

0018917

学校代码: 10200

研究生学号: _____

分 类 号: _____

密 级: 无



东北师范大学

硕士学位论文

长春地区沙尘天气监测与分析

Sand-dust storm monitoring and analysis of Changchun region

作者: 李凤龙

指导教师: 王宁 教授

学科专业: 环境科学

研究方向: 环境地学

学位类型: 学历硕士

东北师范大学学位评定委员会

2010 年 6 月

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。据我所知，除了特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。对本人的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李凤龙 日期：2010.5.28

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解东北师范大学有关保留、使用学位论文的规定，即：东北师范大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权东北师范大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编本学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：李凤龙 指导教师签名：王宁
日 期：2010.5.28 日 期：2010.5.28

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：_____

电话：_____

通讯地址：_____

邮编：_____

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。而沙尘暴监测研究就显得尤为紧迫和重要。本文采用数码设备对沙尘过境时的天空进行定时拍摄,运用卫星遥感处理软件 ENVI4.5 (The Environment for Visualizing Images4.5) 对监测的数据进行 RGB 模式色彩分析,判断并分析沙尘暴的强弱天气及其晴朗、阴天的状况,在监测的图片数据上,持续 1~2 天的强沙尘暴天气能够被清楚的识别,轻度的沙尘天气与云量较多的天气较难区别。还采用了地面 PM_{10} (可入颗粒物) 及 TSP (大气总悬浮颗粒物)、能见度的监测数据对沙尘过境时高空气溶胶和地面沙尘进行了对比分析,得到一定的相关性的结论。此种方法简单易行,成本费用低,监测结论可行。

通过应用卫星遥感和地面观测结果,研究长春地区沙尘气溶胶传输路径及相关特征。表明长春地区属于重要的沙尘过境区,其沙尘源基本上是异地沙尘,多是内蒙古的沙尘过境,向东迁移,漂洋过海,可影响到韩国和日本地区,甚至影响到美国的西海岸地区。作者利用日本对高空的遥感监测数据和我校的地面摄影、颗粒物监测数据对 2003~2009 年度的沙尘天气过境状况进行了分析,初步总结出沙尘通过长春时的强度和运移规律。结果表明:①长春市在亚洲蒙古国到日本岛的中间位置,决定了它是蒙古沙尘向东移动的过境区之一,对其地面的监测有助于分析沙尘气溶胶密度及其迁移转化规律。②2006 年和 2007 年为这 7 年春季中长春地区遭遇沙尘强度最大、次数最多的年份;2008 年后又有强度减弱而次数增加的趋势。③无论沙尘强度大小和次数多寡,都集中发生在每年的 3、4、5 月份。

关键词: 沙尘暴; RGB 模式; 地面监测; 沙尘过境

Abstract

In recent years, large-scale dust storms occurred in north China, it bring some question of transport and environment and people's daily lives and work ,and the negative impact of dust storms problem has become the focus of attention of the community. So the sandstorm monitoring studies appears to be particularly important. In this paper, the digital equipment will be applied to dust in the sky from time to time, and combined with satellite remote sensing processing software ENVI4.5 (The Environment for Visualizing Images) to the monitored data RGB color mode of analysis, it can determine and analyze the strength of the weather and dust storms sunny, cloudy conditions in the monitored picture data ,and a continuous 1 to 2 days of strong dust storms can be clearly identified, mild weather and cloud of dust weather more difficult to distinguish. Also I used the ground PM_{10} (incapable particles) and TSP, the visibility of the monitoring data in transit that the height of the dust and ground dust aerosols carried out comparative analysis of the relevance of a certain conclusion. The method is simple, low cost, just the introduction of China's sandstorm monitoring technology in Japan. High-altitude remote sensing image analysis consistent with ground monitoring.

The application of satellite remote sensing and ground-based observations study the dust in Changchun and the relevant characteristics of aerosol transmission path, it shows that Changchun is important transit area of the dust, sandstorms, dust sources and is off-site dust. Inner Mongolia dusts affect the South Korea and Japan, and even affect to the United States West Coast Region when it transit to east. The author had analyzed dust data from 2003 to 2009, the last he concluded that the strength in transit and transport laws. I have accumulated valuable meteorological data. The results show that Cancun is Asia's central region the transit area of its surface-based monitoring dust storms help to analyze the aerosol density and its migration and transformation rules. The results have occurred from the frequency of dust weather tends to increase, but the intensity tends to wane. It shows a clear trend of transit passage due to dust weather in transit completed within 2 ~ 3 hours, so the occurrence of sandstorms is often in the spring.

Key words: sand-dust storm RGB mode round monitoring Dust transit

目 录

中文摘要	I
英文摘要	II
目 录	III
引 言	1
第一章 绪论	2
1.1 沙尘天气的概述	2
1.1.1 沙尘天气	2
1.1.2 沙尘气溶胶	2
1.1.3 沙尘天气的影响和危害	3
1.1.4 亚洲沙尘源地	4
1.2 沙尘天气的国内外研究进展	5
1.2.1 国内研究现状	5
1.2.2 国外研究状况	6
1.3 沙尘天气的监测方法	6
1.3.1 沙尘暴的卫星遥感监测技术	6
1.3.2 地面的定点监测方法	6
1.3.3 其他监测方法	7
第二章 卫星遥感监测与地面监测	8
2.1 卫星遥感监测	8
2.1.1 卫星遥感监测	8
2.1.2 遥感图的分析功能	8
2.2 RGB 模式在监测地面沙尘中应用	11
2.2.1 RGB 模式地面监测长春地区沙尘暴的方法	11
2.2.2 监测结果	12
2.2.3. RGB 监测结果与沙尘的颗粒对光折射和反射的相关性分析	13
2.3 沙尘暴辅助监测指标的选择及实施	15
2.3.1 沙尘暴天气中能见度监测指标的应用	15
2.3.2 大气总悬浮颗粒物的监测及监测结果	19
2.3.3 沙尘天气中 PM ₁₀ 指标的监测与分析	21
2.3.4 大气总悬浮颗粒物与可吸入的颗粒的相关性分析	22
第三章 2003~2009 年沙尘地面监测数据整理	23
3.1 2003-2005 年监测结果	23
3.1.1 监测的时间和地点	23

3.1.2 监测结果.....23

3.2 2006-2008 年监测数据整理.....23

3.2.1 监测的时间和地点.....23

3.2.2 监测结果.....23

3.3 2009 年监测数据整理和分析.....24

3.4 历年监测结论与沙尘趋势分析.....25

3.4.1 2003~2009 年沙尘暴的监测结论.....25

3.4.2 东北亚地区沙尘暴趋势的简要分析.....26

第四章 结论.....27

参考文献.....28

致 谢.....30

引 言

沙尘是一个世界范围的灾害性天气现象，沙尘发生和迁移对其过境区的生态环境和社会经济都可带来严重的影响和危害。表现在几个方面：一是破坏生态平衡、使环境恶化和土地生产力严重衰退，危及沙漠化区域人民的生存发展，加重了贫困程度，有的地方已经出现了成批的生态难民；二是导致大面积可利用土地资源的丧失，缩小了人们的生存空间；三是严重威胁村镇、交通、水利、工矿设施及国防基地的安全，影响人们的日常生活和生命安全，对人们的身体健康造成极大的危害，对社会经济造成不可低估的损失，甚至长距离迁移影响其他国家，成为全国球性的重大生态环境问题。

人们对沙尘天气的监测和治理具有很长的历史，监测方法与手段各种各样，重点是对沙尘气溶胶的状态、沙尘暴的运移规律和迁移途径的研究，分高空遥感监测和地面监测两种。本文借助我校和日本鹿儿岛大学的监测合作协议，应用数码设备并辅以 PM_{10} 颗粒物分析对近年来长春市的沙尘天气进行定时定期的地面监测，并用遥感图像分析软件 ENVI4.5 对监测数据进行分析，运用 RGB 模式对沙尘暴的状态做出判断，最后得出结论。该方法是沙尘地面与高空对应监测的一种尝试，有助于沙尘暴等灾害性天气的深入研究，对防治灾害、保护人民生命财产安全、提高生活质量都具有及其重要的意义。

第一章 绪 论

1.1 沙尘天气概述

1.1.1 沙尘天气

沙尘天气一般分为扬沙、浮沉和沙尘暴。扬沙、浮尘及沙尘暴是既有联系又有区别的三种沙尘天气，它们虽都与风沙有关，但其形成情况、强度和危害程度等却不相同。一般说来，地面出现 $6\sim 9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风即能将地面沙尘吹到空中。扬沙常为本地沙源扬沙现象，多发生在地面附近。浮尘多由远处的沙尘随高空强风输送来。扬沙和浮尘仍属轻度沙尘天气，因其风速不够强，空气中的含沙量还不够大，对地面能见度的影响还较小，地面能见度常在 $1\sim 10\text{km}$ 之间。《地面气象观测规范》对沙尘暴的解释是：“沙尘暴：因为极强的风将地面尘沙吹起，并且可以使空气变的相当混浊，水平能见度小于 1.0km ，中国气象科学院汤洁博士在《沙尘暴的地基监测仪器及其原理》^[1]一书中对沙尘暴作了具体、明确的阐述：“沙尘暴是沙暴和尘暴或两者兼有的总称，是指强风把地面大量沙尘卷入空中，使空气特别混浊，水平能见度小于 1km 的天气现象。其强度等级一般采用风速和能见度两个指标确定，属于一种灾害性天气。”

1.1.2 沙尘气溶胶

气溶胶中含有的粒径小于 $100\mu\text{m}$ 的所有尘埃颗粒物叫总悬浮粒子（total suspended particulates, TSP）。TSP在大气中可长期悬浮的主要是粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子，叫大气飘尘，而粒径小于 $10\mu\text{m}$ 粒子（ PM_{10} ）极易进入人体呼吸道，粒径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的粒子（ $\text{PM}_{2.5}$ ）极易进入人体肺部。 PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 统称可吸入颗粒物。TSP中直径大于 $30\mu\text{m}$ 的粒子会很快沉降叫降尘，这就是沙尘暴过后沉积下来的主要物质，是看得见的危害物质，而可吸入颗粒物是经常被人们忽视，但危害却是很大的。气溶胶的化学组成中含有粒子元素

Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, Se, Zn, Ni, Cu, Pb, S, Br, Cl, As, Ba, V及可溶性无机盐 Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , 有机物烷烃、烯烃、芳香烃、多环芳烃、苯并芘。它们产生的气候效应主要是使近100年全球气候变暖的因素之一，生态环境发生变化。它们的环境效应是降低了大气能见度。

大气气溶胶可以输送几百、几千甚至上万千米，引起区域性和全球性的污染。大气气溶胶可远距离洲际输送，横跨太平洋、大西洋，因而大气气溶胶同时对区域气候异常及全球气候环境变化有着极其重要的影响。例如起源于蒙古沙漠区的沙尘暴和中国大陆的大气污染物可以被输送到韩国、日本，甚至北太平洋的夏威夷岛屿和北美地区^[2]。

