



沙尘暴 监测技术

MONITORING TECHNIQUES
OF SAND AND DUST STORMS

鞠洪波 陈永富 | 等著
郑新江 张怀清

中国林业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

沙尘暴监测技术

鞠洪波 陈永富 等 著
郑新江 张怀清

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

沙尘暴监测技术/鞠洪波等著. —北京:中国林业出版社,2008.4

ISBN 978-7-5038-5203-9

I. 沙… II. 鞠… III. 沙尘暴—监测 IV. P425.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第040271号

出版 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

网址 www.cfph.com.cn

E-mail cfphz@public.bta.net.cn 电话:(010)66184477

发行 新华书店北京发行所

印刷 中国农业出版社印刷厂

版次 2008年4月第1版

印次 2008年4月第1次

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 12.75

彩页 128P

字数 520千字

印数 1~2000册

定价 88.00元

序

沙尘暴是大量沙尘物质被强风吹到空中，致使空气浑浊的严重风沙天气现象。沙尘暴发生的物理机制相当复杂，但必须具备两个条件：沙源和大风。丰富的沙源是产生沙尘暴的物质基础，它是在特定的地理条件下，由于长期的干旱少雨，地表植被稀少，土壤沙化，形成大量松散干燥的沙尘。在一定的动力作用下，这些沙尘随风漂浮在空中。强风是沙尘暴形成的动力，强风经过沙源区，将大量的沙尘携带到空中，甚至随风漂移到沙源以外的广大地区，使空中能见度显著降低，对经济建设和人民生活造成不同程度的影响，严重时对自然环境和人民生命财产造成极大的破坏，甚至造成重大灾难。沙尘暴问题不仅在中国有，它在非洲、美洲、大洋洲以及亚洲其他地区也大量存在，是一个世界性问题，在全世界有四大沙尘暴区，即中亚、北美、中非和澳大利亚，我国西北沙尘暴地区属中亚沙尘暴区的一部分。

沙尘暴天气不是今天才有，在人类历史上早有记载。自汉代之后，我国沙尘暴发生的范围开始向东扩展，至元明清时期，其发生范围扩展到几乎整个华北地区，而且具有越演越烈的发展趋势。新中国成立以来，我国特大沙尘暴发生频率呈递增趋势。沙尘暴的形成除气象因素外，最主要的原因是大地植被遭到自然灾害和人为的严重破坏，生态环境日益恶化。过去，我国许多地方无计划、无节制地滥垦、滥伐、滥牧、滥采和滥用水资源，最终导致水土流失加剧，土地荒漠化面积扩大，强沙尘暴次数逐年递增的严重局面。特别是2000年春季以来，由于沙尘暴发生次数的明显增多，再一次向人们敲响了生态环境加快恶化的警钟，唤起了党和政府的高度重视与全民的广泛关注。2000年6月，朱镕基总理在河北、内蒙古考察后做出“治沙治漠刻不容缓，绿色屏障势在必建”的重要指示；当年5月，时任国家副主席的胡锦涛同志在考察宁夏后指出，“生态环境治理要做到四结合”，即生态效益与经济效益、群众性活动与龙头企业的带动作用、加大资金投入与依靠科学、近期目标与长远打算相结合；2000年5月8日，由中国科学院、中国气象学院、中国林业科学研究院等十余名知名科学家经过1个月的追踪研究后，向国务院

呈送了“关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策”的报告，时任国务院副总理的温家宝同志就该报告做出“专家的意见值得重视”的重要批示。2000年以来，国家科技部加大了对沙尘暴研究的力度，在公益性专项资金课题中专门设立了有关沙尘暴发生、发展和影响的机制分析、动态监测以及预测预报等方面的研究课题，为沙尘暴防治提供科学依据。

《沙尘暴监测技术》一书是作者承担国家及省、部级相关研究课题的最新成果的总结，是作者多年辛勤劳动的结晶和研究工作的集成、凝练和升华。本书系统地总结了沙尘暴监测研究进展；阐述了沙尘暴监测数据库及沙尘暴监测预警网络系统和沙尘暴监测业务运行系统的构建；研究了沙尘暴卫星遥感、激光雷达遥感监测技术，沙尘暴的光学厚度及含沙量计算方法，植被、土壤水分对沙尘暴影响的遥感监测技术，基于专家知识的沙尘暴短时预警方法，沙尘暴发生统计预报模型，沙尘暴移动路径概率预报模型，基于统计的沙尘强度预报模型等；并以2003~2006年为例，开展应用与分析，取得显著效果。该书采用了定性与定量、宏观与微观、理论与实践相结合的论述方法，学术思想活跃，观点明确，针对性强，内容广泛，具有较强的系统性、科学性和可读性，是一部具有重要理论和应用价值的科学著作，希望该书的出版能对沙尘暴监测研究和沙尘暴防治做出重要贡献。

