

兰州大学

博士学位论文

中国北方沙尘暴灾害形成机理与荒漠化防治研究

姓名：张钛仁

申请学位级别：博士

专业：生态学

指导教师：李自珍

20081001

摘 要

沙尘暴是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和天气系统所诱发的灾害性天气,主要发生在沙漠及其临近的干旱与半干旱地区。沙尘暴的频频发生是草原退化、土地荒漠化的指示器、加速器和催化剂,也是生态环境恶化的重要标志,具有重要的警示作用。世界范围内沙尘暴多发区位于中亚、北美、中非和澳大利亚,我国主要分布在西北及华北大部分地区,属于中亚沙尘暴区的一部分,是全球现代沙尘暴的频发区之一。

开展对沙尘暴及其灾害的深入研究对我国生态环境建设和可持续发展,以及防灾减灾和应对气候变化具有非常重要的意义。鉴于此,论文首先对国内外沙尘暴研究进展进行了系统的回顾和归纳,提出了论文的研究内容和目标。然后,将地面气象资料、遥感资料、以及其他有关资料与数值模式相结合,研究了中国北方沙尘暴时空分布的特征;分析了影响沙尘暴发生发展的主要因素及其相互关系,在此基础上,探讨了沙尘暴灾害形成机理及其内在规律;研究了植被参数变化对沙尘起沙影响机理;通过对现有沙尘暴防治方法与政策的分析,提出了现有方法和政策所存在的弊端,探讨了我国防治沙尘暴的体制机制,提出了新的防治沙尘暴灾害的对策方案。主要研究结论如下:

1. 沙尘暴既是自然灾害,也是人为灾害,同时也是环境灾害(生态灾害)。我国北方大风频繁(尤其是春季),客观上为沙尘暴的发生、发展和强度变化提供了动力条件;长期干旱的背景和脆弱的自然生态环境,加之沙质地表广阔,以及独特的地形、地貌,成为有利于沙尘暴天气的孕灾环境;随着人口增加和人类对土地资源和水资源的不合理利用,对沙尘暴的发生具有加强作用,人类活动的干扰已逐渐成为沙尘暴频发的重要促发因素。总之,沙尘暴及其强度变化是气候因子(风)、环境因子和人类活动共同作用的产物。
2. 中国沙尘暴空间格局总体呈西南-东北分异。中国沙尘暴发生发展的重点区域在西北,并相对集中分布在新疆南部、西藏北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。灾害发生的最大、最小年份和多年平均状况的影响界线分布基本一致,只是影响程度不同。

沙尘暴影响重度区域从11月一直延续到次年6—7月,时间跨度很长,按年内变化趋势可以分为三种类型和两个过渡带。影响较严重的省份达14个省(直辖市、

自治区)，影响面积达624万平方公里，占我国国土面积的65%，重灾区主要分布于西藏、新疆、内蒙、甘肃、青海和宁夏一带。

近40—50年来，我国北方沙尘暴天气总体呈下降趋势，有四个区域呈上升趋势，范围比较小，分别是北疆西部，以昭苏为中心；青海西北部，以芒崖为中心；青海东部，以兴海为中心；内蒙古中部，以朱日和为中心。尽管沙尘暴频次总体上在降低，但强度在增加，近年来有增强的趋势。

内蒙古的荒漠区沙尘暴发生频率高于草原区和农业区，农业区的沙尘暴下降趋势比较明显，农牧交错区的沙尘暴年变率较大，证明沙尘暴发生频率受下垫面生态环境状况的影响。朱日和是内蒙古沙尘暴发生频繁的站点。

3. 中国北方沙尘灾害是气象条件、生态环境和人类活动共同作用的结果。沙尘暴发生日数和持续时间与四季的降水、温度、植被覆盖度和大风日数具有很好的相关性。其中，与降水量和植被覆盖度呈负相关关系，与大风日数和温度呈正相关关系；特别是，上年夏季和本年春季的降水量，以及上年夏季的植被覆盖度和本年春季的温度相关程度最为显著。降水和温度主要通过影响地表植被覆盖度来影响区域沙尘暴的发生频率和持续时间。沙尘暴的频繁发生主要是由于降水的持续减少，使地表干燥及植被覆盖度降低造成的。

影响春季、全年沙尘暴日数和年沙尘暴持续时间的各因子中，植被覆盖度的周期变化是影响沙尘暴频率的重要影响因子，其次是大风日数和降水量的影响，温度对沙尘暴的影响是最小的，但也是不可忽视的因子。

大风日数和温度组成沙尘暴产生的动力因子，植被覆盖度和降水组成沙尘暴形成和搬运的阻力因子。动力因子远低于阻力因子，阻力因子是沙尘暴产生的内因所在，而动力因子是外因，当植被覆盖差，降水少，达到了沙尘暴发生的临界状态时，动力因素才能成为沙尘暴产生和搬运的主导因子，从而影响沙尘暴的产生和发展。可见，改善北方干旱半干旱地区的植被覆盖，恢复生态环境，是控制沙尘暴之根本。

4. 影响我国沙尘暴的沙源和移动路径。影响我国沙尘暴天气的主要沙源是起源自蒙古国南部的戈壁地区，在途径我国北方沙漠或沙地时得到加强或补充，其次是我国境内沙源所致。影响我国沙尘天气的路径主要分为三类：即偏西路径、西北路径和偏北路径。

影响北京地区的沙尘暴路径主要是北方路径和西北路径，北方路径：内蒙古乌兰察布盟和锡林郭勒盟西部→浑善达克沙地→张家口→北京；西北路径：新疆东北部至内蒙古阿拉善盟北部→河西走廊→贺兰山分为南北两路→分别经毛乌素沙地和乌兰布和沙漠→包头、呼和浩特→张家口→北京。北京沙尘暴的主要沙尘来源为新疆东北部、阿拉善高原、鄂尔多斯、阴山北坡、浑善达克沙地和坝上高原，只有这些地区的生态环境得到改善，才能减缓沙尘暴对华北地区的影响。

5. 土地退化、草原沙化，植被覆盖度下降是沙尘暴发生发展的指示器、加速器和催化剂。土地利用/覆盖格局的变化，以及土地退化、荒漠化带来的植被覆盖度下降，导致生态环境安全水平大幅下降，是沙尘暴发生发展的指示器、加速器和催化剂。研究结果也表明，土地利用/覆盖变化及植被覆盖度与沙尘暴频次和强度变化有着显而易见的耦合关系，因此，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。

6. 采用沙尘天气集成数值预报系统，并与国家气象中心T213全球业务模式的嵌套，将T213模式的分析和预报结果为沙尘天气数值预报系统提供初始场和侧边界资料，着重从叶面积指数变化和植被覆盖度变化对风蚀起沙影响进行数值模拟研究，进一步探讨了植被参数变化对沙尘起沙的内在机理。

7. 分析了人类活动对中国北方荒漠化的影响。几千年来，特别是近代以来，由于人类人口数量的增加和人类活动增多，加剧了北方荒漠化的蔓延，并成为造成荒漠化的不断发展的主要原因。而人类活动主要是通过对水资源、植被、土壤和气候等方面加剧了我国西北地区荒漠化问题。

8. 引入市场机制，吸引社会力量，建立以企业为主体的中国北方荒漠化防治模式。研究提出，在现阶段，我国可以通过引入PPP机制，加强企业和政府部门的合作，解决荒漠化治理过程中的资金短缺、管理落后、效率低下等问题。为进一步有效的治理荒漠化，需要转变我国的政府转变为服务型政府；需要制定优惠的资金政策，明确的产权政策和生态补偿政策来引入市场机制；还需要健全荒漠化治理法律体系，明确各级政府的治理责任，加大对违法犯罪行为的处罚力度保护治理成果和进行持续的宣传教育。

关键词：中国北方 沙尘暴灾害 形成机理 植被覆盖度 沙尘模式 治理措施

The Formation Mechanism of Dust Storm in Northern China

and Desertification Control Studies

Abstract: Dust storm is a severe weather induced by a large-scale circulation or a synoptic system, under a given geographic environment or underlying surface condition. It mainly appears in deserts, or in the adjacent arid and semi-arid areas. The frequent occurrence of dust storms makes an indicator, an accelerator, and a catalyst of pastureland degradation and land desertification. It is also a major warning marker indicating the magnitude of ecological environment deterioration. In the global context, dust storms are mainly seen in Central Asia, North America, Central Africa, and Australia. China's dust storms, mostly appeared in the northwest and northern part of the country, constitute a part of the dust storm process in Central Asia. It also makes China one of regions in the world having the most occurrences of dust storms.

Studying dust storms and associated disasters in a systematic manner is extremely important to understanding a range of other issues, including ecological environment reconstruction, sustainable development, disaster prevention and preparedness, and climate change. In this context, the paper makes a systematic review of the latest progresses achieved in studying the dust storms both at home and abroad, before defining the subjects and objectives for the study. Author studies the spatial and temporal distribution of dust storms in North China, and analyzes the major factors that have an impact on the occurrence and development of dust storms and associated interactions, based on the surface, remote sensing, and other selected data, and the results of numerical modeling. Author also discusses the mechanisms that contribute to the occurrence and development of dust storms and associated internal variations, and examines the approaches that may result in an improved numerical dust storm modeling. In addition, author unveils the disadvantages of the existing approaches and policies dealing with dust storm control, analyzes China's dust storm control system, and proposes new strategies for dust storm control and prevention. The study has produced the following main conclusions:

1. Dust storm is a man-made disaster, an environmental disaster (ecological disaster), as well as a natural disaster. The northern part of China is notorious for the frequent attacks of large winds, especially in the spring, which creates the needed momentum for the generation and development of dust storms and associated intensity enhancement. The long lasting droughts and vulnerable natural ecological environment, the vast sandy surface, and unique terrains have built up an environment desirable for breeding out dust storms. The increased population and irrational utilization of land and water resources has beefed up the occurrence of dust storms like adding insult to injury. As a result, human activities have become a major factor contributing to the frequent occurrence of dust storms. Apparently, dust storms and enhanced intensity are the combined results of climate elements (wind), environmental factors, and human activities.

2. Southwest-northeast spatial distribution pattern. The northwest part of China is a major region featured with the frequent occurrence and development of dust storms, mostly in the southern part of Xinjiang, the northern part of Tibet, the middle and west part of Qinghai, the middle and west part of Inner Mongolia, Gansu, Ningxia, the northern part of Shan'xi, the northern part of Shanxi, the northern part of Hebei, and some part of Henan. In China, the years having the most or least occurrences of dust

storms and the associated multi-year average have show a basically agreed distribution pattern in line with the affected regions, though different in magnitude.

The regions having most occurrences of dust storms have registered an extended cycle from this November to the following June-July. The inter-annual variations can be grouped into three categories and two transitional belts. 14 provinces, municipalities, and autonomous regions have been hit hard by dust storms, with an affected area reaching 6.24 million square kilometers, or 65% of China's territories. Tibet, Xinjiang, Inner Mongolia, Gansu, Qinghai, and Ningxia are the hard-hit areas.

In the last four or five decades, the northern part of China has witnessed a basically declining trend for dust storms, though with an ascending trend for four regions: the west part of northern Xinjiang, with Zhaosu as the center; the northwest part of Qinghai, with Mangyan as the core, the east part of Qinghai, with Xinghai as the kernel; and the middle part of Inner Mongolia, with Zhuri as the center. Recent years have witnessed an increasingly enhanced intensity of dust storms, though the frequency is on the down side.

The desert areas in Inner Mongolia have a higher frequency of dust storm attacks, compared with pastureland and farming areas in the same region. Farming areas have a noticeably low occurrence of dust storms, with a large annual variation of dust storm attacks for the area mixed with farming and animal raising activities, indicating that the frequency of dust storm attacks is affected by the ecological environment of underlying surface. Zhurihe is an area frequently attacked by dust storms in Inner Mongolia.

3. Dust storm disasters in the northern part of China are the combined results of meteorological conditions, ecological environment, and human activities. Study shows that the number of days and duration of dust storms are well correlated with rainfall, temperature, vegetation coverage, and days of large winds in different seasons. Specifically, the number of days and the duration of dust storms are negatively correlated with rainfall and vegetation coverage, but positively correlated with the days of large winds and temperature. The correlation is most noticeable in the context of the rainfall of last summer and this spring, the vegetation coverage of last summer, and the temperature of this spring. Both rainfall and temperature bear on the occurrence and duration of dust storms by affecting vegetation coverage. The frequent occurrence of dust storms is mainly associated with the dry surface and reduced vegetation coverage caused by the sustained decrease of rainfall.

Of the elements affecting the number of dust storm days in the spring and in a year, and the duration of annual dust storms, the cyclic variation of vegetation coverage is a major factor determining the frequency of dust storms, followed by the days of large winds and rainfall. Temperature has the least impact on the occurrence of dust storms, though it remains an element that cannot be ignored.

The days of large winds and temperature constitute the momentum to blow up a dust storm, while vegetation coverage and rainfall makes an obstacle blocking the formation and transport of dust storms. Momentum is much weaker than the obstacle. In this context, momentum is an internal cause for the occurrence of dust storms. On the other hand, momentum is an external factor. It becomes a dominant factor in inducing a dust storm, and in beefing up the needed transport, when vegetation coverage and rainfall are reduced to such a threshold that it will trigger up the occurrence of a dust storm. It is apparent that the increase of vegetation coverage in arid and semi-arid areas and the restoration of

ecological environment in the north offers a key to curbing the occurrence and development of dust storms.

4. Dust origins affecting dust storms in China and associated tracks. China's dust storms have the sand and dust supply mainly from the Gobi deserts in Mongolia, though also picking up sand and dust when traveling through the deserts or sandy land in the northern part of China. The domestic sand and dust sources likewise contribute to the occurrence and development of dust storms in the country, though to a lesser degree. China's dust storms move mainly in three directions: west, northwest, and north.

The dust storms affecting the Beijing area either travel along a northerly track, or a northwest track. When moving in the north direction, it travels in the following tracks: Wulanchabumeng and the west part of Xilinguolemeng in Inner Mongolia – Hunshandake Desert – Zhangjiakou – Beijing. In the northwest direction, it goes from the northeast part of Xinjiang to the northern part of Alashanmeng in Inner Mongolia, to the Hexi Corridor, and further to Helanshan Mount. where it diverts in the south and north, to Maowusu Desert and to Wulanbuhe Desert respectively, before heading for Baotou, Hohhot, Zhangjiakou, and Beijing. Beijing's dust storms are fed with a sand and dust supply mainly from the northeast part of Xinjiang, Alashan Plateau, E'erdusi, the northern slope of Yinshan, Hunshandake Desert, and Bashang Plateau. One has to improve the ecological environment of these areas in the first place, if attempting to ease the impacts of dust storms on North China.

5. Land degradation and grassland desertification. The reduced vegetation coverage makes an indicator, an accelerator, and a catalyst for the occurrence and development of dust storms. The change of land use/cover patterns, and the reduced vegetation coverage caused by land degradation and desertification, has resulted in a compromised ecological security, which in turn becomes an indicator, an accelerator, and a catalyst for the occurrence and development of dust storms. Study results show that the change of land use/cover patterns and vegetation coverage is noticeably coupled with the variations of dust storm frequency and intensity. In this context, the fundamental approach of curbing dust storms has to be addressing the social causes that contribute to land degradation and reduced ecological safety in the first place, rather than controlling dust storms. One has to handle the relationship between the development and the ecological reconstruction in a proper manner.

6. Comparative analysis of four dust emission scenarios. Comparison results show that the modeling made by Shao (1996), and Marticorena and Bergametti (1995) has produced a dust storm hit area that is noticeably larger than the observed one. The results derived from the modeling of Marticorena and Bergametti (1995), in particular, have an emission that is much higher than the observed one. On the contrary, the modeling results presented by Lu and Shao (1999) have shown an affected area noticeably smaller than the observed one. Shao (2001) has worked out a simulated emission area that is quite close to the real situation, with the prediction products basically in line with the observational data, indicating that the said dust emission scenario yields fine predictions for the occurrence and development of dust storms in China.

7. Impacts of human activities on the desertification in North China. In the past several thousand years, especially in the contemporary time, the population boom has resulted in increased human activities, which in turn accelerates the desertification in the north. It has also become a major cause for the increasingly expanded desertification in the region. Human activities worsen the desertification in North China mainly by affecting water resources, vegetation, soil, and climate.

8. Establish a North China desertification control modality with industry as the key player, supported by the market mechanism and private sectors. Author proposes that at the present stage, China shall strengthen the collaborations between industry and government agencies, introducing the PPP mechanism in desertification control, so as to address a range of related issues, including fund shortage, outdated management modality, and low efficiency. To curb the desertification in an effective manner, the Chinese government shall turn itself into a service oriented government, formulating favorable policies on fund raising, ownership, and ecological compensation, and paving the way for the introduction of market mechanism. Efforts shall also be made to enhance the legislations on desertification control, define the terms of reference of government at all levels for the purpose, protect the control results by punishing the criminal act in the area, and keep up a long lasting public awareness raising and education campaign.

Keywords: North China, dust storm disasters, generation mechanism, vegetation coverage, dust modeling, control measures

原创性声明

本人郑重声明:本人所呈交的学位论文,是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等,均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外,不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名: 张钦仁

日期: 2008-10-10

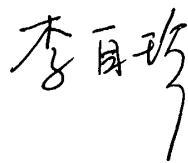
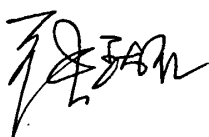
A handwritten signature in black ink, appearing to be '张钦仁' (Zhang Qinren), written in a cursive style.

学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名：张钛仁 导师签名：李自珍



第一章 概 论

本章首先从沙尘暴对人类社会发展的危害入手,分析了开展此项研究的目的和重要意义。然后,从沙尘暴的定义和分级标准、沙尘暴的天气学特征、沙尘暴的气候学特征、沙尘暴的数值模拟、沙尘暴的分布规律、沙尘暴形成机制六个方面,对国内外沙尘暴灾害的研究进展进行了总结和评述。在此基础上,结合中国北方沙尘灾害以及荒漠化的特点,确定了论文的研究目标,提出了论文的研究思路和框架。

1.1 研究的意义与依据

沙尘暴天气的发生,不仅给人民的生命财产造成威胁,而且还造成严重的环境污染。同时它还对全球的生态环境平衡和气候变化有着极其重要的影响^[1]。沙尘暴天气的发生发展及其所带来的环境和气候效应已经成为一个全球性的科学问题。1993年9月在兰州召开的“首届全国沙尘暴天气研讨会”,此后有力地促进了沙尘暴天气研究的广泛和深入的开展。2004年9月12—16日在北京召开了“国际沙尘暴学术研讨会”,来自中国、日本、韩国、美国、埃及等国的100多名代表出席了这一会议,并且通过了“沙尘暴国际研讨会”北京宣言,同时发起和组织了“国际沙尘暴研究计划”。近年来,比较系统的国际大气气溶胶研究计划是已于2001年结束加强观测的亚洲气溶胶特征试验,其中曾将矿物(沙尘)气溶胶作为其主要研究内容之一。于2001年开始的中国科学院—日本文部科学省的“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境影响的研究(ADEC)”的合作项目,可能是系统性地研究亚洲沙尘暴的第一个科学计划,目前正在顺利执行。其目标是阐明亚洲风送沙尘的发生、输送实况及其模式化;评价过去半个世纪以来沙尘向大气与海洋中的输送量;并在全球规模上,将亚洲沙尘对气候系统的影响定量化^[1]。可见,沙尘暴问题已经引起了科学界和国际社会的高度重视。

中国北方地区处于西风带气候区、高原气候区和东亚季风边缘气候区的交界区,气候特征较为复杂,境内又包含了沙漠、戈壁、沙地、草原、地类型,由于其所处的特殊地理位置、内部复杂的地貌特征,以及这一地区又是沙尘暴天气的

频发区,因此对该区域的沙尘暴天气的气候特点的研究具有十分重要的意义。特别是在全球增暖和中国北方地区地表植被状况没有得到根本好转的情况下,沙尘暴天气仍有可能频繁出现。因而,针对我国沙尘暴天气的特点,分析沙尘暴发生源地及沙尘暴移动路径的地表基本状况,研究人类活动和气候变化对沙化和沙尘暴的影响以及沙尘天气形成的气候条件,为深入研究沙尘暴天气的成因、机理和防治提供科学依据,为生态环境保护和建设提供科学依据,为西部大开发的决策研究提供科学依据都具有十分重要的作用。由于沙尘暴天气对人类生存环境造成危害以及对经济、社会活动带来负面影响,人类越来越清楚地认识到沙尘暴天气是不可忽视的大气和生态环境问题之一,也认识到重视对沙尘天气的研究,提高预测水平,减少沙尘天气的灾害程度是一项十分重要和迫切的工作。

1.2 沙尘暴研究进展

1.2.1 沙尘暴的定义与分级标准

1) 沙尘暴的定义。沙尘暴是一种气象灾害,也是严重的生态环境问题^[2](史培军,2000a)。沙尘暴(sand-dust storm)是沙暴(sand storm)和尘暴(dust storm)两者兼有的总称^[3](王式功,2000)。国外报道的沙尘天气包括沙尘暴、浮尘(dust haze)、扬沙(blowing dust)和尘卷(dust devils)四种,在2006年之前,国内根据所造成的大气水平能见度的差异,将沙尘天气划分为沙尘暴、扬沙和浮尘三个等级。

在气象学中,沙尘暴系指由于强风将地面大量沙尘吹起,使空气很浑浊,水平能见度小于1km的天气现象;扬沙指由于风力较大,将地面沙尘吹起时,空气相当浑浊,水平能见度在1~10km之间;浮尘指在无风或风力较小的情况下,尘土、细沙均匀浮游在空中,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、扬沙出现后下沉的尘土^[4-5](中国气象局,1979;叶笃正,2000);尘卷是一种局地小尺度的沙龙卷天气现象。

在2006年11月1日颁布实施的国家标准《沙尘暴天气等级》^[6]中,依据沙尘天气当时的地面水平能见度将沙尘天气依次划分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴五级。

浮尘：当天气条件为无风或者平均风速 ≤ 3.0 m/s时，尘沙浮游在空中，使水平能见度小于10km的天气现象。

扬沙：风将地面尘沙吹起，使空气相当混浊，水平能见度在1km~10km的天气现象。

沙尘暴：强风将地面尘沙吹起，使空气很混浊，水平能见度小于1km的天气现象。

强沙尘暴：大风将地面尘沙吹起，使空气非常混浊，水平能见度小于500m的天气现象。

特强沙尘暴：狂风将地面尘沙吹起，使空气特别混浊，水平能见度小于50m的天气现象。

2) 沙尘暴相关概念。与沙尘暴有关的概念还包括大风、荒漠化、降尘、大风降尘、沙尘暴多发区、土地退化、土壤侵蚀和风力侵蚀等。

大风：在气象学中，把瞬时风速达到17m/s以上的风称为大风。沙尘暴和大风两者的主要区别在于能见度。刮大风时，空气中如不含沙土和粉沙，不形成沙尘暴。大风只是产生沙尘暴的条件之一，它只有与地表沙尘物质及其他天气因素共同作用时才能形成沙尘暴。

荒漠化：系指包括气候变化和人类活动在内的各种因素作用下，干旱、半干旱和亚湿润干旱区的土地退化。这里年降雨量与潜在土壤蒸发比值在0.05~0.65之间，其中，干旱区：0.05~0.20，半干旱区：0.21~0.50，半湿润区：0.51~0.65。

降尘：是因自身重力作用降落到地面的粉尘，粒度大于 $10\mu\text{m}$ ；大风降尘使一部分沙尘在源地周围沉降，另一部分在西风急流的推动和作用下，被携带和搬运到几百甚至几千公里以外。

沙尘暴多发区：是指沙尘暴发生的频率高、强度大、灾情重的地区。

土地退化：由于使用土地或由于一种营力或数种营力结合致使干旱、半干旱和亚湿润干旱区雨养耕地、水浇地或草原、牧场、森林、林地的生物和经济生产力和复杂性下降或丧失。其中包括风蚀、水蚀而造成的土壤物质的丧失，土壤的物理、化学和生物特性或经济特性退化，以及自然植被的长期丧失等。

土壤侵蚀：在水力、风力、温度作用力和重力等外营力作用下，土壤及其母质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的全过程。其中风力侵蚀是指在气流冲击作用下，土壤颗粒或沙粒脱离地表，被搬运和堆积的一系列过程，以及随风运动的沙粒在打击岩石表面过程中，使岩石碎屑剥离出现擦痕和蜂窝的现象，简称风蚀。

在不同的国家或地区，沙尘暴有着不同的名称，如在印度西北地区称之为安德海（Andhi）^[7]（Joseph, 1980）；在非洲和阿拉伯地区称之为哈布（Haboob）^[7]（Wolfson, 1986）；另有的地区称之为鬼怪（Phantom）^[8]（Wolfson, 1986）。

3) 沙尘暴的分级标准和基本特征。按照气象台站沙尘暴年平均发生日数划分，分为影响区（1~4日）、益发区（5~9日）、多发区（10~19日）和高频区（≥20日）^[9]（周自江, 2001）。也有学者把沙尘暴年平均日数接近或超过10天的地区称为沙尘暴多发区，其中10~20天为中频率区，20天以上为高频率区。

按照发生的范围，沙尘暴天气可分为区域性和局地性。由系统性天气引发临近地区2站以上沙尘暴天气，称为区域性沙尘暴天气；由非系统性天气（如局地强对流等）引发的零星1~2站沙尘暴天气，称为局地性沙尘暴天气。区域性可以进一步分为小范围和大范围。

沙尘暴的强度根据水平能见度好坏分为特强、强、中等和轻四级，见表1-1。特强沙尘暴可导致天色昏暗，甚至黑的伸手不见五指，所以人们又根据天色昏暗的程度形象的称为“黄风”和“黑风”^[10]（夏训诚, 1995），也称黑风暴，其特征是瞬时风速大于25m/s，能见度小于50m。强、中和轻度沙尘暴的相应能见度指标分别为200m、500m和1000m。

表 1-1 沙尘暴强度分级标准

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

在地理学上沙暴与尘暴有比较明确的界定，它们发生的外部条件、内在的物质构成与危害程度均不相同^[11]（张增祥, 2001）。沙暴是由狂风把大量粗沙吹入空中所形成的一种风暴，沙粒很少被吹离地面15~30m以上，而且也不会被刮得离源地很远。尘暴则是一种含有大量尘埃的风暴，大气昏暗，能见度大大降低，甚至降低到能见度为零。悬浮在空中的沙尘其高度达1000~2500m，严重时可达2500~3200m^[12]（叶笃正, 2000）。

依据沙尘天气当时的地面水平能见度将沙尘天气依次划分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴五级。

表 1-2 沙尘暴强度分级标准

沙尘暴强度	超强沙尘暴	强沙尘暴	沙尘暴	扬沙	浮尘
能见度 (VV)	<50m	<500m	<1km	1km~10km	<10km

沙尘暴的前锋呈高墙状,称为沙尘壁。沙尘壁移动迅速,呈现上黄、中红、下黑三种颜色的旋转式沙尘团。从光学角度来看,太阳是由赤、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色的单色光组成,它们的波长依次递减($0.75\sim 0.4\mu\text{m}$),太阳光通过大气层时,由于大气层最上层中的微粒直径最小,它能散射掉一部分太阳光中的紫色光,因此,高层大气中天空是呈紫色的。太阳光再通过中低层大气时,该层大气中的尘埃微粒直径因与蓝光波长相当,故又把太阳光中的蓝色光散射掉一部分,所以我们看到该层的天空是蔚蓝色的。在沙尘壁中,由于上升气流产生的上举力所决定,沙尘壁底层的沙粒直径最大,中层次之,上层主要是浮尘。因浮尘微粒能把太阳光中的黄色光散射掉一部分,所以我们看到的是黄颜色。太阳光再通过沙尘壁中层时,较大直径的微粒由将太阳光中的红色光散射掉一部分,所以看到中层是红色。因太阳光通过整个大气层,再穿过沙尘壁的上层和中层时,其七种颜色的光已被全部散射、反射和遮挡住,故沙尘暴最下层为黑色。

沙尘暴发生时,气压会很快下降又上升,气温很快上升后而猛烈下降,空气湿度下降,有时还伴有沉闷的雷声,沙尘暴过境后的第二天易出现霜冻。

1.2.2 沙尘暴的天气学特征分析

国外早在上世纪 20 年代就开始对沙尘暴进行了比较系统的研究。Hankin^[12] 首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行了分析。之后 sutton^[13] 对“*Haboob*”型沙尘暴进行了分析。Idso^[14] 报道了美国亚利桑那州西南部强沙尘暴的特征。80 年代初, Joseph 等^[7]对沙尘暴与雷暴中湿度场的差异作了研究。80 年代中期, wolfson and Matson^[7]对“*Phantom*”型沙尘暴的特征进行了分析研究; Brazel^[15]则进一步总结了亚利桑那州沙尘暴的天气类型:锋面型、雷暴(对

流)型、热带风暴型、高空切断低压型。Monaughtont^[16]的研究则强调了中尺度低压或飑线与沙尘暴天气有紧密的联系。80年代后期, Jauregui^[17]对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统研究, 并指出3月份沙尘暴出现频率最大。90年代初, Littmann^[18]分析了亚洲沙尘暴的发生频率。与国外相比, 我国在沙尘天气研究方面起步较晚, 自上世纪70年代以来, 徐国昌等^[19]1977年4月22日张掖地区的西风型强沙尘暴天气进行了分析, 并提出了黑风预报的着眼点。80年代, 高凤荣和李云^[20]对河西地区东风气流中产生的沙尘暴个例作了研究, 得出一些有别于西风型沙尘暴天气过程的分析结果; 90年代, 陈敏连等^[21]、刘树华等^[22]、王式功等^[23]、徐建芬等^[24]、钱正安等^[25]先后对西北地区沙尘暴天气个例作了深入探讨, 这些研究结果普遍强调了中尺度天气系统在沙尘暴形成中的重要作用, 指出沙尘暴是在特定的地理环境和下垫面条件下, 由特定的大尺度环流背景和天气系统所诱发的灾害性天气。可见, 有利的下垫面特征条件在沙尘暴的形成中起到重要的作用。徐建芬等^[26]对2000年4月12日发生的一次强沙尘暴的天气成因分析指出, 此次沙尘暴是由强冷空气引发的锋后西大风沙尘暴天气过程。前期持续增温为沙尘暴的发生提供了有利的热力条件; 河西气旋性涡旋的生成、发展是激发沙尘暴的中尺度天气系统。姜学恭等^[27]对2001年4月6—8日由蒙古气旋强烈发展触发的内蒙古地区强沙尘暴天气过程进行了分析, 指出冷锋过境对沙尘暴的触发作用远强于气旋发展。影响沙尘暴的天气因素中, 地面大风形成主要源于气旋发展和锋后强冷平流, 高空动量的有效下传, 则是另一重要原因。地面热通量试验证明, 地面加热不仅对冷锋过境产生的上升运动强度具有直接影响, 也影响混合层形成和高空动量下传, 从而影响沙尘暴的强度。陈豫英和赵广平^[28]利用常规气象资料, 对2001年4月8—9日和2002年3月19—21日的两次强沙尘暴天气过程进行了对比分析。分析结果表明, 尽管两次强沙尘暴过程的发生源地基本相同, 但由于环流形势、冷空气的强度、影响时间、蒙古气旋的位置及前期气候背景有所差异, 使两者造成的影响不同。

可以看到, 上述的研究都是以对沙尘天气典型个例的天气学分析为基础的。近年来, 对于沙尘天气的天气学特征, 科研人员利用大批量的个例开展了系统性的研究。例如, 王可丽等^[29]对2001年春季中国北方5次沙尘暴的环流动力结构进行了分析, 指出在沙尘暴强盛期的高度场上, 蒙古国有深厚的低值系统, 乌拉尔

高压发展,其间的强气压梯度是沙尘暴的动力源;低值系统有正涡度中心支持,外围是负涡度区,其间有强涡度梯度带;低值中心伴随有低层辐合高层辐散的垂直结构,易于发生近地面大风和上升气流,有利于地面起沙上扬,形成沙尘暴,大风区与强涡度梯度带一致,强风带切变形成的涡度输送有利于加强低值系统,进而增强风场。刘景涛等^[30]1957—1996年和2001、2002年间发生在我国北方的33次特强沙尘暴天气过程的天气系统进行了研究,将我国北方特强沙尘暴的天气系统,划分成(1)纯冷锋型,(2)蒙古气旋与冷锋混合型,(3)蒙古冷高压型,(4)干飚线与冷锋混合型4种类型。研究了各类型天气系统在沙尘暴强风形成中的作用、各类型强风的特点及沙尘暴天气的时空分布特征。沙尘暴形成的天气原因,江吉喜等^[31]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:(1)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;(2)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;(3)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。胡隐樵和田光宇^[32]研究了干飚线和强冷锋前干胞线发展同黑风暴爆发的关系后指出,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。冷空气的活动能激发冷锋、气旋及中尺度系统,是引发沙尘天气的重要因素^[33-35]。

1.2.3 沙尘暴的卫星遥感监测分析

对于沙尘天气发生发展的天气学特征的分析,除了利用上述常规的气象资料来进行分析外,随着遥感技术的不断发展,利用多种遥感数据监测沙尘暴,提取沙尘暴信息,从而定量分析沙尘暴的有关参数,已成为沙尘暴研究的热点^[36]。曾庆存等^[37]从利用气象卫星的遥感资料,将遥感资料与地面站网观测资料相结合的角度;从有关地理信息系统建立和应用的角度;从有关天气系统、土壤、风蚀和扬沙及传输的动力机理分析的角度;从沙尘天气和土壤湿度的数值天气预报和短期气候预测等方面,对沙尘暴的监测、形成机理和预警预报方法以及防御等方面进行比较深入的分析研究,在此基础上,集成为可供日常业务使用的监测和预测系统。Yang^[38]、徐希慧^[39]利用单通道数据分别对北京、塔里木盆地沙尘暴卫

星云图特征进行了研究。江吉喜等^[40]运用 1 小时间隔的 GMS-4 数字展宽红外资料和部分常规资料,分析了 1993 年 5 月 5 日发生在我国西北地区的特大沙尘暴的形成原因,并指出:通过遥感手段可以分析出特强沙尘暴过程中强冷锋前部的中尺度对流系统(GMS)及其伴随的飑线的卫星云图特征。方宗义等 GMS^[41]利用气象卫星上的可见光、短波红外和红外窗区的辐射测值对沙尘暴的监测进行了研究。范一大等^[42]利用 NOAA/AVHRR 数据研究了沙尘暴图像的查找表 (Lookup Table) 增强法和沙尘暴信息提取的经验模型。郑新江等^[43]介绍了利用气象卫星多通道信息监测沙尘暴的原理和方法。并利用此技术方法对 2001 年 3-4 月北方沙尘暴过程进行了监测,分析了影响北京地区沙尘暴过程的沙源和可能路径。关于定量监测沙尘的方法也有很多的研究,例如,延昊等^[44]利用辐射传输方程进行了沙尘气溶胶的辐射计算,对不同沙尘气溶胶光学厚度下的热红外通道温差的变化进行了分析,表明用这一方法对陆地沙尘识别是可行的。郭妮和倾继祖^[45]通过对 2000—2002 年多次沙尘暴过程的 NOAA 卫星 AVHRR 资料的分析,研究了沙尘、云、沙漠、戈壁、积雪、裸地、植被等不同目标物的光谱特性,发现沙尘暴在 AVHRR-2 中各通道均有不同程度的反映。在此基础上提出定量提取沙尘信息的两种沙尘判识指数,并利用沙尘判识指数成功地提取多次沙尘暴过程的沙尘信息。高庆先等^[46]利用 EOS/TOMS 气溶胶指数定量描述沙尘天气强度,并对 1998 年月间发生的沙尘天气的强度及其演变进行了详细的分析,结果表明利用 EP/TOMS 气溶胶指数并结合气象观测资料,可以对大规模的沙尘天气进行及时判别、监视,并预报影响范围及传输路径;韩涛等^[47]在对 EOS/MODIS 资料光波段光谱特性深入分析的基础上,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,构造了不同的光谱特征判别函数,成功地对几次沙尘暴过程进行了沙尘信息遥感监测。

1.2.4 沙尘暴的气候学特征分析

长期的气候背景亦是影响沙尘暴的重要因子。近年来,我国学者从气候特征方面对沙尘暴作了诸多研究。张仁健等^[48]认为 2000-2002 年处于反 El Nino 事件的高峰期,东亚冬季风强,中国北方沙尘暴频繁发生。康杜娟和王会军^[49]分析了中国北方沙尘天气的时间变化特征,并揭示了冬、春季的气候和大气环流有显著差别。在沙尘活动稀少年代里,冬季极涡异常加深,50°N 附近的西风增强,东亚

极锋锋区位置偏北,东亚大槽偏弱;西伯利亚高压北部及中心强度变弱,阿留申低压明显升压;东亚季风强度变弱,影响中国的冷空气势力减弱,冬、春季大风天气变少。同时中国北方广大地区冬季温度显著升高,西北和内蒙古的沙源地区春季降水明显增多。在年际尺度上,中国北方的沙尘活动频次与前冬的西风指数、北极涛动指数呈显著的负相关,与冬、春季东亚季风指数呈显著的正相关。可见,上述研究都强调了东亚冬季风的作用。张莉和任国玉^[50]的研究认为,在过去的近50a内,造成中国北方沙尘暴频率显著下降趋势的直接自然原因是:沙尘源区和发生区平均风速和大风日数的减少、主要沙尘源区降水量特别是春季和前冬降水量的增加、以及由于源区降水增加引起的大气和土壤湿润程度的改善。王式功等^[51]利用筛选过的我国338个气象站1954—2000年资料及相关气候资料,分析指出47a来我国沙尘暴天气多发区分别位于以民丰至和田为中心的南疆盆地和以民勤至吉兰泰为中心的河西地区。钱正安等^[52]利用1952—2000年间中国西北及华北的强及特强沙尘暴资料进行了分析,得出中国北方的沙尘暴源区主要分布在河西走廊和阿拉善高原、南疆盆地南缘以及内蒙古中部三地区:其中频数在10次以上的强或特强沙尘暴中心有3个,分别位于上述三个区域,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。周自江等^[53-55]研究表明我国西北、华北、东北、青藏高原是扬沙和沙尘暴的主要影响区。他们还揭示了1954—2002年中国典型的强沙尘暴事件的时空分布特点,研究表明强沙尘暴发生的次数在20世纪50年代最多,90年代最少,呈波动减少趋势,2000—2002年又相对增多。周自江和章国才^[55]在统计分析了1954—2002年49a来我国北方典型强沙尘暴序列的特征后,指出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。尚可政等^[56]通过对甘肃河西沙尘暴与赤道中、东太平洋海温的遥相关分析结果表明:(1)春季河西沙尘暴次数与前两年秋、冬季海温因子负相关最好,时间过远或过近的因子相关性反而较差。这意味着,当某年秋、冬季太平洋中、东部海温偏高(低)时,两年后的春季,河西走廊沙尘暴发生次数偏少(多)。夏季河西沙尘暴次数与前两年春、夏季海温因子相关最好,即当某年春、夏季太平洋东部海温偏高(低)时,两年后的夏季,河西沙尘暴次数偏少(多)。(2)就春季逐月而言,河西沙尘暴次数与前期海温因子之间的相关,3月份和整个春季大致相同;4月份仅与前两

年9月海温因子负相关较好；5月份介于春、夏季之间。(3)利用前期赤道中、东太平洋海温距平和给出的相关预报方程，可以较好地预报出河西春季沙尘暴发生次数的多寡。徐建芬等^[57]从气候统计的角度，对沙尘暴的移动路径作了较为详尽的分析，研究以1977年以来西北地区发生的22例区域性强沙尘暴天气过程为对象作了综合分析，并根据沙尘暴的天气形势特点、冷空气来源及云图特征等将沙尘暴移动路径分为西方路径、西北路径、北方路径3大类：(1)西方路径。冷空气从中亚翻越帕米尔高原进入南疆西部，沿塔里木盆地东移影响南疆、河西西部及青海北部而出现大风沙尘暴天气，并随冷空气途经塔克拉玛干和古尔班通特古沙漠东移。此类沙尘暴占14%，主要发生在塔里木盆地、河西走廊西部和青海省。(2)西北路径。冷空气源于北冰洋冷气团，强冷空气自西西伯利亚向东南经我国北疆、内蒙古西部入侵河西走廊，造成大风沙尘暴，穿过巴丹吉林和腾格里沙漠，然后东移至鄂尔多斯高原。此类沙尘暴具有范围广、强度大、灾害严重的特点，易形成黑风，发生次数最多，占68%，如1977年“4.22”黑风、1993年“5.5”黑风以及2000年“4.12”强沙尘暴等。(3)北方路径。冷空气来自极地气团或变性气团，经贝加尔湖、蒙古，影响我国西北地区东部和华北等地，从而引发大风沙尘暴。沙尘暴从蒙古国经我国内蒙古中部到达西北的宁夏、陕北以及华北等地区，此类路径的沙尘暴占了18%。

1.2.5 沙尘暴的数值模拟研究

国内外对沙尘暴进行了许多的科学研究，但由于观测资料少而且不全面，对沙尘暴启动、传输的分布特征了解很少，不能对沙尘暴做出有效的预报。数值模式对大气的动力和物理过程有较好的描述，因此建立有效的数值模式来模拟沙尘暴过程一直是众多学者研究的方向。70年代末，schutz^[58]首先发展了一个二维稳态沙尘输送模式来研究撒哈拉地区沙尘的输送。此后，随着气溶胶观测资料的不断积累，到80年代，通过数值模式对沙尘暴进行模拟的研究逐渐多了起来。

Berkofsky^[59]，设计了一个耦合沙尘浓度方程的边界层模式，分析了边界层高度与沙尘浓度的演变关系。WestPhal等^[60-61]则以NCAR的有限区域动力模式与NASA的气溶胶远距离传输模式为基础，发展了一个比较完善的二维动力学沙尘传输模式，对沙尘气溶胶远距离输送过程进行了研究，真实地模拟了撒哈拉沙尘

SAL (sahara Air Layer) 在大气边界层中的许多特征, 后来在二维模式的基础上, 又发展了三维动力学传输模式。90年代至今, 数值模式已经成为研究沙尘暴的一种重要手段。Joussanme^[62]把沙尘质量守恒方程加入到大气模式, 对大气中的沙尘变化进行了研究。Cautenet^[63]利用中尺度模式, 对西非上空沙尘暴的热力影响进行了数值模拟。Tegen and Fung^[64]利用三维全球大气模式研究了矿物沙尘对大气辐射平衡的影响。Slobidan^[65]对沙尘的远程输送进行了三维空间的数值模拟, 将沙尘的输送过程分为在地面移动和被湍流抬升两个阶段。Shao^[66]的起沙方案在澳大利亚沙尘天气的数值模拟中获得了很好的结果。Nickovic^[67]利用SKIO/Eta模式和 Eta/NCEP区域大气模式研究了沙尘在大气中的循环。我国利用数值模式对沙尘暴也进行了大量的研究。申绍华和陈受钧^[68]利用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。程麟生等^[69]利用中尺度数值模式对我国西北“93.5”黑风暴发展成因而与沙尘输送进行了研究。陈伟民等^[70]利用改进型PSU/NCAR中尺度数值模式, 模拟了1994年4月5—11日西北地区大范围的浮尘和沙尘暴天气过程中海平面气压的演变和分布。宋振鑫等^[71]利用“93.5”黑风暴中尺度数值模拟资料, 对该“黑风”发展过程中有效位能和湿扰动能源的贡献进行了数值诊断分析。纪飞和秦瑜^[72]利用有限区域中尺度模式MM4和沙尘传输模式相耦合, 讨论了东亚地区沙尘暴爆发、传输及沉降的物理特征。刘春涛和程麟生^[73]提出了一种沙尘源、汇项的参数化方案和一个沙尘输送方程, 同时引入MM4中尺度数值模式, 基本成功模拟了“9305”黑风暴的天气系统演变及其沙尘浓度的近地层和垂直分布以及沙尘的沉降与输送。黄美元和王自发^[74]给出了一个适合我国北方的用于黄沙输送模拟与预报的新的起沙机制模型, 在此基础上建立了适合东亚地区的分谱的黄沙输送模式, 较好的模拟了黄沙的输送过程。刘毅等^[75]运用MM4中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式, 对沙尘暴天气及沙尘气溶胶(黄沙)输送过程进行了研究。王伟等^[76]用沙尘暴天气数值预报系统对中国的沙尘暴天气进行了数值预报试验, 成功地模拟了沙尘暴的发生和传输。赵琳娜等^[77]和孙建华等^[78]将澳大利亚发展的具有清晰风蚀物理学概念的起沙数值模式(非参数化方案)、输送模式与PSU/NCAR的中尺度气象预报模式MM5V3进行耦合, 以高精度中国区域的GIS数据为基础, 建立了一个比较完整的沙尘暴起沙和输送过程的预测系统, 试验说明该系统对沙尘天气的起沙和输送过程有较好的模拟能力。王劲松

等^[79]利用MM5中尺度动力学模式成功地模拟了西北地区2000年春季最强的一次沙尘暴过程,并通过数值模拟的结果对影响沙尘暴发生的主要物理量场进行了诊断分析。张小曳^[80]等采用大规模、细致的观测与数值模拟相结合的研究方法,在亚洲沙尘暴潜在源区和下风沉降区,开展了大气气溶胶粒子的理化、辐射特性的空中与地面相结合的立体观测,获得了点-线-面相匹配的空间及时间序列观测结果,比较详细和系统地了解了亚洲沙尘暴的物理特征和化学组成、变化历史、源地、释放量、输送和沉降的方式以及他们与天气气候的关系。同时,以风蚀资料库为基础,将沙尘气溶胶物理耦合到气象模式中,建立了亚洲沙尘暴数值预报系统CUACE-Dust。该数值预报系统在2004年4月进行了沙尘暴数值预报业务试验,对2005年和2006年的主要沙尘暴天气过程均做出了有效预报。李耀辉等^[81]采用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的科研成果GRAPES-SDM—耦合于GRAPES的沙尘暴模式(sand and Dustmodel)系统,对2005年发生在西北地区的两次强沙尘暴进行了模拟分析研究,结果表明,该模式系统对西北地区沙尘暴天气的起沙、传输有较好的模拟和预报能力。

