

分类号 P4
密级

单位代码 10300
学号 2008205132



民勤地区沙尘暴年际变化研究及其监
测预警技术的对比分析

(南京信息工程大学理学硕士学位论文)

培 养 单 位：南京信息工程大学
专 业：气候系统与全球变化
申 请 人：朱 晓 炜
指 导 教 师：李 栋 梁 教 授
 李 耀 辉 研究员

二〇一一年五月

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。本论文除了文中特别加以标注和致谢的内容外，不包含其他人或其他机构已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京信息工程大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。其他同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示谢意。

学位论文作者签名：朱晓峰

签字日期：2011.6.14

关于论文使用授权的说明

南京信息工程大学、国家图书馆、中国学术期刊（光盘版）杂志社、中国科学技术信息研究所的《中国学位论文全文数据库》有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，并通过网络向社会提供信息服务。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权南京信息工程大学研究生院办理。

☐公开 ☐保密（____年 ____月）（保密的学位论文在解密后应遵守此协议）

学位论文作者签名：朱晓峰

签字日期：2011.6.14

指导教师签名：李东梁

签字日期：_____

目 录

中文摘要	III
ABSTRACT	IV
第一章 引 言	1
1.1 沙尘暴的定义分类及特点	3
1.2 沙尘暴的危害和研究沙尘暴的意义	4
1.3. 我国沙尘暴的研究进展	8
1.3.1 沙尘暴的空间分布	8
1.3.2 沙尘暴的时间分布	9
1.3.3 影响沙尘暴的天气系统	10
1.3.4 影响沙尘暴的环境因子	12
1.3.5 沙尘暴研究的方法和手段	12
第二章 研究区域, 资料和方法	16
第三章 民勤沙尘暴的统计分析及“4.24”黑风暴过程	19
3.1 民勤地区沙尘暴发生的年际特征	20
3.2 民勤沙尘暴发生的 MORLET 小波变化分析	22
3.3 沙尘暴的影响因子综述	23
3.4 民勤“4.24”黑风暴过程及其观测资料的分析	25
3.4.1 “4. 24”沙尘暴过程天气形势分析	25
3.4.2 “4. 24”沙尘暴过程气象要素变化分析	27
3.4.3 “4. 24”民勤沙尘暴过程沙尘浓度变化	29
第四章 GRAPES_SDM 模式对沙尘暴的研究	31
4.1. GRAPES_SDM 模式	31
4.2. GRAPES_SDM 对沙尘暴的模拟	37
第五章 利用卫星遥感对沙尘暴进行监测	41
5.1. 遥感及沙尘暴遥感监测系统的介绍	41
5.2. 对沙尘暴范围的监测	42

5.3. 对沙尘强度的监测	43
5.4. 三种沙尘暴监测预警方法的比较	44
第六章 总 结	46
参 考 文 献	48
作 者 简 历	54
致 谢	55

中文摘要

河西走廊地区是我国北方冷空气南下的重要通道,毗邻沙漠,受气候和地形的影响,是我国沙尘暴影响最严重的地区之一,对这一敏感区域进行观测,非常有利于沙尘暴的研究工作。本文利用民勤地区 1971-2009 年沙尘暴爆发时间的统计数据,对民勤地区沙尘暴年际发生频次的进行了研究。结合“4.24”沙尘暴过程,用站点监测、模式预警和遥感监测三种方法的结果进行了分析,得到如下结果:(1)民勤地区沙尘暴发生频次波动下降,呈 5 年和 15 年的周期性,在 80 年代中期下降趋势较明显。春季沙尘暴的发生次数最多,依次是夏季,冬季和秋季。(2)利用“4.24”沙尘天气过程中的站点监测资料,对地面温度、地面气压、相对湿度和风速的变化进行了研究。沙尘暴发生之前,地面温度较高,地面气压较低,相对湿度较低。沙尘暴发生之后,地面温度迅速下降,地面气压升高。相对湿度在沙尘暴的发生初期升高,在后期下降。地面风速的变化曲线和沙尘浓度的变化曲线一致。(3)利用 T213 资料和 GRAES_SDM 模式对“4.24”沙尘天气进行模拟,通过和站点监测的地面温度、相对湿度、沙尘浓度的比较,模式结果能反映出相应要素的变化趋势,模式结果得到验证。利用模式结果,对民勤“4.24”沙尘过程前后的散度场和涡度场配置进行分析。沙尘暴发生之前,在民勤西北部即巴丹吉林沙漠,地面 850hPa 同时存在负散度中心和正涡度中心,此地地面有强烈的辐合运动。民勤处在正负散度和正负涡度的边缘地区。沙尘暴结束时,在巴丹吉林沙漠 850hPa 处有较弱的负散度和涡度中心,地面的辐合运动降低。巴丹吉林沙漠的辐合上升运动对民勤地区沙尘暴的爆发起着很重要的作用。(4)沙尘暴遥感监测系统根据沙尘的反射和辐射特性建立的沙尘指数,本文利用 08、09 两年的站点观测数据对遥感监测建立的沙尘指数进行了验证,沙尘浓度高的时刻沙尘指数也较高,沙尘指数能准确反映出沙尘强度的大小。并通过 2010 年的遥感图像,得到此时甘肃省中北部,宁夏中部,陕西省和内蒙古的交界处同时有沙尘天气的过境。

关键字: 沙尘暴 GRAPES_SDM 遥感

Abstract

Hexi corridor is the important channel in our country for cold air going to south. Adjacent to the desert, affected by climate and topography, the area is one of the most severe regions influenced by sandstorm. Observing this sensitive region is very conducive to further sandstorm's research work. Used the statistical data of storms broking out from 1971 to 2009, the annual frequency of storm was studied. Combined with "4.24" sandstorm process, we used site monitoring, mode warning and remote sensing monitoring to analysis. The results as followed: (1) the sandstorm frequency was decline and had 5, 15 cycle fluctuations. In the mid-80's decline was obvious. Sandstorm occurring in spring was the most, in turn was the summer, winter and autumn. (2) Based on the site monitoring data, the ground temperature, ground pressure, relative humidity and wind speed were analyzed. Before sandstorm occurring, the ground temperature was higher, the ground pressure was lower, relative humidity is lower. After sandstorm occurring, the ground temperature dropped quickly, the ground pressure increased. Relative humidity rose in the beginning and dropped at the end. The ground wind speed changed consistent with the curve of sand-dust concentration. (3) Using T213 data and GRAPES_SDM mode, through simulating the "4.24" dust weather, we knew the model results could reflect the elements' changing trend, the model result was verified. The model results were used to analyze the vorticity and divergence fields. Before sandstorm occurring, BaDanJiL in desert that located in northwest of minqin had negative divergence center and positive vorticity center at 850 hPa. That mean the ground had a strong convergence movement. Minqin was at the edge of the region, which was between positive and negative divergence, which was between positive and negative vorticity. At the end of the sandstorm, there was a weaker divergence and vorticity center in BaDanJiLin desert at 850hPa, the ground of the convergence movement reduced. BaDanJiLin desert's vertical movement played an important role in sandstorm occurring in minqin. (4) According to sandstorm's reflection and radiation characteristics, remote sensing monitoring system established a sand-dust index. We verified the sand-dust index by sand-dust concentration from 2008 to 2009. Sand-dust index could accurately reflect

中文摘要

dust strength. Based on the remote sensing image, we got that the middle of Ningxia, the north-central of Gansu, the intersection of Shanxi and Inner Mongolia had the dust weather.

Key words: Sandstorm GRAPES_SDM Remote sensing

第一章. 引言

沙尘暴是沙尘和尘暴两者兼有的总称,是指强风把地面大量沙尘物质吹起并卷入空中,使空气特别浑浊,水平能见度小于一百米的严重沙尘天气。在我国,沙尘暴主要发生在北方,具有非常明显的地域性特点。王式功^[1],钱正安^[2]等对我国沙尘暴的发生的区域、频次、年际变化趋势等进行了研究,得出我国沙尘暴频数在 10 次以上的沙尘暴中心有 3 个,即以民勤为中心(达 43 次)的河西走廊及内蒙古阿拉善高原区,以和田为中心(42 次)的南疆盆地南缘区和以朱日和为中心(10 次)的内蒙古中部区。前两个区域的沙尘暴频数要比内蒙古中部区明显偏多。李耀辉^[3]等人在之前的工作上对近来沙尘暴的进展进行了系统的论述,自 20 世纪 50 年代以来,我国沙尘暴发生次数或沙尘暴日数总体上呈波动减少趋势,其中 50 年代最多,60-70 年代波动上升,80-90 年代波动减少,90 年代最少,2000-2002 年又相对偏多,由于周围环境的变化和人为活动的显著影响,个别地方可能会稍微有所变化。牛生杰^[4],赵光平^[5],徐国昌^[6]等人分别对宁夏,新疆,甘肃等地区的沙尘暴进行了具体的研究。岳平^[7-9],王付村^[10]等人对一次或者两次的沙尘暴过程进行了分析。以上所有的分析都是基于站点观测数据,利用站点记录和观测的数据来进行研究。这些工作为后续的研究工作提供了很好的基础理论和研究方法,具有非常高的参考价值。国外对沙尘暴的遥感监测研究始于 20 世纪 80 年代的 NOAA/AVHRR 传感器。目前的遥感监测主要利用静止气象卫星(GMS/VISSR)和极轨气象卫星(NOAA/AVHRR)两大卫星遥感系列数据。Griggs^[11]、Steven^[12]等开展了利用卫星的可见光和红外波段监测陆地和水体上空的沙尘及其相关的一些研究。Carlson^[13]利用卫星观测的亮度资料确定了撒哈拉地区沙尘的爆发及其相应的大气扰动。我国的研究与应用工作从 20 世纪 20 年代末开始,裴浩^[14]利用 NOAA/AVHRR 第三通道探测值对科尔沁沙地的变化与发展趋势进行了阐述。章伟伟^[15]等采用 EOS-Terra/MODIS 数据对内蒙古的沙尘暴进行了监测研究。厉青^[16]等通过分析沙尘暴的波谱相应特征及通过分析沙尘暴的波谱响应特征及 EOS-Terra/MODIS 传感器通道的特点,阐述了利用

EOS-Terra/MODIS 进行沙尘暴监测的机理,提出了利用 MODIS 进行沙尘暴监测的热红外双通道差值法、三通道彩色合成直方图均衡增强法及基于双通道域值的叠加分析法,并进行了示范比较研究。厉青,王桥^[17]等人探讨了以 MODIS 为数据源进行沙尘暴监测的业务化技术流程及方法,进行了对沙尘信息提取及等级划分的示例研究,为卫星遥感监测沙尘提供了新的数据源和监测途径。韩涛,李耀辉,郭妮^[18]等人在 EOS/MODIS 资料可见光波段光谱特性的深入研究分析的基础上,提出了一种完全用 MODIS 可见光波段监测沙尘信息的技术方法,并成功地对几次沙尘暴过程进行了沙尘信息遥感监测,取得了良好的效果和实用性。^[9-17]数值模拟是近些年发展起来的一种研究手段,Cautenet^[19]利用中尺度模式对西非尼日尔首都尼亚美上空来自撒哈拉尘暴的热力影响进行了数值模拟,获得了令人满意的结果,认为大气中的沙尘含量和辐射特征是最有意义的参数。申绍华,陈受钧^[20]分别利用二维和三维数值模式研究了沙尘暴爆发时,沙尘辐射强迫的锋生过程和孤立的沙尘暴辐射效应对锋面环流的影响。程麟生^[21]对我国西北“93.5”黑风暴发展成因与沙尘输送进行了中尺度数值模拟。利用改进的 MM4 和高分辨行星边界层(PBL)参数化及 40km 细网格基本上模拟出“93.5”黑风暴的结构和演变,利用大气环流模式研究了沙漠尘暴和南极洲的海盐气溶胶的特征。程海霞^[22]等利用 MM5 模式对 2001 年 4 月的双急流型沙尘暴天气过程进行了数值模拟和诊断分析。在我国自己的模式发展方面,很多人都做了研究。^[23-27]由中国气象局兰州干旱气象研究所和中国气象科学研究院数值预报中心合作研制的 GRAPES_SDM 模式在沙尘暴模拟方面得到了非常好的效果,并经过业务化处理,在甘肃、宁夏等省份已经开始预报业务应用,并对几次沙尘过程进行了很好的模拟和预报。

本文的主要研究区域是甘肃省民勤县。这个沙漠边缘的小县城是处在巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的唯一一块绿洲,在阻碍两大沙漠合拢,减慢荒漠化进程上有举足轻重的作用。温家宝总理曾经在这里驻足,并提出了“决不让民勤成为第二个尼布泊”的口号。每年春季肆虐的沙尘暴都对这个地区会造成非常严重的损失。因此,研究这个小区域的沙尘暴的变化规律具有非常现实和积极的意义。很多学者针对各个领域对该地区进行过一些研究。^[28-31]本文利用最新的民勤地区

沙尘暴的统计资料,对不同季节沙尘暴爆发频次和变化周期性进行分析。民勤地区的沙尘暴的发生次数总体呈下降的趋势,但在一段的时期又存在着波峰—波谷的波动变化。沙尘暴发生频次最多事在春季,依次为夏季,冬季,秋季。年沙尘暴的年发生次数存在着5年和7.5年的周期变化。现在对沙尘暴的监测预警主要有站点观测、遥感资料和数值模拟三种手段,这三种手段都对沙尘暴的研究工作起到了很大的促进作用。但一般都是分别独自进行分析,没有交互起来。2010年4月24日在民勤发生了一次“4.24”黑风暴过程,这次过程是近十三年以来民勤地区最大的一次过程,具有很高的研究价值。结合这次过程,分别利用站点的资料、数值模式结果和遥感的结果进行分析。用站点资料和沙尘暴特殊观测资料对起沙前后的温度、风速、沙尘浓度变化做了分析。用遥感对沙尘的影响范围初步进行描述。同时用GRAPES_SDM模式对这一过程进行了模拟,与上述两种结果进行了对比,得到的结果比较匹配。同时,对三种方法的结果进行了一些比较讨论。

1.1 沙尘暴的定义分类及特点

沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。浮尘天气是指当天气条件为无风或平均风速小于等于 3.0m/s 时,尘沙浮游在空中,使水平能见度小于10千米的天气现象;扬沙天气是指风将地面尘沙吹起,使空气相当浑浊,水平能见度在1千米至10千米以内的天气现象;沙尘暴天气是指强风将地面尘沙吹起,使空气非常浑浊,水平能见度小于500米的天气现象;强沙尘暴是指大风将地面尘沙吹起,使空气非常浑浊,水平能见度小于100米的天气现象;特强沙尘暴是指狂风将地面尘沙吹起,使空气特别浑浊,水平能见度小于50米的天气现象。强沙尘暴是沙尘天气中最强的级别,危害最大,尤其是当瞬时风速 ≥ 25 米/秒,能见度 < 50 米的强沙尘暴天气能见度在50米以下时,俗称为“黑风暴”。有时最大风力可达12级,风速大于 32.6 米/秒,与在我国登陆的台风中心附近的最大风力相当,由此造成的灾害十分严重。沙尘天气是一个区域性的天气现象,因此经常可以在邻近的几个站同时观测到沙尘,因此根据沙尘的影响范围,把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。浮尘天气过程：在同一次天气过程中，我国天气预报区域内 5 个或 5 个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了浮尘天气；扬沙天气过程：在同一次天气过程中，我国天气预报区域内 5 个或 5 个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了扬沙天气；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 3 个或 3 个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了沙尘暴天气；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 3 个或 3 个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了强沙尘暴天气。沙尘暴是一种风与沙相互作用的灾害性天气现象，它的形成与地球温室效应、厄尔尼诺现象、森林锐减、植被破坏、物种灭绝、气候异常等因素有着不可分割的关系。沙尘暴作为一种高强度风沙灾害，并不是在所有有风的地方都能发生，具有典型的地域特征，只有那些气候干旱、植被稀疏的地区，才有可能发生沙尘暴。^[32-38]

1.2 沙尘暴的危害和研究沙尘暴的意义

沙尘暴的危害方式，大体可归纳为 4 种：沙埋、风蚀、大风袭击和污染大气环境。沙埋是沙尘暴以排山倒海的势头向前移动，下层的沙粒在狂风驱动下滚滚向前。遇到障碍物或风力减弱时，沙粒落下来，就会埋压农田、村庄、工矿、铁路、公路、水源等。这种危害一般出现在有风沙入侵绿洲和戈壁滩的地段，也可出现在沙漠、片状沙地相连接的狭长地带。风蚀是强大的风力对地表物质吹蚀，就像是用刀子在刮东西似的。风蚀土壤不仅仅把土壤里的细腻的粘土矿物和宝贵的有机物质刮跑了，而且还把带来的细沙堆积在土壤表层，使原来比较肥沃的土壤变贫瘠。大风袭击是伴随着沙尘暴的大风，所到之处狂风怒吼，能把大树连根拔起，刮倒墙壁、毁坏房屋、刮翻火车、摧毁电杆，造成人、畜伤亡。污染大气环境是由于风沙作用，整个地球每年散发到空中的尘土达每平方公里 2~200 吨。据观测，中亚地区的尘埃能够被西风气流搬运到 1 万公里以外的夏威夷群岛。这些尘埃中含有许多有毒矿物质，对人体、牲畜、农作物、林木等产生危害，并可引起人们的眼病和呼吸道感染等疾病。除了这些很容易和接受的直接的危害，沙尘暴还通过影响太阳辐射，地气能量交换等方式间接的对全球天气系统产生不可预测的作用。全球很多地方都在不同时期都不同程度的遭受沙尘暴过的威胁。