1.1.3 沙尘天气的影响和危害

沙尘暴是对人类产生危害的一种天气现象。对人类危害最大当属强沙尘暴和特强沙尘暴。沙尘暴区每年都会因沙尘暴的影响造成各种损失。我国发生的最严重的沙尘天气当属 1993 年 5 月 5 日, 甘肃省金昌县的强沙尘暴, 当时遮天蔽日, 天昏地暗, 显现出极为恐怖的景象。这次沙尘暴造成数百人死亡或失踪, 直接经济损失 5.4 亿元, 沙尘波及范围达 110 万 km^2 ^[2]。1998 年 4 月, 西北 12 个地区、州县发生了强沙尘暴, 导致数万亩农作物受灾、数十万头牲畜死亡、一百多万人受灾, 造成的经济损失非常惨重^[3], 今年的沙尘天气更是频繁, 仅 3-4 月, 我国就发生沙尘天气和沙尘暴 4 次。2010 年 4 月 24-25 日, 甘肃省发生强沙尘暴天气(人称“黑风暴”), 民勤和酒泉的气象站监测到的能见度为 0 米, 造成张掖市和武威市民勤县多处发生火灾, 1 人死亡、5 人受伤、460 人被紧急转移安置, 造成民勤县经济损失约 2 亿元, 张掖地区经济损失约 2000 万元^[4]。

沙尘暴的影响范围有时很大, 一直可达我国东部的长江下游地区。

沙尘暴的频繁发生是环境恶化的重要标志之一。沙尘暴不但是一种气象灾害, 也是一个引发严重生态环境问题的诱因。为了区分沙尘天气对生态环境影响的程度, 我国气象部门根据水平能见度把沙尘暴分为特强、强、中等和轻四个等级(如表 1-1)。

沙尘暴强度	特强	强	中	轻度
能见度(m)	0~50	50~200	200~500	500~1000

表1-1 沙尘暴强度分级标准

2003年3月1日, 新的沙尘暴标准由中国气象局开始实施。新标准将沙尘天气划分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四种类型。其中, 浮尘指水平方向能见度小于10 km的天气现象; 扬沙指水平能见度在1 km~10 km以内的天气现象; 沙尘暴指水平能见度小于1 km的天气现象; 强沙尘暴则是指水平方向上的能见度小于500 m的天气现象。不同沙尘天气时, 空气中的沙尘含量也明显不同。以多沙尘天气的我国西北地区为例, 根据牛生杰近年在巴丹吉林和腾格里等沙漠边缘区春季的多次取样观测, 当地从背景大气到扬沙、浮尘及一般强度沙尘暴天气时, 地面空气中的平均沙尘浓度分别 $0.083\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $0.356\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $1.206\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.955\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 即从背景大气到扬沙、浮尘和一般沙尘暴, 地面沙尘的浓度是显著增加的, 后者依次是前者的3~4倍。再就我国东、西部沙尘暴天气而言, 据张小玲等报道, 北京地区2000年4~5月共出现9次沙尘天气, 以 4月6日的沙尘天气最强, 当天的最低能见度为500m, 最大风速为 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 地面含沙量仅 $1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅属一般沙尘暴, 对空气质量及交通等仅有轻微影响^[5]。而1993年5月5日甘肃金昌的特强沙尘暴, 最大风速达 $34\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最低能见度为0 m, 地面空气含沙量为 $1027\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 当时虽为午后天竟黑得什么都看不见。

沙尘天气中对人们生活影响最大的当数沙尘暴天气。沙尘暴来临时, 强风卷起大量沙尘, 使能见度恶化, 人们出行不便, 甚至要摧毁房屋和城市建筑, 造成巨大的经济损

失。我国的沙尘暴主要分布在西北及华北地区。在其它主要出现在北非、西南亚、中亚、中蒙、澳大利亚及美国西南部等干旱荒漠化地区，各地有不同的俗称。沙尘暴频频发生是生态环境恶化的标志之一。沙尘暴产生需要有3个要素，即：沙源、强风及热力不稳定的空气层结^[5]。因此也可以说沙尘暴是特定的荒漠化环境和气象条件相结合的产物。

1.1.4 亚洲沙尘源地

全世界有四大沙尘暴的多发区，分别位于中亚、中非、北美和澳大利亚。位于非洲地区撒哈拉沙漠是最大的干旱区，每年都会发生多次沙尘暴和强沙尘暴天气；美国科罗拉多、堪萨斯、俄克拉何马和得克萨斯因缺少植被覆盖也使沙尘暴比较频繁；澳大利亚有六个沙尘暴高发区，每年沙尘天气造成的经济损失也非常大。

我国沙尘暴发生区是中亚沙尘暴区的一部分，且主要集中在两大区域：一个位于塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠，在其西南部又有两个中心，即从麦盖提经巴楚至柯坪为一中心，平均年沙尘暴日数为 20.0~38.8 天；从莎车经和田到且末为另一个中心区，平均年沙尘暴日数为 25~35 天。从巴丹吉林沙漠东部，南至甘肃河西走廊，经过腾格里沙漠、乌兰布和沙漠，至库布齐沙地和毛乌素沙地，是另一沙尘暴多发区，也是西北地区涉及范围最大的沙尘暴多发区，其中最大中心在腾格里沙漠边缘的民勤，年平均沙尘暴日数为 37.7 天；其次是库布齐沙地的杭锦旗和毛乌素沙地南部的定边，分别为 27 天和 25.9 天。中国北方受地质条件和冷空气环流的影响，在西北及东北地区也大面积的分布着沙漠区，因为风蚀强度的不同进而呈现不同地貌特征（戈壁，沙漠，沙地）。这些地理环境都为提供大气气溶胶主要尘源创造了条件。

蒙古国和我国内蒙古地区是影响我国沙尘暴天气的一个重要的沙尘源地，形成于这一地区的沙尘暴天气过程往往能够对我国北方及东部地区产生较大的影响。而蒙古气旋是导致该地区沙尘暴天气过程的重要天气系统。特别是 20 世纪末以来，蒙古气旋^[6]沙尘暴天气过程明显增多，据 2006 年影响我国的沙尘天气过程的统计，在 17 次形成于蒙古国和我国内蒙古地区的系统性沙尘暴天气过程中，有 16 次都是由蒙古气旋引发的。四、五十年代以来，由于前苏联对中亚地区进行大范围的开垦，地表植被破坏严重，这里一直是中亚沙暴区的活跃区域，并对我国产生了很大影响。近年来我国境内包括河西走廊、内蒙古西部、陕西、山西、宁夏北部、河北坝上地区在内的农牧交错区和沙地，由于超载过牧等人类不合理的开发活动，使这一地区土地退化，生态系统遭到严重破坏，成为新的沙尘暴发生的源区。90 年代仅西北五省就发生强沙尘暴 20 次，特别是 1999 年和 2000 年春季，分别发生了 3 次和 4 次强沙尘暴。

由于受地质、地理和大气环流的影响，中国北方（包括长春地区）从东北到西北分布着大面积沙尘区。由于风蚀程度的不同，又把这些沙区进一步划分为沙地、沙漠和戈壁滩：贺兰山以东的半干旱沙区称为沙地，以西的干旱沙区称为沙漠，广大干燥或极端干燥多风地区，则为戈壁滩。沙漠和沙地划分的另一种方法：以 200 mm 等雨量线为界限，等雨量线 < 200 mm 的干旱至极干旱荒漠是以流动沙丘为主的沙漠，等雨量线 >

200 mm 的荒漠草原、干草原和森林草原甚至湿润森林地带分布着以固定、半固定沙丘等为主的沙地。

1.2 沙尘天气的国内外研究进展

1.2.1 国内研究现状

沙尘天气(浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴)是全世界干旱、半干旱地区出现的强灾害性天气,可造成房屋倒塌、交通供电受阻或中断、火灾、人畜伤亡等,甚至污染自然环境,破坏作物生长,给国民经济建设和人民生命财产安全造成严重的损失和极大的危害。沙尘天气问题目前已成为全球关注的重要环境问题之一。我国对沙尘天气及其影响的研究要比国外学者要晚一些,20世纪70年代开始,从形成机理、时空分布、治理对策等方面对沙尘天气开展了深入研究,并取得了大量有意义的成果^[7]。上述研究大多集中在西北和华北地区,对于受沙尘影响同样比较严重的东北地区,研究相对较少。

我国近代沙尘暴研究是从第四纪地质学的角度研究黄土与粉尘沉积开始的。20世纪50年代,我国气象常规观测中开始将沙尘天气作为必须监测的天气现象。70年代末开始研究沙尘灾害,进展速度一直比较缓慢。自从1993年5月5日西北地区特强沙尘暴天气发生后,沙尘天气及其灾害的研究才受到广大学者的关注。1993年9月在兰州召开了首届“全国沙尘暴天气研讨会”,沙尘暴研究正式由国家科委列入“八五”科技攻关计划。同年开始研究使用气象卫星监测沙尘暴,并且掌握了一些沙尘暴监测方法。1994年以来,国家自然科学基金委、科技部和部分省市科技厅先后资助和支持了多项对沙尘暴的研究项目。1997年1月正式出版了第一本沙尘暴研究的专辑《中国沙尘暴研究》。这一时期的沙尘灾害研究主要集中在进行沙尘暴成因分析、沙尘暴监测预报方法研究、沙尘暴天气预警服务系统设计等,并以定性和半定量研究为主^[8]。

20世纪90年代末,我国北方地区大范围沙尘天气频繁出现,沙尘灾害研究进入了新阶段,为及时交流沙尘暴的研究成果,我国于1993年9月和2001年2月先后两次在兰州召开了沙尘暴学术会议;大陆和台湾自2002年后,每两年召开一次海峡两岸沙尘暴学术研讨会^[9]、2009年在兰州大学还召开了大气边界层多相流暨风蚀、沙尘暴、沙粒跃移以及风吹雪国际学术研讨会^[10]。近年来的研究包括大量的沙尘暴案例分析,各地沙尘气溶胶的观测分析,中国荒漠化和沙尘暴活动趋势的分析,更有大量的沙尘暴防御及我国西北生态环境治理的对策和建议见诸期刊和报端。

国际合作项目不断增加。2000年末,中国科学技术研究院与日本科技厅签署了“风送沙尘的形成、输送机制及其气候与环境影响的研究”政府级的合作项目,研究沙尘的形成和传输,分别在阿克苏、敦煌、沙坡头、西安和北京等地建立环境监测站,开始进行沙尘长距离输送机制、沙尘对全球气候影响等相关研究;2004年9月,国际沙尘暴计划会议上,我国气象学家首次领衔国际科学合作项目:“国际沙尘暴研究合作计划”,用以协调各国的沙尘暴观测计划^[11]。

1.2.2 国外研究状况

国外研究者从20世纪20年代就开展了沙尘天气时空分布、成因与结构以及监测与对策等方面的研究,例如:Dove在1921年;Gierasch 1973年;Anthony在 1978年;Doty *et al.*在1987年等都对沙尘天气的时空分布,成因,结构及其监测等方面进行了不同程度的研究与探索^[8]。1925年,Sutton分析研究了北非苏丹喀士穆地区黑风(当地称黑风暴)的若干特征。Morals^[12]分析了苏丹1973年的一个沙尘暴事例,认为干冷空气锋前的辅合上升气流共同作用形成了沙尘暴。Ott,S.T和A.Ott^[13]利用卫星和GATE资料对撒哈拉沙尘暴的爆发作了分析,而Westphal^[14]用一个三维的气溶胶模型和一个三维的大气数值模式,研究了1974年8月23日至28日撒哈拉沙漠沙尘起沙和远距离输送到大西洋的案例。近年来,Shao^[15]将GIS(地理信息系统)、气象模式与起沙模式联合起来,对澳大利亚墨累河至达令河流域(Murray—Darling Basin)以及澳大利亚大陆的土壤风蚀做了模拟。另外日韩许多学者也十分关注沙尘暴的问题,中日及中韩间正在执行“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境的影响”等双边研究计划。在日本鹿儿岛大学教育系,从2000年底至今,设置了面向东方天空具联网功能的数码相机,全天候五分钟间隔实时监测Sakurajima火山的火山灰状况。