1.2.6 沙尘暴的分布规律研究

1) 沙尘暴空间分布规律。沙尘暴的空间分布与下垫面的性质和特征有着明显的对应关系,国内外学者都在这方面进行了大量的研究。Pye (1987)指出沙尘暴主要发生在沙漠及其临近的干旱与半干旱地区,世界范围内沙尘暴多发生在中亚、北美、中非和澳大利亚^[82]。王式功等(1996)也做了类似的工作,指出我国的沙尘暴主要发生在长江以北地区,属于中亚沙尘暴区的一部分^[83]。在地质时期和历史时期,这里一直是沙尘暴的主要成灾地区和“雨土”的释放源地。分布规律是:西北多于东北地区,平原(和盆地)多于山区,沙漠多于其它地区。

总体而言,我国沙尘天气发生频率大致由西北向东南方向减少。钱正安(1997)和王式功(1995)的研究表明:我国北方农牧交错带、沙漠边缘带、沙漠—绿洲过渡带是沙尘天气的多发地带,过去的50年,西北地区强与特强沙尘暴发生高频区有三个,一是以甘肃民勤为中心,包括甘肃河西走廊、巴丹吉林沙漠南缘、腾格里沙漠和宁夏黄灌区;二是以和田为中心,位于塔里木盆地南缘民丰—于田—和田—皮山一线;三是以吐鲁番为中心,主要集中在吐鲁番盆地地区

[84-85]。董治宝(2000)指出:在我国的干旱半干旱地区有五大沙尘暴中心:①塔里木盆地,主要包括塔克拉玛干沙漠和罗布泊地区;②阿拉善高原,包括巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和河西走廊;③鄂尔多斯高原,包括毛乌素沙地和北部黄土高原;④内蒙古高原东南部,包括后山地区、浑善达克沙地和科尔沁沙地;⑤华北平原,范围可至北京以南^[86]。王式功等(2003)的研究结果表明:我国沙尘天气多发区分别位于以民丰至和田为中心的南疆盆地和以民勤至吉兰太为中心的河西地区,其中沙尘暴主要发生在与北方沙漠及沙漠化土地相联系的极干旱、干旱和半干旱区内;全国沙尘暴天气易发区可划分为北疆、南疆、河西、柴达木盆地、河套、东北和青藏等7个亚区。

在华北北部地区,内蒙古的朱日和由于特定的地理位置,经常受到西北路冷空气的袭击,又可受到强西路冷空气的影响,有着内蒙古平均大风日数(83.7天)和年平均风速(5.6m/s)之冠之称^[87](刘景涛,1998),是华北北部强与特强沙尘暴最大的一个中心。此外,阿拉善高原的额济纳旗和鄂尔多斯高原也是强和特强沙尘暴的多发区域。

我国的沙尘暴和沙尘天气大多位于长江以北,北方省区(除黑龙江省)的绝大部分地区都可受到沙尘暴的影响,沙尘暴涉及面积就达580万平方公里,约占全国国土总面积的60%。同时,沙尘天气的覆盖范围比沙尘暴广泛^[88](全林生,2001)。近些年来,沙尘天气也影响到了长江以南的一些地区。

2) 沙尘暴时间分布规律。据考证,距今7000万年前就有沙尘暴的出现^[89](王式功,2000)。在地质历史中,沙尘暴的发生呈周期性的变化,与气候变化和地面沙尘物质的消长有关^[90](夏训诚,1996)。在气候暖湿期间,沙尘暴发生频率低;相反,在冷干气候时期,沙尘暴发生频率高。公元前3世纪至公元12世纪,为沙尘暴发生的低频阶段,从13世纪开始,强沙尘暴发生频率增高,19世纪后进入迅速增长的阶段^[91-92](胡金明,1999;卢琦,2001)。主要由于土地利用不当、持续旱灾和土壤特殊性质,20世纪30年代的美国西南大平原,20世纪30~80年代的加拿大大草原地区,20世纪70年代的非洲大陆,20世纪90年代的澳大利亚中西部海岸地区,都一度沙尘暴发生频繁^[93-94](Ladochy, 1982; Hurt, 1987)。

图1-1给出了公元300年以来中国北方沙尘暴发生频数,由此可见,大约在公元1100年左右,中国北方沙尘暴发生频数急剧增加。近千年来,我国沙尘暴的

频发期有5个,即1060~1090年、1160~1270年、1470~1500年、1610~1700年和1820~1890年。

近50年来,我国沙尘暴天气频数的年代际变化相当明显(如图1-2),从上世纪50年代到90年代,强与特强沙尘暴天气一直呈增加的趋势,沙尘暴天气发生日数也呈明显的增加趋势^[91](胡金明,1999),20世纪90年代至本世纪初,我国北方进入沙尘暴相对活跃的时期。这与在全球气候变化背景下,由于人口的增长、土地利用强度的增大,我国北方干旱与半干旱地区生态环境的恶化有着必然的联系。

沙尘暴出现的日期有明显的季节性变化,一般出现在雨季以前。世界上大部分地区的沙尘暴主要出现在春季,北半球在3~5月,南半球在9~11月^[95](朱福康,1999)。我国沙尘暴发生的季节主要集中在春季,约占全年总数的一半,强与特强沙尘暴主要发生在这一季节,夏季次之,秋季(新疆地区为冬季)最少^[96](何清,1997;王式功,2000)。中国北方的沙尘天气在亚洲地区出现最早,4月份沙尘暴出现频率最高^[17](Littmann,1991;刘景涛,1998),但近些年有提前的趋势,9月和10月出现频率最低^[97](杨东贞,1998)。沙尘暴出现的时间也有明显的日变化,绝大多数集中出现在午后,入夜后减少^[87, 89, 92, 95](刘景涛,1998;王式功,2000;卢琦,2001;朱福康,1999;)。春季沙尘暴发生频率高,除了与一年之中春季冷空气活动频繁、风速较大有关外,还与下垫面状况有着很大的关系。春季地面开冻融化、植被稀少、裸露土地面积较大,再加上气温回升、降水稀少,使得裸露的沙土结构逐渐变得松散,在适当的天气系统下,极易产生沙尘暴天气。

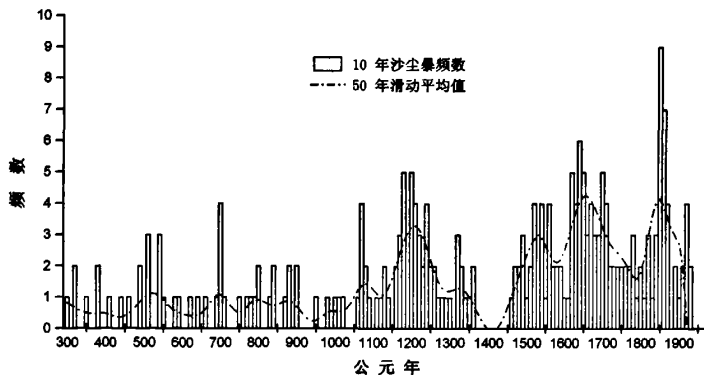


图 1-1 公元 300 年以来我国北方沙尘暴发生频数

(数据提供: 中国气象局)

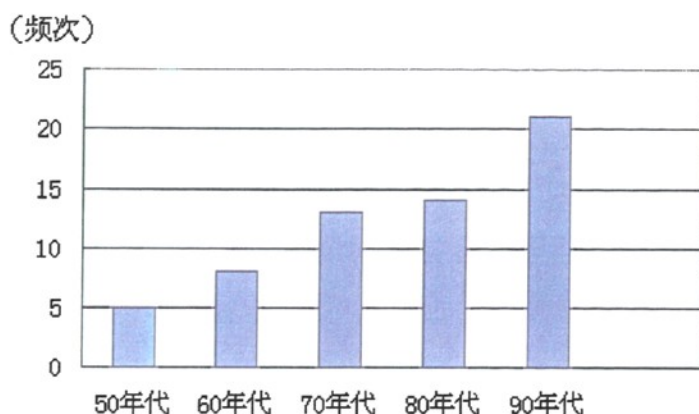


图 1-2 西北地区强和特强沙尘暴频数的年代际变化

1.2.7 沙尘暴形成机理研究

沙尘暴的成因复杂,一般认为强风、沙源和热力不稳定是沙尘暴形成的3个基本条件。强风是沙尘暴形成的动力条件,沙源是它的物质基础,不稳定的空气状态是重要的局地热力条件。

1) 沙尘暴形成的动力条件。沙尘暴是由于大尺度的天气形式、中尺度的干飚线与局地热力不稳定条件相互作用的结果。

强冷空气是形成沙尘暴的动力因素,是沙尘暴形成的必备条件,它的大小决定着空气中沙尘的数量、粒径大小以及沙尘影响的高度和范围。强冷空气通过形成强的气压梯度和变压梯度,使冷空气能够推动暖空气加速运动,从而形成地面大风^[98](张钦仁,1997)。强冷空气的形成首先受大尺度环流的影响,主要是欧洲大槽的东移、欧亚经纬向环流的转变等所诱发的冷空气南下形成强冷锋天气活动或高空低压槽过境,它是沙尘暴天气发生的主要动力^[99,91](胡隐樵,1997;胡金明,1999)。尤其是在春季,是我国北方地区冷锋活动最为频繁的季节,通常是位于西伯利亚的冷空气在我国境内由西北向东南爆发。我国沙尘天气发生的高频区,主要受到蒙古气旋、东北气旋和黄河气旋的影响^[94](全林生,2001)。

其次,中尺度系统对沙尘暴的发生发展也起到至关重要的作用。研究表明^[7,16,99,97,92](Joseph,1980;McNaughton,1987;胡隐樵,1997;刘景涛,1998;卢琦,2001):沙尘暴天气总是与中尺度低压或飚线相联系,在地形、下垫面、大尺度环流背景和天气系统条件具备的情况下,中尺度天气系统对沙尘暴的产生

起着最直接的作用。我国北方地区的暖低压的形成和发展以及锋面飚线的形成主要集中在青藏高原东部和青海地区,加之近地面大气层局部增温等,常导致底层大气的强烈垂直对流,为地表沙尘扬起创造了有利条件^[91](胡金明,1999)。

第三,小尺度的局地热力(对流)不稳定,同样有利于强对流的发生和发展,从而加强对流性天气过程,成为沙尘暴的重要触发机制之一。下垫面热力属性的差异是在一定的天气系统和独特的地貌结构作用下形成的,这种差异容易形成局地小尺度热力性涡旋,而这种现象在春季较其他季节表现得更为频繁^[87,91](刘景涛,1998;胡金明,1999)。同时,沙尘暴的日变化特点与太阳辐射日变化有着密切关系,由于午后地面辐射加热最强,气层不稳定,更容易激发热力性对流,使沙尘暴加强^[87](刘景涛,1998)。山地夹平原和山地夹盆地等独特的地貌结构可以加大冷空气的流速,形成大风天气,易于沙尘暴天气的发生,人们称这种现象为“狭管”效应^[91](胡金明,1999)。而在沙尘暴的发展过程中,由于沙尘区阻挡了太阳辐射,地面接收到的短波入射辐射随之下降,使地表温度降低,气压上升,进而加大锋面前后的气压差,最终又使风速增大,沙尘暴进一步加强。这个过程揭示了沙尘暴发展过程中沙尘辐射冷却的正反馈效应和局地不稳定气流使沙尘暴加强的触发机制^[99,87](胡隐樵,1997;刘景涛,1998),这种热力正反馈机制在午后最强^[100](龚道溢,2001)。

2) 沙尘暴形成的下垫面条件。中国北方沙尘灾害的形成与发展除了天气原因外,直接受到下垫面资源与环境状况的影响,是天气过程和下垫面状况综合作用的结果。

(1) 沙尘暴源地。研究表明:沙尘暴的发生及强度的变化除了与风力等气象条件有着密切关系外,还与其途经区域下垫面沙源物质的地理分布和充足程度有着必然的联系^[101](范一大,2002)。在同样的风力条件下,下垫面的性质决定着风沙活动的形成与强度^[102](史培军,2001)。当地表沙源中断时,沙尘暴发展过程中沙尘辐射冷却的正反馈过程就会中断^[100](龚道溢,2001),使得沙尘暴过程减弱或停止。

发生于我国北方的沙尘暴,大多数属于累加型沙尘暴,其过程特点是沙尘浓度先经历一个上升的阶段,达到一定程度时,然后又缓慢下降。在浓度上升的阶段,下垫面需要有充足的沙源物质,主要是沙尘物质积累的过程;浓度下降的阶

段,主要是沙尘物质沉降过程。这两个过程共同实现了沙尘物质的远距离搬运^[101] (范一大, 2002)。

而哪些地区可以成为沙源,不仅取决于该地区所处的地理位置(如干旱半干旱区、沙漠地区等),还与该地区的地表覆盖状况有关^[102] (顾卫, 2002)。从全球尺度透视,沙尘暴主要的源地在北非的撒哈拉沙漠和中亚的戈壁^[103] (Bergam, 1992)。东亚地区的沙源地主要位于中亚和中国西北地区的沙漠以及黄土分布区,这个区域的年沙尘输送量大约在2500万吨上下,两个强输送区分别位于塔克拉玛干沙漠和内蒙古高原^[104-105] (Jie Xuan, 1999, 2000)。我国北方大部分地区因气候干燥、少雨,植被难以生长,下垫面多为裸露,加之长期的风蚀作用,使该地区呈现为戈壁和沙漠景观,约占北方地区总面积的40.5%^[106] (杨东贞, 1998)。著名的四大沙地(呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地和浑善达克沙地)和八大沙漠(库布齐沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、柴达木沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔格和塔克拉玛干沙漠)都分布在这一区域,是沙尘暴发生和发展的永久性存在的沙源。

大面积的沙漠化土地造成我国北方地区沙质地表广布,为沙尘暴的发生和发展提供了丰富的物质来源^[91] (胡金明, 1999)。沙化(沙质荒漠化)是荒漠化的一种重要类型,是以流动沙丘前移入侵、土地风蚀沙化、固定沙丘活化与古沙翻新等一系列风沙活动为主要标志的土地退化过程。

按照联合国环境规划署(UNEP)的分类标准,地球陆地表面的41%为干旱半干旱地区,其中69%的土地已经退化,荒漠化已成为全球性的严重环境问题。我国是世界上受沙化危害严重的国家之一。目前全国荒漠化土地达262万平方公里,占国土面积的27.3%,其中沙化土地为161万平方公里,占全国荒漠化土地面积的61.3%,占国土面积的16%。全国沙化土地主要分布在我国北方广大干旱和半干旱,以及部分半湿润地带。其中,我国北方农牧交错带、草原区、大沙漠的边缘地带是沙化最为严重的地区,风沙活动最为活跃的沙化土地近30万平方公里^[2, 107] (史培军, 2000; 高尚玉, 2000)。

近半个世纪以来,沙化土地扩展速度加快。全国每年土地沙化扩展的速度已从70年代的1560平方公里,增加到80年代的2100平方公里和90年代的2400平方公里。70年代以来,内蒙古阿拉善、新疆塔里木河下游、青海柴达木盆地东南部,

沙化土地的年均扩展速度达4%以上；北方农牧交错带的毛乌素沙地、乌盟后山地区、河北坝上地区，沙化土地的年均扩展速度达8%以上。研究表明(史培军, 2000)：中国风沙灾害加剧是在气候趋于干暖化背景下，沙化土地扩展的结果^[2]。

除了戈壁、沙漠、沙地和沙漠化土地是沙尘暴发生和发展的物质来源以外，退化草地和耕作农田也是我国北方沙尘暴的重要物质来源。地表植被覆盖是影响土壤风力侵蚀的重要因素，对于水域、冰雪和植被覆盖度高的地区，往往不会发生土壤的风力侵蚀^[108] (Soddoway, 1965)。相反，地表裸露，植被稀少，会使得单位面积中有更大面积的土壤暴露从而遭受风的侵蚀^[109] (张国平, 2001)。尤其在冬春季节，由于大面积的耕作农田和退化草地季节性裸露，加之堆放的工业废渣和自然风化的露天矿石，沙尘物质丰富，成为沙尘暴灾害得以加剧的重要物质基础。

此外，城市扩展区域的地表裸土与建筑沙石和弃土提供了就地扬沙的物质来源，也是沙尘暴在沿城市上风方向累加的沙源^[107] (高尚玉, 2000)。

(2) 沙尘暴源地形成与演化。众所周知，沙尘暴源地的形成与演化是自然因素和人为因素共同作用的结果。作用的强度、持续时间和方向性，以及反馈的性质与众多因素有关，主要取决于不同干旱区域的自然条件的特殊性和人类经济活动的特点。以贺兰山为界，以西的极端干旱地区是我国沙漠的主要分布地区，而贺兰山以东的半干旱地区是沙地的主要分布区。

高尚玉等(2000)指出：沙漠和沙地的形成是地球环境长期演变的产物，是干旱与半干旱地区地貌、水文、土壤、植被等多种环境要素相互作用、长期发展的结果，而人为开发活动使得这些要素变得更为复杂^[107]。孙保平(2000)的研究表明：中国干旱、半干旱及亚湿润干旱地区深居大陆腹地，远离海洋，加上纵横交错的山脉，特别是青藏高原的隆起对水汽的阻隔，使得这一地区成为全球同纬度地区降水量最少、蒸发量最大、最为干旱脆弱的环境地带^[110]。朱震达等

(1980)和高尚玉等(2000)从全球变化的角度分析认为：全球气候变暖加剧了气候干燥化，使得我国北方地区持续干旱，加之这一地区地表富含沙性沉积物、植被覆盖度低、大风频发，为沙化土地的扩展创造了重要的环境条件和动力条件

[111, 107]。

大量研究表明^[91, 107, 111]（胡金明，1999；高尚玉，2000；张增祥，2001）：沙尘暴源地形成的人为因素主要是由于不合理的土地利用，以及土地利用的强度增大，使沙漠边缘流沙蔓延，固定沙丘活化和古沙翻新，以及沙质土地风蚀沙化而形成的。其中，粗放的生产方式、对土地资源的不合理使用（滥牧、滥垦、滥伐、滥采、滥樵）和沙区经济活动的逐年加强，造成森林面积减少，大面积植被遭到破坏，草场发生退化，撂荒的沙化土地和流沙地面积增加，使地表大面积失去覆盖，最终导致土地的沙化^[111]（朱震达，1994；叶笃正，2000；史培军，2000；高尚玉，2000；卢琦，2001）。随着现代人口剧增，人类活动的干扰逐渐成为沙化土地扩展的重要促发因素。工农业的快速发展和水资源的不合理利用，使得一些地区水源短缺、地下水超采、地下水位逐年下降和水质恶化，导致生态系统用水短缺，大面积的植被干枯，失去保护地表沙性物质的抗风蚀功能，加快了沙化土地的扩展，以及沙漠边缘沙丘向农田前沿的入侵^[97, 91, 107]（杨东贞，1998；胡金明，1999；高尚玉，2000）。

从现在到将来的很长一段时间，我国北方地区干旱化的趋势不会有根本性的逆转。因此，抑制沙尘暴源地的扩展，需要人类提高自己的环境意识，自觉地把自己的生产和生活活动纳入自然生态环境系统中。

（3）与沙尘暴有关的下垫面因子。近些年来，我国北方地区沙尘暴发生次数的增多和影响范围的扩大，与多种因素驱动下的下垫面性质和状态的改变有关。沙尘暴的形成、加强以及时空分布，受到很多下垫面因素的影响。在这个问题上，不同学科的专家有不同的看法，但共同的看法是下垫面状况是沙尘暴形成和发展的关键因素。综合分析这些研究成果^[66]（Shao Yaping, 2000；张增祥，2001；张国平，2001；顾卫，2002；范一大，2002），得出影响沙尘暴过程的下垫面因子主要包括：植被的组成、结构、覆盖度，土壤的结构、质地、含水量（干燥度）、侵蚀强度、表面粗糙度，土地利用状况，沙漠化状况，地形地貌（如山脉、丘陵、平原、坡度、坡向）等。

这些研究表明，植被覆盖对沙尘暴的影响机理是当植被覆盖度下降时，地表裸露部分增加，植被对表层土壤的保护能力降低。植被覆盖程度越差，表层土壤为强风提供沙尘的可能性（危险性）就越高，即植被覆盖状况的好坏，与沙尘暴发生的频度是有关联的。植被覆盖度作为衡量植被覆盖状况的重要指标，与沙尘

暴日数之间存在着负相关关系,从季节上来看,夏季植被覆盖度与沙尘暴日数的相关关系比春季植被覆盖度要明显,因为夏季覆盖度的状况对第2年春季的植被覆盖产生较大的影响,从而加重沙尘暴的危害或诱发沙尘暴的产生。从地貌类型上看,沙地植被覆盖率与沙尘暴日数的相关关系要强于其他地貌类型区。在同样的气象条件下,沙尘暴途经区域下垫面的土地利用/覆盖状况和植被覆盖度直接影响着沙尘暴的形成与强度变化。

不同粒度的土壤颗粒具有不同的抗剪切力,它直接影响临界风速值的变化,而风速只有超过临界风速值时,才能对土壤进行侵蚀^[112](刘连友,1998)。粘质土壤易形成团粒结构,抗剪切能力增强,相同条件下,沙质土壤的起沙风速大于壤质土壤的起沙速率^[113](Chepil, 1956);砾质结构的土壤和戈壁土壤的风蚀速率小于沙地土壤的侵蚀速率,基岩质地表的供沙率极低,对风蚀的影响不大^[109](张国平,2001)。野外风洞试验和野外观测表明^[114](Gillette, 1980):沙尘粒子起动的摩擦速度与下垫面土壤的特性有着很大关系,对不同的土壤,摩擦速度的变化范围在20~150cm/s之间。不同地表的沙尘颗粒具有不同的起沙风速,土壤颗粒愈粗,起沙风速愈大。流动沙丘在风速达到5m/s时起沙,半固定沙地为7~10m/s、砂砾戈壁为11~17m/s才能起沙扬沙,其起沙量随风速的增大而增加。而且,沙尘的悬浮或跃移高度与风速也有一定关系,风速达到30m/s时,细沙(直径0.125~0.25mm)跃移的高度达到2m,粉沙(直径0.005~0.05mm)漂浮的高度可达到1500km,而粘粒(直径<0.005mm)则可漂浮于整个对流层(史培军,2000;卢琦,2001)。另外,粒径小于12 μm 的微粒可传输到7000km以外的地区,7 μm 则可传输10000km^[115](张宁,1998)。

土壤含水量是影响风力对土壤颗粒搬运的重要因素,土壤含水量减少,土壤干燥度会增加,使得土壤颗粒变得分散,粉尘物质易被风带至空中。

沙尘暴过程还受到地形的影响。沙尘暴在运行过程中,低层气流受地形、地面建筑物、植被的阻滞。高大山体会阻碍气流的移动,使沙尘天气受到抑制或减弱。相反,大风从山口进入平原时会在风口处产生放大效应(狭管效应)。沙尘暴的形成和运行路线与大气环流、大的山体走向有极大关系。

1.3 论文的基本框架

1.3.1 研究目标

主要利用地面气象观测数据和卫星遥感数据,以沙尘灾害的监测模式和形成机制为研究内容,分析我国北方沙尘灾害的时空分异规律,研究沙尘灾害的形成机制。主要研究内容如下:

(1) 利用我国北方的气象观测数据,研究近50年来中国沙尘灾害的时空分异规律和变化趋势;

(2) 基于近20年NOAA/AVHRR时间序列数据,研究我国沙尘暴孕灾区域——中国北方地区的土地利用/覆盖变化特征,分析地表植被覆盖度的时空分异规律、变化强度和变化趋势,进而研究沙尘灾害与土地利用/覆盖(度)变化的对应关系。在以上研究的基础上,探讨区域沙尘灾害的形成机制。

(3) 利用东亚地区($60^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$) 1999-2005年春季1680个地面气象站每3小时的天气现象、能见度、风速等观测数据,运行并调试了沙尘暴数值预报模式,比较了4种不同的起沙方案的优缺点,从而选出了较为符合实际的起沙方案;

(4) 在数值预报模式中,重点对下垫面特征进行充分考虑,分析几个风蚀起沙的影响因子;

(5) 针对以政府为主体的荒漠化治理模式的不足,研究提出引进市场机制,吸引社会力量特别是企业作为荒漠化防治的主体力量的新设想,在未来的荒漠化治理工作中发挥企业为主体的荒漠化治理新措施。

1.3.2 研究思路

根据灾害系统理论,灾害系统是由孕灾环境、承灾体、致灾因子与灾情共同组成具有复杂特性的地球表层异变系统,它是地球表层系统的重要组成部分。自然灾害的灾情是由孕灾环境、致灾因子、承灾体三者之间相互作用所造成的,其程度由孕灾环境的稳定性、致灾因子的风险性及承灾体的脆弱性共同决定(史培军, 1991, 1996a, 2002)。

灾害系统的类型是由组成灾害系统的致灾因子决定的，一般分为三类，即自然灾害、人为灾害（或技术灾害）和环境灾害（或生态灾害）。沙尘暴作为一种典型的灾害类型，具有其特殊性，它不仅是一种自然灾害，而且从人类不合理的经济活动所造成的结果来看，也是一种人为灾害，同时它也是一种环境灾害。沙尘暴的发生、发展、强度和灾情程度同样符合灾害系统的一般规律，与地球表层致灾因子、承灾体和孕灾环境间的相互作用密不可分。

可见，沙尘天气的研究并不是沙尘灾害的研究，只有当沙尘天气造成了人员伤亡和财产损失，即有灾情发生时，才可称为沙尘灾害。以往沙尘天气的研究，实际上是对沙尘灾害形成的一个重要因素——致灾因子的研究，而沙尘灾害的研究却不仅限于此。因此，为了实现论文所提出的研究目标，需要从以往的沙尘天气研究向沙尘灾害研究转变，以探明沙尘灾害的形成机制。

广义的讲，可以将浮尘灾害、扬沙灾害和沙尘暴灾害统称为沙尘灾害。由于沙尘暴灾害是最严重的沙尘灾害，尤其是特强沙尘暴发生时，会对人民生命财产和工农业生产造成巨大的损失，因此，论文中所指沙尘灾害主要以沙尘暴灾害为主。

根据以上论述，作者认为，沙尘灾害是地球表层“天—地—人”相互作用的复杂过程（见图1—4）。“天”指天气系统和气候条件，是沙尘灾害系统中的致灾因子；“地”指下垫面，是沙尘灾害系统中的孕灾环境，对于土壤风蚀而言，它也是承灾体；“人”指人类活动，在沙尘灾害系统中，它既是承灾体，同时也是致灾因子。

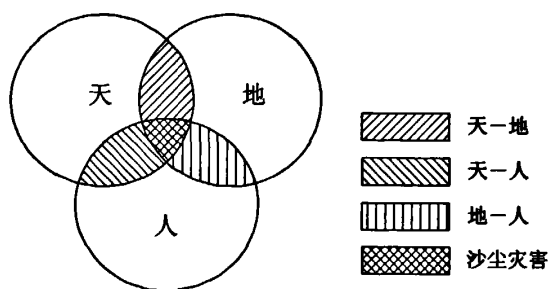


图 1—4 沙尘灾害系统构成

沙尘灾害是“天—地—人”共同作用的产物。“天—地—人”构成的沙尘灾害系统中，两两之间又相互作用、相互反馈，存在着“天—地”、“天—人”和“人—地”三个子系统。“天—地”关系体现了地球系统的自然过程，气候的变化可

以改变地球表层的土地利用/覆盖状况,土地利用/覆盖变化与生态环境安全水平密切相关(史培军,2002a),反过来,土地利用/覆盖变化影响了陆地生态系统的生物多样性、全球地球化学循环和大气中温室气体的含量,改变了区域大气化学性质及过程,对局地、区域及全球气候都产生了广泛而深刻的影响(李晓兵,1999)。近10年来,我国北方深受气候变暖的影响,加速了北方以风蚀沙化为特征的荒漠化过程。“天—人”关系表明人类活动同样受到天气、气候条件的制约,从人类活动所造成的结果来看,人类活动同样影响着区域乃至全球气候的变化。

“人—地”关系指人类活动与自然环境的关系,自古以来就有“人地相关”的辨证思想。自然环境始终影响着人类及其活动,人类活动对自然环境的影响突出的表现在对自然生态系统的结构和功能的影响。随着科学技术的发展和人口的增加,人类影响自然的能力愈来愈大,主要体现在土地利用的方式和强度方面,如果人地关系协调,有利于生态安全,否则,则导致生态环境恶化,引发灾害并使灾害加重。可见,研究沙尘灾害,必须从“天”、“地”、“人”三方面入手,研究和分析它们之间导致沙尘灾害的复杂的相互作用机制,从而为揭示沙尘灾害的形成机制奠定基础。

1.3.3 论文框架

基础上述思想,确定论文框架如图1—5。论文以我国北方沙尘灾害的形成过程为例,对沙尘灾害的分布规律、形成机制和预报模式以及人类活动对沙尘灾害(沙漠化)进行了系统的研究。论文第一章综述了国内外沙尘灾害的研究进展;第二章研究了中国沙尘暴地时空分布和变化趋势,分析了土地利用/覆盖变化与沙尘灾害的关系;第三章探讨了沙尘灾害的形成机制;第四章研究沙尘天气数值预报模式,对比分了四种起沙模式。第五章分析了风蚀起沙的影响因子;第六章分析了人类活动对沙尘灾害(沙漠化)的影响,提出了沙尘灾害的防御措施。第七章给出了论文的主要研究结论,并就如何面对我国北方强沙尘暴天气频繁发生的现状提出了科学的建议。

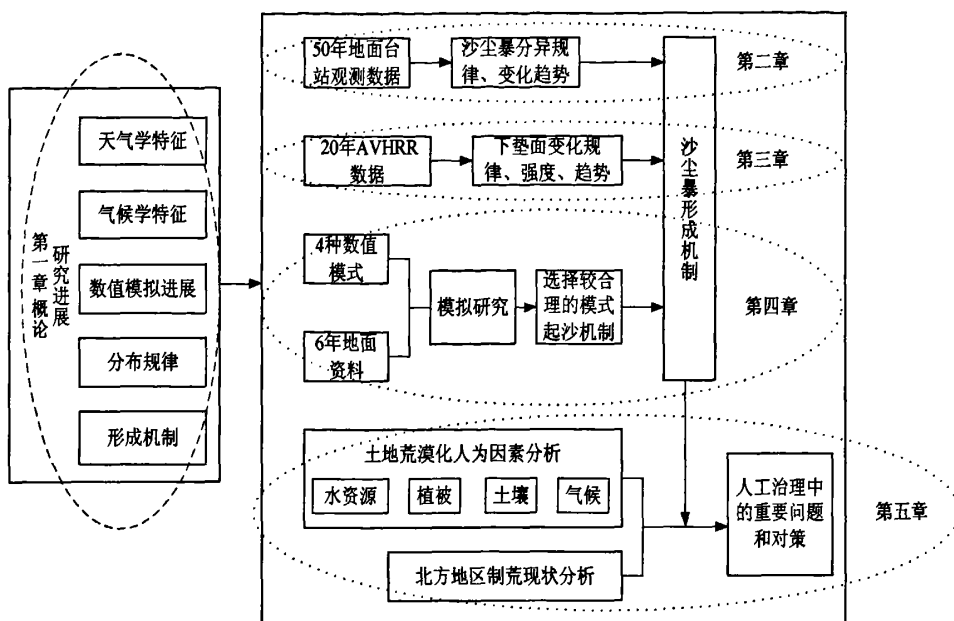


图 1—5 论文研究框架

参考文献

- [1] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题, 大气科学, 2003, 27(4): 591—603
- [2] 史培军, 张宏, 王平等, 我国沙区防沙治沙的区域模式, 自然灾害学报, 2000, (3): 1—7
- [3] 王式功, 董光荣, 陈惠忠等, 沙尘暴研究的进展, 中国沙漠, 2000, 4: 349—356
- [4] 中国气象局, 地面气象观测规范, 北京: 气象出版社, 1979
- [5] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远等, 关于我国华北沙尘暴天气的成因与治理对策, 地理学报, 2000, 55(5): 513—521
- [6] 牛若芸, 田翠英, 毕宝贵, 杨克明, 王友恒, 沙尘暴天气等级, 气象标准汇编 2005—2006, 北京: 气象出版社, 2008, 25—31
- [7] Joseph P V, Raipal D K, Deka S N. “Andhi”, the convective dust storms of Northwest India. Mausam, 1980, 31: 431—442
- [8] Wolfson N, Matson M. Satellite observations of a phantom in the desert, Weather, 1986, 41(2): 57—60
- [9] 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

- [10] 夏训诚, 黑风暴, 北京: 科学出版社, 1995
- [11] 张增祥, 周全斌, 刘斌等, 中国北方沙尘灾害特点及其下垫面状况的遥感监测, 遥感学报, 2001, 5 (5): 377—382
- [12] Hallkin EH. On dust raising wind sad descending our rents. J. India. Met. Memoirs, 1921, 22:PartVI
- [13] Sutton L. J. Haboobs. Quarteriy Jounal of the Royal Meteorological Society. 1925, 51:25-30
- [14] Idsos. B. , Ingram R. S. , Pritchard J. , An Amerioan Haboob, Bull. AMS. , 1972, 50, 930-935
- [15] Brazel A. J. , Nicking W. C. , The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona, J Climatology, 1986, 6(3):255-275
- [16] Monaughton D. L. , Possibl connection between anomalous antcyclones and sandstoms, Weather, 1987, 42(1):8-13
- [17] Jauregui E. , The dust storms of Mexico City, International Journal of Climatology, 1989, 9(2) :169-180
- [18] Littmann T. ,Dust storm frequency in Asia:Climatc control and variability, Intemational Journal of Climatology, 1991, 11:393-412
- [19] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4. 22”特大沙暴分析, 气象学报, 1979, 37(4):26—35
- [20] 高风荣, 李云. 甘肃河西“5. 19”黑风分析, 甘肃气象, 1989, 7(1):13—17
- [21] 陈敏连, 郭清台, 徐建芬, 等. 黑风暴天气的研究和探讨, 甘肃气象, 1993, 11(3):11(3):16-27
- [22] 刘树华, 刘新民, 李金贵. 我国西北地区一次特大沙尘暴的初步分析, 北京大学学报(自然科学版), 1994, 30(5):583—588
- [23] 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
- [24] 徐建芬, 牛志敏, 陈伟民, 等. 我国西北地区 4. 5 沙尘暴天气研究, 中国沙漠, 1996, 16(3):281—286
- [25] 钱正安, 胡隐樵, 龚乃虎, 等. “93. 5. 5”特强沙尘暴的调查报告及其分析.
- [26] 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, 27(6):22·26
- [27] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛, 等. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究, 2003, 61(5):606—620
- [28] 陈豫英, 赵广平. 两次典型强沙尘暴过程的对比分析, 气象, 2003, 29(9):18—22

- [29] 王可丽, 江颢, 吴虹. 2001 年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构分析, 高原气象, 2002, 21(3):303 — 308
- [30] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气学系统分型研究, 高原气象, 2004, 23(4):540 — 547
- [31] 江吉喜, 项续康, 王子厚, 等. 以卫星资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探, 见: 方宗义编, 中国沙尘暴研究, 北京:气象出版社, 1997, 98 — 102
- [32] 胡隐樵, 光田宇. 强沙尘暴发展与干飚线—黑风暴形成的一个机理分析, 高原气象, 1996, 15(2):175 — 155
- [33] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(口辑), 加 02, 32(4):327 — 334
- [34] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析, 气候与环境研究, 2004, 9(12):139 — 154
- [35] 雷航, 林朝辉, 孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验. 气候与环境研究, 2005, 10(3):669 — 653
- [36] 范一大, 史培军, 罗敬宁. 沙尘暴卫星遥感研究进展, 地球科学进展, 2003, 18(3):367 — 373
- [37] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 赵思雄, 方宗义等著, 千里黄云—东亚沙尘暴研究, 北京:科学出版社, 2006, VII
- [38] Yang D. Z., A case study on sandstorms. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 5(2):150 — 155
- [39] 徐希慧. 塔里木盆地沙尘暴的卫星云图分析与研究, 见:方宗义编, 中国沙尘暴研究, 北京:气象出版社, 1997:8801
- [40] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析, 应用气象学报, 1995, 6(2):177-184
- [41] 方宗义, 张运刚, 郑新江, 等. 用气象卫星遥感监测沙尘的方法和初步结果, 第四纪研究, 2001, 21(一):48 — 55
- [42] 范一大, 史培军, 潘耀忠, 等. 基于 NOAA/AVHRR 卫数据的区域沙尘暴强度监测, 自然灾害学报, 2001, 10(4):46 — 51
- [43] 郑新江, 陆文杰, 罗敬宁, 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究, 遥感学报, 2001, 5(4):300 — 305
- [44] 延昊, 侯英雨, 刘桂清, 等. 利用热红外温差识别沙尘, 遥感学报, 2004, 8(5):471 — 474
- [45] 郭妮, 倾继祖. NOAA 卫星沙尘暴光谱特征分析及信息提取研究, 高原气象, 2004, 23(5):643 — 647
- [46] 高庆先, 任阵海, 李占青, 等. 利用 EP/TOMS 遥感资料分析我国上空沙尘天气过程,

- 环境科学研究, 2005, 18(4):96—101
- [47] 韩涛, 李耀辉, 郭泥. 基于 Eos/MODIs 资料的沙尘遥感监测模型研究, 高原气象, 2005, 24(5):757—764
- [48] 张仁健, 韩志伟, 王明星等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. 第四纪研究, 2002, 22(4):374—380
- [49] 康杜娟, 王会军. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化. 中国科学(辑), 2005, 35(11):1096—1102
- [50] 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析, 气象学报, 2003, 61(6):744-750
- [51] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征, 地理学报, 2003, 58(2):193—200
- [52] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析, 中国沙漠, 2002, 22(2):106—111
- [53] 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
- [54] 周自江, 王锡稳, 牛若芸, 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究, 应用气象学报, 2002, 13(2):193—200
- [55] 周自江, 章国才. 中国北方典型的强沙尘暴事件(1954—2002 年), 科学通报, 2003, 48(11):1224—1228
- [56] 尚可政, 孙黎辉, 王式功, 等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析, 中国沙漠, 1998, 18(3):239—2430
- [57] 徐建芬, 狄潇私, 李耀辉. 西北地区沙尘暴天气概念模型及分类, 西北地区重要天气成因及预报方法研究(陈晓光等主编), 北京:气象出版社, 2002, 129—136
- [58] Schutz L. Saharan Dust Transport in the NE—Trade Wind Region Over the North Atlantic ocean. In:Proc. Sym. Radiation. 1977, 1: 68—70
- [59] Berkofsky L. A heuristic investigation to evaluate the feasibility of developing a desert dust prediction model. Mon Wea Rcv., 1982, 110: 2055—2062
- [60] Westphal, Toon O B, Carlson T N. A two—dimension numerical investigation of the dynamics and micro—physics of Saharan dust storms. Journal of Geophysical Research. 1987, 92:3027-3049
- [61] Westphal, Toon O B, Carlson T N. A case study of mobilization and transport of Saharan dust Journal of Atmospheric Science. 1988, 45:2145-2175
- [62] Joussaume S., Three—dimensional simulations Of the atmospheric cycle of desert dust Particles using a general circulation model, J. Geophys. Res., 1990,

95:1909 — 1941

- [63] Cautenet G., Thermal impact of sallaran dust over land. Part I: simulation. J. Appl. Meteor., 1992, 166-180
- [64] Tegen I., Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Source, transport, and optical thickness. J. geophys. Res., 1994, 99:22897 — 22914
- [65] slobldam N, Srdjan. A model for long — range transport of dcsert dust — Monthly weather Revicw, 1996, 2537-2544
- [66] Shao ya Ping. A model for mineral dust enission, J. Geophys. Res. 2001, 106(D17):20239-20254
- [67] Nickovic S, George K, Anastasios P. et al. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. J Geophys Ros. 2001, 106:18113 — 18129
- [68] 申绍华, 陈受钧. 沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟, 气象学报, 1993, 51(3):283 — 294
- [69] 程麟生, 马艳. “93.5” 黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验, 应用气象学报, 1996, 7(4):386 — 395
- [70] 陈伟民, 王强, 牛志敏, 等. 中国西北部 “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
- [71] 宋振鑫, 程麟生. “93.5” 黑风暴扰动能源的诊断分析, 兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(4):116 — 122
- [72] 纪飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴的数值模拟(I) 模式建立. 北京大学报(自然科学版), 1996, 32(3):384 — 392
- [73] 刘春涛, 程麟生. 黑风暴沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验, 气象学报, 1997, 55(6):726 — 738
- [74] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计, 大气科学, 1998, 22(4):625 — 637
- [75] 刘毅, 任丽新, 周乐义, 等. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究, 大气科学, 1998, 22(6):905 — 912
- [76] 王炜, 宋振鑫, 邵亚平, 等. 沙尘暴天气数值预报系统及其预报效果检验, 气象科技, 2005, 33(1):25 — 310
- [77] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究, 气象与环境研究, 2002, 7(3):279 — 294
- [78] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验, 气候与环境研究, 2003, 8(2):125 — 142
- [79] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴, 等. “4.12” 沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析, 高原气

- 象, 2004, 23(1), 89—96
- [80] 张小曳主编. 亚洲沙尘暴及其数值预报系统. 北京: 气象出版社, 2006, II
- [81] 李耀辉, 赵建华, 薛纪善, 等. 基于 GRPAES 的西北地区沙尘暴数值预报模式及其应用研究, 地球科学进展, 2005, 20(9): 999—1011
- [82] Pye K. Aolian dust and dust deposits. London: Academic Press Inc Ltd, 1987. 113-126
- [83] 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
- [84] 钱正安, 焦彦军. 中、美和苏丹强沙尘暴的对比分析, 甘肃气象, 1997, 15(1): 1-5
- [85] 王式功, 金炯, 我国西北地区沙尘暴时空分布及其成因分析, 北京: 中国科学技术出版社, 1995, 364-370
- [86] 董治宝, 王式功, 王金艳, 周自江等, 中国沙尘天气的区域特征, 地理学报, 2003, 58(2): 193—200
- [87] 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
- [88] 全林生, 时少英, 朱亚芬等, 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因, 地理学报, 2001, 56(4): 477—485
- [89] 王式功, 董光荣, 陈惠忠等, 沙尘暴研究的进展, 中国沙漠, 2000, 4: 349-356
- [90] 夏训诚, 杨根生, 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
- [91] 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, 自然灾害学报, 1999, 8(4): 49—56
- [92] 卢琦, 杨有林, 全球沙尘暴警世录, 北京: 中国环境科学出版社, 2001, 209—206
- [93] LaDochy S, Annett C H. Drought and dust: a study in Canada's Prairie Provinces. Atmospheric Environment 1982, 16(6): 1535-1541
- [94] Hurt R D. The dust bowl: an agricultural and social history. Nelson-hall, Inc, 1987
- [95] 朱福康, 江吉喜, 征新江等, 沙尘暴天气研究现状和未来, 气象科技, 1999, 4: 1—8
- [96] 何清, 赵景峰, 塔里木盆地浮尘时空分布及对环境的影响研究, 中国沙漠, 1997, 17(2): 119—126
- [97] 杨东贞, 房秀梅, 李兴生, 我国北方沙尘暴变化趋势的分析, 应用气象学报, 1998, 9(3): 352—358
- [98] 张钦仁, 西北地区“黑风”成因及预报方法探讨, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 70—74
- [99] 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, 5: 581—589

- [100] 龚道溢, 史培军, 华北农牧交错带夏季江水变率及其与前期下垫面热力状况的关系, 自然资源学报, 2001, 16 (3): 211-215
- [101] 范一大, 史培军, 王秀山, 潘耀忠, 中国北方典型沙尘暴的遥感分析, 地球科学进展, 2002, 17 (2): 289-294
- [102] 顾卫, 蔡雪鹏, 谢峰等, 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨—以内蒙古中西部地区为例, 地球科学进展, 2002, 17(2): 273—277
- [103] Bergam etti G. Encyclopedia of Earth System Science, San Diego: Academic Press, 1992, 171-192
- [104] Jie Xuan. Dust emission factors for environment of Northern China. Atmospheric Environment, 1999, 33: 1767-1776
- [105] Jie Xuan, Guoliang Liu, et al. Dust emission inventory in Northern China. Atmospheric Environment, 2000, 34: 4565-4570
- [106] 杨东贞, 房秀梅, 李兴生, 我国北方沙尘暴变化趋势的分析, 应用气象学报, 1998, 9 (3): 352-358。
- [107] 高尚玉, 史培军, 哈斯等, 我国北方风沙灾害加剧的成因及沙化过程的中长期发展趋势, 自然灾害学报, 2000, 9 (3): 31—37
- [108] Soddoway F H, Chepil W S and Armbrust D V. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control, Transactions of the ASAE, 1965, 8(3): 327-331
- [109] 张国平, 张增祥, 赵晓丽, 等. 2000 年华北沙尘天气遥感监测, 遥感学报, 2001, 5(6): 466—471
- [110] 孙保平, 荒漠化防治工程学, 北京: 中国林业出版社, 2000
- [111] 朱震达, 吴正, 刘恕, 中国沙漠概论 (修订版), 北京: 科学出版社, 1980
- [112] 刘连友, 王建华, 李小雁等, 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定, 科学通报, 1998, 43 (15): 1663—1666
- [113] Chepil W. S., influence of moisture on erodibility of soil by wind. Soil Sci., Sociely American proceedings, 1956, 20, 288-292
- [114] Gillette D. A., Adams J., Endo A. et al, Threshold velocities for Inpu of soils particles in the air by desert soils, Joumal of Geophysical Reseach, 1980, 85(c15): 5621 — 5630
- [115] 张宁, 黄维, 陆荫等, 沙尘暴沉降状况研究, 中国沙漠, 1998, 18 (1): 32—37

第二章 中国北方沙尘暴的时空分布和变化趋势分析

本章首先在地理信息系统技术支持下,分别以多年的年、月平均为指标,全面分析了我国沙尘暴发生的时空分布格局、影响范围、年内发生特征等,重建了50年来中国沙尘暴的空间分异格局和季相变化规律,并对全国受沙尘暴影响严重的省市的沙尘强度、特征等进行了定量分析。然后,以沙尘暴出现日数为定量指标,分析了我国北方沙尘暴近40年的变化趋势。

