

北京尘暴 与环境

刘艳菊 韩同林 刘清珺 刘庆阳 等 编著



科学出版社

北京尘暴与环境

刘艳菊 韩同林 等 编著
刘清琚 刘庆阳



科学出版社

北京

内 容 简 介

全书分三篇。上篇从沙尘暴的定义、历史记录、负面影响、发生特征、诱发因素、传输路径、来源解析、治理和预报防护等方面系统地综述了沙尘暴研究的历史及现状。中篇从地学角度介绍了尘暴尘源区范围、气候及地质地貌特征；从实验学角度表征了尘源区不同地表类型土壤/粉尘、尘暴降尘的物化及藻类特性并进行相似性分析，并表征尘暴大气颗粒物的污染特征，借助气团传输路径、铅同位素示踪、来源估算等手段，推断内蒙古、河北北部、天津、北京周边对北京尘暴均有一定程度的贡献，证明干盐湖是北京尘暴的重要来源之一。进而表征了包括我国北方、西北和东北地区在内的北京尘暴潜在源区表土的物化特征，提出其土地普遍呈现盐渍化程度重的结论。下篇通过实验等论证了北京尘暴治理的可行性建议。

本书集资料综述和实验验证于一体，涉及地质、地貌、地理、大气、气象、化学、生物等多学科领域，是围绕北京尘暴这一主题展开的资料翔实、内容丰富、思路新颖的著作，很多一手资料首次面众。可作为从事环境地质、地貌、地理、气象、大气科学等领域的工作者和高等院校师生的专业参考书目，也是广大环境关注者的有益科普读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

北京尘暴与环境 / 刘艳菊等编著. —北京: 科学出版社, 2017.2

ISBN 978-7-03-049243-2

I. ①北… II. ①刘… III. ①沙尘暴—研究—北京市 IV. ①P425.5

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第147840号

责任编辑: 杨帅英 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 图阅社

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年2月第一次印刷 印张: 18

字数: 390 000

定价: 228.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

人类的发展与自然环境息息相关。沙尘暴是非常独特的一种自然现象,曾经把土壤从贫瘠的地表转移到平原和谷地,借助适宜的温度、水文等其他自然条件,形成了肥沃的土地,滋养着生灵万物。然而,正是这位人类自然发展史上的功臣,却正在进一步使贫瘠地区的土地荒漠化进程加剧,并对生态环境、经济和人群带来巨大的危害。我国北方干旱、半干旱地区的严重荒漠化一直被认为是沙尘暴形成的重要原因,而沙漠则被作为首要元凶而一度受到各界关注,为此,政府针对沙漠、沙地治理启动了“三北防护林工程”和“京津风沙源治理工程”,有效改善了荒漠地带的生态环境,沙尘暴似乎暂时风平浪静。但北京于2002年3月19日和2006年4月16日发生的两起特大“沙尘暴”事件,涉及面之广、危害之大均令人瞠目,其降尘具有水溶盐含量极高等以往沙尘暴降尘所不具备的特性,因而有人认为“沙尘暴”应该被称为“尘暴”、“盐碱尘暴”或“化学尘暴”,并大胆提出其来源地应该包括干涸盐湖区,但由于缺乏系统性的研究佐证,政府始终没有启动针对干盐湖治理的大型工程。

基于以上基本情况,《北京尘暴与环境》一书作者,围绕北京尘暴来源问题,对潜在尘源区进行全面考察,并对其表土、尘暴期间北京及其周边的降尘和大气颗粒物进行了大量的调研和分析,明确了北京尘暴的来源问题,并尝试量化尘源区不同类型地表对北京尘暴的贡献,最终确定干盐湖是北京尘暴最重要的来源地,并借助详细的实验分析、提出未来可行的干盐湖治理策略。作者进一步对我国西-西北、北部、东-东北地区潜在尘源区进行调研发现,我国北方土地面临严重盐渍化,需要引起关注。《北京尘暴与环境》一书的出版,将为北京尘暴的防治工作提供翔实的数据资料和新的治理思路,为政府有关部门制定相关政策、法规和措施提供科学依据。