李 强 书

2007年5月28日

前 言

沙尘暴是在沙漠及其邻近地区特有的由强风和沙源二者共同作用下形成的一种天气现象，在世界各地广泛分布，特别是亚热带地区的一种自然事件，在中纬度干旱地区更是“家常便饭”。当沙尘暴发生时，在强风的作用下，将大量的沙尘从地面移到沙源及其以外的空中，使空中能见度显著降低，对经济建设和人民生活造成不同程度的影响，严重时对自然环境和人民生命财产造成极大的破坏，甚至造成重大灾难。比如1935年4月14日在美国西南大平原发生的特强沙尘暴，美国人称其为“黑风暴”，这一天被称为“黑色星期日”，这场沙尘暴是美国20世纪30年代最为严重的生态灾难，几年之后都不能估算其损害，导致几十万公顷农地废弃，几十万人口流离失所，到了1940年，有250万人口外迁，又产生了生态移民问题。1993年5月5日发生在我国西北地区的一场特大沙尘暴，产生的危害甚为严重，造成新疆、内蒙古、甘肃、宁夏等省（自治区）的18个地（市）的72个县（旗）受灾，直接受灾面积 $110 \times 10^4 \text{km}^2$ （占全国总土地面积的11.5%），人口1200万人，12万头牲畜死亡或丢失，505万亩农作物受灾，85人死亡，264人受伤，31人失踪，毁坏房屋4412间，兰新铁路干线因此中断运输31小时，直接经济损失5.4亿元。在人们的意识中，普遍认为沙尘暴的发生只给自然和人类带来负面效益，然而，近年来有的学者也提出沙尘天气的产生有一定好处的观点，认为由于沙尘多为碱性，可以减轻沙尘暴地区酸雨的危害。

中国是世界上沙尘暴易发生和受其影响最严重的国家之一，其中西北地区是沙尘暴的主要发源地和受危害区域。我国西北地区处于欧亚大陆的腹地，气候干旱，降雨少而不均匀，地表植被稀疏，土壤疏松，形成了丰富的沙源，如新疆的塔克拉玛干大沙漠，甘肃和内蒙古西部地区的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地和浑善达克沙地等世界著名的大沙漠。再加之冬春季节，在强劲的西北风作用下，大量的沙尘从沙源区升空并传输到邻近地区。我国西北地区的新疆、内蒙古、甘肃等发生的沙尘暴，常常殃及河北、北京、天津等地区。

沙尘暴发生的两个必要条件是沙尘物质和大风。沙尘物质不单是来自沙漠，在非沙漠地区的尘土也是重要的沙尘源，当大风经过沙漠时可能产生沙尘暴，当大风经过非沙漠而有大量尘土的地区时也可能产生沙尘暴，当沙尘暴经过非沙漠而有丰富尘土的地区可能增强沙尘暴。风是产生沙尘暴的动力，

由于不同的风力和风向,将影响到沙尘暴的强度,包括沙尘暴空中垂直厚度、水平传输方向和距离。沙尘暴产生和发展的机理是复杂的,它对自然和人类的影响也是巨大的,了解沙尘暴产生和发展的复杂机理是防治沙尘暴的前提和基础。

由于沙尘暴对自然和人类社会产生了严重的影响,引起了世界各国政府和科学工作者广泛关注,国外从20世纪20~30年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究。我国从70年代开始对沙尘暴天气进行研究,在国家科技公关计划、自然科学基金计划、社会公益性专项研究计划等专门设置了有关沙尘暴发生、发展和影响的机制分析、动态监测评价、预测预报以及防治措施等方面的研究课题,为我国沙尘暴防治提供科技支撑。