2.1 近50年来中国北方沙尘暴时空分布及季相差异

2.1.1 数据来源与研究方法

2.1.1.1 沙尘暴数据

沙尘暴数据来源于中国气象局,时间为1951-2000年,数据内容为多年平均的每月沙尘暴发生日数资料,所统计的沙尘暴日数是严格按照我国气象观测规范所定义的沙尘暴等级标准得出的,共涉及396个气象站点(如图2-1)。

对沙尘暴数据进行精度验证,剔除不可替代的错误数据后,研究中实际使用了380个站点的资料。为了研究和分析沙尘暴的空间分布格局,选取指标如下:

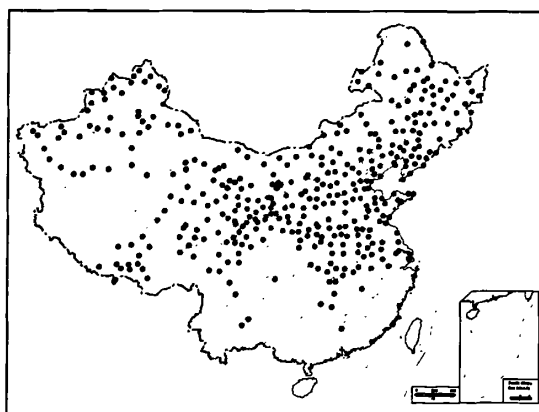


图 2-1 沙尘暴观测站点分布图

(1) 多年平均年指标:

$$Y \max_i = \max\{YD_{ij}\} \quad (2-1)$$

$$Y \min_i = \min\{YD_{ij}\} \quad (2-2)$$

$$Ymean_i = mean\{YD_{ij}\} \quad (2-3)$$

其中, $i=1, 2, \dots, 380$, 表示站点号; $j=1951, 1952, \dots, 2000$, 表示统计数据年代。 YD_{ij} 表示站点*i*第*j*年的沙尘暴日数; $Ymax_i$ 、 $Ymin_i$ 和 $Ymean_i$ 分别表示站点*i*沙尘暴发生的年最大、最小和平均日数。

(2) 多年平均月指标:

$$Mmean_{ij} = mean\{MD_{kj}^i\} \quad (2-4)$$

其中, $i=1, 2, \dots, 380$, 表示站点号; $j=1, 2, \dots, 12$, 表示月; $k=1951, 1952, \dots, 2000$, 表示统计数据年代。 $Mmean_{ij}$ 表示站点*i*第*j*月的沙尘暴多年月平均日数; MD_{kj}^i 表示站点*i*在*k*年*j*月的沙尘暴日数。

2.1.1.2 下垫面数据

(1) 1:100万数字高程模型(DEM), 空间分辨率 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。资料来源: 美国地球资源观测系统(Earth Resource Observation System)数据中心。

(2) 1:100万中国沙漠分布图。资料来源: 1:100万中国沙漠分布图, 在Arc/Info8.0支持下数字化。

(3) 1:400万中国省界行政区划数字化地图, 资料来源: 国家地理信息系统重点实验室。

上述空间数据都经过严格的几何校正、配准、投影变换处理, 选取的投影方式为: 等角割圆锥等积投影。投影主要参数, 第一条纬线: 北纬25度; 第二条纬线: 北纬47度; 中央经线: 东经110度; 起始投影纬线: 北纬10度。

2.1.1.3 数据处理方法

传统的气候指标空间格局的分析方法是将以离散点形式存在的气候站点指标进行空间插值, 直接生成等值线图, 或者生成一定栅格大小、一定行列数的等值栅格图像, 较著名的是最优化的Kriging方法(Oliver, 1990)。这种方法有两个必要条件: 一是有足够多的站点数据; 二是数据之间有较强的关联性。在进行地理问题研究中, 这种方法的缺点是只考虑了离散点的信息, 而忽略了地理现象本

身的区域和地带性特征之间的联系，尤其是下垫面对象本身的影响，所生成的空间趋势和实际情况有较大的偏离。

为了更准确寻求反映中国沙尘暴多年平均年、月的空间格局最优方案，进而分析沙尘暴在不同区域的强度分布，以及相应的影响程度，在实施沙尘暴数据空间差值时，对Kriging方法进行了一些改进，即在差值过程中考虑了沙尘暴发生、发展和演化等过程受地形、地貌的控制影响因素。具体方法是，依据地形条件，借助1:100万数字高程图（DEM），在地理信息系统的支持下，对各观测站点之间的数据关联性，限定了两个基本规则：

规则1：站点之间的距离采用DEM模型中的实际坡面距离，而非一般的直线距离；

规则2：如果两个站点之间存在大的地形地貌单元（绝对高程大于1000米），则认为两者之间的数据无关联性。

技术路线如图2-2。

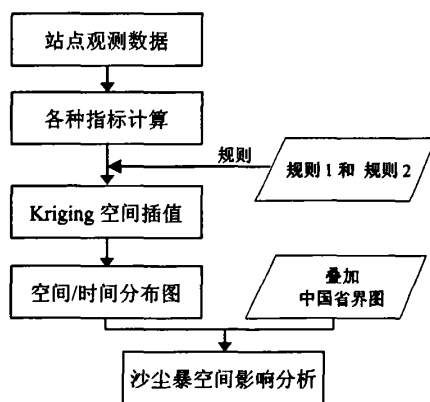


图 2-2 数据处理技术路线

2.1.2 沙尘暴时空分布格局及其季节差异

2.1.2.1 沙尘暴年日数空间格局

根据以上技术路线，对全国380个站点纪录的沙尘暴发生日数数据进行了处理，在叠加DEM数据、等值线数据、中国省行政边界数据后，分别生成了年最大

日数、年最小日数、年平均日数空间分布图,并与1:100万中国沙漠分布图进行比较,详见图2-3。

从图2-3可以看出,西北是我国沙尘暴的主要分布区,沙尘暴空间格局总体呈东北-西南走向。最大、最小和平均日数空间分布范围基本一致,只是严重程度有所不同。按10日均线划分,在全国存在两个多发地区:一是河西走廊、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地、浑善达克沙地及其周边地区,尤其是紧靠腾格里沙漠的甘肃民勤和宁夏盐池出现了2个极大值;二是塔克拉玛干大沙漠和柴达木盆地及其周边地区,尤其是塔克拉玛干沙漠西南沿的和田地区,是沙尘暴发生日数的高值区,一直延伸到青藏高原西南部分。两个多发极值超过20日,最大值达到年60—70日,最小值也在5—10日以上。另外,除两个多发区以外,在内蒙的科尔沁沙地及相邻地区,也存在一个相对多发区,均值在5—10日,最大值达到15—20日。

比较沙尘暴源地与沙地的空间分布可以发现,沙尘暴多发地区基本上与沙漠、沙地的分布有较好的一致性,呈现出以源地为中心向四周蔓延的趋势。这说明沙尘暴的发生、发展与强度变化受下垫面状况的影响较强。在沙尘暴影响较少的地区,主要指1日均线以下的地区,可以看出:良好的植被覆盖、充足的土壤水分、地形因素对沙尘暴有明显的阻挡和抑制作用。可见,为了从机理上解释沙尘暴的空间分布,应加强沙尘暴时间过程与下垫面景观格局之间关系的定量研究工作。

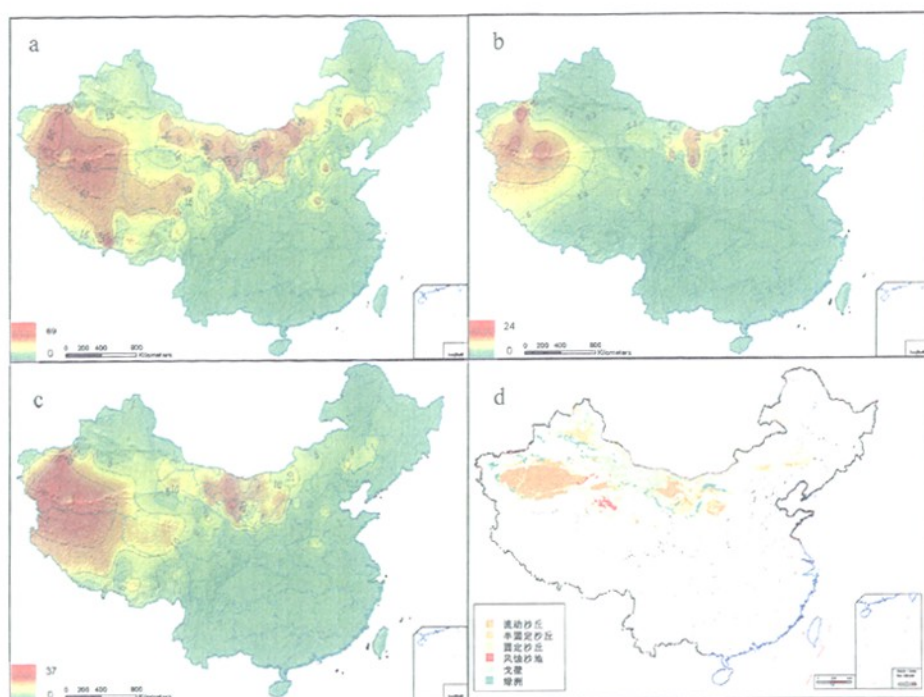


图 2-3 中国沙尘暴年日数空间分布图 (1951~2000) 及沙漠分布图

(a)年最大日数 (b)年最小日数 (c) 年平均日数 (d)中国沙漠分布

2.1.2.2 沙尘暴多年月平均日数空间格局及其变化规律

用同样方法,以各站点多年沙尘暴月平均数据为数据源,生成了我国50年来沙尘暴月季空间和强度变化分布图(如图2-4),图中分别给出了12个月的沙尘暴空间强度分布图,根据图例由白到黑分别表示沙尘暴月平均发生日数由少于1日过渡到7日。据此,可以从空间上掌握我国沙尘暴月季分布格局和强度变化规律。

分析图2-4得出50年来我国沙尘暴月季变化有以下特点:

(1) 我国北方大部分地区几乎全年都受到沙尘暴的侵袭,其中3月到6月最为严重,1月到2月次之,8月到12月最弱,其中10月份几乎没有沙尘暴发生;

(2) 不同月份强度中心有所不同,全年从1月份开始,西藏北部、青海南部和内蒙西部较强,2月份的强中心集中在西藏和青海南部,3月到4月北方大部分地区都强烈受到侵袭,这一时段全国沙尘暴分布范围最广,西藏、青海已减弱,强中心转移到南疆南部和内蒙中西部地区;5月到6月,全国大部分地区强度都小

于4月,强中心集中出现在南疆地区,且出现了多年月平均的最高值,达到多年月平均7日;7月到8月,强中心仍在南疆地区,内蒙西部还有零星表现,但强度都已很弱,每月日数平均在2次以下;9月到10月,全国大部很少受到沙尘暴的影响;11月—12月青海西南部、西藏东北部地区有逐渐增强的趋向,预示着下一次循环的开始;

3) 比较图2—3,可以得出,沙尘暴频发区域位于我国西北地区,并相对集中分布在新疆南部、西藏北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。且从2月—6月强中心交替出现。

我国北方沙尘暴的空间和强度变化分布呈现明显的季节性。沙尘暴发生的季节主要集中在春季,这是因为这一季节是我国北方地区冷锋活动的频繁季节,主要受到蒙古气旋、东北气旋和黄河气旋的影响,这为沙尘暴的发生创造了有利的动力条件;同时这一时期,我国北方大部分地区气候干燥、少雨,地表植被覆盖度低,下垫面多为裸露,加之著名的四大沙地(呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地和浑善达克沙地)和八大沙漠(库不提沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、柴达木沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔和塔克拉玛干沙漠)以及土地荒漠化都分布在这一区域,为沙尘暴发生和发展提供了丰富的物质基础。随着北方雨季的到来,地表植被覆盖度的改善,沙尘暴在空间上和强度上都有减少的趋势,可见,植被覆盖状况的好坏,与沙尘暴发生的频度有着密切关系。

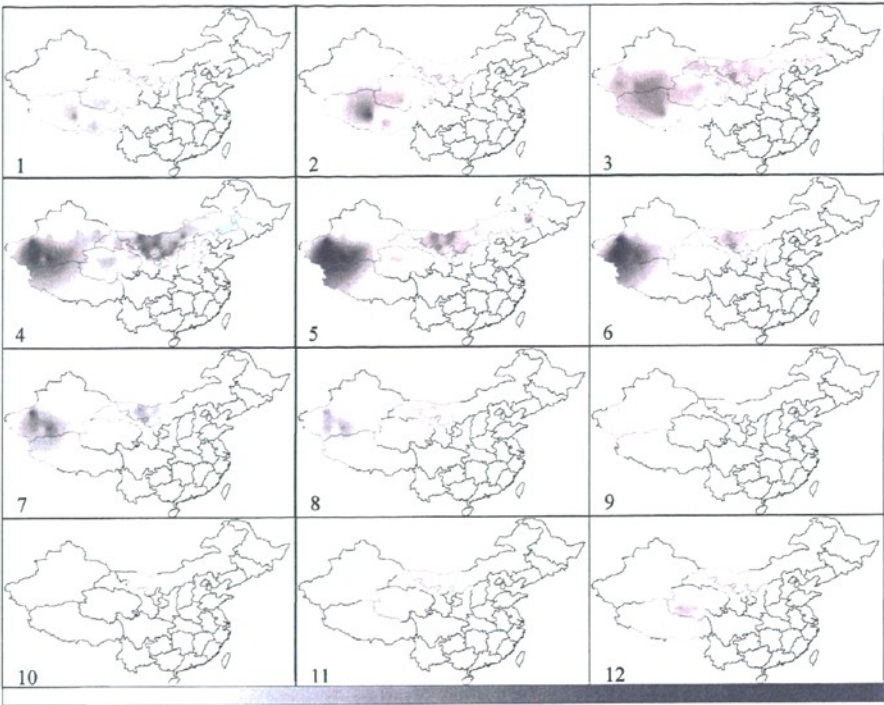


图 2—4 沙尘暴多年月平均日数空间分布图(1951~2000)

2.1.2.3 沙尘暴年内动态变化特征

研究中涉及到的380个气象站点数据中,年平均沙尘暴发生日数大于1日的站点达213个,占总数的56.1%,集中在全国14个省(直辖市、自治区)。结合前人研究成果(胡金明,1999;邱新法,2001),进一步将沙尘暴的影响按年平均发生日数分为五个等级,即极重(大于20日)、重度(10—20日)、中度(5—10日)、轻度(1—5日)和无灾(小于1日)。

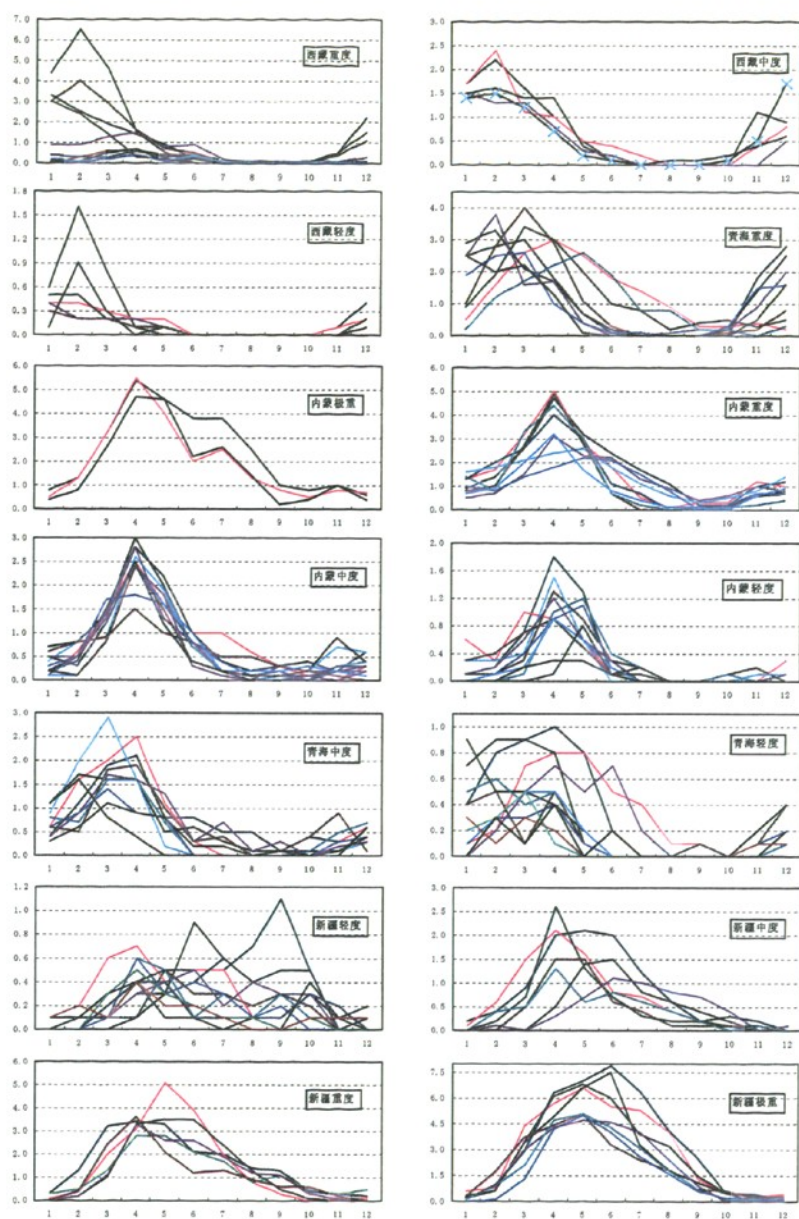


图 2-5 沙尘暴年内时间分布特征(1951~2000)

按上述五个等级对213个站点沙尘暴年内强度变化进行曲线分析发现, 全国沙尘暴易发时间在不同的强中心有一定的差异, 但总体可认为以春季为主, 大部分集中在2月到6月, 这与一般按沙尘暴发生次数的统计结果集中在3月到5月略有

不同(张晓龙, 2001; 邱新法, 2001; 钱正安, 2002)。图2-5是年内变化最有代表性的西藏、青海、内蒙和新疆四个省的监测站点不同等级的年内变化曲线。

进一步分析图2-5, 可以看出: 过去50年中, 根据月平均最大日数峰值年内出现的时间不同, 十分明显的可将中国沙尘暴按年内变化趋势分为三种类型, 即: 西藏型, 月平均最大日数峰值出现在2月, 以申扎、泽当、江孜等站为典型代表, 主要在西藏东南偏中部, 变化特点是2月最高, 4月以后急剧下降, 5—10月几乎很少发生, 11月开始上升; 内蒙型(全国大部均属此类), 峰值出现在4月, 以内蒙的额济纳旗、阿拉善左旗, 甘肃的民勤、张掖、金塔、鼎新, 宁夏的同心、盐池为代表, 主要在内蒙中西部、甘肃、宁夏一带, 变化特点是4月最高, 7月开始下降, 次年2月开始上升; 新疆型, 峰值出现在5—6月, 以民丰、和田、且末为代表, 主要出现在南疆沿青藏高原一带, 变化特点是5—6月最高, 9月开始下降, 全年只有10—12月不受沙尘暴的影响。此外, 青海作为三种类型的过渡地带特点突出, 重度地区是西藏型和内蒙型的过渡带, 峰值由2月向3月过渡, 主要在南部靠近西藏一侧; 中轻度地区是内蒙型和新疆型的过渡带, 峰值由4月向5月过渡, 主要在西北部靠近新疆一侧。

2.1.2.4 全国主要省市区沙尘暴平均强度比较分析

为了分析全国受沙尘暴影响的主要省(区、市)受灾程度的情况, 将全国1951~2000年沙尘暴年平均日数空间分布图(图2-3c)按上述分级标准划分为5级, 并在Arc/Info支持下与中国省行政边界空间叠加, 得到全国受沙尘暴影响的主要省(区、市)强度比例图(见图2-6)和受沙尘暴影响强度比例分析表(见表2-1)。

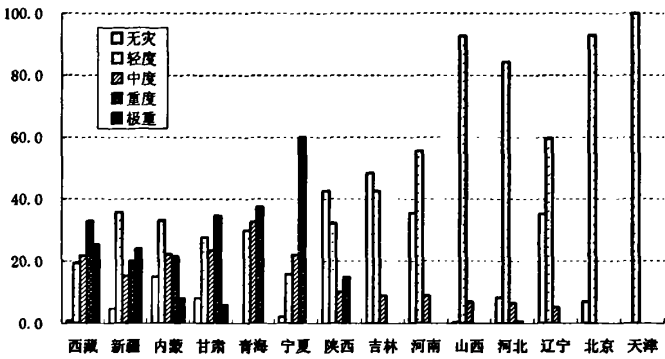


图 2-6 全国主要省市受沙尘暴影响强度比例

表 2-1 全国主要省市受沙尘暴影响强度比例分析表

省名	无灾		轻度		中度		重度		极重		受灾合计	
	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²
西藏	0.8	1.0	19.3	23.3	21.8	26.3	32.8	39.6	25.3	30.5	99.2	119.7
新疆	4.8	7.9	35.8	58.4	15.4	25.1	20.0	32.7	23.9	39.1	95.6	155.3
内蒙	15.0	17.2	33.1	37.9	22.2	25.4	21.5	24.7	8.2	9.4	85.0	97.4
甘肃	8.2	3.3	27.7	11.2	23.4	9.5	34.6	14.0	6.1	2.5	91.8	37.2
青海	0.0	0.0	30.0	21.5	32.7	23.4	37.4	26.8	0.0	0.0	100.0	71.7
宁夏	2.2	0.1	15.8	0.8	22.1	1.1	60.0	3.0	0.0	0.0	97.8	4.9
陕西	42.6	8.8	32.2	6.6	10.2	2.1	14.9	3.1	0.0	0.0	57.4	11.8
吉林	48.5	9.3	42.6	8.1	9.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	51.5	9.8
河南	35.5	5.9	55.5	9.2	8.9	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5	10.7
山西	0.4	0.1	92.7	14.6	7.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	99.6	15.7
河北	8.3	1.6	84.3	15.7	6.5	1.2	0.8	0.2	0.0	0.0	92.7	17.1
辽宁	35.2	5.1	59.7	8.6	5.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	64.8	9.3
北京	7.0	0.1	93.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.0	1.5
天津	0.0	0.0	100.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.2
总计	9.7	60.4	34.9	218.6	19.1	119.1	23.1	144.1	13.1	81.5	90.4	563.3

分析表2-1和图2-6可以看出：

(1) 全国受沙尘暴影响较为严重的共14个省（直辖市、自治区），总面积624万平方公里，占我国国土面积的65%，其中90%以上地区平均每年都会受到1次沙尘暴的侵袭。极重区81.5万平方公里（13.1%）、重度区144.1万平方公里（23.1%）、中度区119.1万平方公里（19.1%）、轻度区218.6万平方公里（34.9%）。

(2) 全国可划分为三种类型, 即重灾区, 包括: 西藏、新疆、内蒙、甘肃、青海和宁夏; 轻灾区, 包括: 吉林、河南、山西、河北、辽宁、北京和天津; 无灾区。

(3) 重灾区影响面积不一定是全省范围, 但受灾区主要分布在中度以上的超过50%, 其中尤以西藏、新疆、内蒙、甘肃最为典型; 轻灾区有的分布面积很大, 但主要为轻度影响, 如: 山西(99.6%)、河北(92.7%)、北京(93.0%)和天津(100%)。

2.2 中国北方沙尘暴变化趋势分析

人们更关心沙尘暴过去的变化和未来的变化趋势, 但在已有的研究中, 由于大多数局限于沙尘暴的个例分析或小范围有限代表站点的分析, 因此对我国沙尘暴天气长期变化趋势的认识目前尚存在较大分歧。有人认为是以增加为主, 也有人认为是以减少为主, 研究的区域和范围不同, 得出的结论也不尽相同。鉴于此, 本章选取了1963—1998年中国北方117个气象站点的观测数据, 以沙尘暴出现日数为定量指标, 分析了我国北方沙尘暴近40年的变化趋势。

2.2.1 数据处理方法

选取了1963—1998年中国北方117个气象站点的观测数据, 以沙尘暴出现年日数为定量指标, 首先分别求取每个站点年沙尘暴日数与年份的Pearson相关系数(R), 相关系数可以反映站点多年沙尘暴的变化趋势, 相关系数高说明趋势比较明显。计算方法如公式(2-5):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}} \quad (2-5)$$

其中, X_i 表示站点在第*i*年的沙尘暴日数, $\bar{X}$ 、 $\bar{i}$ 分别表示沙尘暴日数和年的多年平均值。

对每一站点1963—1998年的沙尘暴年日数序列分别用最小二乘法求取线性拟合趋势。假设回归方程形如2-6式

$$y = a + bx \quad (2-6)$$

则回归系数 a 、 b 及相关性检验的计算步骤为:

(1) 相关系数计算

$$b = \frac{l_{xy}}{l_{xx}}, \quad a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2-7)$$

其中:

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2-8)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2-9)$$

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2-10)$$

以上 x 表示年, y 表示年沙尘暴年日数。

(2) F 值的计算

$$F = \frac{U}{Q}(n-2) \quad (2-11)$$

其中:

$$U = b^2 l_{xx}, \quad Q = l_{yy} - U \quad (2-12)$$

由于是36年的沙尘暴数据, 经查表知: 当 $F > 4.17$ 时, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下存在线性关系; 当 $F > 7.56$ 时, 在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下存在线性关系, 属高度显著。

2.2.2 结果与分析

计算结果如表2-2, 表中只列出了117气象站点中通过了 $\alpha = 0.05$ 置信度检验的气象站点, 共78个。其中有64个站通过了 $\alpha = 0.01$ 的置信度检验, 占总体的82%, 这些站点比较均匀地分布在我国北方地区。分析可知, 从1963—1998年的36年中, 我国北方大部分地区的沙尘暴日数总体呈减少的趋势; 呈增加趋势的站点仅包括青海的兴海、茫崖、河南和新疆的昭苏四个站点, 所占比例较小, 其中兴海增加的趋势高度显著。西北地区的沙尘暴代表站和田、民勤、张掖等站点下降的趋势都比较明显。

表 2-2 1963—1998 年沙尘暴变化趋势分析表

序号	站 号	站 名	a	b	F	R	备注
1	52943	兴海	-1303.2373	0.6627	22.0423	0.6271	
2	51886	茫崖	-349.1229	0.1816	6.8613	0.4098	*
3	56065	河南	-239.6461	0.1223	6.1914	0.3925	*
4	51437	昭苏	-17.2770	0.0088	6.3575	0.3969	*
5	50915	东乌珠穆沁	455.5550	-0.2281	18.8997	-0.5977	
6	50948	乾安	531.0027	-0.2662	34.3553	-0.7089	
7	51330	温泉	452.5110	-0.2269	33.9518	-0.7069	
8	51463	乌鲁木齐	469.6067	-0.2353	20.3668	-0.6121	
9	51567	焉耆	380.0927	-0.1896	18.2104	-0.5906	
10	51628	阿克苏	650.1577	-0.3243	33.2114	-0.7029	
11	51644	库车	1015.8881	-0.5088	91.8823	-0.8543	
12	57083	郑州	471.8876	-0.2368	17.2388	-0.5800	
13	54705	南宫	313.3048	-0.1571	15.1843	-0.5556	
14	51709	喀什	509.2456	-0.2535	17.3350	-0.5811	
15	51711	阿合奇	915.7048	-0.4571	21.9758	-0.6266	
16	51716	巴楚	673.0604	-0.3335	12.6806	-0.5212	
17	51720	柯坪	1748.7356	-0.8673	43.7992	-0.7503	
18	51811	莎车	649.5714	-0.3206	12.8439	-0.5236	
19	51818	皮山	1336.9529	-0.6640	37.9538	-0.7263	
20	51828	和田	1154.1965	-0.5695	28.5294	-0.6755	
21	51848	安德河	1077.0444	-0.5333	36.5079	-0.7196	
22	51855	且末	608.2155	-0.2981	10.2908	-0.4820	
23	51931	于田	703.3811	-0.3477	16.7754	-0.5748	
24	52203	哈密	698.7878	-0.3497	43.2185	-0.7481	
25	52267	额济纳旗	1189.4541	-0.5938	38.5388	-0.7289	
26	52418	敦煌	905.4651	-0.4508	22.5401	-0.6314	
27	52424	安西	396.2360	-0.1963	8.7229	-0.4519	
28	52436	玉门镇	467.8129	-0.2319	8.9473	-0.4564	
29	52446	鼎新	1046.6127	-0.5190	12.6119	-0.5202	
30	52495	巴音毛道	607.7382	-0.3001	15.6959	-0.5620	
31	52533	酒泉	851.2354	-0.4243	24.0036	-0.6433	
32	52546	高台	1019.3179	-0.5084	34.0354	-0.7073	
33	52576	阿拉善右旗	674.7694	-0.3360	14.2317	-0.5432	
34	52652	张掖	1385.4128	-0.6921	115.6090	-0.8791	
35	52679	武威	896.1744	-0.4490	58.5400	-0.7954	
36	52681	民勤	1581.8491	-0.7840	20.1200	-0.6097	
37	52797	景泰	1560.7922	-0.7811	27.5781	-0.6692	
38	52825	诺木洪	716.4634	-0.3587	41.9695	-0.7433	
39	52856	恰卜恰	410.2156	-0.2045	11.3398	-0.5001	
40	52866	西宁	592.1306	-0.2973	22.8640	-0.6341	
41	52889	兰州	141.0134	-0.0705	7.7595	-0.4311	

序号	站 号	站 名	a	b	F	R	备注
42	52895	靖远	464.2524	-0.2318	13.8902	-0.5386	
43	53068	二连浩特	431.6837	-0.2139	8.5829	-0.4490	
44	53192	阿巴嘎旗	422.6775	-0.2108	8.5033	-0.4473	
45	53195	苏尼特左旗	407.4707	-0.2024	8.0350	-0.4372	
46	53336	乌拉特后旗	429.3700	-0.2144	12.5828	-0.5197	
47	53362	四子王旗	1366.7940	-0.6861	36.3585	-0.7189	
48	53446	包头	1787.4013	-0.8965	52.8620	-0.7801	
49	53463	呼和浩特	473.0640	-0.2371	25.2026	-0.6525	
50	53502	吉兰太	1925.5684	-0.9653	47.2279	-0.7625	
51	53513	临河	998.9738	-0.5008	28.8194	-0.6773	
52	53543	东胜	1460.6804	-0.7328	42.1816	-0.7441	
53	53602	阿拉善左旗	396.0088	-0.1961	7.5683	-0.4267	
54	53615	陶乐	1018.0254	-0.5080	16.1351	-0.5673	
55	53646	榆林	831.3015	-0.4158	20.6704	-0.6149	
56	53740	横山	987.5332	-0.4936	24.8179	-0.6496	
57	53754	绥德	365.3433	-0.1830	22.4081	-0.6303	
58	53798	邢台	148.8921	-0.0746	9.6537	-0.4703	
59	54012	西乌珠穆沁	243.6363	-0.1220	24.5268	-0.6474	
60	54102	锡林浩特	642.1301	-0.3221	49.1031	-0.7687	
61	54134	开鲁	223.1095	-0.1111	12.4980	-0.5184	
62	54218	赤峰	363.7029	-0.1822	25.9276	-0.6578	
63	54236	彰武	381.7119	-0.1912	31.0115	-0.6907	
64	54454	绥中	92.2606	-0.0463	19.3416	-0.6022	
65	54511	北京	330.7533	-0.1660	9.2220	-0.4619	
66	54606	饶阳	656.3648	-0.3283	17.5877	-0.5839	
67	56021	曲麻莱	1407.3756	-0.7058	53.7750	-0.7827	
68	56004	托托河	472.3227	-0.2322	4.9599	-0.3568	*
69	51243	克拉玛依	83.1254	-0.0413	4.4198	-0.3392	*
70	51346	乌苏	367.4349	-0.1825	6.0214	-0.3879	*
71	51431	伊宁	115.1305	-0.0575	6.1763	-0.3921	*
72	51730	阿拉尔	524.9101	-0.2593	7.2793	-0.4199	*
73	51777	若羌	512.1869	-0.2520	5.4650	-0.3721	*
74	52313	红柳河	94.7900	-0.0471	5.0203	-0.3587	*
75	53705	中宁	256.5328	-0.1281	6.5039	-0.4007	*
76	54142	双辽	192.3248	-0.0963	6.4430	-0.3991	*
77	54401	张家口	186.5359	-0.0931	6.3853	-0.3976	*
78	50788	富锦	77.9263	-0.0390	4.5933	-0.3450	*

注：*表示仅通过了 $\alpha = 0.05$ 的置信度检验，其它为通过了 $\alpha = 0.01$ 的置信度检验

以上的分析结果只代表我国北方1963—1998年36年的沙尘暴变化趋势，之所以仅以此法分析了这个时段的沙尘暴变化趋势，是由于获取的沙尘暴气象观测数据时段不统一，最早的记录从1951年开始，最晚的数据晚到1990年开始，为了便

于算法的编程实现和结果检验,最终将数据统一到了1963至1998年这个时段,以反映变化趋势的一般规律。

2000年至2002年是我国北方沙尘暴发生频繁的年份,首都北京也多次受到了沙尘天气的影响,受到了社会各界的广泛关注。为了进一步揭示这种现象的内在规律,在已获得的沙尘暴气象数据的基础上(大部分观测数据始于50年代),对内蒙古全部118个气象站点2000、2001、2002年的沙尘暴数据进行了补充,并选取了22个代表站分三组分别代表草原区、荒漠区和农业区分析了沙尘暴日数年际变化规律,见图2-7、图2-8和图2-9。

分析可知,三个区域中荒漠区和农业区代表站的年沙尘暴日数都呈波动中下降的趋势。草原区的大部分代表站也都呈波动中下降的趋势,但朱日和、苏尼特左旗和那仁宝力格三站呈波动上升趋势,这与前面结果有所不同,原因是数据的时间序列长于前面分析的序列。同时,荒漠区沙尘暴的年发生日数要高于草原区和农业区,其中最高值出现在吉兰太气象站,发生于1966年,达62次;草原区的朱日和站是沙尘暴比较频繁发生的站点,而处于农牧交错区的集宁、化德和多伦三站沙尘暴年变率较大。处于农区的呼和浩特、包头、临河和东胜四个气象站,沙尘暴日数年际变化下降的趋势比较明显,其中呼和浩特的沙尘暴年发生日数低于其它三个站。

近50年来,受区域性气候变化的影响,上述22个气象站点的沙尘暴天气频数的年代际变化相当明显,大部分站点在上世纪50年代以来沙尘暴发生频数一直在增加,60、70年代沙尘暴发生频繁,其中大部分站点在1966年都是沙尘暴发生频数的峰值时段;80年代,大部分站点(除朱日和和那仁宝力格外)年沙尘暴日数呈下降趋势;90年代在减少中有回升趋势;进入2000年,各站的沙尘暴次数均有明显增加的趋势,但都未超过各站的历史最高值,有的甚至没有达到多年的平均值,各站数据显示,这个沙尘暴发生的峰值区持续到了2002年。

由以上分析可知,近40、50年来,我国北方大部分区域沙尘暴日数年际变化总体上呈现波动中下降的趋势,具有增加趋势的区域主要有三个,其中心点分别在内蒙古的朱日和、青海省的兴海和新疆的昭苏。

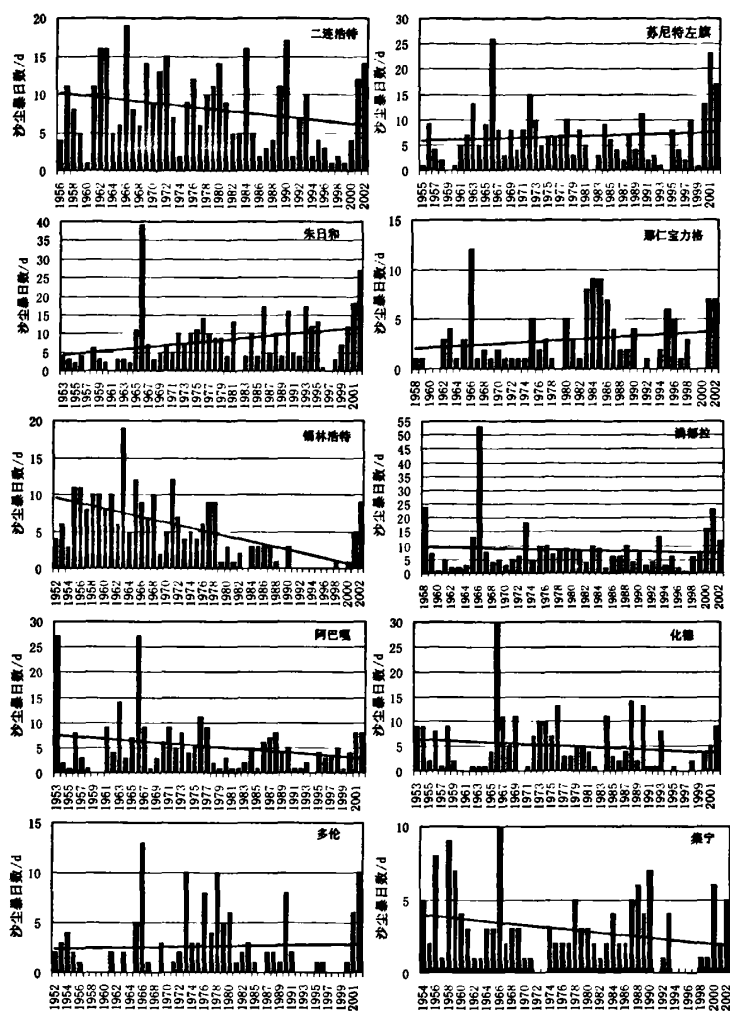


图 2-7 内蒙古东部草原区各代表站沙尘暴日数年际变化

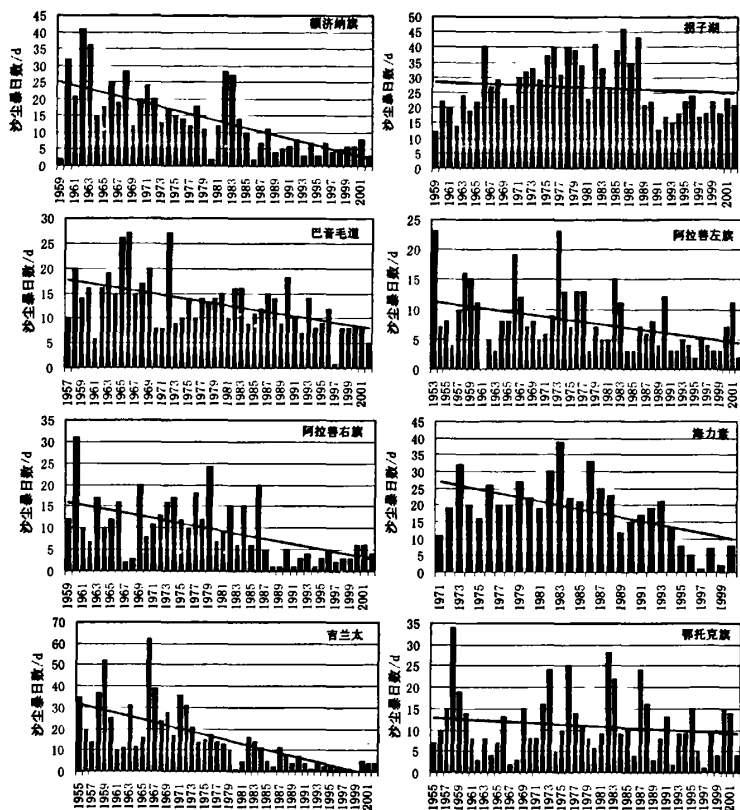


图 2-8 内蒙古西部荒漠区各代表站沙尘暴日数年际变化

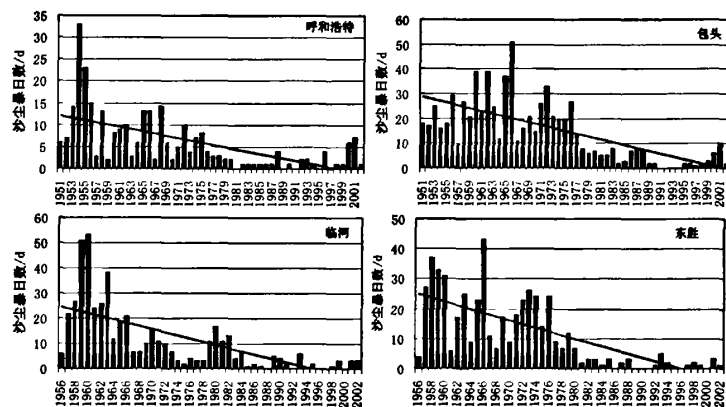


图 2-9 内蒙古中部农业区各代表站沙尘暴日数年际变化

许多研究结果得出近50年来我国北方地区沙尘暴有增长的趋势（钱正安，1997；徐启运，1997；胡金明，1999），这与上述结论并不矛盾，是由于对沙尘

暴的统计标准不同造成的。他们的研究所统计的数据是指危害严重的强与特强沙尘暴频次，而本章的研究所统计的是所有的沙尘暴日数（包括一般沙尘暴）。

表2-3给出了50年来西北地区强沙尘暴频数的年代际变化，值得注意的是，2000年的强沙尘暴频数又急剧增加了，达9次之多，为50年来的最多年，可见，尽管我国北方50年来沙尘暴天气总体呈下降的趋势，但强与特强沙尘暴的发生却在上升，这与我国北方干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化有关。

表 2-3 50 年来西北地区强沙尘暴频数年代际变化（单位：次/年）

时间	50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代
频数	5	8	13	14	23

按照形成荒漠化的主导成分划分，中国荒漠化分为风蚀荒漠化、水蚀荒漠化、冻融荒漠化、土壤盐渍化及其它原因引起的荒漠化等共5个类型。在行政上，中国荒漠化土地分布于新疆、内蒙、西藏、青海、甘肃、河北、宁夏、陕西、山西、山东、辽宁、四川、云南、吉林、海南、河南、天津、北京等18个省（区、市）的大部或一部，涉及471个县。据第一次全国荒漠化监测，中国荒漠化的土地面积为262.2万km²，占该区面积的79.0%，占全国面积的27.3%。其中，风蚀荒漠化土地160.7万km²，水蚀荒漠化土地20.5万km²，冻融荒漠化土地36.3万km²，土壤盐渍化土地23.3万km²，其它原因引起的荒漠化土地21.4万km²，分别占全国荒漠化总面积的61.3%、7.8%、13.8%、8.9%和8.2%（杨维西，2001）。风蚀荒漠化主要分布在干旱、半干旱地区，在各类型荒漠化土地中是面积最大、分布最广的一种荒漠化类型。

荒漠化在主要土地利用类型方面的主要表现形式是草地退化、耕地退化、林地退化。如位于内蒙古锡林郭勒盟阴山山系以北的浑善达克沙地，其荒漠化主要表现为原有的固定或半固定沙丘活化，变为流动沙丘，20世纪90年代以来，沙漠化土地每年增加103万km²（刘钟龄等，2001）。该地区南侧靠近华北地区，是威胁京津地区的主要沙尘源区。荒漠化成因主要有两个方面，一是自然方面的原因，二是人为活动的干扰。自然因素主要是气候和地形因素；人为因素主要是过牧、滥垦、乱樵、滥采和水资源的不合理利用，促成这些人为活动的更深层次的原因是人口增长与经济压力的双重压力，以及利益驱动所致。

2.3 小结

(1) 沙尘暴既是自然灾害,也是人为灾害,同时也是环境灾害(生态灾害)。我国北方大风频繁(尤其是春季),客观上为沙尘暴的发生、发展和强度变化提供了动力条件;脆弱的自然生态环境,加之沙质地表广布,以及独特的地形、地貌,成为有利于沙尘暴天气的孕灾环境;随着人口增加和人类对土地资源和水资源的不合理利用,对沙尘暴的发生具有加强作用,人类活动的干扰已逐渐成为沙尘暴频发的重要促发因素。总之,沙尘暴及其强度变化是气候因子(风)、环境因子和人类活动共同作用的产物;

(2) 结合DEM模型,对站点数据进行空间格局的恢复,较传统的方法更为科学,重建的沙尘暴空间格局更接近于真实情况;

(3) 全国沙尘暴空间格局总体呈西南-东北分异。重点区域在西北,并相对集中分布在新疆南部、西藏北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。灾害发生的最大、最小年份和多年平均状况的影响界线分布基本一致,只是影响程度不同;

(4) 从灾害发生时间的月相过程看,重度区域从11月一直延续到次年6—7月,时间跨度很长,按年内变化趋势可以分为三种类型和两个过渡带。全国受沙尘暴影响较为严重的共14个省(直辖市、自治区),总面积624万平方公里,占我国国土面积的65%,重灾区主要分布西藏、新疆、内蒙、甘肃、青海和宁夏一带;

(5) 我国沙尘暴的空间和强度变化分布呈现明显周期变化规律。随着季节的变化,沙尘暴发生的动力条件和下垫面条件性质都将发生周期性变化,这种变化规律与沙尘暴空间和强度的周期变化有着明显的一致性。因此,在定性到定量的沙尘暴研究中,除了需要对沙尘暴的天气特征进行定量研究外,应该对与沙尘暴有关的下垫面的参数及其时间变化规律进行定量的研究,从而提高沙尘暴的研究精度;

(6) 近40—50年来,我国北方沙尘暴天气总体呈下降趋势,有四个区域呈上升趋势,范围比较小,分别是北疆西部,以昭苏为中心;青海西北部,以芒崖为中心;青海东部,以兴海为中心;内蒙古中部,以朱日和为中心。尽管沙尘暴频次总体上在降低,但强度在增加,近年来有增强的趋势。

(7) 内蒙古的荒漠区沙尘暴发生频率高于草原区和农业区, 农业区的沙尘暴下降趋势比较明显, 农牧交错区的沙尘暴年变率较大, 证明沙尘暴发生频率受下垫面生态环境状况的影响。朱日和是内蒙古沙尘暴发生频繁的站点。

(8) 近50年来, 沙尘暴天气的年代际变化总特点为: 上世纪50年代呈增加趋势, 60、70年代沙尘暴发生频繁, 尤其1966年沙尘暴发生频数达到峰值, 80年代开始下降, 90年代在减少中有回升趋势, 进入2000年, 沙尘暴频次明显增加。尽管2000—2002年沙尘暴频次明显增加, 但大部分站点频次没有超过历史均值, 属低频次状态下的波动增长。

