

我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望

史培军¹, 严平¹, 高尚玉¹, 王一谋², 哈斯¹, 于云江¹

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 我国强沙尘暴灾害的逐年加剧是气候干暖化背景下, 沙化土地扩展的结果。沙尘暴的频发已经成为我国北方生态环境恶化的重要标志, 加强对我国沙尘暴的研究已成为当务之急。本文阐述了我国沙尘暴灾害的现状及动态演变, 综合分析了沙尘暴发生发展的成因, 评述了我国沙尘暴的研究历史、进展及存在的问题。

关键词: 沙尘暴; 灾害; 研究进展; 中国

中图分类号: P425.5*5 **文献标识码:** A

The duststorm disaster in China and its research progress

SHI Pei-jun¹, YAN Ping¹, GAO Shang-yu¹, WANG Yi-mou², HA Si¹, YU Yun-jiang¹

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, the Ministry of Education of China, Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China)

Abstract: The duststorm disaster is a result of the interaction between the atmosphere boundary dynamics and sandy surface, influenced strongly by the climate condition, especially by wind regime and the vegetation coverage of surface sediments. The duststorm occurring frequently is now becoming an important sign of degradation of ecological environment in the Northern China, which threatens the life of human being and livestock, causes heavy wind erosion and air pollution. Therefore, it is very urgent to enhance the duststorm research in China.

Key words: duststorm; disaster; research progress; China

2000年3~4月,我国北方地区连续出现了12次沙尘暴、浮尘恶劣天气,其出现时间之早,发生频率之高,影响范围之广,危害程度之大,为近百年来所罕见,给我国北方地区的交通运输、大气环境及人民生命财产和健康带来了不利的影响,特别是对首都及其周边地区造成严重危害,引起了社会各界的广泛关注。

我国北方地区属全球四大沙尘暴区之一的中亚沙尘暴区,为全球现代沙尘暴的高活动区之一^[1]。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。近年来,由于生态环境的退化,北京地区强与特强沙尘暴灾害频繁发生,给当地及周围地区人民的生命财产造成了巨大损失。

收稿日期: 2000-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4951001); 教育部重点科研项目; 国家重点基础研究(培植)项目

作者简介: 史培军(1959-),男,陕西靖边人,教授,博士,主要从事区域资源开发、自然灾害与环境演变研究。

由于沙尘暴对人类生存环境和社会经济的危害,及其所产生的沙尘气溶胶对全球气候变化的深刻影响,人类愈来愈认识到沙尘暴不仅是一种严重的气象灾害,而且是不可忽视的生态环境问题之一。近年来,沙尘暴问题已经成为国内外地学、资源与环境学等领域的研究热点。本文对我国沙尘暴灾害的现状及其研究进展作一个综合评述,并展望沙尘暴研究的趋势。

1 我国沙尘暴灾害现状

《地面气象观测规范》将沙尘暴定义为:由于强风将地面沙尘吹起,致使空气很浑浊,水平能见度小于1km的天气现象^[1]。强风、沙源和热力作用是沙尘暴形成的三大因子。作为干旱地区天气现象和风成地貌过程,沙尘暴在漫长的地质时期就一直存在^[1]。只是进入到人类历史时期后,随着人口的增长和社会生产力的不断提高,人们逐渐认识到沙尘暴对社会经济和生态环境的巨大破坏,是一种突发性的气象灾害和生态灾难。

1.1 沙尘暴的主要危害

表1列出了建国以来我国沙尘暴灾害的10个典型案例。

表1 我国沙尘暴灾害的典型案例(1949~1998)