(1) 20世纪30年代, 美国西部大平原。

“沙尘暴”这个词源于1935年4月14日的“黑色星期天”——美国30年代最可怕的一次沙尘暴。这次恐怖的沙尘暴让人们度过了宛如‘世界末日’的日子。这次沙尘暴重灾区包括大平原南部九千七百万英亩的高地和平原——涉及科罗拉多, 新墨西哥, 内布拉斯加, 堪萨斯, 俄克拉荷马及德克萨斯六个州的部分地区。早在“黑色星期天”之前, 人们已经经历和多次恐怖的沙尘暴。而沙尘暴对农作物的严重破坏程度, 使人们过好日子的希望被彻底击碎, 渴望成功的意志与奋进的动力随之化为乌有。也直接导致了美国历史上最大的一次生态移动潮。

沙尘暴发生之前, 美国的西南部大平原地区拥有土壤肥沃的草原。联邦政府鼓励民众向西部移民及对大平原地区进行开发。草原变成了耕地, 期间由于第一次世界大战, 小麦成了战略物资品, 应该越来越多的人涌进西部种地。大规模的开垦造成了植被破坏, 黑钙土和褐土为主的南部大平原, 表土含沙较多, 并呈絮状结构, 极易因干旱和拖拉机耕作而被破坏, 从而变成为粉状物。常年受到山风、海风和极地强冷空气影响的大平原地区又拥有许多的大风天气。诸多因素综合在一起, 形成了美国20世纪30年代的生态悲剧。

(2) 20世纪50年代, 中亚哈萨克斯坦。

20世纪50年代, 苏联党和国家领导人赫鲁晓夫振兴农业的一个最为宏大的行动计划, 就是发动全民垦荒种粮。持续多年的轰轰烈烈的垦荒运动, 是响应赫鲁晓夫将一切经济工作首位的做法。但是在西伯利亚, 哈萨克斯坦辽阔的草原地带以及森林半草原地带, 由于没有采取必要的生态环境保护措施, 结果导致了影响苏联自身及欧洲国家的沙尘暴现象。1955年4月, 伏尔加河下游发生了一次密集强烈的白色盐(沙)尘暴, 当年第一次盐(沙)尘暴于4月10日, 发生在里海-咸海盆地整个地区。东风和东南风风速达到15~20米/秒, 在3000米的高度, 风速达50~60公里/小时, 气流卷起地面的粉尘和盐尘, 并搬移、漂浮到伏尔加河的中游、下游地区。好几个气象站记录了4月11日和12日两天粉尘、盐尘弥漫的干旱阴霾天气。在卡尔梅克加盟共和国的埃利斯塔城, 4月11日上午6时出现了盐(沙)尘暴, 下午4时达到最高峰, 直至次日下午5时停止。4月18日这一天, 哈萨克斯

坦西部风速达到15~20米/秒,有些地段高达20~25米/秒,几近飓风风力。风卷盐(沙)尘暴形成巨大的沙尘云团直袭哈萨克斯坦西北地区、北部地区和伏尔加河流域中上游地区;4月19日,盐(沙)尘暴抵达高尔基市,形成阴霾天气,能见度1000米。根据航空观测,盐(沙)尘云团高达3000~4000米,当干热盐(沙)尘暴出现在东南方向,刹那间,地面、物体、植被以及牲畜身上覆盖了一层略苦味道的白色沉降物,沉降物厚度达1~2毫米,有些地段达到2~4毫米。化学分析结果显示,沉降物主要是硫酸钠、氯化钠、镁盐、石膏颗粒和硅石颗粒物。如前所述,曾经发生过白色盐暴,但是,1955年4月18~22日的盐粉尘暴影响极大,危害范围达到50万平方公里。

(3) 20世纪30~80年代,加拿大。

加拿大是世界上第二大国,仅次于俄罗斯联邦。加拿大大草原地区由艾伯塔、萨克其万和马尼托巴三个省组成,总面积约1.96亿公顷,占国土总面积的19.6%。这里是世界上谷物产量最高的地区之一,占加拿大农业基地的80%。正因为大范围的垦荒,造成了地面状况的改变,加拿大没有真正的沙漠,但在大草原地区随处可以看到类似荒漠的景观。20世纪整个30年代,风蚀和干旱极为严重。就这一段时间来说,大草原地区的250个城市、700多万公顷土地受到了旱灾的影响。风蚀到底摧毁了多少农田,没有准确的记录。当时,土地表土被剥蚀的局面用“失控”形容一点不为过。20世纪30年代的这场大风和干旱也带来了蝗虫灾难。艾伯塔发生蝗虫的第一年,受到严重袭击的面积大约4100平方公里,到1939年,蝗虫袭击面积达到15.5万平方公里。萨克其万受到中度袭击的面积由1931年的4000平方公里,增加到26万多平方公里,超过全省国土面积的40%。沙尘暴和干旱摧毁了城镇和粮田,给人们的财产和粮食生产带来了不可估量的损失。以1988年的沙尘暴和干旱为例,直接生产损失估计达到18亿加元。加拿大政府花在这次灾难中的保险和补助金达14亿加元。各省政府也由于沙尘暴和干旱等自然灾害,遭受了粮食损失的巨额费用。平均来算,萨克其万省损失最为惨重,每年超过1.3亿加元(按1995年不变价计算),马尼托巴的粮食损失费用每年大约在3000 千万加元。据估计,大草原地区三省每年因风蚀花在农场上的开支大约为2.49亿加元。

(4) 20世纪70年代, 非洲大陆。

非洲的撒哈拉沙漠是世界最大的沙漠, 这里的沙尘对全球沙尘暴都有深刻的影响。20世纪60年代西非大规模扩大农作物耕种面积, 才导致了20世纪70年代的非洲撒哈拉地区的大旱灾。人口激增驱使人们扩大耕种面积, 农田面积的增加使牧场面积更加减少, 而牧畜量却有增无减, 只能进一步扩大放牧范围。这种连锁式的人类活动使原本多样性的植被破坏, 持续的单一块茎农作物耕种使土地的肥力下降, 土壤表层板结。土地失去了调节气候的功能, 风蚀和水蚀带来水土流失和干旱。人类对自然环境的过度干涉与异常气候相互迭加使生态环境轻而易举地崩溃, 并失去复原能力, 最终逐渐演变为一场持续的灾难。60年代末和70年代初(1968~1973), 发生在撒哈拉沙漠南部边界——苏丹—萨赫勒地区的干旱和荒漠化生态灾难, 是除了20世纪两次世界大战之外, 近百年人类史中最悲惨的灾难。英国牛津大学地质学院的研究记录表明, 自1900年以来, 英国共经历过17次撒哈拉沙漠降尘。埃尔·巴兹认为, 撒哈拉尘暴搬运的微细颗粒集中于大气层中1.5~3.7公里的高度上。每年有2500~3700万吨尘埃输送到赤道以北的大西洋地区, 有的穿过西经60°线沉降。有人研究发现, 海底沉积物中风吹来的沉降粉尘占20~75%, 陆地上有大面积的黄土及类似黄土的覆被层, 证明干旱、半干旱的沙漠地区不仅是沙尘暴的形成地, 也是粉尘、盐分向外输出的源产地。Duce (1983)、Martin & Gordon(1988)和Barrow (1991) 等人进一步确认, 每年参与地球化学循环的106吨磷元素中有一半以上是从撒哈拉沙漠以浮尘传输形式输送到北大西洋的, 而北太平洋95%的可用铁元素是通过大气环流过程从中国中部沙漠传输到海洋。

(5) 20世纪90年代, 澳大利亚。

澳大利亚是个干旱国家, 陆地面积的75%属于干旱和半干旱地区。由于许多地方气候干燥, 加上耕作和放牧, 土壤表层缺乏植被的覆盖, 导致了土地的逐渐沙漠化, 一旦刮起大风, 沙尘暴就会发生, 尤以澳大利亚中部和西部海岸地区的沙尘暴最为频繁。这些肆虐的沙尘主要是由于上世纪20年代, 澳大利亚许多地方的森林大遭砍伐, 成了炼矿的燃料。1788年以来, 澳大利亚被砍伐的树木高

达 200 亿棵,造成的直接后果就是降雨量减少,土地大面积裸露,继而引起沙尘暴。1993 和 1994 年发生在澳大利亚最严重的沙尘暴给东部沿海城市以及周围的城镇带来了毁灭性的破坏。1993 年,南澳东部的平原发生了一次大规模的沙尘暴。大量的土壤被大风吹蚀,降尘覆盖了澳大利亚东部和新西兰,绵延 1800 多公里。细小的土壤颗粒被卷入大气,导致尘土随着气流围绕地球环绕了三圈。1994 年也有类似现象发生。这些表土被大风席卷,以沙尘暴形式殃及澳洲大陆的大部分地区。南澳平均每年 8.5 天的沙尘天气,空气中的浮尘量足以引发哮喘病的爆发,据估计南澳 20%的哮喘病问题与空气中的浮尘有关。

大量研究业已表明,沙尘暴与土地荒漠化密切相关,全世界四大沙尘暴多发区(即中亚、北美、中非和澳洲)无一不是荒漠化重灾区。以古为鉴,可知兴替。历史的血的教训一次次的告诫我们,人类必须要重视沙尘暴,要研究它的一系列发生发展规律,去抑制它的进一步发展,同时在人力暂时无法克服的情况下,也要做好准确的预报工作,针对性的进行准备工作,把沙尘暴带来的危害尽可能的降到最低。

1.3 我国沙尘暴的研究进展

1.3.1 沙尘暴的空间分布

在我国,沙尘暴主要发生在北方,具有非常明显的地域性。王式功等利用筛选 1954—2000 年我国 338 个气象站资料及相关气候资料,分析指出 47a 来沙尘暴平均发生日数 10d 的区域主要分布在南疆盆地、河西地区及青藏高原东北部,其中塔里木盆地以及甘肃河西走廊东北部至内蒙古的阿拉善为两个多发区,前者多发中心在民丰,47a 平均年发生日数 35.8d,后者多发中心在甘肃民勤,平均年发生日数 28.1d。钱正安等补充了内蒙古中西部以及西北地区 1995 年以后的资料,初步得到西北及内蒙古中西部地区 1952—2000 年的 130 个强和特强沙尘暴个例序列,统计指出频数在 10 次以上的沙尘暴中心有 3 个,即以民勤为中心(达 43 次)的河西走廊及内蒙古阿拉善高原区,以和田为中心(42 次)的南疆盆地南缘区和以朱日和为中心(10 次)的内蒙古中部区。显然,前两个区域的沙尘暴频数要比内蒙古中部区明显偏多。周自江等统计分析了 1954—2002 年 49a 来我国北方

典型的强沙尘暴序列特征,表明强沙尘暴多发区主要位于南疆盆地、西北地区东部和华北地区。对于扬沙、浮尘等一般沙尘天气来说,其多发区与上述沙尘暴多发区分布基本上是一致的。李耀辉把我国沙尘暴的发生区域总体归纳为:我国沙尘暴主要集中在北方地区,南方几乎没有;北方又以西北地区为最多,多发区主要分布在两大区域:以和田和民丰为中心的南疆盆地及其附近地区以及以甘肃河西走廊(民勤)为中心的河西走廊、阿拉善高地到腾格里沙漠地区,这两个区域年平均沙尘暴日数/次数在 10d/次以上。另外华北地区和青海柴达木盆地也是两个沙尘暴相对多发区域。

以上地区基本上就是我国沙尘暴主要发生次数较多和强度较大的区域,是需要重点监测和防范的地区。同时也是我国沙漠边缘地区和荒漠化程度比较高的地区。

1.3.2 沙尘暴的时间分布

我国对沙尘暴有正规记录是 20 世纪 50 年代左右开始的,对我国沙尘暴总体演变趋势的研究发现:自 20 世纪 50 年代以来,我国沙尘暴发生次数或沙尘暴日数总体上呈波动减少趋势,其中 50 年代最多,60-70 年代波动上升,80-90 年代波动减少,90 年代最少,2000-2002 年又相对偏多。以上的观点是大多学者的共识。但对个别的地方,其变化趋势有所出入。邱新法对 1971-1996 年我国沙尘暴多个站点的年际变化分析,发现在中国大部,沙尘暴明显减少。但在有些地区沙尘暴(如青海西南部沱沱河等)没有明显变化,在有些地区沙尘暴甚至呈增长趋势(如青海的西北部和东北部部分地区,内蒙古的西部沙漠地带等)。这些可能是由于局部地区人类活动导致土地条件和周围环境恶劣,使个别地区荒漠化加剧,导致沙尘暴发生次数与总趋势相反。

我国沙尘暴的季节和月份变化特点是:春季最多,约占全年总数的 1/2,夏季次之,秋季(新疆地区为冬季)最少;按月份来看,4 月份发生频率最高,3 月和 5 月份次之,秋季的 9 月份(新疆为 12 月或 1 月份)最低。有些个别地方可能稍有不同。刘景涛等对内蒙古中西部地区的分析结果表明,4 月份沙尘暴出现频率最高,春季(3~5 月)占全年的 73%。墨西哥城的沙尘暴是 3 月份发生频率最高,一

一般在连续 3 个月降水量小于 13mm 的 3 月份, 容易出现沙尘暴, 在秋季的 9 月份出现频率最低。在印度西北部的沙尘暴也主要发生在 4~6 月份, 这与我国新疆境内沙尘暴的多发期一致。之所以我国在春季沙尘暴多发, 这个由于产生沙尘暴有沙尘源、强风和不稳定的大气层结三个条件。其中强风是沙尘暴产生的动力, 沙尘源是其物质基础。在春季冷空气和气旋活动比较频繁, 与之相伴形成的大风是沙尘暴的启动因子, 春季干旱少雨是我国北方地区的大气候特征, 持续干暖的气候又造成了土质疏松, 这又具备了沙尘暴的物质基础。因此春季是沙尘暴的多发季节。沙尘暴也具有明显的日变化特征, 王式功等对 1994 年 4 月上旬我国西北地区沙尘暴发生频率日变化的研究表明: 沙尘暴主要发生在午后到傍晚时段内, 占总数的 65.14%; 清晨到中午时段内, 仅占 34.16%。在甘肃河西走廊中部地区, 黑风暴大都出现在中午 12 时至晚上 22 时的时段内。出现这种分布式在晴空少云和情况下, 受太阳强烈辐射, 中午前后近地面气层受热, 处于热力不稳定状态, 十分有利于空气对流发展和上下动量和能量的交换, 使大气中带起的沙尘粒子, 卷扬得更高, 传播得更快。若遇上冷暖气团交绥的锋面过境, 锋区附近强烈的抬升作用以用能量和动量的交换, 加上气层的热力抬升作用, 很易形成强沙尘暴天气。所以春季, 特别是春季的午后至傍晚, 往往形成沙尘暴天气。

总体上, 除了个别地方由于人类活动导致荒漠化的加剧会有不同的趋势, 现在沙尘暴的总的发生次数是呈下降趋势。沙尘暴容易发生在冬春交替, 冷空气南下的季节, 在午后至傍晚这段时间更容易形成强沙尘暴天气。

1.3.3 影响沙尘暴的天气系统

沙尘暴是一个多因素导致的, 除了具备大气候背景和满足下垫面条件的情况下, 还需要大气环流和天气系统的配合。通过判断天气系统的发展形势, 也是现在主要对沙尘天气进行预报的手段。Brazel^[39]分析了美国亚利桑那州 1965-1980 年期间沙尘爆发时的各种天气特征后指出, 4 种天气系统: 锋面系统, 雷暴与对流, 热带扰动, 上层切断低压易导致沙尘暴的产生。王式功^[2]等通过对我国西北地区几次大范围强或特强沙尘暴天气过程的分析, 认为易产生沙尘暴的主要环流形势和天气系统有: 经纬向环流调整、冷锋活动、低空东风急流、中尺度系统。

江吉喜等通过对 7 次特强沙尘暴的研究认为,强沙尘暴天气的发生一般可分为 3 种方式:锋前飚线引起的强沙尘暴,它是西北和华北北部地区最主要的一种强沙尘暴;锋尾强对流云团引起的强沙尘暴,此种强沙尘暴的特点是强度特强,但影响范围相对较小;锋前强对流云团引起的强沙尘暴,以这种方式形成的特强沙尘暴出现频率较小,但影响范围却较大。胡隐樵等研究了干飚线和强冷锋前干飚发展同黑风暴爆发后的关系后指出,由于强冷锋过境时冷锋前干飚线移至被强烈太阳辐射加热的地表以及条件不稳定大气层结地区,干飚线进一步发展致使黑风暴爆发。刘景涛^[40]等使用 1957-1996 年及 2001 年和 2002 年共 42 年高空和地面天气图资料,在期间发生在我国北方的 33 次不同范围的特强沙尘暴过程的天气系统进行了分析研究,把影响我国北方特强沙尘暴的天气系统分为纯冷锋型,蒙古气旋与冷锋混合型,蒙古冷高压型和干飚线与冷锋混合型 4 种类型。牛生杰^[4]对贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子进行了研究,认为产生沙尘暴的阈值风速在 5m/s 左右,空气的水平运动并不能直接引发沙尘暴,尤其是强沙尘暴。中国发生的沙尘暴均伴随大中尺度天气系统,主要是冷锋。