1.3 沙尘天气的监测方法

沙尘天气的监测手段分为卫星遥感监测和地面定点监测。

1.3.1 沙尘暴的卫星遥感监测技术

利用卫星遥感技术监测沙尘暴的历史可追溯到二十世纪七十年代以前。Shenk 和 Curran 在1974年提出了用卫星可见光和红外数据监测陆面和水面上空沙尘暴的方法,Griggs1975年则提出用卫星观测的可见光数据测量水面上空大气气溶胶的光学厚度,使可见和近红外VIR 技术以及热红外TIR 技术成为当时的主要监测方法。Fraser、Carlson、Norton和Takashima等分别利用卫星可见光和近红外观测识别大气中沙尘的质量、大气浑浊度和气溶胶光学厚度。Legrand则研究了利用卫星热红外观测识别和反演沙尘暴光学厚度的方法。将VIR 和TIR 的技术比较可见,VIR 技术的主要误差来自地表反射率的不确定性,而TIR 技术的主要误差来自地表面温度、地表发射率和大气温度的不确定性。由于沙尘暴发生源区的下垫面多为沙漠,反照率很高,与近红外波段的表面反射率随空间分布差异变化很大,利用VIR 技术监测沙尘暴,必然会带来较大误差;而地表温度、地表发射率和大气温度的廓线均为空间分布的慢变函数,对以TIR 技术监测沙尘暴的影响相对较小^[16]。

1.3.2 地面定点监测方法

地面定点监测分为一般地面观测和长期地面观测。

一般地面观测主要用于沙尘暴、浮尘天气的全自动大气颗粒物采样分析和天气状况

监测,还包括沙尘光学厚度测定、气象要素(降水量、风速、温度和湿度等)记录、沙尘源地土壤状况分析、激光雷达沙尘垂直分层观测、沙尘通量和能见度观测等;长期地面监测立足于建立沙尘暴历史数据库,要对大气气溶胶光学厚度、气象要素、土壤状况、太阳辐射和能见度观测等,还需要进行历史气候资料的整理。两种方法有其不同的作用,对研究沙尘灾害十分重要。但是哪一种监测方法,也都有一定的局限性,如:(1)需要特定的观测仪器;(2)沙尘暴的发生往往伴有恶劣天气、历时短暂和时间不定,因此制约着观测的准确性;(3)观测点有限,不能保证其空间覆盖率。

1.3.3 其他监测方法

其他监测方法主要分为光谱仪法、红外辐射计法和全景照相等。主要监测的对象是地物(沙漠和沙化土地、湖面和海面)反射率、天空温度、地表温度和湿度、太阳辐射等。

本论文是定位定时监测沙尘天气的实验研究。利用数码拍摄设备(数码相机和数码摄像机),监测和记录每年12个月份每天的天气状况,分辨沙尘天气情况,并使用ENVI4.5对数码图片进行分析与整理,半定量分析沙尘过境的天气状况。该项目由日本鹿儿岛大学^[17]和东北师范大学签订的合作协议资助完成。

第二章 卫星遥感监测与地面监测

2.1 卫星遥感监测

2.1.1 卫星遥感监测

卫星遥感监测在我国起步是比较早的,早在 70 年代初,我国还没有自己的气象观测卫星时,国家卫星气象中心就利用接收别国的气象卫星资料,开始了我国的卫星遥感监测工作。卫星遥感监测工作也有了很大的发展。具体的监测方法很多,激光雷达技术、近红外技术、热红外技术等等。应用这些技术采用的信息结合 GIS (地理信息系统),不但可以监测沙尘暴的源地、路径,载沙量进行研究,还可以估计出受沙尘天气影响的程度,沙尘暴发生前后的风力及风向,沙尘气溶胶的密度等一些有关于沙尘的物理、化学机制。本论文采用高空卫星遥感技术结合地面数字,对沙尘过境区进行监测,分析其运移规律及其机理。

2.1.2 遥感图的分析功能

首先从卫星遥感图像中可以分析出沙尘天气的路径及天气状况。

长春地区位于吉林省中部,温带大陆性季风气候,春季干旱少雨,多大风天气,气旋活动非常频繁。利用高空遥感图像就可以分析沙尘天气发生时,浮尘和沙尘暴的影响范围以及强度。

图 2-1^[18]是 2002 年 3 月 21 日沙尘过境时的卫星遥感图。从图像上可以看出,蒙古气旋是影响长春地区沙尘天气的主要地面系统。该气旋一般形成于贝加尔湖西侧的萨彦岭地区,沙尘区位于气旋的西南方。气旋沿西北向东、东南或东北方向移动,其中心逐渐加强。气旋路径经过的地方一般会有冷锋过境,因此长春地区出现沙尘天气时,经常伴有 4~7 级大风。影响范围很大,除了影响本地区外,还可能跨国向东到韩国、日本,甚至影响到美国的西海岸地区。

沙尘天气过程分发生在冷锋前及冷锋后两种。长春地区处在冷锋前时多出现西南大风,风速普遍较大,只要有沙源提供,就可出现大范围的扬沙天气或沙尘暴天气;冷锋后由于冷空气南移,风速相对较小,因此以出现的大范围浮尘天气或局地扬沙天气为主^[19]。由此可以判断,长春地区是沙尘过境区,是重要的影响区,在亚洲沙尘研究中有重要意义。

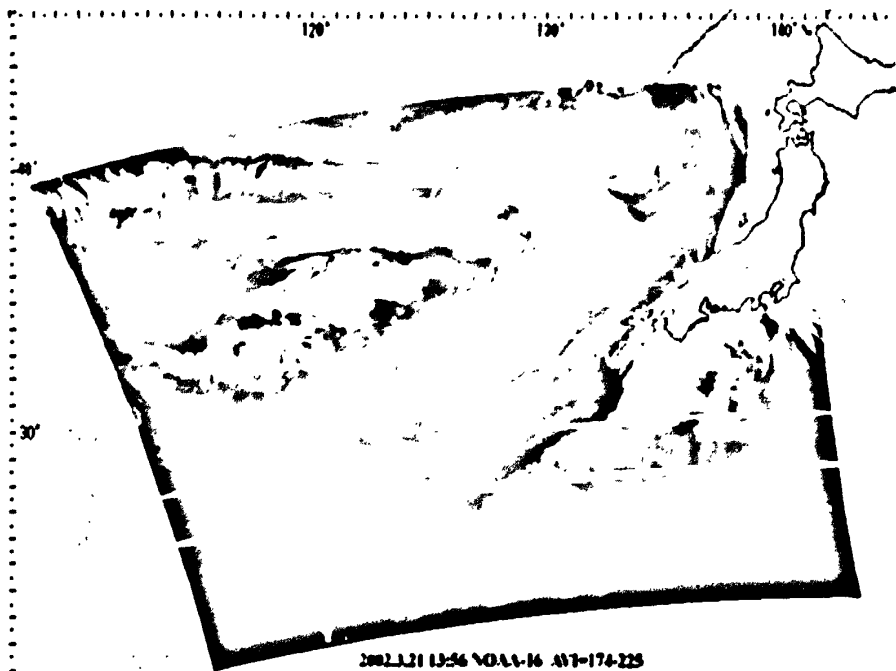


图 2-1.2002 年 3 月 21 日沙尘过境 NOAA/AVHRR 的 AVI 图

另外，通过卫星遥感图像还可以分辨沙尘天气发生时的强度。

从图 2-1 高空遥感影像的颜色上可以看出，影响长春地区的沙尘天气以浮尘和扬沙为主。浮尘中沙砾浓度较小，因此遥感影像中的色调比较浅，空气能见度稍大，色调范围在 30% ~50% 之间；扬沙的沙砾浓度相对较大，色调相对也比较暗，范围在 40% ~60% 之间；沙尘暴沙砾浓度大，色调较暗。一般在大范围的扬沙天气中出现单个或几个站点的沙尘暴，色调范围在 60%~70%之间。单从色调上不能准确判断出沙尘天气的强弱，还应配合地面形势及气象要素分析。图 2-2 是长春和四平地区沙尘天气的气象卫星监测图，虽然色调较浅(30% ~50%)，但从地面图上可见地面风速很大，仍有沙尘暴现象出现

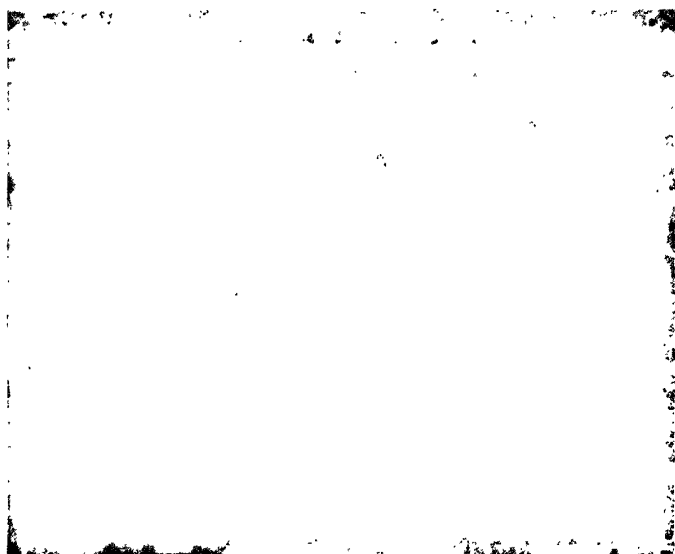


图 2-2. 气象卫星 NOAA 监测的沙尘天气图像

沙尘暴的发生主要集中在春季,而在一天中没有时间规律,一般持续时间不会太长。2009 年长春地区的沙尘天气仍然集中发生在 3~5 月份,沙尘的强度稍低于往年,2009 年 5 月 19 日 17 时在卫星 NOAA-16 的监测影像上可以清晰看出长春属于沙尘过境区,可以识别沙尘的强弱。



图 2-3 2009 年 5 月 19 日 17 时中国北方 NOAA/AVHRR 影像

上图中淡黄色的区域为中国的北方区域,呈现明显的沙尘过境的天气状况。Aerosol Vapor Index(AVI)图片上能够辨别昼夜沙尘天气的分布。通过分析热红外波段在 12 和 11 微米的差异,能够清楚地识别相应的沙尘天气。尤其是 5 月 19 日强烈的途经韩国和日本的沙尘暴过境事件^[20] (2.4)。分析主要原因,是春季我国冷空气活动加强,风速较大,降水偏少。加之这几天气温突然急剧回升。此外,由于干旱,植被尚未返青,地表覆盖较差,这些都促成了长春地区 5 月份沙尘天气的发生。