参考文献

- [1] Oliver, M A, Kriging. A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. International Journal of Geographic Information Systems, 1990, 4(4): 313-332
- [2] 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, 自然灾害学报, 1999, 8(4): 49-56
- [3] 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, 56(3): 316-322
- [4] 张晓龙, 张艳芳, 赵景波, 近年来中国沙尘暴发生特点、成因及其防治对策, 干旱区资源与环境, 2001, 15(3): 31-36
- [5] 钱正安, 宋敏红, 李万元, 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析, 中国沙漠, 2002, 22(2): 243-250
- [6] 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, 方宗义等, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 1-10
- [7] 徐启运, 胡敬松, 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征分析, 方宗义等, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 11-15
- [8] 刘钟龄, 郝敦元, 我国北方草原的荒漠化及其治理, 见中国工程院“西北水资源”项目办公室编: 西北地区水资源配置、生态环境建设和可持续发展战略研究简报, 第 18 期, 2001

第三章 中国北方沙尘暴灾害形成机理的研究

沙尘暴发生的周期变化,以及它发生的频率和强度,与沙尘暴途经区域下垫面状况有很大关系,这一点已被很多研究结果证实。由于下垫面状况复杂多样,到底是哪些因素影响沙尘暴发生和发展的全过程,不同的下垫面因素又有多大的贡献,哪些下垫面因素是影响沙尘暴过程的主导因子,这是当前沙尘暴研究的核心问题之一,这对全面认识沙尘暴的形成机制,进而深入理解沙尘暴与区域生态环境建设和可持续发展战略之间的关系,起着关键作用。

在本章的研究过程中,考虑到沙尘暴这一复杂过程涉及较多的变量,如果不加以处理,必将增加问题分析的复杂性,经综合考虑,确定了以沙尘暴日数、沙尘暴持续时间、大风日数、降水、温度、植被覆盖度、DEM和沙漠、沙地分布为主要变量,借助数据统计分析技术,分析了影响沙尘暴形成、演化过程的下垫面主导因子,同时也分析了沙尘暴与下垫面的关系,最后对沙尘灾害的形成机理进行了探讨。

3.1 数据来源与处理方法

3.1.1 数据来源

本章分析所用数据包括四部分,即气象数据、地形与沙漠数据、植被覆盖度数据和土地利用/覆盖数据。

3.1.1.1 气象数据来源与处理

气象数据包括沙尘暴日数、沙尘暴持续时间、降水和温度四项指标,时间单位为月,数据来源于中国气象局和内蒙古自治区气象局。其中1951—2000年的数据来源于中国气象局,2001年1月至2003年6月的数据来源于内蒙古气象局,主要涉及内蒙古的118个气象站。实际分析中筛选出了188个气象站作为我国北方地区沙尘暴的代表站。大风日数数据(风速 $\geq 17.2\text{m/s}$)也来源于内蒙古气象局,时段为1971—2002年。

降水和温度数据按季节整理, 即3—5月表示春季、6—8月表示夏季、9—11月表示秋季、12—2月(次年)表示冬季。季节降水量用各月降水数据之和表示, 季节温度值用各月温度数据的平均值表示。由于沙尘暴主要发生在春季, 因此, 沙尘暴数据只区分春季和全年的沙尘暴发生日数和持续时间。大风日数数据与沙尘暴数据相对应, 分别整理出春季和全年的大风日数。

3.1.1.2 地形与沙漠数据来源与处理

为了分析沙尘暴过程与地形的关系, 提取并建立了我国的数字高程模型(DEM)。DEM空间分辨率1km, 资料来源于美国地球资源观测系统(Earth Resource Observation System)数据中心(相关网站:<http://edcdaac.usgs.gov/glcc/glcc.html>)。数据已经严格的几何校正、配准、投影变换处理。

在此基础上计算了中国坡度的空间分布图, 计算过程在ARC/INFO的支持下完成, 结果见图3-1。坡度的高值区几乎均位于地貌上的第一阶梯与第二阶梯交界区, 还有第二阶梯与第三阶梯的交界区。

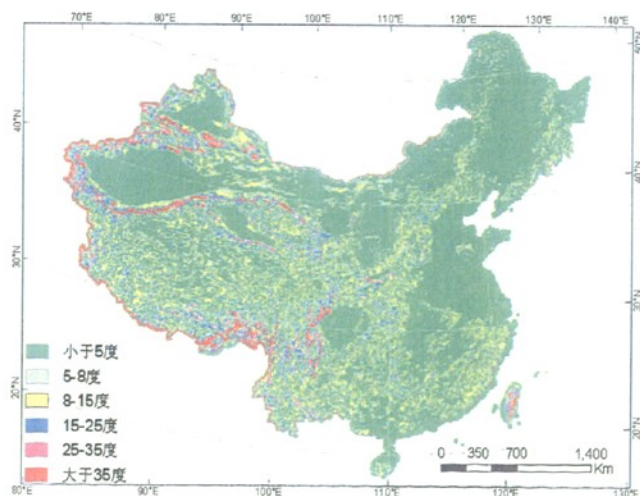


图 3-1 中国坡度分布图

我国沙漠主要分布在极端干旱地区, 沙地主要分布在半干旱地区。气候干燥、地表富含沙性沉积物、植被覆盖较低、大风频发是沙漠形成的主要自然因素。中国沙漠分布图来源于中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所编制的1:200万《中国

沙漠分布图》，数字化过程在arc/info8.0软件的支持下完成。共有六种类型，即固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘、戈壁、风蚀地和绿洲。具体分布情况见图3-2。

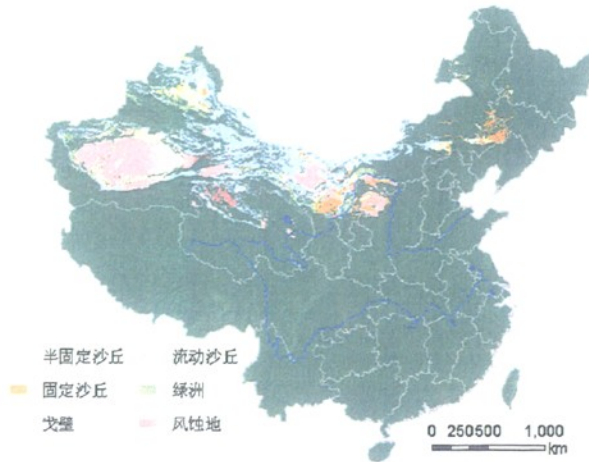


图 3-2 中国沙漠分布图

所有数据在Microsoft Visual FoxPro软件的支持下建立数据库，并进行数据管理，以便于后续分析的需要。

3.1.1.3 土地利用/覆盖数据来源与处理

（1）数据来源。本研究采用的基本数据为覆盖中国北方 13 省区（新疆、甘肃、青海、宁夏、陕西、内蒙、山西、北京、天津、河北、吉林、辽宁、黑龙江）的极轨气象卫星 NOAA/AVHRR 数据，数据来源于中国气象局卫星气象中心，空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ ，成像时间分别为 1983 年、1990 年和 1999 年的 7 月。在不考虑云覆盖影像的条件下，获取完全覆盖研究区的数据，至少需要 3 轨卫星数据。为了获取研究区晴空数据，需要大量数据。

（2）数据处理。本研究所用数据有当年 7 月逐日数据多轨拼图和镶嵌完成，处理流程如图 3-3。全部处理过程是在卫星气象中心提供的“极轨卫星资料接收与处理系统”软件和 ERDAS IMAGINE 8.4 遥感影像处理软件测支持下完成。

研究中其它辅助数据还包括：（1）野外考查 GPS 数据，记录土地利用现状和各种土地利用类型的采样点数据；（2）1:100 万中国土地利用图；（3）1:100

万中国植被图。



图 3-3 AVHRR 数据处理流程

图 3-4 是经过处理后的 89 年、94 年和 99 年的研究区多轨原始影像合成图。

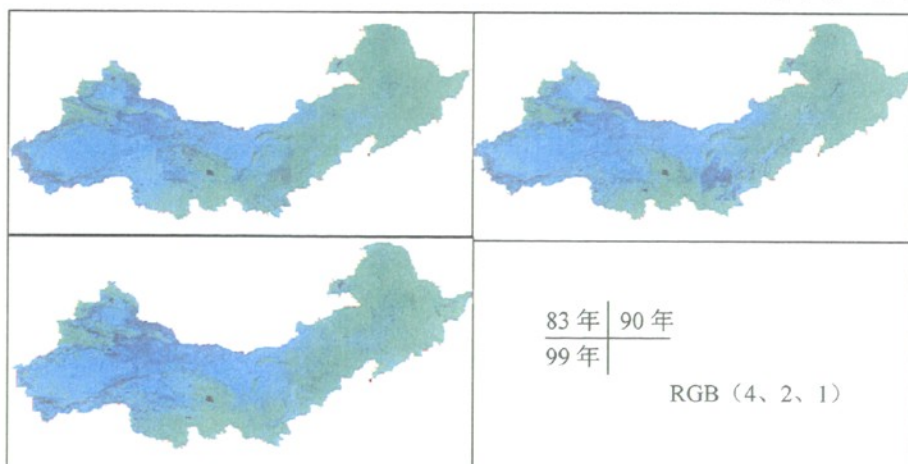


图 3-4 NOAA/AVHRR 原始影像合成图 (1983、1990、1999)

(3) **数据分类。**根据我国北方的土地利用特征,分类体系确定为:森林、灌丛、草地、耕地、荒漠、水体,共六大类。结合现有 1:100 万中国土地利用图、1:100 万中国植被图和地面 GPS 数据,利用 NOAA/AVHRR 数据计算归一化植被指数 NDVI ($NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$), NIR 表示近红外波段反射率, VIS 表示可见光波段的反射率),将它作为 NOAA/AVHRR 数据的第 6 通道,利用最大似然法分类,分类流程见图 2-26a,得到研究区三期的土地利用图(图 2-26b、图 2-26c 和图 2-26d),分别表示 80 年代初、90 年代初和 90 年代末我国北方

土地利用/覆盖状况。

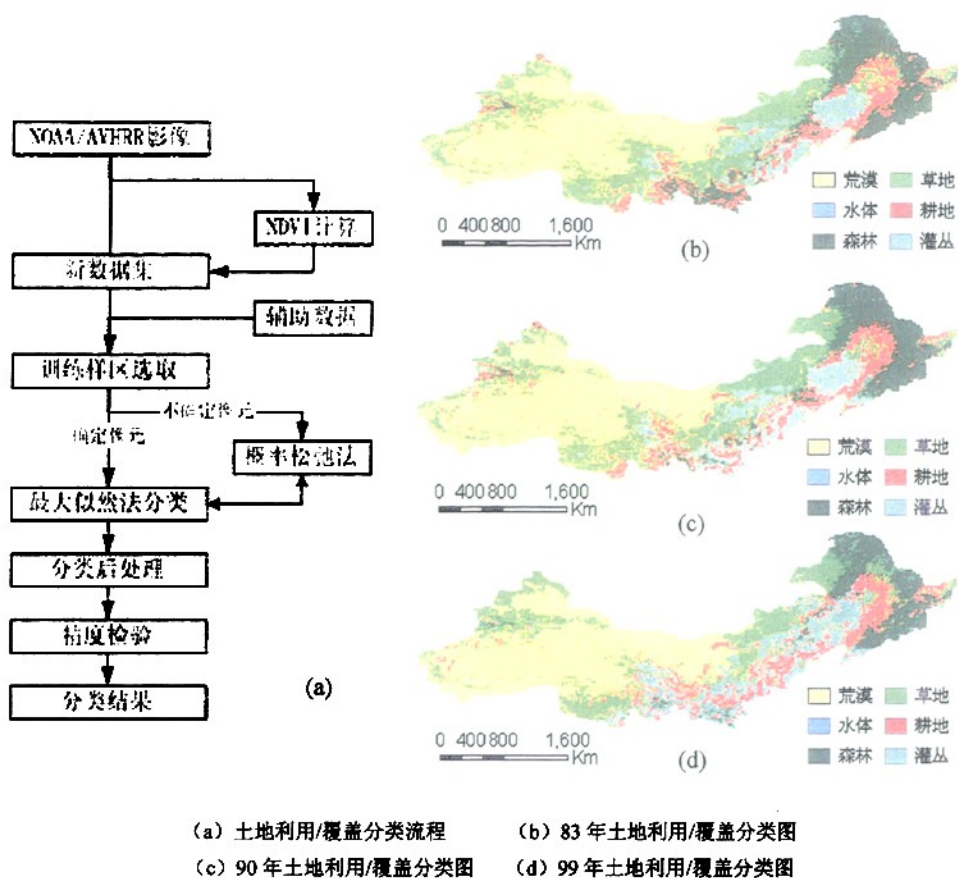


图 3-5 NOAA/AVHRR 土地利用/覆盖分类流程和结果

参考地面同期资料，对分类结果进行精度检验，检验结果见表 3-1。

表 3-1 北方 13 省土地利用分类精度检验结果 (Kappa 系数)

	1983 年	1990 年	1999 年
森林	0.7318	0.7795	0.7795
灌丛	0.7795	0.8915	0.6794
草地	0.7795	0.7863	0.7863
耕地	0.8395	0.8898	0.6667
水体	0.8915	0.7813	0.8915
荒漠	0.6794	0.7813	0.6693

3.1.1.4 植被覆盖度数据来源与处理

(1) 数据来源。植被覆盖度计算所用的遥感数据为美国EROS（地球资源观测系统）数据中心的探路者数据库所提供的1983~2000年每旬中国的NDVI数据。图像的空间分辨率为8km×8km，投影方式为GOODE (Interrupted Homolosine equal-area) 投影。

(2) 数据的预处理。这个数据集中，为了尽量消除云的影响，旬NDVI采用最大值合成法 (maximum value composite)，并且对气溶胶的影响进行了大气纠正。获得的数据是无符号整数，数值范围为0—255，使用前需要对其进行转换，原始值减去128，然后乘以0.008就可以恢复到真实的物理值（-1到+1）。归一化植被指数NDVI可以很好地反映地表植被的繁茂程度，它与生物量、叶面积指数有比较好的相关关系 (Asrar et al, 1985; Tucker et al, 1981)。

本研究以月为时间单位进行分析，首先用最大合成法生成月NDVI数据，以进一步消除云、大气、太阳高度角等因素对数据的干扰，如公式 (3-1)：

$$NDVI_i = \max(NDVI_{ij}) \quad (3-1)$$

$NDVI_i$ 是第 i 月的NDVI值， $NDVI_{ij}$ 是第 i 月第 j 旬的NDVI值。然后进行投影变换，将GOODE格式的投影转换为兰勃特方位等积投影 (Lambert Azimuth Equal Area)，最终生成中国1983~2000年月NDVI数据集。

(3) 植被覆盖度计算原理和方法。植被覆盖度 (f) 被定义为植被投影面积在单位面积上所占比例，它和叶面积指数 (L_e) 可以作为衡量地表植被数量的指标 (Gutman, 1998)。植被覆盖度降低、地表裸露度增大是地表植被退化的表现特征。

本研究将线性混合模型应用到8km AVHRR—NDVI数据计算中国北方植被覆盖度。线性混合模型假定每个像元的测值包含着该像元涉及的地表每种覆盖类型的信息，并且每个像元的值根据每种覆盖类型在像元中所占比例呈线性组合。对于每个像元的NDVI数据有下列关系 (Defries, 2000)：

$$NDVI_i = \sum_{j=1}^Q NDVI_{ij} f_j + e_i \quad (3-2)$$

其中： $NDVI_i$ 是第*i*月的NDVI数据， $NDVI_{ij}$ 是第*j*种覆盖类型在第*i*月的值， f_j 是第*j*种土地覆盖类型在像元中的所占比率， e_i 是误差。模型的约束条件为：

$$\sum_{j=1}^Q f_j = 1 \quad (3-3)$$

考虑到模型的实际应用，根据线性混合模型的假设，可以认为每个像元的NDVI值由植被覆盖部分（ f_v ）和裸土部分（ $1-f_v$ ）的NDVI值合成，即：

$$NDVI = NDVI_v f_v + NDVI_s (1 - f_v) \quad (3-3)$$

其中： $NDVI_v$ 是植被覆盖部分的NDVI值， $NDVI_s$ 是裸土覆盖部分的NDVI值。

年最大NDVI可以较好反映该年度植被长势最好季节地表的植被覆盖程度。在实际计算中，取NDVI最大值代替 $NDVI_v$ 和最小值代替 $NDVI_s$ ，则植被覆盖度（ f_v ）计算公式如下：

$$f_v = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (3-4)$$

$NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 为整个生长季植被NDVI的最大值和最小值，本研究根据具体植被覆盖类型从多年（1983—2000年）NDVI值中求得，见表3-2。

表 3-2 植被覆盖度估算参数表

土地利用/覆盖类型	$NDVI_{\max}$	$NDVI_{\min}$
林地	0.864	0.032
耕地	0.841	0.032
灌丛	0.835	0.032
草地	0.814	0.032
荒漠	0.814	0.032
水体	$f_v=0$	

计算结果中发现许多噪声点，经分析，主要原因是由于卫星信号接收过程中丢线和误码所致。在获得的原始NDVI数据集中这一问题并没有进行处理，本研究的预处理过程也没有对噪声点进行相应处理，目的是尽量减少数据处理步骤，进而降低运算步骤带来的误差。

计算出的植被覆盖度结果中，噪声点像元的植被覆盖度与周围像元相比呈现高亮度，大部分植被覆盖度高达100%，利用这一特性，对相应像元作卷积运算。

选择3×3模板如公式(2-24)，其含义是用噪声点周围8个像元值的累加和平均代替噪声点的值。

$$t(3,3)=\begin{bmatrix} \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{8} & 0 & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \end{bmatrix} \tag{3-5}$$

利用上述方法分别计算了中国北方13省从1983年1月到2000年9月逐月的植被覆盖度，经噪声处理后，建立了近20年来中国北方13省月植被覆盖度数据序列集，可满足论文的研究的需要。

以每年3、4、5月和7、8、9月的植被覆盖度分别构造两个三维向量 f_{spring} 和 f_{summer} （公式3-6），并分别计算两向量的模（公式3-7），用来表示当年春季和夏季的植被覆盖状况。

$$f_{spring}(i)=\begin{bmatrix} f_{i3} \\ f_{i4} \\ f_{i5} \end{bmatrix} \quad \text{和} \quad f_{summer}(i)=\begin{bmatrix} f_{i7} \\ f_{i8} \\ f_{i9} \end{bmatrix} \tag{3-6}$$

$$\|f_{spring}(i)\|=\sqrt{f_{i3}^2+f_{i4}^2+f_{i5}^2} \quad \text{和} \quad \|f_{summer}(i)\|=\sqrt{f_{i7}^2+f_{i8}^2+f_{i9}^2} \tag{3-7}$$

式中，i表示年， f_{ij} 表示i年j月的植被覆盖度，定义两向量的模为季节植被覆盖度特征值。

3.2 沙尘暴影响因子分析

3.2.1 相关分析

利用188个时间序列的沙尘暴代表站的沙尘暴、降水、温度、大风日数数据，共22个字段4511条记录，分别用春季沙尘暴日数、全年沙尘暴日数、年沙尘暴持续时间与春季降水、上年夏季降水、上年秋季降水、上年冬季降水、春季温度、上年夏季温度、上年秋季温度、上年冬季温度、春季植被覆盖度、上年夏季植被覆盖度、春季大风日数和全年大风日数做相关分析，得出相关矩阵如表3-3。

表 3-3 时间序列沙尘暴数据相关矩阵

	春季日数		全年日数		年持续时间	
	R	N	R	N	R	N
春季日数	1	4511	0.908	4511	0.808	4511
全年日数	0.908	4511	1	4511	0.851	4511

年持续时间	0.808	4511	0.851	4511	1	4511
春季降雨	-0.290	4511	-0.294	4511	-0.234	4511
上年夏季降雨	-0.304	4511	-0.338	4511	-0.266	4511
上年秋季降雨	-0.244	4511	-0.269	4511	-0.210	4511
上年冬季降雨	-0.240	4511	-0.233	4511	-0.188	4511
春季温度	0.211	4511	0.221	4511	0.243	4511
上年夏季温度	0.143	4511	0.118	4511	0.184	4511
上年秋季温度	0.138	4511	0.142	4511	0.186	4511
上年冬季温度	0.117	4511	0.154	4511	0.150	4511
春季植被覆盖度	-0.291	1858	-0.285	1858	-0.232	1858
上年夏季植被覆盖度	-0.361	1858	-0.365	1858	-0.317	1858
春季大风日数	0.322	1021	0.229	1021	0.193	1021
全年大风日数	0.327	1021	0.300	1021	0.244	1021

表3—3中R表示相关系数，N表示样本数，所有相关系数都通过了0.01的显著性检验，表明沙尘暴发生的日数与持续时间的长短与这些因子有很大的相关性，具体有以下几个特点：

(1) 春季、全年沙尘暴日数和年沙尘暴持续时间都与春季降水和上年夏季、秋季、冬季的降水量呈显著的负相关，其中相关系数最高的为上年夏季，其次为春季，最低的是上年冬季。表明四季的降水都对沙尘暴日数和持续时间的变化有影响，当降水量充沛时，沙尘暴日数和持续时间将减少，相反，当持续干旱时，沙尘暴发生频次将提高。其中上年夏季和本年春季降水量所造成的影响最为明显。

(2) 春季、全年沙尘暴日数和年沙尘暴持续时间都与春季温度和上年夏季、秋季、冬季的温度呈显著的正相关，尤其春季的相关系数最高，明显高于上年其它季节，表明春季温度的变化是影响沙尘暴波动变化的重要气象条件。温度在春季对地表的作用主要体现在对水分的蒸散方面，同时温度变化可导致局地热力不稳定，易产生上升气流。

(3) 春季和上年夏季植被覆盖度与沙尘暴发生日数和持续时间呈负相关。与降水相同，上年夏季植被覆盖度的相关程度高于本年春季植被覆盖度。夏季是我国北方植被覆盖度最高的季节，如果夏季的降水量大、植被覆盖度高，必然影响到来年春季的植被覆盖度，而春季又是我国北方沙尘暴发生占全年比例最高的季节，春季植被覆盖度是衡量沙尘暴发生风险等级的关键指标，加之春季的降水量也影响着牧草的返青和作物的生长，可见降水量作为抑制沙尘暴的气象指标，

除了可以增加春季地表的土壤墒情外，更重要的是影响着下垫面的植被覆盖度，再考虑温度的作用，可以得出结论：降水和温度主要通过影响地表植被覆盖度来影响着区域沙尘暴的发生频率和持续时间。

夏季植被覆盖度与春季植被覆盖度有较高的相关性，同时，从我国北方地区干旱、半干旱地植被类型来看，很多是一年生或季节性植物，生长时间较短，如果它们上年夏季生长状况好，其地下根系和地表凋落物就比较多，在来年春季，即使它们中间有一些不能返青或已经死亡，但它们的根系和凋落物仍然能够有效阻滞沙尘暴产生。这或许是夏季植被盖度与沙尘暴相关性高于春季植被覆盖度的主要原因。

(4) 大风日数与沙尘暴日数、持续时间呈正相关，体现了风作为沙尘暴发生、发展动力因素的特征。从相关系数来看，风对沙尘暴的影响要低于植被覆盖度和降水量的影响，高于温度的影响。

(5) 总体来看，在影响沙尘暴日数和持续时间的上述各项指标中，根据相关系数排序，春季对沙尘暴影响的大小顺序为：植被覆盖度、大风日数、降水和温度；全年的顺序为：植被覆盖度、降水量、大风日数和温度；对年沙尘暴持续时间的顺序为：植被覆盖度、降水、大风日数和温度。影响春季、全年沙尘暴日数和年沙尘暴持续时间的各因子中，植被覆盖度都是排第一位，表明植被覆盖度的周期变化是影响沙尘暴频率的重要影响因子；对于大风日数，在春季是影响沙尘暴日数的重要因子，其影响力仅次于植被覆盖度的影响，而从沙尘暴的年发生日数和持续时间来看，降水量的影响又高于了大风日数的影响，说明大风对沙尘暴的影响具有季节性，主要影响着春季沙尘暴的发生，同时春季也是我国北方大风频发的季节；在上述所有因子中，温度对沙尘暴的影响是最小的，但也是不可忽视的因子。

对数据重新整理，得出188个站点与沙尘暴有关的各因子的多年综合指标，即每个站点一条记录，各字段为沙尘暴日数（春季平均、年平均）、降水量（春季平均、上年夏季平均、上年秋季平均、上年冬季平均）、温度（春季平均、上年夏季平均、上年秋季平均、上年冬季平均）和植被覆盖度（春季最高、平均、最低，上年夏季最高、平均、最低）。由于大风日数只有内蒙的站点有这项数据，

不能代表我国北方沙尘暴的整体情况,所以这里分析没有将大风日数作为输入变量。利用上述同样方法,求取沙尘暴日数与其它因子的相关矩阵,如表3-4。

表 3-4 沙尘暴综合指标相关矩阵

其它因子	沙尘暴日数		其它因子	沙尘暴日数	
	春季平均	年平均		春季平均	年平均
春季平均降水	-0.492**	-0.468**	春季平均温度	0.313**	0.296**
上年夏季降水平均	-0.436**	-0.464**	上年夏季温度平均	0.192*	0.148
上年秋季降水平均	-0.472**	-0.465**	上年秋季温度平均	0.214*	0.201*
上年冬季降水平均	-0.416**	-0.355**	上年冬季温度平均	0.256**	0.277**
春季最低盖度	-0.358**	-0.331**	春季最大盖度	-0.387**	-0.351**
春季平均盖度	-0.370**	-0.339**	上年夏季最低盖度	-0.442**	-0.422**
上年夏季最大盖度	-0.456**	-0.465**	上年夏季平均盖度	-0.466**	-0.465**

注:样本数 N=188, *表示在 0.05 检验水平上显著相关, **表示在 0.01 检验水平上显著相关, 其它为不相关

表3-4显示了我国北方188个沙尘暴代表站,多年综合指标下的各因子间的相关关系,从整体上反映了多年来沙尘暴与下垫面因子间的关系。结果也同样表明:沙尘暴日数与植被覆盖度、降水量和温度存在显著相关,多数指标通过了0.01的显著性检验。其中春季和全年的沙尘暴日数与降水量和植被覆盖度呈显著负相关,都通过了0.01的显著性水平检验;温度的相关程度要低于前二者,除春季平均温度和上年冬季平均温度通过了0.01的显著性检验外,其它仅通过了0.05的显著性检验,而年平均沙尘暴日数与上年夏季平均温度不存在相关关系。

3.2.2 主导因子分析

由以上分析可知,沙尘暴形成的因素很多,而且不同学科的专家有不同的看法,但哪些因素可以构成沙尘暴天气的主导因子,一直是沙尘暴研究中亟待解决的课题。本文进行沙尘暴主导因子分析,主要选取了具有年际和季节变化特征的地表信息,如温度、降水、植被覆盖度、大风日数等,而地表的土壤结构质地、地形地貌等数据,尽管对于沙尘暴天气过程有很大的影响,但由于它们长时期变化不大,在主导因子分析时没有考虑。

沙尘暴主导因子的提取是基于降维思想,考虑到上述诸多沙尘暴影响因素并不是独立的,它们之间具有较强的联系,因此,通过降维处理,可以在保障原始信息损失较小的前提下,将高维变量化为低维变量,简化变量系统的统计数字特

征,从而做出更合理的解释。因子分析过程在SPSS软件支持下完成,其中因子提取的方法采用主成分分析法。

在因子提取过程中,首先考察了与沙尘暴有关的各原始变量间的相关系数,确定了有助于解释沙尘暴过程的相关的变量集;然后采用主成分分析方法来提取因子,根据因子的特征根大小和方差贡献率来综合评判最终提取的因子数;采用方差极大正交旋转来获取旋转因子载荷矩阵,并根据旋转因子载荷矩阵对因子的意义进行解释;进而根据旋转因子得分系数矩阵来计算标准化的因子得分,探讨了各因子得分与沙尘暴的相关性强弱。由于大风日数数据只有内蒙古的气象站点有此项数据,因此,主导因子分析在两种空间尺度上进行,即分为内蒙古(考虑大风日数)和中国北方两种尺度分别进行。

(1) 内蒙古沙尘暴的影响因子分析

对12个原始变量进行因子分析后提取出两个因子,它们的方差贡献率为66%;按方差极大正交旋转变换后,得出旋转后的因子载荷矩阵如表3-5(注:载荷矩阵中载荷值小于0.45没有显示在表中)。

表 3-5 旋转后的因子载荷矩阵(内蒙古)

编号	变量	因子 1	因子 2
1	上年秋季温度	0.934	
2	本年春季温度	0.926	
3	上年夏季温度	0.787	
4	上年冬季温度	0.747	
5	本年春季大风日数	-0.615	
6	全年大风日数	-0.516	
7	上年夏季植被覆盖度		0.834
8	上年夏季降水量		0.770
9	本年春季植被覆盖度		0.745
10	上年秋季降水量		0.743
11	本年春季降水量		0.721
12	上年冬季降水量		0.465

分析表3-5可知,对于第一因子,它与上年秋季温度、本年春季温度、上年夏季温度、上年冬季温度、本年春季大风日数和全年大风日数的相关系数的绝对值均大于等于0.5,其中,因子1与上年秋季温度、本年春季温度、上年夏季温度、上年冬季温度有较大的正相关,与上年秋季温度和本年春季温度的相关系数最

高,达到0.9以上。从因子载荷矩阵中可以看出,因子1所反映的变量是大风日数和温度,因子2所反映的变量是植被覆盖度和降水量。

(2) 中国北方沙尘暴的影响因子分析

采用上述方法对中国北方广大地域的沙尘暴影响因素进行了分析,分析后得出,这些影响因素同样可以归为两个因子,这两个因子的方差贡献率为64%,旋转后的因子载荷矩阵如表3-6。

分析表3-6可知,因子1所反映的变量是本年春季和上年夏季、秋季、冬季的温度数据,因子2所反映的变量是植被覆盖度和降水数据。

两种尺度的主导因子分析结果显示:因子1所反映的变量是大风日数和温度,因子2所反映的变量是植被覆盖度和降水。由于大风是沙尘暴过程的动力条件,同时温度变化可导致热力不稳定,在春季亦产生上升气流,因此,因子1可以称为沙尘暴产生的动力因子;植被覆盖度是衡量下垫面植被状况的重要参数,加之降水量是地表土壤水分的主要来源,两者都是影响沙尘暴发生、发展、强弱变化的重要的下垫面参数,与动力因子相对应,降水量和地表植被覆盖是阻碍沙尘暴产生的重要因素,因此,因子2可以称为沙尘暴产生和搬运的阻力因子。

表 3-6 旋转后的因子载荷矩阵(中国北方)

编号	变量	因子 1	因子 2
1	上年秋季温度	0.966	
2	本年春季温度	0.932	
3	上年夏季温度	0.855	
4	上年冬季温度	0.781	
7	上年夏季植被覆盖度		0.858
8	本年春季植被覆盖度		0.829
9	上年夏季降水量		0.719
10	上年秋季降水量		0.717
11	本年春季降水量		0.688
12	上年冬季降水量		0.413

为了探讨影响沙尘暴产生和搬运的动力因子与阻力因子的影响程度,分别将两次分析得出的因子与相应的沙尘暴日数和持续时间作相关分析,其相关系数矩阵如表3-7。

表 3-7 因子得分与沙尘暴日数、持续时间的相关系数矩阵

	内蒙古		中国北方	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
春季沙尘暴日数	0	-0.582**	0.068**	-0.396**
全年沙尘暴日数	0.100*	-0.609**	0.064**	-0.402**
沙尘暴年持续时间	0.036	-0.472**	0.132**	-0.319**

注：样本数 N=188，*表示在 0.05 检验水平上显著相关，**表示在 0.01 检验水平上显著相关，其它为不相关

分析表 3-7 发现，动力因子与沙尘暴日数和持续时间的相关系数远低于阻力因子。这表明，在影响沙尘暴产生和发展的动力因子与阻力因子中，阻力因子更为重要，它是沙尘暴产生的内因所在，在植被覆盖好、降水多的情况下，风等动力因子再大，也不会产生沙尘暴。相反，风等动力因子是沙尘暴产生和发展的外因，当植被覆盖差，降水少时，也就是达到沙尘暴发生的临界状态时，动力因子才能成为沙尘暴产生和搬运的主导因子，从而影响沙尘暴的产生和发展。因此，改善北方干旱半干旱地区的植被覆盖，是控制沙尘暴之根本。

3.3 沙尘暴与气候的关系分析

3.3.1 沙尘暴频次与大风日数的关系

我国北方地区春季多大风天气，是形成我国大范围沙尘暴的动力因素。大风日数的增减是气候周期性变化的反映，每年春季寒潮大风的出现与冬季风的强度有关（史培军，2001）。亚洲冬春季风与厄尔尼诺事件密切相关，在厄尔尼诺年东亚冬季风强度弱，而在反厄尔尼诺（拉尼娜）年，东亚冬季风势力强（尚可政，1998）。在70年代，拉尼娜事件占优势，我国北方寒潮大风天气出现频繁；而在80—90年代，厄尔尼诺事件占优势，寒潮大风天气出现相对少一些。2000年正处于20世纪最强的一次厄尔尼诺事件以后的拉尼娜事件的高峰期，造成我国北方1999年冬至2000年春季强寒潮大风的频繁出现，为沙尘暴的频繁发生提供了动力条件，加之同期我国北方地区有相当大的区域植被覆盖很差，具备产生沙尘暴的内在条件，因此风对我国部分地区的沙尘暴产生有明显影响。

为了进一步说明大风日数与沙尘暴日数间的关系，图3-3给出了中国年大风日数分布图。我国年大风日数分布的高值区主要在华北地区、西北地区和青藏高原，其中大风日数超过100天的区域分布在青藏高原和新疆的局部地区，大风日

数超过30天的区域主要集中在华北和西北地区,其中内蒙古中西部大部分地区年大风日数超过了50天,北疆和塔里木盆地边缘地区,以及青海、甘肃、山西、吉林的大部分区域,大风日数也比较高,一般也超过了50天。

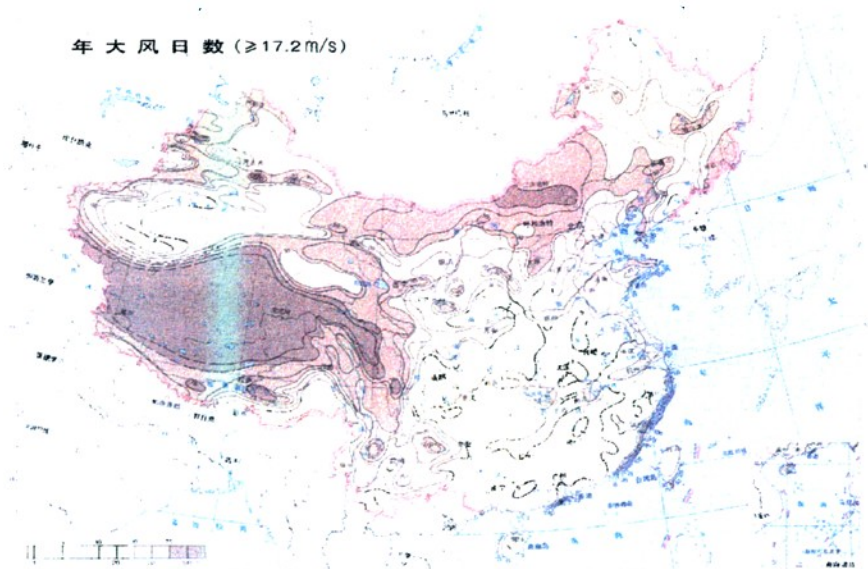


图 3—6 中国年大风日数空间分布图

(《中华人民共和国气候图集》，2002)

将中国年大风日数空间分布图(图3—6)与中国沙尘暴年日数空间分布图(图2—3)对比,发现二者的分布在空间上并不完全一致,在内蒙古中西部、甘肃省北部和新疆东北部地区,大风日数与沙尘暴日数有较好的一致性;而在新疆的塔克拉玛干沙漠,虽然这里是我国西北地区沙尘暴发生的高频区,但年大风日数在20天以下,是西北地区大风日数分布的低值区域。这种空间分布上的不一致,再次说明沙尘暴的发生频次除了受到区域大风日数的影响外,同样受到下垫面的地形地貌、植被覆盖等条件的影响。

由于内蒙古中西部地区是年大风日数和沙尘暴日数分布比较一致的区域,因此,选择了此区域30个气象站点,分别以春季和全年对每个站点的沙尘暴日数和大风日数进行了整理,时间段为1971—2002年,并分别求取了春季和全年30个气象站点的沙尘暴和大风日数间的相关关系,计算结果见表3—8。

表 3-8 内蒙古 30 个气象站点春季和全年沙尘暴日数与大风日数相关系数 (1971—2002)

站名	春季		全年		站名	春季		全年	
	R	Sig.	R	Sig.		R	Sig.	R	Sig.
二连浩特	0.224	0.218	-0.023	0.899	苏尼特左旗	0.453*	0.009	0.125	0.494
额济纳旗	0.358*	0.044	0.503**	0.003	拐子湖	0.756**	0.000	0.760**	0.000
巴音毛道	0.165	0.365	0.102	0.577	阿拉善右旗	0.393*	0.026	0.580**	0.000
那仁	0.469**	0.007	0.380*	0.032	满都拉	0.579**	0.000	0.302	0.093
阿巴嘎旗	0.691**	0.000	0.478**	0.006	海力素	0.056	0.771	0.211	0.264
朱日和	0.351*	0.049	0.030	0.869	乌拉特后旗	0.529**	0.002	0.558**	0.001
达茂旗	0.290	0.107	0.230	0.206	四子王旗	0.826**	0.000	0.819**	0.000
化德	0.389*	0.028	0.409*	0.020	包头	0.876**	0.000	0.956**	0.000
呼和浩特	0.230	0.205	0.140	0.443	集宁	-0.075	0.682	-0.092	0.615
吉兰太	-0.028	0.880	-0.138	0.452	临河	0.302	0.093	0.430*	0.014
鄂托克旗	0.684**	0.000	0.667**	0.000	东胜	0.748**	0.000	0.721**	0.000
西乌旗	0.390*	0.027	0.361*	0.043	阿拉善左旗	0.214	0.239	0.253	0.163
扎鲁特旗	0.350*	0.050	0.224	0.218	锡林浩特	0.444*	0.011	0.481**	0.005
开鲁	0.103	0.577	-0.244	0.178	多伦	0.173	0.344	0.029	0.876
赤峰	0.587**	0.000	0.623**	0.000	东乌旗	0.479**	0.005	0.480**	0.000

注: Sig. 值<0.05, 表明两变量具有相关性; *表示在 0.05 检验水平上显著相关, **表示在 0.01 检验水平上显著相关。

分析表3-8可知, 沙尘暴日数与大风日数呈正相关关系。在内蒙古境内的30个代表站中, 春季有19个代表站沙尘暴日数与大风日数相关(通过了0.05的显著性水平检验), 其中11个站显著相关, 通过了0.01的显著性水平检验, 这些站点分别是那仁、阿巴嘎、东乌旗、鄂托克、赤峰、拐子湖、满都拉、乌拉特后旗、东胜、四子王旗和包头, 包头的相关系数最高, 为0.876。全年也有16个站沙尘暴日数与大风日数相关, 其中额济纳旗、拐子湖、阿拉善右旗、阿巴嘎、乌拉特后旗、四子王旗、包头、鄂托克旗、东胜、锡林浩特、东乌和赤峰12个站通过了0.01的显著性水平检验, 为显著相关。春季和全年都显著相关的站点有9个, 分别为阿巴嘎、东乌旗、鄂托克、包头、四子王旗、乌拉特后旗、东胜、赤峰、拐子湖。

可见, 尽管内蒙古是沙尘暴日数和大风日数空间分布较一致的区域, 但对于具体的气象站点观测值, 并不完全遵循这一规律。并且沙尘暴日数与大风日数相关的站点, 在空间分布上也没有明显的规律, 从而进一步证明, 除大风条件可以驱动沙尘暴天气的发生、发展外, 下垫面状况同样是沙尘暴天气重要的驱动因素, 良好的植被覆盖能够有效阻碍风对沙尘暴的影响强度。

3.3.2 沙尘暴频次与降水、温度的关系

沙尘暴发生频率及强度与气候变化有关,气候变化突出的体现是地表降水和温度的变化。气候变化遵循一定的规律,使得沙尘暴的发生也呈周期性的变化。沙尘暴频发期对应着冷干气候时期,相反,在气候暖湿期间,沙尘暴发生频率低。

选择了包括北京在内的北方地区23个气象站点,这些站点分别是北京、乌鲁木齐、民勤、哈密、和田、西宁、兴海、兰州、张掖、银川、榆林、拐子湖、额济纳旗、吉兰太、阿拉善左旗、呼和浩特、包头、集宁、赤峰、锡林浩特、朱日和、多伦、张家口,分别计算了1961年至2001年春季和夏季沙尘暴日数的年平均值,以表示我国北方沙尘暴的年际变化,如图3-7。

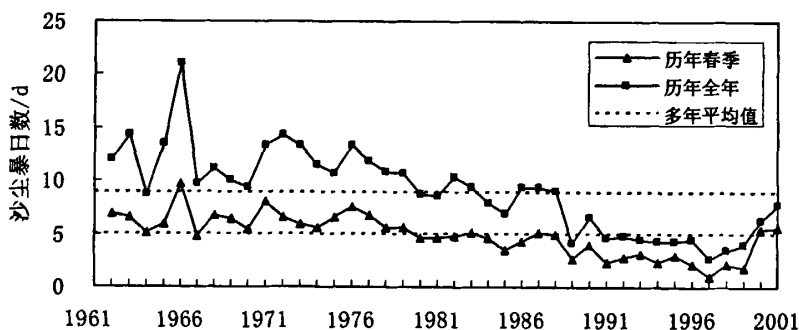


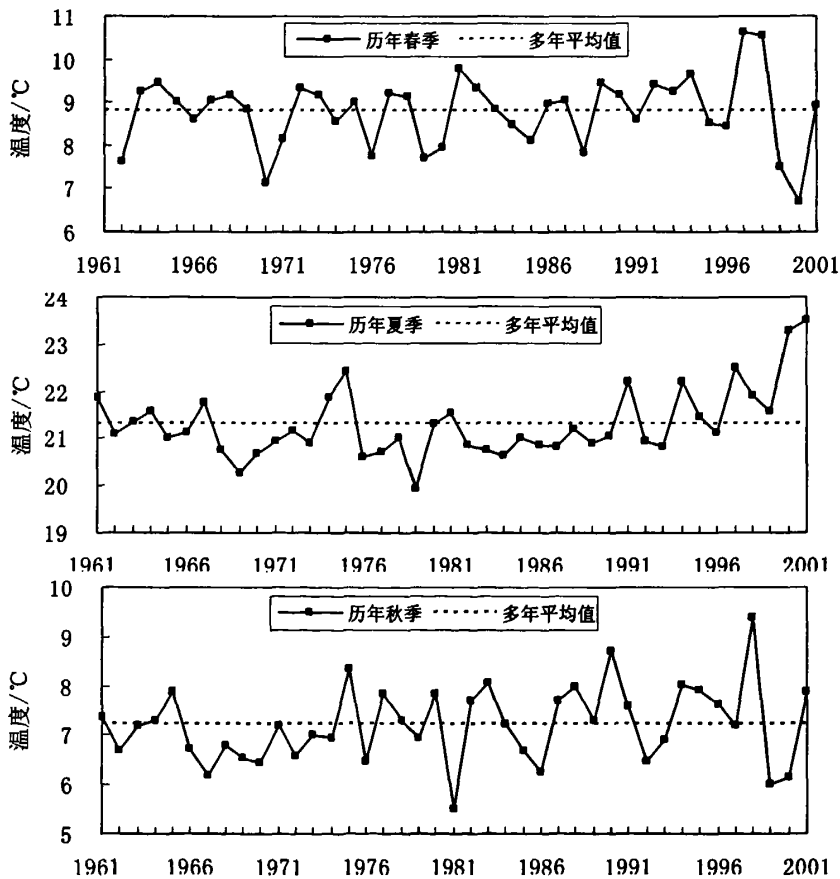
图3-7 中国北方沙尘暴日数年际变化(1961—2001)

与第二章分析结果相同,40多年来,我国北方沙尘暴天气长期变化在起伏波动中呈现逐渐减少的趋势,春季和全年的沙尘暴日数起伏规律具有一致性,其中全年的沙尘暴振幅大于春季,上世纪60—70年代是沙尘暴天气的高发区,80—90年代呈波动减少,且90年代减少更加明显,在1996年降到了40年来的最低谷值,2000年又急剧增加,春季沙尘暴日数超过了多年平均值。40年中,在1980年以前,沙尘暴日数均接近或超出了多年平均值。1980年以后,只有少数年份沙尘暴日数超出了多年平均值,其它年份的沙尘暴日数均低于多年平均值,尤其是春季沙尘暴日数,除2000年和2001年外,都没有超出多年平均值。

图3-8给出了相应站点四季的平均气温变化趋势曲线。近40年来,我国北方温度一直在升高,有变暖的趋势,除春季增加趋势较小外,其它季节增加趋势明显。这一变化趋势对于生态环境建设十分不利,特别是对病虫害防治极为不利,

使得我国北方本来已经脆弱的沙源区生态环境更加脆弱。夏季增温加快了地表的蒸发,土壤水分减少,到了冬春季风力达到一定条件,易形成沙尘暴天气。另外,我国华北地区从春季的3月份起,气温开始明显回升,而且回升的速度快,每3—4天就升高 1°C (周淑贞, 1981)。温度快速回升导致下层大气强烈受热,造成空气不稳定,这将促使对流作用及湍流作用的加强,有利于风速的加大和上升气流的产生,为风沙活动提供有利条件。

从图3—5中看出,20世纪60—70年代处于冷期,对应着我国北方沙尘暴的频发期,尤其是冬季,这一期间多数年份温度低于多年平均值。冬季气温偏低,土壤冻结层厚,春季升温解冻后,松土层变厚,是沙尘暴形成的有利条件。2000年前,我国北方持续干旱,夏季温度明显高于往年,冬季温度也由高于多年平均值变化到了低于多年平均值,为2000年以后连续3年多发沙尘暴天气提供了前期气温条件。