全书共分上篇、中篇和下篇。由刘艳菊撰写内容简介和前言,全书结构分布由刘艳菊、韩同林、刘清珺共同策划和最终校对。上篇共8章(第1~8章),为综述部分,由刘艳菊、刘清珺撰写。中篇共9章(第9~18章),为调查与分析,主要由韩同林、刘艳菊共同撰写完成,为了本书结构的完整,第15、第16章内容编辑了刘庆阳、刘艳菊等共同发表的部分论文内容。下篇共3章(第19~21章),为尘暴治理,主要由韩同林完成。著作后期,杨峥做了全书的校对工作和考察路线图的绘制,朱明溟、张婷婷、邢波、刘蔚轩对部分章节校对。专著涉及大量的野外取样工作,其中韩同林参与了2002~2011年的所有考察和采样工作,刘艳菊参与了2007~2015年的所有大型野外土壤样品采集和北京及周边地带的样品采集,刘庆阳参与了2011年、2013年、2014年的野外样品采集,王欣欣参与了2012年和2015年的样品采集,刘蔚轩、刘新建参与了2013年和2014年的大型野外样品采集工作和北京及周边的土壤样品采集,杨峥

和张鹏骞参与了2015年新疆的野外采样。室内样品分析工作同样繁重,韩同林分析了土壤的人工粒度、进行了藻类培养、释尘量实验和盐碱治理实验,刘艳菊参与完成了大部分土壤样品的前处理和pH、电导率分析,张婷婷完成了大部分土壤、降尘的水溶性离子及所有颗粒物的元素碳和有机碳的分析工作,刘庆阳主要完成了2012年北京西三环大气颗粒物的采样和大部分成分分析及土壤样品的重金属元素分析,朱明湙完成了2014~2015年的土壤前处理、pH和电导率分析。邢波协助进行了部分2012年土壤的前处理和部分降尘样品的收集。

项目进行过程中得到多方支持:中国科学院植物研究所王宇飞团队、张家口环境保护局赵强团队和中国科学院天津工业生物技术研究所刘新建团队协助进行了北京植物园、张家口和天津三地2012年春季3~5月大气颗粒物样品的连续采集;北京自然博物馆王志学帮助鉴定藻类属种;北京市理化分析测试中心(以下简称“理化中心”)物理部高原等帮助分析了大部分土壤的激光粒度及化学全元素;郑柏裕、朴祥镐先生参与了2011年的野外考察,朴祥镐提供了其团队于2012年9月采集的部分盐碱地土壤样品;林景星、宋怀龙、王绍芳、庞健峰、孙珍全参与了2007年野外考察,殷学波等协助了部分降尘样品采集。整个项目实施中得到理化中心原环境污染分析与控制研究室同事及北京麋鹿生态实验中心生态室同事的协助,还有由于时间久远可能遗漏的热心人,一并感谢。

资金是研究工作进行的重要支撑,从理化中心、中国地质科学院地质研究所等的小额启动,到北京市财政专项的部分支撑,使项目初期的野外考察才能实现,2011年以后北京尘暴进一步深入的研究工作,则是在国家自然科学基金项目(41175104, 41475133)的资助下才得以展开,期间还得到北京现代汽车有限公司的赞助,在此表达诚挚谢意。

项目实施过程中得到北京市科学技术研究院领导班子、理化中心领导及各级管理部门的大力支持,尤其是2012年国家自然科学基金项目负责人工作单位调动后,理化中心和北京麋鹿生态实验中心的领导和同事能共同支持,才使项目按计划顺利完成,在此表示衷心感谢。

最后,把深深的感谢留给作者的家人们,正是他们长期默默的付出,才有了此稿的顺利产出。

因作者知识局限,书中对北京尘暴的认识和论述难免粗浅不当,愿能抛砖引玉,推动学界创新。

目 录

前言

上篇 综 述

第 1 章 沙尘暴概述	3
1.1 沙尘天气的定义和分类	3
1.2 沙尘暴的历史记录	5
1.2.1 我国沙尘暴的历史记录	5
1.2.2 北京沙尘暴的历史记录	6
1.3 北京沙尘暴的研究阶段	8
1.3.1 初步研究阶段 (1950 ~ 2002 年)	8
1.3.2 盐碱尘暴起步阶段 (2002 年至今)	8
第 2 章 沙尘暴的危害	10
2.1 影响范围广	10
2.2 直接经济损失和受灾程度重	11
2.3 通过高空运输大范围影响空气质量	12
2.4 对农业和生态造成负面影响	13
2.5 严重危害人群健康	14
2.6 其他方面危害不可忽视	15
第 3 章 沙尘暴发生特征	16
3.1 沙尘暴发生的时空分布特征	16
3.1.1 我国沙尘暴发生的时空分布特征	16
3.1.2 北京沙尘暴发生的时间特征	17
3.2 沙尘暴期间的气溶胶污染特征	17
第 4 章 沙尘暴发生的诱发因素分析	20
4.1 大风和不稳定的空气层结为沙尘暴的助推因子	20
4.1.1 持久的强风是卷起沙尘的动力	21
4.1.2 不稳定的空气条件有利于风力加大及强对流的发生发展	21
4.1.3 蒙古气旋是影响我国沙尘暴天气的主要系统之一	22
4.1.4 西伯利亚冷涡也是我国北方沙尘暴天气发生的主要因素	23