图 2-4 AVI Color on 15:56 CHANGCHUN at may19, 2009

2.2 RGB 模式在监测地面沙尘中的应用

2.2.1 RGB 模式地面监测长春地区沙尘暴的方法

本实验设计监测点选址位于中国吉林省长春市的东北师范大学,其地理坐标为东经 $125^{\circ}19'25''$, 北纬 $43^{\circ}51'38''$ 。架设的监测点在城市与环境科学学院 6 楼气象实验室,窗朝向正北方(图 2-5), 设了 CasioQV-R4 型的数码相机进行监测,相机记录数据均采用 640×480 分辨率, JPEG 存储格式, 定时拍摄间隔为 1 小时。

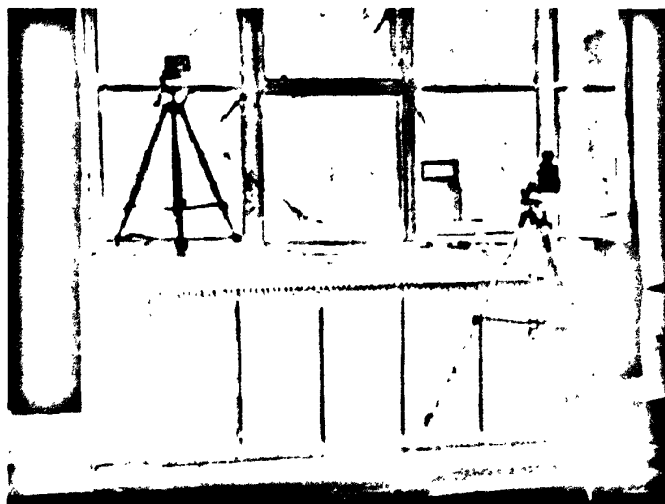


图 2-5 地面监测地点

监测时用数码设备(数码照相机和数码摄像机)定时拍摄沙尘天气的状况,将记录的影像资料在 ENVI4.5(遥感分析软件)处理后,得到对沙尘天气的分析结果。在监测点朝窗口方向放置 Casio QV-R4 数码相机, SONY DCR-TRV40E 数码摄像机,(如图 2-6a、b)作者采用了不间断电源,可以持续提供稳定电能供电,可以拍摄持续的相片;在整个的监测过程中,室内所有灯光均处于关闭状态,这样可以防止灯光干扰拍摄相片。数码相机拍摄前设定为定时自动拍摄,其时间的间隔为 1h,拍摄时刻为 CST(China Standard Time)的整点时刻,焦距设为无穷大,画幅大小设定为 640×480 dpi,图像质量为最好,无曝光补偿,其他设定均为数码相机的默认值;数码摄像机也设定为自动拍摄,时间间隔为 10min,拍摄时刻也以整时整点的时刻为起点,时间依次设为 10min, 20min, 30min, 40min, 50min 和 60min,记录时间为 0.5s,每秒 30 帧,焦距无穷大,拍摄目标内容与数码相机相符。数码摄像机的感光 CCD 为 100 万像素,镜头为 10X 光学变焦镜头。

本方法已设计应用了 7 年时间,设计的监测时间为每年 2 月下旬到 8 月上旬。6 年中监测点位稍有变化,因房屋修缮将监测地点向东平移了 300 米左右。从天气尺度上看,并不影响监测效果。该监测系统是完全的自动化监测,监测过程中,每周维护一次。数码相机存储卡容量为 512MB,可完成一年的监测数据存储;数码摄像机的录像时间是 90min,能够存储两个月的数据,因此需要按时更换 DV 录像带。本套地面监测系统每年为研究者积累了大量沙尘暴监测的宝贵资料。

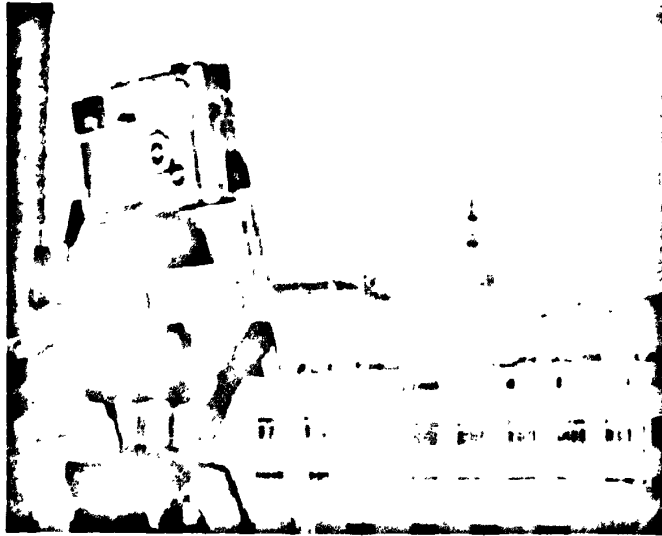


图 2-6(a)数码相机 Casio QV-R4

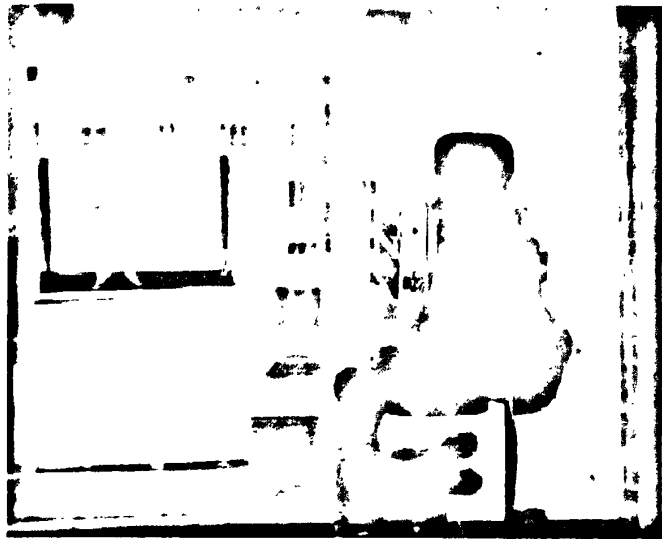


图 2-6(b)数码摄像机 SONY DCR-TRV40E

2.2.2 监测结果

在众多的监测数据中挑选出有沙尘状况的天气,通过以下一些特征能够判定沙尘天气过境与否:如数码图片色彩的差异、图片上垂直方向上亮度的变化以及远处能见度参照物和天空对比度的下降等。并且还能分辨轻微沙尘暴天气、重沙尘暴天气、阴霾天气和晴天。分析方法:从四种天气的图片中按水平方向上取一条线(图 2.7 所示)做剖面图分析。在监测平面上提取此线上图片信息所记录的 RGB 值,得到曲线(如图 2.8a-2.8d),在竖直方向上,垂直取一条线(图 2.7 所示),任意位置均可,在不同图片的相应的位置同样得到曲线,如图(2.9a~2.9d)。解析该线上各像素点 8 位的 RGB(R 代表红,G 代表绿, B 代表蓝)色彩信息,获得 RGB 波形位置关系,可以定量分析所发生沙尘天气的轻重程度。即本论文中应用的 RGB 模型。

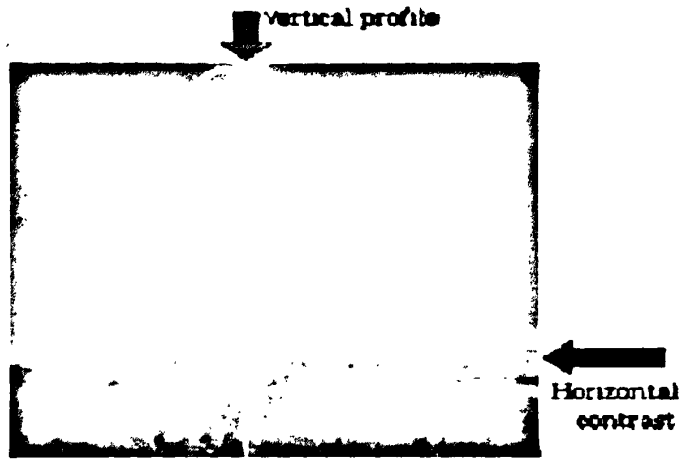


图 2-7 剖面分析图

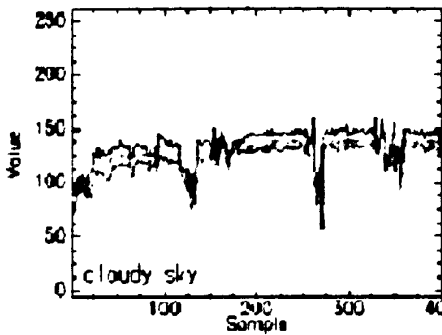


图 2-8 a (多云天气)

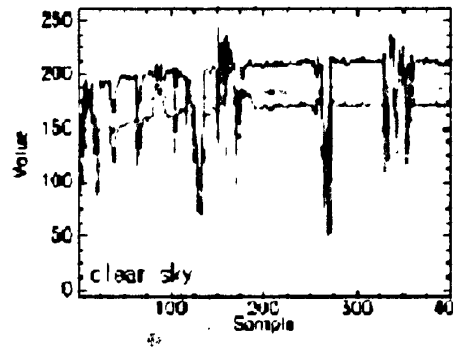


图 2-8 b (晴朗天气)

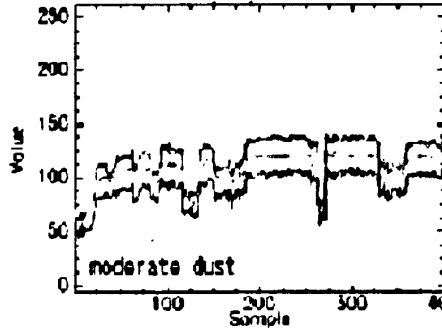


图 2-8 c (严重沙尘天气)

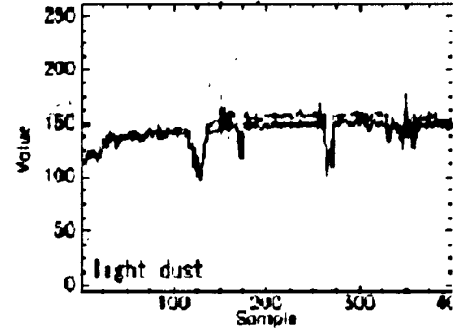


图 2-8 d (轻微沙尘)

图 2-8 RGB 值曲线图

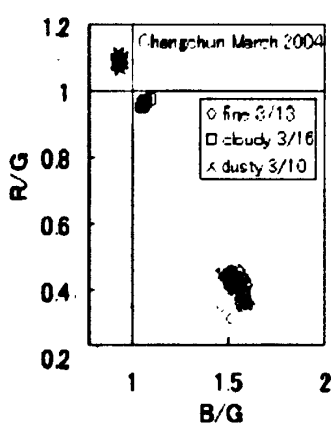
对于晴朗天空，所取线上各像素点的 RGB 信息灰度级关系有 $B > G > R$ ，相对的位置关系亦很明显，此种情况越靠近图片顶部越明显。云量多的天气下，上述差异变小，尤以 G 和 R 值更为接近，但是大小关系没有变化。沙尘天气过境时，RGB 的灰度级位置关系变化为 $B < G < R$ ，随着沙尘天气程度加重，灰度级间差异也增大，二者变化为正相关。