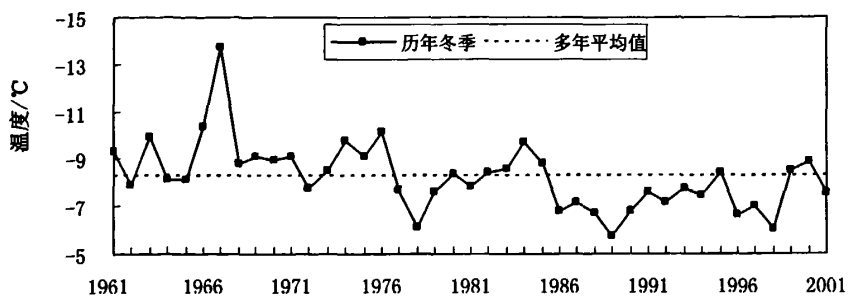
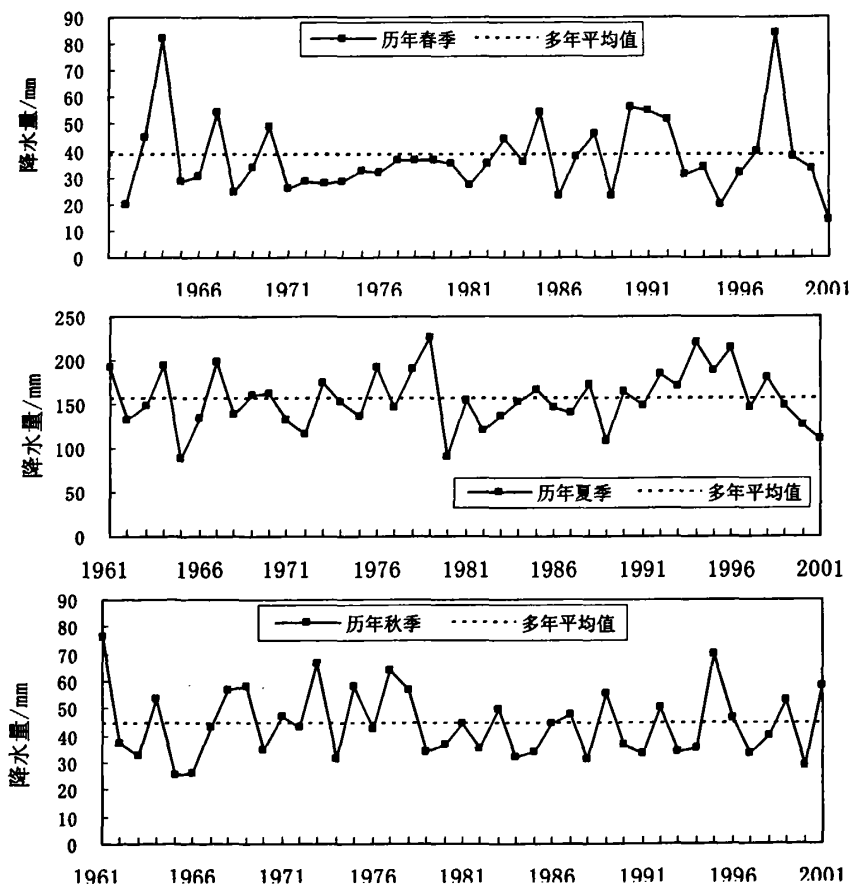


图 3—8 中国北方不同季节气温变化曲线 (1961—2001)

相关分析结果表明,降水量与沙尘暴发生频次有较好的负相关关系,为了进一步说明降水量对沙尘暴发生频次的影响,还对中国北方上述气象站点四季的降水数据进行了分析,图3—9是相应降水量变化曲线。



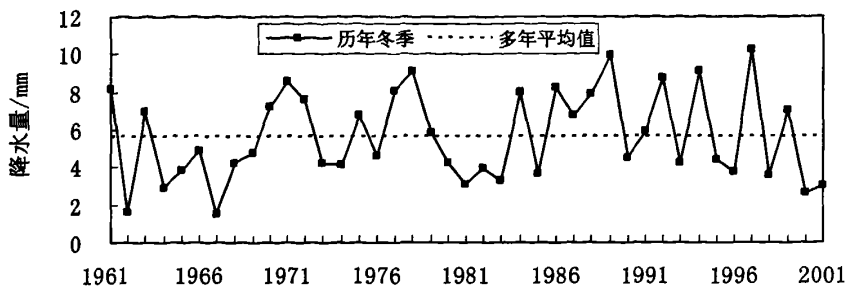


图 3-9 中国北方不同季节降水量变化曲线 (1961-2001)

从图中可以看出, 40年来我国北方降水量波动较大, 趋势分析表明, 总体变化趋势不是很明显, 其中春季、夏季降水量在增加, 秋季在减少, 冬季基本没有变化。但上世纪60—70年代春季降水量呈减少趋势, 80—90年代有增加的趋势, 正对应着60—70年代沙尘暴的多发期和80—90年代沙尘暴的减少期。当春季降水量偏少, 由于返青季节缺水, 植被覆盖度大大减少, 裸露土地面积增加, 可导致当年春季大风季节发生沙尘暴的频次增加; 当大气降水比较丰富, 由于植被覆盖度相对较大, 发生沙尘暴的概率就比较小。

结合图2—7、图2—8、图2—9和图3—9可知, 沙尘暴的波动与同期降水波动有非常好的关系。1966年是中国北方沙尘暴天气的峰值, 由图3—6可以看出, 这一年乃至前一年, 降水量锐减。同样, 2000年沙尘暴频次比往年有所增加, 也与其前期降水明显减少、持续干旱有很大关系。

可见, 沙尘暴是一种与气候变化密切相关的自然现象, 降水和温度是影响沙尘暴频次变化的重要下垫面参数, 降水量减少、地表植被稀疏、冬季冷干、春季温暖是沙尘暴发生的理想条件。

3.4 沙尘暴与沙源及移动路径分析

3.4.1 沙尘暴与沙源的关系分析

图3—1显示了中国坡度分布。沙尘暴的产生与源地地理位置和地貌有很大的关系, 中国大陆地形复杂, 高山盆地交错, 沙区四周基本为群山和高原围绕, 在东、南、西三面, 依次有小兴安岭、大兴安岭、燕山、太行山、吕梁山、秦岭、六盘山、青藏高原、帕米尔高原、天山及阿尔泰山, 使北上的东亚南方季风受阻, 海洋上空的暖湿水汽难以进入腹地, 致使腹地内空气极度干燥, 降水稀少。北面

与蒙古接壤的漫长边界为开阔平坦的戈壁草原,是东亚北方干燥寒冷季风南下的必经之地。来自蒙古及西伯利亚高压区的强大干燥冷气流可以长驱直入,成为沙尘暴形成的动力因素(任阵海,2001)。

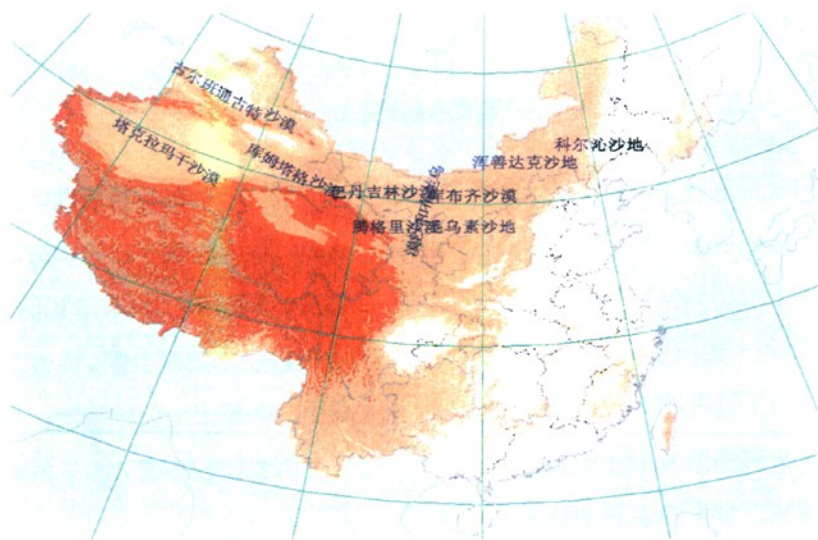


图 3-10 我国的主要沙尘源地(八大沙漠和四大沙地)

经统计分析表明,影响我国沙尘暴的主要沙尘源包括我国有八大沙漠和四大沙地(如图3-10所示)和蒙古国南部戈壁地区。

经统计分析表明,影响我国的沙尘暴天气有三分之二左右的沙源是起源蒙古国南部的戈壁地区,在途径我国北方沙漠或沙地时得到加强或补充,我国八大沙漠和四大沙地的基本情况(见表3-9);另三分之一左右的沙尘天气为境内沙源所致。

新疆南部的塔克拉玛干沙漠是我国境内的沙尘天气高发区。该地的沙尘天气多数是由盆地东部的冷空气倒灌产生的偏东风引起,且维持时间较长。新疆的沙尘天气一般不会大规模向东移动影响到西北地区东部和华北地区。

表3-9 我国八大沙漠和四大沙地基本情况

名称	地理位置	海拔(m)	面积(1000m) ²
塔克拉玛干沙漠	新疆塔里木盆地	840-1200	33.76

古尔班通古特沙漠	新疆准葛尔盆地	300-600	4.88
库姆塔格沙漠	新疆东部、甘肃西部、罗布泊低地南部、阿尔金山北部	1000-1200	2.28
柴达木盆地沙漠	青海柴达木盆地	2600-3400	3.49
巴丹吉林沙漠	内蒙古阿拉善高原西部	1300-1800	4.43
腾格里沙漠	内蒙古阿拉善高原东南部	1400-1600	4.27
乌兰布和沙漠	内蒙古阿拉善高原东北部，黄河后套西南部	1000	0.99
库布齐沙漠	内蒙古阿拉善高原北部，黄河河套平原以南	1000-1200	1.61
科尔沁沙地	东北平原西部的西辽河下游	100-300	4.23
浑善达克沙地	内蒙古高原东部的锡林郭勒盟南部和昭乌达盟西北部	1200	2.14
毛乌素沙地	内蒙古鄂尔多斯高原中南部和陕西北部	1300-600	3.21
呼伦贝尔沙地	内蒙古东北部的呼伦贝尔平原	600	0.72

3.4.2 沙尘暴与移动路径的关系

经统计分析表明，影响国的沙尘天气的路径主要分为三类：即偏西路径、西北路径和偏北路径。

西北路径：西北路径在东移南下的过程中又可分为：西北路径1和西北路径2两个副类（如图图3-11）。



图3-11 西北路径又可分为：西北路径1和西北路径2两个副类

西北路径1：沙尘天气一般起源于蒙古高原中西部或内蒙古西部的阿拉善高原，顺西北风向东南方向移动，途径巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地、黄土高原；主要影响我国西北、华北，甚至还会影响到黄淮、江淮等地。

西北路径2：沙尘天气起源于蒙古国南部或内蒙古中西部，先向东南方向移动，后随气旋收缩北上转向东北方向移动，主要影响西北地区东部、华北中北部、东北大部，有时还会影响到俄罗斯远东地区、朝鲜半岛、日本等地。

偏西路径：沙尘天气起源于蒙古国西南部或南部的戈壁地区、内蒙古西部的沙漠地区，主体向偏东方向移动，途径巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布其沙漠、毛乌素沙地，主要影响我国西北，华北，有时还影响到东北地区西部和南部。如图3-12所示。



图3-12 偏西路径

偏北路径：沙尘天气一般起源于蒙古国乌兰巴托以南的广大地区，途径内蒙古腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地和浑善达克沙地，主要影响西北地区东部、华北大部和东北南部，有时还会影响到黄淮等地。如图3-13所示。

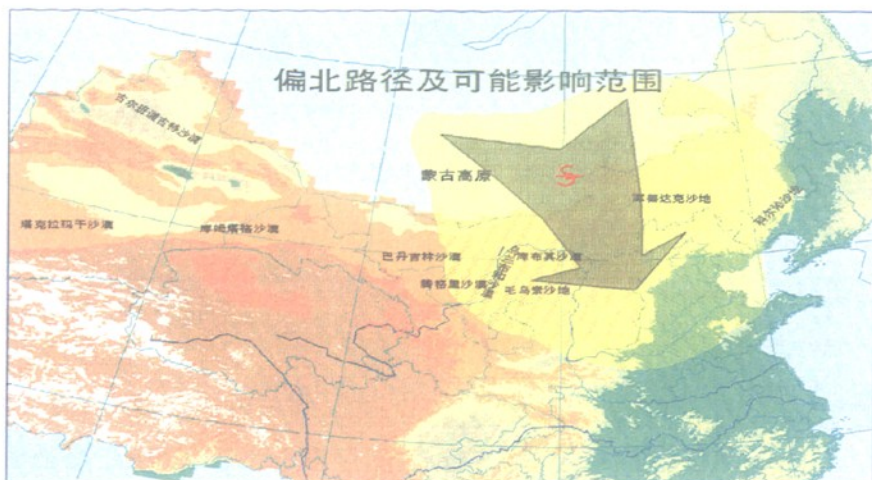


图3-13 偏北路径

3.4.3 沙尘暴与土地沙漠化的关系

按照气候特征定位, 沙漠和戈壁区域处于干燥气候区, 而沙地处于半干燥、半湿润甚至比较湿润的气候区 (见图3-2)。气候变暖有利于荒漠化的形成, 过去的50年中, 中国沙质荒漠化土地面积不断扩大, 从50年代到70年代中期, 平均每年扩展 1560km^2 , 70年代中期到80年代末为 2100km^2 , 90年代每年扩展达 2460km^2 , 至90年代中期总面积已达 350000km^2 (张晓龙, 2001)。河西走廊、阿拉善高原和东部农牧交错带的生态环境严重恶化。50年来, 干枯的湖泊超过 500km^2 (王涛, 2001), 东居延海和天鹅湖已经干枯。在增加的沙质荒漠化土地中, 过渡农垦占26.9%, 过渡放牧占30.1%, 过渡樵采占32.7%, 水资源利用不当与工矿城镇建设及其它占10.3% (朱震达, 1994)。

近些年来, 尽管沙尘暴总体呈下降的趋势, 但强与特强沙尘暴频次却在增加, 这与土地沙质荒漠化的发展密切相关。随着人口的增长, 土地利用强度的增大, 使得原本脆弱的生态环境日益恶化, 如果不加以重视, 处理好人与自然的关系, 沙尘暴发生的频次和强度将会增加。

3.4.4 影响北京沙尘暴天气的移动路径与沙源关系分析

根据北京的气象数据,近50年来沙尘暴天气日数呈波动减少趋势(图3-14)。50年代平均沙尘暴是90年代的8倍。根据沙尘暴的定义,2000年北京共出现扬沙14次、浮尘8次,但没有出现水平能见度低于1km的沙尘暴天气。

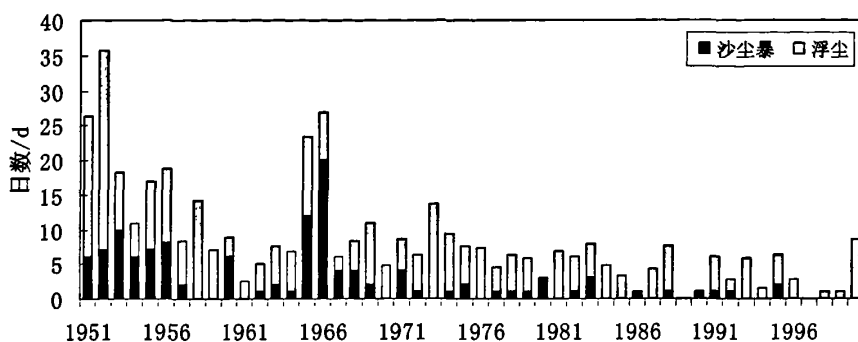


图 3-14 北京沙尘暴日数年际变化 (1951-2000)

陈广庭(2001)将北京的沙尘天气划分为3个阶段,第一个阶段从1951年到1964年,呈迅速减少之势,从每年80d以上的水平降为10d;第二阶段从1965年到1975年,1965年和1966年北京沙尘天气猛增,尤其是沙尘暴分别达12次和20次,创有观测以来的记录;第三阶段的第一年1976年,由于扬沙天气猛增,沙尘天气又出现一次小高潮(42d),之后虽仍有波动,总的呈减少之势。到1997年成为0沙尘天气年。从1998年又出现了回升的势头,2000年22次沙尘天气,是11a中所没有见到过的。从上述变化可以总结出北京沙尘天气周期性的变化规律,每一个变化周期为11-14a。

表3-9列出了1951-2000年北京沙尘暴和大风的发生频率。50年中出现沙尘天气1396天,平均每年28天。其中扬沙天数占70.9%,浮沉天气占20.5%,沙尘暴占8.6%。

表 3-9 北京 50 年沙尘天气日数统计 (据陈广庭, 2001)

年 度	沙尘暴 日 数	扬 沙 日 数	浮 尘 日 数	大 风 日 数	沙尘天气日数	
					总计	年平均
1951-1955	33	285	72	72	390	78
1956-1960	16	158	41	77	215	43
1961-1965	16	79	29	63	115	23
1966-1970	38	90	27	199	147	24.9

1971-1975	8	89	38	233	135	2
1976-1980	6	128	21	157	155	31
1981-1985	4	70	25	98	99	19.8
1986-1990	3	48	11	76	62	12
1990-1995	4	19	18	51	41	8
1995-2000	0	24	13	54	37	7.4
总 计	120	990	286	1080	1396	28

分别用50年北京沙尘暴天气日数、浮尘天气日数、沙尘暴和浮沉天气日数累计值与我国北方117个沙尘暴代表站作相关分析,有34个站与之有相关关系,表3—10列出了具体相关的站点和相应相关系数,图3—8列出相应相关站点的空间位置。

表 3—10 与北京沙尘天气相关的站点及相关系数

站点	累积	沙尘暴	浮尘	站点	累积	沙尘暴	浮尘
西乌旗	0.721**	0.518**	0.384**	赤峰	0.640**	0.537**	0.520**
那仁	—	0.416**	—	阿巴嘎	0.508**	0.611**	—
锡林浩特	0.390**	0.398**	—	苏左旗	0.436**	0.522**	—
多伦	0.300*	0.392**	—	朱日和	0.319*	0.408**	—
化德	0.535**	0.511**	0.335*	张家口	0.543**	0.553**	—
满都拉	0.735**	0.671**	0.444**	达茂	0.573**	0.526**	0.383**
四子王旗	0.692**	0.677**	0.381*	集宁	0.455**	0.402**	0.314*
乌后旗	0.483	0.359*	0.407**	包头	0.568	0.624**	0.352*
呼和浩特	0.502**	0.558**	0.306*	东胜	0.644**	0.458**	0.551**
海力素	0.421*	—	0.366*	乌鲁木齐	0.383*	—	0.597**
哈密	0.416*	0.410*	—	敦煌	0.550**	0.495**	0.368*
诺木洪	0.453**	0.330*	0.399*	酒泉	0.440**	—	0.381*
高台	0.487**	0.359*	0.422*	张掖	0.585**	0.479**	0.449**
武威	0.758**	0.723**	0.458**	西宁	0.641**	0.458**	0.574**
兰州	0.355*	—	0.499**	额济纳旗	0.385*	0.360**	—
巴音毛道	0.618**	0.593**	0.342*	吉兰太	0.646**	0.558**	0.462**
阿左旗	0.531**	0.367*	0.489**	榆林	0.391*	—	0.510**

注: *表示在 0.05 检验水平上显著相关, **表示在 0.01 检验水平上显著相关, —表示不相关。



图 3-15 与北京沙尘天气相关站点的空间分布

分析表3—10和图3—15可知,与北京沙尘天气相关的气象站点主要分布在内蒙古中西部、甘肃、河北的张家口,以及新疆东部和青海北部,其中甘肃的武威与北京沙尘暴的相关系数最高,为0.723,内蒙古的西乌旗、四子王旗、满都拉、化德、呼和浩特、包头、阿巴嘎、赤峰、巴音毛道、阿左旗、吉兰太、达茂、东胜13个站,甘肃的武威、张掖、敦煌3站,与北京沙尘天气的相关系数都超过了0.5。内蒙的那仁、锡林浩特、多伦、阿巴嘎、苏左旗,朱日和、额济纳旗,以及河北的张家口和新疆的哈密,其沙尘暴天气与北京的浮尘天气不相关;兰州、海力素、乌鲁木齐、酒泉、榆林5个站点的沙尘暴天气与北京的沙尘暴天气不相关。

可以看出,影响北京地区的沙尘暴路径主要是北方路径和西北路径。北方路径:内蒙古乌兰察布盟和锡林郭勒盟西部→浑善达克沙地→张家口→北京;西北路径:新疆东北部至内蒙古阿拉善盟北部→河西走廊→贺兰山分为南北两路→分别经毛乌素沙地和乌兰布和沙漠→包头、呼和浩特→张家口→北京。北京处在西风环流带上,受地形影响,主导风,尤其春季形成沙尘暴的大风为西北风,每一次沙尘暴过程的风暴中心、过往路径并不相同。

由以上分析不难看出,北京沙尘暴的主要沙尘来源为新疆东北部、阿拉善高原、鄂尔多斯、阴山北坡、浑善达克沙地和坝上高原,有理由相信,只有这些地区的生态环境得到改善,才能减缓华北地区受沙尘暴的影响。

3.5 沙尘暴与土地利用/覆盖的关系分析

根据“3.1.1.3土地利用/覆盖数据来源与处理”得到的三期土地利用/覆盖动态图(图3-5),统计得到中国北方地区3个时期土地利用/覆盖分类结果,见表3-11。根据这个统计结果,分析了从1983年到1990年再到1999年中国北方土地利用/覆盖6种类型的变化趋势,见图3-16。

表 3-11 北方 13 省土地利用分类结果统计表

年 类型	1983 年		1990 年		1999 年	
	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)
森林	892722	17.04	750913	14.56	602351	11.81
灌丛	405169	7.25	573989	10.71	682034	11.90
草地	1558549	28.82	1378924	25.76	1189946	22.12
耕地	794130	15.43	873814	16.23	1019675	18.94
荒漠	1673347	31.28	1746277	32.56	1830012	34.06
水体	8103	0.18	8103	0.18	8103	0.18

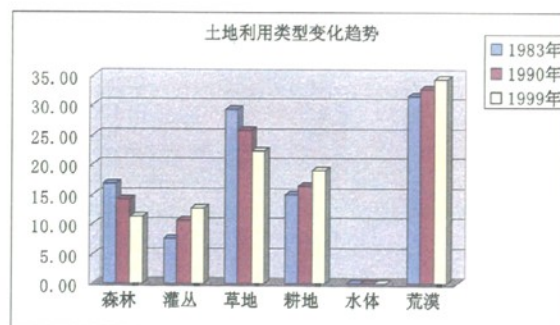


图 3-16 土地利用变化趋势图

中国北方地区20年来土地利用利用结构变化主要特征表现为两个方面。一方面是森林、草地面积的迅速减少,另一方面是灌丛、耕地和荒漠化土地的面积持续增加,只有水体的面积基本上没有变化。其中,森林面积下降了5.23%,草地面积下降了6.7%,灌丛面积增加了4.65%,耕地面积增加了3.15%,荒漠面积增加了2.78%。

为了提取土地利用/覆盖的变化信息,根据地图代数原理,利用1983、1999年两期土地利用/覆盖分类图,计算了可以反映土地利用类型相互转化定量关系的转移矩阵,计算方法如下式(史培军,2000d):

$$C_{ij} = A_{ij}^k \times 10 + A_{ij}^{k+1} \tag{3-8}$$

式中 A_{ij}^k 、 A_{ij}^{k+1} 和 C_{ij} 分别代表 k 和 $k+1$ 时期 i 行 j 列的像元及叠加后得到的像元，这种方法适用于土地利用类型小于 10 的情况，转移矩阵见表 3-12。

表 3-12 1983—1999 年土地利用/覆盖变化转移矩阵

1999 1983		森林	灌丛	草地	耕地	荒漠	水体	小计	
								像元数	%
森 林		7808	1760	1344	1280	0	0	12192	16.9
灌 丛		0	2880	880	1232	192	0	5184	7.2
草 地		96	2400	11968	4368	1972	0	20804	29.0
耕 地		544	2192	1632	6672	0	0	11040	15.4
荒 漠		0	0	0	0	22384	0	22384	31.2
水 体		0	0	0	0	0	128	128	0.2
小 计	像元数	8448	9232	15824	13552	24548	128	71732	
	%	11.8	12.9	22.1	18.9	34.2	0.2		

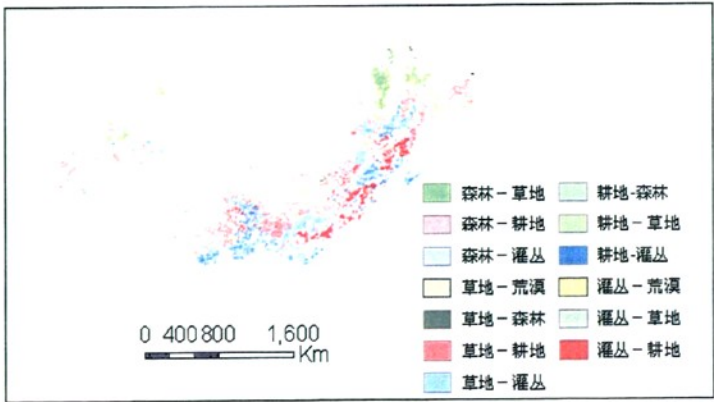


图 3-17 中国北方土地利用/覆盖变化类型空间分布（1983—1999）

转移矩阵只能反映土地利用/覆盖类型间的数量变化，并不能反映这些变化发生的空间位置，不利于在空间上分析变化的特征。因此，利用转移矩阵的计算方法，分析了我国北方 13 省 1983—1999 年土地利用/覆盖发生变化的空间位置分布，并用不同色彩区分了不同的转换类型（图 3-17）。

分析图 3-17 可以看出，1983—1999 年我国北方土地利用/覆盖类型的变化，主要发生在农牧交错区、河北，以及新疆和东北的一些地区。其中，其他类型土地利用类型转化为耕地类型的，基本涉及所有变化区域；转化为灌丛类型的主要

分布在农牧交错区和河北的局部地区,林地和灌丛变为草地的区域主要在大兴安岭边缘地带和北疆一带;土地退化为荒漠的区域主要分布在内蒙古中部以西的局部地区。

3.6 沙尘暴与植被覆盖度的关系

3.6.1 年最大植被覆盖度变化规律

图3—18 反映了北方13省1983—1999年多年平均年最大植被覆盖度的空间分布。计算方法如下式:

$$f_{mean}^{max} = mean(f_i^{max}) \quad (3-9)$$

$$\text{其中: } f_i^{max} = \max(f_j) \quad (3-10)$$

式中: f_{mean}^{max} 、 f_i^{max} 分别表示多年平均年最大植被覆盖度和年最大植被覆盖度, f_j 是*i*年*j*月的植被覆盖度, $i=1, 2, \dots, 17$, $j=1, 2, \dots, 12$ 。

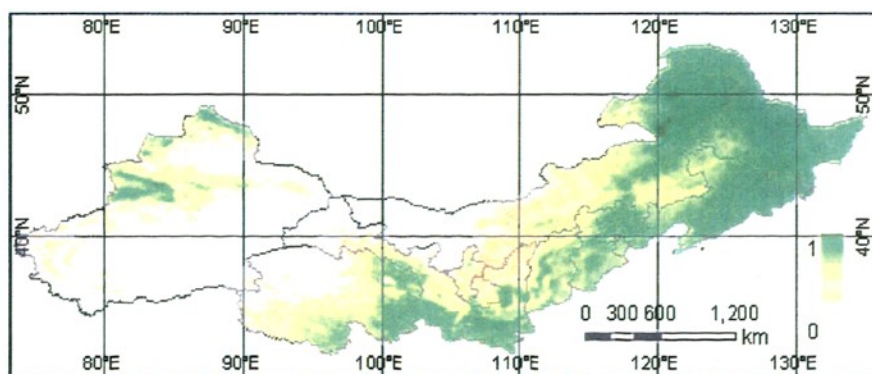


图 3—18 中国北方多年平均最大植被覆盖度空间分布 (1982—1999 年)

17年间平均年最大植被覆盖度数值分布在0~0.97的区间内,基本分布规律是东部高于西部,北部低于南部,森林植被与山地灌丛的植被覆盖率高于其它植被覆盖类型。高值区分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山、太行山、秦岭、天山等以林地和灌丛为主要土地利用/覆盖类型的区域,植被覆盖度大于0.8;青海和新疆南部的部分草原草甸地区、三江平原温带草本沼泽以及东北平原、海河平原、关中盆地等农作区,地表植被覆盖比较好,覆盖度在0.7~0.8之间;农牧交错带

半干旱草原和半干旱荒漠地带,以及河套平原、土默川平原等温带高寒地区一年一熟作物区,植被覆盖度相对较低,绝大部分在0.4~0.7之间;内蒙古中西部和西北地区的沙漠、沙地和戈壁地区,植被覆盖度最低,多年平均年最大植被覆盖度小于0.4,尤其是塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠、准格尔盆地的古尔班通古特沙漠、哈顺戈壁、中央戈壁和巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠等地区,覆盖度低于0.1。

为研究1983~1999年中国北方植被覆盖度的年际变化,计算了每年的平均年最大植被覆盖度 (M_f), 计算方法如下式:

$$M_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}^{\max} \quad (3-11)$$

式中, $f_{ij}^{\max}$ 是坐标为 (i, j) 像元的年最大植被覆盖度, N表示影像中有效像元 (不包括背景部分) 的总数, $N < m \times n$ 。

图3-19 显示了1983~1999年我国北方13省年平均最大植被覆盖度的年际变化,同时,列出了北方156沙尘暴站点沙尘暴日数平均值的年际变化。17年来我国北方地区的植被覆盖度总体上呈波动中增加的趋势,波动范围为0.395~0.487,1983年地表植被覆盖度最低,值为0.395,1994年地表植被覆盖度最高,为0.487。植被覆盖度上升的趋势与沙尘暴日数下降的趋势有着很好的对应关系。

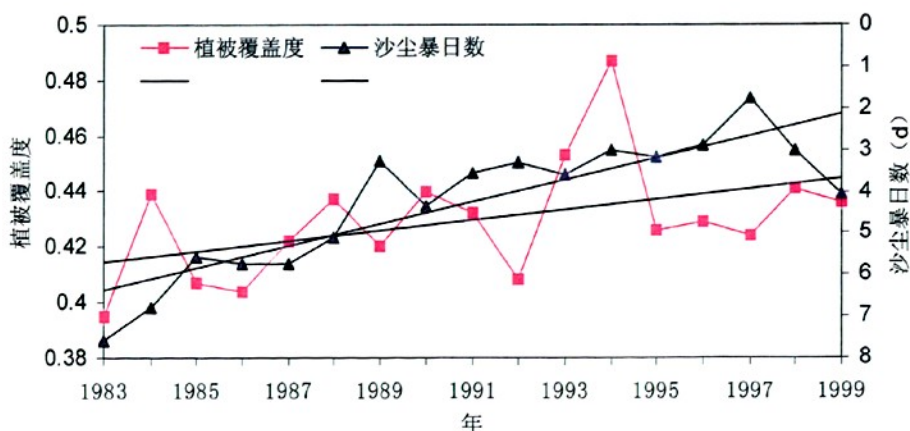


图 3-19 中国北方平均年最大植被覆盖度和平均沙尘暴日数年际变化 (1983—1999 年)

(注: 平均沙尘暴日数坐标轴反序以便对比)

3.6.2 春季和夏季的植被覆盖度变化规律分析

3.6.2.1 植被覆盖度变化强度分析

为了分析1983—2000年我国北方地区植被覆盖度在春季和夏季的变化强度，对时间序列影像数据中相同空间坐标的植被覆盖度特征值数据（计算方法见3.1.1.4中的植被覆盖度计算原理和方法），按（3-12）式分别计算春季和夏季特征值的标准差，以此来表示植被覆盖度变化强度。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (FV_i - \overline{FV})^2}{k-1}} \quad (3-12)$$

其中， FV_i 为第*i*年春季或夏季的植被覆盖度特征值， $\overline{FV}$ 为对应季节18年植被覆盖特征值的平均， $k=18$ 。

标准差反映了各像元灰度值与平均值的总的离散程度。标准差大，说明多年来该像元植被覆盖度波动变化强烈；相反，说明植被覆盖度数值变化较小，基本保持恒定的值。计算结果中标准差的数值范围在0~0.40之间，大部分集中在0~0.25范围内，直方图显示峰值在0.10附近。分析计算结果和相应计算结果直方图，将春季和夏季植被覆盖度变化强度分为4种类型，具体的划分标准如式（3-13）。

$$\begin{cases} \sigma \leq 0.02 & \text{微变化} \\ 0.02 < \sigma \leq 0.06 & \text{低变化} \\ 0.06 < \sigma \leq 0.10 & \text{中变化} \\ \sigma > 0.10 & \text{高变化} \end{cases} \quad (3-13)$$

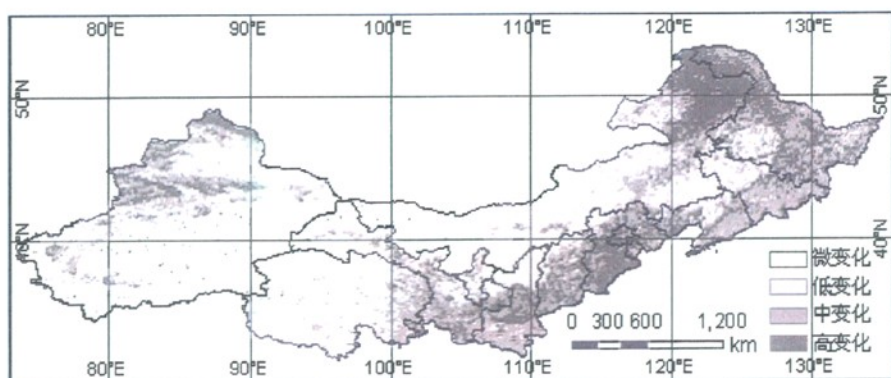
根据（3-13）式，将计算结果分割为植被覆盖度变化强度图（图3-20），从中可以看出1983—2000年中国北方春季和夏季植被覆盖度变化有如下特征：

（1）随季节的不同，多年植被覆盖度变化强度表现出不同的空间分布特征。在春季，植被覆盖度变化强度与植被覆盖度的空间分布有较好的一致性。即植被覆盖度的高、中、低、微变化区与植被覆盖度从高到低相对应（参考图3-18）。高变化区主要分布在东部的大兴安岭、小兴安岭和长白山，新疆的阿尔泰山脉和天山山脉，北京、河北北部，以及山西、陕西、甘肃的局部地区，植被覆盖度一般大于0.7；中变化区主要分布在农牧交错带，以及河套平原、土默川平原等区

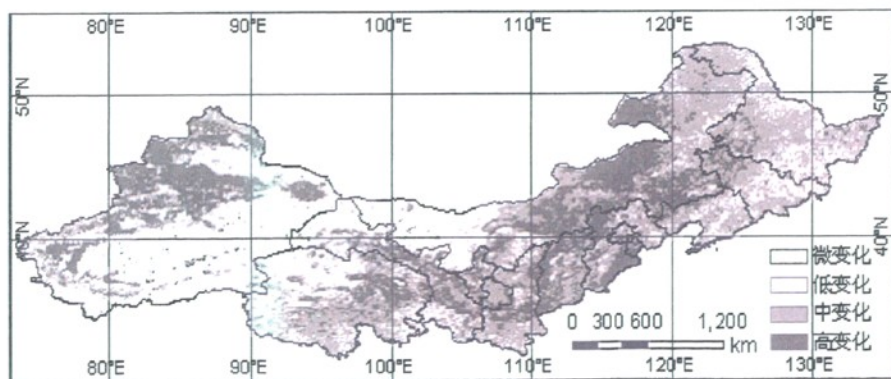
域,植被覆盖度在0.4~0.7之间;低变化区主要分布在内蒙古的锡林郭勒、呼伦贝尔和青海南部地区,植被覆盖度一般小于0.4。在夏季,植被覆盖度变化强度表现出整体西移的现象:春季高变化区变为中变化区,中变化区变为高变化区,低变化区变为中变化区。植被覆盖度的高变化区发生在草原、草甸和农用地以及农牧交错地区,主要分布在内蒙古的呼伦贝尔草原、锡林郭勒草原、科尔沁、土默川和河套边缘,河北的北部和南部,山西的西北部,甘肃和山西的中部,青海的青海湖周边,新疆的北部和塔里木河两岸。

(2) 随季节不同,植被覆盖度的微变化区在空间上则保持相对稳定,主要分布于西北地区的沙漠、沙地和戈壁地区,其中塔里木盆地的大部分地区标准差为0,表明这一区域的低植被覆盖特征20年来基本没有变化。

(3) 根据变化强度从高到低划分,北方13省春季高、中、低、微变化的面积比例分别为17.6%、22.5%、30.1%和29.8%,夏季分别为26.1%、34.3%、22.6%和17.0%,表明夏季的植被覆盖度强变化范围要大于春季。



(a) 春季植被覆盖度变化强度分布



(b) 夏季植被覆盖度变化强度分布

图 3-20 中国北方 1983—2000 年春季和夏季植被覆盖度变化强度分布

3.6.2.2 植被覆盖度变化趋势分析

根据上文计算的我国北方1983—2000年春季和夏季植被覆盖度特征值图像，取每年春季和夏季植被覆盖度特征值平均，绘出图3-21所示变化趋势图。

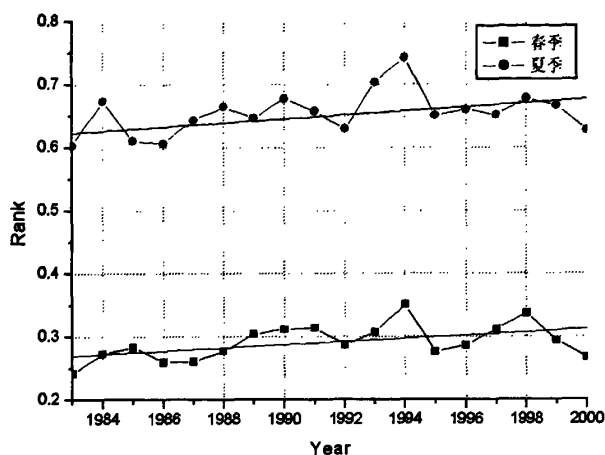


图 3-21 中国北方植被覆盖度春季、夏季特征值平均值年际变化 (1983-2000)

分析图3-21可以看出：

- (1) 我国北方春季和夏季的植被覆盖度整体上呈上升的趋势，其中1994年达到18年来的最高值；
- (2) 春季和夏季植被覆盖度波动的特点基本一致，但夏季的波动要强于春季；
- (3) 从1998年开始，春季和夏季的植被覆盖度特征值持续下降，到2000年已经接近历史最低值。

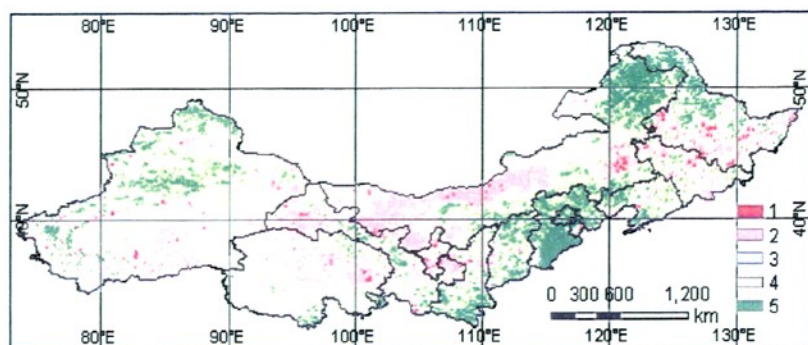
为了从空间上研究1983—2000年我国北方春季和夏季的植被覆盖度变化趋势，用每年春季和夏季时间序列的植被覆盖度特征值图像分别与年份进行回归分析，得到Pearson相关系数（R），用来表示植被覆盖度的变化趋势。Pearson相关系数的计算方法如公式（3-14）：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3-14)$$

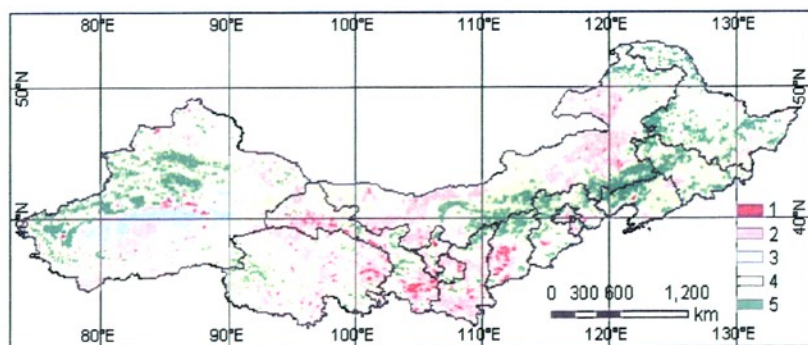
其中, X 表示春季或夏季的植被覆盖度特征, Y 表示年, $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别表示 X 、 Y 的多年平均值。

设定: 相关系数(R)为负值的区域, 其植被覆盖度呈减小趋势; R 值为正值的区域, 则植被覆盖度呈增加趋势; 如果 R 值等于0, 趋势不确定; 如果 R 值通过0.05的显著性水平($p < 0.05$), 则认为植被覆盖度减小或增加趋势显著。

图3-22显示了1983—2000年春季和夏季我国北方植被覆盖度的变化趋势。结果表明:



(a) 春季变化趋势



(b) 夏季变化趋势

图 3-22 1983—2000 年春季和夏季植被覆盖度变化趋势

1.显著减小 2.不显著减小 3.趋势不确定 4.不显著增加 5.显著增加

(1) 春季占北方13省面积67.4%的地区植被覆盖度呈增加趋势, 其中11.7%的地区增加趋势显著($p < 0.05$)。这些显著增加的地区主要集中在大小兴安岭、太行山、秦岭、天山和阿尔泰山, 以及海河平原、河套平原等, 土地利用覆盖类型主要是林地和农业用地。植被覆盖度呈下降趋势的地区大部分集中在干旱、半

干旱地区，其中显著减少的地区所占比例很小，仅占0.8%，分布在科尔沁沙地、东北平原、西北的沙漠戈壁等地区；

(2) 夏季有61.7%的地区植被覆盖度呈增加趋势，显著增加的地区占总数的10.3%，分布在新疆塔里木盆地西北地区的天山山脉、东北平原西南部、河北山西北部、内蒙古土默川平原和河套地区。植被覆盖度减少的地区所占比例大于春季，也主要分布在西北干旱、半干旱地区，显著减少的区域占1.1%。内蒙古的锡林郭勒和呼伦贝尔草原植被覆盖度呈下降趋势，但并不显著，这与春季有所不同。

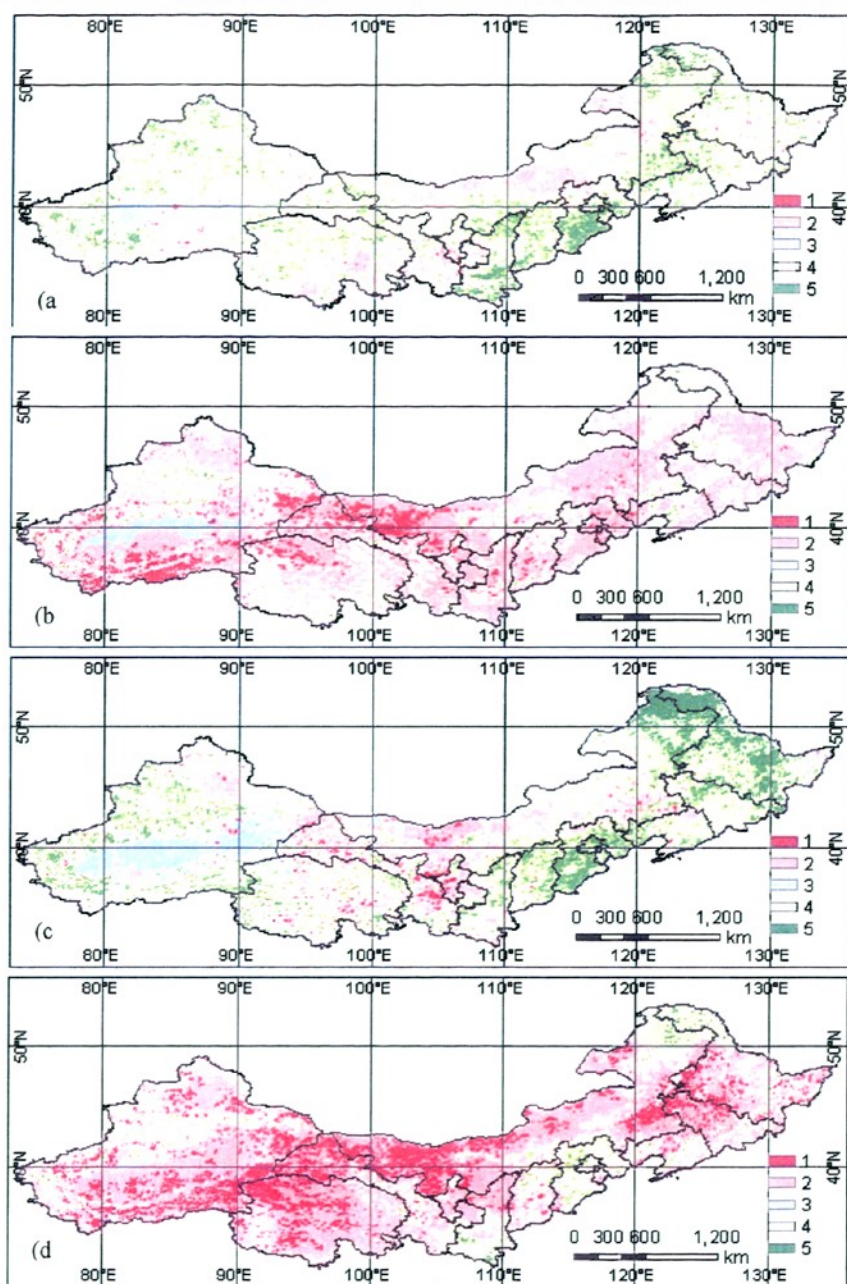
分别以1983—1990年和1991—2000年数据表示80年代和90年代的时间序列的植被覆盖度数据，用同样的方法分别分析了80、90年代春季和夏季植被覆盖度的变化趋势，结果见表3—13和图3—23。