4.1.5 沙尘暴发生是一系列气候气象因素共同作用的结果	23
4.2 沙源是沙尘暴发生的物质基础	25
4.2.1 干燥的气候环境为起尘提供了保障	25
4.2.2 沙源是沙尘暴的物质基础	25
4.2.3 严重的荒漠化是酝酿沙源的重要因素	27
4.3 北京地区的沙尘暴发生因素分析	29
第5章 沙尘暴的传输路径	30
5.1 我国沙尘暴传输路径	30
5.2 北京沙尘暴传输路径	30
第6章 沙尘暴源解析	33
6.1 沙尘暴源解析方法	33
6.1.1 同位素	33
6.1.2 受体模型	34
6.1.3 色度	34
6.1.4 元素及其比率	34
6.1.5 成分相似性	35
6.1.6 颗粒粒径	36
6.2 北京沙尘暴来源研究现状	36
6.3 北京沙尘暴新来源的认识	38
第7章 沙尘暴治理	40
7.1 沙尘暴防治经验	40
7.1.1 加强法律体系建设	40
7.1.2 有效保护与合理利用水资源	40
7.1.3 改善土壤结构	40
7.1.4 减轻人为破坏	40
7.1.5 生态修复	41
7.1.6 其他策略	42
7.2 沙尘暴治理中存在的问题	43
第8章 沙尘暴预报和防护	44
8.1 沙尘暴的预报与监测	44
8.2 沙尘暴的预防和防护	45

中篇 调查与分析

第9章 北京尘暴研究阶段	49
9.1 北京尘暴研究序曲——干涸盐湖区作为北京尘暴源问题的提出	49
9.2 干盐湖作为北京尘暴源的初步研究	49
9.2.1 高耐盐碱先锋植物——碱蓬种植自发性试验阶段(2002~2005年)	49
9.2.2 所级项目资助的启动阶段(2006~2008年)	50

9.2.3 北京市财政项目支持的助推阶段 (2009 ~ 2011 年)	50
9.3 北京尘暴源的深入系统研究阶段 (2012 ~ 2015 年)	50
9.3.1 中韩联合对内蒙古干盐湖考察 (2012 年)	50
9.3.2 国家基金项目成员考察我国西部、西北地区 (2013 年)	52
9.3.3 国家基金项目成员考察我国东北地区 (2014 年)	52
9.3.4 国家基金项目成员考察新疆地区 (2015 年)	52
9.3.5 其他零星采样工作	60
9.4 人工规模种植碱蓬试验	61
第 10 章 北京尘暴尘源区范围、气候及地质地貌特征	62
10.1 尘暴尘源区的大致范围及气候特征	62
10.1.1 尘暴尘源区范围初步确定的主要依据	62
10.1.2 尘暴尘源区大致范围的确定	63
10.1.3 北京尘暴尘源区的气候特征	64
10.2 尘暴尘源区的地质构造特征	64
10.2.1 尘源区的地层与岩石特征	64
10.2.2 尘暴尘源区的构造特征	66
10.3 尘暴尘源区的地貌特征及地表类型的划分	66
10.3.1 地貌特征	66
10.3.2 地表类型划分	67
10.3.3 尘暴尘源区 4 种不同类型地表的特征描述	67
第 11 章 北京尘暴尘源区 4 种不同类型地表土壤 / 粉尘的动力学特征	70
11.1 不同类型地表释尘量实验的准备	70
11.1.1 设备和材料的选用	70
11.1.2 实验设计和配件准备	70
11.1.3 装配	71
11.2 不同类型地表释尘量实验过程	72
11.2.1 实验样品的制备	72
11.2.2 实验次数和步骤	73
11.3 不同类型地表土壤释尘量表征	75
11.3.1 不同类型地表土壤释尘量和百分释尘量	75
11.3.2 释尘量实验可靠性的检测	77
11.3.3 关于尘暴尘源区地表粉尘物质的性质、分类和特征	78
第 12 章 北京尘暴尘源地土壤 / 粉尘物理化学特性表征	81
12.1 样品的处理和分析	81
12.1.1 样品预处理	81
12.1.2 样品分析	81
12.1.3 数据处理	83
12.2 尘暴尘源区 4 种不同类型地表土壤 / 粉尘的物化特征	84
12.2.1 物理学特征	84