本书是在社会公益性研究专项“沙尘暴监测技术”(2000DIA10002)、国家林业局948项目“风沙灾害监测与预警技术引进”(2002-50)和中国科协2006年决策咨询类课题“沙尘暴肆虐原因与防治对策研究”(2006ZCYZ14)的研究成果基础上,结合近年来的推广应用成果,进行加工、提炼和整合而成。本书内容包括国内外关于沙尘暴监测研究进展概述,我国受沙尘暴影响地区的生态环境数据库研建,沙尘暴遥感监测技术,沙尘暴预测预报,沙尘暴监测网络系统和业务运行系统,应用与分析等6个方面共13章。各章节的完成情况是第一章:鞠洪波、陈永富;第二章:陈永富、刘华;第三章:罗敬宁、郑新江、陆文杰;第四章:张怀清、鞠洪波;第五章:陈渭民、郑新江、方翔、罗敬宁;第六章:陈巧、陈永富;第七章:张晓虎、郑新江、王月英、徐建芬;第八章至第十章:赵峰、鞠洪波;第十一章:张怀清、黄建文、王韵晟;第十二章:罗敬宁、郑新江、方翔;第十三章:蒋建莹、郑新江、方翔、吴晓京、李小龙、姬翔。

本书的出版得到了国家科学技术部学术著作出版基金委员会的资助,深表谢意!由于本研究的问题难度大,涉及领域广,时间仓促,限于作者业务水平 and 经验,书中难免存在缺点和不足,敬请读者批评指正。

著者

2007年3月

目 录

序 前 言

第一章 沙尘暴监测研究进展概述	(1)
1.1 沙尘暴定义与沙尘天气等级	(2)
1.1.1 沙尘暴的定义	(2)
1.1.2 沙尘暴天气等级	(2)
1.2 沙尘暴成因、特征与影响	(3)
1.2.1 沙尘暴成因分析	(3)
1.2.2 沙尘暴气溶胶理化特性及对环境的影响	(5)
1.2.3 环境状况与沙尘暴的相互作用	(7)
1.3 中国沙尘暴分布与特点	(11)
1.3.1 空间分布与特点	(11)
1.3.2 时间分布与特点	(12)
1.4 沙尘暴发生、发展及影响的模拟、监测与预报	(13)
1.4.1 发生源地	(13)
1.4.2 移动路径	(14)
1.4.3 影响区域	(14)
1.4.4 数值模拟	(15)
1.4.5 遥感监测	(17)
1.4.6 预警预报	(22)
第二章 沙尘暴监测数据库构建	(25)
2.1 数据采集的原则、方法和途径	(25)
2.1.1 数据采集原则	(25)
2.1.2 数据采集方法	(26)
2.1.3 数据采集途径	(26)
2.1.4 数据源及数据类型	(26)
2.2 数据库建立标准规范	(27)
2.2.1 基本术语	(27)
2.2.2 数据库建立标准规范制定依据	(27)

2.2.3 命名规则	(28)
2.3 数据库设计	(29)
2.3.1 数据库组织	(30)
2.3.2 数据库结构与存储格式设计	(30)
2.3.3 数据库管理与应用系统设计	(30)
2.3.4 数据库平台设计	(30)
2.4 数据结构分类	(30)
2.5 数据库及主要技术指标	(31)
2.5.1 气象数据	(31)
2.5.2 空间专题数据	(32)
2.5.3 基础地理数据(地形数据)	(33)
2.5.4 遥感影像数据	(33)
2.5.5 社会经济数据	(34)
2.5.6 沙尘暴发生、影响及监测数据	(35)
第三章 沙尘暴卫星遥感监测技术	(36)
3.1 沙尘暴遥感监测原理	(36)
3.1.1 卫星遥感基本特征	(37)
3.1.2 遥感沙尘暴基本原理	(38)
3.2 沙尘暴遥感的光谱特性半定量分析	(43)
3.3 沙尘暴信息提取方法	(45)
3.3.1 沙尘暴信息提取方法	(45)
3.3.2 静止气象卫星沙尘暴信息提取方法	(48)
3.3.3 监测实例分析	(49)
3.4 沙尘暴强度定量计算方法	(53)
3.4.1 沙尘暴强度概念与定量指标	(53)
3.4.2 沙尘暴监测标准同一化	(55)
3.4.3 定量遥感沙尘强度指数构建	(57)
3.4.4 沙尘指数反演水平能见度方法	(63)
3.5 EOS/MODIS 沙尘暴监测	(66)
3.5.1 地球观测系统(EOS)简介	(66)
3.5.2 中分辨率成像光谱仪(MODIS)特色和优势	(67)
3.6 沙尘暴遥感监测结果检验与分析	(68)
3.6.1 沙尘信息提取结果检验	(68)
3.6.2 沙尘强度指数与能见度反演结果分析	(69)
第四章 沙尘暴激光雷达遥感监测技术	(73)
4.1 激光雷达大气探测原理	(73)
4.1.1 激光和大气相互作用的机制	(74)
4.1.2 大气探测激光雷达的分类	(75)