沙尘天气的本质是地面的沙尘颗粒被大风吹到空中,然后伴随着大风发生迁移造成的。追究沙尘天气的根本起因是在沙尘源地,垂直方向上有不稳定大气,产生较大的垂直风速,致使能量的交换,使地面的沙尘颗粒脱离地面,把动量向下游传输,在同一次过程中,粒径小的传输的较远,粒径大的传输的较近。有很多学者发现春季的气旋活动频繁和沙尘暴的发生有很好的对应关系,也是这个原因造成的。天气系统为沙尘暴的发生提供了动力因素和背景环境,是沙尘暴过程中非常重要的一环。

1.3.4 移动路径和影响区域

我国北方春季的沙尘天气与冷空气活动产生的大风相伴出现,冷空气影响我国的路径主要有三条。东路:从蒙古国东、中部南下,影响我国东北、内蒙古东部、中部和山西、河北及其以南地区。中路:从蒙古国中西部南下,影响我国内蒙古中西部、西北东部、华北中南部及以南地区。西路:从蒙古国西部和哈萨克斯坦东北部东移,影响新疆在内的西北、华北及以南地区。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。

1.3.5 影响沙尘暴的环境因子

环境因子对沙尘暴的影响是非常重要的,沙尘暴是土壤荒漠化的一个重要的指标。宋阳^[41]等利用中国北方农田,草地,沙地,戈壁,盐壳等5种不同下垫面15个气象站点40年的大风与沙尘暴日数气象数据,对这5种下垫面大风日数与沙尘暴日数之间的关系进行了定量研究。通过分析初步得出:大风日数与沙尘暴日数之间存在着一定的相关关系。下垫面对沙尘暴有重要的影响,不同下垫面的沙尘暴日数存在着较大的差异。草地、戈壁、盐壳的沙尘暴日数明显少于大风日数,沙尘暴日数的年际变化较小,农田与沙地的沙尘暴日数明显增多,甚至在许多年份中多于大风日数。这种差异是由不同下垫面对沙尘暴的影响机制决定的。达布希拉图等分析了下垫面因子对内蒙古中西部沙尘暴时空分布的影响,指出下垫面状况的恶化,使沙漠化地区和沙漠化发展区正在成为新的沙尘暴源地。范一大等通过对中国北方沙尘灾害影响因子的分析,得出了以下结论:在影响沙尘暴发生、发展、演化的自然因子中,植被覆盖度、降水、大风日数和温度起关键作用,夏季植被覆盖度对来年春季沙尘暴发生频次影响较大,降水和温度主要表现在对地表植被覆盖等与沙尘暴有关的地表参数的影响;大风日数和温度是沙尘暴形成的动力因子,植被覆盖度和降水是阻力因子。沙尘暴日数和持续时间的变化,主要取决于动力因子与阻力因子的综合作用;同时指出了遏制沙尘灾害的治本办法,不在于治理沙尘暴本身,而在于消除产生土地退化、生态安全下降的社会原因,处理好发展与生态环境建设的关系。

下垫面为沙尘天气的生成提供了物质条件,潮湿,多植被的地面使得土壤粒子抬升的力增大,沙尘粒子的临界摩擦速度增大,使得起沙的条件更苛刻。而且高大的树木对上游传输的沙尘颗粒也起到很好的阻碍作用。因此不同的下垫面条件以及对下垫面状态产生影响的一些气象因素都能从侧面对沙尘暴进行反映。

1.3.6 沙尘暴研究的方法和手段

最初,对沙尘暴没有专门的记载,只能从地方志和文学资料等其他相关资料

收集。我国是从20世纪50年代才开始有沙尘暴专门记录的,当时观测项目和手段非常有限。进入九十年代以后,随着人们对沙尘暴的重视,越来越多的新的先进仪器和研究设备被引进来了。有关沙尘暴的资料和研究也越来越多。从不同的研究手段和方法来划分,可以分为站点观测,卫星遥感和模式三个方面。

站点资料研究的时间相对最长,分布最广,资料的利用率也是最高的。从沙尘天气的发生天数,发生时间,持续时间,影响范围,可见度到沙尘过程中沙尘浓度的变化监测等,再配合上温、压、湿、风等常规气象资料,可以对沙尘过程进行详细的描述。钱正安,王式功等对我国沙尘暴的发生的区域、频次、年际变化趋势等进行了研究。牛生杰等对2004年春夏两次沙尘暴期间地面气象要素变化特征进行了对比分析。赵光平,魏文寿,等学者分别对宁夏、新疆、甘肃等区域的沙尘暴进行了研究。随着沙尘暴研究的深入,越来越多的先进仪器的应用,对沙尘暴的观测项目,研究角度也扩大了。沙尘粒子的大小、化学组成成分、光学特性等都有专家进行了分析,并取得了一定的成果。牛生杰将APS23310型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪安装在飞机上,对中国西北沙漠地区上空气溶胶进行了探测。张锦春等借助自行研制的近地面沙尘暴监测系统,对沙尘暴气溶胶进行了监测,考察了近地面沙尘暴发展规律,填补了国内该项研究的空白。通过对不同下垫面条件下和不同高度层次上的沙尘暴气溶胶浓度时空变化特征进行分析,探讨民勤沙尘源区风速、沙尘暴持续时间及下垫面条件对沙尘气溶胶浓度的影响。王雁鹏等利用激光雷达对2005年春季北京地区沙尘天气进行了连续观测,表征了沙尘气溶胶的时空分布及沙尘天气特征。曹贤洁等利用微脉冲激光雷达CE370-2与太阳光度计CE-318,在兰州观测分析了2007年3月27-29日扬沙过程沙尘气溶胶辐射特性。

国外对沙尘暴的遥感监测研究始于20世纪80年代的NOAA/AVHRR传感器。目前的遥感监测主要利用静止气象卫星(GMS/VISSR)和极轨气象卫星(NOAA/AVHRR)两大卫星遥感系列数据。Griggs、Shenk和Curran等开展了利用卫星的可见光和红外波段监测陆地和水体上空的沙尘及其相关的一些研究。Carlson利用卫星观测的亮度资料确定了撒哈拉地区沙尘的爆发及其相应的大气

扰动。我国的研究与应用工作从 20 世纪 20 年代末开始,裴浩利用 NOAA/AVHRR 第 1,2 通道探测之对沙尘区的相对沙尘浓度进行了分层。章伟伟等采用 EOS-Terra/MODIS 数据对内蒙古的沙尘暴进行了监测研究。厉青等通过分析沙尘暴的波谱相应特征及通过分析沙尘暴的波谱响应特征及 EOS-Terra/MODIS 传感器通道的特点,阐述了利用 EOS-Terra/MODIS 进行沙尘暴监测的机理,提出了利用 MODIS 进行沙尘暴监测的热红外双通道差值法、三通道彩色合成直方图均衡增强法及基于双通道域值的叠加分析法,并进行了示范比较研究。厉青,王桥等人探讨了以 MODIS 为数据源进行沙尘暴监测的业务化技术流程及方法,进行对沙尘信息提取及等级划分的示例研究。为卫星遥感监测沙尘提供了新的数据源和监测途径。韩涛,李耀辉,郭妮等人在 EOS/MODIS 资料可见光波段光谱特性的深入研究分析的基础上,提出了一种完全用 MODIS 可见光波段监测沙尘信息的技术方法,并成功地对几次沙尘暴过程进行了沙尘信息遥感监测,取得了良好的效果和实用性。

数值模拟是近些年发展起来的一种新的研究手段,Cautenet 利用中尺度模式对西非尼日尔首都尼亚美上空来自撒哈拉沙尘的热力影响进行了数值模拟,获得了令人满意的结果,认为大气中的沙尘含量和辐射特征是最有意义的参数。申绍华、陈受钧分别利用二维和三维数值模式研究了沙尘暴爆发时,沙尘辐射强迫的锋生过程和孤立的沙尘暴辐射效应对锋面环流的影响。程麟生和惠小英等分别对我国西北“93.5”黑风暴发展成因与沙尘输送进行了中尺度数值模拟。程麟生等还利用改进的 MM4 和高分辨行星边界层(PBL)参数化及 40km 细网格基本上模拟出“93.5”黑风暴的结构和演变。利用大气环流模式研究了沙漠沙尘和南极洲的海盐气溶胶的特征。程海霞等利用 MM5 模式对 2001 年 4 月的双急流型沙尘暴天气过程进行了数值模拟和诊断分析。在应用方面,兰州干旱研究所的 GRAPES_SDM 模式已经经过业务化处理,并对几次沙尘过程进行了很好的模拟。

沙尘暴对人们的生命和财产造成很严重的影响,研究其产生规律和机制等可以有效的对其监测和预报。可以基于对起沙机制的研究,针对性的采取一些积极措施,减少沙尘暴的发生次数,改善人们生活的环境质量。纵观其他国家,沙尘

暴的肆虐和随意垦荒有非常紧密的联系。不合理的垦荒破坏了当地原有的环境链条，影响了生态平衡，造成水土流失，带来了一系列的自然灾害。研究沙尘暴，并不是让我们可以随意破坏环境而又不必付出严重的代价，而是为了更好的保护环境，更好的改善周围环境，使人类和环境能更好的和谐共荣。

第二章 研究区域, 资料和方法

我国沙尘暴主要发生在北方, 西北地区是重灾区之一, 发生沙尘暴的频次和强度都较高。每年春季是沙尘暴肆虐的时期, 这个时候地表植被稀少, 冻土开始融化, 同时冷空气南下, 大气稳定度下降, 这些都为沙尘暴的发生提供了先决的条件。受峡管作用的影响, 风速经过西北河西走廊区域时会有明显的增大现象, 为沙尘暴的发生提供了强大的动力条件, 使得这一地区成为我国沙尘暴发生次数最多的地区之一。而民勤县由于位于两大沙漠之间, 周围环境比较恶劣, 因此又是河西走廊地区沙尘天气出现的频次最多的地区。

本文主要研究区域是西北河西走廊的民勤地区。民勤县地处甘肃省河西走廊东北部, 石羊河流域下游, 南依武威, 西毗镍都金昌, 东北和西北面与内蒙古的左、右旗相接具体地理位置在东经 $101^{\circ}49'41''$ — $104^{\circ}12'10''$ 、北纬 $38^{\circ}3'45''$ — $39^{\circ}27'37''$ 之间。东西长 206 公里, 南北宽 156 公里, 总面积 1.59 万平方公里。全县最低海拔 1298 米, 最高海拔 1936 米, 平均海拔 1400 米, 由沙漠、低山丘陵和平原三种基本地貌组成。处于河西走廊位置, 位于发源于祁连山的石羊河流域的下游, 地处阿拉善高原的巴丹吉林与腾格里沙漠之间, 为中国典型的沙漠绿洲地区。地势四周高, 中部低, 具有盆地特征, 海拔为 1300—2000m。气候属温带干旱型, 特点是冬季长而寒冷, 夏季短而炎热, 降水少而蒸发量大, 风沙大, 日照长。年降水量仅 109mm, 而蒸发量高达 2600mm。全年日照 3000 多小时, 风力一般为七级, 最大为十一级。自然植被较差, 无天然森林, 在山地与沙漠地带有稀疏的沙、碱生植物。民勤地处石羊河流域最下游, 西、北、东三面被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围, 由于石羊河上游祁连山水源涵养能力降低和中游用水激增, 每年进入民勤的地表水由上世纪 50 年代的 5.9 亿立方米减少到现在的 1.0 亿立方米。目前, 民勤的荒漠化面积已占土地面积的 94%, 荒漠边缘以每年 3 至 4 米的速度向绿洲推进。

本文分别利用站点观测资料, GRAPES_SDM模式和遥感资料对沙尘暴进行分析。其中地面观测资料是从甘肃省气象局信息中心提供的民勤站的逐年, 逐时

的温度和风速数据, 每5分钟一次的沙尘暴特种观测资料和1951-2009年的沙尘暴发生次数和时间的统计观测资料。GRAEPS_SDM是模式是中国气象局兰州干旱气象研究所和中国气象科学研究院数值预报研究中心合作研制, 耦合于GRAPES模式的沙尘模式。输入场为中国气象局下发的每6小时一次的T213资料, 具有同化系统, 可以引入MICAPS资料进行同化。输出场的的数据包括常规气象要素风速、温度、湿度、位势高度、10m风、地表温度、地表气压、降水、长短辐射、感热、潜热、沙尘变量、沙尘浓度、地面沙尘浓度、起沙通量、干湿沉降通量、摩擦速度、临界摩擦速度、粗糙度、沙尘覆盖等。以GRAPES_SDM为主体的沙尘模式业务系统已经在甘肃省中心台业务化处理, 并对沙尘暴的预警起到很重要的作用。这套系统在在周围几个省区也进行了推广应用。目前西北沙尘暴遥感监测业务服务中存在以定性图像为主, 服务产品较为单一的问题, 干旱所依托项目开展了MODIS资料监测沙尘暴的范围和对强度进行定量判识的研究, 构建了定量判识沙尘暴范围和强度的两个沙尘指数。通过历年数次沙尘暴过程沙尘指数的判别效果验证后, 进行MODIS沙尘暴判识方法的业务化工作, 并结合GIS进行沙尘暴影响范围的分析, 开发研制了MODIS沙尘暴监测和影响评估业务系统。系统生成沙尘暴MODIS影响图, 沙尘暴范围和强度遥感监测图, 沙尘暴影响土地类型图, 全国各省(直辖市)沙尘面积统计表, 全国不同土地类型沙尘暴影响面积统计表, 甘肃省各县沙尘暴的影响面积统计表和甘肃省不同土地类型沙尘影响面积统计表等功能, 为沙尘暴定量和精细化服务提供了丰富的产品。本文所用遥感资料是甘肃省气象局遥感中心接受的卫星资料, 选取了10年4月24日黑风暴过程的卫星资料, 经过处理后利用兰州干旱气象研究所在华云MODIS资料处理显示系统上二次开发完成的沙尘暴遥感监测系统来显示。10年“4.24”黑风暴是民勤县近十三年来最大的一次沙尘过程, 造成全县各类直接经济损失达2.5亿元。其中: 大田作物受灾面积37.5万亩, 直接经济损失8176万元; 日光温室受灾面积5660亩, 直接经济损失2842万元; 小拱棚受灾面积3万亩, 直接经济损失6575万元; 造成畜牧业直接经济损失691万元; 造成电力设施直接经济损失2472万元; 造成林业直接经济损失375万元; 造成交通直接经济损失171万元; 造成水利工程直接经济

损失2357万元；造成城市基础设施直接经济损失970万元；发生火灾13起，涉及11个社、87户，造成经济损失360万元，5人轻度受伤。这次沙尘过程也具有很典型的研究意义。分别用三种不同的方法对这次过程的强度和范围进行了分析，比较其结果，对其特点进行了分析。

第三章 民勤沙尘暴的统计分析及其“4.24”黑风暴过程

民勤县地处甘肃省河西走廊东北部,南依武威,西毗金昌,东北和西北面与内蒙古的左、右旗相接,总面积 1.6 万 km^2 ,总人口 30.4864 万。具体地理位置在 $101^\circ 49' 41'' \sim 104^\circ 12' 10'' \text{E}$ 、 $38^\circ 3' 45'' \sim 39^\circ 27' 37'' \text{N}$ 之间。东西长 206km,南北宽 156km,总面积 1.59 万 km^2 ,是位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的唯一一块绿洲。近年来,民勤县唯一的地表径流——石羊河上游来水锐减,甚至河流干涸断流。民勤人民赖以生存的亚洲最大的沙漠水库——民勤县红崖山水库于 2004 年 5 月首次全面干涸,地处石羊河流域末端的民勤已成为全国乃至全世界最干旱、荒漠化危害最严重的地区之一。温家宝总理就民勤的生态问题先后 4 次做出重要批示,“决不能让民勤成为第二个罗布泊”。国内外许多著名专家学者指出“在地理和环境梯度上,民勤处于全国荒漠化监控和防治的前沿地带,阻隔巴丹吉林和腾格里两大沙漠合拢,是中国西北部风沙线上的一座“桥头堡”。“民勤绿洲的存亡关系河西走廊的安危,如果民勤绿洲不保,必将危及河西,河西不保,必将危及中国”。因其特殊的地理位置,民勤地区成为了是我国沙尘暴多发地区之一,环境条件极其恶劣。另一方面,频繁发生的沙尘暴也为沙尘暴的观测研究提供了丰富的前沿资料,该地区也成为了研究沙尘暴的热点地区。通过对民勤沙尘暴的发生规律的科学的研究,对我国沙尘暴的研究,西北地区荒漠化等提供了重要的参考价值。民勤处于与沙尘暴斗争的第一线的位置,对该地区沙尘暴的研究有非常现实的意义。本文就主要是针对甘肃省民勤县地区进行研究讨论。

利用民勤气象局提供的 1971~2009 年的沙尘暴爆发的统计资料,用数学方法对该地区沙尘暴的年际发生频率和周期变化进行研究,阐述了沙尘暴爆发的年际变化规律。需要注意的是,在数据的统计方面,由于不同时期采用了不同的沙尘暴的标准。些浮尘和扬沙天气可能也被误统计为了沙尘暴,这会对研究结果产生一些影响。最后,利用 NECP/NCAR 再分析资料,对

