



风扬粉尘

——近地层湍流与气固两相流

顾兆林 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

-18

风扬粉尘

——近地层湍流与气固两相流

顾兆林 著

P425.5
G523

科学出版社

北京

中国科学院
2008年11月

内 容 简 介

本书结合西北干旱、半干旱地区的地表特征,将粉尘活动过程作为近地层湍流及气固两相流行为来研究,介绍了植被层湍流的大涡模拟方法及数值模拟,以揭示大气湍流对植被层的热/动力响应机制,阐述了气固两相流数学模型及尘卷风的扬沙过程模拟,提出了风沙运动的颗粒动力学离子温差转移机制及相应的风-沙-电的耦合力学模型,为理解大气边界层内的粉尘活动过程研究提供了新的角度。相比于气象学研究方法,本书在微小尺度上,介绍了近地层植被层空气流场、沙粒与流场的相互作用以及沙粒静电起电机等方面的数学建模及模拟,研究了风扬粉尘气固两相流的数学模型及多相流体力学理论。

本书可供从事干旱、半干旱地区的风沙研究,城市大气环境研究的风沙物理学、地理科学、大气科学等方面的科技工作者,以及高等院校有关专业师生参考,也可供从事计算流体力学和多相流研究的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

风扬粉尘:近地层湍流与气固两相流/顾兆林著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028125-8

I. ①风… II. ①顾… III. ①沙暴-研究 IV. ①P425.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 119793 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:赵博 / 封面设计:爱丽精特

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

*

2010年7月第一版 开本: B5 (720×1000)

2010年7月第一次印刷 印张: 21 3/4

印数: 1—2 000 字数: 417 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

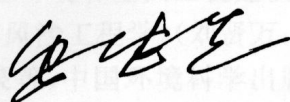
序

沙漠化(desertification)已成为全球的重大环境问题之一,引起国际社会的广泛关注。沙漠化通过风沙运动,以风沙地貌为景观标志,以各种风扬粉尘形式形成粉尘的垂直和水平输送,甚至远距离输送影响大气环境质量。我国是受荒漠化严重危害的国家之一,在各级政府的支持下,我国科学家以“沙漠化”为对象开展多学科综合研究与防治实践,围绕风沙活动及其危害,开展风沙运动规律、沙漠环境及其演变、沙漠化(含沙尘暴)过程及防治研究,为沙漠与沙漠化地区生态环境和重大工程建设提供理论依据和技术支撑。

粉尘活动研究的核心问题之一是理解沙尘天气、尘卷风等形成的物理机制,并定量描述风沙的分布、强度、输送与沉降。众所周知,粉尘活动过程是一个复杂的物理过程,与大气运动和地表状况等诸多因素有关,涉及中小尺度天气学、大气边界层动力学、颗粒动力学、气固两相流等多个学科领域。不同学科领域的研究尺度、关注点和研究方法都有其自己的特点。

对于西北干旱、半干旱地区,植被覆盖稀疏,是一种所谓的非均匀下垫面状态,这种状态是近地层大气湍流的一个重要影响因素。因此,要想从风沙物理学角度,弄清沙尘暴、尘卷风等中小尺度粉尘活动过程的动力机制,特别是粉尘活动与下垫面的关系、近地面的空气流场等,就要在风沙运动的环境力学建模与实验研究中解决以下主要问题:①近地层湍流及其与下垫面的相互作用机制;②近地面的空气流场中颗粒群碰撞的动力学及静电产生机制;③风-沙-电耦合的气固两相流数学模型及数值解法。

该书作者和课题组从事近地层风沙运动的气固两相流的数值模拟及风沙运动力学机制研究近十年,承担国家自然科学基金项目以及“973”项目课题等,并取得丰硕成果。该书结合西北干旱、半干旱地区的地表特征,将粉尘活动过程作为近地层湍流及气固两相流行为进行研究,介绍植被层湍流的大涡模拟方法,以揭示大气湍流对植被层的热/动力响应机制;介绍尘卷风的流场及气固两相流模拟,以解释静电场作用下的气固两相流机制,关注风-沙-电的耦合模型,为丰富现有风沙运动学作出贡献,为尘卷风、沙尘暴等强对流自由气旋形成的灾害性天气研究开辟了一个新的研究方向,值得国内外同行高度关注。