4.1.3 激光雷达系统结构	(77)
4.2 激光雷达沙尘监测原理	(78)
4.2.1 Collis 斜率法	(78)
4.2.2 Klett 方法	(79)
4.2.3 Fernald 方法	(79)
4.3 实验方法	(80)
4.3.1 激光雷达系统	(80)
4.3.2 激光雷达数据分析系统	(81)
4.3.3 近地面沙尘浓度监测	(82)
4.4 结果分析	(83)
4.5 小结	(89)
第五章 沙尘暴的光学厚度及含沙量估算	(91)
5.1 卫星遥感沙尘的基本原理	(91)
5.1.1 辐射传输方程	(91)
5.1.2 辐射传输方程的基本解	(92)
5.1.3 多次散射辐射的传输方程	(93)
5.1.4 大气层的反射和透射函数	(93)
5.1.5 太阳天顶角和卫星视角的计算	(95)
5.2 大气中气溶胶(沙尘)的辐射特性	(96)
5.2.1 气溶胶(沙尘)的光学厚度	(96)
5.2.2 气溶胶的相函数和不对称因子	(97)
5.3 地面遥感沙尘气溶胶的方法	(101)
5.4 卫星遥感沙尘气溶胶光学厚度的方法	(102)
5.4.1 Kaufman 查表法方法	(102)
5.4.2 6S 方法反演沙尘气溶胶光学厚度的方法	(104)
5.4.3 由辐射传输近似公式计算气溶胶光学厚度	(105)
5.5 具体方法	(107)
5.6 实验结果分析	(107)
5.7 误差讨论	(110)
第六章 土壤水分、植被对沙尘暴影响的遥感监测技术	(111)
6.1 概述	(111)
6.2 NOAA/AVHRR 监测土壤水分的方法	(112)
6.2.1 遥感监测土壤水分的理论依据及现状	(113)
6.2.2 遥感监测土壤水分的方法	(114)
6.3 NOAA/AVHRR 遥感资料监测地表植被生长状况	(139)
6.3.1 植被指数简介	(139)
6.3.2 植被指数的提取	(140)
6.4 沙尘暴的发生与土壤湿度及地表植被状况的关系	(141)

6.4.1 资料与方法	(141)
6.4.2 沙尘暴发生影响因素的分析	(142)
6.5 小结	(145)
6.5.1 结果	(145)
6.5.2 讨论	(146)
第七章 基于专家知识的沙尘暴短时预警方法	(147)
7.1 沙尘暴预警的意义	(147)
7.2 我国沙尘暴形成的特征分析	(148)
7.2.1 我国沙尘暴形成的边界分析	(148)
7.2.2 我国沙尘暴形成的天气与地表特征分析	(151)
7.3 沙尘暴天气云图特征分析	(151)
7.3.1 冷锋云系型沙尘暴云图特征	(151)
7.3.2 锋面气旋型沙尘暴云图特征	(155)
7.3.3 强对流云团型沙尘暴云图特征	(159)
7.3.4 偏东大风型沙尘暴云图特征	(163)
7.4 沙尘暴天气冷空气路径分类模式	(165)
7.4.1 冷空气西北路径类	(165)
7.4.2 冷空气北方路径类	(170)
7.4.3 冷空气西方路径类	(175)
7.5 沙尘暴预警系统	(180)
7.5.1 沙尘暴预警模型	(180)
7.5.2 预报关键区的划分	(181)
7.5.3 沙尘暴知识库	(182)
7.5.4 预报因子选择	(182)
7.5.5 预报知识与规则	(182)
7.5.6 建立预报模型	(184)
7.5.7 试预报结果	(184)
第八章 沙尘暴天气统计预报模型	(186)
8.1 研究区域概况	(186)
8.2 研究方法	(187)
8.2.1 动力预测方法	(187)
8.2.2 统计预测方法	(187)
8.2.3 判别分析预报	(188)
8.2.4 因子筛选	(189)
8.3 研究数据	(190)
8.3.1 气象数据	(190)
8.3.2 植被信息提取	(191)
8.4 数据预处理	(193)