典型年份的天气形势进行了分析讨论。



图 3.1 民勤地理位置

3.1 民勤地区沙尘暴发生的年际特征

根据民勤气象局提供的数据,分析了包括最近几年的沙尘暴统计资料。如图 1 所示,在沙尘暴爆发频次的总趋势上,年发生次数是呈线性递减的。从 1970 年代的平均每年 35 次左右到最近几年的年发生次数不足 10 次,一些学者对全国的总的沙尘暴年爆发次数的趋势进行了研究,与本文结论是相吻合的。其中在民勤县,1979 年一共出现 43 次沙尘暴过程,是研究的时间范围内发生沙尘暴最多的一年,其次是 86 年,一共出现了 42 次。1987 年之后进入了一个新的阶段,沙尘暴的年爆发的频次有了大幅度的降低,1997 年达到一个最低值,一共只发生过 5 次沙尘暴过程。进行多项式拟合,得到的如图中黑粗线所示曲线,反映了民勤地区沙尘暴爆发的年代际变化规律。在沙尘暴的发生次数逐渐递减的形势下,在一段时期内又会有波峰-波谷的振荡型变化。1970 年代到 1980 年代末是一个变化阶段,沙尘暴频繁爆发,1990 年代到现在是另一个变化阶段,这一时期的沙尘暴爆发的最高次数甚至低于七八十年代的最低次数。如果未来按照这个规律发展,现在正接近沙尘暴爆发的相对低谷时期,按照这个趋势,在未来的几年,沙尘暴的爆发频次的趋势会逐渐增加,进入一个沙尘暴发生的相对活跃期。

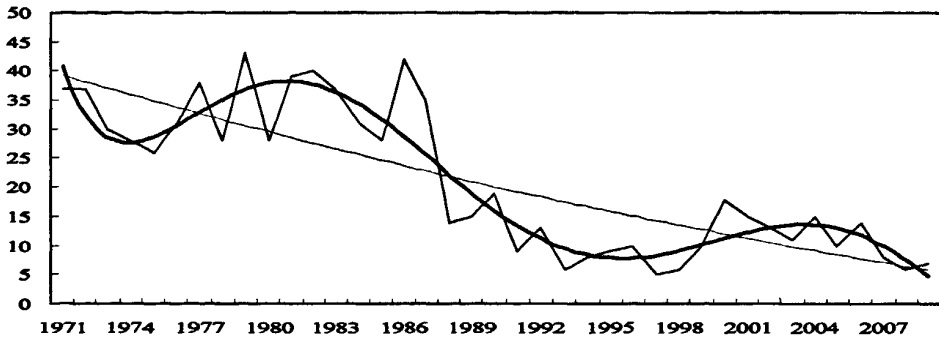


图 3.2 1971—2009 年民勤地区沙尘暴全年发生次数统计

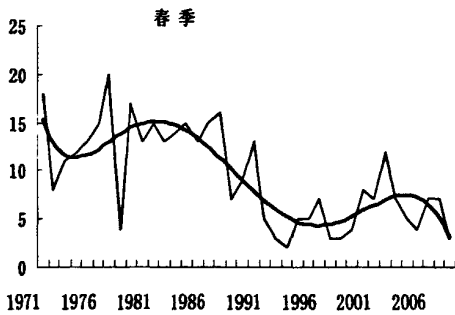


图 3.3 民勤地区沙尘暴春季发生次数统计

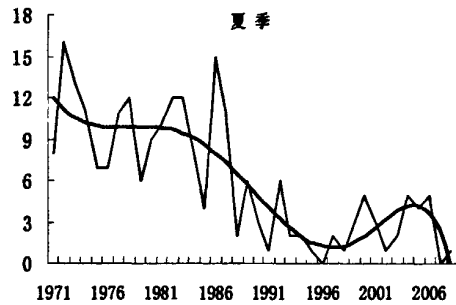


图 3.4 民勤地区沙尘暴夏季发生次数统计

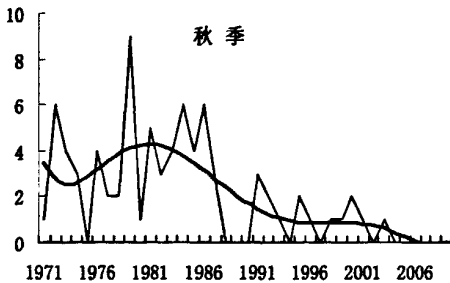


图 3.5 民勤地区沙尘暴秋季发生次数统计

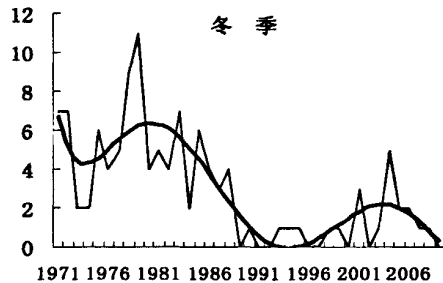


图 3.6 民勤地区沙尘暴冬季发生次数统计

图3~6分别是春夏秋冬四个季节的沙尘暴爆发的年分布。总体上,所有的季节沙尘暴的爆发趋势都是趋向于降低的,和总趋势一致。每个趋势线在一段时间内都存在波峰—波谷的上下波动,虽然其幅度有差别,但其出现波峰波谷的年代基本上都是相同的,说明在长的时间尺度上,各个季节的沙尘暴的频次变化的趋势具有一致性。与图1比较,春季爆发沙尘暴的次数相比其他季节更多,而且其

变化的趋势与全年的吻合程度最高,具有非常好的代表性。王式功等认为沙尘暴主要发生在春季和初夏季节是由于有土壤表层疏松、冷空气活动频繁和午后大气层结易不稳定等5个方面的原因。在很多的研究中,为了忽略其他次要因素的影响,常常用春季来代表整个年份,这对研究有很大的帮助作用。

3.2 民勤沙尘暴发生的 Morlet 小波变化分析

图 7 为 1971~2009 年年沙尘暴爆发次数的小波图。所有小波系数图的上半部分等值线相对稀疏,对应较长时间尺度周期振荡(低频振荡),而下半部分等值线相对密集,对应较短尺度周期振荡(高频振荡)。图中实线中心对应的横坐标是沙尘暴爆发次数比较多的年份,虚线中心是沙尘暴爆发相对比较少的年份,闭合曲线中心的纵坐标则代表着周期性。由图可知,沙尘暴年爆发在中小尺度上存在着明显的 5 年的周期变化,部分年际存在着 7.5 年的周期变化,大尺度上则存在着 15 的周期变化。这一结论与统计上的结果有很好的对应性。

图 8 分别是对四季的沙尘暴的爆发分别作的小波分析。由图中可以看出来,春季沙尘暴的爆发在小尺度上周期为 5 年,中尺度上没明显的周期性,大尺度上有 15 年的周期变化;夏季小尺度上在 90 年代之前有着明显的周期为 5 年的变化,之后周期变为 6 年。中尺度上部分区域有不明显的 10 年的周期变化,大尺度上周期为 13.5 年;秋季小尺度上有周期为 4 年和 7 年的变化,中尺度上没明显周期性,大尺度上周期为 15 年;冬季有明显的周期 8 年,更小尺度上有部分的周期为 4 年的变化,大尺度上没有周期性。以上分析均通过了 0.05 的显著性检验。通过对周期性的分析,发现沙尘暴在小时间尺度上一般周期为 5 年,大尺度上周期为 15 年,其他的周期性不明显。个别季节会有稍微差别,但差距不大。与年沙尘暴爆发次数的小波图形比较,春季的小波图与之最相似,周期性也最匹配。同时也进一步说明了,春季的沙尘暴对全年具有很好的代表性。夏季的小波图与年沙尘暴发生次数的小波图也较相似,但在小尺度上周期在 96 年以后有一个跳跃,大尺度上周期性偏小;秋季的小尺度上的周期明显较大,大尺度上比较吻合;冬季衍生出了 4 和 8 的周期,在大尺度上没有周期,与年沙尘暴发生次数的小波图偏差最大。

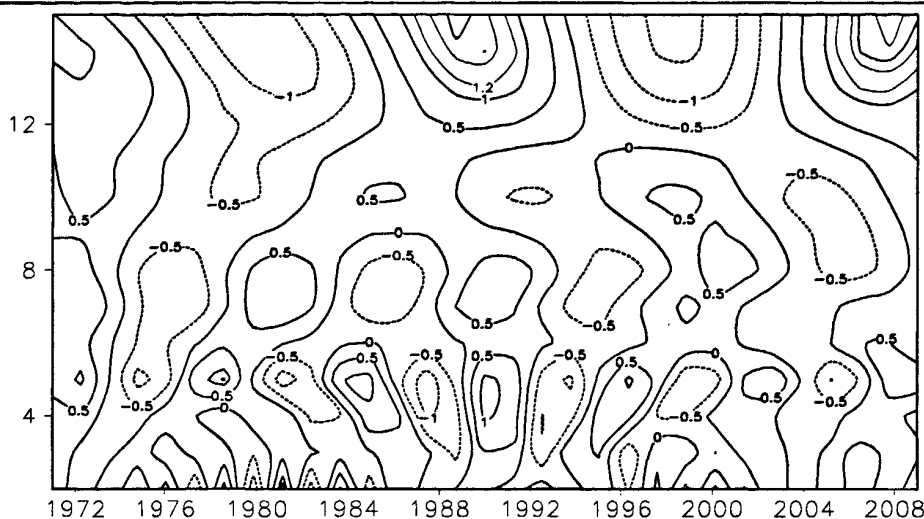


图 3.7 1971~2009 年沙尘暴爆发频次的小波图

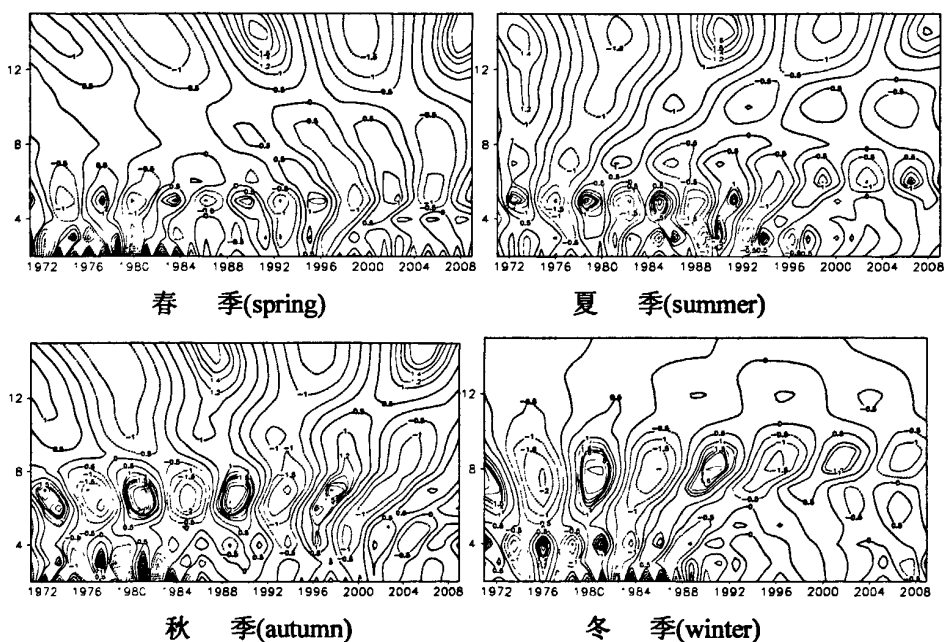


图 3.8 1971~2009 年春, 夏, 秋, 冬沙尘暴爆发频次的小波图

3.3 沙尘暴的影响因子综述

现在一般公认的产生沙尘暴的条件有三个, 丰富的沙尘源, 大风和层结不稳定。民勤县位于河西走廊东部的石羊河下游, 地势四周高, 中间低, 中间盆地的东、西、北三面被腾格里和巴丹吉林沙漠包围, 为沙尘暴的爆发提供了丰富的沙尘源。该地区大部分地方平坦, 开阔, 境内沙漠, 戈壁, 盐碱滩地和剥蚀残丘占

全县土地面积的 91%。这种地貌没有树木等固沙植被的存在,也不能对刮起的风沙起到减弱和阻碍作用,非常有利于沙尘暴的爆发和发展。

当气流由开阔地带流入地形构成的峡谷时,由于空气质量不能大量堆积,于是加速流过峡谷,风速增大。当流出峡谷时,空气流速又会减缓。这种地形峡谷对气流的影响,称为“狭管效应”。河西走廊位于我国西北地区,这一区域是我国冬、春季冷空气南下的通道了,因此经常出现大风天气。并且是西北向的狭长地形,属于典型的“狭管效应”影响区域,更容易生成大风天气。民勤位于这河西走廊,大风天气出现的非常频繁,丰富的风力资源为沙尘暴的产生提供了动力条件。再加上民勤地处腾格里和巴丹吉林沙漠的中间地带,具有丰富的沙尘源,而其他地方则不具有如此恶劣的环境。民勤地区长期依赖的石羊河上游水位的下降,地表状况每况愈下,因此民勤地区是西北河西走廊地区沙尘暴发生的最多地区,也是研究的最典型区域。

沙尘暴一般是发生在午后至傍晚这一时间段,在这段时间地面升温比较快,大气稳定度比较差,层结不稳定,容易产生空气的对流。民勤的地表状况恶劣,植被水分等可以对温度进行调节的影响因子很小,地表升降温相比之下更快,层结不稳定,空气的对流也更容易发生,起沙更容易,起沙的强度也更大。

影响沙尘暴的因子很多,例如大风,温度,下垫面类型,降水等。很多学者就对影响沙尘暴的因子进行了详细的研究,并结合沙尘暴明显的爆发次数降低的趋势也进行了一些解释。李栋梁等认为,沙尘暴持续减少的主要原因是全球气候变暖的大背景下,西风急流轴向北移动,蒙古气旋减弱,冷空气活动减弱,风速减小,热带暖湿系统向北移动,西北西部降水的增加导致的。张宝军等利用民勤气象站的1956~2000年的气温观测资料统计分析,发现民勤年均气温呈上升趋势,10年平均增幅约为 0.305°C 。20世纪90年代升幅明显。对四季的温度上升进行分析,发现对增幅贡献大小的顺序为冬,秋,春,夏。常兆丰,韩富贵等研究了1961—2007年的温度和降水资料,结果表明,民勤近47年的平均气温增高幅度高于全国水平,且2月份的平均气温增高 3.01°C ,幅度明显。当地的降水增加趋势

不明显,干旱期占据植物的整个生长季节。宋阳,刘连友等利用中国北方农田,草地,沙地,戈壁,盐壳5种不同下垫面15个气象站点40年的大风与沙尘暴日数气象数据,对这5种下垫面大风日数与沙尘暴日数之间的关系进行了定量研究,初步得出,大风日数与沙尘暴日数之间存在着一定的相关关系。下垫面对沙尘暴有重要影响,不同下垫面的沙尘暴日数存在着较大的差异。张克存,屈建军等分析了民勤地区沙尘暴与大风日数,降水等因素之间的关系,得出每年沙尘暴发生次数与大风日数之间的相关性非常显著,降水量多的年份对应的沙尘暴会相应的减少,但20世纪80年代以前这种反相关不是很明显,80年代后反相关性非常的良好。王建,李文君等对30年的民勤土地荒漠化变化的遥感分析,得出近年来民勤县的荒漠化土地面积呈增加的趋势。

通过以上研究,针对民勤地区的状况,荒漠化和沙化的程度在加剧,但是沙尘暴的爆发次数却呈现出逐步递减的趋势,下垫面状况越发恶劣,沙源扩大的同时沙尘暴爆发次数却在递减,下垫面状况与沙尘暴的爆发出反相关,看似这与理论分析的结论相反,其实不然。这说明在民勤地区,下垫面状况长期非常恶劣,很容易满足起沙的条件,下垫面已经不是制约沙尘暴发生发展的最主要因素。沙尘暴的爆发受其他因素的制约,即动力因素和稳定层结成为了影响沙尘暴的主要因素。^[43-48]

3.4 民勤“4.24”黑风暴过程及其观测资料的分析

2010年4月24日左右,我国西北地区发生了一次非常强烈的沙尘过程。甘肃省是重灾区之一,全省有14个观测站出现大风沙尘天气,其中鼎新、临泽、张掖、民乐、民勤、酒泉出现特强沙尘暴,酒泉、民勤最小能见度为0m;山丹、高台、金昌出现强沙尘暴,最小能见度200m;敦煌、玉门、金塔、肃南、肃北出现沙尘暴,能见度600-900m。4月24日19时09分和20时,民勤两次出现“黑风”,能见度一度达到0米,瞬间极大风速达到28米/秒(10级)。

3.4.1 “4.24”沙尘暴过程天气形势分析

10年4月24在甘肃民勤等出现了罕见的黑风暴天气,是近13年来强度最大的一次过程。分析其500hpa环流形势,东亚地区为两脊一槽型,高空槽为近

南北走向, 高空槽区狭窄深厚, 槽前后冷暖平流强盛, 槽前脊后为强劲的偏北气流。23 日 08 时 500hpa 高空图上乌拉尔山高压脊发展, 其西部的暖平流加强并向东输送, 高压脊前暖平流的动力加压作用使高压脊向东北方向加强发展, 促使

