORACLE 的 DBI 或 ADO，达到快速检索和返回结果的功能。综合查询见图 8-7。

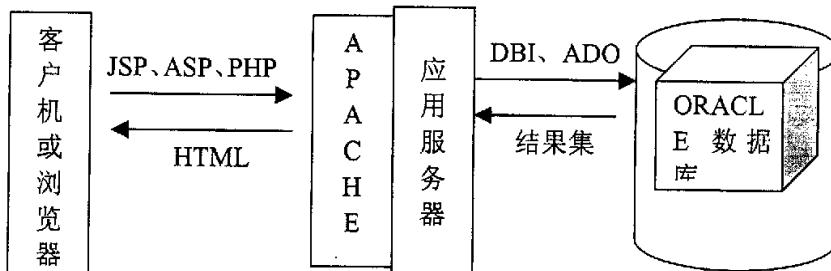


图 8-7 沙尘暴监测预警数据综合查询

### 8.3.4 动态数据更新

动态数据更新，主要是动态新闻的数据更新和气象站点数据的实时更新，该系统建立了气象站点数据的自动接受、自动更新机制，保证气象站点数据每天进行自动实时更新。动态数据更新见图 8。

通过 INTERNET 进行实时传输，实时数据进入系统和节点的网络数据库，程序自动进行实时查询和复制数据。传输协议为 HTTP (TCP/IP) 协议，传输带宽为 4M。

首先系统启动气象站点数据监控程序，监控全球电信系统 (GTS) 中数据的更

新情况；当发现新的数据更新时，启动数据获取程序，将新数据下载到本机。

系统对下载的新数据进行检查和校验，如果数据合格，启动数据更新程序，数据更新程序将存储在 ORACLE 气象数据库的数据进行自动更新。系统重新进行气象站点数据监控程序，以此循环，完成数据自动更新。

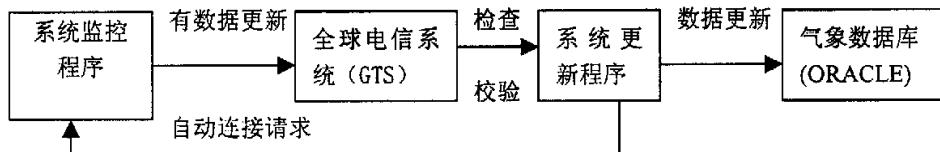


图 8-8 气象站点数据自动更新示意图

### 8.3.5 监测数据的实时传输

沙尘暴监测预警网络系统和国家卫星气象中心信息服务中心节点进行监测数据和常规地面数据的交换和实时传输。传输方式为通过 INTERNET 进行实时传输，实时数据进入系统和节点的网络数据库，程序自动进行实时查询和复制数据；传输协议为 HTTP (TCP/IP) 协议；传输带宽为 4M。数据实时传输见图 8-9。

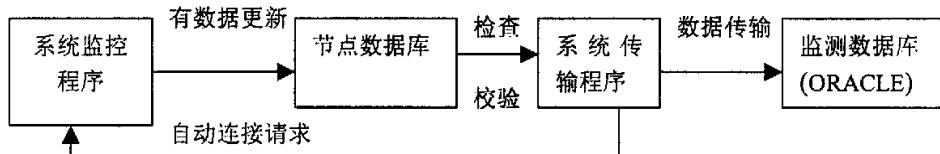


图 8-9 监测数据的实时传输示意图

首先系统启动节点数据监控程序，监控节点中数据的更新情况；当发现新的数据更新时，启动数据获取程序，将新数据下载到本机；系统对下载的新数据进行检查和校验，如果数据合格，启动数据传输程序，数据传输程序将存储在 ORACLE 气象数据库的数据进行加载。系统重新进行数据监控程序，以此循环，完成数据实时传输。

### 8.3.6 网络管理

#### 8.3.6.1 安全管理

1、病毒防治：限制和管理服务器的 FTP 上传功能；数据装载时彻底检查是否带毒；配备杀毒软件进行定期查毒。

2、络安全性保护：设置和管理管理人员的访问权限；设置和管理数据访问/维护帐号和权限；严格管理 TELNET 远程登陆的帐号和权限；防火墙设置。

3、系统故障和数据安全：系统日志管理；记录系统的登陆和操作日志；系统提示，通知和警告信息。系统数据安全恢复；参考系统日志，对系统的的误操作和故障进行安全恢复；对破坏的信息进行修复；数据的定期备份、数据的批量

转出储存等措施进行系统数据安全的管理。

### 8.3.6.2 数据管理

设置系统和数据的操作及访问权限，对数据进行更新；规定数据的使用权限、所属权限和使用协议，对数据进行按照使用用户进行管理。

## 8.4. 网络实现与运行

### 8.4.1 网络互联

可以通过进入 <http://www.digitalforestry.cn/duststorm/> 访问沙尘暴监测预警系统网络，同时可以以管理员身份登陆进行系统的管理和数据的更新、维护等工作。

### 8.4.2 程序开发

数据查询检索程序使用 ASP (Active Server Pages) 进行开发，结合 GEOMEIDA WEBMAP4 的 ACTIVEX 矢量数据查询。ASP 是微软公司为 Microsoft Internet Information Server (IIS) on Windows 服务器提供的一个服务器端的开发环境。它可以在 HTML 页面中嵌入 VBScript 或 JavaScript，从而为你的 Web 生成动态、交互的界面。另外，ASP 提供了 ODBC 接口，所以可以开发与数据库有关的 Internet/Intranet 应用。ODBC(Open Database Connectivity)提供了极大的互操作性，它使得一个应用可访问不同的数据库管理系统。由使得开发者可以针对某一类数据源进行开发，用户可以选择数据引擎，然后将应用连接到用户选择的数据库管理系统，如图 8-10。

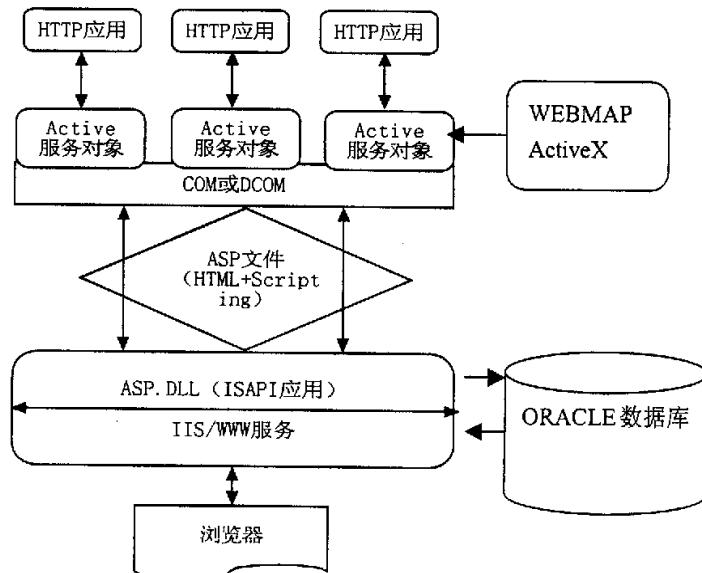


图 8-10 数据查询开发示意图

动态数据自动更新和监测数据的实时传输采用 UNIX 下 PDK 的开发，通过 HTTP 通信协议，进行远程数据的实时监控，对比分析，网络传输和自动更新，程序在 UNIX 启动时加入等待循环进程：等待、检查、传输和更新，见图 8-11。

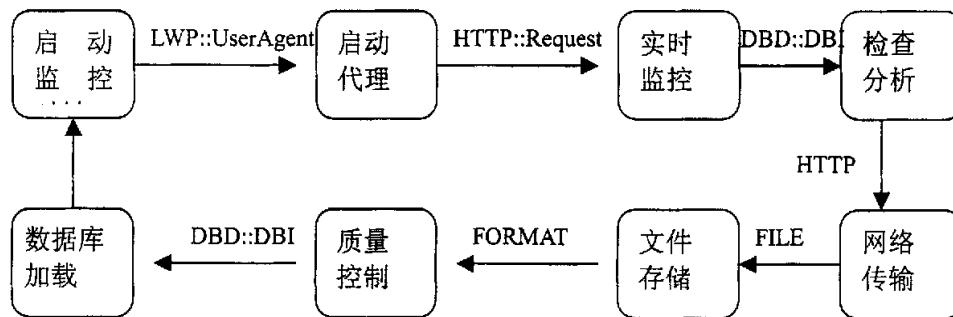


图 8-11 数据传输、自动更新示意图

#### 8.4.3 主页开发

沙尘暴监测预警系统网络主要栏目有：

- 1、基础数据：包括气象数据、土地利用图数据、土壤数据、地形数据和遥感数据等内容。见图 13-17。
- 2、监测预警：沙尘暴监测信息、天气信息风内容。包括 2001-2004 年沙尘暴监测预警数据、监测图件、路径分析等数据。
- 3、监测技术：常规监测、遥感监测、特种监测和沙尘预警等内容。包括国内外用于沙尘暴监测预警的各种手段、方法、技术文档数据，以各种文档格式提供下载服务，见图 8-18。
- 4、历史灾情：沙尘暴历史灾情、天气情况等内容。包括 1952 年至 1996 年我国西北地区强和特强沙尘暴个例谱、涉及沙尘暴灾害的地区、天气情况和灾害造成的损失、沙尘暴等级等数据。
- 5、沙尘综述：沙尘组成、沙尘发生、沙尘影响、沙尘监测和沙尘预报等研究资料。包括国内外关于沙尘暴现状、沙尘暴监测研究、沙尘暴灾情分析等与沙尘暴相关的论文、资料、报告等文档、图片、数据资料，见图 8-19。
- 6、沙尘新闻：沙尘暴监测、预报、影响、成因和沙尘暴防治等方面的新闻内容。实时更新沙尘暴发生、发展，沙尘暴灾情、沙尘暴治理、研究等最新现状，见图 8-20。
- 7、沙尘科普：包括沙尘天气知识、沙尘监测知识和沙尘暴监测方面的科普知识。



图 8-12 沙尘暴监测预警系统网络主页



图 8-13 沙尘暴监测预警气象数据查询



图 8-14 沙尘暴监测预警实时地面数据查询



图 8-15 沙尘暴研究地区土地利用图



图 8-16 沙尘暴研究地区土壤图数据

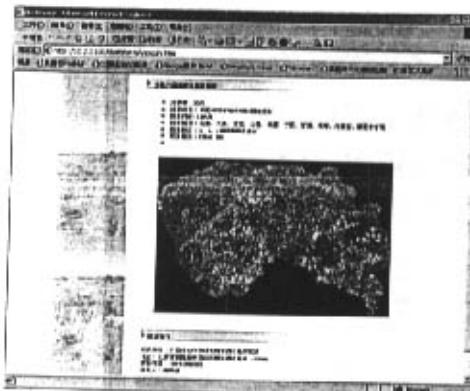


图 8-17 沙尘暴地区植被分析 TM 数据

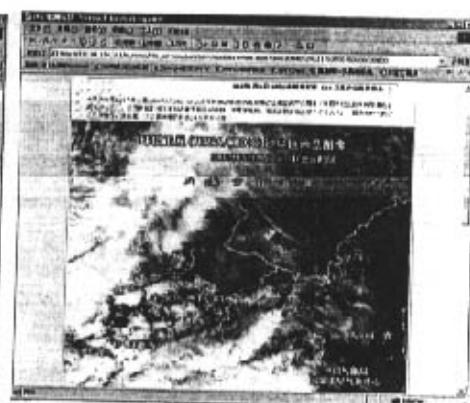


图 8-18 沙尘暴监测实时数据



图 8-19 沙尘暴资料综述查询



图 8-20 沙尘暴动态新闻查询

## 8.5 本章小结

沙尘暴作为一种季节性的灾害天气，近年来越来越受到人们的重视。而进行沙尘暴的监测、预报及防治，必须对其成因、传播、影响等研究需要对各种因素进行综合考虑、分析各种因素影响程度和因素之间的相互作用等。从而需要及时获取和分析与沙尘暴监测、预警相关的大量数据和资料，并且将沙尘暴的发生、发展和预报的结果进行快速发布和实时跟踪。因此，建立沙尘暴相关因子（气候、土壤、植被、调查、遥感影像、基础地理、统计等数据）网络数据库、为沙尘暴监测、预警提供信息查询、分析、发布、处理等服务，将充分利用互联网的信息资源的快速获取、传输，实时更新等优点，大大提高沙尘暴监测和预警的工作效率。