Table 1 The typical cases of duststorm disaster in China, 1949~1998

时间	地域范围	沙尘暴灾害情况
1949年	新疆哈密	3月18日晨8时,哈密城风云突变,狂风四起,飞沙走石,天昏地暗,至夜12时稍息,死3人。
1952年	甘肃河西23县	4月9日酒泉、敦煌、临泽、张掖、山丹、永昌、武威、环县等23个县发生强沙尘暴,仅永昌县沙埋农田400多hm ² 。据张掖气象站记载,4月9日15时至10日晨发生强沙尘暴,天空变黑,飞沙走石,能见度0级,风力9级,15时32分后风力渐减,天空变为黄色,17时后风力仍有6级,能见度仍很低。
1961年	新疆吐鲁番	5月31日~6月1日大风,风力12级以上,盆地内兰新铁路多处被沙埋,造成91次列车脱轨的严重事故,10多节车厢翻倒路边,其中一节被抛起摔坏,刮断电杆几百根,交通中断36h,下马崖等地有40多孔坎儿井被沙埋,死伤20多人。
1979年	新疆中部地区	4月10日兰新线哈密至乌鲁木齐,风力达12级以上,兰新线运输中断37h47min;南疆线中断167h,房屋损坏2.1万m ² ,门窗玻璃损坏7800m ² ,小学生死3人,波及部队仓库,毁1698.4万元物资,死2名战士,4月10~11日吐鲁番刮12级大风18h,受灾作物3万hm ² ,折树5758株,沙埋坎儿井108道,大小渠道402条,吹失麦草62.5t,化肥2.5t,倒房屋16间,26户着火,死10人,伤40人,通讯中断,总计损失143.9万元。
1983年	新疆吐鲁番、托克逊、岳普湖、英吉沙、焉耆等地	4月25~28日先后受8级以上大风危害,据不完全统计,2.4万多hm ² 农作物被损失,毁坏树木5.1万株,填平渠道9.2km,死亡牲畜843头(只),倒塌或火灾烧毁房屋242间,4人死亡,在4月26日风暴中,吐鲁番地区4800多hm ² 农作物受灾,1400hm ² 葡萄受损,刮倒树木近万株,供电、通讯线杆数百根被刮倒,90道坎儿井堵塞,倒房108间,9处起火,18户受灾,死7人,死牲畜155头(只),铁路运输设施受到不同程度破坏,运行中的69次客车和沿线车站门窗玻璃被风沙击碎600多块。
1983年	内蒙古中、西部地区、陕西榆林地区	4月27~29日大风,风力一般8~9级,瞬时最大风速在38m/s,为历年所罕见,在伊盟伴有沙尘暴天气,能见度小于200m,据不完全统计,在这次灾害中内蒙古死33人,伤46人,死牲畜9.8万头(只);牧区部分草场棚圈被沙压埋;鄂托克旗流沙埋没水井78眼,压塌棚圈15处,榆林地区死25人,死亡、丢失牲畜6.2万头(只)。
1986年	甘肃安西、敦煌	5月18~20日沙尘暴持续17h,能见度0级,据气象站介绍,能见度之低,持续时间之长,为1938年有气象记载以来的第一次。在风沙灾害中,1.49万hm ² 农作物全受害,其中毁灭性灾害2020hm ² ,重灾1200hm ² ,蔬菜全毁140hm ² ,掉果23.5万kg,毁果树嫁接苗1.64万株,摧树2.5万株,死亡、失踪大畜14头,羊659只,决坝塌2座,沙埋水渠29.4km,毁电线24.5km,引起火灾3次,刮倒房屋57间,畜圈105个,围墙384m,吹失煤炭1800多t,芒硝1.5t,造成总经济损失1200多万元。
1986年	新疆和田地区	5月18~19日出现强沙尘暴天气,使小麦减产2.5万t,棉花减产12万~15万担,玉米、果树、葡萄、瓜菜受灾严重,风暴中死亡10人,失踪9人,丢失、死亡牲畜4128头(只),倒房屋218间,棚圈125个,刮断电杆736根,直接经济损失为5000万元以上。
1993年	新疆吐鲁番、哈密、甘肃河西地区、宁夏中卫、内蒙古西部	5月5日14~19时出现黑风暴天气,死85人,伤264人,失踪264人,表土层风蚀达10~30cm,农作物受灾面积37.3万hm ² ,死亡与丢失牲畜12万头,沙埋水渠1000多km,刮断电杆6012根,兰新线中断37h,毁房4412间,降尘量每km ² 高达161~256t,直接经济损失为5.6亿元。
1998年	西北12个地、州	1998年4月17~19日,遭受沙尘暴袭击,3.07万hm ² 农作物受灾,11.09万头牲畜死亡,156万人受灾,直接经济损失8亿元。