8.4.1 数据分组	(193)
8.4.2 数据标准化	(193)
8.5 沙尘暴天气预报方程	(193)
8.5.1 预报量和预报因子的确定	(194)
8.5.2 预报模型建立	(195)
8.5.3 沙尘暴天气的分类预报	(197)
8.5.4 沙尘暴天气预报模型检验	(198)
8.6 小结	(199)
第九章 沙尘暴移动路径概率预报	(200)
9.1 概述	(200)
9.2 研究方法	(201)
9.2.1 数据处理	(201)
9.2.2 扬沙和沙尘暴天气过程筛选与统计	(201)
9.2.3 拟定沙尘暴源地和影响区	(201)
9.2.4 扬沙和沙尘暴移动路径上各气象台站发生概率统计	(202)
9.3 沙尘暴主要移动路径的分析	(203)
9.3.1 塔里木盆地周围地区	(207)
9.3.2 吐鲁番—哈密盆地经河西走廊—宁夏平原至陕北	(207)
9.3.3 内蒙古阿拉善高原、河套平原及鄂尔多斯高原	(209)
9.3.4 京津地区风沙危害的主要尘源地	(210)
9.4 小结	(210)
第十章 基于统计的沙尘暴强度预报	(211)
10.1 概述	(211)
10.2 研究方法	(212)
10.3 强度分析	(212)
10.3.1 偏西路径上主要台站沙尘暴强度分析	(212)
10.3.2 西北路径上主要台站沙尘暴强度分析	(215)
10.3.3 偏北路径上主要台站沙尘暴强度分析	(218)
10.4 小结	(220)
第十一章 沙尘暴监测与预警网络系统	(221)
11.1 建设目标	(221)
11.2 网络系统建设概述	(221)
11.2.1 网络结构	(221)
11.2.2 数据传输	(222)
11.2.3 网络数据库	(222)
11.3 网络功能设计	(225)
11.3.1 网络系统功能设计	(225)
11.3.2 信息发布	(225)

11.3.3 数据集成和综合查询	(225)
11.3.4 动态数据更新	(226)
11.3.5 监测数据的实时传输	(226)
11.3.6 网络管理	(227)
11.4 网络实现与运行	(227)
11.4.1 网络实现	(227)
11.4.2 网络数据管理和查询	(228)
11.4.3 数据自动更新	(229)
11.4.4 网络运行	(229)
11.5 小结	(231)
第十二章 沙尘暴监测业务运行系统	(232)
12.1 沙尘暴监测体系概述	(232)
12.1.1 沙尘暴地面监测体系	(232)
12.1.2 卫星遥感沙尘暴监测体系	(234)
12.1.3 对地观测卫星技术发展	(237)
12.2 数据获取与处理	(238)
12.2.1 数据的接收	(238)
12.2.2 卫星资料预处理	(238)
12.3 沙尘暴监测业务系统	(240)
12.3.1 系统总体设计	(240)
12.3.2 业务运行系统功能	(241)
12.3.3 沙尘暴专题数据库与信息發布	(242)
第十三章 应用与分析	(244)
13.1 2003 年春季沙尘天气监测结果分析	(244)
13.1.1 2003 年春季沙尘天气监测概况	(245)
13.1.2 2003 年春季沙尘天气气象条件分析	(251)
13.2 2004 年春季沙尘天气监测结果分析	(252)
13.2.1 2004 年春季沙尘天气监测概况	(253)
13.2.2 2004 年春季沙尘天气气象条件分析 (中国气象局编, 2005)	(265)
13.3 2005 年春季沙尘天气监测结果分析	(267)
13.3.1 2005 年春季沙尘天气监测概况	(267)
13.3.2 2005 年春季沙尘天气气象条件分析	(277)
13.4 2006 年春季沙尘天气监测结果分析	(278)
13.4.1 2006 年春季沙尘天气监测概况	(278)
13.4.2 2006 年春季沙尘天气气象条件分析	(303)
参考文献	(306)