## 第九章 应用与分析

利用地面观测资料，配合地理信息系统对沙尘影响面积进行了定量计算；利用卫星监测结果，分析了2004年沙尘天气分布特征；在2004年3—4月开展了沙尘预警系统试报工作，并利用卫星对2003与2004年沙尘暴过程进行了全面监测。对沙尘暴监测的精度进行了检验。

### 9.1 2003年春季沙尘天气监测结果

#### 9.1.1 2003年春季（3—5月）沙尘天气监测概况

2003年3—5月，气象卫星监测到27次沙尘天气。其中，三月份出现的沙尘天气没有达到扬沙或沙尘暴天气过程标准，四月份有4次达到了扬沙或沙尘暴标准（4月8—11日沙尘暴天气；4月13—15日扬沙天气；4月15—17日沙尘暴天气；4月20—21日扬沙天气），五月份有3次达到扬沙天气（5月1—2日扬沙天气；5月2—5日扬沙天气；5月6—7日扬沙天气）。其中，4月8日—11日沙尘暴过程是今年春天强度最强，范围最广的一次，至少使近3000万人口、430万公顷耕地及5900多万亩草地受影响。

2003年春季沙尘天气重要出现在西北、华北北部和西部、东北西部以及青藏高原等地、北京没有一次明显的沙尘天气出现。

表9-1：2003年沙尘暴遥感监测结果检验

日期	沙尘报告站点总数	云覆盖数	识别数	未识别数	沙尘暴报告总数	云覆盖数	识别数	未识别数
2003.03.23	3	0	2	1	0	0	0	0
2003.04.08	9	6	1	2	3	1	1	1
2003.04.09	20	11	8	1	3	0	3	0
2003.04.10	33	8	19	6	4	2	2	0
2003.04.11	44	8	27	9	1	0	1	0
2003.04.14	25	9	2	14	2*	0	0	2*
合计	134	42	59	33	11	3	7	1
百分比		31.3%	44%	24.6%		27.3%	63.6%	9.9%
准确率(去掉云影响)			64%	35.9%			87.5%	12.5%

#### 9.1.2 2003年春季气象条件分析

2003年春季影响我国的沙尘范围与日数是2000年以来最少的，同时，强度也是偏弱的。3月份没有出现沙尘天气过程也是近年来没有过的，同时，3—5月北京没有一次沙尘天气过程出现，也是2000年以来少见的。原因主要有以下三个方面：

### 1、冷空气势力偏弱，大风天气少。

2003年春，影响我国的冷空气势力明显偏弱，尤其是易造成沙尘暴天气的蒙古气旋较前几年偏少，强度偏弱，冷空气势力明显偏弱，造成大风天气少，气候中心分析冬春以来北方地区平均风速只有2.47米/秒，是1951年以来最小的年份。又如，入春以来，华北大部地区大风扬沙天气明显少于往年，其中，达到5级以上大风日数比去年同期明显偏少，其中内蒙古中西部、山西西北部、河北北部、吉林与辽宁西北部偏少10-20天左右，而北京西部地区偏少10-10天，其他地区偏少1-10天左右。因此，2003年春季，由于入侵我国的冷空气次数少，强度弱，维持时间短，同时，3月下旬气温迅速升高，我国北方大部地区气温比常年同期偏高3—6℃，地表解冻后，植被很快返青，由于土壤墒情较好，使植被长势好，裸地少，也抑制了沙尘天气发生。故沙尘天气日数小，范围小，强度弱。

### 2、北方大部地区降水量偏多，抑制了沙尘天气的形成。

2002年12月至2003年5月上旬，北方地区出现了多次雨雪天气过程，降水量较常年明显偏多，其中华北大部、内蒙古中部和西部、甘肃西部和中部、宁夏大部、陕西北部及南疆大部地区偏多5成—2倍以上。分析北方沙源地区历年冬春降水量变化，表明：内蒙古中西部、新疆、甘肃、宁夏地区冬春降水量（上一年12月~下一年4月）多年平均值为26.7毫米，去冬今春（2002年12月—2003年4月）降水量达到42.2毫米，较常年偏多15.5毫米，继19990年（1989年12月至1990年4月）、1964（1963年12月—1964年4月）之后，在历年同期降水量中居第3位。

内蒙古是东北、华北中南部及其以南地区出现沙尘天气的重要路径和沙源地之一。2002年12月和2003年1月，内蒙古地区均出现了大面积降雪，尤其是内蒙古中部地区累计降雪量与降雪持续时间大都创历史同期最高记录。2—3月份，内蒙古又相继出现了多次较明显的降雪或雨夹雪天气过程，中部地区降雪次数之多，降雪量之大是历史同期罕见的，这对于一向干旱的内蒙古来说实在是难得的。降雪结束后，地表被积雪覆盖，部分地区最大积雪深度达28厘米。而在2002年度同期，内蒙古中西部仅有少部分地区出现了积雪覆盖。遥感监测分析表明，2003年3月份内蒙古中部和蒙古国南部的积雪覆盖范围较沙尘多发的2001年明显偏多。又如：北京去冬今春的雨雪是近5年最多的一年，今年3月份降水量为33毫米，4月份为13毫米；5月份有些地区高达60—70毫米。遥感监测的北方地区的地表土壤湿度指数表明，内蒙古中部地区、山西、陕西和河北2003年4月土壤湿度指数比去年同期偏大，可见2003年沙源区的地表湿度明显好于2002年。

沙尘多发区长期被积雪覆盖不仅可以阻止沙尘天气的产生和保持土壤水分，而且雪水融化时可以直接补充土壤水分，改善土壤墒情，从而间接地抑制了沙尘天气的出现。

### 3、植被长势较好，部分沙源得到控制

2002 年, 由于北方降水好于前三年, 尤其是西北部分地区降水量较常年明显偏多 (偏多 3 成至 1 倍), 植被长势明显好于前几年。加之, 退耕还林、还草等生态工程的大力开展, 沙区植被明显增加。使部分沙源得到控制。

## 9.2 2004 年春季沙尘天气监测结果

### 9.2.1 沙尘天气监测概况:

2004 年 3—5 月, 每天对与沙尘天气有关的卫星轨道逐条进行了分析, 对出现的 17 次沙尘过程全部进行了监测。2004 年 1 月 1 日至今, 我国共出现 17 次沙尘天气过程, 其中 1 月未出现, 2 月出现 3 次, 3 月 7 次, 4 月 4 次, 5 月 3 次。这些过程中属强沙尘暴的 1 次 (3 月), 沙尘暴的 5 次, 扬沙的 11 次 (图 9-1)。

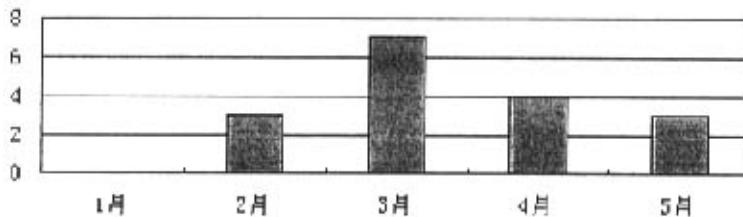


图 9-1: 2004 年逐月沙尘天气过程次数变化图

### 9.2.2 沙尘影响面积定量计算

2004 年度, 对每次主要沙尘过程均进行了影响面积的计算。图 1-1 是 3 月 29 日 14:24 (北京时) NOAA16 卫星监测沙尘过程图像。通过计算发现卫星监测到的沙尘面积约为 46.8 万平方公里, 其中, 林地 2.3 万平方公里, 耕地 13.4 万平方公里、草地 24.5 万平方公里。对各省影响面积如表 1 所示。

表 9-2: 沙尘暴影响各省的面积

省/自治区/直辖市	沙尘暴影响面积 (万平方公里)
陕西省	4.7
内蒙古自治区	25.0
山西省	8.1
河北省	6.8
北京市	1.1
宁夏回族自治区	0.2
天津市	0.9
辽宁省	0.04
总面积	46.8

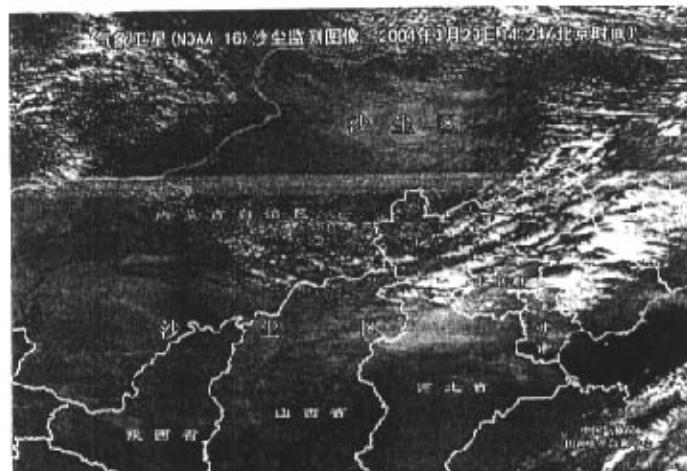


图 9-2: 气象卫星(NOAA-16)沙尘监测图像 2004 年 3 月 29 日 14:24(北京时间)

### 9.2.3 2004 年沙尘天气分布特征:

图 1-2 是气象卫星 2004 年 1 月 1 日至 5 月 10 日监测到的沙尘天气影响区域合成图。从图中可以分析出, 2004 年春季沙尘天气主要分布在东北地区南部、河套地区以及西北地区东部一带。另外, 从图上可以分析出从蒙古国南部进入我国的沙尘主要影响内蒙古北部与浑善达克沙地等地区。

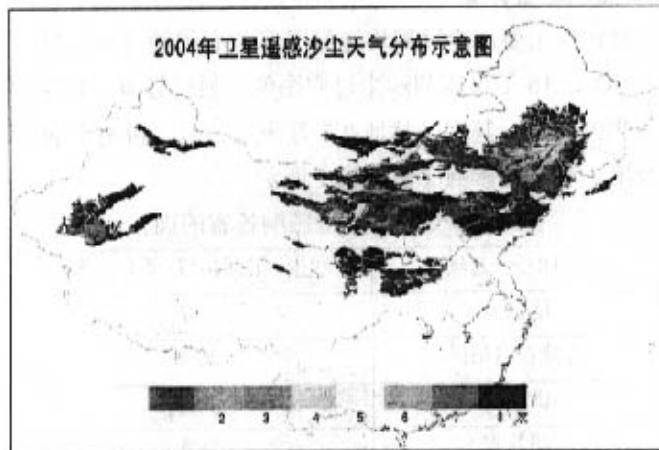


图 9-3 2004 年卫星遥感沙尘天气分布示意图

### 9.2.4 2004 年春季沙尘天气特点

1、沙尘天气过程次数明显多于去年同期, 与近 5 年平均次数大体相当:

2000 年以来, 我国北方春季共出现沙尘天气过程 67 次, 平均每年 13.4 次, 2004 年春季我国北方地区共出现 14 次沙尘天气过程, 接近近 5 年同期平均值 (表 9-3)。

表 9-3 2002—2004 年春季我国北方地区沙尘天气过程次数:

	3月	4月	5月	总计
2000 年	3	8	5	16
2001 年	7	8	3	18
2002 年	6	6	0	12
2003 年	0	4	3	7
2004 年	7	4	3*	14
总计	23	30	14	67
平均	4.6	6	2.8	13.4

## 2、沙尘暴和强沙尘暴过程次数低于近 5 年同期平均值

2004 年春季我国出现的沙尘暴和强沙尘暴过程共为 6 次，仅多于 2003 年，为 2000 年以来的次低值。近 5 年春季，沙尘暴和强沙尘暴过程发生次数最多的是 2001 年 (14 次)，其次为 2002 年 (11 次)，和 2000 年 (9 次)。

就沙尘天气过程的强度和范围而言，今年强度最强的 3 月 26~28 日的强沙尘暴过程还不及 2001 年 4 月 5~8 日和 4 月 7~10 日以及 2002 年 3 月 18~22 日的三次强沙尘暴天气过程。

## 3、沙尘天气出现日数明显低于常年同期值

2004 年春季，我国北方大部地区出现了沙尘天气，影响范围较广，但我国北方地区出现沙尘天气的平均日数较常年同期明显偏少，仅高于 1997 和 2003 年同期值 (图 9-4)。

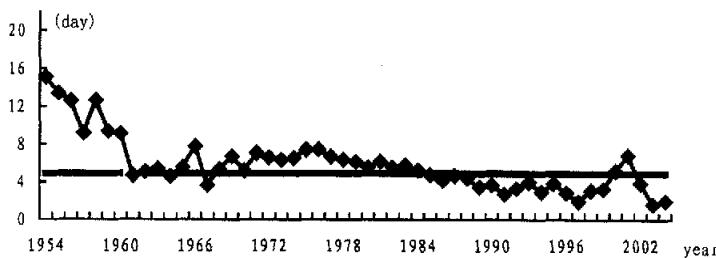


图 2-2 北方地区3月1日-5月18日平均沙尘日数历年变化图

## 4、3 月份沙尘天气过程明显偏多

2004 年 3 月份出现的沙尘天气过程次数明显偏多，共有 7 次，高于近 5 年 3 月份沙尘天气过程次数的平均值 (4.6 次)，与 2001 年同期持平；2002 年 (6 次) 次之；2003 年 3 月未出现沙尘天气过程。

### 9.2.5 2004 年春季主要沙尘过程和云图特征

9.2.5.1 2004 年我国主要沙尘天气过程，见表 9-4。

表 9-4: 2004 年我国主要沙尘天气过程纪要表

序号	起止时间	类型	扬沙和沙尘暴影响的范围	风力(级)
1	2月3日	扬沙	内蒙古西部、甘肃中部和宁夏北部地区出现扬沙,其中内蒙古的阿拉善右旗和甘肃的民勤出现了沙尘暴。	5-6 级
2	2月12--13日	扬沙	内蒙古西南部、甘肃中部、宁夏北部、陕西北部、山西西北部和东南部、河北南部、河南北部、山东中部等地出现扬沙。	5-7 级
3	2月23—24日	扬沙	内蒙古西部和中部、甘肃中部、宁夏北部等地区出现扬沙,其中内蒙古的海力素出现了强沙尘暴天气。	5-7 级 (局地 8-9 级)
4	3月2—3日	扬沙	青海东部、甘肃中部、内蒙古西部和宁夏北部的部分地区出现扬沙,其中甘肃的金昌、民勤,青海省的都兰、贵南、泽库等地出现沙尘暴。	5-7 级 (局地 8 级)
5	3月4日	扬沙	甘肃东部、内蒙古西部地区的东南部、宁夏大部、陕西北部地区出现扬沙,其中甘肃的武威、陕西的定边等地出现了沙尘暴。	6-7 级
6	3月9—11日	沙尘暴	南疆盆地东部、内蒙古中西部和东部偏南地区、甘肃西北部、青海西北部、宁夏北部等地以及辽吉两省的局部地区出现了沙尘暴,甘肃西北部和内蒙古的局部地区还出现了强沙尘暴。	5-7 级 (局地 8 级)
7	3月15—16日	扬沙	南疆盆地、甘肃的河西走廊、内蒙古中西部、宁夏、陕西北部、山西南部、河南西北部等地的部分地区出现了扬沙,南疆的局部地区还出现了沙尘暴。	5-6 级(局地 7-9 级)
8	3月26—28日	强沙尘暴	南疆盆地、青海西北部、甘肃西部、内蒙古中西部的部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。	5-7 级(局地 8 级)
9	3月28—30日	沙尘暴	内蒙古中西部、甘肃西部、陕西北部、山西北部的部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。	5-6 级(局地 7 级)
10	3月31日	扬沙	青海东部、内蒙古西部、宁夏、甘肃西部等地出现了扬沙,局部地区出现了沙尘暴。	4-6 级 (部分地区 7 级)
11	4月15日	扬沙	内蒙古东南部部分地区和辽宁大部出现了扬沙。	4-6 级
12	4月22日	扬沙	内蒙古东南部、辽宁西部、山西东南部、河南、湖北东北部等地出现扬沙天气。	5-6 级 (局地 7 级)
13	4月23—25日	沙尘暴	南疆盆地、甘肃西部、宁夏北部、内蒙古西部等地出现扬沙天气。其中南疆盆地的部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。	4-6 级 (局地 7 级)
14	4月28—29日	扬沙	南疆盆地、甘肃西部、宁夏、内蒙古西部和东部偏南地区、黑龙江西南部、吉林西部、辽宁西部等地出现扬沙天气。	5-6 级
15	5月5日	扬沙	内蒙古东部偏南地区和辽宁西部地区出现了扬沙,局部地区出现沙尘暴。	5-6 级(局地 7 级)
16	5月8日	沙尘暴	内蒙古东部偏南地区、吉林西部和黑龙江西南部的部分地区出现了沙尘暴,吉林西部的局部地区出现了强沙尘暴。	6-7 级(局部地区 8 级)

## 9.2.5.2 2004 年主要沙尘过程云图特征：

1、受锋后偏西大风影响，2004 年 2 月 23 日，蒙古国南部、内蒙古中部等地出现了沙尘天气，局地出现沙尘暴天气。图 9-5 为下午 14:20 分（北京时间）NOAA-16 气象卫星监测到的沙尘图像。中红色箭头所指处即为卫星监测到的沙尘覆盖区，面积大约为 6.5 万平方公里。对当地交通运输、人民生活造成了一定危害。

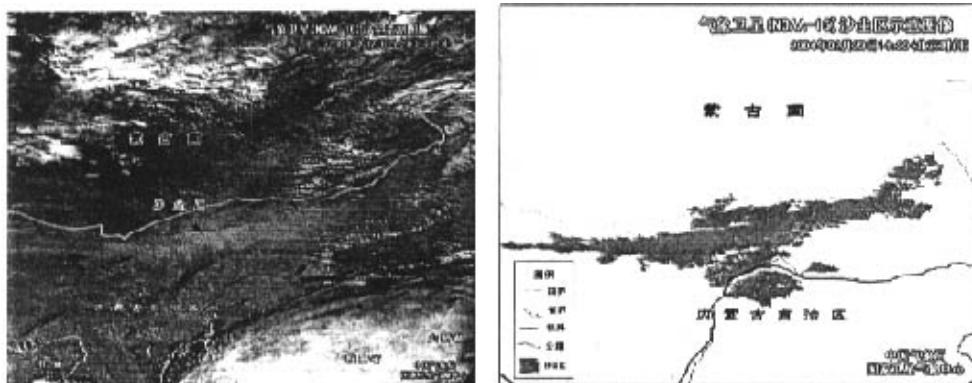


图 9-5、气象卫星（NOAA-16）沙尘监测图像（北京时 2004 年 2 月 23 日 14:20）

2、受蒙古气旋后部偏西大风影响，2 月 24 日在我国内蒙古自治区中西部、甘肃省中部等地出现了大范围的沙尘天气，部分地区出现沙尘暴。图 9-6 是气象卫星监测到的沙尘图像（图中箭头所指为沙尘区）和不同区域的放大图，图 9-7 为沙尘覆盖范围示意图，经估算沙尘区面积约为 12.6 万平方公里（见表 9-5）。

表 9-5：部分省、自治区卫星可视沙尘区面积

省份	沙尘区面积（平方公里）
甘肃省	27,275
河北省	484
内蒙古自治区	98,334
宁夏回族自治区	77
总面积	126,170

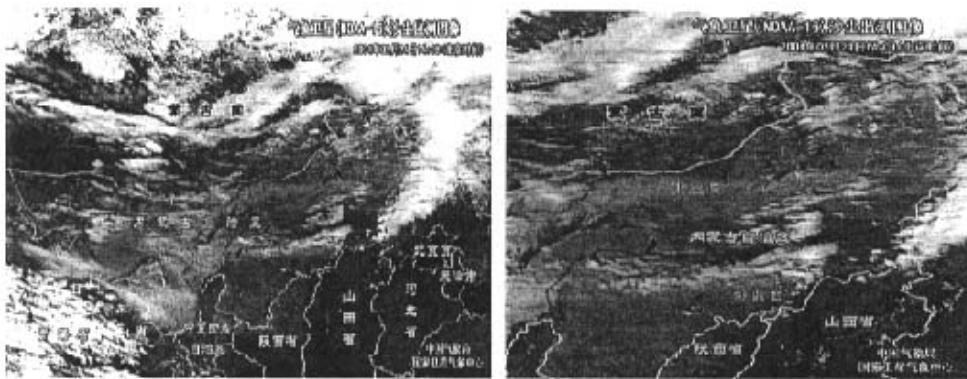


图 9-6：沙尘监测图像 2004 年 2 月 24 日 14 时（北京时间）

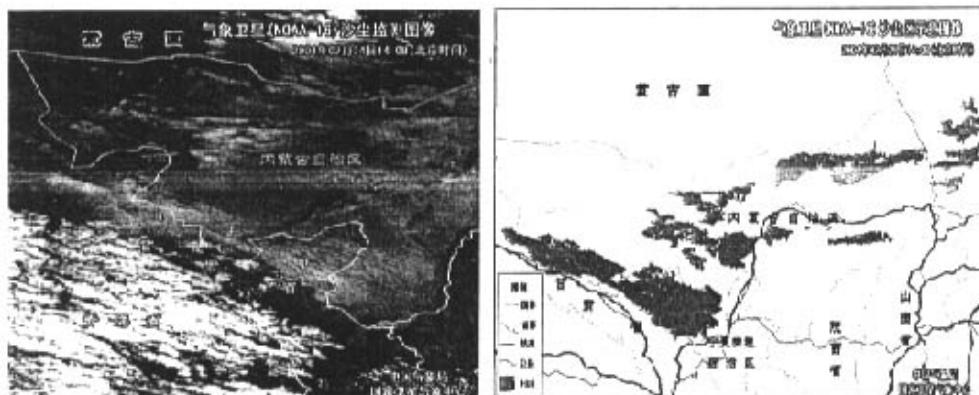


图 9-7: 沙尘区示意图 2004 年 2 月 24 日 14 时 (北京时间)