沙尘暴灾害的主要危害方式有:

(1)强风:携带细沙粉尘的强风摧毁建筑物及公用设施,造成人畜伤亡。

(2)沙埋:以风沙流的方式造成农田、渠道、村舍、铁路、草场等被大量流沙掩埋,尤其是对交通运输构成严重的威胁。

(3)土壤风蚀:每次沙尘暴的尘源区和影响区都会受到不同程度的风蚀危害,风蚀深度可达1~10cm。据估计^[9],我国每年由沙尘暴产生的土壤细颗粒物流失高达 $10^6 \sim 10^7$ t,其中绝大部分粒径在 $10\mu\text{m}$ 以下,对源区农田和草场的土地生产力造成严重的破坏。

(4)大气污染:在沙尘暴源地和影响区,大气中可吸入颗粒物(TSP)增加,大气污染加剧。以1993年“5.5”特强沙尘暴为例,甘肃省金昌市的室外空气TSP浓度达到 $1016\text{mg}/\text{m}^3$,室内为 $80\text{mg}/\text{m}^3$,超过国家标准的40倍^[9];2000年3~4月,北京地区受沙尘暴的影响,空气污染指数达到4级以上的有10d(表2),同时影响到我国东部许多城市,3月24~30日,包括南京、杭州等18个城市的日污染指数超过4级;而且,源于我国西北的沙尘,经长距离搬运,对周边国家造成危害,已经引起日本、韩国、美国等国家的关注。

表2 2000年春天北京市出现的4级以上天气污染

Table 2 Occurrence of high grade of air pollution index by duststorm in Spring of 2000 in Beijing

时间	市区空气污染指数	对照点空气污染指数
3月3日	500(5级)	500(5级)
3月18日	232(4级)	185(3级)
3月23日	272(4级)	251(4级)
3月27日	146(3级)	143(3级)
4月4日	190(3级)	未测
4月6日	171(3级)	161(3级)
4月7日	500(5级)	500(5级)
4月9日	500(5级)	431(5级)
4月10日	429(5级)	191(3级)
4月25日	252(4级)	336(5级)
4月26日	500(5级)	500(5级)
4月29日	219(4级)	184(3级)
4月30日	230(4级)	未测

注:数据引自北京市环境保护监测中心,今春北京市颗粒物污染加重的情况分析,2000年5月18日

1.2 沙尘暴的空间分布

我国沙尘暴灾害受冷高压路径、下垫面性质、地形等因素的控制,呈现出显著的区域特色。从总体上,我国沙尘暴灾害主要分布于西北、华北和东北西部,尤其以西北地区沙尘暴灾害分布范围广,危害最为严重。有关西北地区沙尘暴灾害的区域分布,目前有以下3种划分:

一是采用地面气象观测的沙尘暴日数,将我国沙尘暴灾害从区域分布上划分为易发区和多发区^[6](图1)。其中,易发区即年平均沙尘暴日数大于5d的地区,西起新疆喀什,东至陕西榆林,北起新疆富蕴、内蒙古海里素,南到新疆和田、青海格尔木、陕西吴旗;多发区即年平均沙尘暴日数大于12d的地区,首数吐鲁番、哈密、敦煌、巴彦毛道、景泰和中卫,其次是和田地区、北疆和河套地区。

二是以年平均沙尘暴日数20d为标准,将西北地区沙尘暴多发区划分为3个^[6,7],分别是塔里木盆地周围地区、吐鲁番—哈密盆地—河西走廊—宁夏平原—陕北一线和内蒙古阿拉善高原—河套

平原—鄂尔多斯高原。

三是根据 40 多年来我国强和特强沙尘暴(表 3)的频数分布,认为我国西北地区有 3 个沙尘暴频发区,分别为甘肃河西走廊及宁夏河套地区(中心在民勤)、新疆和田地区、吐鲁番地区^[9]。