12.2.2 化学特性	90
第 13 章 北京沙尘源地不同地表类型土壤粉尘藻类特性表征	99
13.1 北京沙尘源地不同类型地表粉尘中藻类植物的培养	99
13.1.1 设备选择及装配	99
13.1.2 培养液的制作	99
13.1.3 实验装配	100
13.1.4 培养步骤	100
13.1.5 藻类植物的处理	100
13.2 北京沙尘源地不同地表类型土壤中藻类植物分类特征	100
第 14 章 北京沙尘降尘物质的特征——以 2006 年 4 月 16 日和 2010 年 3 月 19 日 沙尘为例	103
14.1 北京沙尘降尘样品的采集和处理	103
14.1.1 北京沙尘降尘样品的采集	103
14.1.2 北京沙尘降尘样品的处理	104
14.2 北京沙尘降尘的物理学特征	104
14.2.1 北京沙尘降尘的宏观表象和手感特征	104
14.2.2 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘的粉尘量、百分粉尘量特征	105
14.2.3 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘的比重及最小起尘风速	107
14.2.4 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘颗粒的外观特征和粒度分析	108
14.3 北京沙尘降尘的化学特征	112
14.3.1 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘的 pH、电导率特征	112
14.3.2 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘的水溶盐、水溶性离子含量及水不 溶物特征	113
14.3.3 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘物质的化学全分析结果特征	115
14.3.4 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘的矿物成分及矿物颗粒特征	115
14.3.5 北京“4.16”和“3.19”沙尘降尘的重金属含量特征	116
14.4 北京沙尘降尘的藻类特征	119
14.4.1 降尘中藻类的研究现状	119
14.4.2 北京沙尘降尘的藻类属种特征	120
第 15 章 2012 年沙尘暴期间北京 PM ₁₀ 污染特征及铅同位素来源分析	123
15.1 研究方法	123
15.1.1 样品采集	123
15.1.2 样品分析	124
15.1.3 数据分析	128
15.2 北京市两个样点大气颗粒物 PM ₁₀ 的污染特征	129
15.2.1 质量浓度变化特征	129
15.2.2 水溶性离子浓度特征	131
15.2.3 金属元素浓度特征	134
15.2.4 含碳气溶胶变化趋势	135
15.2.5 沙尘暴期间 PM ₁₀ 的铅同位素变化趋势及来源探讨	135

第 16 章 2012 年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	139
16.1 材料与方法	139
16.1.1 采样地点与方法	139
16.1.2 样品分析	140
16.2 颗粒物的污染特征分析	140
16.2.1 质量浓度时空分布特征	140
16.2.2 水溶性离子变化特征	142
16.2.3 含碳气溶胶变化趋势	144
第 17 章 北京尘暴潜在源区地表土壤物化特性	146
17.1 样品采集及分析方法	146
17.1.1 样品采集	146
17.1.2 分析方法	146
17.2 北京尘暴潜在源区地表土壤物化特性总体概况	148
17.2.1 激光粒度	149
17.2.2 pH	149
17.2.3 电导率	149
17.2.4 离子浓度	149
17.2.5 全元素分析	150
17.3 北京尘暴潜在源区各省份地表土壤物化特性	151
17.3.1 激光粒度	151
17.3.2 pH	153
17.3.3 电导率和盐渍化程度	155
17.3.4 水溶性离子浓度	156
17.3.5 全元素分析	160
17.4 北京尘暴潜在源区各省份 4 种类型地表土壤物化特征	167
17.4.1 pH	168
17.4.2 电导率和土壤盐渍化	171
17.4.3 离子浓度特征	173
17.4.4 化学全分析	179
17.4.5 激光粒度	192
17.5 北京尘暴潜在源区地表土壤参数相关性	196
17.5.1 激光粒度之间及与各参数的相关性	196
17.5.2 pH、电导率、阴离子、阳离子之间的相关性	197
17.5.3 pH、电导率、阴离子、阳离子浓度与化学全元素含量之间的相关性	198
17.5.4 化学全元素之间的相关性及其主成分分析	199
第 18 章 北京尘暴降尘组分来源估算方法和应用	203
18.1 北京尘暴降尘组成来源估算方法	203
18.1.1 关于北京尘暴降尘组成来源的认识和争论	203
18.1.2 北京“4.16”尘暴降尘组分来源计算的依据及假设	205
18.2 北京“4.16”尘暴降尘粉尘来源估算	207

18.2.1 估算过程	207
18.2.2 估算结果	209
18.3 北京“3.19”尘暴降尘粉尘来源估算	210
18.3.1 估算过程	210
18.3.2 估算结果	212