3、受冷锋后部偏北大风影响, 2004 年 3 月 4 日下午在我国内蒙西部、甘肃中部以及青海局地等地先后出现了不同程度的扬沙天气, 青海的兴海、甘肃的民勤、武威等地出现沙尘暴天气(图 9-8)。经估算沙尘区面积约为 4.4 万平方公里。

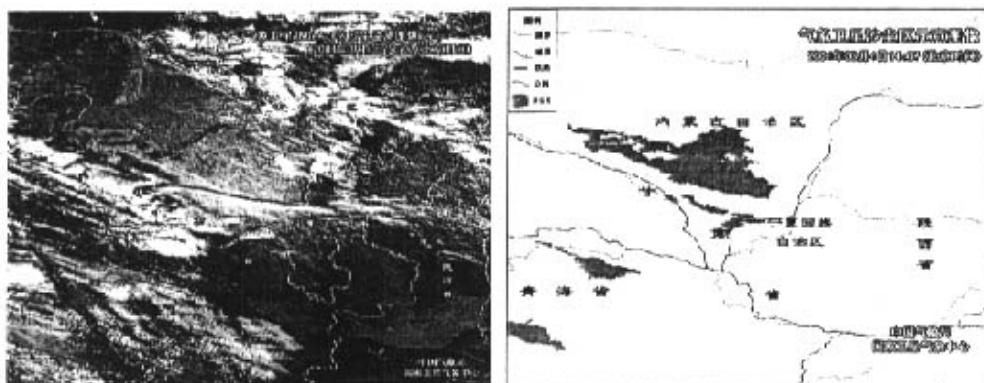


图 9-8: 沙尘监测图像 2004 年 3 月 4 日 14:07 (北京时间)

4、受偏西大风影响, 3 月 8 日下午在我国内蒙西部、甘肃中西部等地先后出现了不同程度的扬沙天气, 图中箭头所指区域为卫星观测到的沙尘区。图 9-9 为沙尘区示意图, 经估算沙尘区面积约为 1.4 万平方公里。

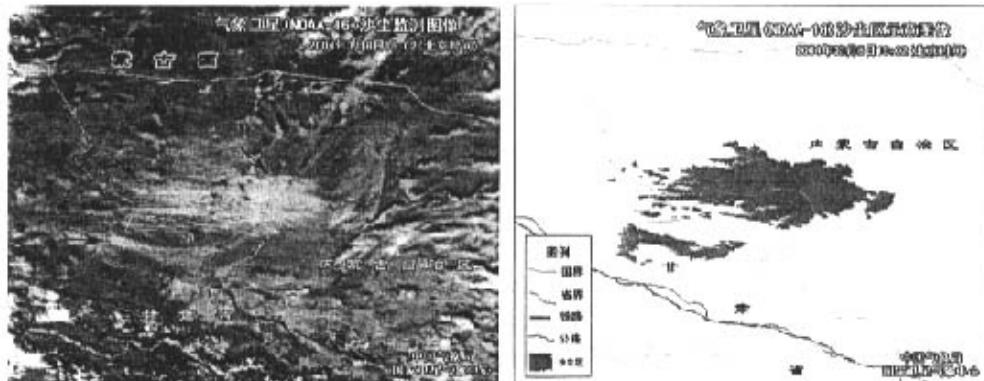


图 9-9: 沙尘监测图像 2004 年 3 月 8 日 15:02 (北京时间)

5、受东移的东北低压和锋面后部偏北大风影响,3月10日上午卫星监测到东北、内蒙古中南部、宁夏、甘肃东部、陕西南部、河南等地有扬沙或浮尘(图9-10),监测到的沙尘区域面积约30.4万平方公里。图3为上午8时监测到的东北地区的沙尘图像,图9-11为上午10时监测到的西北地区东部的沙尘图像,图9-12为下午监测到的东北地区沙尘图像。

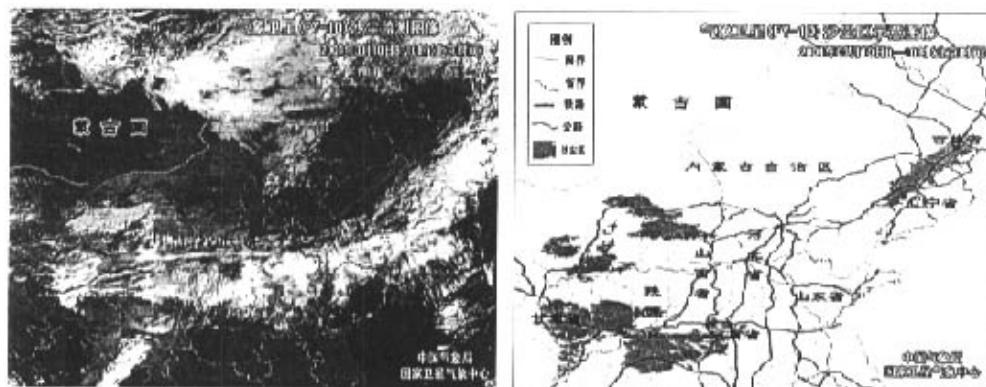


图9-10: 沙尘监测图像 2004年3月10日8-10时(北京时间)

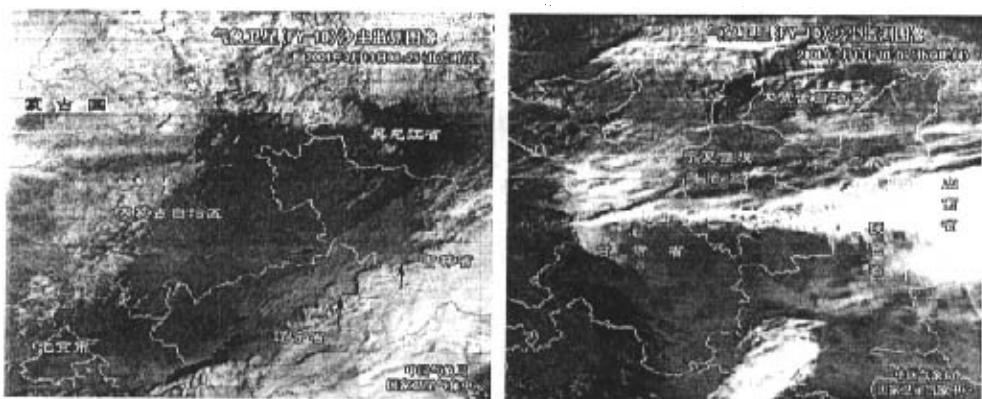


图9-11: 沙尘监测图像 2004年3月10日08:25和10日10:06(北京时间)

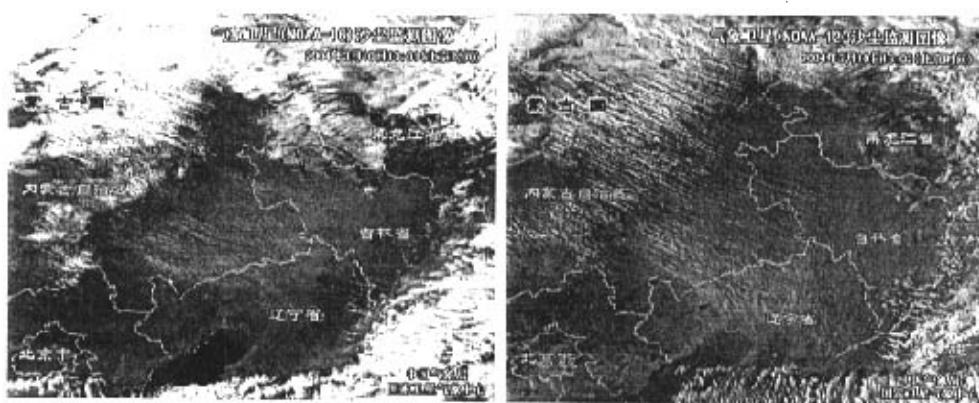


图9-12: 沙尘监测图像 2004年3月10日13:01和16:02(北京时间)

6、受蒙古气旋南侧偏西大风影响，3月27日内蒙古中部地区出现了大范围沙尘暴。图9-13是EOS卫星11:46（北京时间）的沙尘监测图像，图2是沙尘区域示意图，沙尘影响面积约4.9万平方公里。图9-14为EOS卫星13:13的沙尘暴监测图像，沙尘区域如图9-14所示，影响面积约为13.4万平方公里。图9-15为NOAA-16卫星14:47的沙尘监测图像，影响面积约9.8万平方公里。