2.2.3 RGB 监测结果与沙尘的颗粒对光折射和反射的相关性分析

光波都有一定的频率，光的颜色是由光波的频率决定的，在可见光区域，红光频率

最小，紫光的频率最大，各种频率的光在真空中传播的速度都相同。但是不同频率的单色光，在介质中传播时由于受到介质的作用，传播速度都比在真空中的速度小，并且速度的大小互不相同。红光速度大，紫光的传播速度小，因此介质对红光的折射率小，对紫光的折射率大。当有沙尘天气发生时，大量不同粒径的颗粒物对光发生折射和散射作用。在谱段中的蓝紫光的光波能量损失大，因此体现在图片上时，就是蓝紫光的灰度级别明显低于长波长的红光；在明亮的晴朗天气状况下，情况恰恰正好相反，体现为短波长蓝色光灰度的级别高于长波长红色光。

在分析天空的数码影像中，正是由于上述原因，经 ENVI4.5 软件分析时，有 RGB 模式产生，每像素 24 位元 (BPP) 编码的 RGB 值是使用表示红色、绿色和蓝色（通常按这个顺序）强度的三个 8 位元符号整数 (0 到 255) 来指定^[21]。从所分析图片数据得到的单像素点 RGB 模式折线图中，观察到 G 线位于 R 和 B 线的中间位置，当沙尘过境时 R 和 B 两折线则交换了位置关系。因此考虑将 R/G 和 B/G 的比值作为数据比较，并分别以 R/G、B/G 作为横纵坐标轴，监测图片上所取的一条位置固定的曲线，曲线上每个像素点经过分解获得三色彩信息点，形成三条折线，将折线 RGB 上对应像素点的 R/G、B/G 的所有比值标于坐标系内，比较其相关位置的关系。（如图 2-9）



晴天



阴天



沙尘天气

图 2-9 不同天气的 RGB 值

按照上述方法经过处理后所获得的三个点分别集于坐标系内，由左上至右下依次排列的天气为沙尘天气，多云和晴朗天气，沙尘天气的 R/G 值明显大于等于 1，非沙尘天气时候的 R/G 值均小于 1，天气越晴朗 R/G 的值越小。

2009 年的沙尘天气监测选取出了沙尘天气，轻微沙尘天气，阴天，晴天的影像图片。经过 ENVI4.5（遥感分析软件）的分析处理后得到分析结果，可以看出沙尘天气的强弱趋势。如图 2-10 所示：

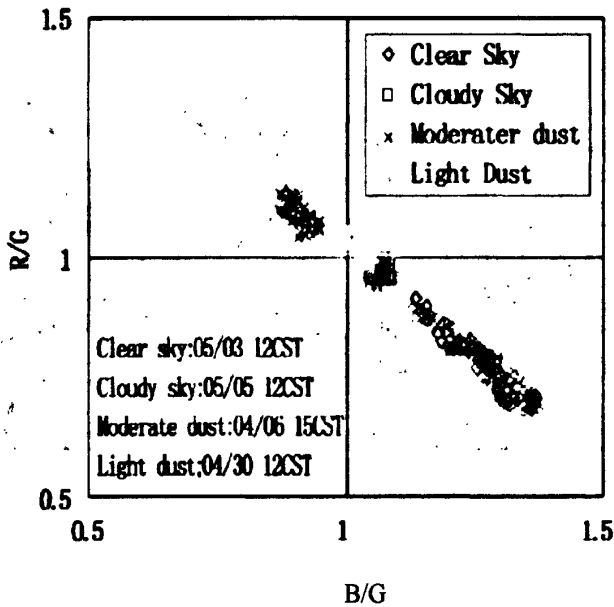


图 2-10 2009 年 R/G/B/G 模式图

2.3 沙尘暴辅助监测指标的选择及实施

沙尘暴辅助地面监测指标选择了能见度、总悬浮颗粒物和 PM₁₀ 三项指标。

2.3.1 沙尘暴天气中能见度监测指标的应用

大气能见度(Visibility)是反映大气透明度的一个指标。一般定义为具有正常视力的人在当时的天气条件下还能够看清楚目标轮廓的最大地面水平距离。还有一种定义为目标的最后一些特征已经消失的最小距离。一般来说，对同一种目标，

这两种定义确定的能见度大小是有差异的，后者比前者要大一些。

气象条件直接决定着能见度的好坏，而能见度大小能很好的反映沙暴、扬沙、浮尘等天气现象对大气环境影响的程度^[22]，因此目前国内外对于沙尘暴的定义多以能见度和风速作为依据。并以能见度作为划分沙尘暴强度的重要参数。

根据浮尘、扬沙和沙尘暴的能见度指标，通过选择监测目标物及其与监测地点的距离来判断长春地区沙尘天气过境。监测目标物见图 2-11，目标物及与监测地点的距离见表 2-1。

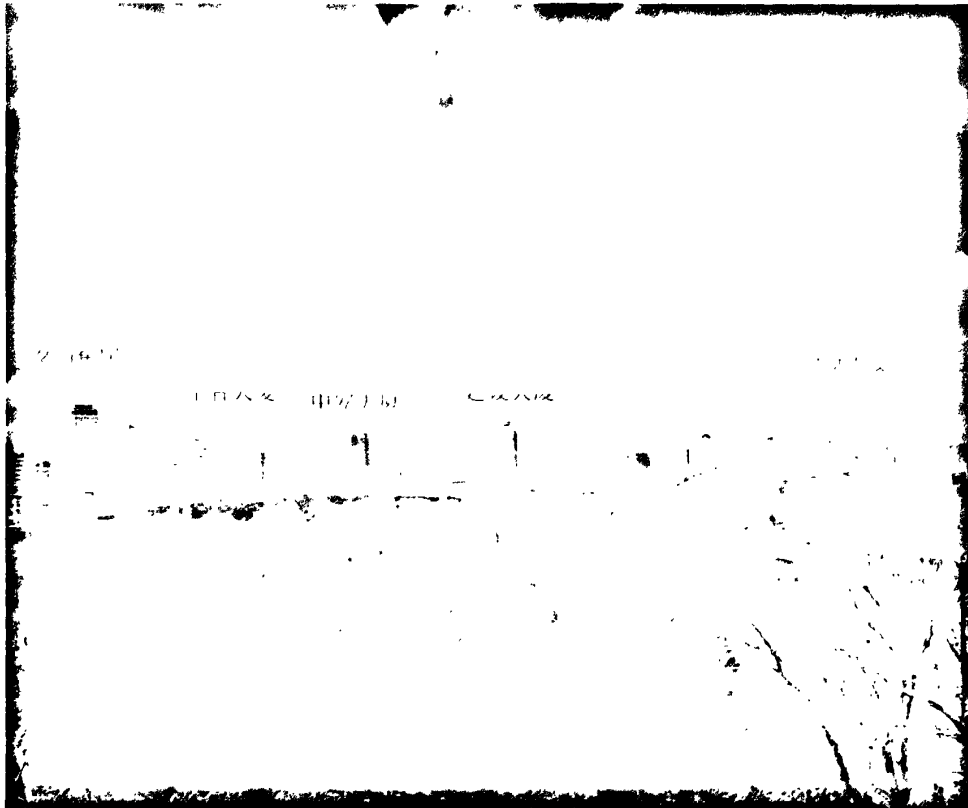


图 2-11 监测中基准站和观测站的位置图

表 2-1 监测目标物及与监测地点的距离

监测目标物名称	至监测点的距离	能见度级别
名门集团	300m	I
中吉大厦	1200m	II
中安大厦	2000m	III
建设大厦	2800m	IV
滨河小区	4000m	V

监测目标物的选取主要考虑在图片中建筑物是否明显可辨，且足够突出，便以观察。此外目标物的分布对于监测点而言，应有一定的距离梯度。按照表中目标物的距离，分别确定其能见度级别为 I ~ V 级，级别越高，能见度越好。2009 年设置的监测目标物比

较合理，梯度明显可辨，并且有助于判别沙尘天气过境时的强弱。监测点距离监测目标物体的距离，是先用相片记录，然后在 1: 50000 的地图上标出相应的建筑物，再通过地图比例尺换算到相应的距离。在记录的图片数据中，通过监测目标物的能见度指数级别(I、II、III、IV、V)来确定该日基本天气系统的具体情况：如晴天、雨天、阴天或者沙尘天气。

在 2009 年 11 月 1 日到 19 日任意时段的监测图片中选出若干沙尘天气、阴天、雨天和晴天的影像，用监测目标物的方法判断其能见度，见表 2-2。再将其结果和吉林省气象监测站的数据（如表 2-3）进行分析比较，结果见表 2-4。

表 2-2 基准站监测与能见度确定

具体时段 2009 年 11 月	名门集团 500m	中吉大厦 1500m	中安大厦 2000m	建设大厦 2800m	滨河小区 4000m	能见度级别 估定
1 日 8:00	可见	可见	可见	可见	可见	V
2 日 8:10	可见	可见	可见	可见	可见	V
3 日 14:00	可见	可见	可见	可见	可见	V
4 日 8:00	可见	可见	可见	可见	不可见	IV
5 日 8:00	可见	可见	不可见	不可见	不可见	II
6 日 8:00	可见	可见	可见	不可见	不可见	III
7 日 8:00	可见	可见	不可见	不可见	不可见	II
8 日 20:00	可见	可见	可见	可见	不可见	IV
9 日 8:00	可见	可见	可见	可见	不可见	IV
10 日 14:00	可见	可见	可见	不可见	不可见	III
11 日 8:00	可见	可见	不可见	不可见	不可见	II
12 日 14:00	可见	可见	可见	可见	可见	V
13 日 14:00	可见	不可见	不可见	不可见	不可见	I
14 日 8:00	可见	可见	不可见	不可见	不可见	III
15 日 8:00	可见	可见	可见	可见	不可见	IV
16 日 16:00	可见	可见	可见	可见	不可见	IV
17 日 14:00	可见	可见	可见	可见	可见	V
18 日 8:00	可见	可见	可见	可见	可见	V
19 日 8:00	可见	可见	可见	可见	可见	V

其中能见度的级别（I、II、III、IV、V）判定是根据监测的图片，图片在遥感卫星分析软件 envi4.5 分析后，初步判定其级别，其中 I 级为沙尘发生天气，仅名门集团建筑物清晰可辨，II 级为阴雪天气，名门集团和中安大厦的建筑物明晰可见；III 级的确定为晴朗天气，名门集团、中吉集团、中安大厦建筑物均清晰可见；IV 级的判定是在晴朗天气，名门集团、中吉大厦、中安大厦、建设大厦均可见。V 级是所有的建筑物均明晰可见。将测定的结果同吉林省气象局提供的同日逐日能见度值进行了比较，其最终的判定结果和官方的监测结果相差不是很大，基本吻合。

表 2-3 2009 年 11 月份长春市逐日能见度值

(吉林省气象局提供)