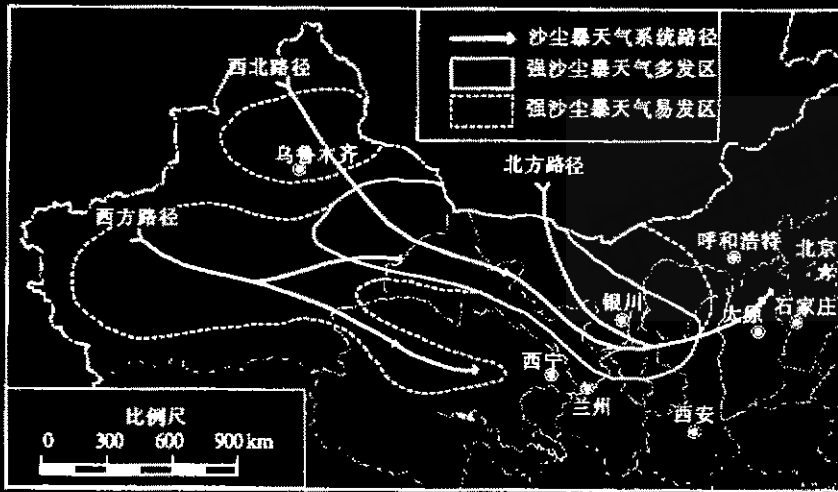


图 1 我国北方地区沙尘暴天气的区域分布(据文献[6]改绘)

Fig.1 The distribution of duststrom on the Northern China

表 3 我国沙尘暴天气强度划分标准

Table 3 Classification duststrom intensity

强度	瞬间极大风速/(ms^{-1})	最小能见度/m
特强	≥ 25	< 50
强	≥ 20	< 200
中	≥ 17	200~ 200
弱	≥ 10	500~ 1000

注:表 3 引自文献[6]。

1.3 沙尘暴动态变化

大量的研究表明^[4,6,8],从季节(月)变化上看,沙尘暴主要发生于春季,其中,我国西北地区主要发生在 4~5 月,而在青藏高原北部,沙尘暴主要发生于夏季,青藏高原南部,则主要发生于冬季;在沙尘暴的日变化上,每天 13~18 时是沙尘暴天气发生的高峰期,而南疆地区的沙尘暴天气多形成于每天的 20~23 时,较其它地区晚 4~5 h,在月和日两个时间尺度上,不同地区的沙尘暴时间有所不同,反映出沙尘暴形成、发展过程的区域差异。

在年际变化上,沙尘暴灾害反映了气候变化和区域环境演变过程。在不同的时间尺度上,沙尘暴灾害的时间演变过程表现出不同的特点:

(1)在万年时间尺度上,沙尘暴形成是以东亚特殊的大气环流为背景,并与季风的强弱紧密联系在一起,其演化主要受地球轨道因素的控制。通过黄土中的尘暴事件^[9]和冰心中的微粒分析^[10],虽然在一定时期曾出现有突发性的强沙尘暴事件,但从平均水平来看,沙尘暴的发生频数总体上处于波动的状态,没有显著的增加或减少。

(2)在千年时间尺度上,沙尘暴频发期对应于干冷的气候背景^[1,2]。根据历史沙尘记载绘制了公元 300 年以来我国沙尘暴的频数曲线(图 2)。由此可知,大约在公元 1100 年左右,我国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、1470~1560 年、1610~1700 年和 1820~1890 年。这与冰心中的微粒记录

基本一致^[10]。

(3)在百年时间尺度上,我国沙尘暴的发生频率与区域性的气候变化有关。沙尘暴的发生既有由局地天气条件所致,而更多的是由大尺度天气系统造成。我国北方100个气象站观测(1951~1997年)表明,50年代以来,我国除青藏高原的部分地区外,沙尘暴日数总体上(70%以上)呈递减趋势^[12,13];而强和特强沙尘暴的发生频数自50年代以来一直在增加^[4],50年代5次,60年代8次,70年代13次,80年代14次,90年代23次,其中的原因与区域干燥导致的土壤水分减少和人为干扰活动加强、地表覆被总体恶化有关。