通过卫星的连续监测，可见目前沙尘区随偏西大风继续向东部地区移动，并将影响山西北部、河北北部等地区。

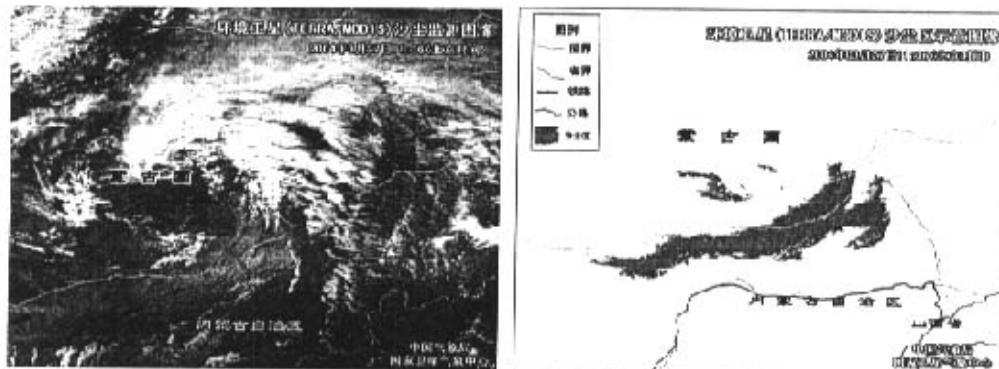


图9-13: 沙尘监测图像 2004年3月27日11:46时（北京时间）

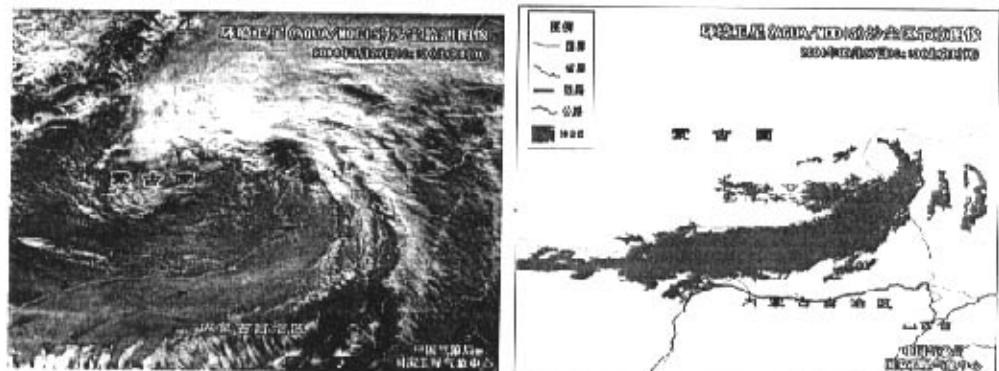


图9-14: 沙尘监测图像 2004年3月27日13:13时（北京时间）

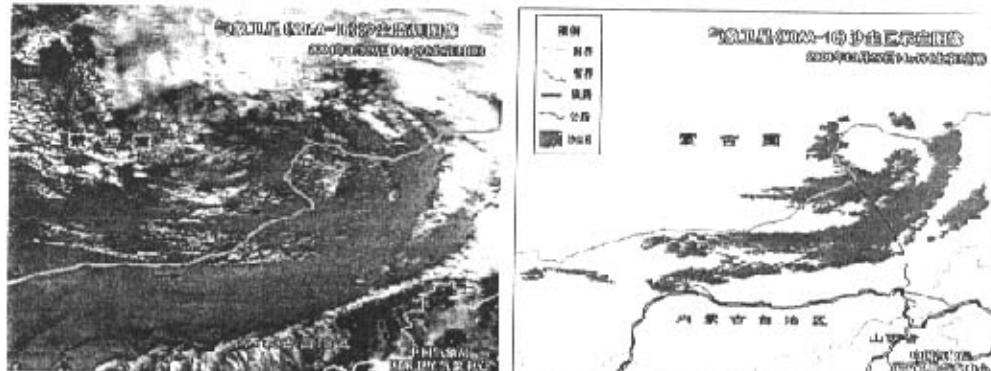


图9-15: 沙尘监测图像 2004年3月27日14:47时（北京时间）

7、受华北冷锋后部偏北大风的影响，3月29日我国西北地区东部、华北大部以及京津地区等地相继出现了大范围的扬沙和浮尘天气，局地出现了沙尘暴。利用NOAA-16卫星14:24的监测图像，经分析此次沙尘暴的总影响面积约为46.8万平方公里，其中林地2.3万平方公里、耕地13.4万平方公里、草地24.5万平方公里，对各省的影响面积如表9-6所示。利用气象卫星对此次沙尘暴的连续监测如图9-16、9-17所示。

表9-6：沙尘暴影响各省的面积估算

省/自治区/直辖市	沙尘区面积(万平方公里)
陕西省	4.7
内蒙古自治区	25.0
山西省	8.1
河北省	6.8
北京市	1.1
宁夏回族自治区	0.2
天津市	0.9
辽宁省	0.04
总面积	46.8

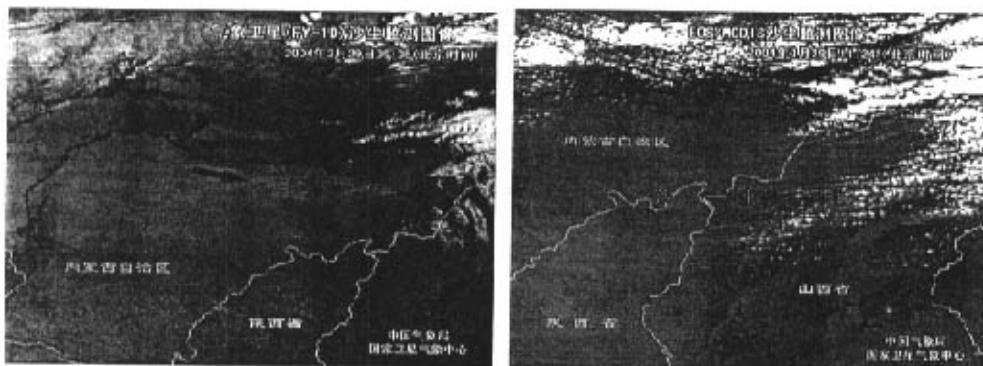


图9-16：气象卫星(FY-1D)沙尘监测图像 2004年3月29日09:05和11:24

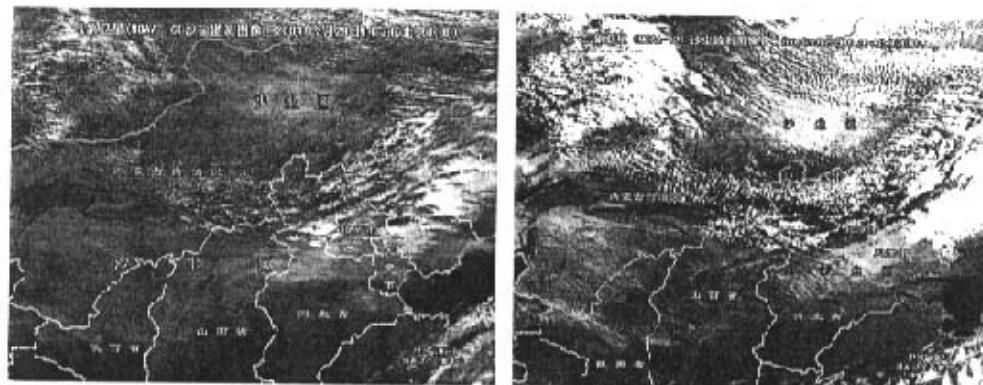


图9-17：EOS/MODIS沙尘监测图像 2004年3月29日14:24和16:36

8、受偏西大风影响，4月14日下午内蒙古西部和中部地区出现了扬沙天气，图9-18中箭头所指区域为卫星监测到的沙尘区。经估算，影响面积约为4万平方公里。

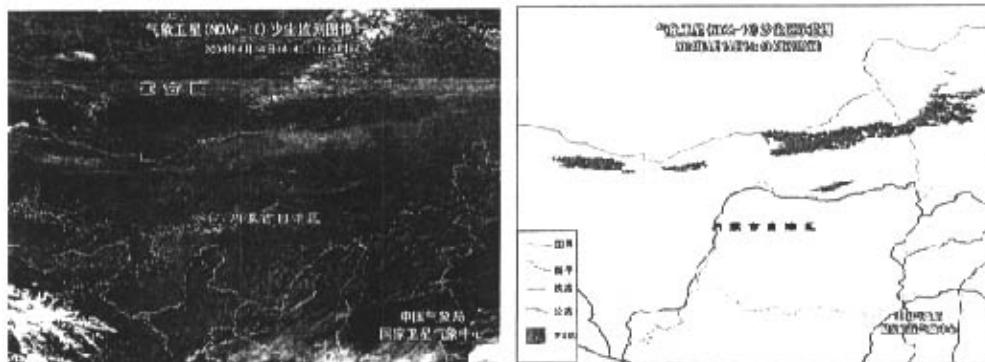


图9-18 沙尘监测图像 2004年4月14日14:43

9、受低气压影响，4月15日下午辽宁西部等地出现了较大范围的扬沙天气，如图9-19中箭头所指区域为卫星监测到的辽宁西部沙尘区。经估算，沙尘影响面积约为3.7万平方公里。另外，受偏西大风的影响，下午内蒙古西部等地出现了小范围的扬沙天气，如图9-20中箭头所指区域为卫星监测到的内蒙古西部沙尘区。经估算，沙尘影响面积约为1.5万平方公里。

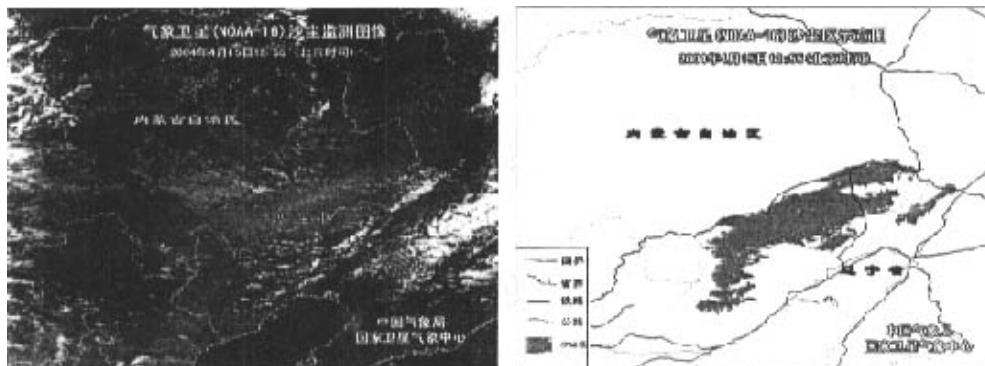


图9-19 沙尘监测图像 2004年4月15日12:55 (北京时)

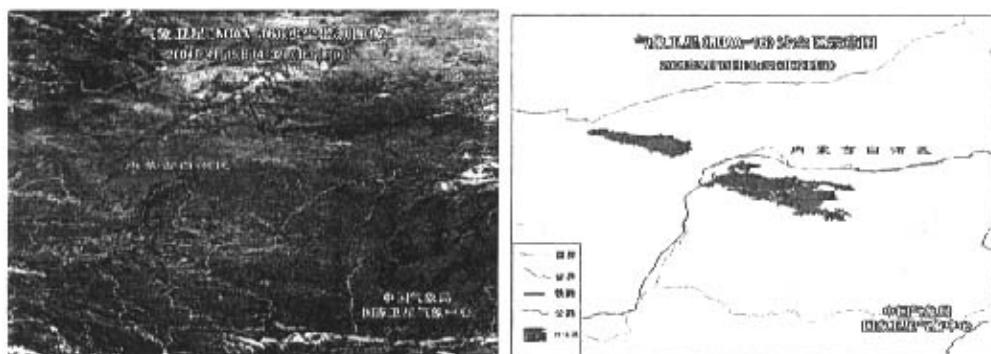


图9-20 沙尘监测图像 2004年4月15日14:32 (北京时)

10、受涡旋南部西北大风影响，东北南部等地出现了扬沙天气。图 9-21 是 NOAA-12 气象卫星 4 月 22 日 16:47 所监测到沙尘图像，由图所示：内蒙东部，辽宁西北部和吉林南部有沙尘区覆盖，卫星所监测到的沙尘区面积约为 16.8 万平方公里。

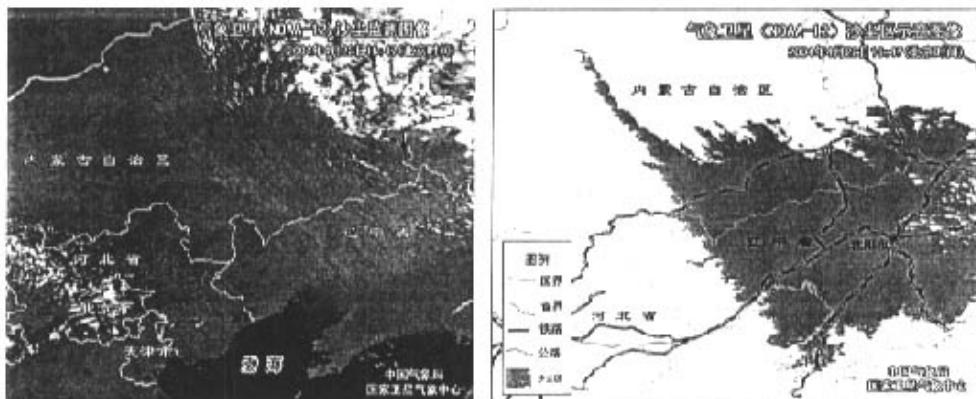


图 9-21 沙尘监测图像 2004 年 4 月 22 日 16:47 (北京时)