第一章

沙尘暴监测研究进展概述

沙尘暴问题不仅在中国有，它在非洲、美洲、大洋洲以及亚洲其他地区也大量存在，是一个世界性问题，在全世界有四大沙尘暴区，即中亚、北美、中非和澳大利亚。我国西北沙尘暴地区属中亚沙尘暴区的一部分。

沙尘暴是在强风和沙源二者共同作用下形成的一种天气现象。沙尘暴发生的物理机制相当复杂，但必须具备以下两个条件：沙源、大风。丰富的沙源是产生沙尘暴的物质基础，它是在特定的地理条件下，由于长期的干旱少雨，地表植被稀少，土壤沙化形成大量松散干燥的不同大小的沙尘，在一定的动力作用下随风漂浮在空中不同范围之内。强风是沙尘暴形成的动力，强风经过沙源区，将大量的沙尘携带到空中，甚至随风漂移到沙源以外的广大地区，使空中能见度显著降低，对经济建设和人民生活造成不同程度的影响，严重时对自然环境和人民生命财产造成极大的破坏，甚至造成重大灾难。近年来，有的学者也提出沙尘天气的产生有一定的好处的观点，认为由于沙尘多为碱性，可以减轻沙尘暴地区酸雨的危害。

沙尘暴天气不是今天才有，在人类历史上早有记载。自汉代之后，我国沙尘暴发生的范围开始向东扩展，至元明清时期，其发生范围扩展到几乎整个华北地区（宋豫秦，2002）。北京地区历史上第一次可靠的沙尘暴记录出现在北魏太平真君元年（440年）“春二月，上谷郡”“黑风起，坏屋庐，杀人”（上谷郡辖地相当于今张家口、小五台以东，今北京延庆、河北赤城、怀来、涿鹿、宣化一带）。国外关于沙尘暴的报道主要从20世纪30年代开始，美国的约翰·斯坦因贝克（John Steinbeck）在他1939年的小说《愤怒的葡萄》（*The Grapes of Wrath*）中写道：当时，无依无靠者被从堪萨斯、俄克拉何马、得克萨斯、新墨西哥驱逐到西部。从内华达到阿坎萨斯，无数的家庭和部落，被沙尘暴“扫地出门”，无数的人们被拖拽着流落他乡，有坐汽车的，有乘马车的，无家可归，饥寒交迫。1805年，非洲撒哈拉大沙漠发生的沙尘暴将一支由2000人和1800匹骆驼组成的商队吞没。1960年3月4日，前苏联发生沙尘暴席卷了俄罗斯南部平原广大地区，使垦荒地春季作物受灾面积达400hm²以上（张庆阳，2001）。据气象部门统计，20世纪前50年我国记载的强沙尘暴有17次，新中国成立以来，50年代共发生5次；60年代共发生8次；70年代共发生13次；80年代共发生14次；90年代共发生23次。每次强沙尘暴都给国家和人民生命财产造成严重破坏，如1998年4月18日在新疆发生特强沙尘暴，造成11人失踪，大批畜群失散，10个地州市受灾严重，强沙尘暴还引起森林火灾和其他火灾多起，部分地区居民房屋被大风刮倒，农田、蔬菜大棚受损惨重；2007年3月，在我国新疆有一列火车遭受沙尘暴袭击，十余节车厢被吹翻脱离铁轨，造成数人死亡和数十人

受伤的惨剧。沙尘暴问题一直受到国内外各级政府部门、生产单位、专家学者的广泛关注,并在沙尘暴监测及产生、发展、影响机理和防治措施等方面开展了一系列卓有成效的工作。国外从20世纪20~30年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究。我国从70年代开始对沙尘暴天气进行研究,自1993年5月5日我国西北地区的特强沙尘暴天气发生后,引起了我国政府和科学工作者们的高度重视,有力地推动了沙尘暴研究的广泛开展,于1993年9月在兰州召开了“首届全国沙尘暴天气研讨会”。之后1993年11月29日国家科委又召开汇报会,将沙尘暴研究正式列入“八五”攻关项目。1994年以来,国家自然科学基金委先后资助了多项沙尘暴方面的研究项目,部分省(自治区、直辖市)的有关科技部门也立项支持对沙尘暴进行研究。特别是2000年春季以来,由于沙尘暴发生次数的明显增多,再一次向人们敲响了生态环境加快恶化的警钟,唤起了全民的广泛关注。因此,我国政府各有关部门(如2000年国家科技部在公益性专项资金课题指南中专门设立了有关沙尘暴发生、发展和影响的机制分析、动态监测以及预测预报等方面的研究课题)进一步加大对沙尘暴研究及其防治措施的支持力度,沙尘暴研究与防治高潮迭起。