单位: km

日期	02 时	08 时	14 时	20 时
11 月 1 日	12	11	15	15
11 月 2 日	15	12	15	15
11 月 3 日	12	12	10	10
11 月 4 日	10	10	12	12
11 月 5 日	4	8	10	10
11 月 6 日	10	10	10	10
11 月 7 日	10	10	10	10
11 月 8 日	10	15	15	11
11 月 9 日	10	16	20	12
11 月 10 日	12	12	16	12
11 月 11 日	12	9	12	7
11 月 12 日	10	7	10	10
11 月 13 日	7	4	4	4
11 月 14 日	7	9	10	10
11 月 15 日	10	10	12	10
11 月 16 日	10	12	20	12
11 月 17 日	12	12	19	12
11 月 18 日	12	12	12	10
11 月 19 日	10	13	12	10
11 月 20 日	10	12	15	12
11 月 21 日	12	12	15	12
11 月 22 日	12	10	12	10
11 月 23 日	8	7	12	10
11 月 24 日	8	10	7	6
11 月 25 日	10	12	1	10
11 月 26 日	10	60	70	7
11 月 27 日	10	10	12	10
11 月 28 日	10	10	12	12
11 月 29 日	12	12	15	5

表 2-4 本实验能见度监测数据与省气象局监测数据的比较

监测日期	本实验监测数据	气象局监测数据 (km)	监测日期	本实验监测数据	气象局监测数据(km)
11 月 1 日 8:00	V	11	11 月 10 日 14:00	III	12
11 月 2 日 8:00	V	12	11 月 11 日 8:00	II	8
11 月 3 日 14:00	V	12	11 月 12 日 14:00	V	7
11 月 4 日 8:00	IV	10	11 月 13 日 14:00	I	4
11 月 5 日 8:00	III	8	11 月 14 日 8:00	III	8
11 月 6 日 8:00	III	11.5	11 月 15 日 8:00	IV	10
11 月 7 日 8:00	II	10	11 月 17 日 14:00	V	12
11 月 8 日 20:00	IV	15	11 月 18 日 8:00	V	12
11 月 9 日 8:00	IV	15	11 月 19 日 8:00	V	10

从表 2-2 到 2-4 中可见，用不同监测目标物方法判定的天气能见度状况与吉林省气象局监测的能见度指标基本符合。其中监测到 2009 年 11 月份的轻微扬尘天气只是在 6、13 日，在长春市气象局能见度的监测数据在 11 月 6 日的的数据是 10 km；在 11 月 13 日的能见度数据是 4 公里，能见度不是很高，产生轻微的浮尘天气。这同后文中的 TSP 和 PM₁₀ 的监测结果也相符，由于本实验的监测时间在 2009 年的 11 月份，是沙尘发生的比较轻的月份，所以监测的结果的其他时段不是很明显，但足以能够说明能见度可以作为沙尘产生的指标。由于监测点的选取不同，加之实验是通过数码像素分析地物的可见情况分析能见度，而气象局监测能见度是在空旷的野外。所以监测的结果和气象局的监测数据在强度上有些不一致，稍比气象局的监测数据小一点，但总的结论是一致的。由此可以判断，本实验采用的目标物监测方法所得到的能见度监测值可以作为监测沙尘天气的辅助监测指标。

2.3.2 大气总悬浮颗粒物的监测及监测结果

总悬浮颗粒物是环境空气中组分最复杂、危害最大的污染物之一。城市沙尘来源非常复杂，既有煤烟尘、工业粉尘等人为来源的粉尘，也有风沙尘、海盐粒子等天然来源的尘粒。不同城市的能源结构、工业布局以及气象条件不同,空气中总悬浮颗粒物的组成也有所不同。沙尘天气发生时，空气中的沙尘气溶胶浓度增大，理论上大气中的 TSP（空气中粒径≤100μm 的所有悬浮颗粒的总称）值也会相应的增加，经过本论文的实验证实结果是正确的。本论文中采用重量法分析沙尘天气中的总悬浮颗粒物。TSP 大流量采样测定的机理是利用采样泵，形成负压，使空气中的颗粒物(0~100μm) 滞留在已恒重的滤膜上，通过采样前后滤膜的恒重差计算 TSP（Total Suspended Particles）的浓度。用标准容量颗粒采样器在采样效率接近 100%滤膜上采集已知体积的颗粒物，恒温恒湿条件下，电子天平称量采样前后膜的质量来确定采集到的颗粒物质量，再除以采样体积，得到颗粒物的质量浓度。

(1) 监测地点

监测地点位于东北师范大学南门附近，实验楼东侧。此地为长春市中心，可代表长春市文教居民区地面的一般状况，对于长春市的大地理环境也具有一定的代表性。

(2) 实验过程

①空白滤膜的准备：

空白滤膜放在恒温恒湿箱中平衡 24h。称量滤膜精确到 0.1mg,记录滤膜重量 W_0 ，平展放置在保存盒内存放。用时再取出，将剩余的仍保存好。

②设置采样时间 30min，开启采样器。从气压计中读出所测环境中的环境大气压力和环境温度。

③将取得大气总悬浮粒子样品放在在电子秤中称重（精确到 0.1mg）为 w_1 ,将 w_1-w_0 设为取得大气 TSP 的总重量，运用 $P_0V_0/T_0=P_1V_1/T_1$ 公式，将每日测量的大气总悬浮粒子算成零摄氏度时、标准压强下的值。间断采样的频次和采样时间。对环境空气中的 TSP，采样频次及采样时间应根据“环境空气质量标准”（GB3095-1996）中 TSP 监测数据统计的有效性规定确定。要获得日平均浓度值，颗粒物的累计采样时间应不少于 12h。与国家标准的大气总悬浮物的标准值比较，分析超标的日期。

(2) 监测结果

2009 年 11 月份大气总悬浮颗粒物的监测结果见表 2-5。

表 2-5 校内大气总悬浮物和 PM₁₀ 监测值

监测日期	监测时间	监测项目	测量值(g)	换算标准值 (mg/m ³)	温度 (℃)	气压 hPa	天气状况
11.1	9:30-9:43	PM ₁₀	0.0002	0.007			晴，微风
	10:10	TSP	0.28-0.39	0.332			
	15:45-15:50	PM ₁₀	0.015-0.016	0.0153			
11.2	9:00-9:10	PM ₁₀	0.038-0.044	0.042	10℃	99.8	晴，北风
	9:30	TSP	0.0009	0.31			
11.3	8:30-8:40	PM ₁₀	0.028-0.04	0.035	15℃	99.8	晴，微风
	9:00	TSP	0.0004	0.14			
11.4	10:04-10:08	PM ₁₀	0.072-0.089	0.083	14℃	99.5	晴，北风
		TSP	0.003	0.1			
11.5	13:54-13:58	PM ₁₀	0.09	0.0904	16℃	99.1	晴
		TSP	0.003	0.1079			
11.6	9:01-9:11	PM ₁₀	0.098-0.102	0.1014	19℃	98.5	晴，微风
		TSP	0.0023	0.83			
11.9	9:00-9:10	PM ₁₀	0.026-0.028	0.02695	0℃	101	晴，小雪
		TSP	0.006	0.2			
11.10	9:00-9:20	PM ₁₀	0.072-0.08	0.0755	4℃	101	晴，小雪后 微风
		TSP	0.006	0.203			
11.11	9:00-9:21	PM ₁₀	0.044-0.065	0.053	1℃	101.3	晴
		TSP	0.0014	0.468			
11.12	8:46-9:00	PM ₁₀	0.0003	0.1	2℃	101.2	晴转多云

		TSP	0.196-0.202	0.2			
11.13	9: 00-9:15	PM ₁₀	0.047-0.045	0.049			小雪
11.16	8: 40-9:00	PM ₁₀	0.085-0.089	0.0858			
11.17	9:00-9:45	PM ₁₀	0.08-0.084	0.082	-1℃	100.5	晴
		TSP	0.009	0.15			
11.18	9:03-9:30	PM ₁₀	0.001	0.046	0℃	100.8	晴
		TSP	0.046	0.234			
11.23	9:10-9:40	PM ₁₀	0.206-0.209	0.2075	8℃	99.8	晴, 无风
		TSP	0.008	0.277			

在分析的结果中，我们可以看出 2009 年 11 月份的沙尘天气比较少，只有 11 月 6、13 日的空气质量超出了国家的现行标准，属于轻微沙尘天气，分析其原因，可能是由于 6 日风比较大，近几天气温 20℃左右，较适合沙尘的传输；而 13 日则下午是小雪天气，上午的风很大，是浮沉天气。

有利于产生大风或强风的天气形势、有利的沙、沙尘源分布和有利的空气不稳定条件是沙尘暴或强沙尘暴形成的主要原因。强风是沙尘暴产生的动力，沙、沙尘源是沙尘暴物质基础，不稳定的热力条件是利于风力加大、强对流发展，从而夹带更多的沙尘，并卷扬得更高。除此之外，前期干旱少雨，天气变暖，气温回升，是沙尘暴形成的特别的天气气候背景；地面冷锋前对流单体发展成云团或飑线是有利于沙尘暴发展并加强的中小尺度系统；有利于风速加大的地形条件，即狭管作用是沙尘暴形成的有利条件之一。因此，长春地区属于沙尘过境地区，此地产生沙尘暴的原因主要是：内蒙古地区提供的大量沙尘源，东亚大气环流(特别是冬、春季环流)与沙尘暴年代变化间的关系。降水及风速等的变化仅是东亚大气环流年代际变化的结果和具体表现。在冬季时，长春地区大部份地区受蒙古高压控制，因此干旱、寒冷；春季到来，我国的东南及北部地区受太平洋暖湿气团的控制，长春地区此时春暖花开。地表冷暖更迭，土质疏松，为沙尘天气提供了丰富的沙尘源。在气流的控制之下，有时沙尘可以越境迁移，向东可以到达韩国和日本，有时甚至到达美国的西海岸地区，对国民经济和人们的日常生活影响颇大^[23]。

2.3.3 沙尘天气中 PM₁₀ 指标的监测与分析

沙尘天气的出现直接影响环境空气中PM₁₀ (可吸入颗粒物) 浓度，水平能见度小于 10.0 km。长春地区的浮尘多为远处尘沙经上层气流传播而来，或是由扬尘、沙尘暴出现后尚未下沉的细沙浮游在空中。是沙尘中重要的组成部分，因此可以作为沙尘天气的一项参考指标。沙尘天气到来时，在理论上沙尘气溶胶中的PM₁₀值会比平常多至数倍^[24]，对人们的生活有很不利的影响。实验采用青岛崂山电子仪器实验所的KB120E型空气测量仪对2009年11月1-15日大气中的PM₁₀进行了采样，得出的监测结论与理论上的分析基本相符。

由表 2-4 中可以看出，在 11 月 6 日的天气有轻微的沙尘天气，其 PM₁₀ 值已经超出了国家空气质量的二级标准（表 2-6），达到了 0.1014mg/m³，对人们的身体健康有轻微

的影响。从 11 月份的监测值可推测，轻微沙尘天气到来时，PM₁₀ 的监测值明显高于晴朗天气和阴天。

表 2-6 中华人民共和国国家标准环境空气质量标准（部分）

污染物名称	取值时间	浓度限值			浓度单位
		一级标准	二级标准	三级标准	
总悬浮颗粒物 TSP	年平均	0.08	0.20	0.30	mg/m ³ (标准状态)
	日平均	0.12	0.30	0.50	
可吸入颗粒物 PM ₁₀	年平均	0.04	0.10	0.15	
	日平均	0.05	0.15	0.25	