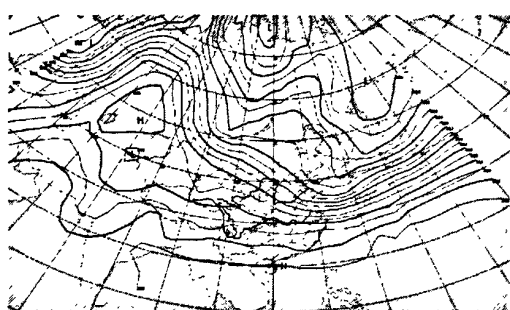


图 3.9 2010 年 4 月 23 日 08 时 500hPa 高度场

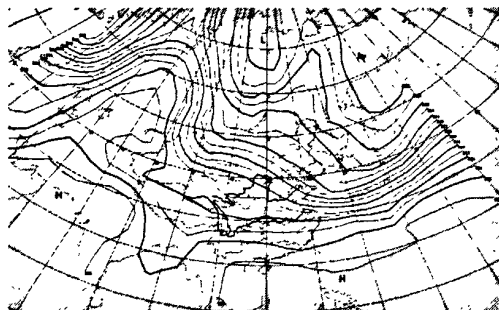


图 3.10 2010 年 4 月 23 日 20 时 500hPa 高度场

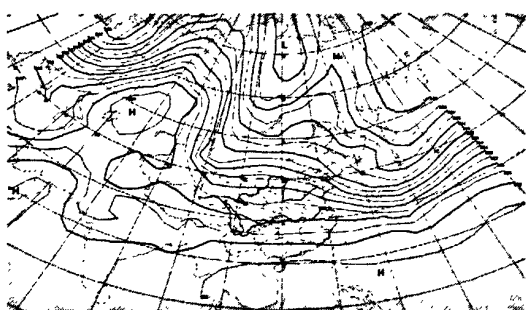
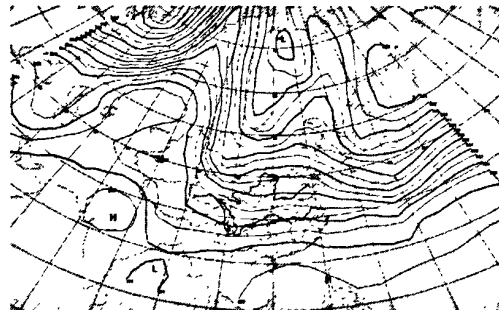


图 3.11 2010 年 4 月 24 日 08 时 500hPa 高度场



3.4.2 “4.24”沙尘暴过程气象要素变化分析

沙尘过程发生时需要配合相应的天气气象要素特征，而沙尘发生后又对气象要素的特征有反馈作用。温度、气压、湿度、风速都和沙尘有较为密切的联系。结合民勤县气象局的逐时观测资料，对过程的气象要素的变化特征及其原因进行讨论。[54-57]

1) 地面气温

较高的地面气温会促进地面水分的蒸发，使得地面变得干燥，使得起沙的临界摩擦速度降低，易于克服自身重力脱离地面悬浮到空中。同时，沙尘过程一般会伴随着冷空气的过境，这种天气背景又会对使得地面气温大幅度下降。图 3.13 为 2010 年 4 月份民勤站的地面气温的日平均变化曲线，由图可以看出曲线总体呈上升趋势但在过程中振幅波动幅度比较大，日平均温度最高 16°C ，最低达到 0°C ，说明 4 月份是一个冷空气活动比较频繁的月份。民勤站出现沙尘暴是在 24 日晚上 7 点左右，在 23 日存在一个温度的高值区，日平均气温达到 14°C 。25 日是一个温度的低谷区，日平均气温仅有 5°C ，在此期间有冷空气过境。图右为 4 月 24-25

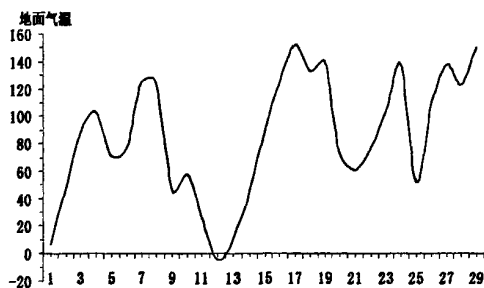


图 3.13 10 年 4 月份民勤地面气温的月变化

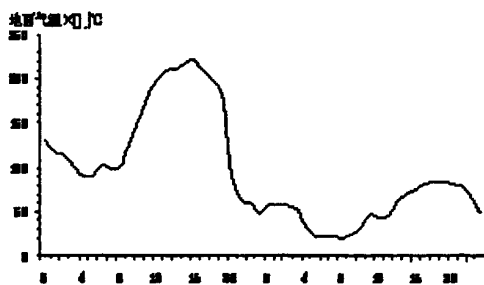


图 3.14 10 年 4 月 24-25 民勤地面气温的日变化

日地面气温的变化曲线。24 日昼夜温差较大，截止到沙尘发生之前，最低值在凌晨 5 点左右，为 9°C 。最高值出现在下午 4 点，达到 22°C 。25 日昼夜温差较小，最低值出现在凌晨 6 点左右，时间段上较 24 日推迟。最高值在下午 7 点左右，也较前一天推迟。

2) 地面气压

沙尘暴是一种剧烈的天气过程，受天气系统背景的影响，同时也会对背景产

生反作用。图 3.15 为民勤地区四月份的地面气压的月变化。四月份是处在冷暖交替的季节, 大气相对不稳定, 地面气压的振荡比较剧烈。24 日地面气压较低, 25 日地面气压急速升高。这是由于 24 日白天温度较高, 大气受热上升, 使得地面的压强降低。25 日游冷空气过境, 大量的冷空气向地面逼近, 使得地面气压变高。从图 3.16 也可以看出来, 25 日的地面气压远远高于 24 日的地面气压。



图 3.15 10 年 4 月份民勤地面气压的月变化

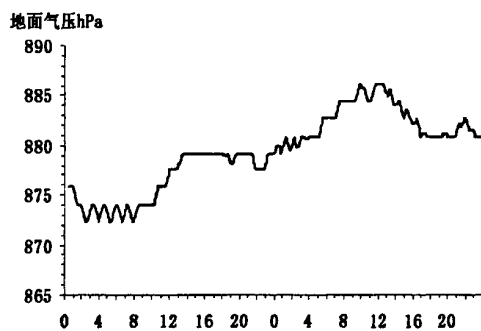


图 3.16 10 年 4 月 24-25 民勤地面气压的日变化

3) 相对湿度

相对湿度对起沙有很重要的影响, 较高的相对湿度对起沙有很显著的阻碍作用。它增大了起沙的临界摩擦速度, 使得起沙时需要提供更大的动力。如图 9 所示, 23 日之后一直都保持着较低的日均相对湿度, 这种天气条件非常有利于沙尘过程的发生。图 18 是发生沙尘过程时 24-25 的相对湿度变化曲线, 也存在着很明显的大幅度变化。产生这种变化的原因在后面会进行解释。

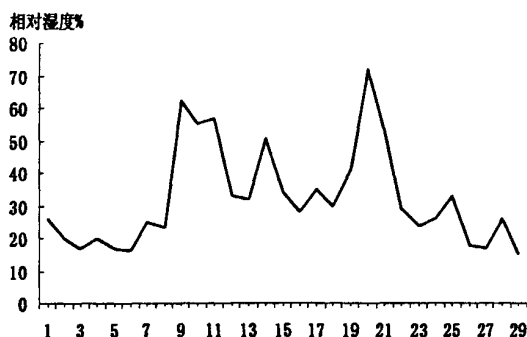


图 3.17 10 年 4 月份民勤相对湿度的月变化

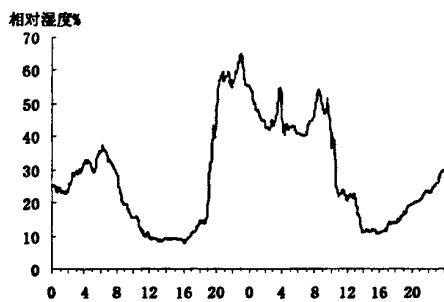


图 3.18 10 年 4 月 24-25 民勤相对湿度的日变化

4) 地面风速

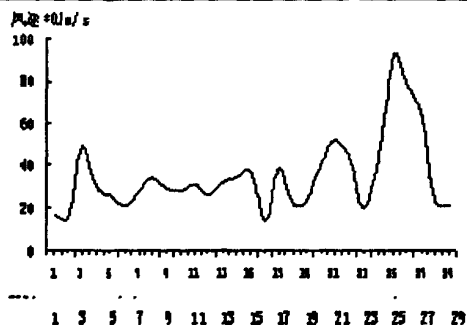


图 3.19 10年4月份民勤地面风速的月变化

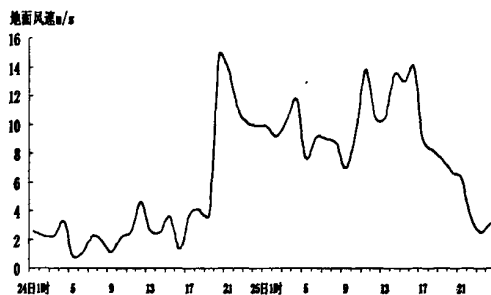


图 3.20 10年4月24-25日民勤地面风速的日变化

大风为沙尘提供动力条件，对沙尘天气的发生起着至关重要的作用，图 3.20 为民勤 4 月份的日平均地面风速，可以明显看到地面风速在 25 日有明显的增大，日平均风速为 9.2m/s 。从 24-25 日地面风速变化曲线上可以看到，风速变化率最大的时刻在 24 日 19 时左右，由下面的沙尘浓度变化曲线可知，这个时刻正好也是沙尘浓度突然增大的时刻。这说明了突然增大的地面风速是此次黑风暴发生的最主要的起因。

3.4.3 “4.24”民勤沙尘暴过程沙尘浓度变化

在沙尘过程中，悬浮在空中的沙尘颗粒是导致能见度降低的主要原因。因此，沙尘浓度是衡量空中所含沙尘颗粒多少的参数，与能见度在表征沙尘强度的方面具有一致性。利用沙尘浓度资料，我们就可以清楚的掌握整个沙尘过程中沙尘强度的变化趋势。下图为 2010 年 4 月 24-26 民勤的沙尘浓度的变化曲线。图中沙尘浓度的单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

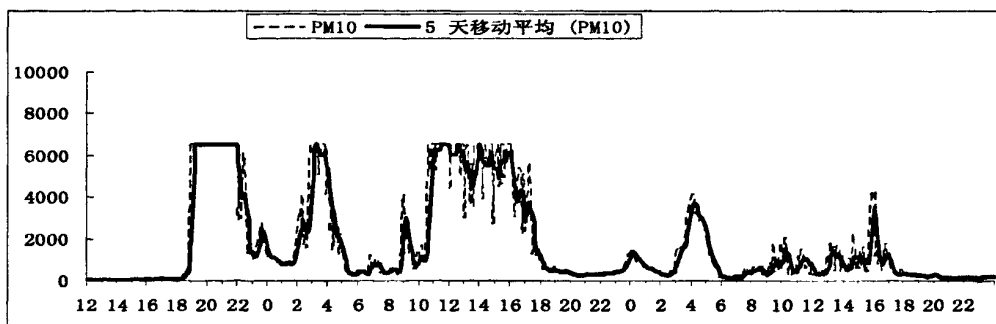


图 3.21 2010年4.24-26日民勤地区PM10变化曲线

由图可知，沙尘浓度从 24 日 19 时左右开始突然急剧增大，最大值超过 $6500\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，这一过程一直间断持续到 25 日晚 6 点，沙尘浓度才逐渐降低。期

间在 24 日 23-25 日 2 时和 25 日 6 时-11 时各有一个沙尘浓度的谷值。与以上气象要素对比,地面风速突然增大的时刻正是起沙的时间,大风为起沙提供了动力条件。随着沙尘浓度的增大,水分的蒸发作用减弱,沙尘颗粒的凝结核作用,使得空气中的相对湿度增大,进而又对沙尘浓度起到了抑制作用,使得沙尘浓度降低。沙尘浓度的降低又导致空气中相对湿度的降低,由于在过程中大风一直存在,当空气相对湿度降低到一定程度,沙尘浓度又会呈现增大的趋势。这种过程一直持续到 25 日晚上大风过程的结束。

通过以上分析,我们对民勤地区沙尘暴的年际发生规律有了一定程度的了解。并针对“4.24”沙尘过程,对沙尘暴发生时的基本气象要素的变化规律及其原因进行了研究。据研究,民勤地区的荒漠化在加剧,但沙尘暴的发生频次呈降低趋势,这主要是由于全球变暖等气候背景条件造成的。一旦未来全球气候再次发生大的变化,民勤地区沙尘暴的发生频次极有可能会发生重大转变,其危害性也必将更大。因此,我们必须加强对沙尘暴的监测预警工作的进行,不断提高其技术水平。以上是对站点监测资料的分析,下面我们继续来对其他监测预警方法进行介绍和分析。

第四章. GRAPES_SDM 模式对沙尘暴的研究

4.1 GRAPES_SDM 模式介绍

GRAPES (global/regional assimilation and prediction system) 模式是中国气象科学研究院发展的全球/区域同化及预报增强系统的简称, 是中国气象局组织多所研究所, 教育部多所大学, 依靠中国科学家自己的力量, 经过多年的科技攻关, 自主研究建立的新一代多尺度统一气象资料同化与数值预报系统。该系统的核心包括: 资料变分同化; 半隐式-半拉格朗日差分方案和全可压/非静力平衡动力框架; 可自由组合的、优化的物理过程参数化方案; 全球、区域一体化的同化与预报系统; 标准化、模块化、并行化的同化与模式程序。针对 GRAPES 系统的正确性、有效性, 已经进行了一系列的标准测试和应用模拟试验, 包括常规资料分析应用、雷达和卫星非常规资料直接分析应用试验。该系统已在国家级、区域级气象业务中心运行, 在实际气象业务中发挥了重要应用。

GRAPES_SDM 是中国气象局兰州干旱气象研究所和中国气象科学研究院数值预报研究中心合作研制, 它耦合了 GRAPES 和加拿大气溶胶模式。该模式包括了沙尘的起沙, 传输, 吸湿增长, 并合, 干沉降与云下清洗等详细的物理过程, 可以对沙尘暴的起沙和空气中沙尘浓度进行模拟和预报。在并在此基础上形成了西北地区的沙尘暴数值预报模式系统, 并在甘肃, 宁夏, 新疆, 西藏等沙尘暴易爆发省份进行了业务化运行, 取得了一定的模拟和预报能力。作为一种新的预报的技术, GRAPES_SDM 模式的引入使我国对沙尘暴的预报由定性向定量的提升, 沙尘天气预报的准确率和精度的提高有很大的促进作用。[58-62]

GRAPES_SDM 把沙粒粒径分为 12 个档次, 为: 0.005-0.01, 0.01-0.02, 0.02-0.04, 0.04-0.08, 0.08-0.16, 0.16-0.32, 0.23-0.64, 0.64-1.28, 1.28-2.56, 2.56-5.12, 5.12-10.24, 10.24-20.48, 单位是 μm 。沙尘模式的预报方程为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial C_i}{\partial t} \Big|_{transport} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \Big|_{source} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \Big|_{clearair} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \Big|_{dry} + \frac{\partial C_i}{\partial t} \Big|_{below-clouds}$$

其中, C_i 为第 i 档次的干沙粒质量比含量 (kg/kg)。其局地变化由动力传输, 源,

晴空,干沉降以及云下清除等过程构成。传输项包括平流输送,次网格的湍流扩散和对流过程。源项包括了自然源和人为因素的源排放过程,同时考虑了气溶胶的二次形成过程。晴空包括核化,凝结,聚合等过程。干沉降包括气体和气溶胶粒子的干沉降。云下清除过程指的是云层以下到地面之间的降水清除。

4.1.1 传输 (transport)

沙尘粒子的传输是由GRAPES模式采用半隐式,半Lagrange方法,由模式自己实现。

4.1.2 沙尘排放源项 (Source)

(1) 光滑地表临界摩擦速度

起沙及沙尘输送过程涉及沙粒的受力问题。沙粒受到的力主要有重力、摩擦拖曳力、Saffman 力、Magnus 力、电场力与分子间的内聚力(范德瓦耳斯力、静电力与毛细管力)等。当沙粒受的净力有向上的分量时,沙粒就会上升;当沙粒上升足够多、足够高(垂直输送)又足够远(水准输送)时,就产生了沙尘天气。一般的研究往往只注重水准风速的影响,而忽视了由 Saffman 力、Magnus 力、电场力以及分子间的内聚力等的临界风速与摩擦速度求起沙通量。在 GRAPES-SDM 中,除了考虑重力与拖曳力的影响外,还考虑了分子间内聚力的作用。其临界摩擦速度 u^* 采用 Iversen 等在 1982 年给出的结果。

$$u_{*s}^*(r_s) = \begin{cases} \frac{0.129K}{(1.928R_e^{0.092} - 1)^{0.5}} & 0.03 < R_e \leq 10 \\ 0.129K\{1 - 0.0858\exp[-0.0617(R_e - 10)]\} & R_e > 10 \end{cases}$$

其中,雷诺数 $R_e = aD_p^x + b$, $a = 1331\text{cm}^{-x}$, $b = 0.38$, $x = 1.56$, D_p 为沙粒粒径,单位为

cm, $K = [\frac{\rho_p g D_p}{\rho_a}]^{0.5} \cdot [1 + \frac{0.006}{\rho_p g D_p^{25}}]^{0.5}$ 。注意,式中的系数0.006的单位是 $\text{cm}^{0.5}/\text{s}^2$,