下篇 尘暴治理

第19章 基于典型尘暴源地——干盐湖特性的研究	215
19.1 查干诺尔干盐湖地表风蚀深度的测定及特征	215
19.1.1 地表风蚀深度的测定方法	215
19.1.2 查干诺尔干盐湖地表风蚀深度的测定结果及特征	217
19.2 干盐湖盐壳剖面特征及盐壳形成	217
19.2.1 干盐湖的盐渍化程度	217
19.2.2 呼日查干淖尔干盐湖盐壳剖面特征	217
19.3 干盐湖的治理方法探索	220
19.3.1 干盐湖向草原的转化过程浅析	220
19.3.2 干盐湖盐壳形成实验	220
第20章 浅析北京尘暴与“京津风沙源治理工程”及“三北防护林体系建设工程”的关系	225
20.1 浅析北京尘暴与“京津风沙源治理工程”的关系	225
20.1.1 “京津风沙源治理工程”概况	225
20.1.2 “京津风沙源治理工程”(一期, 2001 ~ 2012 年)的治理效益	225
20.2 北京尘暴与“京津风沙源治理工程”的关系讨论	228
20.2.1 “京津风沙源治理工程”涉及区域存在的缺陷	228
20.2.2 干涸盐渍湖盆区治理难度和可能	228
20.3 北京尘暴与“三北防护林体系建设工程”关系讨论	229
20.3.1 “三北防护林体系建设工程”概况	229
20.3.2 “三北防护林体系建设工程”效益	230
20.3.3 “三北防护林体系建设工程”存在的问题	231
20.3.4 北京尘暴与“三北防护林体系建设工程”的关系	232
第21章 北京尘暴的治理对策和建议	233
21.1 北京尘暴的治理对策	233
21.1.1 干涸盐渍湖盆区的治理方案	233
21.1.2 丘陵的治理方法和方案	235
21.1.3 农耕地的治理方法和方案	236
21.1.4 沙地的治理方法和方案	236
21.2 北京尘暴的治理建议	236
参考文献	238
彩图	255

上篇 综 述

第 1 章 沙尘暴概述

1.1 沙尘天气的定义和分类

沙尘天气是半干旱、干旱和荒漠化地区特有的一种天气现象，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某种系统诱发的一种小概率、危害大的灾害性天气。与普通百姓所认识的“风沙”“黄沙”“黑风暴”等一般常用叫法不同，气象学依据大气水平能见度的大小将沙尘天气分为沙尘暴、扬沙和浮尘等天气现象，这也是影响北京的 3 种主要沙尘天气类型（方修琦等，2003），只要出现其中一种即为出现沙尘天气（方翔等，2002）。

根据《地面气象观测规范》（以下简称《规范》）和其他有关资料，现对扬沙、浮尘和沙尘暴的具体定义及细节阐述如下：

扬沙是由于风大将地面尘沙吹起，使空气相当混浊，水平能见度为 1.0 ~ 10.0 km 的一种自然天气现象。

在《规范》中浮尘被定义为“尘土、细沙均匀地浮游在空中，使水平能见度小于 10.0 km 的自然天气现象”（何清和赵景峰，1997）；也是指沙尘微粒在风力作用下，从地面扬起进入大气，悬浮、飘移、沉降的全过程；或是远处大风引起尘暴、扬沙之后，尚未下沉的细粒随高空气流移来本地，均匀地浮游于空气中的现象（易仁明，1982）。以往研究认为，我国浮尘主要起源于甘肃、内蒙古、宁夏等地的干燥沙漠地带，其次为新疆沙漠（张德二，1984）。浮尘按粒径（ D ）可分为 3 类：粉尘（ $1\text{ }\mu\text{m} < D \leq 10\text{ }\mu\text{m}$ ）、飘尘（ $D \leq 1\text{ }\mu\text{m}$ ）、降尘（ $D > 10\text{ }\mu\text{m}$ ）（何清，1997）。近代气溶胶成分观测表明，粉尘在大气中可进行远距离输送。大气降尘可根据搬运风力大小和源区差别被划分为尘暴降尘和非尘暴降尘。一方面，两类降尘物质外观色泽不同，尘暴降尘样品为黄褐色，更多源于地壳物质；非尘暴降尘为灰褐色，可能是因为其含有更多人类活动排放的燃烧物质。另外，尘暴降尘粒度比非尘暴降尘偏粗，分选更差。典型的非尘暴降尘的粒度频率曲线呈近似正态分布，而尘暴降尘则因远近距离共同搬运和强烈气流对粗细颗粒混合搬运的共同作用而呈现双峰态粒度分布特征（王赞红，2003a）。