中国科学院院士

2009年11月

前 言

源于西北干旱、半干旱地区的粉尘活动(风扬粉尘)是西北地区土壤风蚀的结果,扬尘、扬沙和尘卷风,乃至尘暴、强沙尘暴事件不时发生,对其他地区的环境质量有重要影响。认识粉尘活动的形成过程和机制是西部环境系统的演化及未来趋势研究的关键科学问题之一。

能够启动和搬运地表粉尘的风系统发生在不同的气象条件下,并且具有各种尺度。每年的春季或秋季,锋面低压过境可能是大范围扬沙的主要原因,粉尘经常被冷锋前或后的大风扬起,而且高空急流在粉尘搬运中起着重要的作用。通常尘暴天气是一个中尺度天气过程。在非尘暴事件多发期(如夏季、秋季),大气边界层内粉尘活动也很频繁,通常以尘卷风的形式出现;尘卷风可以在微风,甚至无风条件下生成,是微小尺度天气过程。因此,风扬粉尘是一个复杂的粉尘活动现象,而且尘卷风、沙尘暴等大气边界层内的粉尘活动(又称风沙运动)是一个非线性、多场耦合的气固两相流体力学问题,沙粒作为分散相具有非均匀的直径分布;地表粉尘从地面到空中经历了稀相和浓相复杂流动。特别是粉尘颗粒间的不对称摩擦起电产生静电场,反过来对颗粒运动又产生影响。

粉尘活动研究的核心问题是要理解沙尘天气、尘卷风等形成的物理机制,并定量描述风沙的分布、强度、输送与沉降。风沙物理学是研究各种风沙现象的规律和形成的物理机制及其利用与控制原理的科学,是介于沙漠科学、物理学之间的交叉科学。国际上,一般将拜格诺(Bagnold R A)于1941年出版的*The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*(《风沙和荒漠沙丘物理学》,钱宁、林秉南译,科学出版社,1959)作为风沙物理学诞生的标志。拜格诺将风沙运动按沙粒离开地面的程度进行了分类:在地表滚动的沙粒蠕移运动;在近地风沙流层内沙粒离开地面的跃移运动;离开地面升空形成尘埃或悬浮于空中的悬移运动。

自20世纪50年代开始,我国开展了沙漠科学考察与治沙试验中的风沙地貌研究。90年代以来,我国的科学家以“沙漠化”为对象开展多学科综合研究与防治实践,围绕风沙活动及其危害问题,开展风沙运动规律、沙漠环境及其演变、沙漠化(含沙尘暴)过程及防治研究,为沙漠与沙漠化地区生态环境和重大工程建设提供理论依据和技术支撑,代表性著作有《实验风沙物理与风沙工程学》(刘贤万,科学出版社,1995)、《治沙工程学》(朱震达、赵兴梁、凌裕泉等,中国环境科学出版社,1998)和《风沙地貌与治沙工程学》(吴正等,科学出版社,2003)等。

事实上,粉尘活动过程是一个复杂的物理过程,与大气运动与地表状况等诸多

因素有关,涉及中小尺度天气学、大气边界层动力学、颗粒动力学、气固两相流等多个学科领域。不同学科领域的关注点和研究方法不同,尺度也不同。

深刻理解尘卷风、沙尘暴等各种尺度的大气环境问题,需要对复杂下垫面近地层(植被层)的大气湍流有深入的了解。目前,利用各种中尺度模式,以及从中尺度模式延伸而来的小尺度模式,无法直接模拟植被层高度内的风速分布,降低了预测判断沙尘暴以及污染物扩散的能力。

例如,预报沙尘暴时通常希望通过比较实测风速和沙尘暴的启动风速阈值来判断,但在不同非均匀植被层覆盖下,对起沙至关重要的距地面 20cm 高度内的风速由于受植被层的影响,其平均值和湍流强度存在显著差异,而植被层上方的实际平均风速却几乎无差异,容易引起误判。因此,精细研究近地层湍流及其与下垫面状况的相互作用机制,是具有现实意义和科学意义的基础课题。对于西北干旱、半干旱地区,植被覆盖稀疏,是一种所谓的非均匀下垫面状态,非均匀下垫面状态是近地层大气湍流的一个重要影响因素。