2.3.4 大气总悬浮颗粒物与可吸入的颗粒的相关性分析

大气总悬浮颗粒物包含可吸入的颗粒物，两者的相关性可通过百分比进行描述，比较可吸入的颗粒占大气总悬浮物的百分比，来分析沙尘天气和晴天的天气情况^[25]。一般的，不同沙尘天气过程中，TSP 和 PM₁₀ 浓度相差明显，且 TSP 与 PM₁₀ 值随沙尘天气强度的增加而增大。

应用相关分析方法对 2009 年 11 月份的 PM₁₀/TSP 比值进行了计算（TSP 值和 PM₁₀ 值如表 2-5 的所示），可见 PM₁₀/TSP 有很好的相互关系，其比值随沙尘天气强度的增大而增大的。根据 2008 年和 2009 年 11 月沙尘天气过程中的 TSP 与 PM₁₀ 的相关性进行分析，见图 2-12。

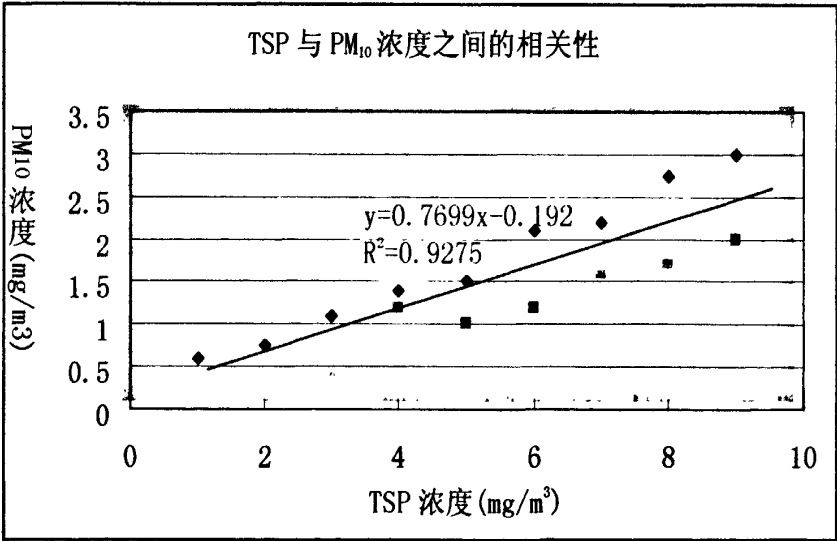


图 2-12 TSP 和 PM₁₀ 浓度之间的相关性

图 2-12 可见，TSP 和 PM₁₀ 浓度相关关系符合线性方程 $PM_{10}=0.7699TSP-0.192$ 。通过 $t=PM_{10}/TSP$ 检验发现，在 1% 显著水平下，回归方程是显著的，说明 TSP 与 PM₁₀ 浓度之间存在极好的相关关系(相关系数 $r=0.9630$)。因此，在沙尘天气过程中，PM₁₀ 是 TSP 的主要组成部分。利用上述回归关系可对长春地区沙尘天气过程中的 TSP 与 PM₁₀ 浓度进行推算。另外，该线性关系与许多学者的研究^[26]相类似。说明沙尘天气过境时主要成分分是 PM₁₀。

第三章 2003~2009 年沙尘地面监测数据整理

沙尘监测的 7 年的中，其中 2006-2009 年的监测，以前从来没有做过统一的分析。因此，本章对 2003-2009 年的沙尘天气做了统计分析。

3.1 2003-2005 年监测结果^[27]

3.1.1 监测的时间和地点

监测时间为 2003~2005 年每年 3 月~8 月，监测地点设在东北师范大学环境科学系教学楼，地理坐标为东经 125°19'26"，北纬 43°51'38"^[27]。

3.1.2 监测结果

经过对图片数据的分析整理，得到 2003 年到 2005 年各年沙尘天气的发生时间和次数，结果可见：2003 年出现中等程度的沙尘 3 次，弱沙尘 9 次，强沙尘 1 次^[28]。

2004 年出现中等程度的沙尘 2 次，弱沙尘 9 次，无强沙尘天气。本年度沙尘天气系统过境较多，但强度较小，仅有两次中度沙尘天气系统过境，分布于 3 月和 5 月，无强沙尘天气发生。与上一年发生的沙尘状况相比较，具有发生频次增多，强度减弱的趋势。

2005 年监测到发生中等程度的沙尘 3 次，弱沙尘 9 次，无强沙尘天气。

3.2 2006-2008 年监测数据整理

3.2.1 监测的时间和地点

监测时间仍为每年 3~8 月，监测地点设在东北师范大学城市与环境科学学院教学楼气象实验室。地理坐标为东经 125°19'25"，北纬 43°51'38"。监测仪器架设位置参考图 2.5 和图 2.6 所示，监测方法参考 2.2。

3.2.2 监测结果

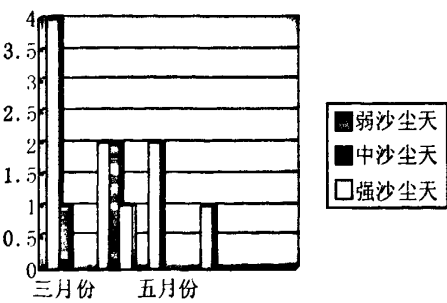


图 3-1(1) 2006 年监测统计

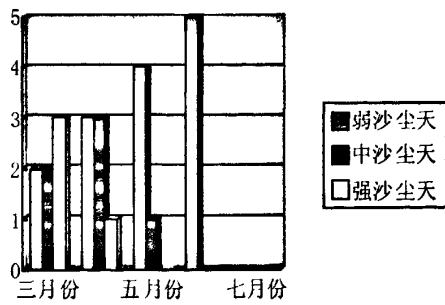


图 3-1(1) 2007 年监测统计

将 2006-2008 年监测数据整理成统计图，看起来清晰、直观，便于分析天气的状况。如 3-1 图：2006 年监测到出现沙尘天气的日期为：3 月 1 日、4~5 日、10 日、17 日、22 日、27 日、29 日和 31 日为轻微沙尘天气；4 月 1 日，7 日，14 日，23 日；5 月 4 日，9 日，17~18 日；其中中等程度的沙尘 7 次，弱沙尘 20 次，强沙尘 4 次。

2007 监测到的发生沙尘天气的日期 3 月 10 日，24 日，31 日；4 月 16 日，30 日，4 月 1 日，6 日，15 日，20 日，5 月 1 日，7~9 日，15 日，29 日；其中中等程度的沙尘 6 次，弱沙尘 9 次，强沙尘 4 次。

2008 监测到的发生沙尘天气的日期为 3 月 1 日，5 日，9~10 日，12 日，15，18，21，29。其中中等程度的沙尘 2 次，弱沙尘 20 次，强沙尘 14 次。如图 3-1（3）

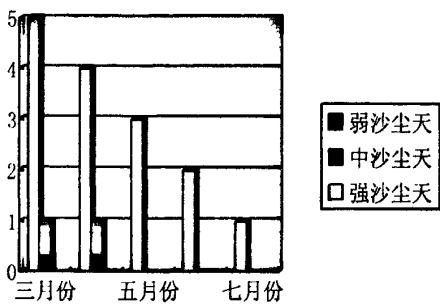


图 3-1(3) 2008 年监测统计图

3.3 2009 年监测数据整理和分析

图 3- 2 是根据 R/G-B/G 图统计出的 2009 年沙尘天气。2009 年监测到的沙尘天气发生日期是：4 月 3 日、4 日、10 日和 17 日；5 月 7 日、10 日、15 日、18 日、20 日和 28 日，6 月 20 日和 27 日；7 月 5 日。全年仅一次强沙尘天气，发生在 4 月 17 日。

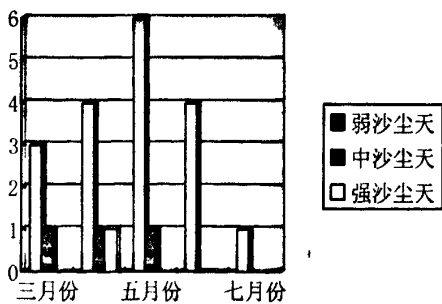


图 3-2 2009 年沙尘天气总数统计图

如图 3-2 中，通过对 2009 年沙尘天气的统计分析可见，多发月份与往年相同，仍为 3-5 月份：3 月份有沙尘天气 4 次，其中中等程度沙尘 1 次，弱沙尘 3 次；4 月份有 6 次沙尘天气，其中 4 次弱沙尘，中等程度和强沙尘天气各 1 次；5 月份发生 7 次沙尘天

气，其中弱沙尘 6 次，中沙尘 1 次。6 月和 7 月份均为弱沙尘天气。沙尘天气的发生主要还是集中在春季。监测表明：2009 年沙尘发生次数虽不是近几年最少的年份，但强沙尘天气为最少年份。

3.4 历年监测结论与沙尘趋势分析

3.4.1 2003～2009 年沙尘暴的监测结论

总结 2003 年到 2009 年沙尘天气地面监测的数据，将每年的沙尘发生程度汇总于表 3-1。

表 3-1 2003 年到 2008 年每年 3-6 月份强弱沙尘发生次数统计

项目	3 月			4 月			5 月			6 月		
	强	中	弱	强	中	弱	强	中	弱	强	中	弱
2003		1			1	4	1	1	3			2
2004		1	3			6		1	3			7
2005		1	4		2	2			2			1
2006	2	3	5	1	3	6	1	1	6			3
2007	3	2	2	1	3	3		1	4			
2008		1	5		1	4			3			2
2009		1	3	1	1	4		1	6			4

通过对数据的分析，沙尘天气的发生都在每年的 3、4、5 月份为多发期，发生的频率也较高。一直可以持续到 6 月末，7、8 月份基本不再发生沙尘天气了。2006 年出现四次强沙尘天气，出现中等程度的沙尘天气 7 次，弱沙尘天气出现 20 次；2007 年出现强沙尘天气四次，中等程度的沙尘天气出现 6 次，弱沙尘天气出现 6 次；2008 年强沙尘天气没有发生，中等程度的沙尘天气出现 3 次，而弱沙尘发生的次数 11 次。强沙尘发生的月份主要集中在 3 月份。

由于贝加尔湖西侧的萨彦岭地区的蒙古气旋的活动，气旋沿西北向东、东南或东北方向移动，并且在每年的春季气旋活动频繁，地区属于温带大陆性季风气候，时值刚刚解冻期，土质疏松，提供了大量的尘源。所以，每年的沙尘多发生在 3～5 月份，其强度也很强，在年际上看有发生频次增强、强度降低的趋势；月内的发生，常随着天气的变换有所不同，在长春地区过境时间很短，且都是异地沙尘源^[29]。

长春地区属于沙尘的过境区，也呈现出统计中的规律。这与蒙古气旋的活动规律正好相附，也说明了影响长春地区的沙尘活动与扬沙的时间吻合。因大气运动的改变，高低压控制气团的改变，气温及降雨的影响，月份内沙尘天气发生次数，强度都会明显的改变。从 2003 年到 2008 年的几年统计资料可以看出，每年的沙尘活动大致相同，年内沙尘变化的不同也和蒙古气旋活动及其天气的状况有关。