表 3—13 1983—2000 年春季和夏季植被覆盖度变化趋势统计表

类型	春季						夏季					
	1983-2000		1983-1990		1991-2000		1983-2000		1983-1990		1991-2000	
	像元数	%	像元数	%	像元数	%	像元数	%	像元数	%	像元数	%
显著减少	825	0.8	241	0.2	5020	4.9	1151	1.1	1379	1.3	12031	11.6
不显著减少	29215	28.2	21001	20.3	60391	58.4	32253	31.2	26119	25.3	60704	58.7
趋势不确定	3682	3.6	6269	6.1	6078	5.8	6270	6.1	9880	9.6	3132	3.0
不显著增加	57644	55.7	67086	64.9	31078	30.0	53122	51.4	51730	50.0	26156	25.3
显著增加	12055	11.7	8824	8.5	854	0.8	10625	10.3	14313	13.8	1398	1.4

图3—23a和图3—23b分别是80年代和90年代春季我国北方植被覆盖度变化趋势的空间分布。80年代，中国北方大部分地区植被覆盖度呈增加趋势，占整个面积的73.4%，其中显著增加的地区占8.5%；20.5%的地区植被覆盖度呈减小趋势，显著减小的地区仅占0.2%。90年代，中国北方63.3%的地区植被覆盖度却呈下降趋势，其中显著下降的地区占4.9%；植被覆盖度显著增加的地区也仅占0.8%。

与春季相对比，我国北方植被覆盖度80年代和90年代夏季的变化趋势，与春季有着相同的规律，如图3—23c和图3—23d。在80年代，中国北方大部分地区植被覆盖度呈增加趋势，占总面积的63.8%，显著增加的地区占13.8%，高于同年春季显著增加的比例（8.5%）。与春季相同，90年代夏季中国北方大部分地区植被覆盖度呈减小趋势，占70.3%，其中显著减小的地区占11.6%，分布



(a) 80 年代春季 (b) 90 年代春季 (c) 80 年代夏季 (d) 90 年代夏季

图 3—23 中国北方 20 世纪 80 和 90 年代春季和夏季植被覆盖度变化趋势空间分布

1.显著减小 2.不显著减小 3.趋势不确定 4.不显著增加 5.显著增加

在科尔沁沙地、浑善达克沙地、阴山山脉北部、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、河西走廊、哈顺戈壁、库姆塔格沙漠、柴达木盆地西北部和塔克拉玛干沙漠南部

等地区,所占比例也高于春季显著减小的地区。植被覆盖度呈增加趋势的面积占总面积的26.7%,其中显著增加的地区占1.4%,分布也比较分散。

不同年代、不同季节的植被覆盖度变化趋势不确定的地区大部分集中在塔里木盆地北部,也是植被覆盖度值最小的区域,所占比例最大值(9.6%)出现在80年代夏季,最小值(3.0%)出现在90年代夏季。

植被覆盖度的动态变化不仅受气候变化的影响,也受人为活动的干扰。分析上述结果可知,尽管18年来(1983—2000年)我国北方大部分地区植被覆盖度呈增加的趋势,但从年代级的变化规律来看,并不符合这种规律。无论是春季还是夏季,80年代的变化趋势基本与18年的趋势一致,即大部分区域呈增加趋势;而90年代却与18年的总趋势相反,即大部分区域植被覆盖度呈下降趋势。18年的数据以及80年代和90年代数据都显示出植被覆盖度减少的地区分布在我国西北和华北等地区,地表覆盖类型是草地和沙漠、沙地和戈壁,尤其到90年代,植被覆盖度减小的地区扩展到了东北地区。这种现象与不同地区的气候背景特点以及该地区近20年的气候波动有关。从我国北方代表站近20年来的气候数据来看,我国北方的气温都呈上升趋势,90年代增温比80年代更为显著,同时80年代北方地区的降水都呈增加趋势,但90年代则有减小的趋势,使得西北干旱荒漠区变得更加干旱,从而不利于植被生长。

3.6.3 植被覆盖度对沙尘灾害的影响

对比第二章研究结果,中国北方的沙尘暴高发区对应着低植被覆盖的区域,土地利用类型包括荒漠、耕地和退化草地,按行政区划分,沙尘暴灾情较严重的省份包括宁夏、青海、甘肃、内蒙、新疆和陕西。

土地利用/覆盖类型中,耕地和荒漠面积的增加,增加了沙尘灾害的风险。西北的低植被覆盖地区为沙尘暴天气储备了丰厚的沙尘源物质,同时植被状况相对较好的农牧交错区、河套平原、土默川平原等地区,植被覆盖度年际变率较大,说明这些地区的植被覆盖受气候波动影响较大,是沙尘灾害发生的脆弱区,使得中国北方地区的沙尘灾害孕灾环境极不稳定,凡遇气候冷干年份,植被覆盖低下,有些区域甚至无植被覆盖沦为裸地,成为沙尘暴发生的沙源地,加之北方地区春季多大风天气,一旦沙尘暴发生的动力条件具备,极易发生大范围的沙尘灾害。

近20年来,中国北方地区植被覆盖度呈现波动中增长的趋势,这与这一区域沙尘暴日数呈下降的趋势相耦合。年代际趋势表明:20世纪80年代的大部分区域植被覆盖度呈增加趋势,20世纪90年代大部分区域则呈下降趋势,尤其是华北和西北的干旱、半干旱地区下降趋势显著,结合这一期间土地利用/覆盖类型转化的特点,可以认为,尽管中国北方地区植被覆盖状况整体呈上升的趋势,但在华北和西北的干旱、半干旱区(尤其是内蒙古中西部地区)土地退化严重,荒漠化在加剧,这与近年来这一区域强与特强沙尘暴灾害的增加趋势有着内在的、必然的联系。例如,从1998年开始,北方地区的植被覆盖度呈下降的趋势,与沙尘天气上升的趋势相对应,特别是2000—2002年,我国北方沙尘暴频次显著增加。可见,中国北方植被覆盖状况是影响沙尘暴频次变化地重要因素,当植被覆盖度下降时,沙尘暴日数呈现出增加趋势,当植被覆盖度上升时,沙尘暴日数呈现出减少趋势。

3.7 沙尘暴灾害的形成机理探讨

综上所述,沙尘暴灾害是地球表层“天—地—人”相互作用的复杂过程,即沙尘暴灾害的发生是特定的气候背景、脆弱的生态环境和人类活动的干扰共同作用的结果。沙尘暴天气必须具备三个条件:强风、沙源、热力不稳定,人类活动对沙尘暴的发生具有加强作用。可见,沙尘灾害的形成机制研究应该从气候背景、环境因子、人类活动三方面进行探讨,见图3-24,分析的流程见图3-25。

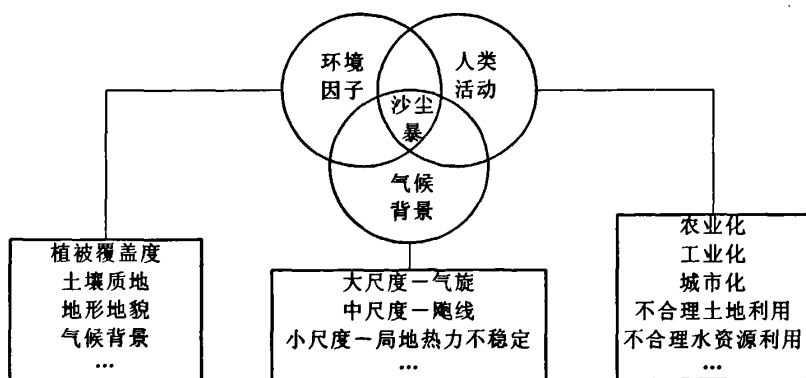
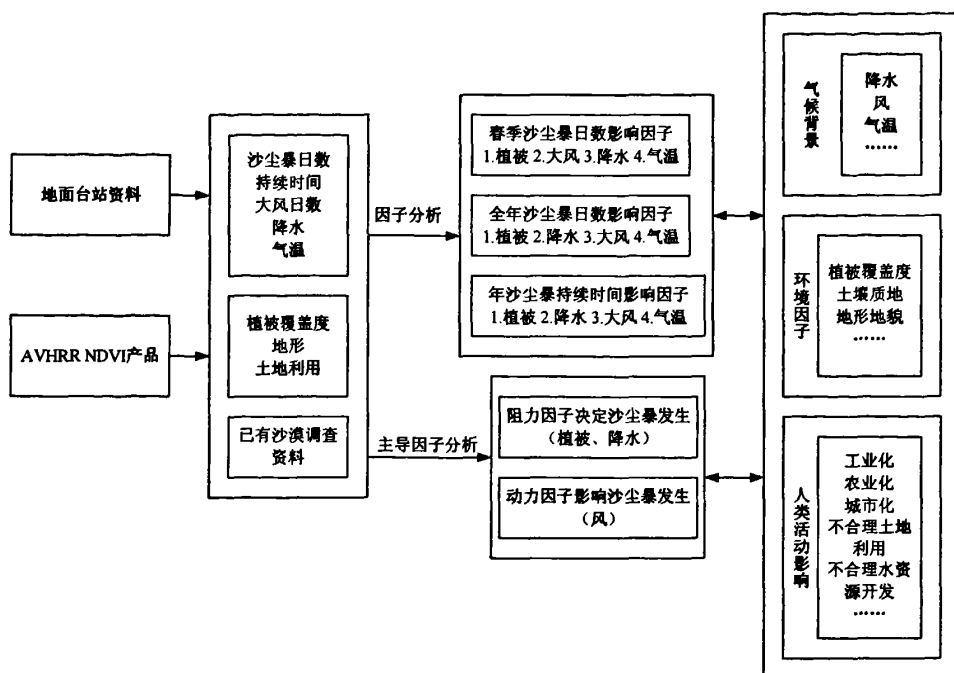


图 3-24 沙尘暴灾害形成机理概念模型



气候背景作为沙尘暴形成的动力条件，其中风是沙尘暴灾害的主要致灾因子，它的大小决定着空气中的沙尘数量、粒径、高度和范围，沙尘暴的动力条件来自大尺度的天气形式（气旋）、中尺度的干飚线与局地热力不稳定条件。降水和气温是影响沙尘暴频次变化的重要下垫面参数，降水量减少、地表植被稀疏、冬季冷干、春季温暖是沙尘暴发生的理想条件。

脆弱的自然生态环境既是沙尘暴灾害的孕灾环境，也是承灾体。我国北方干旱、半干旱地区降水稀少，沙质地表广布，植被覆盖度低，大面积的沙漠及沙漠化土地为沙尘暴的发生提供了丰富的物质来源，同时，地形地貌和气候背景也是沙尘暴孕灾环境的重要环境因子。

人类是沙尘暴灾害的承灾体，同时也是致灾因子。自人类文明以来，并随人口的不断增长和经济活动的日益频繁，人类活动贯穿于农业化、工业化、城市化的过程中，由于不合理的土地利用、不合理的水资源利用，在全球气候变化的背景下，使得森林减少、草地退化、生态用水短缺、沙漠化土地面积不断增加，沙

尘暴源区面积人为的扩大,强沙尘暴愈演愈烈。可见,人类活动的干扰逐渐成为沙尘暴频发的重要促发因素。

3.8 小结

(1) 中国北方沙尘灾害是风、环境因子和人类活动共同作用的结果,沙尘暴发生日数和持续时间与四季的降水、温度、植被覆盖度和大风日数有很大的相关性。其中,与降水量和植被覆盖度呈负相关关系,与大风日数和温度呈正相关关系;上年夏季和本年春季的降水量,以及上年夏季的植被覆盖度和本年春季的温度相关程度最为显著。降水和温度主要通过影响地表植被覆盖度来影响着区域沙尘暴的发生频率和持续时间。沙尘暴的频繁发生主要是由于降水的持续减少使得地表干燥及植被覆盖度降低造成的。

(2) 影响春季、全年沙尘暴日数和年沙尘暴持续时间的各因子中,植被覆盖度的周期变化是影响沙尘暴频率的重要影响因子,其次是大风日数和降水量的影响,温度对沙尘暴的影响是最小的,但也是不可忽视的因子。

(3) 因子分析结果表明,大风日数和温度组成沙尘暴产生的动力因子,植被覆盖度和降水组成沙尘暴形成和搬运的阻力因子。动力因子与沙尘暴日数和持续时间的相关系数远低于阻力因子,阻力因子是沙尘暴产生的内因所在,而动力因子是外因,当植被覆盖差,降水少,达到了沙尘暴发生的临界状态时,动力因素才能成为沙尘暴产生和搬运的主导因子,从而影响沙尘暴的产生和发展。可见,改善北方干旱半干旱地区的植被覆盖,是控制沙尘暴之根本。

(4) 中国北方大风日数的空间分布与沙尘暴年日数的空间分布并不完全一致,说明沙尘暴的发生频次除了受到区域大风日数的影响外,同样受到下垫面的地形地貌、植被覆盖等条件的影响。

(5) 与北京沙尘天气相关的气象站点主要分布在内蒙古中西部、甘肃、河北的张家口,以及新疆东部和青海北部。影响北京地区的沙尘暴路径主要是北方路径和西北路径,北方路径:内蒙古乌兰察布盟和锡林郭勒盟西部→浑善达克沙地→张家口→北京;西北路径:新疆东北部至内蒙古阿拉善盟北部→河西走廊→贺兰山分为南北两路→分别经毛乌素沙地和乌兰布和沙漠→包头、呼和浩特→张家口→北京。北京沙尘暴的主要沙尘来源为新疆东北部、阿拉善高原、鄂尔多斯、

阴山北坡、浑善达克沙地和坝上高原,只有这些地区的生态环境得到改善,才能减缓沙尘暴对华北地区的影响。

(6) 土地利用/覆盖变化和植被覆盖状况与生态环境安全水平密切相关,它是人类活动和气候变化对地球表层作用的结果。土地利用/覆盖格局的变化,以及土地退化、荒漠化带来的植被覆盖度下降,导致生态环境安全水平大幅下降,容易引发沙尘暴这一生态环境灾害。研究结果也表明,土地利用/覆盖变化及植被覆盖度与沙尘暴频次和强度变化有着显而易见的耦合关系,因此,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。

参考文献

- [1] Asrar G, Kanemasu E T, Jackson R D et al. Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17: 211-220
- [2] Tucker C J, Holben B N, Elgin H J et al. Remote Sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11: 171-190
- [3] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 1533-1543
- [4] Defries R S, Hansen M C, Townshend J R G. Global continuous fields of vegetation characteristics: a linear mixture model applied to multi-year 8km AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6-7): 1389-1414
- [5] 史培军, 灾害研究的理论与实践, 南京大学学报(自然科学版), 1991, (自然灾害研究专辑): 37-42
- [6] 周淑贞, 气象学与气候学, 北京: 人民教育出版社, 1981, 110-112
- [7] 任阵海. 浅谈我国的生存环境问题. *气候与环境研究*, 1999, 第1期
- [8] 张晓龙, 张艳芳, 赵景波, 近年来中国沙尘暴发生特点、成因及其防治对策, *干旱区资源与环境*, 2001, 15(3): 31-36
- [9] 王涛, 陈广庭, 钱正安等, 中国北方沙尘暴现状及对策, *中国沙漠*, 2001, 21(4): 322-327
- [10] 朱震达, 陈广庭, 中国土地沙质荒漠化, 北京: 科学出版社, 1994
- [11] 陈广庭, 近50年北京的沙尘天气及治理对策, *中国沙漠*, 2001, 21(4): 402-407.

- [12] 史培军, 我国风沙灾害加剧的成因分析及防沙治沙科技对策, 科学技术部, 2000c.
- [13] 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, 56 (3): 316—322
- [14] 刘晓春, 曾燕, 邱新法等, 影响北京地区的沙尘暴, 南京气象学院学报, 2002, 25 (1): 118—123
- [15] 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 深圳市土地利用变化机制分析, 地理学报, 2000d, 55 (2): 151—160

第四章 植被参数变化对沙尘起沙影响机理的数值模拟研究

本章分析了叶面积指数和植被覆盖变化对沙尘暴起沙过程的影响机理。在一个集成的沙尘数值模拟预报系统中,将模拟区域的叶面积指数分成了0、0.5、3.0和卫星反演的实测值4种,模拟结果发现,叶面积指数对沙尘的数值模拟有较大的影响,利用卫星反演的叶面积指数计算沙尘浓度时,沙尘浓度的变化介于叶面积指数为0~0.5之间。将植被覆盖度数据分成0、0.2和卫星反演的实测值3个类型。当植被覆盖度都为0时沙尘浓度最大;当植被覆盖度为0.2时,沙尘浓度出现的范围明显减少。

4.1 前言

沙尘天气作为一种灾害性天气事件,对它的数值模拟和预报具有重要意义。沙尘天气的发生、发展包含复杂的物理过程,迄今尚未完全认识其物理本质。它的研究需要多学科知识的综合,涉及到大气科学(如气候学、天气学、云物理学、大气化学等)、土壤物理学、表层动力学、生态学,也包括了农学和土壤学及土地管理学等。国内外对沙尘天气进行了大量的研究,取得了一批重要成果。Gillette等(1988)认为地表的沙尘排放量是风速和地表状况(包括土壤水分和地表植被等)的函数;贺大良等(1986)利用室内风沙环境风洞对影响土壤风蚀起沙的风况、土壤表面的覆盖状况、地表物质组成和人为因素等影响因子进行了初步的模拟试验。Shao等(1997)认为风蚀起沙(尘)的阻力主要来源于地表,临界摩擦速度的大小正反映了这种阻力的强弱。国内研究人员对起沙过程与地表参数的关系也进行了研究(申彦波等,2005),本文主要分析叶面积指数、植被变化对风蚀起沙的影响。

4.2 集成的沙尘天气数值预报系统

由于沙尘天气产生的物理机制复杂,影响其发生、发展的环境因素众多。我们对沙尘天气的预报主要基于沙尘天气集成预报系统。该系统包括区域大气模式、陆面过程模式、风沙模式(包括风蚀、输送和沉降模式)和地理信息系统。

大气模式为风沙模式提供风速、降水等物理场；陆面模式预报土壤水分、摩擦速度等物理量的变化，同时为风蚀模式提供其它参数；风沙模式主要预报沙尘的源地、浓度、与沉降传输；地理信息系统提供了土壤类型、植被覆盖、植被类型、叶面指数等参数，为大气、陆面与风沙模式提供了必须的输入参数。该系统是一个比较完善的、具有国际先进水平的沙尘天气数值预报系统。结构如图 1 所示。

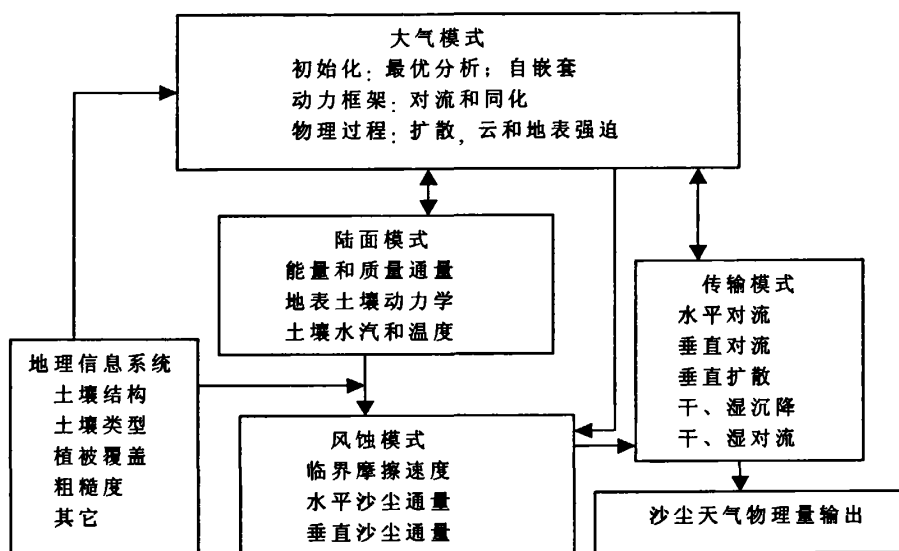


图 1 集成沙尘天气数值预报系统结构图

Figure 1: The Structure of Integrated Numerical Simulation and Forecast System of Dust Weather

大气模式由澳大利亚 New South Wales 大学开发研制，它是一个高分辨的有限区域模式，该模式对大气动力过程有较先进的计算方法，对模式物理过程处理比较复杂，包括辐射、云、对流、湍流扩散、大气边界层方案（Leslie and Wightwick, 1995）。大气模式和其它三个模式系统耦合起来。

陆面方案模拟大气、土壤和植被之间的能量、动量和质量交换。在风蚀模拟中陆面模式计算摩擦速度和土壤水汽作为输出。风蚀方案从大气模式中获得摩擦速度，从陆面方案中获得土壤水汽，从地理信息系统资料中获得其它空间分布参数，这样风蚀模式用来预报不同粒径的水平沙通量和起沙率。为了预报沙尘起动、传输和沉降，风蚀模式需要从大气模式中获得风场、湍流扩散和降水。利用集成的沙尘天气数值预报系统进行沙尘天气预报时，首先运行大气模式，接着运行陆

面和风蚀方案，最后计算沙尘输送和沉降。

4.2.1 模式的输入和嵌套

集成的沙尘天气数值预报系统和国家气象中心 T213 全球业务模式嵌套运行，T213 模式的分析和预报结果为沙尘天气数值预报系统提供初始场和边界条件。在沙尘模式预报试验中，我们开发了模式的前处理接口程序，以读取 T213 模式的预报场资料，并进行处理和格式转换。它首先将 T213 模式的输出量值水平插值到区域大气模式的预报范围内，再将其等压面的量值插值到区域大气模式的等 σ 面层上。

4.2.2 地理信息系统

模式的运行涉及到许多地面参数。它们包括：植被类型、植被叶面积指数 (LAI)、植被高度、植被侧面积指数、植被反照率、植被覆盖率、土壤质地类型以及陆地与海洋的分布。导出这些参数的最基本资料是土壤类型、植被类型与叶面积指数。

在对一些地面参数的反演与准备过程中，我们使用了地理信息系统技术与遥感技术。大范围的地表植被资料，如植被叶面积指数，不可能通过建立稠密的观测网来实际观测，这时遥感为我们提供了获得大范围植被叶面积指数的途径。通过气象卫星的遥感资料 (NOAA AVHRR) 或对地观测卫星的遥感资料 (MODIS) 可获得归一化差异植被指数 (NDVI)。该指数对绿色植被表现敏感，可以对农作物和半干旱地区降水量进行预测，常被用来进行区域和全球的植被状态研究。也可以利用该指数的季节特征来对植被进行分类。

4.2.3 风蚀方案

风蚀方案是整个集成沙尘天气数值预报系统的核心，对风蚀机理的深刻认识是模拟沙尘天气的基础。以下简要介绍模式中所考虑的和沙尘天气相关的主要物理量。

4.2.3.1 水平沙通量

将土壤粒子区分为沙、尘两类。由引入临界粒子尺度 d_c 来决定。凡 d_c 满足方案 $w_t(d_c) = \alpha_d k u_*$ 。其中 w_t 是粒子末端速度, $k=0.4$ 是 Von-Karman 常数, α_d 是一个经验参数, 通常设为 0.5 到 1。 d_c 的意思是小于 d_c 的粒子容易被吹到大气中, 大于 d_c 的粒子不容易被吹到大气中。对, $\alpha_d = 0.5$, $u_* = 0.5 \text{ ms}^{-1}$, d_c 大约为 $35 \mu\text{m}$ 。一定粒径沙粒子的跳跃在起沙过程中扮演着重要角色。给定一个粒径 d_s , 气流方向的水平跳跃通量 $\tilde{Q}$ 利用模式 (Owen, 1964) 计算得到:

$$\begin{cases} Q(d_s) = \frac{C_s \rho u_*^3}{g} \left[1 - \frac{u_{*t}(d_s)}{u_*} \right] \left[1 + \left(\frac{u_{*t}(d_s)}{u_*} \right)^2 \right] & (u_* \geq u_{*t}) \\ Q(d_s) = 0 & (u_* \leq u_{*t}) \end{cases} \quad (1)$$

其中 c_0 为量级为 1 的系数, ρ 为空气密度, g 为重力加速度, u_* 是摩擦速度, u_{*t} 是临界摩擦速度, 它是 d_s 的函数。

4.2.3.2 起沙

在本模式中考虑了三个起沙机理: 气动卷积、跳跃碰撞、聚合分解。由这三种机理产生的起沙率可表示为:

$$F = F_a + F_b + F_c \quad (2)$$

在沙尘暴模拟中, 我们将粒子分为 I 档, 每一档粒子具有平均尺度 d_i ($i=1, \dots, I$), 增量为 Δd_i 。在本研究中, 我们集中研究三档粒子尺度, 分别为: $d \leq 2 \mu\text{m}$; $2 \mu\text{m} \leq d \leq 11 \mu\text{m}$; $11 \mu\text{m} \leq d \leq 22 \mu\text{m}$ 。对于这些不同档的粒子, 沙通量 F_1, F_2, F_3 可以估计为:

$$F_1 = \int_0^{2.5\mu m} \tilde{F}(d) p_s(d_s) \delta d \quad (3)$$

$$F_2 = \int_{2.5\mu m}^{10\mu m} \tilde{F}(d) p_s(d_s) \delta d \quad (4)$$

$$F_3 = \int_{10\mu m}^{22\mu m} \tilde{F}(d) p_s(d_s) \delta d \quad (5)$$

相应地, 对于这三档粒子尺度的沙尘粒子浓度分别为 c_1, c_2, c_3 。

4.2.3.3 沙尘传输和沉降

Lu and Shao[2001]描述了沙尘输送和沉降。假设第 i 类粒子的浓度为 c_i , 那么总的沙尘浓度为:

$$c_d = \sum_{i=1}^I c_i \quad (6)$$

c_i 的演变遵循守恒方程, 在 σ 坐标系中 ($\sigma = p/p_s$, 其中 p 为大气压强, p_s 为地表大气压强) 写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_s c_i}{\partial t} + \frac{\partial p_s u c_i}{\partial x} + \frac{\partial p_s v c_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_i (p_s \sigma + g \rho w_{ii}) = \\ p_s \frac{\partial}{\partial x} K_{ph} \rho \frac{\partial c_i / \rho}{\partial x} + p_s \frac{\partial}{\partial y} K_{ph} \rho \frac{\partial c_i / \rho}{\partial y} + \frac{g^2}{p_s} \frac{\partial}{\partial \sigma} K_{pz} \rho^3 \frac{\partial c_i / \rho}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (7)$$

边界条件:

$$c_i (p_s + g \rho w_{ii}) - \frac{g^2}{p_s} K_{pz} \rho^3 \frac{\partial c_i / \rho}{\partial \sigma} = g \rho (F_i - F_{di}) \quad \text{当 } \sigma = 1 \quad (8)$$

$$\frac{\partial c_i / \rho}{\partial \sigma} = 0 \quad \text{当 } \sigma = 0 \quad (9)$$

在上面的方程中, w_{ii} 和 F_{di} 分别为针对第 i 类粒子的沉降速度和沙尘沉降率。

u, v, σ 是风速。水平扩散率 K_{ph} 被认为在 x, y 方向是相等的。垂直扩散率 K_{pz} 是一个粒子尺度函数, 通过对中性粒子的涡动扩散的修正来估计。

沙尘粒子仅仅通过干沉降被清除到地面。由于沉降和湍流扩散引起的沉降率可以被模拟为:

$$F_{di} = c_{i0}(w_{ti} + v_{di}) \quad (10)$$

其中 c_{i0} 为 c_i 在地面的值。干沉降速度 v_{di} 遵循 Raupach et al. [2001] 的参数化方案。通常沉降速度 w_{ti} 是一个粒子尺度函数，湿沉降没有考虑。

4.2.4 模式系统预报性能分析

本文所用的集成的沙尘天气数值预报系统从 2002 年开始研究开发，模式预报结果与观测资料对比分析 (song, 2004, song et al., 2007, 2006, Shao et al., 2003,) 表明，该模式系统对东北亚地区发生在春季的沙尘天气具有较好的模拟和预报力。

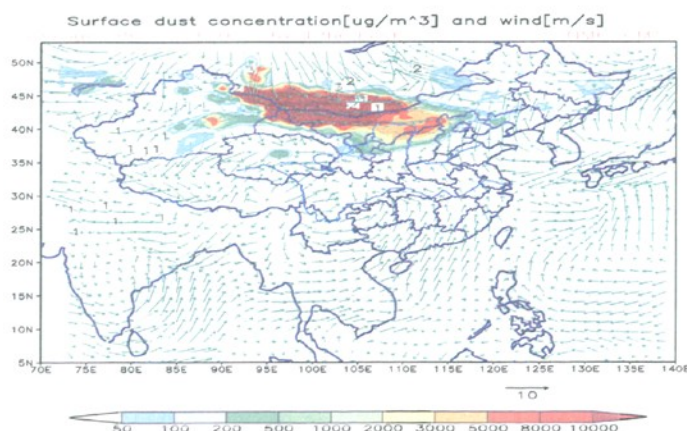


图2 2005年5月1日20点(北京时)起报的未来42小时的地面沙尘浓度和观测实况 (1代表浮尘、2代表扬沙、3代表沙尘暴，红色阴影区为模拟的地面沙尘浓度)

Figure2 42h forecast surface dust concentration and observations records (1: dust-in-suspension, 2: floating dust, 3: dust storm)

图2为沙尘天气业务数值预报系统预报的42小时的地面沙尘浓度，通过和地面观测资料(1, 2, 3分代表代表浮尘、扬沙、沙尘暴天气记录)的比较可以看出，该系统的预报的地面沙尘浓度出现的范围与实际观测比较接近。模式的预报性能在2002到2007年春季的业务预报中得到了充分的检验，预报结果是可信的。

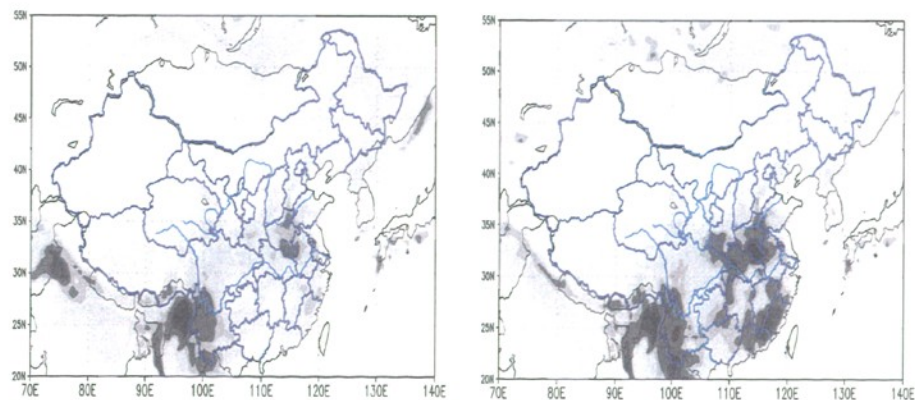
4.3. 叶面积指数对风蚀起沙的影响

4.3.1 叶面积指数

在沙尘暴的数值模拟中,考虑植被对临界摩擦速度的影响时,需要用到正面面积指数进行修正。正面面积指数与植被的叶面积指数成正比。叶面积指数是一个生物物理学参数,它表示每单位面积中表现出的最大叶面积。叶面积指数可以用标准的归一化植被指数(NDVI)得到。McVicar 等(1996)发现叶面积指数 L_A 与 NDVI 有下列关系:

$$LAI=4.65+4.24 \times (1+NDVI)/(1-NDVI) \quad (11)$$

在沙尘暴的数值模拟中,我们使用了卫星反演的叶面积指数。希望通过这个参数反映地面植被的生长情况,提高模式的预测能力。但是叶面积指数到底对沙尘浓度有多大的影响还不清楚。我们的敏感性试验就是想搞清楚这个问题。图3是2002年3月的卫星反演的叶面积指数分布图,可以看出我国北方地区叶面积指数都在3以下。在我国35°N以北、120°E以东绝大多数地区的叶面积指数值小于0.5,在新疆、内蒙西部、甘肃西北部等叶面积指数大多在0和0.1之间,这也与我国沙尘天气频发区相一致。



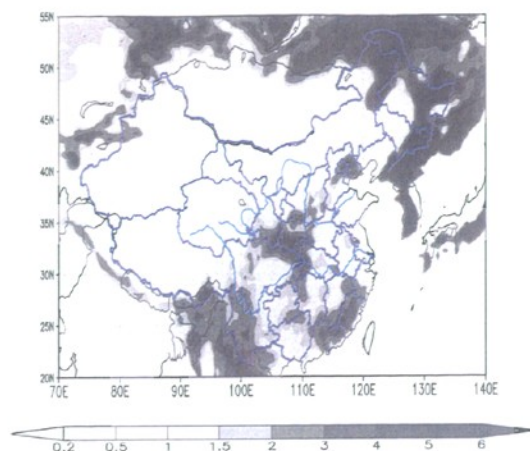
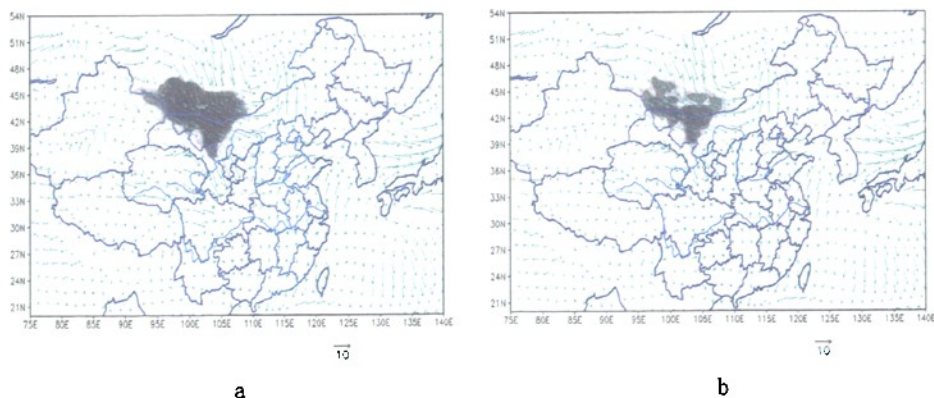


图3 2002年3月、4月、5月叶面积指数的分布图

Figure 3: Leaf area index distribution inversed by satellite in March, April and May, 2002

3.2 叶面积指数变化对风蚀起沙的影响

根据 Sehmel (1980) 对叶面积指数的总结, 叶面积指数为 0.5 表示自然的草场; 3 表示灌溉和肥沃的草场; 3~5 是成排的成熟农作物; 4~6 是落叶森林; 更大的值表示常绿森林。对于森林, 叶面积指数可以达到 10。为了使试验能反映不同植被覆盖情况下的模拟结果, 我们将 $75^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内的叶面积指数数据分成了 0、0.5、3.0 和卫星反演的实测值 4 种。



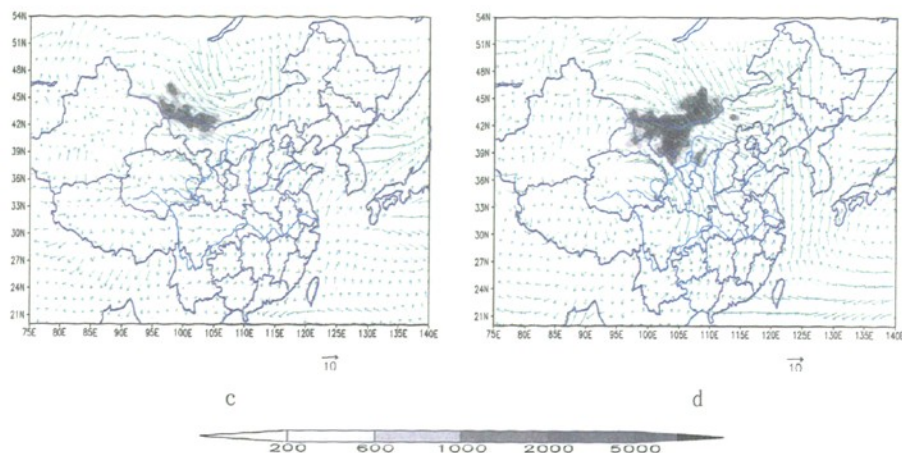
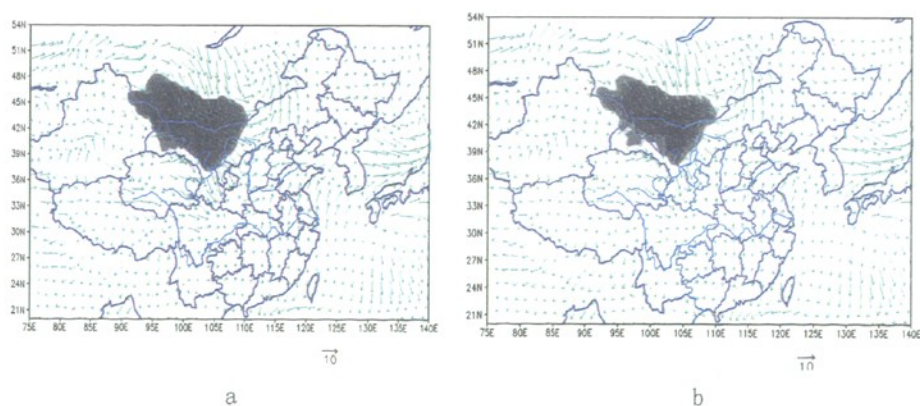


图 4 叶面积指数为 0(a)、0.5(b)、3(c)、卫星反演的实测值(d) 情况下模拟的沙尘垂直通量

Figure4: Simulated vertical dust flux under the condition of LAI 0(a),0.5(b),3.0(c) and the measured value of satellite inversion

从图 4 可以看出，当叶面积指数都为 0 时沙尘垂直通量最大；当叶面积指数为 0.5 时，沙尘垂直通量的出现的范围明显减少，当叶面积指数为 3 时，沙尘垂直通量只在小范围内出现，而且量值也减少到 $600 \mu g m^{-3}$ 。



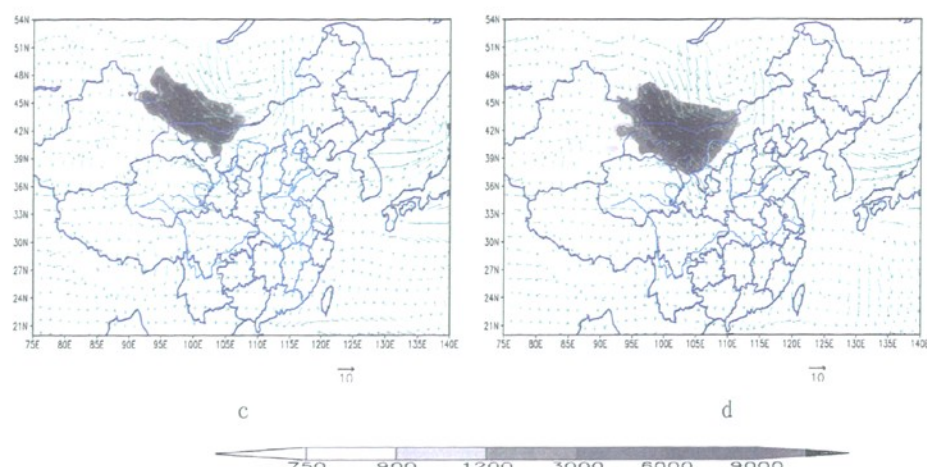


图 5 叶面积指数为 0(a)、0.5(b)、3(c)、卫星反演的实测值(d) 情况下模拟的沙尘浓度分布

Figure5: Simulated dust concentration distribution under the condition of LAI 0(a),0.5(b),3.0(c) and the measured value of satellite inversion

图 5 是叶面积指数为 0、0.5、3 和卫星反演的实测值这 4 种情况下模拟的沙尘浓度分布图。从图 5 中也可以看，当叶面积指数都为 0 时沙尘浓度分布范围最大；当叶面积指数都为 3 时(图 5c)沙尘浓度分布范围相对最小。利用卫星反演的叶面积指数计算沙尘浓度时，沙尘浓度的变化介于叶面积指数为 0 和 0.5 之间。从以上分析可以看出，叶面积指数对沙尘的数值模拟有较大的影响。只是利用卫星反演的叶面积指数计算沙尘浓度时，沙尘浓度的变化介于叶面积指数为 0 和 0.5 之间。其沙尘浓度与叶面积指数为 0 时基本一样。

4.4. 植被覆盖对风蚀起沙的影响

4.4.1 植被覆盖

植被覆盖一方面影响地表粗糙度，进而影响摩擦速度，另一方面可使植被根部附近的土壤粒子结合的更紧，不易因风蚀而脱离地表。在Shao (2001) 的风蚀方案中，根据地理信息系统数据计算被植被覆盖分数以粗糙元密集度的形式通过影响临界摩擦速度进而影响风蚀起沙(尘)量。

$$u_{*i} = u_{*i0}(d) \cdot f(w) \cdot f(\lambda) \cdot f(s) \quad (12)$$

其中, $f(w)$, $f(\lambda)$, $f(s)$ 分别表征地表土壤水分、地表粗糙元、土壤结构对临界摩擦速度的影响。

$f(\lambda)$ 的表达式根据 Raupach 等 (1993) 的研究的:

$$f(\lambda) = \sqrt{(1 - m\alpha\lambda)(1 + m\beta\lambda)} \quad (13)$$

其中, $m \leq 1$, 反映地表切应力的平均值和最大值之差, 根据 Wyatt and Nickling (1997) 的研究, 对植被类的粗糙元 $m=0.16$; α 粗糙元侧面和正面面积之比, 其大小决定于粗糙元的形状, 一般取 1.45; β 表示地表拖曳系数在有粗糙元和无粗糙元时的比值, 一般取 202; λ 反映粗糙元的密集程度。

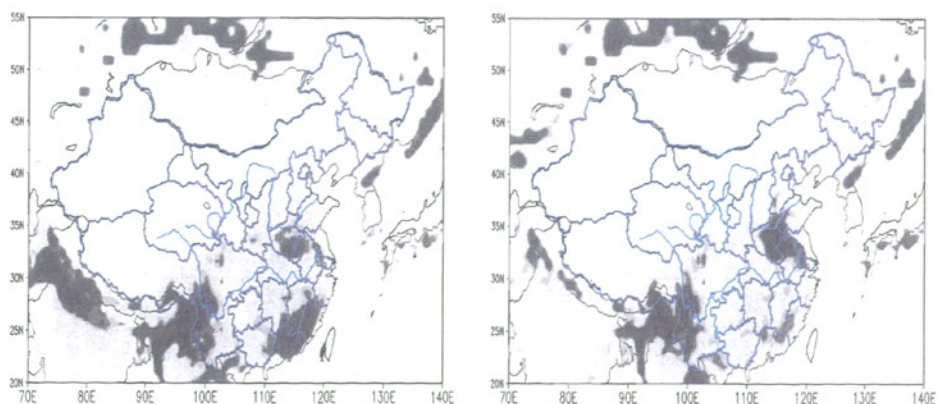
$$\alpha = \begin{cases} \frac{\pi b}{4H} & \text{圆柱体} \\ \frac{1}{2} & \text{半球体} \end{cases} \quad (14)$$

其中, b 、 H 分别是粗糙元的迎风面宽度和平均高度。

Lu 等 (2001) 用覆盖度分数近似确定 λ 的值:

$$\lambda = 0.25 \exp(a + bNDVI) \quad (15)$$

其中, a 、 b 是系数 (不同植被类型取值不同), 分别大约是 -1.5 和 6.5。



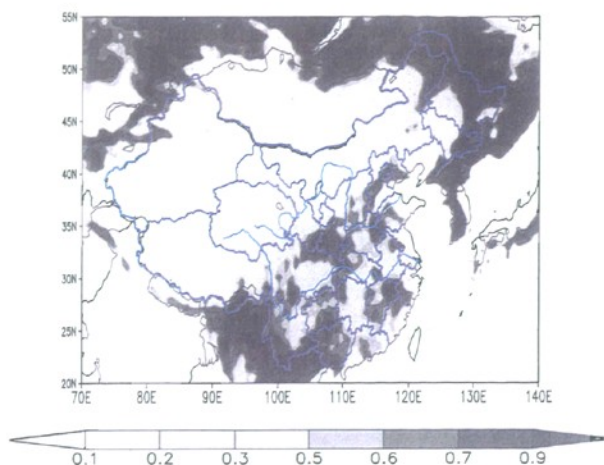


图 6 2002 年 3 月、4 月、5 月植被覆盖度的分布图

Figure 6 Distribution of Vegetation Coverage Rate in March, April, May, 2002

图 6 是 2002 年 3、4、5 月植被覆盖度的分布图，可以看出，2002 年我国春季植被覆盖度的分布与叶面积指数的分布较为一致。我国北方地区叶面积指数都在 0.2 以下，在新疆、内蒙西部、甘肃西北部等地植被覆盖度在 0 和 0.1 之间。西北地区的植被覆盖度在春季变化不大，仅新疆沿天山一带区域春季的植被覆盖度有较大变化，部分地区可从 0.1 增长到 0.5。东北地区、黄河以南区域的植被覆盖度在春季变化较大，3 月这些区域的大部分地区植被覆盖度在 0.1~0.2 之间，4 月植被覆盖度大于 0.1 的区域面积迅速增大。5 月这些地区的植被覆盖度增大到 0.2~0.6。

4.4.2 植被覆盖变化的影响

我们将 75°~120°E, 30°~50°范围内的植被覆盖度数据分成了 0、0.2 和卫星反演的实测值 3 个类型。从图 7 可以看出，当植被覆盖度为 0 时沙尘垂直通量最大，达到 $2000 \mu\text{g m}^{-3}$ ；当植被覆盖度为 0.2 时，沙尘垂直通量的出现的范围变化不大，但是沙尘垂直通量的强度有所降低。