又如,目前绝大多数的风洞试验都是以水平风场为条件进行的。无疑,水平风场下的实验数据(包括垂直分布)对风沙运动研究是非常有益的,但是,实际的非均匀下垫面上的风沙运动其空气流场十分复杂。另外,沙尘天气的数值预报与监测中,空气流场的参数往往是一个较大水平尺度的数值,与风沙运动微尺度的空气流场数据的需求不同。实际上,我们至今对沙尘天气下地面的微气象参数与空气流场、地面以及太阳辐射的影响因素等知之甚少,导致对风沙运动的气固两相流的研究进展缓慢。

从风沙物理学的角度,风沙运动的环境力学建模更缺乏风-沙-电耦合的气固两相流数学模型及数值解法。

因此,本书尝试从多相流理论的角度认识风沙运动。相比于气象学研究方法,本书在微小尺度上,从近地层植被层空气流场、沙粒与流场的相互作用以及沙粒摩擦产生静电等方面进行数学建模及数值模拟的探索。

本书的指导思想是基于西北干旱、半干旱地区的地表特征,将粉尘活动过程作为近地层湍流及气固两相流行为来研究,介绍植被层湍流的大涡模拟,以揭示大气湍流对植被层的热/动力响应机制;通过尘卷风的流场及气固两相流模拟,以解释风场作用下的气固两相流机制;通过颗粒动力学离子温差转移模型以及 CFD-DEM 的模拟解释风沙运动静电场的物理机制。总之,通过植被层湍流和气固两相流理论的介绍及应用,企图建立静电场作用下风扬粉尘气固两相流的颗粒相数学模型及多相流体力学理论,为尘卷风、沙尘暴等强对流自由气旋形成的灾害性天气的研究提供一个新的视角。

全书共分 9 章,第 1 章是绪论。

第 2 章综合国内外的大量研究成果,介绍了西北干旱、半干旱地区的典型地貌

特征(植被状况)及近地层大气运动的物理与热力机制,重点讨论了近地面的气流及空气动力学粗糙度、单颗粒起动、跃移及悬移的力学、跃移层颗粒群的统计运动规律、风沙流的结构、粉尘的沉降以及风沙运动静电场的观测研究成果等。

结合风沙运动的特点,第3章介绍了风沙运动气固两相流的双流体模型和分相流动模型、气固两相连续方程和动量方程的通用形式以及气固两相层流运动控制方程组。按照雷诺时均的方法,讨论了气固两相湍流运动控制方程控制组湍流脉动关联项的模化问题。

对于大气边界层流场的主要湍流信息,大涡模拟(LES)能够直接提供模拟结果,描述拟序(相干)结构特征,因此,第4章介绍了大气运动的大涡模拟的方法控制方程组、常用亚格子模式的基本原理及特点,讨论了作者课题组提出的亚格子脉动有效特征尺度概念即改进的Sagaut混合尺度模式,通过对流场的二次过滤方法,自适应地评估和反映流场内各点湍流脉动尺度及其时空分布特征。

第5章以植被层湍流为对象,介绍了中性近地层湍流的经典理论,并利用改进的Sagaut混合尺度亚格子模式对植被层湍流进行了数值模拟。应用Shaw植被层热/动力模式,结合改进的Sagaut混合尺度亚格子模式的大涡数值模拟,研究了垂直方向叶面积密度分布不均匀、水平方向均匀分布的植被层湍流以及植被覆盖在水平方向不均匀的植被层湍流,揭示了不同的植被分布状态对大气湍流引起的干扰和改变,以及大气湍流对植被层的热/动力响应机制,再现了涡卷等大尺度相干结构的发展演化过程。

第6章介绍了尘卷风的数值模拟方法,包括对流边界层尺度(CBL)的模拟和尘卷风尺度的模拟,分析了尘卷风的演化进程、结构特征;在尘卷风尺度的准静态模型中,引入环境涡量、地表温度及地表粗糙度等热力或物理参数反映下垫面的影响,研究了不同特征的数值尘卷风及其特点。

第7章介绍了气固两相流的确定性颗粒轨道模型,在欧拉坐标系下模拟连续流体相的运动,在拉格朗日坐标系下模拟离散颗粒的运动;特别讨论了粗糙沙粒表面的粗糙度引起的冲击摩擦能量损失问题以及传热离散单元法。对尘卷风的空气流场,进行了沙尘的确定性颗粒轨道模拟,得到了颗粒群运动的概貌,分析了尘卷风扬尘的物理特征。