3.4.2 东北亚地区沙尘暴趋势的简要分析

结合卫星遥感图片和其他相关数据,使用数字图片长期自动监测亚洲地区沙尘暴是行之有效的。本论文是日本的目下纪正教授牵头在东北师范大学签署的联合项目。主要研究东北亚地区的沙尘暴迁移、转化规律^[30]。长春地处东北亚中心,具有很强的研究意义。沙尘暴是大气运动和自然地理环境的综合产物。许多观测事实证明,长春地区的沙尘暴天气不仅和大风天气有关,同时还与当时大气热力、动力状态和沙源地区土壤、植被及其水分等生态环境因素密切相关^[31]。

综合以上的研究发现,经过长春地区的沙尘,可以飘洋过海,影响到韩国,日本等地区。因此,长春地区作为东北亚地区的沙尘过境中心,有其重要地理研究意义。通过分析遥感卫星图片的资料、本实验拍摄的图片、摄像资料的地面 TSP 和 PM₁₀ 监测数据可知,沙尘的发生,过境都有一定的规律可以遵循:第一,沙尘天气的发生大都发生在每年春季,无论是就其发生的频次,还是发生的强度都明显高于年内的其他季节。这与冬季降雨少、风大、地面覆盖少有关。第二,异地沙尘源明显高于本地沙尘源,长春地区属于沙尘的过境区之一,沙尘来源主要是蒙古国和内蒙古沙漠区。第三,沙尘暴多发生于午后;清晨时也偶尔有发生。由吉林省气象局提供的能见度数据也可得出这一结论。如表 2-13 中所列:11 月 6 日 8 时的能见度 10 km,为轻微浮尘天气;11 月 13 日为轻沙尘,8 时能见度达 4km,而 14 时的能见度仅为 3km;能见度更低;11 月 24 日 8 时的能见度 10km,而 14 时的能见度只有 7km。具体的详细研究应该在沙尘的起沙及其迁移规律做详细的阐述。

干旱气候的产物,在干旱时段自然会有更多沙尘暴活动。长春地区每年春季风大且干燥,尤其在内蒙古及新疆地区更是如此。另外,经过以上的 2003~2009 年的沙尘暴发生的分析,特别是东亚大气环流(冬、春季环流)与沙尘暴年际变化间的关系。近年来,500hPa 东亚大槽平均位置正常,强度略微偏强,乌拉尔山脊偏强些,结果中、高纬度环流经向度加大,冷空气频频南下^[33]。2005 年 3 月中旬至 5 月上旬仅 50 余天中,就共有 14 次冷空气活动,并在内蒙古中、西部及河西走廊产生强沙尘暴 5 次。这些证明:东亚大气环流的年际变化是引起我国北方沙尘暴年代变化本地区的最直接原因。西北及内蒙古中西部生态环境恶化的势头没有得到有效的控制,过去生态环境恶化的不良结果还影响东北亚地区的环境;全球气候变暖会使春季地表解冻期提前,这些都使沙尘暴的产生具备了良好的条件,因此估计长春地区的沙尘是异地沙尘源。

第四章 结 论

利用卫星遥感影像结合地面数字监测综合分析沙尘过境时沙尘气溶胶浓度, RGB 模式在监测中的应用, 国内应用并不多见^[34]。同其他的监测方法比较, 有相同或相近的监测结论。因此, 结合卫星遥感图片和其他相关数据, 使用数字图片长期自动监测亚洲地区沙尘暴在长春地区的过境天气状况是行之有效的方法。

通过 2003~2009 的卫星遥感影像资料和地面监测数据, 本论文初步阐述了长春地区沙尘天气发生的趋势和特点, 探讨了数码相机和数码摄像机组合地面监测方法对于监测沙尘天气的适用性^[35]。

(1)通过数码相机和数码摄像机定时自动拍摄监测沙尘天气过境情况, 应用遥感分析软件 ENVI4.5 所监测的天气状况进行分析处理, 通过记录像素点 RGB 色彩的信息变化, 区别沙尘天气和普通天气的不同并予以识别。本论文所用的监测方法可与乌兰巴托水利与气象学院、日本鹿儿岛大学的测数据, 共享监测结果^[36]。并且本次实验中又增加了对 PM_{10} (可吸入颗粒物) 和 TSP (总悬浮颗粒物) 的监测和分析, 该方法对 RGB 的监测模式进行必要的补充, 对研究沙尘天气过境和气溶胶浓度分布有一定作用。

(2)利用 2003~2009 年遥感卫星影响图片监测到的沙尘过境天气与地面进行的 TSP 和 PM_{10} 监测、能见度数据分析相对应, 能够较好地分辨沙尘天气过境时的天气状况。对 TSP 和 PM_{10} 浓度之间的相关性进行分析, 得出了显著相关的结论, 说明沙尘天气过境时以 PM_{10} 为主要成分。

(3)在长春地区进行的多年监测证明该地区是蒙古和内蒙古沙尘的过境区, 也是亚洲沙尘暴传输的重要通道之一^[37]。长春地区沙尘天气发生的规律表现为: 时间上, 每年 3-5 月为沙尘天气多发月份, 无论次数, 强度均明显高于其他月份; 强度上, 多为中、弱强度的沙尘天气, 强沙尘暴天气比较少; 来源上, 异地沙尘多于本地沙尘。

参考文献

- [1]张宇俊,乔丽霞,张雪梅.浅谈沙尘暴及其监测意义.科技情报开发与经济, 2005,15(2):310- 312.
- [2]<http://laiba.tianya.cn/laiba/CommMsgs?cmm=1517&tid=2655858143481397533>
- [3]Kim等, 2001; Lee等, 2002.中国北方城市的卫星监测,荒漠化环境,16(4):210~218.
- [4] <http://blog.myspace.cn/e/407041493.htm?block=latest>
- [5]范一大,史培军,朱爱军等.中国北方沙尘暴与气候因素关系分析,地球科学展.2006,15(5):2-3.
- [6]钱正安,蔡英,刘景涛,等.中蒙地区沙尘暴研究的若干进展.地球物理学报,2006,49(1):83-86
- [7]延昊,矫梅燕,毕宝贵等.国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划.气象科学. 2006,26(1):4-8
- [8]胡秀清,卢乃锰,张鹏.利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴.应用气象学报. 2007,18(3):21-30.
- [9]Gierasch P J,Goody R M.A model of a Martin great dust storm[J].Journal of Atmospheric Science,1973,30(2):168-180.
- [10]http://em.hhu.edu.cn/csem/news_view.asp?newsid=53
- [11]<http://weather.news.sina.com.cn/news/2004/0920/1694.html>
- [12]Morals H C.A case study of a dust storm weather situation in the Sudan in April 1973[J]. Pure, Appl, Geophys, 1981, 119:658-676.
- [13]Ott A. Martin, D W, Young, J A et al., Analysis of a Trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE Data [J]. Mon Wea Rev, 1991, 119, (8):1832-1850.
- [14] West pal D L,O B Toon and T N Carlson A two dimensional numerical investigation of the Dynamics and Microphysics of Saharan dust Storms [J]. J. Geophys, Res.1988, 92:3027-3049.
- [15] Shao.,Y.P., and I.Miesl, Winderos, onpredietion over the Australlaneont inent.J.GeoPhys.Res., 1997,102(I)25), 30091-30105.
- [16] 张鹏,张兴赢,胡秀清等. 2006 年一次沙尘活动的卫星定量遥感和分析研究 气候与环境研究,2007,12 (3):101~108.
- [17] Kinoshita K, Wang Ning, Zhang Gang et al, Continual observation of Asian dust in Changchun and Kagoshima,2nd International Workshop on Sandstorms and Associated Dustfall, Nagoya, 13-15 Nov. 2003.
- [18]慕秀香,胡中明.卫星云图在吉林省沙尘天气监测中的应用分析.吉林气象,2006,4: 112-114.
- [19]毛节泰,李成才.气溶胶辐射特性的观测研究.气象学报,2005,63(5):610~619.
- [20]石广玉.中日沙尘合作研究专案(ADEC)情况简介[C].(台湾)沙尘暴学术研讨会.2002.6,台北,39-40.
- [21]李曙光,刘晓东,侯蓝田.沙尘暴对低层大气红外辐射的吸收和衰减[J].电波科学学报,2003,(18): 143~47.

- [22]张莉,丁一汇,任国玉.我国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析.应用气象学报, 2005,16(5):35~39.
- [23]陈进华,杨军.中国沙尘气溶胶研究的若干进展[J].环境研究与监测,2007,20(2):114~116
- [24]刘从蓉.沙尘天气对环境空气中 PM10 影响分析[J].环境保护科学,2005, 31(3):18~21.
- [25]张美根,韩志伟,雷孝恩.天津市总悬浮颗粒物浓度分布的数值模拟[J].气候与环境研究, 2000,5(1):30~35.
- [26]国家环境保护总局.空气和废气监测分析方法,第四版[M].北京:中国环境科学出版社, 2007,10.
- [27]张刚.沙尘天气的地基数字监测.东北师范大学硕士论文,长春,2006,5
- [28]Kinoshita K, Kikukawa H, Iino N et al., Properties of long-time digital camera records in Changchun and Ulaanbaatar CERES International Symposium on Radiation Budget and Atmospheric Parameters Studied by Satellite and Ground Observation Data, Feb. 17-18, 2005, Chiba, Japan.
- [29] Hankin EH. On dust raising winds and descending currents. Part VI [J], India Met Memoirs, 1921,22(1):80-84.
- [30]Kinoshita K, Wang Ning, Zhang Gang et al., Satoshi Hamada and Satoshi Tsuchida. Continual observation of Asian dust in Changchun and Kagoshima. 2nd International Workshop on Sandstorms and Associated Dustfall, Nagoya, 2003,13-15.
- [31]王式功,王金艳等.中国沙尘天气的区域特征,地理科学,2003,58(2):115-117.
- [32]史培军,严平等.我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J].自然灾害学报,2000,9(3):71~77.
- [33]李栋梁,钟海玲等.中国北方年沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应[J].高原气象,2003,22(4):337~345.
- [34]石广玉.中日沙尘合作研究专案(ADEC)情况简介[C].(台湾)沙尘暴学术研讨会.2002.6,台北,39-40.
- [35]陈进华,杨军.中国沙尘气溶胶研究的若干进展,环境研究与监测, 2007,20(2):102~108.
- [36]Iino N, Kinoshita K, Andrew C. et al., Detection of Asian dust aerosols using meteorological satellite data and suspended particulate matter concentrations. Atmospheric Environment. 2004, 38:7008-7114.
- [37]Yang Y Q, Hou Q, Zhou C H et al., Sand/dust storm processes in Northeast Asia and associated large-scale circulations. Atmos. Chem. Phys, 2008,8:35-40.

致 谢

时光荏苒，转瞬半年多的时间过去了，回首论文的开题到实验和初稿，直到最后的定稿。期间得到了众多老师和同学们的帮助。王宁老师诲人有方的教学方法、严谨的学术思维、高尚的师德在时时刻刻的影响着我，伴随着我论文的完成，也将影响我终身的行为规范。还有张刚老师的大力帮助，使我的试验可以顺利的完成；还有各位同学的帮助与支持，使我的生活和学习在充实中度过。在此，我深表对帮助我的老师和同学说声：谢谢！