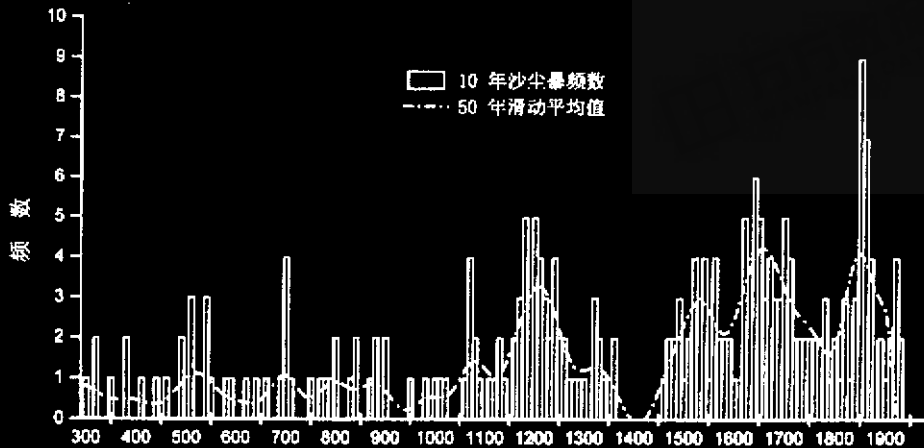


图2 公元300年以来我国北方沙尘暴发生频数(数据提供:国家气象局)

Fig.2 Frequency curve of duststorm since A.D. 300 in northern China

1.4 沙尘暴灾害的发展趋势

观测资料表明,近几十年来,我国北方地区的气候有明显的干暖化趋势,地表湿润指数和土壤湿度明显减小,这为沙尘暴的形成提供了气候背景。在全球气候增暖的影响下,北半球中纬度内陆地区,降水量变化不大,但温度显著升高,地表蒸发加大,土壤进一步变干。这是有利于沙尘暴发生发展的大尺度气候背景,加之人口压力的增大和沙区经济活动的逐年加强,尤其是土地利用不合理的格局不可能在短期内得到根本性的调整,沙尘暴灾害将可能进一步加剧,尤其是强沙尘暴灾害会在更大的空间上发生,沙尘暴灾害加剧应当引起我们足够的重视。

2 我国沙尘暴研究进展

我国历史上关于沙尘暴的记载,最早见于公元前1150年^[4],史书中将沙尘暴及相关的沙尘天气记为“雨土”、“黄土”、“黄沙”、“雨尘土”、“黄霾”等^[15]。

地质学和地貌学家从19世纪中期就开始认识到沙尘暴现象和大气粉尘输送过程,并对中国黄土高原的形成产生了兴趣。Ehrenberg在1847年描述了从非洲输送到欧洲大陆的大气粉尘^[6];德国地质学家Ferdinand von Richthofon通过在中国的实地考察(1868~1892年),认为中国广泛分布的黄土是低空搬运的沉积物,主要是风吹扬起来的沙粒和尘粒沉降到干旱草原植被上形成的,首次提出了中国北方黄土的风成假说^[7];前苏联的B.A.奥勃鲁切夫将黄土的形成与沙漠、戈壁联系起来,认为中国北方等地的黄土是沙漠黄土,成因上与沙漠有关,并强调了反气旋活动对黄土物质的搬运和沉积作用^[8]。

我国近代沙尘暴研究首先在地质学领域开展起来,主要从第四纪地质学的角度研究黄土与粉尘沉积。1934年,马溶之对北京的降尘进行过研究^[4];1958年,张淑媛指出了北京风尘的特点^[9];王嘉荫通过对我国历史上沙尘暴记载的整理,认为我国历史上连续不断的“雨土”事件是支持黄土高原风成说的重要证据之一^[4]。刘东生等通过大量的研究工作,对黄土高原的风成学说作了进一步的阐