11、受东移的锋面前部的偏西大风影响，4 月 28 上午甘肃中部、内蒙古西部部分地区出现了沙尘天气，局部地区有沙尘暴。图 9-22 是上午 9:53 (北京时) 风云一号气象卫星的沙尘监测图像，图中红色箭头所指为沙尘影响区。右图是相对应的沙尘区示意图。

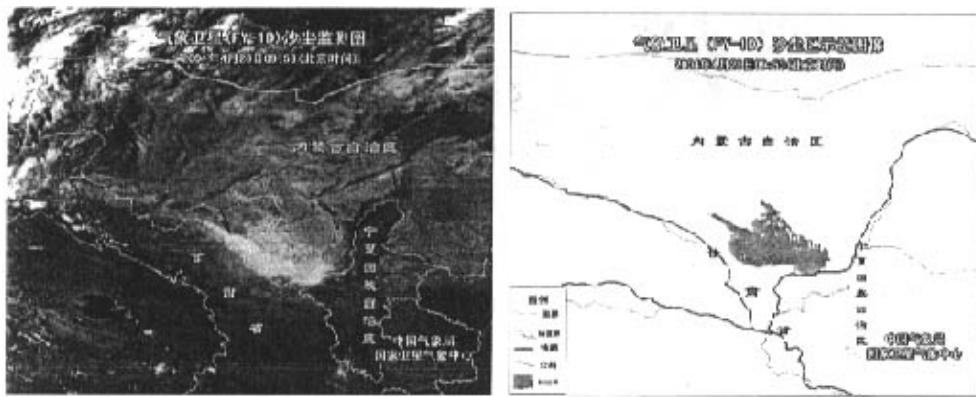


图 9-22 沙尘监测图像 2004 年 4 月 28 日 09:53 (北京时)

12、受锋面前部偏南大风影响，4 月 28 日中午开始内蒙古东南部、辽宁西部、吉林西部等地出现了扬沙。图 9-23 是下午 13:45 (北京时) 极轨气象卫星观测到的沙尘图像，图中红色箭头所指为沙尘影响区。右图是相对应的沙尘区示意图，经估算，沙尘影响面积约为 6.1 万平方公里。

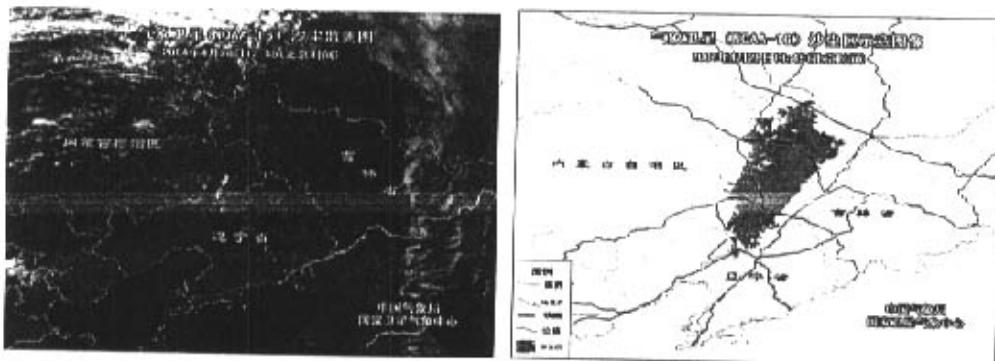


图 9-23 沙尘监测图像 2004 年 4 月 28 日 13:45 (北京时)

13、受东移的锋面前部的西北大风影响, 4月29日上午宁夏东部、陕西西北部、内蒙古西部部分地区出现了沙尘天气, 局部地区有沙尘暴。图9-24是上午9:44(北京时)风云一号气象卫星的沙尘监测图像, 图中红色箭头所指为沙尘影响区。沙尘影响面积约为4.4万平方公里。

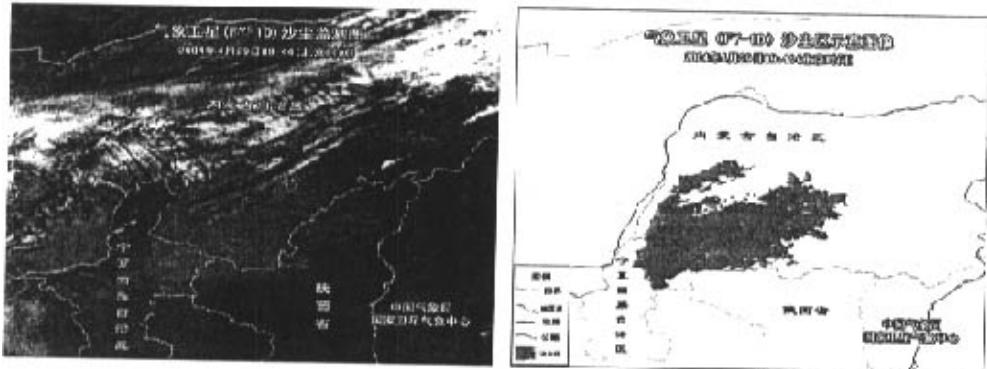


图 9-24 沙尘监测图像 2004 年 4 月 29 日 09:44 (北京时)

### 9.3 本章小结

沙尘暴预警系统试报工作于2004年3月2日开始, 到2004年4月30日结束, 共进行实时预报约60天, 现将3—4月预报结果小结如下。

3月份我国共有7次沙尘天气过程(2—3日扬沙; 4日扬沙; 15—16日扬沙; 31日扬沙; 9—11日沙尘暴; 28—30日沙尘暴; 26—28日强沙尘暴)。该系统预报出了6次(仅2—3日扬沙过程未报出), 其中, 4次沙尘暴与强沙尘暴过程全部报出。因此, 对范围大、强度强的沙尘过程有较好的预报作用。4月份全国共出现了4次沙尘天气过程(15日扬沙; 22日扬沙; 28—29日扬沙; 23—25日沙尘暴)该系统仅报出了1次(28—29日)扬沙过程, 其余2次扬沙与1次沙尘暴过程未报出。

经初步分析, 该预警系统对于气旋、冷锋等大的天气系统造成的强沙尘暴过程预报能力较强、预报水平为80%, 并且预报稳定。但对于局地大风造成的范围不大的沙尘过程预报效果不十分明显。

## 第十章 结论与讨论

本文针对沙尘暴发生、发展、传播和影响的全过程，开展沙尘暴监测与预警技术的研究。研建了我国受沙化影响地区的生态环境数据库，包括沙尘暴发生、发展及影响的主要地区，典型地区（重点地区）的地理环境、气候条件和自然资源与人为活动等数据库。以地面气象台站、气象卫星和资源卫星等多源信息为基础，探讨了沙尘暴发生、发展以及危害机理。建立了沙尘暴发生、运动、作用模型，提出了沙尘暴遥感图像特征提取技术标准规范，初步建立了沙尘暴监测网络系统和沙尘暴监测与预警系统。实现了沙尘暴信息发布，包括发生、发展、路径、强度及影响范围等信息。完成了预定目标，归纳所研究的内容得出以下结论。

### 10.1 结论

- 1、本文根据数据的性质划分为 6 个数据库。数据库包括空间矢量数据库（基础地理数据库、土地利用分布图库、土壤分布图库、气候图库等）；空间栅格数据库（各种遥感数据库）；观测与统计数据库（各气象站点观测数据库、沙尘暴影响地区社会经济统计数据库等）；文本数据库（历次沙尘暴发生、发展及影响评价数据库）。建设的我国新疆、内蒙、甘肃、宁夏、河北北部、天津和北京地区的生态环境数据库，为沙尘暴的监测与预警奠定了数据基础。
- 2、使用 NOAA-16 和 FY-1D 资料，研究沙尘暴信息提取技术、沙尘暴监测标准同一化与强度标定方法、静止气象卫星监测沙尘暴信息提取方法。以波段 3A (NOAA-16) 的测值为主，给与最大权重，同时加入波段 4 和波段 5 的差值，这样就可以完成从浮尘、扬沙、沙尘暴到强沙尘暴的精确识别。该方法对于 FY-1C/D 和 EOS/MODIS 资料同样适用。 $1.6 \mu m$  波段在沙尘暴监测中具有较好的稳定性，在多颗卫星资料  $1.6 \mu m$  波段都具有较固定的沙尘信息反映范围，利用  $1.6 \mu m$  波段可以很好的解决沙尘监测的标准同一化问题。当沙尘暴强度较弱时，沙尘区和地表在  $1.6 \mu m$  波段的区分不是非常明显，这时需要引入波段 4 和波段 5 的差值作为沙尘区识别因子，但波段 4 和波段 5 的差值在散点图上的分布呈非线性变化，进一步研究发现当沙尘暴强度较低时它的分布按线性变化，而当沙尘暴强度增加到一定程度时它的分布呈明显的非线性变化。随着沙尘暴强度的增强，波段 4 和波段 5 的差值被明显分成两个区域，低强度区随强度线性变化，而高强度区不随强度线性变化。
- 3、通过卫星遥感获取的沙尘信息主要体现沙尘在垂直方向的分布情况，为了计算

沙尘强度，必需建立卫星遥感获取的沙尘垂直分布信息和地面水平能见度之间的对应关系。使用两年的卫星遥感资料和地面观测资料进行对比分析，利用计算得到的归一化沙尘分布指数作为沙尘垂直分布的强度指标与水平能见度作回归分析，结果表明当能见度小于2Km时，二者之间有较好的相关性，而当能见度大于2Km时相关性较差，主要原因是由于能见度的测量方法主要以目视为主，在测量较大能见度时误差很大，因此在作回归分析时只选用能见度小于2Km的沙尘发生区站点。根据分析结果，计算出沙尘指数和能见度的转换对照表，可以精确的由遥感资料定量表示沙尘暴强度。

4、在遥感数据中，可见光和近红外通道可用来测算下垫面的反射率，对地表植被、云和水体较为敏感。在NOAA/AVHRR数据的可见光通道，大气沙尘对它的影响往往要高于对近红外通道的影响，尤其在地表植被盖度较高时更为明显。热红外通道可以用来测算下垫面的亮度温度。由于沙尘与云系、地表在反射率和温度上均有差异，利用这些特征可以从遥感数据中将沙尘暴信息分离出来。

5、通过对二十年来，我国主要沙尘暴过程的卫星云图与天气形势，进一步分析沙尘暴产生的冷空气路径，天气形势产生沙尘暴的动力条件，研究沙尘暴的影响范围，建立短时天气预警模型。在分析沙尘暴形成的机制基础上找出预报着眼点，进而确定相应的天气图关键区，选择关键区内的气象站的高空与地面要素，建立分类模型、热力模型和动力模型，最后形成沙尘暴短时预警模式。应用卫星资料，完成沙尘暴信息提取，生成沙尘暴监测图像、沙尘暴影响范围示意图及面积估算、沙尘暴强度分析图。配合天气图和地表资料，开展沙尘暴短时预警工作。

6、地面状况为沙尘暴的发生提供了丰富的物质源，是沙尘暴发生的物质因素。尤其是地表植被状况与沙尘暴天气的发生强度有着密切的关系。本研究中用归一化植被指数作为预报因子对沙尘暴天气进行预报，不单纯从天气角度进行考虑，同时将地表下垫面因子直接作为预报因子，说明用地表植被状况对沙尘暴天气进行预报的可行性。气象因子是沙尘暴产生的动力因子，因此在对沙尘暴天气进行预测预报时，须结合典型的天气形势，根据不同机制下产生沙尘暴的天气形势对预报因子进行分组，以保证预报因子确切反映预报量的信息，提高预报准确率。