沙尘暴一词源于 1935 年 4 月 14 日的“黑色星期天”——美国 20 世纪 30 年代最可怕的一次沙尘暴，是指强风（强烈扰动气流）把地表大量的沙粒尘土猛烈地卷入空中，使空气特别混浊，水平能见度小于 1 km 的一种天气现象。沙尘暴是沙漠化的主要过程之一，是特殊条件下产生的一种灾害性沙尘天气（王式功等，2000），是沙尘天气中最强烈的一种表现形式。风速和能见度是确定沙尘暴强度的主要依据，当沙尘暴水平能见度小于 200 m、风速 $\geq 20\text{ m/s}$ 时为强沙尘暴；沙尘暴水平能见度小于 50 m、风速 $\geq 25\text{ m/s}$ 时则被称为特强沙尘暴也被称为黑风暴，有时将强沙尘暴和特强沙尘暴统

称为黑风暴（唐丹妮，2012）。

另外，沙尘暴又可作为沙暴和尘暴两者兼有的总称，地学研究中依据大气中所含物质颗粒的大小、扬起的高度和搬运的距离长短来区分沙暴和尘暴（杜恒俭，1981）。文献研究认为，沙尘中粒径大于 $150\text{ }\mu\text{m}$ 时不能飞到高空，粉沙可被带入 1500 m 以上的高空，黏粒则可悬浮于整个对流层中被搬运到几千千米以外（文倩等，2001）。沙暴颗粒多集中分布在 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$ ，扬起的高度和搬运的距离有限，仅数米或数十米。尘暴颗粒物小于 0.074 mm ，扬起的高度可达数千千米至万米以上的高空平流层，搬运的距离在数百千米至上千千米以外。沙暴和尘暴的起沙风速不同，沙暴的起沙风速为 5 m/s ，合适条件下，风力超过起沙风速，沙粒便能被风吹起，以跳跃式和滚动式运移，常可被高于 1 m 的障碍物阻滞，更无法翻越高大的山体，沙暴发生区域一般在东北三省西部、燕山以北、晋北、陕西黄龙山、宁夏南部山区、西秦岭以北半干旱和干旱地区。尘暴的起沙风速比沙暴小，二者起因相同，但由于颗粒细小，可随风翻山越岭而到达我国北方半湿润甚至湿润区，影响区域可从黄土高原南部、华北平原、东北平原直达东部沿海。

以上三类灾害天气现象关系密切。扬沙和浮尘这两种自然天气现象同属一个性质，即都是尘沙在空中的悬浮，造成的视程障碍程度基本相同，在大气中造成的光、色、态等在人们视觉上有几乎相同的表现。扬沙与沙尘暴是由于本地或附近尘沙被强风吹起而造成的，其共同特点是能见度明显下降，出现时天空混浊，一片黄色，北方春季容易出现；所不同的是扬沙天气风较大，能见度在 $1\sim 10\text{ km}$ ，而沙尘暴风很大，能见度小于 1 km 。浮尘是由于远地或本地产生沙尘暴或扬沙后，尘沙等细粒浮游空中而形成，俗称“落黄沙”，出现时远方物体呈土黄色，太阳呈苍白色或淡黄色，能见度小于 10 km ，无风或风力不大（李青春等，2003）。有描述称：沙尘暴的主要成分是比较沙粒更小、更轻的微粒，因其体积小，比重轻，并且所在范围大，草原、农田、工厂、矿山、道路等到处都有，很容易被风卷起，长途飞荡，沿路还可补充，因而可以横扫亚洲大陆，甚至漂洋过海，远涉澳大利亚大陆（郝志邦，2013）。从搬运方式讲，强风扬起的土壤颗粒有3种移动方式：悬浮漂移（直径小于 $0.02\text{ }\mu\text{m}$ ），地表蹦跃（直径为 $0.02\sim 0.10\text{ }\mu\text{m}$ ）和贴地滚动（直径为 $0.10\sim 0.90\text{ }\mu\text{m}$ ），扬沙或沙尘暴的发生主要是通过悬浮漂移方式形成的。