明,提出了我国黄土粉尘的搬运和堆积与不同尺度的大气活动有关,尤其与强冷锋发展有着密切的关系^[9],张德二根据历史记载、现代沙尘暴资料及浮尘天气过程分析认为,我国西北干燥沙漠地带是沙尘的源地,而且黄土粉尘曾历经风力搬运过程,并以此支持黄土的风成说^[10]。

气象部门自50年代开始对沙尘暴及其它风沙天气进行观测,七十年代末期,我国气象、大气科学工作者开始研究沙尘暴天气。徐国昌等对1977年4月22日发生在甘肃河西走廊的特大沙尘暴过程进行了较为详尽的研究,初步揭示了沙尘暴的大尺度天气成因、沙尘输送过程和运移路径,首次提出了“黑风暴”的定义及判别标准^[11];周明煜、曲绍厚等通过卫星云图分析、沙尘气溶胶和沙尘暴途经地区表土测定,揭示了大气气溶胶的主要特征,认为沙尘暴产生的气溶胶多半来自沙漠、戈壁而不是黄土高原^[22-23]。

1993年“5.5”特大沙尘暴发生后,沙尘暴灾害引起了社会各方面的关注,西北各省、区和有关科研机构相继开展了大量的沙尘暴研究。方宗义等编辑出版了《中国沙尘暴研究》,较为系统地汇集了近年来我国在沙尘暴研究上所取得的进展^[24],主要表现在以下几个方面:

- 历史时期沙尘暴记载的统计整理
- 沙尘暴典型个案分析
- 沙尘暴的天气气候特征
- 沙尘暴的发生源地、移动路径和沉降范围
- 沙尘暴的沙尘气溶胶的物理和化学特性
- 沙尘暴灾害的遥感监测与预报
- 沙尘暴防治对策研究

近年来,沙尘气溶胶问题引起了我国学者的重视。沙尘气溶胶作为大气气溶胶的主要成分,由于其光化学厚度大,分布范围广,通过其辐射强迫作用,对地球系统辐射平衡和全球气候变化的影响是非常重要的。研究表明,沙尘气溶胶是重要的气候驱动因子之一,它可能是地球气候系统10~1000a尺度快速变化的一个重要激发与响应因子,不仅沙尘的直接气候效应显著,已有证明表明沙尘还通过控制输入海洋的风成铁、铝等微量元素控制着海洋的生物产率,进而影响海洋对CO₂的吸收,间接地对气候造成显著影响,而气候和环境的改变又反馈于沙尘的产生、输送与沉积。

在第四纪地质学研究方面,最新的研究表明^[25],通过黄土和冰心中的沙尘记录,可以较好地反映第四纪以来粉尘沉积历史以及冰期、间冰期的气候波动,对全球变化、古环境等领域的研究具有极其重要的价值,并为重建沙尘暴形成演化历史提供了可能。

3 问题与展望

沙尘暴是大气边界层中的强风与干燥沙质地表相互作用的产物。风作为沙尘活动的动力条件,风力强度和风场格局主要受大气环流及区域气候与地貌格局的控制,气候因子中的水热组合及其在不同时空尺度上的变化也会影响下垫面表层土壤含水量和植物生长状况,进而影响沙尘起动及传输过程。我国北方地区作为沙尘暴发生发展的源区,其地表沉积物组成和土地利用类型均复杂多样。但是,有关各种类型地表的沙尘起动及输送机制,以及这些地表对大气粉尘的贡献量等方面,迄今尚未开展系统的研究,需要通过对器测时期区域沙尘活动与大气环流和气候各要素之间的相关分析,以及不同地表沙尘起动及传输的地面观测、遥感监测和化学示踪等,力图解决上述提到的有关科学问题。