其余都是无量纲量。

(2) 非光滑地表临界摩擦速度

对于非光滑地表,一方面,粗糙元的存在覆盖了部分地表而使得沙粒不易受风侵蚀;另一方面,粗糙元会吸收空气动能而使得沙粒不易启动。因此,需考虑粗糙元

的影响: $u_{*r}^*(D_p) = u_{*s}^* \left\{ 1 - \left[\frac{\ln(Z_m/z_{os})}{\ln[0.35(10/z_{os})^{0.8}]} \right] \right\}$ 其中, $Z_m(\text{cm})$ 是初始不同土地覆盖类型的粗糙度长度, $z_{os}(10^{-3}\text{cm})$ 为裸地粗糙长度。

(3) 土壤水分的影响

水分会在土壤粒子表面吸附成膜,在土壤粒子间毛细引力作用下形成水楔。在土壤水分未达到最大持水量之前,水分会增大沙尘粒子启动的临界摩擦速度。对此,采用 Fe'can 等在忽视形成水膜的分子作用力的条件下,提出的以下参数化方案:

$$u_{*i}^* = u_{*r}^* \begin{cases} 1 & \text{for } w \leq w' \\ [1 + 1.21(w - w')^{0.68}]^{0.5} & \text{for } w > w' \end{cases} \text{ 其中, } w \text{ 与 } w' \text{ 是实际土壤的体积含水量 (土壤湿度) 与临界体积含水量, 且 } w' = 0.0014(\% \text{clay})^2 + 0.17(\% \text{clay}).$$

(4) 地面水平品质通量

Marticorena 等在 White 工作的基础上加入品质与对数粒径的正态分布关系,而得到了跃移层水准品质通量与沙粒粒径的关系:

$$dF_h(D_p) = EC \frac{\rho_a}{g} u_*^3 (1+R)(1-R^2) dS_{rel}(D_p) dD_p$$

其中, E 是侵蚀地表占整个地表份额, $C = 2.61$ 为比例常数, $R = u_{*i}^*/u_*^*$, ρ_a 是空气密度, $dS_{rel}(D_p)$ 是单位地表中 $D_p \sim D_p + dD_p$ 粒径之间的沙粒的覆盖率, 通过以下计算:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dM(D_p)}{d \ln D_p} &= \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_i}} \exp \left[-\frac{(\ln D_p - \ln MMD_i)^2}{2 \ln^2 \sigma_i} \right] \\ dS(D_p) &= dM(D_p) / \frac{2}{3} \rho_p dD_p \\ S_{total} &= \int_{D_p} dS(D_p) dD_p \\ dS_{rel} &= \frac{dS(D_p)}{S_{total}} \end{aligned} \right.$$

其中, $M(D_p)$ 是 D_p 粒径粒子的品质, MMD_i 为拟合对数正态分布函数集中第 i 个函数的中值粒径, σ_i 为相应的标准差。

(5) 地面垂直质量通量

垂直通量也叫沙通量,是由跃移沙粒中能悬移的沙粒产生。它表示在单位时间内单位水平面积上流过的品质。悬移—跃移层是由临界摩擦速度与下落末速度的比值决定。下落末速度是粒子重量与风拖曳力平衡时的速度,故而它是粒径与密度的函数。悬移—跃移层中的粒子粒径约 $50\mu\text{m}$ 。低于此值的粒子,由于粒子间的聚合力使它们抱聚成团,故其临界摩擦速度将会递增。这意味着,为使这些粒子能够悬移,需要喷沙或冲击过程来瓦解其凝聚。由于沙粒的排放需要把跃移作为基础过程,故垂直通量常由其与水位通量的比值得到。

采用 Alfaro 以及 Shao 等的结果:粒径在 $D_p \sim D_p + dD_p$ 之间的跃移沙粒的垂直动能通量 $F_{\text{kin}}(D_p)$ 为: $dF_{\text{kin}}(D_p) = \beta dF_h(D_p)$, 其中, $\beta = 16300 \text{ cm} / \text{s}^2$ 。

跃移中通过喷沙破坏内聚力而能悬移的动能通量根据 Alfaro 等的工作,可以用 3 个对数正态分布函数拟合。其相应的品质中值半径 D_j 为 1.99cm、4.56 cm 与 7.68 cm, 标准差为 0.96、0.62 及 0.21, 粘合能为 0.0453、0.0450 及 0.0447。在 3 个拟合中,粒子的数浓度 N_j 与品质浓度 $F_{\text{soil},j}$ 相应为:

$$N_j = \frac{1}{e_j D_p} \int p_j dF_{\text{kin}}(D_p) \quad F_{\text{soil},j} = \frac{\pi \rho_p D_j^3}{6} N_j$$

总的输送沙粒(粒径 $D < 40\mu\text{m}$)的品质浓度 F_{SD} 为: $F_{\text{SD}} = \sum_{j=1}^3 F_{\text{soil},j}$

4.1.3 垂直扩散

垂直扩散主要考虑对流与湍流扩散过程。对流扩散过程由 GRAPES 模式用半隐式—半 Lagrange 方法实现;湍流扩散由下述方程求得: $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial^2} K_v C$ 。其中, K_v 是湍流扩散系数。式子表示,当沙尘在地表被排放后,就会产生一定的浓度梯度,在此梯度下,沙尘由湍流在一个时间步长里面扩散到高空。

4.1.4 晴空过程

对于无云的晴空而言,仅考虑沙粒凝并过程,凝并过程也仅局限于沙尘粒子谱的各档之间。所谓凝并,指粒子做运动时,轨迹相互交叉就会发生碰撞并合,其结果使得粒子数浓度减少,但总的品质浓度未改变。凝并方程为:

$$\frac{dN_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} K_{i,k-i} N_i N_{k-i} - N_k \sum_{i=1}^{\infty} K_{k,i} N_i \quad \text{其中,核函数 } K_{ij} \text{ 是第 } i \text{ 档与 } j \text{ 档粒子}$$

之间并合概率,由 Brownian 运动、湍流运动与惯性运动三者构成; N_k 是第 k 档的粒子数浓度。

4.1.5 云下清除

在有云的情况下,粒子的云下清除指由于 Brownian 运动、惯性碰撞、湍流切变流、热漂移、扩散漂移以及电漂移等运动形式使得粒子向水汽凝结体运动而被捕获的过程。根据 Slinn 单位体积的云下清除率可以写为:

$$\left. \frac{\partial C_i}{\partial t} \right|_{\text{below-clouds}} = f_{\text{cd}} \psi(r_i) C_i \quad \text{其中, } r_i \text{ 是第 } i \text{ 档的平均粒径, } f_{\text{cd}} \text{ 是云覆盖度, } \Psi \text{ 是清除率。}$$

清除率依赖于粒子与下落水汽凝结体两者的粒径。

4.1.6 干沉降

沉降后的沙尘含量变化为: $\frac{\partial C_i}{\partial t} = C_i \cdot \left[\exp\left(-\frac{V_i}{\Delta z} \cdot \Delta t\right) - 1 \right]$ 其中,等式右边的 C_i

为起沙、传输、晴空以及云下清洗等过程后的沙尘品质比含量。 Δz 与 Δt 为模式垂直分辨率和时间步长。粒子下落末速度 V_i 由重力沉降项 V_g 与考虑地表状况及天气稳定度的湍流项

$$\text{组成: } \begin{cases} V_i = V_g & \text{模式其余层} \\ V_i = V_g + \frac{1}{R_a + R_s} & \text{模式底层} \end{cases} \quad \text{其中,重力沉降项 } V_g \text{ 为:}$$

$$V_g = C \cdot \frac{2}{9} \frac{g}{\mu} (\rho_s - \rho_a) r_s^2 \quad \text{其中, } r_s \text{ 为粒子吸水后经 } k \&\& \text{ler 方程得到的半径。}$$

$$\text{Cunningha 修正系数 } C \text{ 为: } \begin{cases} C = 1 - \frac{\lambda}{r_s} (1.257 + 0.4 \exp(-1.1 \frac{r_s}{\lambda})) \\ \lambda = 6.54 \times 10^{-8} \frac{\mu}{1.818 \times 10^{-5}} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{293.15} \right)^{0.5} \\ P_0 = 1.013 \times 10^5 \\ \mu = 145.8 \times 10^{-8} \frac{T^{3/2}}{T + 110.4} \end{cases} \quad \text{其}$$

中, μ 是空气粘性系数, λ 是分子自由程, P 、 T 是压强与温度。

$$\left\{ \begin{array}{l} R_a = \frac{1}{ku_*} (0.74 \ln \frac{z}{z_0} + 4.7 \frac{z}{L}) \quad \frac{z}{L} \geq 0 \\ R_a = \frac{0.74}{ku_*} (\ln \frac{z}{z_0} - 2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 - 9 \frac{z}{L}}}{2}) \quad \frac{z}{L} < 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} R_s = \frac{1}{3u_*} \frac{1}{E_{im} + E_{in}} \frac{1}{r_s} \\ E_{im} = \left(\frac{S_i}{S_i + A_{est}} \right)^2 \\ E_{in} = (1000 \times 2 \times r_s / p_{llp})^2 / 2 \\ S_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_g u_*^2}{g v} \\ 1000 \frac{V_g U u_*}{g \cdot p_{llp}} \end{array} \right. \\ v = \mu / p \end{array} \right. \end{array} \right.$$

湍流项考虑了空气动力阻抗 R_a 与地表阻抗 R_s , 尚未考虑植被阻抗的影响。空气动力阻抗与大气稳定度、摩擦速度及表面粗糙度有关。地表阻抗与地表含水量、地面物种、分子扩散系数及亨利常数有关。植被阻抗与地表植被种类及生理状况(季节)有关。 R_a 和 R_s 如上, u_* 为摩擦速度, g 为重力加速度, A_{est} 和 p_{llp} 为与土地覆盖类型有关的量。

4.1.7 Land use 信息

由上面可知,沙尘垂直通量依赖于地面风速、地面粗糙长度、土壤质地与土壤湿度等因子。沙尘天气发生的首要条件是要有沙源存在。因此,下垫面的沙源分布与土壤质地是沙尘模式中沙粒启动的必要条件。GRAPES_SDM 模式中采用的沙源分布与土壤质地数据来自加拿大 CAM (Canada Aerosol Model) 模式。东亚的沙源主要集中在塔里木盆地、准格尔盆地、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙漠以及蒙古国南部和西北部地区。为了求解粗糙度,土地覆盖类型划分为 15 类,如表 4.1。

4.1.8 粒径分布

仅考虑了可悲“悬浮”输送的粒径 $d \leq 40 \mu m$ 沙粒。模式把粒径在 $0.005 \sim 40 \mu m$ 之间的干沙尘粒按粒径下限一次倍增的规律,分为如表 4.2 的 12 档。

表 4.1 GRAPES_SDM 模式 Land use 土地覆盖类型

分 类	土 地 覆 盖 类 型	物理高度 h (cm)
1	常绿针叶林	2000
2	常绿阔叶林	4000
3	季节性针叶林	2000
4	季节性阔叶林	2000
5	针阔叶混合林	3000
6	草	20
7	庄 稼	20
8	沙 漠	0.2
9	苔 藓	0.2
10	灌木, 片状林地	100
11	长植物的湿地	2
12	冰盖, 冰河	0.01
13	内 陆 河	0.001
14	海 洋	0.001
15	城 镇	1000

表 4.2 GRAPES_SDM 模式的粒径 12 档分布

档 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
粒径下 限	0.005	0.01	0.02	0.04	0.08	0.16	0.32	0.64	1.28	2.56	5.12	10.24-20.48

4.2 GRAPES_SDM 对沙尘暴的模拟

利用 GRAPES_SDM 模式对发生的沙尘暴过程进行模拟。模式的基本参量为:

- (1)水平分辨率: $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 约 50km; 垂直分辨率: 模式顶 15km, 不等距分为 31 层; 时间分辨率: 900s; 水平中心($103.08^{\circ}\text{E}, 38.62^{\circ}\text{N}$); (2)水平格点数 111×71 , 模式结果 1h 输出一次; 初始和边界条件: GRAPES 输出结果, 每 6h 输入一次边界条件。(3)侧边界方案: 采用 Davies 松弛边界方案。(4)模式时间积分采用: GRAPES 非静力半隐式—半 Lagrange 方案。(5)降水方案: 显式降水与隐式降水一起考虑, 其中显式降水为 NCEP23 级简单冰方案。(6)辐射传输: Duhia 短波辐

射方案与辐射快速传输方案(rrtm)。(7)近地面层: Monin_Obukhov 方案。(8)陆面过程: 热扩散模式。(9)PBL: MRF 方案。(10)积云对流参数化: Kain_Fritsch 方案。

民勤地区 2010 年 4 月 24 日左右发生了一次黑沙尘暴过程, 利用 GRAPES_SDM 对“4.24”过程进行模拟。其中模式的启动时间为 10 年 4 月 23 日 8 时, 结束时间为 10 年 4 月 27 日 8 时。

图 4.1-4.3 为模式模拟的地面温度、地面气压和地面风速的结果与实际观测值的比较。模拟结果能很好的反应出实测值的变化曲线, 在细节方面有一些差距。这是由于站点观测到的是一个点的变化曲线, 模式的结果是一个空间和一段时间积分后的结果, 两者存在一定的差异是合理的。图 4.4 为模式模拟的沙尘浓度和

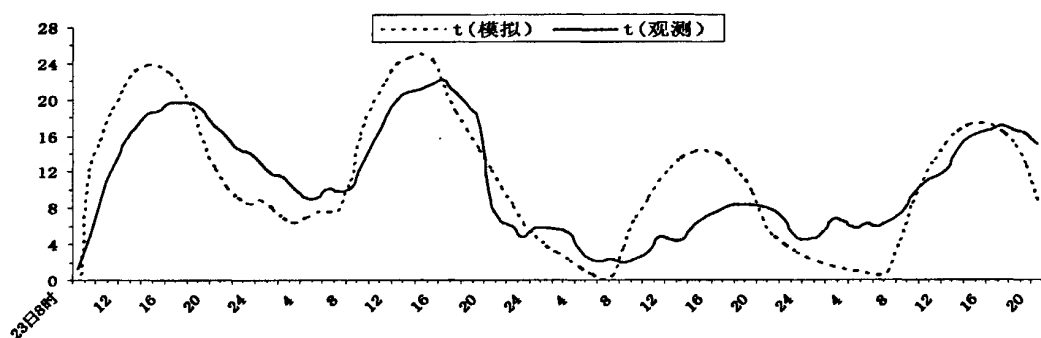


图 4.1 模式结果和实际观测的地面温度的比较

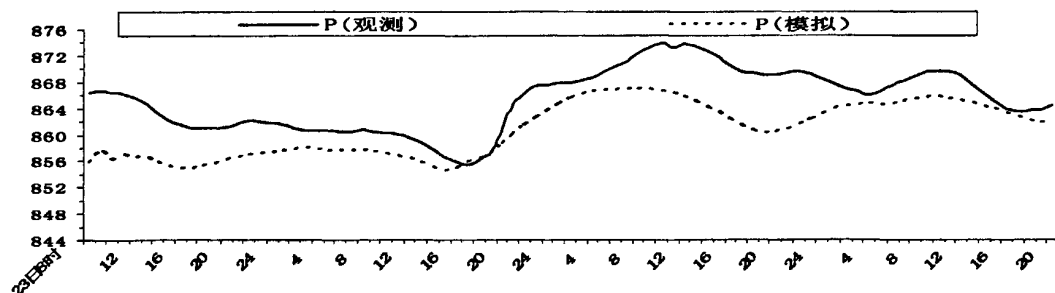


图 4.2 模式结果和实际观测的地面气压的比较

观测值的比较。模式结果得到的沙尘浓度的数量级和实际观测结果在同一个级别。而且模式能模拟出沙尘浓度出现峰值的时刻及其变化趋势。

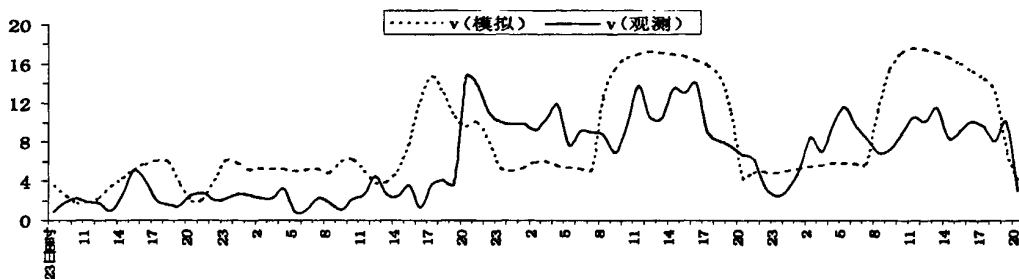


图 4.3 模式结果和实际观测的水平风速的比较

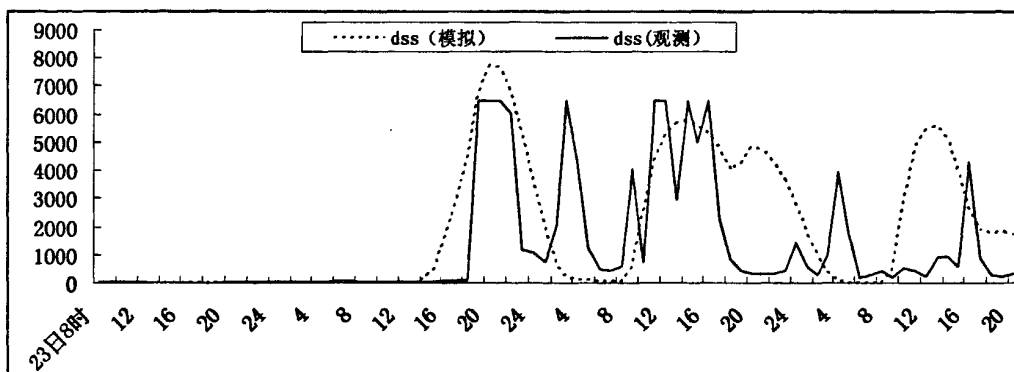


图 4.4 模式结果和实际观测的沙尘浓度的比较

通过以上工作，我们对 GRAPES_SDM 沙尘模式进行了检验。模式对这次沙尘过程的模拟效果比较好，结果较接近真实情况。下面我们应用模式结果对这次沙尘过程发生时民勤地区周边的散度场和涡度场进行分析。