近年来，一直被人们坚信的京津地区的“沙尘暴”被质疑可能是尘暴。其实，沙尘暴和沙暴、尘暴，均是因强风暴吹蚀地面沙和尘土而起，只是搬运距离和颗粒大小不同而已。沙尘暴扬起和搬运的物质既有沙也有粉尘物质，是沙暴和尘暴的混合体。据报道，京津地区“沙尘暴”所含的物质主要为粉尘，含沙粒极少，且粉尘物质主要从高空数千千米以外搬运而来。人们把它们称为尘暴，也不过因为其所含的主要物质是粉尘而已。从北京沙尘暴降尘的颗粒大小、扬起的高度和搬运的距离分析，北京的沙尘暴相当于地学分类中的尘暴（张万儒和杨光滢，2005；张宏仁，2007；韩同林，2008a）。早在35年前，刘东生院士根据1980年4月17日至4月20日北京沙尘暴期间落尘的粒度，指出当时的落尘主要是尘，而不是沙尘（Liu et al., 1981）。另外，北京城因北有燕山阻隔，又是半湿润区域，出现的局部扬沙来自大兴区沿永定河河滩的沙，属就地起沙，不应称为来自沙漠沙尘所指的“北京沙尘暴”，确切地说应该是尘暴。

(申元村等, 2000)。北京“尘暴”更被称为“化学尘暴”, 除物理学特性与尘暴相同外, 化学尘暴更多强调了尘暴的化学物质成分为盐碱物质, 主要来源于干涸的盐碱湖、盐碱地、退化草地中的盐渍化土壤、盐碱荒漠等。有时除了盐碱成分外, 还有相当比例的有毒副作用的化学物质和元素, 如亚硝酸盐、溴、锌、镉、锰等, 所以称为化学尘暴(人人健康综合, 2012)。例如, 2006年4月16日发生的尘暴事件(简称4.16尘暴)带来的水溶盐重达1.1万余t, 被认为不是一般的沙尘暴, 而是含有大量水溶盐化学物质的化学尘暴(宋怀龙, 2006)。尽管对北京发生的是沙尘暴还是尘暴或化学尘暴的分类或叫法上仍存异议, 并不影响我们关注其危害程度和对其进行各种研究。我们暂且延用文献中提及的惯用名称。

1.2 沙尘暴的历史记录

1.2.1 我国沙尘暴的历史记录

据正史记载, 公元300~1909年, 我国共发生尘暴436次, 尘暴日数达901日。根据每10年中尘暴的次数与日数之乘积以值, 推测尘暴频发时段有: 公元480~509年, 1170~1219年, 1690~1729年, 1840~1879年, 在这些时段内的以值都不小于25, 对应于历史时期中的冷干期, 在所研究的1610年内, 每年降尘的平均厚度约为0.54 cm。

20世纪以来我国北方强沙尘暴呈急剧上升趋势, 50年代发生5次, 60年代发生8次, 70年代发生13次, 80年代发生14次, 90年代发生23次。1954~2000年我国尘暴事件发生频率较上半个世纪有降低趋势, 但自1998年后又逐渐增加(Wang et al., 2005a)。21世纪初我国沙尘暴加剧, 2000年沙尘暴发生15次, 2000年3~4月, 在我国北方地区连续出现12次沙尘暴和浮尘(史培军等, 2000), 2001年发生18次。国家林业局发布的《2002年沙尘天气及灾情评估报告》指出, 2002年3~5月, 我国北方地区共发生12次沙尘天气过程, 其中11次为沙尘暴(黄淼等, 2008)。在2001~2010年的近10年间民勤沙尘暴强度没有减弱, 强沙尘暴变化不大, 以6月出现最多的局地性沙尘暴为主, 4月出现最多的区域性沙尘暴为辅(赵明瑞等, 2013)。2013年和2014年我国沙尘天气有减少趋势, 2013年春季共出现了7次沙尘天气过程, 其中沙尘暴2次、扬沙5次, 是沙尘天气频次总体偏少, 但发生时间偏早、影响范围较广的一年(段海霞和李耀辉, 2014)。2013年3月8~10日, 北方自西向东有新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、河南、山东等省(自治区、直辖市)出现大范围浮尘、扬沙或沙尘暴天气, 是近几年来出现范围最广、强度最大、影响时间最长的沙尘暴天气(顾佳佳, 2013)。

我国不同地区沙尘暴发生呈现各自的特点: 长江以北地区20世纪50年代沙尘暴发生日数较多, 60年代发生日数较少, 70年代略有增加, 80年代又处于逐渐减少的趋势, 90年代有明显增加, 21世纪初则上升到一个新阶段, 为百年所罕见(王式功等, 2000)。同时期西北地区沙尘暴呈急剧上升趋势, 20世纪50年代5次, 60年代8次, 70年代13次, 80年代14次, 90年代19次。新疆大范围沙尘暴发生的次数从