1.1 沙尘暴定义与沙尘天气等级

1.1.1 沙尘暴的定义

沙尘暴是一种强灾害性天气,不仅对全球和区域的气候和生态系统造成重大的影响,而且给工农业生产、交通、建筑设施、人民生命财产等带来严重危害。由于不同的历史时期,不同地区的经济、文化、社会等背景,不同的人对沙尘暴有不同的认识,进而产生了不同的沙尘暴名称、定义和内涵,本文仅列举几个典型例子。

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

在印度西北部地区,将季风到来之前季节内出现的对流性沙尘暴,称其为安德海(Andhi);在非洲和阿拉伯地区称之为哈布(Haboob)(Joseph et al, 1980);也有的地区称之为“phantom”,即“鬼怪”的意思(Wolfson et al, 1986)。

为了对沙尘暴天气监测进行统一和规范,中国气象局根据中国气象事业发展的需求,编制了中华人民共和国国家标准《沙尘暴天气监测规范》(2006年11月1日开始实行)。该标准中对沙尘暴的定义是:风将地面大量尘沙吹起,使空气很混浊,水平能见度小于1km的天气现象。

1.1.2 沙尘暴天气等级

1.1.2.1 沙尘暴天气等级划分方法

对沙尘暴强度的等级划分,一般采用风速和能见度两个指标。国内外均提出了沙尘暴等级及划分依据,既有定性的,也有定量的,还有定性加定量的划分方法。

(1) 定性的划分方法

沙尘暴天气发生时, 气流向空中输送大量沙尘, 使能见度较低、空气质量恶化, 给人们日常生活、身体健康带来严重影响。强沙尘暴往往造成天昏地暗, 引起人们恐慌心理(张广兴, 2003)。

(2) 定量的划分方法

Joseph (1980) 将发生在印度西北部的沙尘暴划分为 3 个等级: 即 4 级 $< \text{风速} \leq 6$ 级, $500\text{m} \leq \text{能见度} < 1000\text{m}$, 称为弱沙尘暴; 当 6 级 $< \text{风速} \leq 8$ 级, $200\text{m} \leq \text{能见度} < 500\text{m}$, 称为中等强度的沙尘暴; 而风速 ≥ 9 级, 能见度 $< 200\text{m}$, 则称之为强沙尘暴。

(3) 定性加定量的划分方法

在气象学中, 将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴 3 个等级。浮尘指在无风或风力较小的情况下, 尘土、细沙(颗粒直径约 0.001mm) 均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于 10km ; 浮游的尘土和细沙多为远地沙尘经上层气流传播而来, 或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的沙尘。扬沙指由于风力较大, 能将粉沙(颗粒直径 $0.001 \sim 0.05\text{mm}$) 吹扬于空中, 使空气相当浑浊, 水平能见度在 $1 \sim 10\text{km}$ 。沙尘暴指强风把地面大量沙尘(颗粒直径 $> 0.05\text{mm}$) 卷入空中, 使空气特别浑浊, 水平能见度低于 1km 。

1.1.2.2 我国沙尘暴天气等级国家标准

我国 2006 年《沙尘暴天气等级》国家标准颁布, 规定了沙尘天气和沙尘天气过程的等级。在该标准中将沙尘暴天气等级划分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴、特强沙尘暴 5 级:

浮尘: 尘土、细沙均匀地浮游在空中, 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 $1 \sim 10\text{km}$ 以内的天气现象。

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

1.2 沙尘暴成因、特征与影响

1.2.1 沙尘暴成因分析

关于沙尘暴的成因, 从历史到现在, 从国内到国外, 都有很多专家学者对其进行了较深入的分析, 概括起来主要是两个原因, 即一是动力因素, 二是物质因素。二者缺一不可。沙尘暴活动的搬运动力和沙尘来源区物质所处状态是沙尘暴活动与否的决定因素。因此, 降低沙尘暴搬运动力和改变沙尘来源区地表物质所处状态是防治沙尘暴的关键(郁耀闯, 2006)。