7、研究成果表明，利用卫星遥感技术，结合地面观测数据对沙尘天气的形成、发展和扩散进行跟踪观测，是形成实用的沙尘天气监测与预警系统的可行方法之一。通过分析可提供沙尘暴起源、路径、强度、影响范围等信息。将不同类型、分布

于不同地理空间或系统或时间下的数据，监测预警模型集成在一起，通过网络这条纽带，为沙尘暴监测预警系统的业务运行实时提供信息支持和信息发布。

## 10.2 讨论

由于数据资料受限，本研究在很多方面仅是初步探索，特别在因子选择方面尚有不足，例如沙尘暴天气里对流层低层的强烈不稳定状态应特别重视，大气是否稳定取决于大气的压温垂直梯度的大小，仅用当日气温和气压不很确切。另外，地表土壤干湿状况、土壤表面硬度以及土壤含沙量等都是沙尘移动路径中的地表起沙量的重要因素。

统计预报方法虽然较简单易操作，并且可根据统计预报方程可做出比较客观的定量或定性预报。但由于其往往把复杂问题简单化或模式化，与天气变化的实际情况有一定距离而影响预报效果，对于同一个预报问题，采用不同的预报方法并把各种预报意见进行“集成”，得出一个统一的预报结论。

本研究所建立的判别函数是一个线性函数。实际上各变量之间包含有非线性关系。这样用线性判别函数作分类判别会影响判别效果。故判别效果的好坏在很大程度上取决于所选择的判别因子是否对判别对象具有良好的指示性。

鉴于本研究中数据资料有限，在一定程度上影响了判别效果，研究还需进一步完善。

根据沙尘强度统计结果，即我国境内沙尘天气三条路径上主要台站的平均能见度，比较相邻站点能见度的大小，可以初步预测沙尘传输途径中不同站点可能出现的沙尘强度，但是，由于能见度的大小受到多种因素的影响，如地形障碍物、风速、地表裸露或湿度状况等，本文仅从统计的角度客观的对沙尘天气过程中受影响地区的沙尘强度进行预测，复杂问题简单化，有待于进一步改进。

沙尘暴的监测、预警及防治，必须对其成因、传播、影响等研究需要对各种因素进行综合考虑、分析各种因素影响程度和因素之间的相互作用等。从而需要及时获取和分析与沙尘暴监测、预警相关的大量数据和资料，并且将沙尘暴的发生、发展和预报的结果进行快速发布和实时跟踪。因此，要建立沙尘暴相关因子（气候、土壤、植被、调查、遥感影像、基础地理、统计等数据）网络数据库、以便为沙尘暴监测、预警提供信息查询、分析、发布、处理等服务，应充分利用互联网的信息资源的快速获取、传输，实时更新等优点，更大地提高沙尘暴监测和预警的工作效率。

## 主要参考文献

- 1 白肇烨, 徐国昌等。中国西北天气, 气象出版社, 1988
- 2 陈隆亨, 李福兴。宁夏和内蒙古阿拉善盟强沙尘暴危害及防治对策。中国沙漠, 1993, 13(3): 8-13
- 3 陈敏连, 锅清台, 徐建芬等。黑风暴天气的研究与探讨, 甘肃气象, 1993, 11 (3): 16-27
- 4 陈伟民, 王强, 牛志敏等。中国西部“4-5”沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟, 中国沙漠, 1996, 16 (2): 140-144
- 5 陈添宇, 余优森等。欧亚大陆桥(中国段)沿线植被与风沙天气分布的关系分析。甘肃气象, 1999, 17 (3): 13-16
- 6 陈惠忠等。沙尘暴研究的进展。中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356
- 7 程麟生, 马艳。1996, “93.5”黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验, 应用气象学报, (4): 386-395。
- 8 付有智, 刘坤训等。甘肃河西黑风成因及预报, 气象, 1994, 20(12): 50-53
- 9 贺慧霞, 钱正安, 龚章。我国西北地区部分沙尘暴个例谱, 大气情报, 1993, 30(4): 14-18。
- 10 方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 44-51
- 11 方宗义, 张运刚, 郑新江等。用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果。第四纪研究, 2001 年 01 期
- 12 付有智, 刘坤训等。甘肃河西黑风成因及预报, 气象, 1994, 20 (12): 50-53
- 13 高庆先, 李令军。我国春季沙尘暴研究。中国环境科学, 2000, 20(6): 495-500
- 14 高尚玉, 史培军等。我国北方风沙灾害加剧的成因及其发展趋势。自然灾害学报, 2000, 9 (3), 31-37
- 15 高涛, 刘景涛等。沙尘暴天气的归类判别分析预报模式。甘肃气象, 2001, 19 (2), 14-20
- 16 高志强等。基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究。气候与环境研究, 2000, 5 (2), 155-164
- 17 龚佃利, 王以琳等。山东省飞机增雨降水区级预报方法研究。应用气象学报, 2001, 12 (增刊), 139-145
- 18 国家林业局宣传办公室编。关注沙尘暴。北京, 中国林业出版社, 2000
- 19 郭睿君。伊宁机场雷暴的统计预报方案。新疆气象, 2000, 23 (3), 9-10
- 20 贺慧霞, 钱正安等。我国西北地区部分沙尘暴各例谱。大气情报, 1993, 30 (4): 14-18
- 21 胡金明, 崔海亭, 唐志尧。中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响。1999, 8 (4), 49-55
- 22 胡隐樵, 光田宁。强沙尘暴发展与干飑线——黑风暴形成的一个机理分析。高原气象, 1996, 15 (2): 178-185
- 23 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
- 24 黄嘉佑编著。气象统计分析与预报方法。北京: 气象出版社, 2000
- 25 黄嘉佑。第一讲 气象统计应用概况。气象, 1995, 21 (5), 53-57
- 26 江吉喜等。以卫星资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 98-102

- 27 焦彦军, 钱正安等。“93.5.5”特强沙尘暴成因的数值模拟研究。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 134-141
- 28 焦彦军, 钱正安等。“93.5.5”特强沙尘暴的数值预报研究。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 121-127
- 29 林进, 孙司衡, 王君厚。沙尘暴多发区土地风蚀荒漠化诊断评价方法。中国沙漠, 1999, 19(4):375-377
- 30 刘景涛等。关于黑风暴定义的意见。内蒙古气象, 1996, (4):5-6
- 31 刘景涛, 郑明倩。华北北部黑风暴的气候学特征。气象, 1998, 24(2), 39-44
- 32 刘树华, 刘新民, 高尚玉。沙尘暴天气成因的初步分析。北京大学学报(自然科学版), 1994, 30(5):589-596
- 33 李福兴, 陈隆亨。强风沙尘暴灾害及减灾对策。中国减灾, 4(2):35-39
- 34 李建芳, 李建军等。2001, 2000年春季北方地区沙尘暴天气初探。陕西气象, 1994, (1): 1-4
- 35 李令军, 高庆生。2000年北京沙尘暴源地解析。环境科学研究 2001年02期
- 36 陆汉城主编。中尺度天气原理和预报。北京: 气象出版社, 2000
- 37 卢琦, 任国玉, 鞠洪波。2000年环北京沙尘暴成因、过程及其影响分析, 全球沙尘暴警世录, 中国环境科学出版社。2001, 185-196
- 38 卢琦, 杨有林主编。全球沙尘暴警世录。北京: 中国环境科学出版社, 2001
- 39 马元仓。1992年4月28日青海沙尘暴分析。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 59-69
- 40 毛式功, 杨德保。我国西北地区黑风暴的成因和对策。中国沙漠, 1995, 15(1): 19-30
- 41 钱正安, 贺慧霞等。我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 1-10
- 42 钱正安等。关于甘、宁部分地区“93.5.5”特强沙尘暴灾害的调查报告。大气情报, 1993, 30(4): 1-13
- 43 邱新法, 曾燕, 缪启龙。我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径。地理学报 2001年03期
- 44 曲绍厚, 李玉英, 周明煜等。北京地区一次尘暴过程的来源。环境科学学报, 1984, 4(1): 80-85
- 45 瞿章, 许宝玉, 贺惠霞等。我国沙尘暴灾害的概况和对策。中国减灾, 1996, 6(1): 23-26
- 46 瞿章, 许宝玉, 贺惠霞等。“930505”沙尘暴的若干启示。干旱区地理, 1994, 17(1): 63-67
- 47 申绍华, 陈受钩。沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟。气象学报, 1993, 51(3):283-294
- 48 申绍华, 陈受钩。沙尘辐射强迫的锋生过程分析。气象学报, 1993, 51(4):425-433
- 49 沈志。NOAA/AVHRR数据在植被生态环境监测中的应用探讨。干旱环境监测, 1997, 11(2), 98-103
- 50 施能编著。气象科研与预报中的多元分析方法。北京: 气象出版社, 1995
- 51 史培军, 严平, 高尚玉等。我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望。自然灾害学报, 2000, 9(3), 72-77

- 52 孙军、李泽椿。西北地区沙尘暴预报方法的初步研究。气象, 2001, 27 (1): 19-24
- 53 孙红雨, 王常耀。中国地表植被变化及其与气候因子关系。遥感学报, 1998, 2 (3), 204-210
- 54 唐守正编著。多元统计分析方法。北京: 中国林业出版社, 1984
- 55 腾卫平, 杜惠良。浙江东风暴雨天气的一种诊断统计预报方法。科技通报, 1995, 11 (4), 209-212
- 56 王长根等编著。内蒙古气候特点及对策研究。北京: 气象出版社, 1997
- 57 王式功, 董光荣, 杨德保等。中国北方地区沙尘暴变化趋势初探, 自然灾害学报 1996, 5 (2): 86-94。
- 58 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
- 59 王式功, 董光荣, 魏丽等。大气沙尘辐射特性的卫星观测。高原气象, 1998, 17 (4): 347-355
- 60 乌兰, 锡盟地区一次特强沙尘暴天气过程分析。内蒙古气象, 2001, (3), 18-19
- 61 夏训诚, 杨根生等著。中国西北地区沙尘暴灾害及防治。北京: 中国环境科学出版社, 1996
- 62 徐国昌。甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]。气象学报, 1979, 37(4): 26-35
- 63 徐希慧。塔里木盆地沙尘暴卫星云图特征分析, 甘肃气象 1997 年 02 期
- 64 徐运启, 胡敬松, 罗开照等。西北地区中尺度强沙尘暴天气监测预警系统工程建设方案, 中国减灾 2001 年 02 期
- 65 徐建芬, 陶健红, 杨民等。2000 年 4 月 12 日特强沙尘暴天气分析, 气象, 2001, 2001 年 06 期
- 66 杨东贞, 纪湘明等。一次黄沙天气过程的分析。气象学报, 1991, 49(3): 334-342
- 67 杨东贞, 王超等。春季沙尘暴的发生源地及输送沉降的探讨。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社 1997, 111-117
- 68 杨东贞, 王超, 温玉璞等, 1990 年春季两次沙尘暴特征分析, 应用气象学报 1995 年 01 期
- 69 叶笃正等。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
- 70 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, 24(3): 278-288
- 71 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
- 72 张铁仁。西北地区“黑风”成因及预报方法探讨。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 70-74
- 73 张煜星, 廖雅萍。我国沙尘暴灾害初步研究, 中国生态农业学报 2001, 9 (2): 13-15
- 74 张芬馥, 陆如华。数值预报产品对“5·5”特大沙尘暴的释用能力分析。气象 1994 年 04 期
- 75 赵峰, 鞠洪波, 陈永富。沙尘暴天气统计预报模型的研究, 林业科学研究, 2004, 17 (3): 300-304。
- 76 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙等。2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响。科学通报, 2001 年 03 期
- 77 郑新江, 刘诚, 陆文杰等。沙尘暴监测方法研究。方宗义, 朱福康, 江吉喜等编。中国沙尘暴研究[C]。北京: 气象出版社, 1997, 82-87