开展此问题研究的目標是要弄清沙尘发生的气候学成因,揭示大尺度空间范围的沙尘暴发生发展规律;建立反映沙尘起动、输送和沉积全过程的动力学模型,明确粉尘沉降区的物质来源,量化沙尘原区、沿途过境区对大气粉尘贡献率。主要研究内容包括:区域风场变化的大气环流背景及其与水热组合变化之间的关系;沙尘起动、垂直输送机制及其与下垫面性质、大气边界层热量和动力状况之间的关系;沙尘输送形式、近地面风沙流与上层粉尘流边界高度、垂直通量及结构的实验观

测;不同地段土壤表层沉积物、风沙-粉尘流中沙尘物质和沉降区降尘物质等的理化性质及矿物成分的对比分析。

4 结论与讨论

沙尘暴已经成为我国风沙灾害的重要组成部分,强和特强沙尘暴灾害逐年加剧,一方面与我国北方气候变暖,降水在波动中趋向减少有关,另一方面,与我国北方沙化土地面积的扩展密不可分。沙尘暴对源区和影响区都形成极大的威胁,特别对城市大气环境质量产生了深刻的影响,已经成为城市地区的生态灾难。加强对沙尘暴形成机制、沙尘暴影响评价以及沙尘暴灾害的监测,正是我国北方地区防沙治沙工程建设规划与实施所迫切需要解决的重大科学问题。

参考文献:

- [1] Pyke K. Aolian dust and dust deposits[M]. London:Academic Press Inc. Ltd., 1987. 113-126.
- [2] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1979.
- [3] 夏训诚, 杨根生, 等. 中国西北地区沙尘暴灾害及防治[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1996. 1-50; 118-126.
- [4] 钱正安, 贺慧霞, 翟章, 等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[A]. 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社, 1997. 1-10.
- [5] 翟章, 许宝玉, 贺慧霞, 等. 我国沙尘暴的概况对策[A]. 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社, 1997. 155-158.
- [6] 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[A]. 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社, 1997. 11-15.
- [7] 赵性存. 西北地区是我国沙尘暴的多发区[A]. 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社, 1997.
- [8] 朱福康, 江吉喜, 郑新江, 等. 沙尘暴天气研究现状和未来[J]. 气象科技, 1999, (4): 1-8.
- [9] 戴雪荣, 李吉均, 俞立中, 等. 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析[J]. 地理学报, 1999, 54(5):445-453.
- [10] 刘纯平, 姚檀栋, 谢树成, 祁连山敦煌冰心微粒变化特征和天气环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 105-114.
- [11] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. 中国科学, 1984, 24(3): 278-288.
- [12] 张德二, 陆风. 我国北方的冬季沙尘暴[J]. 第四纪研究, 1999, (5): 441-447.
- [13] 杨东贞, 房秀梅, 李兴生. 我国北方沙尘暴变化趋势的分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 352-358.
- [14] 王鑫蔚. 中国地质史料[M]. 北京:科学出版社, 1963. 1-8.
- [15] 全浩. 关于黄沙研究与进展[J]. 环境科学研究, 1994, 7(6): 1-8.
- [16] Ehrenberg C G. The sirocco dust that fell at Genoa on the 16th May 1846[J]. Q.J. Geol. Soc. Lond., 1847, 3:25-26.
- [17] Richhofen F. von. On the mode of origin of the loess[J]. Geol. Mag., 1882, 9: 94-97.
- [18] 奥布鲁切夫 B A. 黄土成因问题, 砂与黄土问题[M]. 乐铸译. 北京:科学出版社, 1958. 23-60.
- [19] 张淑媛. 北京风沙的研究[A]. 中国第四纪委员会第二届学术讨论文[C]. 北京:科学出版社, 1964. 31-38.
- [20] 刘东生, 等. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985. 303-336.
- [21] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35.
- [22] 周明煜, 曲绍厚, 宋锡铭, 等. 北京地区尘暴过程的气溶胶特性[J]. 科学通报, 1981, 26(4): 609-611.
- [23] 曲绍厚, 李玉英, 周明煜, 等. 北京地区一次尘暴过程的来源[J]. 环境科学学报, 1984, 4(1): 80-85.
- [24] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社, 1997.