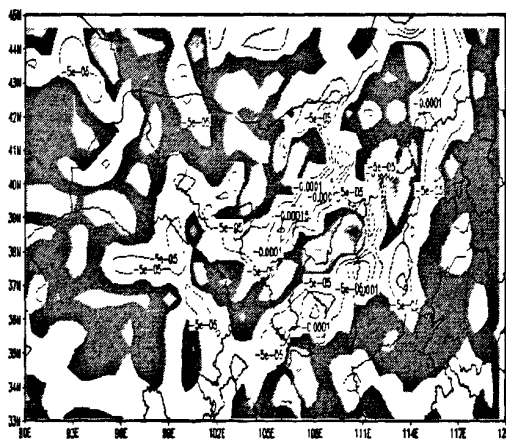


图 4.1 850hpa 散度场分布(沙尘暴发生前)

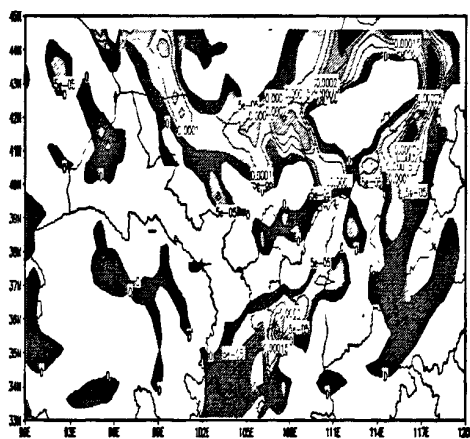


图 4.2 850hpa 涡度场分布(沙尘暴发生前)

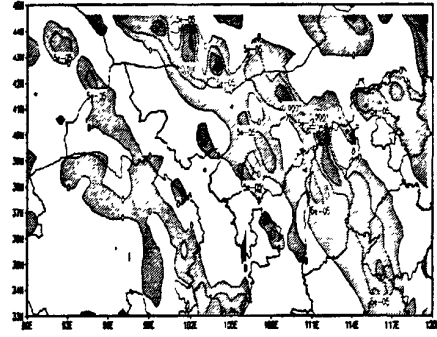
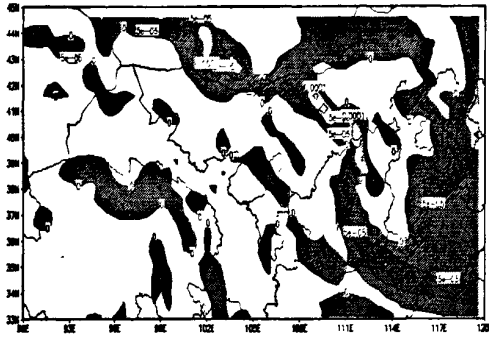


图 4.3 850hpa 散度场分布(沙尘暴发生后) 图 4.4 850hpa 涡度场分布(沙尘暴发生后)

涡度是描述空气微团旋转运动强弱程度的物理量，散度是表征辐合辐散的物理量，正值为辐合，负值为辐散。如图 4.1 和 4.2 分别为模式模拟的 10 年 4 月 24 日沙尘暴发生前 850hPa 民勤周边地区的地面散度场和涡度场。由图可以看出在民勤地区的西北方向有一明显的负的散度中心和正的涡度中心，这一位置正好位于巴丹吉林沙漠，说明此时沙漠地区地面有强烈的辐合运动。民勤地区处在正负值交替的位置。图 4.3 和 4.4 分别为沙尘暴之后 850hpa 的涡度和散度分布图，巴丹吉林沙漠区域存在着微弱的辐合运动。

通过模式结果的分析，这次民勤地区沙尘暴是南下的冷空气在经过巴丹吉林沙漠时，和温度较高的沙粒表面进行能量交换，产生强烈的辐合运动，把沙漠地区的沙粒吹到空中，随着南下的强劲的冷空气经过民勤地区产生的。

本章对 GRAPES_SDM 模式及其框架进行了介绍，并对“4.24”沙尘过程进行了模拟，用地面温度、地面气压和沙尘浓度等观测资料对模式的结果进行了验证，模式的结果比较可靠。用模式结果对沙尘暴过程中的地面涡度和散度场的配置进行了分析。沙尘暴发生前，位于民勤西北方向的巴丹吉林沙漠有强烈的辐合运动，沙尘暴发生之后，辐合运动消减变弱。通过对 GRAPES_SDM 模式的应用，其具有很强的预警作用。根据在业务中的应用，仍然有部分沙尘过程有漏报的出现。因此，在模式的发展水平处在瓶颈阶段时，我们可以应用其他的监测手段对其进行补充。下面我们就对沙尘暴遥感监测系统进行介绍及应用。

第五章. 利用卫星遥感对沙尘暴进行监测

5.1 遥感及沙尘暴遥感监测系统的介绍

遥感卫星(remote sensing satellite)是用作外层空间遥感平台的人造卫星。用卫星作为平台的遥感技术称为卫星遥感。通常,遥感卫星可在轨道上运行数年。卫星轨道可根据需要来确定。遥感卫星能在规定的时间内覆盖整个地球或指定的任何区域,当沿地球同步轨道运行时,它能连续地对地球表面某指定地域进行遥感。所有的遥感卫星都需要有遥感卫星地面站,卫星获得的图像数据通过无线电波传输到地面站,地面站发出指令以控制卫星运行和工作。遥感卫星主要有气象卫星、“陆地卫星”和“海洋卫星”三种类型。气象卫星以搜集气象数据为主要任务的遥感卫星,为气象预报、台风形成和运动过程监测、冰雪覆盖监测和大气与空间物理研究等提供大量实时数据。气象卫星按轨道特点可分为太阳同步卫星和地球静止卫星两类。太阳同步卫星绕地球南北极附近和跨越赤道上空运行,美国的“泰罗斯”号(TIROS)“诺阿”号(NOAA)和“雨云”号(Nimbus)卫星都属于太阳同步气象卫星。地球静止卫星在赤道上空相对于地球处于静止状态。80年代美国发射的三颗“地球静止实用环境卫星”(GOES)(分别处于地球西经75°、135°和东经75°的赤道上空),欧洲航天局发射的“气象卫星”(METEOSAT)(位于0°经度的赤道上空)和日本发射的“地球静止气象卫星”(GMS)(位于东经140°的赤道上空)都属于地球静止卫星,它们构成全球性的气象监测网。

兰州干旱气象研究所在华云MODIS资料处理显示系统的基础上二次开发了沙尘暴遥感监测系统。利用华云MODIS卫星资料处理显示系统接收,订正和处理生成EOS/MODIS L1B(level 1B)产品后,可以进一步生成沙尘暴监测产品。在此基础上,可以对沙尘过程进行多种类型的直观显示和统计分析。^[62-68]

沙尘暴遥感监测系统继承了原系统的功能,并针对沙尘检测的需要进行了增强:1)显示单通道图像或三通道合成图像;2)可进行由用户定义的通道算术运算,提供友好的图形用户界面,在设置算术运算公式时,除常规的加减乘除外,还提供而是多个常用函数计算时使用;3)可以对沙尘进行面积计算,直方图和

散点图显示；并以行政区/土地类型为划分标准对沙尘图像进行面积统计或调用（可选时段）历史沙尘日数统计表；4）显示图像时，支持多种投影方式，如轨道图，球面投影（等角投影），麦卡托投影，极射立体投影和兰伯托投影灯；5）根据具体的地理位置和使用目的，提供图形用户界面，可视化地制作投影地图，在显示各种图像选择时，制作的投影将作为投影的选择之一；6）提供图形用户界面便捷编辑工具，可对要显示的有关行政便捷，地理边界和有关标志进行编辑，可赋予边界线和有关标志显示属性，如显示颜色，线条特征，字体大小等，生成边界文件，供显示时调用；7）经纬度线显示属性包括线型，线粗和颜色可设置；8）可选择叠加显示内容，如经纬度线分辨率，边界线和有关标识等；9）有三种挖图方案，一是事先设置好的区域挖图显示；二是用鼠标拉成矩形，并可对该矩形进行移动和改变大小，显示该矩形区域的挖图图像；三是用移动数遍形成任意型的闭合区域，显示该区域的挖图图像；10）可将通过移动鼠标形成的区域边界保存为边界文件；11）在显示各种图像时，将按照设定的矩形框显示图像。其中矩形框可通过鼠标移动位置或改变大小确定显示区域；12）放大或缩小图像，处于放大或缩小的图像，仍然可进行各种操作，包括定位，获取数遍指定点有关信息；13）可方便的改变显示色彩，并提供用户定义色彩显示方案，可对不同图像使用各自的色彩菜单。图形游湖界面编辑色彩查找表；图像亮度可调，可显示发反色，根据资料内容自动确定颜色亮度等；14）用表格形式显示或文件方式输出所选区域或全图的图像数据。15）按标准图像文件格式存储所选区域或全图图像；16）打印所选区域或全图图像。

5.2 对沙尘暴范围的监测

沙尘暴遥感监测系统应用的数据是极轨卫星下传的数据，极轨卫星每天扫过中国西北两次，图像分辨程度受天气状况（尤其是云）的影响很大。根据甘肃省遥感中心提供的数据，选取了天气云层较少，同时又有沙尘过程的时刻进行观测。

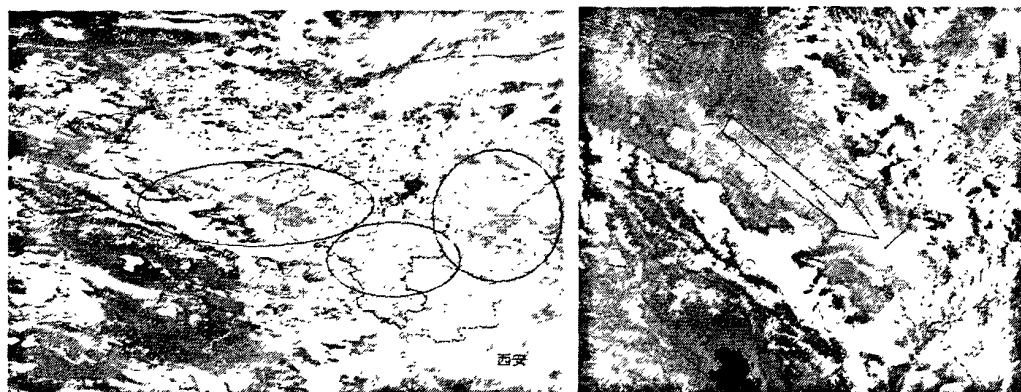


图 5.1 2010 年 4 月 24 日 12:10 遥感图像

上图为 2010 年 4 月 24 日发生在我们西北地区的一次大范围沙尘过程观测到的遥感图像。图中白色絮状部分是代表空中有云层覆盖，地面状况被遮挡，无法看出是否有沙尘过程。圈中羽翼状黄色部分为沙尘天气覆盖的地区，颜色越深的沙尘浓度越大。右图为河西走廊地区放大的图像，从图中的箭头方向可以看出沿着甘肃和内蒙的交界处有一片东南走向的浅黄色的区域，一直延伸到宁夏境内，被浅黄色覆盖的地区就是沙尘天气影响的地区。

5.3 对沙尘强度的监测

沙尘暴遥感监测系统中还建立了沙尘指数来对沙尘暴的强度进行判断。判别条件的选择是根据设定的沙尘指数 NDSI 和 DSI 的取值来完成遥感影像中沙尘的判识和强度分级。 $NDSI = (B7 - B3) / (B7 + B3)$ ，根据沙尘的反射特征进行判识， $DSI = (B20 - B29)$ ，是根据沙尘的辐射特征进行判识的。韩涛等已经对这种方法的模型进行了研究，并对几次沙尘暴过程进行了沙尘信息遥感监测，表明该方法具有良好的效果和实用性。之前没有沙尘浓度的观测资料，只能采用可见度作为验证的指标，而能见度容易受其他因素的影响。下面利用沙尘浓度的资料，对该方法进行进一步的验证。系统中根据 DSI 的值把沙尘天气分为四级。一级： $DSI \geq 30.1$ 并 < 38.2 ；二级： $DSI \geq 38.2$ ，并 < 45.3 ；三级： $DSI \geq 45.3$ ，并 < 55.4 ；四级： $DSI \geq 55.4$ 。

由表中可以看出，用遥感划分的沙尘强度和沙尘浓度基本上是想对应的。沙尘级别越大，沙尘浓度也会越大，这说明遥感结果与沙尘浓度在表征实况沙尘强度上是一致的。但由于遥感的沙尘指数是用反照率等其他物理量反演出来的，因

此在精度方面低于观测结果。

表 5.1 08-09 沙尘天气过程中沙尘强度的遥感值和沙尘暴浓度值比较

日期	时间	民 勤	敦 煌	酒 泉
08-03-18	04:01	860.90 (31.29 一级)	1667.00 (二级)	1509.70 (二级)
08-03-30	04:25	125.70 (30.16 一级)	144.60 (一级)	96.90 (一级)
08-05-20	03:19	378.30 (31.17 一级)	—	—
09-02-18	04:45	1263.30 (41.92 二级)	—	—
09-03-14	03:56	4677.50 (45.58 三级)	—	—
09-04-23	03:07	2785.20 (47.14 三级)	—	—
09-04-23	04:45	1847.60 (50.87 三级)	—	—

(表中地名一栏数值是沙尘浓度,单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,括号中第一个数值是 DSI,第二个级别按 DSI 划分的沙尘暴级别, — 是缺失数据)

5.4 三种沙尘暴监测预警方法的比较

通过三种不同方法对沙尘暴的观测得到的资料分析,三种方法都能对沙尘过程进行描述。站点观测资料的精度较高,可以准确观测到整个沙尘过程中各要素的变化趋势,得到的结果也最接近实况。但由于站点分布有限,只有少数站点具备沙尘暴特种观测仪器,在沙尘中心地带无法设置观测点,仪器故障等问题导致沙尘暴的观测在空间和时间上有很多的缺陷,给研究带来了一定的干扰。遥感技术的出现,对沙尘暴的观测起到了很大的推动作用,卫星的观测在空间具有较大的广度,利用卫星资料对沙尘过程的沙尘浓度进行反演,可以弥补沙尘暴在空间分布监测的缺陷。但卫星资料对沙尘强度的判断定量化的精度还相对较低,且遥感图像容易受到天气状况,云层的干扰。通过对“4.24”过程的模拟,GRAPES_SDM 沙尘模式在沙尘强度和范围方面都取得了很好的模拟效果。虽然

在沙尘浓度方面准确度劣于站点观测资料但高于遥感反演的结果, 范围精度劣于遥感图像但高于站点资料。对于无法使用站点和卫星遥感观测或者数据缺测的区域和时间段, 模式的结果对其是一个很好的补充。而且模式可以提高提前预报的效果, 在业务方面可以起到很大的作用。

第六章. 总 结

通过对民勤地区沙尘暴发生频次的统计分析,得到了:民勤地区的沙尘暴的发生次数总体呈下降的趋势,但在一段的时期中又存在着波峰一波谷的波动变化。春季的变化趋势和总的趋势拟合的程度最高;用小波分析发现,沙尘暴的年发生次数存在着周期性变化。其中总的年发生次数存在中小尺度上存在着明显的 5a、7.5a 的周期变化,大尺度上则存在着 15a 的周期变化。同时分别对不同季节也做了分析,其周期性基本存在着 5a、15a 两种情况。其中春季的周期性和总趋势最吻合。

对沙尘暴的监测预警方法有站点观测,卫星遥感和数值模拟。这三种方法各有自己的特点。结合民勤地区“4.24”黑风暴过程,分别对这次过程进行了分析。从天气形势上来看造成这次特强沙尘暴过程影响的系统为乌拉尔山脊前低槽,由于脊前槽后强偏北气流不断将极地的干冷空气输送到低压槽中,使低槽加深,槽前锋区加强,气压梯度,温度梯度加大,使垂直上升运动加强,从而为特强沙尘暴的形成提供了大尺度环流条件。通过研究,我们得到以下结论:(1)利用“4.24”沙尘天气过程中的站点监测资料,对地面温度、地面气压、相对湿度和风速的变化进行了研究。沙尘暴发生之前,地面温度较高,地面气压较低,相对湿度较低。沙尘暴发生之后,地面温度迅速下降,地面气压升高。相对湿度在沙尘暴的发生初期升高,在后期下降。地面风速的变化曲线和沙尘浓度的变化曲线一致。(2)利用 T213 资料和 GRAES_SDM 模式对“4.24”沙尘天气进行模拟,通过和站点监测的地面温度、相对湿度、沙尘浓度的比较,模式结果能反映出相应要素的变化趋势,模式结果得到验证。利用模式结果,对民勤“4.24”沙尘过程前后的散度场和涡度场配置进行分析。沙尘暴发生之前,在民勤西北部即巴丹吉林沙漠,地面 850hPa 同时存在负散度中心和正涡度中心,此地地面有强烈的辐合运动。民勤处在正负散度和正负涡度的边缘地区。沙尘暴结束时,在巴丹吉林沙漠 850hPa 处有较弱的负散度和涡度中心,地面的辐合运动降低。巴丹吉林沙漠的辐合上升运动对民勤地区沙尘暴的爆发起着很重要的作用。(3)沙尘暴遥感监测