从图 8 可以看出，当植被覆盖度都为 0 时沙尘浓度最大；当植被覆盖度为 0.2 时，沙尘浓度出现的范围明显减少。植被覆盖度对沙尘的数值模拟有较大的影响。只是利用卫星反演的叶面积指数和植被覆盖分数计算沙尘浓度时，沙尘浓

度的变化介于植被覆盖度在 0 和 0.2 之间。

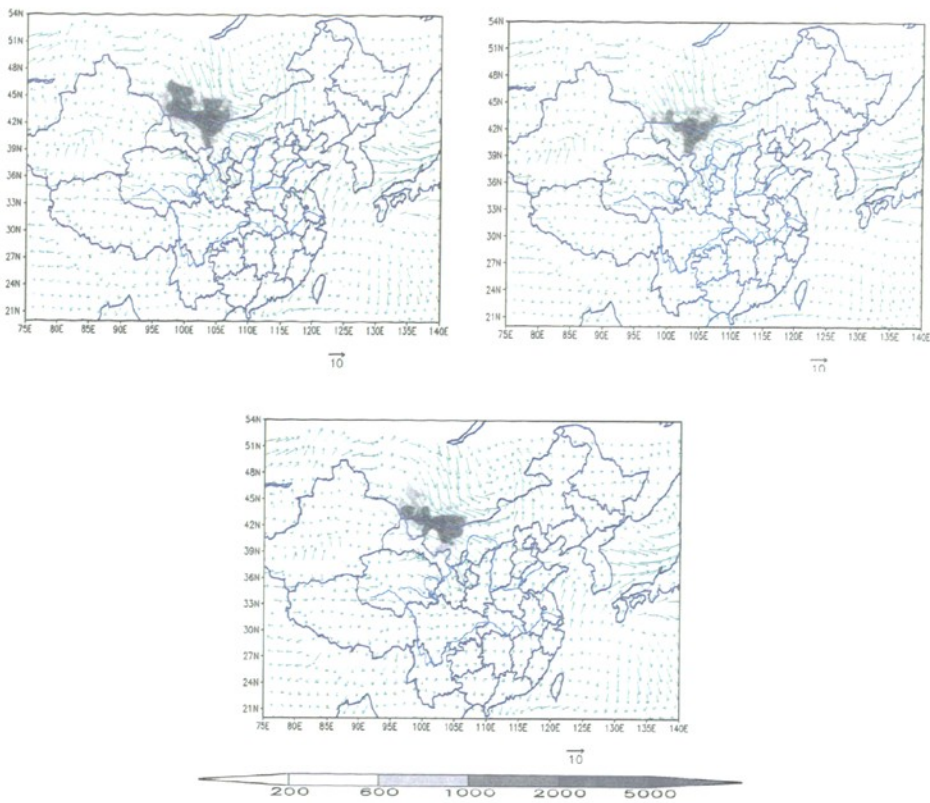
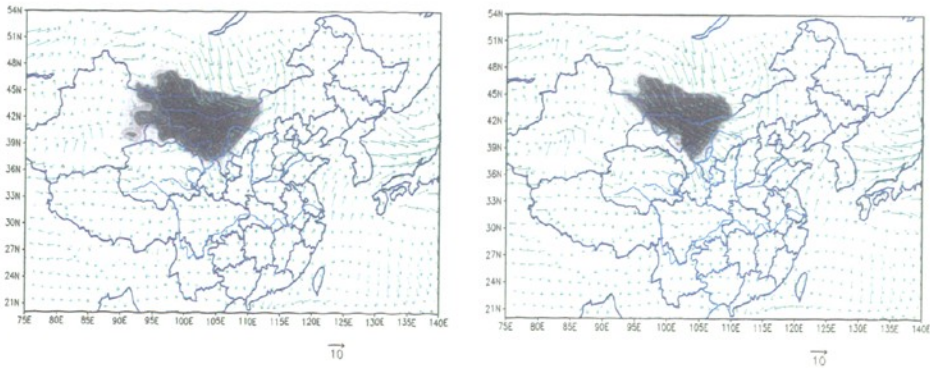


图 7 植被覆盖度为 0、0.2 和卫星反演的实测值情况下模拟的沙尘垂直通量

Figure7: Simulated vertical dust flex under the condition of Vegetation Coverage Rate0, 0.2 and measured value of satellite inversion



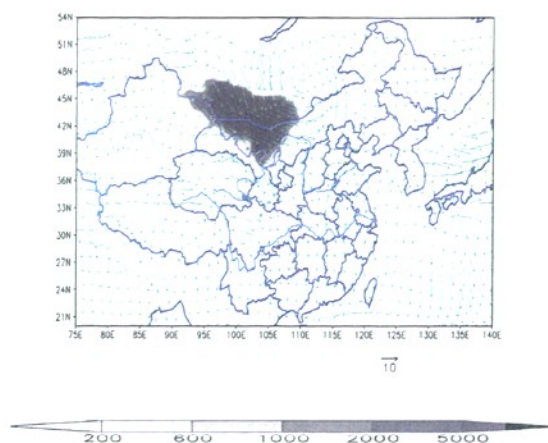


图 8 植被覆盖度为 0、0.2 和卫星反演的实测值情况下模拟的沙尘浓度

Figure 8: Simulated dust concentration distribution under the condition of Vegetation Coverage Rate 0, 0.2 and the measured value of satellite inversion

4.5. 结论

(1) 当叶面积指数为 0 时沙尘垂直通量最大, 当叶面积指数为 0.5 时, 沙尘垂直通量的出现的范围明显减少且强度降低, 当叶面积指数为 3 时, 沙尘垂直通量只在极小范围内出现, 而且量值也减少到 $600\mu\text{g m}^{-3}$ 。

(2) 当植被覆盖度为 0 时沙尘垂直通量最大, 达到 $2000\mu\text{g m}^{-3}$; 当植被覆盖度为 0.2 时, 沙尘垂直通量的出现的范围变化不大, 但是沙尘垂直通量的强度有所降低。

(3) 叶面积指数和植被覆盖分数对风蚀起沙的数值模拟有较大的影响, 也就是植被的数量和植被的生长变化对风蚀起沙有较大的影响作用。只是利用卫星反演的叶面积指数和植被覆盖分数计算沙尘浓度时, 沙尘浓度的变化介于叶面积指数为 0 和 0.5 之间, 植被覆盖分数在 0 和 0.2 之间。

参考文献

- [1] Gillette, D. A. Threshold friction velocities for dust production for agricultural soils. *J. Geophys. Res.*, 1988,93,12645-12662.
- [2] L. M. Leslie, G. R. Wightwick, A new limited-area numerical weather prediction model for operations and research : formulation and assessment, *Monthly Wea. Rev.*, 1995,123, 1759-1775.
- [3] Lu H, Shao Y. P. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. *Environment Model & Software*, 2001, (16): 233~249.
- [4] McVicar, T.R, Walker,J., D.L.B., Pierce, et al, Relating AVHRR vegetation indices to in situ measurements of leaf area index. 1996,Technical Report 96.5, CSIRO, Division of Water Resources.
- [5] Owen, R.P. , Saltation of uniform grains in air. *J. Fluid Mech.*, 1964, 20, 225-242.
- [6] Raupach, M. R., D. A. Gillette, and J. F. Leys, The effect of roughness elements on wind erosion thresholds. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98, 3023-3029.
- [7] Raupach, M. R., P. R. Briggs, N. Ahmad, and V. E. Edge (2001), Endosulfan transport II: Modeling airborne dispersal and deposition by spray and vapor. *J. Environ. Qual.*, 30, 729-740.
- [8] Sehmel, G. ,Particle and gas dry deposition: a review. *Atmospheric Environment*, 1980, 14,983~1011.
- [9] Shao, Y. and Leislle, L. M., Wind erosion prediction over the Australian continent. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102:30091-30105.
- [10] Shao Y.,Yan Y., J. J. Wang, Z. X. Song et. al. Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation. *J.Geophys. Res.* 2003, Vol 108(22), 4691-4711.
- [11] Song Z. X. , A numerical simulation of dust storms in China, *Environmental Modelling & Software*, 2004,Vol 19(2), 141-151.
- [12] Song Z. X., Wang J. Y.Wang S. G. , Quantitative Classification of Northeast Asian Dust Events, *J.Geophys. Res.*, 2007,112, D04211, doi:10.1029/2006JD007048.
- [13] Song Z. X., Bai X. P., The Impact of Convective Transport and Wet Deposition of Airborne Dust Particles on the Numerical Simulation of Northeast Asian dust storms, *IEEE*

- International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. doi: 10.1109/IGARSS.2006.166, 632-635.
- [14] Wyatt V E, Nickling W G. Drag and shear stress partitioning in sparse desert creosote communities, *Canadian Journal of Earth Science*, 1997, 34:1 486-1 498.
- [15] 贺大良, 邹本功, 李长治, 等. 地表风蚀物理过程风洞实验的初步研究, *中国沙漠*, 1986, 6(1):25-31.
- [16] 申彦波, 沈志宝, 杜明远, 汪万福. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征. *高原气象*, 2005, 24(3):236-241.
- [17] 姜学恭, 赵琳娜. 一次蒙古气旋型强沙尘暴的数值模拟试验. *高原气象*, 2006, 25(4):572-679.
- [18] 梁 玲, 吕世华, 柳媛普. 黄土高原植被变化对环境影响的数值模拟. *高原气象*, 2006, 25(4):575-582.
- [19] 韩经纬, 沈建国, 孙永刚等. 一次强沙尘暴和雪暴天气过程的诊断及模拟分析. *高原气象*, 2007, 26(5): 1031-1038.
- [20] 沈建国, 姜学恭, 孙照渤. 地形对沙尘暴的影响及敏感试验研究. *高原气象*, 2007, 26(5):1013-1022.
- [21] 张钦仁, 宋振鑫, 王金艳, 李自珍等, 植被参数变化对沙尘起沙影响机理的数值模拟研究. *高原气象*, 2008, 27(2):392-400.

第五章 人类活动对北方荒漠化影响与对策研究

在人类面临的诸多生态和环境问题中,荒漠化是影响最为广泛和深远的灾难,很多的专家将其称为“地球的癌症”。而我国又是世界上荒漠化和沙化面积大、分布广、危害严重的国家之一,严重的土地荒漠化威胁着我国生态安全和社会的可持续发展,甚至威胁到了中华民族的生存和发展。据我国2004年完成的第三次全国荒漠化和沙化土地检测结果,2004年我国沙化土地面积为173.97万平方公里,占国土面积的18.12%,分布在除上海、台湾及香港和澳门特别行政区外的30个省(自治区、直辖市)的899个县(旗、区)。其中,西北地区(包括新疆、内蒙古、西藏、青海、甘肃、河北、陕西、宁夏8省或自治区)的沙化土地面积占全国沙化土地面积的96.28%,影响着近4亿人口和全国75%的少数民族群众的生产和生活。另外,沙化土地还有很强的“后备军”:全国具有明显沙化趋势的土地面积为31.68万平方公里,占国土面积的3.32%。其中,93.13%分布在内蒙古、新疆、青海和甘肃四省(自治区)的西北地区^[1],因此,对西北地区荒漠化影响的研究具有重要意义。

5.1 荒漠化的概念及分类

荒漠化(desertification),最早出现在Lavauden1927年的一篇科学论文中,他使用“荒漠化”一词描述Sahara地区荒漠化景观的退化。1949年法国森林学家Aubreville在研究非洲热带森林界限后退问题时,把热带森林变成热带草原以及最终变成类似荒漠景观的过程称之为“荒漠化”。1959年法国科学家H.N.Houerou又提出desertification概念,阐述人类在干旱和半干旱地带内原非沙漠景观的地区因人类不合理的经济活动而造成沙漠蔓延。1977年,美国著名的学者Dregne在Desertification of Arid Lands一文将荒漠化定义为^[2]:

“荒漠化是干旱区、半干旱区和某些半湿润区生态系统的贫瘠化。这种贫瘠化是由于人为活动和干旱所共同影响的结果,因此荒漠化变化过程可以通过优良植物生产力的下降,生物量的变化,微小的和巨大的动物区系的差异和土壤的退化等方面加以测定,因而荒漠化并不是仅指那些什么都不长的完全被人类毁灭的土

地。”

联合国对荒漠化的定义经过了多次修改。1977 年联合国荒漠化会议 (UNCOD) 采用的荒漠化定义为: 荒漠化是土地生物潜力下降或破坏, 并最终导致类似荒漠景观条件的出现 “1984 年联合国环境规划署 (UNEP) 第十二界理事会会议^[3], 对荒漠化的定义是: 荒漠化是土地的生物潜能衰减或遭到破坏, 最终导致出现类似荒漠的景观。它是生态系统普遍退化的一个方面, 是在为了多方面的用途和目的而在一定时间谋求发展, 提高生产力, 以维持人口不断增长的需要, 从而消弱或破坏了生物潜能, 即动植物生产力。

1993 年到1994 年, 国际防治荒漠化公约政府间谈判委员会 (INCD)^[4], 经过多次反复讨论, 最后在防治荒漠化公约上确定的定义为: 荒漠化是指包括气候变异和人类活动在内的各种因素作用下, 干旱、半干旱和亚湿润干旱区的土地退化。干旱、半干旱和亚湿润干旱区是指降雨量与潜在土壤水分蒸发量比值在 0.05-0.65 之间的区域, 不包括极区和副极区。即, 干旱区: 0.05-0.20; 半干旱区: 0.21-0.50; 半湿润区: 0.51-0.65。“土地退化”是指由于使用土地或由于一种营力或数种营力结合致使干旱、半干旱和亚湿润干旱区雨育耕地、水浇地或草原、牧场、森林和林地的生物和经济生产力和复杂性下降或丧失, 其中包括风蚀、水蚀而造成的土壤物质的流失; 土壤的物理、化学和生物特性或经济特性退化, 及自然植被的长期丧失等。这一定义表明荒漠化的本质是土地退化, 气候因素主要是干旱的影响。荒漠化这一定义基本上被世界各国所接受, 并作为荒漠化防治国际公约制定的思想基础。

荒漠化主要分为风蚀荒漠化、水蚀荒漠化、冻融荒漠化、土地盐渍化四种类型^[5]: 吉林大学博士学位论文 多源遥感数据支持下的松嫩平原生态环境变化研究。

风蚀荒漠化: 即沙质荒漠化, 也就是沙漠化。是以空气动力为主的自然营力叠加在人类活动的条件下所造成的土地退化过程, 干旱多风和沙源丰富的沙质地表是产生风蚀沙漠化的条件和物质基础。特别是在干旱大风在时间上同步的情况下, 人为活动造成植被的破坏, 为沙质荒漠化的发生提供了可能, 如东北平原西部的沙地和内蒙古高原上的沙地等。

水蚀荒漠化: 是以降水和重力作用为自然营力叠加在人类不合理活动条件下

的土地退化，主要分布在黄土高原等地区。

冻融荒漠化：主要发生在高海拔地区，由于温差大引起岩体和土体因剧烈热胀冷缩而造成地表利用难度加大而引起的土地退化，如青藏高原等。

土壤盐渍化：是在干旱、亚干旱条件下由于不合理灌溉和管理措施不当产生的可溶性盐类在地表的累积而造成的土地退化过程。如河套平原、华北平原和东北平原西部的部分地区。

松嫩平原的荒漠化的成因非常复杂，主要是碱质荒漠化和沙质荒漠化（风蚀荒漠化），土壤盐渍化也存在于部分地区。

5.2 荒漠化的主要特征

“荒漠化”的主要特征表现在^[6]：(1)气候变化：由于荒漠化引起植被退化，改变了地表反射率及CO₂的吸收过程，从而对气候变化产生影响，如气候变暖，降水的变化；(2)植被及动物群落退化：例如密度、多样性向坏的方向发展；(3)土壤退化：其形式包括：表层土壤流失(水份)——土壤流失——养分流失；沟蚀引起土体搬运，流沙、掩埋农田、村庄；风蚀地表，吹走土壤细粒和土壤养分，土壤肥力降低；土壤次生盐渍化；土壤污染；(4)水文状况的恶化：主要由于植被退化，洪峰流量增加，枯水流量减小。水蚀作用，地下径流减小；水文状况的恶化又为某一地区土地资源退化创造了恶性循环条件。

5.3 人类活动对北方地区荒漠化的影响

造成土地荒漠化既有自然因素，也有人为因素所致。虽然学术界对于土地荒漠化的原因的看法有所不同。但是人类活动无疑是其中一个重要的因素。对于我国西北地区近现代荒漠化的主要原因，有些学者认为人类活动的过度才是其主要原因^[7]。根据相关研究结果表明，人类活动主要是通过以下四个方面影响荒漠化^[8]，如下图所示：

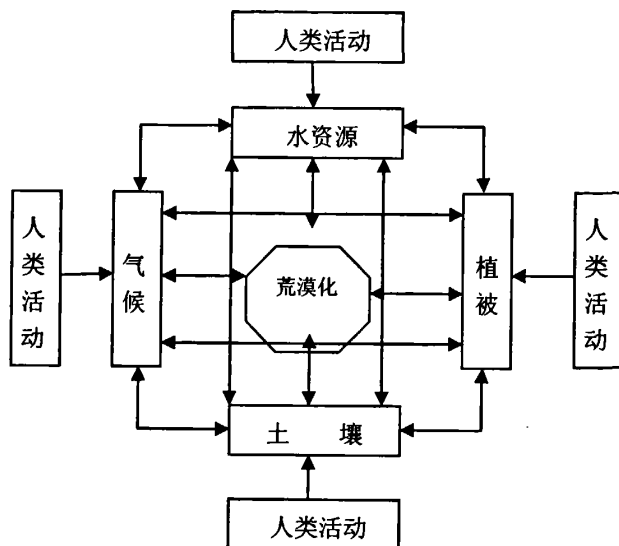


图 5-1 我国西北地区土地荒漠化成因概念模型

从上图中可以看出,对于我国西北地区来说,人类活动是从四个方面来影响土地荒漠化的,即:人类活动对水资源的影响、人类活动对植被的影响、人类活动对土壤的影响和人类活动对气候的影响。下面我们具体分析人类活动对我国西北地区荒漠化的影响。

5.3.1 人类活动对水资源的影响

我国西北地区是水资源缺乏地区,据资料表明,西北地区水资源量多年平均为1635亿立方米,仅占全国总量的5.84%。2000年西北地区人均水资源占有量1781立方米,为全国当年人均水资源量的80.5%。其中:宁夏黄河流域217立方米,陕西渭河流域326立方米,青海湟水河流域618立方米,甘肃河西走廊的石羊河流域761立方米,均大大低于全区平均水平,成为严重缺水的地区。2000年全区总用水量817亿立方米,其中农业用水占89.3%。扣除工农业和生活用水的回归水量后,2000年全区净耗水总量547亿立方米,耗水率(耗水量与用水量之比)为62.8。

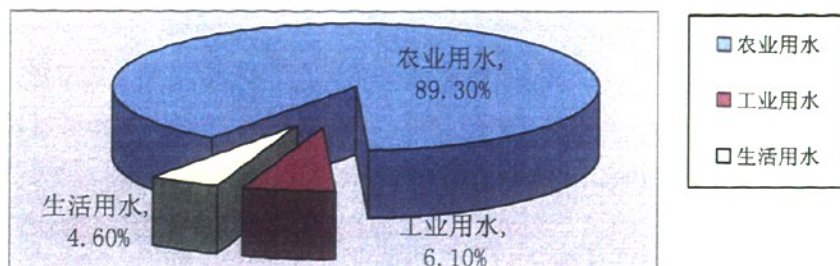


图 6-2 西部地区水资源利用结构图（200 年）

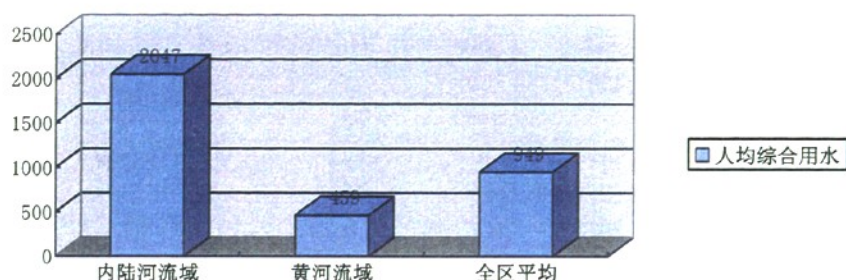


图 5-3 西部地区人均用水示意图（200 年）

在这样水资源条件和水资源的需求条件下，西北地区的人们为满足工农业的用水要求，使水资源的使用不当，主要表现为：地表用水缺少上、中、下游的统筹安排、过度使用地下水、水资源的浪费严重。例如，建国以来河西黑河中游地区耗水量逐年增加，80年代比60、70年代增加3~5倍，流入下游的水量从过去的5~9亿 m^3 减少到3亿 m^3 ，到1992年仅有1.83亿 m^3 ，河水断流时间由50、60年代的100天左右增加到90年代的200天左右，造成绿洲萎缩。塔里木河流域卡拉站水量50年代为13.5亿 m^3 ，60、70、80和90年代分别为12.4、6.69、3.92和3.54亿 m^3 ，致使下游“绿色走廊”濒临消亡^[9]。

总体来说，我国西北地区人均用水量高、农田灌溉用水定额高、单位GDP用水量高。农田平均每亩实灌定额617立方米，比全国平均高40；万元GDP用水1736立方米，比全国平均高1.85倍。水资源开发利用率（用水量与水资源总量之比）。目前全国水资源开发利用率平均为20%，西北地区为53.3%。其中甘肃的河西走廊各河、新疆的塔里木河和天山北坡各河都超过70%，有的甚至超过100%。

表5-1是近2000年来西北干旱区主要湖泊面积的变化情况^[11]。湖泊萎缩和干涸本是一普通的自然现象,但是干涸得如此之快,大面积湖泊消失得如此之多,则仅见于我国西北干旱区,仅说是气候变化的结果是不可能的。合理的解释,主要还是人类大规模开发利用水资源和牺牲生态用水所致。特别是清代中叶以后的近200年来,湖泊的急剧缩小与人类活动直接相关。

表 5-1 近 2000 年西北干旱区主要湖泊的变化 (单位: km²)

湖名	先秦两汉	清代前期	清末民国	1950 年代	1960 年代	1970 年代	目前状况
罗布泊	5350	-	明显缩小	3006	660	0	干涸
台特马湖	-	150	-	88	88	0	干涸
博斯腾湖	1390	-	-	1015	960	-	955
艾比湖	3380	3185	2000	1200	997	566	500
艾丁湖	2000	400	230	124	-	29	时令性湖
玛纳斯湖	1000	-	1000	550	0	54	干涸
巴里坤湖	-	140	-	140	114	85	52
居延海	2000	695	352	352	50	58	干涸
花海	445	200	10	-	-	3	干涸
野猪泽	575	210	-	-	-	35	干涸
青海湖	6000	4980	-	4568	-	4474	4304

由于水资源系统在西北干旱地区的重要作用,基本上属地表水量条件支撑下的生态系统,水资源条件的改变对其它自然要素会产生重要的影响,当水资源系统改变后,脆弱的生态平衡就会被打破,在一定气象条件下,就会引起荒漠化的产生。

5.3.2 人类活动对植被的影响

植被是自然生态系统中的生产者,是维系生态平衡的关键组成部分。植被的破坏也成为荒漠化高速扩展的重要原因。我国西北干旱区森林覆盖率很低,是我国突出的无林少林地区。根据相关资料表明,我国西北地区各省(自治区)的森林覆盖率各时期的森林覆盖率如下表所示^[12]:

表 5-2 西部各省森林覆盖率的变化与现有森林面积

省(区)	原始社会 (%)	1948 年 (%)	1977-1981 年 (%)	1984-1988 年 (%)	1989-1993 年 (%)	现有森林面 积 (km ²)
内蒙古	40	13.2	11.9	11.94	12.14	140 630
四川	80	20	12.0	19.21	20.37	602 378

西藏	15	5.1	5.1	5.14	5.84	71 741
陕西	43	9.8	21.7	22.86	24.15	49 743
甘肃	60	6.0	3.9	4.51	4.33	19 473
青海	23	0.26	0.3	0.37	0.35	2 525
宁夏	29	1.79	1.4	1.78	1.54	1 023
新疆	12	1.7	0.7	0.91	0.79	13 011
西部地区	30	8.72	7.49	8.25	8.68	593 748

从表5-2可以看出,西北地区各省(区)的森林覆盖率是极其低下的,特别是青海和新疆都低于1%,但是,人类活动对其破坏却是相当严重的,主要表现为滥垦、滥牧、滥采和滥伐。

(1) 滥垦。滥垦是指在不具备垦殖条件又无防护措施的情况下在干旱、半干旱和亚湿润干旱地区进行的农业种植活动。从50年代到70年代,由于过分强调“以粮为纲”,在我国西北地区出现过3次大规模开荒,开垦草地在 $6.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上。影响范围从最北部的内蒙古呼伦贝尔到科尔沁、浑善达克、毛乌素直至青海省共和。开垦后,由于缺乏防护,表土受到风蚀或沙埋,单产急剧下降,只好废弃。废弃的土地由于植被遭到破坏,在风力作用下很快产生荒漠化^[6]。仅1986年至1996年十年时间,我国就开垦了 $161 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 耕地,结果到现在已经有49.2%废弃,也即有 $80 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 耕地成为荒漠化土地。在农牧交错区,更是大面积地扩大耕地面积,结果导致了20世纪70年代中期沙化荒漠化土地 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$,到20世纪80年代中期发展到近 $12.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均每年增长 $1\,479.3 \text{ km}^2$,年增长率为1.39%^[13]。

(2) 滥牧。滥牧是指超过天然草地承载能力的放牧活动。随着人口增加和受市场利益驱动,牧民盲目增加牲畜头数,导致草场严重超载过牧,抢牧、争牧现象也经常发生。结果,一方面由于牲畜的过度啃食,使牧草植株变稀变矮,优良牧草减少,毒草因牲畜不吃,数量急剧增加,草场可食牧草的产草量大幅度下降;另一方面,由于牲畜的过度践踏,使地表结构受到破坏,造成风蚀沙化。据调查,新中国成立以来,我国牧区家畜由2900万头(只)发展到9000多万头(只),草原面积却因开垦破坏和沙化减少667万 hm^2 ,使过牧现象更为严重。同时,虫鼠害猖獗也加重了荒漠化。目前,牧区牲畜超载一般在50%~120%以上,有的地区甚至超载300%。以晋陕蒙接壤地区为例,伊克昭盟所属的伊金霍洛旗、东胜市、达拉特旗和准格尔旗,1990年天然草地超载率为170.6%,其中准格尔旗达331.7%。

根据计算,目前荒漠化地区共有 $1.05 \times 10^6 \text{ km}^2$ 草场发生不同程度的退化,长期超载过牧是一个重要原因^[14]。

(3) 滥采。滥采是指农牧民为了增加副业收入,无计划、无节制地掏挖药材、发菜等资源植物。荒漠化地区甘草、琐阳、肉苁蓉、发菜等易采集、价格高,一些邻近草原地区的农民以挖药材、搂发菜作为脱贫致富的捷径,常年采挖贩卖,特别是宁夏一些贫困地区,已发展成有组织的集团行动。由于采挖时铲掉草皮,挖土刨坑,翻动土层,严重破坏草场,大大加速了风蚀荒漠化过程。据估计,每挖10 kg甘草要破坏 $5.3 \sim 7.3 \text{ hm}^2$ 草地。甘肃省1994年因挖甘草破坏草场 666.7 km^2 以上,给畜牧业造成的损失超过1 000万元。内蒙古在1993—1996年间因搂发菜破坏草原 $1.27 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中4 000多 km^2 严重沙化,失去了利用价值。宁夏高沙窝乡流墩行政村有草场 77.82 km^2 ,近15年来因滥挖甘草使 5.21 km^2 草场变成流沙,66.8%的草场发生不同程度的荒漠化。

(4) 滥伐。由于经济原因或其他目的的需要,违反生态规律,过度砍伐林木,致使地表植被和土壤遭到彻底破坏,在风力作用下,大面积固定、半固定沙地顷刻之间变成流沙,加速了荒漠化的进程。例如,据对河北坝上地区的卫星影像分析,自1987—1996年9年间,森林面积由 36.35 万hm^2 减少至 22.24 万hm^2 ,减少38.82%,流沙面积由 6.8 万hm^2 增加到 12.91 万hm^2 ,增加了81%。新疆广泛分布的梭梭林,现在比50年代初减少了 8 万hm^2 ,怪柳灌丛减少了50%。位于内蒙古境内的毛乌素沙地的柳灌丛由50年代的 66.7 万多hm^2 到1984年减少为 5.2 万hm^2 。沙漠戈壁地区的农牧民为了解决烧柴和增加收入大量破坏植被。例如,新疆和田、墨玉、洛浦三县60%的居民做饭取暖靠烧柴,每年需47.5万t植物。和田地区绿洲外围沙漠植物已基本被砍光烧光^[15]。

人类对植被的直接和间接的破坏作用下,打破地表植被与土层结构媒介功能,地表裸露或植被大为降低,加大了区内沙质、沙砾质地表的风蚀等风沙活动过程,导致土沙质地荒漠化的产生与发展。

表 5-3 不同成因类型导致荒漠化土地的比例

成因类型	百分比
过度农垦所形成的荒漠化土地	23.3
过度放牧所形成的荒漠化土地	29.4

过度樵采活动所造成荒漠化土地	32.4
水资源利用不当所造成的荒漠化土地	8.6
工矿交通城市建设所引起的荒漠化土地	0.8
风力作用下沙丘的迁移入侵	5.5

5.3.3 人类活动对土壤的影响

西北干旱区的土壤自然演替规律受水盐条件控制,形成各类土壤类型,这些土壤肥力一般较为低下,土地自然生产力较低,极易风沙化。干旱区人类活动对土壤系统的影响以近半个世纪最为明显和强烈。近50年来人类采用多种措施对土壤施加影响,使人工耕作土壤代替自然土壤,并逐渐改变了自然土壤的物理、化学和生物性质,以至形成新的人工土壤类型,如长期用泥沙含量高的河水灌溉,在原土壤表层可以淤积50—100cm厚的灌淤层(新疆和田地区最厚的可达4.0m),形成干旱区特有的灌溉淤积土。人类活动的盲目和过度如:过度灌溉引水、大量投入肥料、盲目土壤脱盐,使土壤的水分含量减少、肥力下降、土壤盐渍化或次生盐渍化,导致土壤向风沙土和盐土化发展。如塔里木河流域下游原有吐鲁依土转化为风沙土^[16]。

此外,在矿石开采、道路建设、城镇基本建设中,由于对生态环境的重视不足,而导致土壤结构发生变化,引起荒漠化的产生。如露天开采毁坏地表土层,矿山废弃物中的酸性、碱性或重金属成分通过径流和大气飘尘污等途径污染土地,使土壤结构改变,植被破坏,最终形成土地的荒漠化。虽然工矿建设等原因导致的荒漠化土地多位“点”和“线”状的分布,特点是小而分散,然而,这样的土地多靠近人口稠密的城镇、工矿,因而其维修不容忽视。据不完全统计^[3],内蒙古全区共有各类矿点3 530处,筑路长度8 000多km,固体废弃物5 600多万m³,占地和毁坏植被13 201 km²,相当于全区累计治理面积的1/4。

5.3.4 人类活动对气候的影响

人类活动特别是近代以来的工业活动,向大气中排放了大量的温室气体,使全球的平均气温在过去的一个多世纪上升了0.7度。而对20世纪中国西北地区气候变化作检测表明,人类活动造成大气中温室气体浓度增加以及硫化物气溶胶增加,从观测计算得到的近百年中国西北地区气候变暖0.75摄氏度和近50年气候变

暖0.88摄氏度^[11]。仅以新疆为例：1987-1996年，平均温度北疆6.1℃，南疆9.5℃，全疆为7.8℃，与前两个10年（1967-1976年、1977-1986年）相比，北疆偏高1.0和0.3℃，南疆偏高0.6和0.2℃；与1950-1999年相比，北疆偏高0.4℃，南疆偏高0.3℃^[12]。

由于人类活动排放的温室气体的增加，造成“温室效应”而导致全球气温的升高，会使我国西北地区的气温的升高，降水减少，土壤水分蒸发增加，加剧了荒漠化的产生。

5.4 中国北方荒漠化防治的现状和存在的问题

党和政府历来重视荒漠化的防范和治理，早在延安时代，就曾提出“以水拉沙”，造“涝坝田”等口号，引导群众对西北地区的荒漠化进行治理，来发展农牧业的生产。新中国成立后，我国政府也对荒漠化严重的地区进行了重点的治理。上世纪70年代以后一直到现在，先后启动了“三北防护林体系建设工程”、“治沙工程”、“封山禁牧，舍饲圈养”、“退耕还林”等一系列的重点生态建设工程，在治理荒漠化的过程中，创造出了很多对我国荒漠化治理实用的技术，同时也积累了很多的经验。此外，我国政府也制定了一系列相关的法律和政策，来遏制荒漠化的发展。总体来说，我国治理荒漠化的主要举措有：

5.4.1 三北防护林体系的建设

(1)工程概况。1978年，为防止我国西北、华北北部和东北西部地区的荒漠化、水土流失等严重的生态问题，我国政府决定在上述地区建设防护林体系，也被称为“三北”防护林体系。这项工程的范围包括全国的13个省（市、自治区），551个县（市、旗、区），土地面积达到406.9万平方公里，为我国国土面积的42.4%，覆盖了我国95%以上的荒漠化严重的区域，是我国治理荒漠化的主干工程。在国际上被誉为“中国的绿色长城”、“世界生态工程之最”。

(2)工程现状和取得的效果。三北防护林工程从启动至今，近30年来，取得了非常显著的成果，据资料显示，从1978到2000年，累计造林面积达到2200多万公顷，为任务计划的122%^[14]。从2001年至今六年间，共新造林345万公顷，为防治我国西北地区荒漠化的发展做出了巨大的贡献。

(3) 工程存在的问题。虽然三北防护林工程经过二十多年的努力,取得了显著的成果,然而,我们也应该清醒的认识到工程中存在的问题和不足。突出表现在:①投入严重不足;②工程管理机制上存在严重缺陷;③工程造林的科技含量还比较低;

5.4.2 治沙工程

(1) 工程概况和取得成绩。1991年10月,国务院发表了《1991-2000年全国治沙工程规划要点》,以此为起点,防沙治沙工程正式启动。1992年治沙工程列入国家计划, 该工程的建设范围包括有西北地区的沙漠、戈壁、荒漠化及风沙化土地分布的全国27个省、区、市的596个县(旗、市)6205个乡,沙区土地面积2.64亿公顷,占国土面积27.5%。

(2) 工程中存在的困难和问题。①缺乏长期战略规划;②管理体制不顺,协调难度较大。③监督管理机制还很不到位。④治沙投入不足,标准偏低。

5.4.3 封山禁牧,舍饲圈养

(1) 政策背景和概括。放牧是我国西北地区重要的经济支柱之一,而脆弱的生态却无法支撑羊群的急速膨胀。草场过牧、牧畜的数量大大超过草场原有的承载力,这已成为我国西北地区植被保护与恢复的一大障碍。这种障碍如果不能解除,那么不仅加速了草场的退化而最终导致荒漠化,而且也会使其他的手段如人工造林、退耕还林还草等政策的效果大打折扣。在这样的情况之下,我国在西北地区实行了封山禁牧、舍饲圈养的政策。这样的举措改变了历来野外放牧为种草舍饲,则为实现草畜平衡,解决林牧矛盾,切实改善草原生态带来了契机。

(2) 政策中存在的问题。作为国家的一项强制性政策,它在保护草场的生态环境和防治荒漠化中起到了不可替代的作用。但是,由于这一政策模式过分强调强制性政策的实施,而忽视了激励性政策的使用,社会参与性差,缺乏政策执行中协调性政策手段的应用的实施。例如,在鄂尔多斯市有的牧户因承担不起新增的包括舍饲后棚圈建设费用、饲料供应费用以及增加的人工费用,而把大量的羊卖掉,结果使当地牲畜头数总量减少了^[17]。

5.4.4 退耕还林

(1) 政策概况。退耕还林工程是我国为防止荒漠化、水土流失等生态问题所实行的又一重大举措。具体是指在水土流失严重或粮食产量低而不稳定的坡耕地和沙化耕地,以及生态地位重要的耕地,退出粮食生产,植树或种草。国家实行退耕还林资金和粮食补贴制度,国家按照核定的退耕地还林面积,在一定期限内无偿向退耕还林者提供适当的补助粮食、种苗造林费和现金(生活费)补助。

(2) 政策的成效。这项工程从1998年启动以来,取得了良好的效果。据数据显示,我国实施退耕还林工程9年来成效显著,到2006年底已累计完成退耕还林任务3.64亿亩,其中退耕还林1.39亿亩,荒山荒地造林2.05亿亩,封山育林2000万亩。工程区森林覆盖率平均提高2个多百分点。中央财政已累计投入资金1300多亿元,退耕农民平均每户获得补助3500元^[18]。

(3) 存在的问题。①宣传引导力度不够。②个别村干部“多吃多占”,形成农民意见大。③重退耕,轻管理。④干部弄虚作假,虚报冒领。

5.5 中国北方荒漠化防治的对策分析

40多年来,通过不懈的努力,我国拥有了一整套比较成熟的荒漠化防治技术与模式;形成了比较健全的管理机构、教学和科研体系;制定了一系列政策和法规。在防治荒漠化领域已经达到世界先进水平,某些方面居于国际领先地位。但是,发人深省的是,虽然投入越来越多治理力度逐年加大,荒漠化扩展的速度却越来越快,而且有进一步加重的趋势。这与我们防治荒漠化工作中的失误有关。以往以政府作为防治沙漠化的主体,资金和技术无法得到最有效率的利用。因此,在要改变这种局面,就必须走出一条新的防治沙漠化的道路。

5.5.1 以往政府主导型荒漠化治理结构的弊端分析

以往,我国生态建设的运作方式主要有政府主导型,然而,经过多年的实践,政府主导型生态治理已经捉襟见肘,难以支持生态建设的可持续发展。因为,政府主导型生态治理模式的一持续发挥作用的前提条件是:(1)政府有无限的财政支付能力,且不受高成本的约束;(2)政府对生态建设区居民和经济组织的

经济行为有绝对的控制力；（3）居民和经济组织对生态建设区土地拥有完全的产权；（4）由高效廉洁的政府组成委托代理链，不存在自上而下的截流资金现象，也不存在自下而上的谎报虚假信息现象。（5）当事人的行为不存在“道德陷阱”和“逆向选择”现象等。因此，在实际中，政府行主导的运作大多属于权责利不明的推进模式，往往是前期搞的轰轰烈烈，后期的管理和维护跟不上，“只重数量不讲质量”“只管种树，不管成长”，“粗放种树，粗犷管理”是生态建设中普遍存在的官僚现象。再从最近政府推动实施的退耕还林还草工程来看，在有些地方，基层政府为了突出“政绩”，农民为了实现既得利益，得到政府粮食和补贴，向上级政府虚报退耕还林还草面积时有发生。所以，在政府财政资源短缺、理性人选择、产权模糊、信息不对称的环境中，上述的前提条件很难具备。一旦政府的强劲投入和行政手段减弱时，政府主导型治理模式就会陷入困境，就难以支撑生态建设的可持续发展，甚至短期和应急效应也会自然停止。

事实上，因为政府部门自身是荒漠化治理费用预算的制定者，而在制定荒漠化防治费用时，因为没有有效的竞争机制，政府部门所需要治理荒漠化的费用往往会超出实际的治理费用，在治理荒漠化的过程中，缺少监督机制或者监督机制不够完善，资金往往得不到有效的利用。另外，由于政府部门缺乏竞争机制而缺乏改进和应用新技术投入到防治荒漠化的过程中来。这也是我国多年来不断加大对荒漠化治理的投入，而没有取得相应治理效果的根本原因。此外，信息不能及时的披露从而也得不到社会力量的有效参与。

5.5.2 以市场为主导治理荒漠化的概念模型

5.5.2.1 荒漠化企业主导型治理结构

要改变以往以政府主导型荒漠化防治结构，就要找出合理有效的防治结构。传统的理论认为，荒漠化的防治是一种改善生态的公共物品，同时，荒漠化的地区往往都是经济落后，人口众多的地区，在这种情况下，理应由政府来提供这项公共物品。但是如何来实施具体的荒漠化治理是值得研究和探讨的。在实际中，如果治理荒漠化不仅能够给改善荒漠化地区的生态环境，而且能够得到可观的收益的话，那么就可以吸引企业和个人加入到这个过程中来，不仅扩大了资金的来源和渠道，并且，企业和个人在资金管理、组织运作、技术水平等方面会比政府

更加有效率。事实上，只要政府合理的转变职能，制定配套的法律政策，就可以把市场引入到荒漠化治理中来，实现上述政府直接治理所达不到的效果。

在这里，作者认为应该引入市场机制，也就是引入专业化的荒漠化治理企业作为防治荒漠化治理的主要力量，同时，引入相应的监督单位作为荒漠化治理的监督 and 验收部门。其结构图如下：

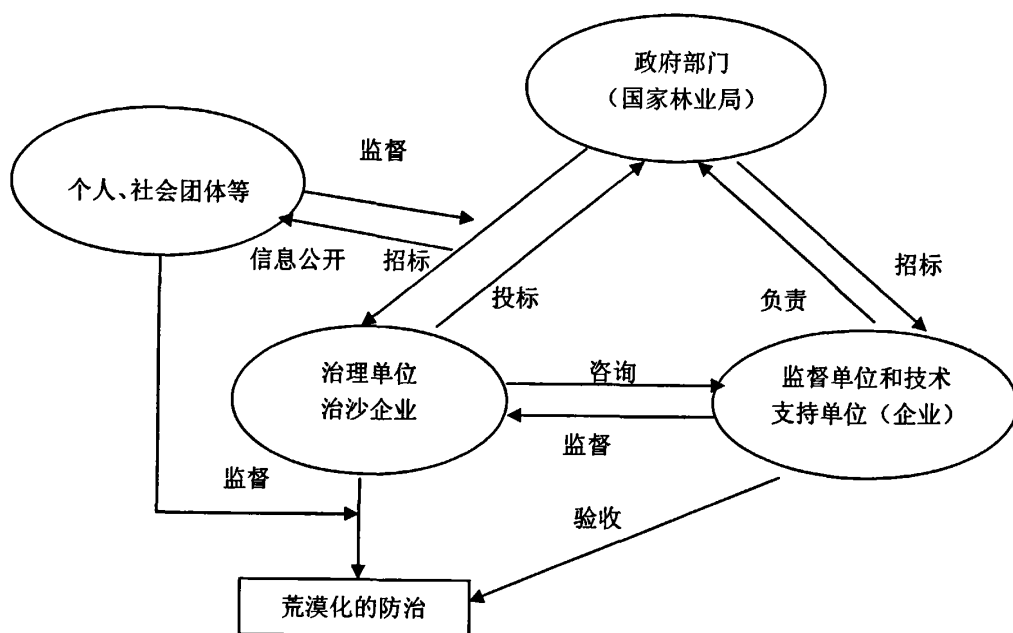


图 5-4 荒漠化治理的企业主导型结构示意图

对于需要进行荒漠化治理的地区，政府部门通过招标的方式来面向全社会具有荒漠化治理资质的企业进行招标，治沙企业制定荒漠化治理的方案和预算，通过竞标的方式来获得某块荒漠化地区的治理合同。在公平公正和公开的市场原则下，最后获得合同的荒漠化治理企业将会是那些治理技术和管理水平较高，而治理成本较低的企业。这样的好处是政府可以以真实而较低的价格来完成治理荒漠化的工作，满足整个社会对于防治荒漠化的需求。荒漠化治理企业有足够的动力来提高自身的荒漠治理水平、企业管理水平和资金利用效率，来带动整个荒漠化治理行业水平的提升。

对于荒漠化治理方案和预算的审核是由独立于政府的监督单位和科研单位担任的，而这些监督和科研单位是直接向政府的相关部门负责，也就是说荒漠化

治理的效果是由这些单位负有连带的责任。同时,这些监督单位或者说是企业也可以是通过向政府部门竞标来获得合同的。

这种安排是防治荒漠化治理企业通过非正常渠道获得荒漠化治理的合同。也促使监督单位有足够的动力来对企业治理的方案和预算、治理过程以及治理结果进行监督。当然,这些信息都要定期向社会进行公开和公布,受到其他社会力量的监督。

治理企业可以通过和相关的科研单位进行合作(这里不是指承担监督和审核企业治理责任的科研单位)来提高自身的荒漠化治理技术和能力。

此外,为吸引足够的企业加入治理荒漠化的过程中,可以在不损害生态环境和治理荒漠化效果的前提下,允许企业发展相关的产品和产业,如林下经济或者副产品,来提高自身的盈利水平和渠道。

5.5.2.2 荒漠化治理的 PPP 模式

尽管我国在荒漠化地区已经初步形成了以种植业、养殖业、精深产品加工业、生态旅游等为主的产业体系,但仍存在着一些问题与不足。荒漠产业是在水资源短缺且易流失的劣质土地上进行集约化生产的,而目前我国企业进入该领域的主要动因是对这个行业经济回报率的较高预期,往往忽略了对荒漠地区脆弱的生态系统进行保护或恢复,忽视了荒漠产业经济效益背后更为重要的环境效益和社会效益,较少考虑到不适当的开发方式和开发强度会造成新的生态退化。实际上,真正意义上的荒漠产业是知识密集型的产业,然而由于大多数企业的短视和逐利行为,并没有运用具有较高科技含量的技术,主营收入仍然来自于传统农牧业和简单的加工业,大多数企业是在圈地后,从事蔬菜、药材、速生树等种植加工及种草开展奶牛养殖等产业链较短、技术含量较低的经营活动。所以现在要将荒漠化的治理工程彻底的交由企业负责实施还是不实际的。

荒漠化治理收费费率的限制,其回报率低或较长时期内难以取得回报,虽然项目本身能产生一定现金流,但完全推给市场企业却难以承担,因此,政府还应承担一定的投资责任用政府的财政、税收资金来完成这一部分的投资和进行治理^[19]。又由于上述的我国荒漠化治理企业现在还不足以独立承担治理荒漠化的能力,现阶段可以采用PPP模式进行。