20 世纪 60 年代到 90 年代逐年减少 (李强, 2013)。阿拉善盟的沙尘暴, 在新中国成立初期 3 ~ 5 年一见, 70 年代 2 年一见且强度都较弱、危害也较轻, 但进入八九十年代以来, 几乎年年发生; 到了 90 年代后期, 每年发生数十次, 发生频率明显加强, 强度加大。呼和浩特地区的沙尘暴在 1954 ~ 2001 年发生次数总体减少, 但 90 年代后有所增加, 特别是 2000 年开始急剧增加 (王文彪等, 2013); 1961 ~ 2010 年观测结果表明, 内蒙古中西部巴彦淖尔地区 20 世纪 90 年代沙尘暴频次明显减小, 进入 21 世纪又呈现增长态势 (梁凤娟, 2014); 1980 ~ 2006 年鄂尔多斯市春季大风、沙尘暴日数的时间总体呈减少趋势 (崔桂凤等, 2010); 锡林郭勒地区在 1981 ~ 2010 年的 30 年间沙尘暴风险呈增加趋势, 且西部地区高于东部地区 (武健伟等, 2012)。黑龙江省在 1958 ~ 2007 年的 50 年内扬沙、浮沙、沙尘暴日数都呈减少趋势, 其中扬沙减少速率为 1d/10a, 浮尘减少速率为 0.1d/10a, 沙尘暴减少速率为 0.3d/10a (王凤玲和李江宁, 2012)。黄土高原近 43 年来的沙尘、强沙尘暴天气呈减少趋势 (刘国梁和张峰, 2013)。位于腾格里沙漠南缘的民勤县的沙尘暴的发生次数存在着 5 年和 7.5 年的周期变化, 发生次数总体呈下降趋势, 但在一段时期又存在着波峰-波谷的波动变化 (邱进强和高峰, 2014)。内蒙古通辽市在 1954 ~ 2001 年的近 48 年间沙尘暴天气总体呈减少趋势, 20 世纪 50 ~ 70 年代是高发期, 且变化幅度大; 80 年代后沙尘暴发生次数急剧减少, 进入 90 年代后又呈上升趋势 (刁鸣军等, 2013)。世界上受风沙危害最严重的地区之一新疆绿洲农业区 54 年来沙尘暴发生次数均呈负趋势变化 (郝璐和穆斯塔发, 2012)。

1.2.2 北京沙尘暴的历史记录

我国首都北京关于沙尘暴的记录更为详细。北京地区历史上第一次可靠的沙尘暴记录是在北魏太平真君元年 (公元 440 年) (陈广庭, 2000), 其凶猛“坏屋庐, 杀人”。北魏景明元年 (公元 500 年) 二月, 沙尘暴“杀一百六十一人”。景明三年 (502 年) 九月, “暴风混雾, 拔树发屋”。正始二年 (505 年) 春二月, “黑风拔树杀人”。《元史》中记载, 致和元年 (1328 年) 三月壬申, “雨霾”; 天历二年 (1329 年) 三月丁亥、至顺元年 (1330 年) 三月丙戌, “雨土霾”; 至元四年 (1338 年) 四月辛未, “天雨红沙, 昼晦”; 至正二十七年 (1367 年) 三月庚子, “大风自西北起, 飞沙扬砾, 白日昏暗”, 史籍中有“幽燕沙漠之地, 风起则沙尘涨天”的记述。辽金时期, 北京城最严重的沙尘暴出现在公元 1367 年, 长达 44 天。到了明代, 北京的沙尘天气更加严重, 《明实录》记载的随大风而起的“扬黄土沙”“扬尘四塞”“扬尘蔽空”“拔木飞沙”等现象, 可视为扬沙天气, 其中特别猛烈的, 如“大风扬尘, 天地昏暗”等, 则很可能是沙尘暴天气; 而“风霾”“雨霾”“黄雾四塞”“雨土濛濛”“日色变白”一类的记录, 则应属于浮尘天气。明代的 276 年间, 北京地区共有 95 个年份出现春夏之交的大风沙尘暴天气, 前 71 年没有沙尘暴的记载, 沙尘暴多出现在正统五年 (公元 1440 年) 以后的 205 年里。几次特大沙尘暴毁坏建筑, 死伤人众, 损失惨重。以 20 年为间隔, 将洪熙元年 (1425 年) 至崇祯十七年 (1644 年) 的 220 年划分为 11 个时间段, 各时段沙尘天气发生次数分别为 16 次、9 次、11 次、17 次、6 次、23 次、15 次、8 次、18 次、19 次, 呈递增趋势。