系统根据沙尘的反射和辐射特性建立的沙尘指数, 本文利用 08、09 两年的站点观测数据对遥感监测建立的沙尘指数进行了验证, 沙尘浓度高的时刻沙尘指数也较高, 沙尘指数能准确反映出沙尘强度的大小。并通过 2010 年的遥感图像, 得到此时甘肃省中北部, 宁夏中部, 陕西省和内蒙古的交界处同时有沙尘天气的过境。

沙尘暴是一种自然灾害性天气, 它的发生依赖于周围环境, 同时又作用于周围环境。现在统计方面的证据表明, 沙尘暴的年发生次数是逐年递减的, 这可能是受全球气候背景, 大气环流形势影响的。沙尘暴的发生次数是荒漠化程度的一个指标, 现在我国的荒漠化程度在持续加剧, 沙尘暴的发生促使沙粒的迁移, 荒漠化加剧, 荒漠区域的加大, 为沙尘暴的发生提供了丰富的物质基础, 只要有合适的天气系统, 就很容易导致沙尘暴的发生。在未来很长的时间尺度的全球气候会发生什么变化, 大气环流形势又会有什么大的改变, 沙尘暴的发生次数会不会一直持续降低, 很多的问题都没有确定的结论, 一直处在不断的研究探索中。面对这种现状, 我们现在应该做的, 就是根据当地的气候特点和自然环境, 因地制宜, 改善周围环境和下垫面条件, 降低荒漠化的程度, 涵养水源, 保持沙漠边缘地带的水土平衡, 提高起沙的阈值。^[69-80]

随着人类对自然界认识的深入, 对影响人类的自然灾害的深入研究, 各种现象的本质必然会被人们层层解开。现在人们逐渐加大了对各个交叉学科的研究力度, 从不同的角度和研究方法对某一问题进行综合评定, 完善了很多之前不是很完整的理论。沙尘暴是一种剧烈的天气现象, 对它的起沙机制的研究就需要涉及到多个学科, 需要各个领域的人互相协调配合才能完成。现在已经有很多人已经意识到这点, 从各个方面对沙尘暴的过程进行分析, 这些工作取得了一定的成果。不过现在对沙尘暴的起沙机制, 起沙源区, 影响因素等问题没有达成统一的意见, 对沙尘暴的预报还不能达到令人满意的效果, 这些都仍然需要一个长期的过程来实现。

参考文献

- [1]王式功,董光荣,陈惠忠,等.沙尘暴研究的进展.中国沙漠[J],2000,20(4):350-356.
- [2]钱正安,宋敏红,等.近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22(2):106-111.
- [3]李耀辉.近年来我国沙尘暴研究的新进展.中国沙漠[J],2004,24(5):616-623.
- [4]牛生杰,章澄昌.贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究[J].气象学报,2002,60(2):194-203.
- [5]李艳春,赵广平,胡文东等.宁夏中北部沙尘暴过程中气象要素变化特征及成因分析[J].高原气象,2005,24(2):212-218.
- [6]徐国昌.甘肃“4.22”特大沙暴分析[J].气象学报,1979,37(4):26-35.
- [7]岳平,牛生杰,张强.民勤一次沙尘暴的观测分析[J].高原气象,2008,27(2):401-408.
- [8]岳平,牛生杰,张强.民勤一次沙尘暴天气过程的稳定度分析[J].中国沙漠,2007,27(04):668-672.
- [9]岳平,牛生杰,张强.民勤一次沙尘暴的观测分析[J].高原气象,2008,27(2):401-408.
- [10]王伏村,邵亮,郭良才等.河西走廊一次强沙尘暴过程的干侵入分析.干旱气象[J].2008,26(2):30-36.
- [11]Criggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data[J]. Air Pollute Control Assoc,1975, 25:622-625.
- [12]Steven AA. Using the radiative temperature difference at 3.7 μm and 11 μm to track dust outbreaks[J]. Remote Sens Environ,1989,27:129-133.
- [13]Carlson T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data[J]. Mon Wea Rev,1979,107:322-335.
- [14]裴浩,李云鹏,乌日娜.利用极轨气象卫星监测科尔沁沙地[J].中国草地.1997,6,46-52.
- [15]章伟伟,过仲阳,夏艳.利用MODIS监测沙尘暴的影响范围[J].遥感技术与应用,2008,23(6):682-685.
- [16]厉青,王桥,王文杰等.基于EOS-Terra/MODIS的沙尘暴遥感监测方法对比研究

- [J]. 干旱区地理, 2006, 29(1), 138-142.
- [17] 厉青, 王桥, 王文杰等. 基于EOS-Terra/MODIS的沙尘暴业务化遥感监测研究[J]. 国土资源遥感, 2006, 1, 43-46.
- [18] 韩涛, 李耀辉, 郭妮. 基于 EOS/MODIS 资料的沙尘遥感监测模型研究[J]. 高原气象, 2005, 24(5), 757-765.
- [19] Cautenet G. Theraml impact of Saharan dust over land. Part I : Simulation[J]. J. Appl Meteor, 1992: 166-180.
- [20] 申绍华, 陈受钧. 沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟[J]. 气象学报, 1993. 51(3): 283-294.
- [21] 陈麟生, 马艳. “93.5”黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4), 385-395.
- [22] 陈海霞, 丁治英, 帅克杰. 一次双急流型沙尘暴过程的数值模拟与诊断[J]. 干旱区研究. 2007, 24(4), 543-550.
- [23] 李耀辉, 赵建华, 薛纪善等. 基于 GRAPES 的西北地区沙尘暴数值预报模式及其应用研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 999-1012.
- [24] 赵建华, 李耀辉. GRAPES_SDM 沙尘模式应用及存在的问题[J]. 干旱气象, 2006, 24(1): 7-14.
- [25] 张人禾, 沈学顺. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展[J]. 科学通报, 2008, 53(20): 2393-2395.
- [26] 庄照荣, 薛纪善, 李兴良等. GRAPES 全球模式的模式误差估计[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 592-598.
- [27] 王宏, 贡山陵, 张红亮等. 新一代沙尘天气预报系统 GRAPES_CUACE/Dust: 模式建立, 检验和数值模拟[J]. 科学通报, 2009, 54(24): 3878-3891.
- [28] 张宝军, 马金珠, 等. 近 50 年来民勤县气温变化特征及其原因分析[J]. 干旱区农业研究, 2007, 22(2): 262-267.
- [29] 常兆丰, 韩富贵, 等. 民勤荒漠区近 50a 气温, 降水对全球变暖的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(09): 95-100.
- [30] 张克存, 曲建军, 马中华. 近 50a 年来民勤沙尘暴的环境特征[J]. 中国沙漠, 2004,

24(03): 257-261.

- [31]何金梅,张杰,等.甘肃民勤春季沙尘天气的气候特征[J].干旱气象,2008,26(3): 39-44.
- [32]胡隐樵,光天宁.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J].大气科学,1997,21 (5):581-589.
- [33]胡隐樵,光田宁.强沙尘暴发展和飏线-黑风暴形成的一种机理分析[J].高原气象, 1996,15(2):178-185.
- [34]王式功,杨德宝,金炯等.我国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠 1995,15(1):19-30.
- [35]钱正安,贺慧霞,瞿章,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[A].中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997.1-10.
- [36]王涛,陈广庭,钱正安,等.中国北方沙尘暴现状及对策[J].中国沙漠,2001,21(4): 322- 327.
- [37]叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报, 2001,55(5):5132522.
- [38]石广玉,赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J].大气科学,2003, 27(4):591- 603.
- [39]Brazel A J.The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona (1965—1980)[J].Journal of Climatology,1986,6:255-275.
- [40]刘景涛, 钱正安, 姜学恭等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究[J]. 高原气象, 2004, 23 (4), 540-548.
- [41]宋阳,刘连友,等.中国北方 5 种下垫面对沙尘暴的影响研究[J].水土保持学报, 2005,19(06):152-156.
- [42]郭锐,张杰,等.西北特殊地形与沙尘暴发生的关系探讨[J].中国沙漠,2004,52(5): 762-768.
- [43]韩永翔,张强,等.沙尘暴的气候环境效应研究进展[J].中国沙漠,2006,22(3):72- 77.
- [44]王建鹏,沈桐立,刘小英等.西北地区一次沙尘暴过程的诊断分析及地形影响的模拟试验.2006,25(2):259-268.

- [45]杨续超,刘晓东.东亚中纬度地区前期降水对中国北方春季强沙尘暴影响初探[J].干旱区地理,2004,27(3):293-299.
- [46]董治宝,屈建军,刘小平,等.戈壁表面阻力系数的实验研究[J].中国科学(D 辑),2001,31(11):953-958.
- [47]岳乐平,杨利荣,李智佩,等.西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气[J].沉积学报,2004,22(2):325-331.
- [48]王贤,等.浑善达克沙地沙漠化成因及其综合防治[J].水土保持学报,2004,18(1):147-150.
- [49]江灏,吴虹,等.河西走廊沙尘暴的时空变化特征及其环流背景.高原气象,2004,23(04):548-552.
- [50]方宗义,王炜.2002 年我国沙尘暴的若干特征分析[J].应用气象学报,2003,14(05):513-521.
- [51]程鹏,李光林,刘抗等.河西走廊一次区域性大风强沙尘暴天气诊断.干旱气象,2009,27(3):245-250.
- [52]杨东贞,王超.1990 年春季两次沙尘暴特征分析[J].应用气象学报,1995,6(1):18-26.
- [53]许东蓓,杨民,孙兰东,等.西北地区 4.18 强沙尘暴、浮尘天气成因分析[J].甘肃气象,1999,17(2):8-9.
- [54] Yang Dongzhen. A case study on sandstorm[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 5 (2):150-155.
- [55]李祥余,何清,黄少鹏等.南疆一次强沙尘暴前后塔中近地面个气象要素的变化特征[J].高原气象,2009,28(3),652-662.
- [56]胡泽勇,黄荣辉,卫国安等.2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J].大气科学,2002,26(1),1-8.
- [57]田庆明,马廷德,刘晓云等.强沙尘暴过程高空温湿风结构和大气稳定度分析[J].干旱区研究,2008,25(5),700-705.
- [58] Liu M, Westphal D L, Wang S, et al. A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001[J]. J. Geophys Res., 2003, 108, 8653, doi:10.1029/2002JD003178.

- [59]Zhao T L , Gong S L , Zhang X Y,et al.Modeled sizesegregated wet and dry deposition budgets of soil dust aerosol during ACE2Asia,2001:Implications for transPacific transport[J].J.Geophys.Res.,2003.108(D23),8665,doi:10. 1029/2002 JD003363.
- [60]梅凡民,张小曳,曹军骥,等.定量评价中国北方粉尘源区地表覆盖类型对表土风蚀强度的影响[J].海洋地质与第四纪地质,2004,24(1):119-124.
- [61]张胜邦,董旭,刘玉璋,等.柴达木盆地东南部土壤风蚀研究[J].中国沙漠,1999,19(3):293-295.
- [62]刘艳萍,等.防护林降解近地表沙降尘机理的研究[J].水土保持学报,2003 ,17(1):162 -165.
- [63]王建,李文君,等.近 30 年来民勤土地荒漠化变化遥感分析.遥感学报,2004,8(03):282-289.
- [64]张军华,毛节泰,王美华.利用 TOMS 资料遥感沙尘暴的研究[J].高原气象,2002,21(5),457-466.
- [65]郭妮,蔡迪花,韩兰英等.MODIS 沙尘暴判识方法与业务系统[J].气象,2009,35(1),102-107.
- [66]Holzer M , McKendry I G, Jaffe DA.Springtime t ransPacific atmospheric transport from east Asia:Atransit-time probability density function approach[J]. J.Geophys Res., 2003,108,4708,doi:10.1029/2003JD003558.
- [67]Toshiyuki M , Nobuo S ,Uno I , et al . Ground2based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia[J].J.Geophys Res.,2001,106(16):18345-18359.
- [68]Gao Y, Arimoto R,Zhou M Y, et al . Relationships between the dust concent rations over eastern Asia and t he remoteNort h Pacific[J].J.Geophys.Res, 1992,97:9867 -9872.
- [69]Swap T. Saharan dust in the Amazon Basin[J].Tellus,1992,44B,2:133-149.
- [70]李栋梁,王涛,钟海玲.中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J].中国沙漠, 2004,24(3):376-379.
- [71]张瑞军,何清,孔丹等.近几年国内沙尘暴研究的初步评述[J].干旱气象,2007, 25(3):88-95.

- [72]王存忠,牛生杰,王兰宁.中国 50a 来沙尘暴变化特征[J].中国沙漠,2010,30(4): 933-940.
- [73]Jauregui E. The dust storms of Mexico City [J].Inter.J.Climatol.,1989,9 (2):169 – 180.
- [74] McNaughton D L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms[J].Weather,1987,42(1):8-13.
- [75]Legrand M. Satellite detection of Saharan dust:optimized imaging during nighttime[J]. Journal of Climate,1988,1(3):256-264.
- [76]Steven A Ackerman , Hyosang Chung. Radiative effects of airborne dust on regional energy budgets at the top of the atmosphere[J].J.Appl.Meteor,1992, 223-233.
- [77]陈敏连,王锡稳.西北地区强沙尘暴研究的进展[J].甘肃气象,1996,14(1):8-10.
- [78]韩永翔,赵天良,宋连春,等.北太平洋地区春季粉尘的空间分布特征——观测及模拟研究[J].中国环境科学,2005,25(3):257-261.
- [79]宋连春,邓振镛,董安祥.干旱[M].北京:气象出版社,2003: 64-65.
- [80]张自银,杨保.中国北方过去 2000 年沙尘事件与气候变化[J].第四纪研究,2006, 26(6): 906-914.

作者简历

个人简介:

朱晓炜, 男, 汉族, 1985 年 10 月出生于宁夏回族自治区中宁县。2003-2007 年就读于南京信息工程大学数理学院物理系, 2008 年考入南京信息工程大学大气科学学院, 就读于气候系统与全球变化专业。

参与的科研项目:

1. 国家自然科学基金项目“西北沙尘暴关键区近地面起沙特征的观测与数值研究”。
2. 973 计划前期研究专项课题“民勤的生态变化对起沙影响的特征观测与数值基础研究”。

论文发表情况:

1. 朱晓炜, 李栋梁, 李耀辉。民勤地区年沙尘暴发生频次研究。干旱气象, 2010, 28 (4): 401-407.
2. 朱晓炜, 李耀辉, 李栋梁等。三种不同沙尘暴观测研究方法的比较分析, 已投至期刊《气象》。

参加学术活动情况:

1. 2010 年 5 月, 参加在北京举行的第一届中国激光雷达学术会议。
2. 2010 年 1 月, 参加在兰州举行的中国气象科学研究院及各专业所 2009 年度学术年会。
3. 2010 年 9 月, 参加在兰州举行的第三届干旱气候变化与可持续发展国际学术研讨会。

致 谢

时光匆匆，转眼间，三年的研究生生活就要结束了。回想这三年的生活，需要感谢的人很多。感谢周锁铨老师，师母及同门的师兄师姐们，在他们的帮助下，我度过了一段美好的时光，师门温馨上进的氛围让我感受到了温暖和科研的乐趣。虽然周老师不在了，但他的儒雅风度，广博知识永远是我学习的最好的榜样。感谢李栋梁老师，在我感到迷茫的时候接受了我，并尊重我的意愿把我送到了兰州干旱研究所生活学习，虽然在李栋梁老师身边的时间不多，但老师的和蔼，风趣，谈吐都深深的打动了我。感谢李耀辉老师，在兰州生活和学习期间，从日常生活的点点滴滴到论文的开题选题等一系列的事情都是在李耀辉老师的关怀和指导下完成的，虽然由于工作的原因老师很忙，但仍然安排专人安排我们生活，指导我们学习，抽空检查我们的学习情况，李耀辉老师敏锐的思维一丝不苟的态度及踏踏实实的工作精神都时刻激励着我。

回想在学校的时光，同学和老师们在生活和学习中对我的关怀和照顾，让我感受到了大家庭的温暖，并时刻激励着我努力学习。当我到兰州后，兰州干旱所的同学和老师帮助我很快适应这边的生活，在这里和他们一起度过了非常愉快的一年半的时光，这些美好的回忆是给予我的最宝贵的财富。

正是因为有了所有人的帮助，我的论文才得以顺利的完成。这里，我再次对关系和帮助我的老师和同学表示衷心的感谢。

最后我要感谢我的父母和其他亲友对我学习和研究工作的支持，以及生活上无微不至的关怀，他们是我顺利完成学业的源动力。

朱 晓 炜

2011 年 4 月 兰州