1.2.1.1 动力因素

动力因素也就是使沙尘从地面在垂直方向上升和水平方向移动的风, 包括风速、风向及风持续的时间等要素。风的形成受不同的天气条件制约, 国内外有很多专家学者对沙尘

暴发生所需要的动力及形成条件进行了较深入的研究, 归结起来主要有: 厄尔尼诺(拉尼娜)事件(张仁健, 2002); 不稳定大气、特殊地形地貌(如峡谷、山口、走廊等)(陈敏连, 1993); 近地层湍流输送, 近地层湍流感热交换和湍流动量交换(孙继明, 2002); 蒙古气旋(刘景涛, 2003); 太阳活动、全球气候变化、青藏高原地面加热场、欧亚西风急流轴、西太平洋副热带高压(李栋梁, 2004); 气温、寒潮、北半球极涡、亚洲西风环流、东亚大槽和南方涛动(高涛, 2004); 北极涛动(宋连春, 2004)等。以及风向、最大风速及持续时间(李艳春, 2005); 大风日数(许炯心, 2005); 大气环流形势和较强冷空气(尤凤春, 2005, 贾耀锋, 2006, 柏晶瑜, 2003)等。

1.2.1.2 物质因素

沙尘源物质的形成, 一方面与干旱气候条件有关, 另一方面也与人对土地利用的方式, 干预周围自然环境的方向和程度有关。

(1) 气候条件对沙尘物质形成的影响

一方面, 长期以来, 由于干旱少雨, 水分蒸发量大等客观因素, 形成了丰富的沙场源区, 如我国北方地区的古尔班通古得沙漠、塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地、库布齐沙漠以及甘肃河西、内蒙西部、陕北和河套地区的沙地。除沙漠以外, 戈壁和小块绿洲外围多为砂砾和粗、细沙构成的漏沙土和风沙土等。另一方面, 各年的气候差异也产生不同的沙尘暴发生、发展状况, 即使有固定的沙尘源区和植被覆盖, 因每年冬春季节的气候变化不同, 导致各年的沙尘暴发生的情况也有差异。相比之下, 如果某年冬季降水比往年少, 或春季气温回升迅速且比往年偏高, 使土壤解冻早而快, 地表土层疏松, 一旦遇到风, 易于发生沙尘暴。

(2) 人为活动对沙尘物质形成的影响

人类的不合理行为, 可能增加沙尘源物质, 主要是对森林、草原的滥垦、滥伐、滥采、滥牧、滥用水资源以及纵火和不合理的耕作方式使土地沙化、退化、荒漠化, 造成生态环境破坏(朱雅丽, 2003)。

随着人类社会的不断进步, 人口的增加、经济的发展、人民生活水平的提高, 各种用地和原材料增加, 包括生产粮食的耕地、城镇建设用地、居民点建设用地、工矿建设用地、道路建设用地、娱乐场所用地、宗教信仰用地、墓葬用地及其各种建设需要的原材料(木材、药材、饲料等)增加, 人类大量采伐森林, 利用林地和草地开垦农田和其他用地。北京地区有沙尘暴记录始于北魏对北京上风向大同地区的农业开发。386年鲜卑族拓跋氏在平城(今山西省大同市)建立魏政权(史称“北魏”), 为了发展经济, 从中原掠来农业人口和商贾充实都城, 周围土地的开垦导致沙尘暴并袭击下游的北京地区。至元四年(1267年)“郭守敬请开玉泉山水通漕运”, 同年“凿金口导西山木石”, 为从1268~1285年大都城的兴建提供木材、石料。当时西山一带采伐森林和运木的规模和场面从元《运伐图》中可见一斑。掠夺式的采伐, 串坡集采、沿道运输, 使西山的森林遭到毁灭, 这时陡坡和岩石裸露的山地已失去自我恢复昔日森林景观的能力。丰台大葆台西汉燕王刘旦墓仅黄肠题凑就耗用柏木16000根, 墓外还积实了大量木炭。辽、金时期幽州成为陪都, 有“户口三十万, 大内壮丽, 城北有市, 海陆百货聚于其中, 僧居佛寺冠北方。”

战争、火灾对森林的破坏, 加急了土地荒漠化。宋、辽之间的战争频繁, 大片森林毁于战火, 而“营造木船数以千计”、修道填路、安营扎寨也要大量砍伐森林。辽金时代又