- 78 郑新江, 刘诚, 崔小平等。沙暴天气的云图特征分析。气象, 1995, 21 (2): 27-31
- 79 郑新江, 徐建芬等。利用风云 1C 气象卫星监测南疆沙尘暴研究。中国沙漠, 2000, 20 (3): 286-288
- 80 郑新江, 罗敬宁, 刘征。FY-1C 气象卫星在沙尘暴监测中的应用。上海航天, 2001 年 01 期
- 81 周明煜, 曲绍厚等。北京地区尘暴过程的气溶胶特征。科学通报, 1981, 26 (10): 609-611
- 82 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
- 83 朱爱荣。陕西北部春季沙尘暴预报探讨, 陕西气象 1994 年 01 期
- 84 朱伯承。统计天气预报。上海: 上海科学技术出版社, 1981
- 85 朱福康, 江吉喜等。沙尘暴天气研究现状和未来。气象科技, 1999, 4, 1-8
- 86 朱福康, 汤绪。我国沙尘暴天气的研究—全国沙尘暴天气研讨会综述。气象科技, 1994 年 01 期
- 87 Ackerman, Steven A. and Hyosang Chung. Radiative Effects of Airborne Dust on Regional Energy Budgets at the Top of the Atmosphere *J. Appl. Meteor.*, 1992, 223-233.
- 88 Anderson, J. Dust storm! *Chinook* 1984.6(3): 71-73.
- 89 Cautenet, G., et al. Thermal Impact of Saharan Dust over Land. Part I: Simulation. *J. Appl. Meteor.*, 1992, 166-180.
- 90 Chakravarti, A.K.. The June-July precipitation pattern in the Prairie. *The Journal of Geography* 1972, 71: 155-160.
- 91 Chakravarti, A.K. Precipitation deficiency patterns in the Canadian Prairies, 1921 to 1970. *Prairie Forum* 1976.1(1): 95-110.
- 92 Coughlan, M.J. and Lee, D. H. *The assessment of drought risk in Northern Australia*. "Natural Hazards Management in North Australia" Aust. Nat. University, Canberra; 1978.
- 93 Dyson, I. W. Canada's Prairie Conservation Action Plan. In: Fred B. Samson and Fritz L. Knopf (eds. ) *Prairie Conservation – Preserving North America's Most Endangered Ecosystem*, 1996. pp.175-186.
- 94 Environment Canada. 2000a. *Top Weather Events of the 20<sup>th</sup> Century*. Environment Canada: The Green Lane – Fact Sheet.
- 95 Environment Canada.. *Cultivating A Secure Future: Rural Development and Sustainable Agriculture in Canada* – A Canadian contribution to the land use dialogue at the 8<sup>th</sup> Session of the United Nations Commission on Sustainable Development, April 24 – May 5, 2000. Ottawa: Environment Canada.
- 96 Etkin, D., M.T. Vázquez, and I. Kelman. *Natural Disasters and Human Activity – A Contribution to the North American Commission on Environmental Cooperation State of the Environment Report*. Environment Canada: The Green Lane. 1998.
- 97 Gill, T.E. Eolian sediments generated by anthropogenic disturbance of playas: human impacts on the geomorphic system and geomorphic impacts on the human system. *Geomorphology* 1996.17(1-3): 207-228.
- 98 Goudie, A.S., and N.J. Middleton. The changing frequency of dust storms through time. *Climatic*

- Change 1992.20(3): 197-225.
- 99 Gray, J.H. *Men Against the Desert*. Second Edition. Saskatoon & Calgary: Fifth House Publishers. 1996.
- 100 Heathcote, R.L. *The Arid Lands: Their Use and Abuse*. London: Longman. 1983.
- 101 Herrington, R., B.N. Johnson, and F. Hunter. *Responding to Global Climate Change in the Prairies*, Volume III of *Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*. Ottawa: Environment Canada. 1997.
- 102 Hilliard, C., and S. Reedyk. *Agricultural Best Management Practices*. Regina: Prairie Farm Rehabilitation Administration, Agriculture and Agri-Food Canada
- 103 Hope, E.C. Weather and crop history in Western Canada. *Canadian Society of Technical Agriculture Review* 2000.16: 347-358.
- 104 Iwasaka, Y. et al. The transport and spatial scale of Asian dust storm Clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, 1983,35B, 3: 189-196.
- 105 Jauregui E. *The dust storms of Mexico City*. *Inter. J. Climatol*, 9 (2): 169-180.
- 106 Joseph, P.V., Raipal, D.K. and Deka, S.N. 1980, "Andhi," the convective dust storms of Northwest India. *Mausam*, 31989,1, 431-442.
- 107 Jones, D.C. "We'll All Be Buried Down Here": *The Prairie Dryland Disaster 1917-26*. Calgary: Alberta Records Publication Board, Historical Society of Alberta.,1986.
- 108 Jones, D.C. *Empire of Dust – Settling and Abandoning the Prairie Dry Belt*. Edmonton: The University of Alberta Press. 1987.
- 109 LaDochy, S., and C.H. Annett. 1982. Drought and dust: a study in Canada's Prairie Provinces. *Atmospheric Environment* 16(6): 1535-41.
- 110 Larney, F.J., M.S. Bullock, S.M. McGinn, and D.W. Fryrear. 1995. Quantifying wind erosion on summer fallow in southern Alberta. *Journal of Soil and Water Conservation* 50(1): 91-95.
- 111 Mackenzie River Basin Committee.. *Athabasca Sand Dunes in Saskatchewan*. Mackenzie River Basin Study Report Supplement 7. Canada – Alberta – British Columbia – Saskatchewan – Northwest Territories – Yukon Territory. 1981
- 112 McNaughton, D. L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms. *Weather*, 1987, 42 (1): 8-13.
- 113 Pauley, Patricia M., Baker, Nancy L. and Barker, Edward H. *An Observational Study of the "Interstate 5" Dust Storm Case*; Bulletin of the American Meteorological Society, 1996,77 (4), 693-720.
- 114 Péwé, T.L. (ed.). *Desert Dust: Origin, Characteristics, and Effect on Man*. Special Paper 186. Boulder, Colorado: The Geological Society of America. 1981.
- 115 Wheaton, E.E., and A.K. Chakravarti. Some temporal, spatial and climatological aspects of dust storms in Saskatchewan. *Climatological Bulletin* 1987.21(2): 5-16.
- 116 Wheaton, E.E., and A.K. Chakravarti. Dust storms in the Canadian Prairies. *International Journal of Climatology* 1990.10: 829-837.

## 发表论文目录

- 1 鞠洪波。信息技术与数字林业, 2001 年林业科技大会, 2001. 7
- 2 卢琦, 任国玉, 鞠洪波。2000 年环北京沙尘暴成因、过程及其影响分析, 中国环境科学出版社, 2001, 185-197
- 3 王晓慧、鞠洪波。森林资源数据库的改造与共享, 林业科技通讯, 2000, 总 360 期, 15-16
4. 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 张增祥, 王一谋, 周自江, 鞠洪波, 黄签。关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策, 地理学报, 2000, 第 55 卷, 第 5 期, 513-521
- 5 张怀清, 鞠洪波, 陈永富。林业资源环境网络在线决策支持系统研究, 林业科学, 2002, 15(6): 637-643
- 6 鞠洪波, 国家重大林业生态工程监测与评价技术研究, 西北林学院学报, 2003, 18(1), 56-58。
- 7 黄建文, 鞠洪波, 特木钦等。阿拉善左旗天然梭梭林鼠害防治的遥感监测, 林业科学, 2004, 40 (3): 107-110
- 8 黄建文, 鞠洪波。山区林地多季相 TM 影像综合分类研究, 福建林学院学报, 2004, 24(2): 136-139.
- 9 黄建文, 鞠洪波, 赵峰等。快鸟数据在退耕还林中应用方法的研究, 林业科学, 2004, 17(3), 267-271.
- 10 赵峰, 鞠洪波, 陈永富。沙尘暴天气统计预报模型的研究, 林业科学, 2004, 17(3): 300-304.
- 11 张怀清, 鞠洪波, 陈永富。基于 Internet 的林业资源环境信息服务系统 (FINFOSYS) 研究, 林业科学, 2004, 17(5): 576-582
12. TPN1, its potentials and challenges in combating desertification. Proceedings of Workshop of the Asian regional Thematic Programme network on Desertification Monitoring and Assessment (TPN1), 2000, pp18-21

## 致谢

论文终于完成了，已悬了多年的心稍微得到一点宽慰。

回想 2000 年春天，我国北方，特别是华北地区连续多次出现沙尘天气，时间之早、频率之高、范围之广、强度之大，为历史同期所罕见，给华北地区的交通运输、环境治理及人们的日常工作和生活带来了不利影响，对北京、天津等大城市特别是首都及周边地区造成直接危害，引起社会各界的广泛关注。为此，4 月 10 日中国科学院地学部常委会召开紧急会议，决定成立由著名气象学家叶笃正院士和丑纪范院士任组长等十余人组成的“中国科学院地学部风沙问题咨询组”，我有幸成为咨询组中的一员。

在提交国务院的报告中，咨询组建议“建立和完善沙尘天气的动态监测、预警系统，做好防灾减灾的科学的研究工作”，并指出“目前的当务之急是建设和完善沙尘天气监测系统，以降低强沙尘天气造成的损失。为此，须针对我国沙尘天气的特点，研究沙尘天气动态监测方法，利用卫星遥感、雷达和探空等手段，对沙尘天气的形成、发展和扩散进行跟踪观测，形成一个实时的沙尘天气监测、预警系统。并及时发布信息，以利于提前安排好生产、交通和群众生活，尽可能减少损失”。

正是基于此，我选定“沙尘暴监测与预警技术研究”作为我的博士论文。

我非常感谢导师徐冠华院士的悉心指导，使我能顺利完成这篇论文，多年来导师严谨的治学态度、敏捷的思维，使我受益匪浅，并将影响我的一生。

感谢我的另一位导师唐守正院士，对我的论文提出了许多宝贵意见，使得论文不断完善。

论文研究中，得到了中国林科院资源信息研究所陈永富研究员、张怀清副研究员、黄建文副研究员、赵峰博士等的大力协助，在此表示衷心的感谢。

特别感谢中国卫星气象中心的郑新江研究员等同行为本研究提供了大量基础数据和工作经验，没有他们的帮助本研究是很难完成的。

感谢中国科学院遥感应用研究所给我的学习机会，特别是余琦老师在多方面给予的关心、支持和帮助，使我终身难忘。

感谢我的妻子和女儿对我的照顾和理解。没有她们的支持和鼓励我也许会“半途而废”。

最后，感谢所有为本论文提供帮助的朋友。衷心地谢谢大家。