PPP模式是公共部门与私人部门之间建立在各自专长基础上的合作,通过共享双方资源优势、共同承担项目的风险并分享项目带来的回报,最大程度地满足公众的需求和利益。PPP模式中公共部门是指政府,包括中央政府和地方政府;私人部门是指以营利为目的的各种企业。作为PPP模式的重要组成部分的第三方是非营利性组织,包括NGOs、CBOs、个人和学术团体等。由于第三方与项目没有直接的利益关系,因此他们能够代表广大人民群众的利益,客观地对政府和企业行为进行评估、协调,发现合作过程中的漏洞并提出建议加以解决,促使合作的最终成功^[20]。PPP模式中三方合作关系如图5-5所示。

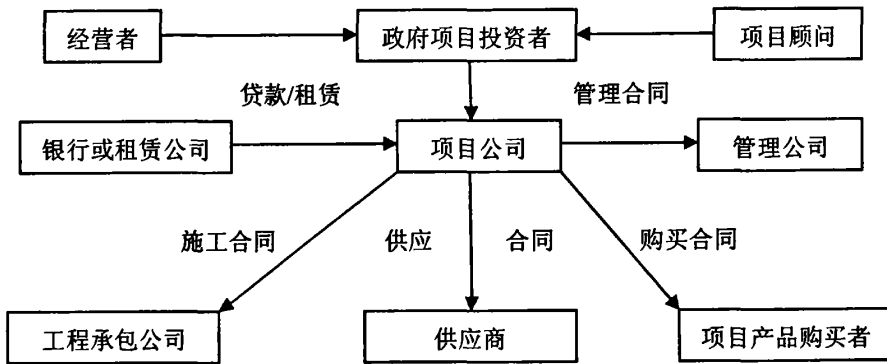


图 5-5 PPP 融资结构图

在我国,虽然PPP模式目前主要应用于城市环境基础设施建设方面,但荒漠化治理同样具有与城市环境基础设施建设类似的特点,如建设初期投资巨大而投资回报周期较长,经济效益收效慢,社会效益、环境效益明显,可以改善居民的生存环境,缓解紧迫的荒漠化蔓延问题。在我国荒漠化治理中引入PPP模式具有如下优越性:

(1) 能提高治沙工程运作效率和收益水平。PPP模式通过公私合作,将市场竞争机制引入原本由政府单独控制的荒漠化治理之中,同时结合私人部门先进的企业运作模式、管理经验,努力提高治沙项目的投入产出比。英国的统计数据表明,80%的PPP项目控制在预算之内,并且能在计划的时间内完成,而传统的政府项目能够控制在预算范围内的只有25%;合作项目一般可以帮助政府节省5%-20%的费用,但其所提供的公共服务的质量却显著上升。与传统的项目运作模式相比,PPP这种市场化的模式在节约时间和资金方面具有较大的优势。因此,针对目前

我国在荒漠化治理中所存在的高投入、低产出、见效慢的实际情况,将私人部门和市场机制引入国家大型的荒漠化治理项目就具有十分重大而深远的意义。

(2) 能确保将生态恢复作为荒漠产业的首要目标。盈利是企业参与荒漠产业建设的根本目的,一般来讲,生态恢复不是企业关心的重点,这正是在荒漠产业中引入PPP模式的必要性及其意义所在,即约束企业行为使荒漠产业能够真正起到生态恢复的作用。在PPP模式下,政府部门和私营企业共同经营项目,凭借着政府利国利民的社会责任感、基于国情的远景规划,合作项目可以在挖掘荒漠产业诱人的潜力时,采用集约化的生产方式,统筹规划,将生态恢复作为产业的首要目标,将保护脆弱的生态环境寓于开发之中,寻求生态保护、经济效益的双赢,避免了经营目的向单方经济利益倾斜的可能性。

(3) 能降低风险以吸引更多的企业投资。PPP模式对企业的吸引力在于政府参与给企业带来的风险分担。荒漠产业具有较为明显的公益性,能促进荒漠化的治理,但是由于初期投入高、建设周期长、经济回报缓慢等特点,使私人部门面临着资金不足和融资代价高等问题,因而私人部门单独投资荒漠产业建设存在着较高的风险。通过PPP模式,政府部门成为企业合作的股东,共同经营项目,并分担项目实施的风险和分享项目带来的回报,克服了以往风险由企业独自承担的弊端。尽管目前已有很多分担风险的方式,但PPP融资模式的独特之处在于能将风险合理地分配并降至最低,同时企业还可以获得国家土地、税收、贷款等方面的优惠政策支持以及生态建设的资金补贴,这一完美的协调平衡能够确保在风险合理分配的基础上实现最佳经济效益,从而提高企业投资的积极性,吸引更多的民间资本参与荒漠化治理。

(4) 能引入监督机制保障生态环境恢复和人民的利益不受侵害。PPP模式中的第三方与项目没有直接的关系,能够对政府部门与企业的合作及其成效进行客观的评估、公正的协调和严格的监督。如由近百名企业家组成的“阿拉善SEE生态协会”等,这种非政府组织,凭借着他们极强的社会责任感,可以为公私合作把握好方向,不会因为公私合作而侵害人民的权益、滋生腐败现象,保障人民尤其是处于社会底层的劳动人民的切身利益。

根据PPP模式的特点和我国荒漠化治理现状,可知运用PPP模式不仅可以引进大量的私人资本缓解我国在荒漠化治理中资金投入的压力,而且可以克服我国现行荒漠化治理模式的种种弊端,有效地遏制荒漠化的蔓延。

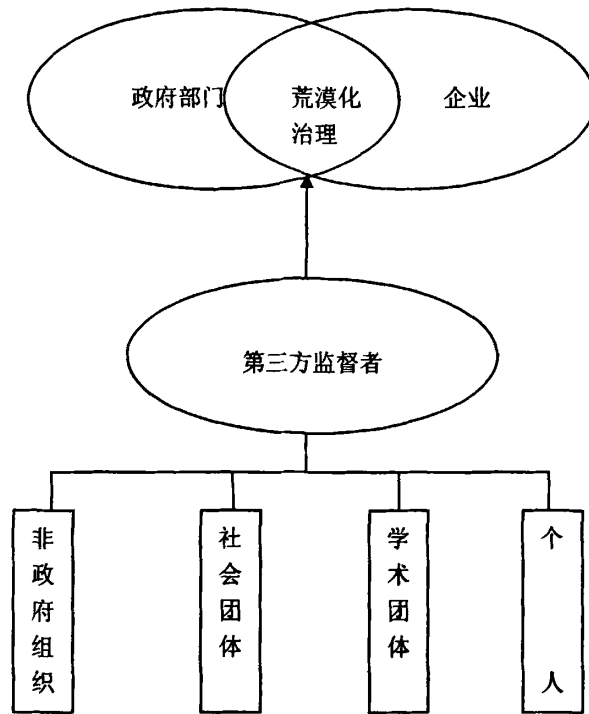


图 5-6 PPP 模式在治理荒漠化中的关系

当前在应对我国荒漠化防治方面,利用PPP模式可以从以下几个方面进行:

(1) 政府与私人部门合作。利用PPP模式,一方面政府将生态工程建设资金按项目招标制运作、合同制管理,使一部分公益性明显、运营良好的企业能够参与到其中;另一方面,对于私人部门单独运营的荒漠产业政府可以参与进来,给予其以资金、政策等方面的保障。这样既可使国家的生态建设资金能够高效使用,又可解决这类企业自有资金不足或融资代价高的问题,使产业发展和国家生态建设形成互促机制。

(2) 政府与当地人民合作。引入PPP模式,政府与当地人民分别作为公私双方进行合作,尽可能地引导当地人民从事附加值较高的第二、第三产业,这样既可解决农牧民的生计问题,将大量的牧民和当地农民从简单的放牧和农业劳作中

解放出来,又可给当地脆弱的生态环境创造一个休养生息的机会,使已经退化或将要退化的生态系统得到自然恢复。

(3) 政府与外资企业合作。根据PPP模式,在荒漠化治理方面与外资企业合作,具有很大的发展空间。当前在世界范围内不乏在荒漠产业建设方面有成功经验的企业,我国可以根据PPP模式的方式进行合作,与这些外资企业签订合同,让他们在中国的荒漠化地区进行一定期限的产业经营,合同期满后,我国在其运营的基础之上再进行运营。此外,我国目前在防沙治沙方面的主要合作国家有德国、韩国、澳大利亚等,合作方式以无偿援助的造林项目为主,如果采用PPP模式开展政府与外资企业合作,就有可能引进更多的投资、先进技术和管理理念。

当然,为建立上述的以强化市场机制从而调动社会各方面的力量为防止主体,以法律和政策为支撑,政府部门综合规划、监督和管理为基础的新思路来解决荒漠化新路子。新型荒漠化治理模型,就有必要对现行的政府部门、产业政策和法律法规作相应的改革和调整。

5.5.3 以市场为主导治理荒漠化的对策分析

5.5.3.1 改革管理体制,转变政府职能。

(1) 我国现在荒漠化治理体制存在的问题

防沙治沙并不是一个单纯的技术问题,同时也是社会问题和管理问题。它涉及了社会、经济、生态各个方面和林业、农业、水利、交通、环保等各个政府部门。这是一项复杂的系统工程。以往,荒漠化的防治之所以不尽如人意,很重要的一个原因就是缺乏一个协调生态建设的国家级管理权力机构,政出多门,条块分割,各行其是,多元领导突出。

在我国,荒漠化的治理工作是与多个部门负责的,包括农、林、牧、水利、治沙等部门,多个部门共同治理。20世纪90年代以来,我国先后成立过“全国水土保持工作领导小组”和“中国防沙治沙协调小组”。1994年,为适应履约的需要专门成立了“中国防治荒漠化协调小组”,由国务院相关的16个部门组成,1998年增加经贸委,1999年增加中国气象局2006年增加民政部,至今共19个成员单位。1999年,经中编委批准成立了国家层面具有行政职能的事业单位——“防治荒漠化管理中心”,专门承担协调小组和执委会的日常事务。目前,参加中国防治

荒漠化协调小组的19个部、委、办、行、局，其主管业务虽然都与防治荒漠化行动有关，但按关联程度却有远近之分，相关责任也有大小之别。由于参加单位的职责不明确，每次参会多为作客心态，各参加部门会逐渐趋向消极、冷漠，这显然不利于防治荒漠化行动的开展。在现实中，各部门不能协调一致治沙造林、资金管理混乱、责任不落实，农、林、牧业之间缺乏统一管理规划，矛盾突出，资源得不到合理利用对环境的治理不能从整体上综合考虑，治理费用存在着严重的部门分割，经费使用缺乏有效性和可持续性。

因此，单靠成立一些新机构，像成立“国家治沙局”“国家防治荒漠化管理局”等机构，不仅解决不了根本问题，只能增加内耗和扯皮，更难协调。

（2）改革我国荒漠化治理体制的方向

凡属环境问题，都是跨行政区横向发展的，而解决环境问题的政府部门却是纵向设计的，这种部门分割和地域分割的纵向的行政管理模式，是不可能从根本上解决横向的环境问题的，所以要彻底解决环境问题就必须横向来设计我们的环境行政管理体制，以此避免部门之间工作中的扯皮、内耗、分散和重复，提高生态建设工程的整体效率。

我国防治荒漠化工作之所以需要这么多部门参加，又如此难协调，从根本上讲是我国政府职能机构的设置缺少一个象日本国土厅、美国内政部、法国领土整治部等统管国土资源环境的部委，全面负责国土资源环境的调查、监测、灾害预报及管理、评估、租让和规划开发建设等项事务。

对于目前我国行政管理体制中存在的问题，我们党在十七大报告中也提出了相应的些原则性的要求，更提出了具体、操作性的改革思路。其中，探索实行职能有机统一的“大部门体制”，健全部门间协调配合机制是未来发展的方向。在此，建议实行机构重组——设立资源环境部，由国务院直接领导，以提高其权威性和可操作性。

建议在今后的机构改革中，通过合并、改组现有十几个分管资源和环境的机构，组建新的资源环境部。其职能应为四大部分：

- 一是国土资源环境的调查、监测、评估和灾害预报；
- 二是国土资源环境的开发整治规划；
- 三是国土资源环境的管理和租让；

四是国土资源开发的建设事务管理。

对于荒漠化的防治来说,环境部门的主要职责应该是定期调查和监测全国范围内的荒漠化的发展和治理情况,并对产生严重危害的荒漠化事件进行预警,及时向全社会公报。对于确定进行治理的区域,应该通过招标让治沙企业来进行。

在政府资金的投入和管理方面,应逐步建立以招、投标为主要形式的资金投入机制、通过竞争,提高资金的投入效率。建立资金的现代化管理方式,加强资金使用过程的管理,提高资金的使用效率。政府要把鼓励社会力量投资治理的优惠政策落到实处,简化行政审批环节,提高办事效率。同时,还要提供技术、项目、产业政策、市场等方面的信息服务引导整个防沙和治沙企业的发展。此外,加强对防沙治沙和相关企业的监督和管理,保证荒漠化的防治过程处于健康有序和公平透明的环境下发展。

5.5.3.2 调整现行政策,引入市场机制

早在1991年为励社会力量积极投入荒漠化防治,国务院就下发了《关于防沙治沙工作若干政策措施意见的通知》,国家税务总局下发了《关于治沙和合理开发利用沙漠资源给予税收优惠的通知》,地方各级政府也先后出台了“谁开发、谁治理、谁受益”、“继承荒漠土地使用权”等一系列优惠政策,在造林方面沿用了“谁造谁有”的林木所有政策。然而,在实际的操作过程中,相关的配套政策并不完善,还存在一些相互矛盾和不协调的问题,再加上实际情况比较复杂,给政策的落实带来一定困难。特别是企业和个人治理沙漠的行为多是跨地区、跨行业、跨所有制的,而现行的土地使用和开发政策、林业政策、农业政策在这方面几乎没有明确的规定,这给社会力量介入荒漠化防治带来了一定的障碍。还有政府部门办事效率低下,审批程序复杂,治沙的门槛太高等等,都限制了荒漠化治理的市场化。

因此,对于引进市场机制,吸引社会力量和当地群众加入到治理荒漠化的治理当中来,今后政府应从以下几方面来完善其有关政策和转变其职能。

第一是制定优惠政策,吸引社会力量投资荒漠化治理。荒漠化治理的公益性属性,决定了只有得到政府的特殊支持和补贴,企业或个人才有投资治理积极性。

(1) 资金上的支持。由于荒漠化治理与开发投资大周期长, 因此, 对于资金的需求是相当巨大的, 政府应该继续制定相关专项资金, 并适当增加相应的预算支出。政府除工程建设投资以外, 将农林牧等各部门、扶贫、农业综合开发等资金捆在一起从而统一使用, 以加大对企业或个人经济资助的力度和规模。

(2) 贷款上的优惠。对于天然林保护、退耕还林、湿地保护、荒漠化等“绿色”项目, 应该给予贷款的优先权。07年农发行去年发放绿色信贷逾270亿元, 涉及上述的项目30多个, 建成后可新增绿地面积8837亩, 治理沙漠化面积115平方公里^[31]。今后应该进一步完善, 在必要情况下可以实行低息和贴息的贷款政策, 并简化贷款手续, 放宽贷款条件。此外, 根据产业开发的内容不同实行不同的还贷期限, 如投资周期长的林果产业, 还贷期限也可以适当延长。

(3) 税收上的优惠。对于对投资于荒漠化治理的企业或公司, 应该征收低税赋甚至是免税, 对所有利用沙漠化土地开发出的、并且没有破坏生态的产品, 可采取较长时期的低税甚至免税政策以鼓励企业投入荒漠化的治理过程。

第二是制定明晰的造林地产权制度, 提高荒漠化治理者的积极性。无论是国外还是国内, 显著的环保成就, 与明确的土地产权不无关系。在这方面, 我国已经有一些尝试。如承包荒山使用权的改革, 使一些原本光秃秃的荒山, 经过承包者若干年的努力, 荒山都披上了绿装。但是, 也经常有一些在荒山的树木开始成材时, 基层政府即推翻承包协议, 没有任何补偿措施而强制收回山林, 大大伤害了民间力量参与社会公益事业的积极性事件的发生。因此只有生态资源产权明晰化, 才能有利于形成荒漠化治理的良性循环。如将需要治理的荒漠化土地以低价无偿等方式承包给企业与个人时, 除了规定承包、租赁期几十年不变以外, 还必须使承包、租赁者所获取的这种长期的资源使用权能得到法律的有效保护和支持, 使承包者或承租者拥有长远又充分的资源使用、转让和经营管理权。

第三是建立生态效益补偿制度, 保护治理者的积极性。为了补偿生态公益经营者付出的投入, 弥补工程建设经费的不足, 合理调节生态公益经营者与社会受益者之间的利益关系, 应当尽快建立生态效益核算和补偿制度。首先要让使用治理好的荒漠化土地的单位和个人缴纳补偿金, 其次对破坏生态的单位和个人不仅要支付罚款, 还要缴纳补偿金; 最重要的还是需要国家投入, 建立生态补偿基金。

此外,虽然当前治沙的主体有企业也有个体承包,但未来的发展方向应该是以培养有相当技术、资金和管理水平的企业为主,才能使整个防沙治沙行业不断发展。因为个体承包型虽然较好地解决了权责利的问题,但容易受到资金、技术和市场营销能力的限制不适应进行大规模荒漠化治理。如1980年代初期,山西河曲县承包治理“四荒”的第一人苗混瞒,他承包治理的荒山,从目前来看虽有效益,但效果不理想,究其原因一是科技投入少,经济林品种老化,效益下降;二是后续资金不足,基础设施建设跟不上。

因此,通过产权改革,引入市场机制,将政府主导型治理模式逐渐转变成由企业化治理的模式上来。这些企业都是合同制管理,公司制承包,股份制经营,自负盈亏,独立核算的,以提高其技术开发和竞争力。它们可以通过竞标的方式参与国家和地方政府的荒漠化治理工程。引入这样的机制有以下的好处:一是企业可同时开发上万亩的荒山、沙漠,进行荒漠化治理的规模大,持续长,可以使荒漠区的林草产业、生态农业产业取得突破,从而造就一批有潜力的治沙新型产业。二是企业运作比个体承包开发者的资金、技术和市场营销能力强,比政府行为型开发模式更为规范。同时,竞争还迫使企业加强生态技术的开发应用向市场提供更具竞争力的绿色产品,即企业具有形成产业的竞争机制。三是企业运作有助于提高国家生态建设资金使用效果。国家用于生态建设的资金可以采取企业化方式运作,即以国家资金与企业资金相结合,组建生态治理型企业,避免建设资金过于分散。如果把企业增加的就业机会及生态建设的综合效果都考虑在内,企业化运作的资金使用效果是其它运作方式无法比拟的。

5.5.3.3 健全法制体系,明确治理责任,保护治理权益,增强法律宣传

(1) 健全防治荒漠化的法制体系。我国是最大的发展中国家,建立健全行之有效的防治荒漠化的法律体系是十分必要的。虽然,我国已经颁布实施《环境保护法》、《自然资源法》、《土地管理法》、《草原法》、《森林法》、《水法》、《防灾减灾法》等法律法规,保护环境、防治荒漠化在有关法规中或多或少都有所体现。但我国法律法规有时政出多门,不够协调;有时条文规定比较原则,操作性差。

例如根据《中华人民共和国环境保护法》的规定：“地方各级人民政府，应当对本辖区的环境质量负责，采取措施改善环境质量。”“跨行政的环境污染和环境破坏的防治工作，由有关地方的人民政府协商解决，或者由上级人民政府协调解决，做出决定。”由《中华人民共和国环境保护法》可以看出，环境质量是属于地方责任制，但对于荒漠化这类的跨区域环境问题来说，这项责任机制显然并不具备科学性和合理性。虽然环保法中也规定了跨区域的环境问题由地方政府协商解决或者由上级政府协商解决，但并没有在法律中对于上级政府在跨区域环境治理上的责任进行很好的定位，也没有对各级政府的职责作出明确的分工，因此其操作性不强。

我国在防治荒漠化等环境法律时，往往不具有针对性，过于粗而不够细致，对于不同的情况没有相应的法律规定。在实际中，常常是有法难依，不知如何依法量刑。比如滥砍滥伐，在荒漠化严重的地区，根据相关的法律，砍伐一株100年—200年树龄的红柳，应如何处罚，是罚款3000—5000元还是处以有期徒刑1年—3年。我国的相关法律都没有明确的规定。

我国环境保护的法律中存在许多类似上述的问题，因此在今后的法律制定中，要注意法律的明确性、针对性和可操作性。

(2) 明确各级政府在防治荒漠化方面的法律责任和义务。荒漠化影响严重的省、自治区、直辖市有责任和义务阻止荒漠化的蔓延和扩大。各级地方各级政府要根据《全国生态环境建设规划》的要求，制定自己的长远规划和五年计划。对于荒漠化的治理，应该实行地方政府工程管理“一把手”责任制制度，由该行政区域的一把手来负责其辖区内的沙漠化防治的责任，并应以法律形式固定下来，以增强地方行政领导对防治荒漠化的重视程度，加强工程质量监督管理力度，加强资金使用管理工作力度，同时，要使目标责任管理落实到人，以此来解决目前在荒漠化地区边治理边破坏的现象，也可用有效减少工程质量差，“豆腐渣”工程等问题的产生。

(3) 保护治理荒漠化的治理成果加大对违法犯罪行为的处罚力度。我国法律对于破坏植被等各类违法活动，往往以罚款的形式进行处罚，这样的惩罚措施往往造成违法活动的违法成本很小，不足以威慑各类违法活动，一定程度上加剧了各类违法活动，也使各类防治工作的成果得不到保障，这是不利于吸引社会

力量投资于荒漠化的防治工作。因此我国的法律应加重对此类违法犯罪行为的惩处力度,保护治理工作的成果。

(4) 要加强荒漠化防治法律的教育宣传,增强全民的法制意识。在普法教育中必须防治荒漠化和保护环境的内容。防治荒漠化是一项长期的战略任务,因此,必须向长期向民众普及荒漠化继续蔓延对我国带来的严重危害,强其防治荒漠化的忧患意识;向民众宣传我国防治荒漠化的相关法律法规,使持续发展和防治荒漠化的法制深入人心,形成“防治荒漠化、人人都有责”的社会新风尚。此外,也要及时披露破坏相关法律法规的重大案件的判决,使社会公众得到震动和教育。

5.6 小结

(1) 本章首先分析了我国北方荒漠化形成过程中人类行为所造成的影响。几千年来,特别是近代以来,由于人类人口数量的增加和人类活动增多加剧了西北荒漠化的蔓延,并成为造成荒漠化的不断发展的主要原因。而人类活动主要是通过通过对水资源、植被、土壤和气候等方面加剧了我国西北地区荒漠化问题。

(2) 在分析了人类活动对荒漠化的影响之后,本章回顾了我国应对荒漠化问题所采取的一系列防治工程和政策。“三北防护林体系”、“治沙工程”、“封山禁牧,舍饲圈养”、“退耕还林”等工程 and 政策的实施基本遏制了荒漠化加剧的势头,对于荒漠化的防范和治理起到了非常积极的作用,取得非常大的成就。同时,我们也看到在上述工程 and 政策的实施过程中也存在着了很多的问题,如资金不足不到位、技术水平有待提高、管理能力需要进一步改善等等问题,需要在今后的工作中得到完善。

(3) 本章在上述的分析之后,针对以政府为主体的荒漠化治理模式的存在不足,提出了引进市场机制吸引社会力量特别是企业作为荒漠化防治的主体力量来共同关注并参与到荒漠化的治理工作当中来,发展成为以企业为主体的荒漠化治理结构。在当前的条件下,我国可以通过引入PPP机制来加强企业和政府部门的合作,解决荒漠化治理过程中的资金短缺、管理落后、效率低下等问题。为进一步有效的治理荒漠化,需要转变我国的政府转变为服务型政府部门,成立大部制的资源环保部门以便进行统一规划和管理;需要制定优惠的资金政策,明确的产权政策和生态补偿政策来引入市场机制;还需要健全荒漠化治理法律体系,

明确各级政府的治理责任,加大对违法犯罪行为的处罚力度保护治理成果和进行持续的宣传教育。

参考文献

- [1] 维西,中国土地,去掉国土脸上的“黄斑”,2007年第8期,30-33
- [2] Dregne H.E.Desertification of Arid Lands, Economic Geography, 1977, 53 (4)
- [3] Glantz,M.H.,and N.S.Orlovsky, Desertification:A review of the concept. Desertification Control Bulletin, 1983, 9:15-22
- [4] 中国荒漠化协调小组办公室. 中国荒漠化报告[M], 1996, 11
- [5] 慈龙骏. 我国荒漠化发生机理与防治对策[J]. 第四纪研究, 1998, 2: 97-107
- [6] 慈龙骏. 全球变化对我国荒漠化的影响[J]. 荒漠化及其防治, 1995
- [7] 董光荣, 吴波, 慈龙骏等 我国荒漠化现状、成因与防治对策, 中国沙漠, 1999年12月第19卷, 第4期, 318-331
- [8] 李香云, 王立新, 章予舒等, 西北干旱区土地荒漠化中人类活动作用及其指标选择, 地理科学, 2004年2月, 第24卷, 第1期, 68-75
- [9] 关于西北地区水资源配置、生态环境建设和可持续发展战略研究项目
- [10] 王乃昂, 顾耀文, 薛祥燕, 近2000年来人类活动对我国西部生态环境变化的影响, 中国历史地理论丛, 2002年, 9月, 第13卷, 第13期, 12-19
- [11] 孙金铸, 鄂尔多斯草原沙漠化的因素与防治意见, 内蒙古师院学报(自然科学版), 1981, (1):60-67
- [12] 杨莉, 荒漠化发展及防治探讨, 山西水利, 2007年第2期, 42-43
- [13] 郭绍礼, 杜国恒, 王钟建, 晋陕蒙接壤地区环境整治与农业发展研究(总体研究, 北京: 中国科学技术出版社, 1995, 51—52
- [14] 张晓龙, 张艳芳, 赵景波, 近年来中国沙尘暴发生特点、成因及其防治对策, 干旱区资源与环境, 2001年9月, 第15卷第3期, 31-36
- [15] 李香云, 王立新, 章予舒, 西北干旱区土地荒漠化中人类活动作用及其指标选择, 地理科学, 2004年2月, 第24卷, 第1期, 68-75
- [16] 任国玉, 郭军, 徐铭志等, 近50年中国地面气候变化基本特征, 气象学报, 2005年12月, 第63卷第6期, 942-954
- [17] 张军民, 中国西部气候特点及其变化浅析, 兵团教育学院学报, 2006年第1期, 第16卷第1期, 23-26
- [18] 国家林业局网站, <http://www.forestry.gov.cn>

- [19] 人 民 网 ， 中 国 地 方 领 导 在 线 ， 网 址：
<http://202.99.23.71/GB/channel79035/80210/80211/200510/08/37285.html>
- [20] 莱亚林, 肩负防沙治沙重任谱写生态和谐乐章, 经济, 2007 年第四期, 114-115
- [21] <http://greenfood.northeast.cn/system/2005/06/15/050057564.shtml>
- [22] 包庆丰, 李丽丽, 荒漠化防治政策实施的经济学分析, 林业经济, 2007 年第四期, 56-58
- [23] www.tghl.gov.cn
- [24] 公用事业项目融资及其路径选择——基于 BOT、TOT、PPP 模式之比较分析, 冯 锋, 张瑞青,, 软科学, 2005(19):6
- [25] 孟伟庆, 李洪远, 鞠美庭, PPPUE 模式及在中国的应用前景探讨, 环境保护科学, 2005(5) : 63-66
- [26] 中国金融网:
- [27] <http://active.zgjrw.com/News/2008225//Bank/000309307000.html>

第六章 结论与讨论

6.1 主要研究结论

本论文将地面气象资料、遥感资料、数值模式相结合,研究了中国北方沙尘暴时空分布的特征,分析了沙尘暴发生与多时相气象要素之间的关系,探讨了沙尘暴发生的机理及提高沙尘暴预报预报准确性的数值模式方法,通过对现有沙尘暴防治方法与政策的分析,提出了现有方法和政策所存在的弊端,提出了新的防治沙尘暴的对策方案。主要结果分为以下几个方面:

1) 中国北方沙尘暴的时空分异规律和变化趋势。本论文在地理信息系统技术支持下,分别以多年的年、月平均为指标,全面分析了我国沙尘暴发生的时空分布格局、影响范围、年内发生特征等,重建了50年来中国沙尘暴的空间分异格局和季相变化规律,并对全国受沙尘暴影响严重的省市的沙尘强度、特征等进行了定量分析。然后,以沙尘暴出现日数为定量指标,分析了我国北方沙尘暴近40年的变化趋势。

论文结合DEM模型,提出了较传统的方法更为科学对站点数据进行空间格局的恢复,重建的沙尘暴空间分布更接近于实况。

全国沙尘暴空间格局总体呈西南-东北分异。重点区域在西北,并相对集中分布在新疆南部、西藏北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。灾害发生的最大、最小年份和多年平均状况的影响界线分布基本一致,只是影响程度不同;

从灾害发生时间的月相过程看,重度区域从11月一直延续到次年6—7月,时间跨度很长,按年内变化趋势可以分为三种类型和两个过渡带。全国受沙尘暴影响较为严重的共14个省(直辖市、自治区),总面积624万平方公里,占我国国土面积的65%,重灾区主要分布西藏、新疆、内蒙、甘肃、青海和宁夏一带;

我国沙尘暴的空间和强度变化分布呈现明显周期变化规律。随着季节的变化,沙尘暴发生的动力条件和下垫面条件性质都将发生周期性变化,这种变化规律与沙尘暴空间和强度的周期变化有着明显的一致性。因此,在定性到定量的沙尘暴研究中,除了需要对沙尘暴的天气特征进行定量研究外,应该对与沙尘暴有

关的下垫面的参数及其时间变化规律进行定量的研究,从而提高沙尘暴的研究精度;

近40—50年来,我国北方沙尘暴天气总体呈下降趋势,有四个区域呈上升趋势,范围比较小,分别是北疆西部,以昭苏为中心;青海西北部,以芒崖为中心;青海东部,以兴海为中心;内蒙古中部,以朱日和为中心。尽管沙尘暴频次总体上在降低,但强度在增加,近年来有增强的趋势。

内蒙古的荒漠区沙尘暴发生频率高于草原区和农业区,农业区的沙尘暴下降趋势比较明显,农牧交错区的沙尘暴年变率较大,证明沙尘暴发生频率受下垫面生态环境状况的影响。朱日和是内蒙古沙尘暴发生频繁的站点。

近50年来,沙尘暴天气的年代际变化总特点为:上世纪50年代呈增加趋势,60、70年代沙尘暴发生频繁,尤其1966年沙尘暴发生频数达到峰值,80年代开始下降,90年代在减少中有回升趋势,进入2000年,沙尘暴频次明显增加。尽管2000—2002年沙尘暴频次明显增加,但大部分站点频次没有超过历史均值,属低频状态下的波动增长。

2) 中国北方沙尘暴形成的机制。本论文以沙尘暴日数、沙尘暴持续时间、大风日数、降水、温度、植被覆盖度、DEM和沙漠、沙地分布为主要变量,借助数据统计分析技术,分析了影响沙尘暴形成、演化过程的下垫面主导因子,同时也分析了沙尘暴与下垫面的关系,最后对沙尘灾害的形成机制进行了探讨。

中国北方沙尘灾害是风、环境因子和人类活动共同作用的结果,沙尘暴发生日数和持续时间与四季的降水、温度、植被覆盖度和大风日数有很大的相关性。其中,与降水量和植被覆盖度呈负相关关系,与大风日数和温度呈正相关关系;上年夏季和本年春季的降水量,以及上年夏季的植被覆盖度和本年春季的温度相关程度最为显著。降水和温度主要通过影响地表植被覆盖度来影响着区域沙尘暴的发生频率和持续时间。沙尘暴的频繁发生主要是由于降水的持续减少使得地表干燥及植被覆盖度降低造成的。

影响春季、全年沙尘暴日数和年沙尘暴持续时间的各因子中,植被覆盖度的周期变化是影响沙尘暴频率的重要影响因子,其次是大风日数和降水量的影响,温度对沙尘暴的影响是最小的,但也是不可忽视的因子。

因子分析结果表明,大风日数和温度组成沙尘暴产生的动力因子,植被覆盖度和降水组成沙尘暴形成和搬运的阻力因子。动力因子与沙尘暴日数和持续时间的相关系数远低于阻力因子,阻力因子是沙尘暴产生的内因所在,而动力因子是外因,当植被覆盖差,降水少,达到了沙尘暴发生的临界状态时,动力因素才能成为沙尘暴产生和搬运的主导因子,从而影响沙尘暴的产生和发展。可见,改善北方干旱半干旱地区的植被覆盖,是控制沙尘暴之根本。

中国北方大风日数的空间分布与沙尘暴年日数的空间分布并不完全一致,说明沙尘暴的发生频次除了受到区域大风日数的影响外,同样受到下垫面的地形地貌、植被覆盖等条件的影响。

与北京沙尘天气相关的气象站点主要分布在内蒙古中西部、甘肃、河北的张家口,以及新疆东部和青海北部。影响北京地区的沙尘暴路径主要是北方路径和西北路径,北方路径:内蒙古乌兰察布盟和锡林郭勒盟西部→浑善达克沙地→张家口→北京;西北路径:新疆东北部至内蒙古阿拉善盟北部→河西走廊→贺兰山分为南北两路→分别经毛乌素沙地和乌兰布和沙漠→包头、呼和浩特→张家口→北京。北京沙尘暴的主要沙尘来源为新疆东北部、阿拉善高原、鄂尔多斯、阴山北坡、浑善达克沙地和坝上高原,只有这些地区的生态环境得到改善,才能减缓沙尘暴对华北地区的影响。

土地利用/覆盖变化和植被覆盖状况与生态环境安全水平密切相关,它是人类活动和气候变化对地球表层作用的结果。土地利用/覆盖格局的变化,以及土地退化、荒漠化带来的植被覆盖度下降,导致生态环境安全水平大幅下降,容易引发沙尘暴这一生态环境灾害。研究结果也表明,土地利用/覆盖变化及植被覆盖度与沙尘暴频次和强度变化有着显而易见的耦合关系,因此,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。

3) 植被参数变化对沙尘起沙影响机理的数值模拟研究。本论文采用沙尘天气集成数值预报系统,并与国家气象中心 T213 全球业务模式的嵌套,将 T213 模式的分析和预报结果为沙尘天气数值预报系统提供初始场和侧边界资料,数值模拟研究了植被参数变化对沙尘起沙影响机理。

根据 Sehmel (1980) 对叶面积指数的总结,对叶面积指数进行分级,我们

将 $75^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内的叶面积指数数据分成了 0、0.5、3.0 和卫星反演的实测值 4 种。

在沙尘暴的数值模拟中,我们使用了卫星反演的叶面积指数。希望通过这个参数反映地面植被的生长情况,提高模式的预测能力。但是叶面积指数到底对沙尘浓度有多大的影响还不清楚。我们的敏感性试验就是想搞清楚这个问题。经研究表明,在我国 35°N 以北、 120°E 以东绝大多数地区的叶面积指数值小于 0.5, 在新疆、内蒙西部、甘肃西北部等叶面积指数大多在 0 和 0.1 之间,这也与我国沙尘天气频发区相一致。

4) 人类活动对北方沙尘灾害影响与对策研究。几千年来,特别是近代以来,由于人类人口数量的增加和人类活动增多加剧了西北荒漠化的蔓延,并成为造成荒漠化的不端发展的主要原因。而人类活动主要是通过对水资源、植被、土壤和气候等方面加剧了我国西北地区荒漠化问题。

论文回顾了我国应对荒漠化问题所采取的一系列防治工程和政策。分析表明,“三北防护林体系”、“治沙工程”、“封山禁牧,舍饲圈养”、“退耕还林”等工程 and 政策的实施基本遏制了荒漠化加剧的势头,对于荒漠化的防范和治理起到了非常积极的作用,取得非常大的成就。

本文针对以政府为主体的荒漠化治理模式的存在的不足,提出了引进市场机制吸引社会力量特别是企业作为荒漠化防治的主体力量来共同关注并参与到荒漠化的治理工作当中来,发展成为以企业为主体的荒漠化治理结构。在当前的条件下,我国可以通过引入 PPP 机制来加强企业和政府部门的合作,解决荒漠化治理过程中的资金短缺、管理落后、效率低下等问题。为进一步有效的治理荒漠化,需要转变我国的政府转变为服务型政府部门,成立大部制的资源环保部门以便进行统一规划和管理;需要制定优惠的资金政策,明确的产权政策和生态补偿政策来引入市场机制;还需要健全荒漠化治理法律体系,明确各级政府的治理责任,加大对违法犯罪行为的处罚力度保护治理成果和进行持续的宣传教育。

6.2 主要创新点

1) 针对沙尘暴的时空分布,论文在地理信息系统技术支持下,重建了 50 年来中国沙尘暴的空间分异格局和季相变化规律,并对全国受沙尘暴影响严重的省

市的沙尘强度、特征等进行了定量分析。结合DEM模型,提出了较传统的方法更为科学对站点数据进行空间格局的恢复,重建的沙尘暴空间分布更接近于实况。

2) 以沙尘暴日数、沙尘暴持续时间、大风日数、降水、温度、植被覆盖度、DEM和沙漠、沙地分布为主要变量,借助数据统计分析技术,分析了影响沙尘暴形成、演化过程的下垫面主导因子,同时也分析了沙尘暴与下垫面的关系,最后对沙尘灾害的形成机制进行了探讨。

3) 采用沙尘天气集成数值预报系统,并与国家气象中心T213全球业务模式的嵌套,将T213模式的分析和预报结果为沙尘天气数值预报系统提供初始场和侧边界资料,着重从叶面积指数变化和植被覆盖度变化对风蚀起沙影响进行数值模拟研究,进一步探讨了植被参数变化对沙尘起沙的内在机理。

4) 本文针对以政府为主体的荒漠化治理模式的存在的不足,提出了引进市场机制吸引社会力量特别是企业作为荒漠化防治的主体力量的新设想,在未来的荒漠化治理工作中发挥企业为主体的荒漠化治理新措施。

6.3 讨论与展望

一方面,随着人们生活水平的提高,对居住环境的要求也越来越高。另一方面,我国政府已经深刻地认识到以牺牲环境为代价的经济发展是不可持续的,环境问题已经讲政治的高度。沙尘暴作为环境问题中的重要方面,应当引起我们的高度重视。沙尘暴问题从来就不是一个单纯的自然界的事情,人对于环境问题也不是束手无策,当前,我们应该急需关注的是如何尽快地将沙尘暴的发生发展规律研究清楚,并且在现有的条件和体制下提出尽可能切合实际的对策。本文虽然研究了中国北方沙尘暴时空分布的特征,分析了沙尘暴发生与多时相气象要素之间的关系,探讨了沙尘暴发生的机理及提高沙尘暴预报预报准确性的数值模式方法,通过对现有沙尘暴防治方法与政策的分析,提出了现有方法和政策所存在的弊端,提出了一些新的防治沙尘暴的对策方案。但是,涉及沙尘暴这一复杂现象的很多方面问题还没有深入研究,期待今后将进一步完善。

1) 地理信息系统中的新疆地面植被参数和土壤类型不很准确,今后的工作中需要对此区域的陆面参数进行改进。

2) 在对沙尘暴的气候特征进行分析方面, 与其它更广泛的气候因子之间关系的分析相对缺少, 如极涡、经纬向环流、西太平洋副热带高压、西风环流、南方涛动等因素。

3) Shao (2001) 起沙方案模拟结果显示48小时预报的沙尘发生区域与24小时预报的基本一致, 但48小时预报的浓度中心位置与观测更加一致。这是沙尘浓度初值设为0, 模式自我调整需要一定的时间所致。在预报试验中, 因没有沙尘气溶胶的观测初始值, 在计算中将沙尘初值设为零, 这样在计算中丢失了保留在空中的沙尘信息。观测的 pm_{10} 的浓度高于模拟值, 这进一步说明如果沙尘暴已经生成, 而模式计算的初始场中没有赋予沙尘浓度值, 将会使模式的预报结果明显偏小。沙尘暴模式急需解决沙尘气溶胶的初始值问题。

4) 一系列防治荒漠化工程和政策的实施过程中所存在如资金不足不到位、技术水平有待提高、管理能力需要进一步改善等等问题, 需要进一步分析详细的原因, 针对不同情况提出更加合理的对策。

在读期间参加的科研活动和发表论文情况

参加的科研活动:

1. 2005.03—2006.03, 参加了气象科学数据共享中心建设研究项目(国家科技基础条件平台项目), 本人主持承担了该项目第8专题—《行业数据资源整合和共享试点》, 并通过了由李泽椿院士任专家组组长的中国气象局组织的技术验收鉴定。
2. 2006年-2007年, 参加了国家自然科学基金面上项目《基于生态理论与方法优化沙区人工植物群落研究》。
3. 2006.03—现在, 参加了由中国气象局下达的气象服务效益评估方法与评估研究项目。本人主持承担了行业气象服务效益评估专题研究。
4. 2007—现在, 参加了科技部、教育部联合下达的教育公益专项《雷电信息管理系统开发及相关规范的研究》项目研究。本人主要负责有关技术标准和技术规范的研究。
5. 2006年—现在, 参加了国家自然科学基金面上项目《对流传输和湿沉降过程对亚洲暴影响机理的数值模拟研究》(批准号: 40705038)的研究项目。本人主要负责沙尘暴机理研究。
6. 2007—现在, 参加了中国气象局下达的《事业单位改革及服务业改革对气象事业的影响研究》项目研究, 本人负责气象服务的分类及发展模式研究。

发表文章:

1. 张钦仁等, 气候变化对中国青海天然牧草影响研究, 《高原气象》2007 Vol. 26 No. 4, 一级核心期刊。
2. 张钦仁等, 下垫面植被参数变化对沙尘起沙影响机理的数值模拟研究, 《高原气象》2008 Vol. 27 No. 2, 一级核心期刊。
3. 张钦仁等, 中国气候资源管理与可持续发展, 《中国农业资源与区划》2007 Vol. 30 No. 6。

-
4. 张钦仁等, 推进农牧业信息化建设的思考与探索, 《农业网络信息》2007 Vol.132 No.6。
 5. 张钦仁等, 我国气候资源管理的原则与政策研究, 《图书情报工作》2004 Vol.48 No.5, 一级核心期刊。
 6. 张钦仁等, 中国行业气象服务效益评估方法与分析研究, 《气象软科学》, 2007 Vol.68 No.4。
 7. Zhang tai-ren, et al .Study of dust storm and emission with an emphasis on physical background of wind erosion, Ecological Complexity and sustainability Abstracts of EcoSummit2007, 2007.05。
 8. Zhang tai-ren, et al .On Management of Climatic Resource in China, Ecological Complexity and sustainability Abstracts of EcoSummit2007, 2007.05。
 9. Zhang tai-ren, et al .China' s Climatic Resource Management and Analysis on Optimized Regulating Policies, Ecological Complexity and sustainability Abstracts of EcoSummit2007, 2007.05。
 10. Zhang tai-ren, et al .The benefit valuation method and analytical study of profession meteorological service in China, Ecological Economy(录用, 待发表)。
 11. Zhang tai-ren, et al . Impacts of Vegetation Parameters on Dust Emission Modeling JOURNAL OF METEOROLOGY (SCI , 投稿)。
 12. Zhang tai-ren, et al . The Impact of Climate Change on Native Pasture in Qinghai Province in China ECOLOGICAL COMPLEXITY (SCI , 投稿)。
 13. Zhang tai-ren, et al . Climate Resources Management and Sustainable Development in China ECOLOGICAL COMPLEXITY (SCI , 投稿)。

国际学术交流:

2007年5月应邀参加了第三届世界生态高峰会(北京), 其中Study of dust storm and emission with an emphasis on physical background of wind erosion

等5篇论文摘要被收录大会论文集 (Ecological Complexity and sustainability Abstracts of EcoSummit2007, 2007.05) 。

2007年3月参加了WMO在马德里召开的“安全与可持续生存: 天气、气候和水文气象服务社会经济效益”国际会议, 由本人为主撰写的“The benefit valuation method and analytical study of profession meteorological service in China”作了大会交流。

致 谢

本论文是在导师李自珍教授的悉心指导下完成的。导师在科学问题上的前瞻性、学术上的严谨性和不断追求的科研创新精神,使我受益匪浅;导师思维敏锐、学识渊博、品德高尚、关爱学生,处处体现出大家风范,使我感念至深,引为榜样。论文从选题、构思到具体的技术难题的解决,均得益于导师的帮助,正是在导师不断的鼓励 and 指导下,论文才得以顺利完成。在论文完成之际,谨向李自珍老师致以由衷的敬意和谢忱。

衷心感谢国家气象中心李泽椿院士、中科院大气所石广玉研究员、中科院旱寒所吕世华研究员、兰州大学王刚教授、杜国桢教授、王式功教授在我论文完成的不同阶段,在学术上给予了精心指导,对开阔思路,完善论文,提高水平,起到了十分重要的作用。在此对上述各位恩师的教诲表示衷心感谢。

感谢中国气象局政策法规司司长王志强博士、中国气象科学研究院张佳华研究员、张晓春博士、国家气象中心宋振鑫博士、赵琳娜博士、李朝生博士、国家卫星气象中心朱小祥研究员、中国气象局气象探测中心王建凯博士、民政部灾害中心范一大博士、兰州大学大气科学学院王金艳博士、清华大学吴晓峰博士等在论文框架讨论、资料收集、数据处理、模式调试、论文撰写等不同阶段给予的鼎力支持和大力协作。

感谢与我合作研究过的同学和朋友,在我的论文撰写过程,从不同角度给予的支持和帮助。他们分别是:兰州大学张锋博士、刘江涛博士、张玉平博士、元炳成博士、中国人民大学张玉峰硕士、中国气象局气象探测中心杨金红博士、王静博士、中国气象局培训中心纪翠玲博士、中国气象局政策法规司胡赫硕士等。

最后,特别感谢我的妻子柴秀梅女士,在我求学、研究、工作的艰辛历程中,她一个人承担了全部的家务和教育孩子的重任,付出了艰辛的劳动,在事业上作出了巨大的牺牲,没有她的支持和鼓励,我很难完成论文,感谢聪明、活泼、可爱的女儿张颖对我的理解和鼓励,在论文研究过程中,她们始终是激励我不断努力和拼搏进取。

张 斌 仁

二〇〇八年十月于北京