第8章基于水的电化学理论和颗粒动力学,提出了一个风沙流中的颗粒静电带电模型,对沙尘的带电过程进行了微观动态模拟;运用CFD-DEM方法,结合风沙运动颗粒碰撞的静电起电模型,对风沙运动的混合沙起电过程进行数值模拟。

第9章讨论了大气运动的中尺度模拟及解决相关问题的思路。

本书以尘卷风的气固两相流研究为主,兼顾沙尘暴天气的讨论,主要考虑到尘卷风是一个小尺度天气过程,观测与数值模拟的进展显著。关于尘卷风的研究成果对理解沙尘暴等中尺度天气过程的粉尘活动过程的规律非常有益。

2001年3月,作者结束日本庆应大学博士后工作回到西安交通大学,在原来环境与化工多相流模型与模拟研究的基础上,开始了利用气固两相流理论研究风扬粉尘问题的探索,相继承担了以下科学研究项目:

(1) 教育部跨世纪优秀人才计划课题“西北干旱区搬运粉尘的小尺度风系模式及数值模拟研究”。

(2) 重大基础研究(973)前期研究专项“干旱、半干旱地区的环境动力机制重大理论基础研究”(2003CCC01500)。

(3) 国家重点基础研究发展计划“973计划”课题“季风-干旱环境系统与全球变化关系的综合集成研究”(2004CB720208)。

(4) 国家自然科学基金项目“尘卷风的演化及下垫面参数的影响机制”(40675011)。

(5) 国家自然科学基金项目“风扬粉尘静电场及气固两相流的力学机制——以尘卷风为例”(10872159)。

(6) 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目“强粉尘活动过程静电场的两相流力学机制(708081)”。

(7) 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学)开放基金资助项目“尘卷风扬尘过程的静电问题研究”(200707)。

实际上,本书是上述研究项目工作的系统总结。陕西省气象局杜继稳副局长(研究员)和王繁强高级工程师,西安交通大学的李云副教授、赵永志博士和邱剑博士等参与了项目研究;作者的博士生鲁录义、苏军伟、张云伟和焦建英等正在参加研究工作。他们出色的工作及所完成的学位论文,丰富了本书的内容。如赵永志博士提出的尘卷风尺度模型较好地解决了尘卷风流场的模拟;邱剑博士提出了亚格子脉动的特征尺度概念,并发展了Sagaut混合尺度模式;鲁录义研究了沙粒表面粗糙度引起的冲击摩擦能量损失计算方法,提出了时间恢复系数和面积恢复系数概念,计算传热离散单元法中颗粒间的接触时间、接触面积以及颗粒间的传热等。

本书非常荣幸地获得2008年度国家科学技术学术著作出版基金的资助。作者真诚感谢中国科学院院士安芷生教授和陶文铨教授、中国工程院院士孙九林教授的推荐。中国科学院地球环境研究所安芷生院士对作者的研究给予了很多鼓励,不但吸收作者参与他为首席科学家的“973”计划项目,让作者有机会与西部乃至全球变化问题研究的同行交流,大开眼界,而且对作者科研方向的意义给予充分肯定,认为这是认识西部风沙环境问题的ABC(基础)。西安交通大学陶文铨院士是作者的前辈和师长,其著作《数值传热学》(西安交通大学出版社,第1版,1988;第2版,2001)以及《计算传热学的近代进展》(科学出版社,2001)一直摆在作者的案头,百读不厌,为作者及课题组的数值计算奠定基础、开拓思路。孙九林院士为

西安交通大学人居环境与建筑工程学院的学科建设倾注了大量精力,并积极鼓励作者开拓思路,进行学科交叉研究。

作者怀着深深的敬意,衷心感谢导师郁永章教授和蒋德明教授,他们的为人师表和严谨的科学态度让作者终生受益,正是在他们的鼓励下,作者才有勇气跨出原来的工程研究领域,探索风沙运动新的研究手段和方法。

本书之成,除了课题组成员的倾力协助外,兰州大学郑晓静教授非常关心、支持本书的撰写,并提供了其课题组多年来发表的研究成果资料,供作者参考;本书出版承蒙科学出版社刘宝莉编辑的热情帮助和编辑、审定,于此并致谢忱。

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请读者不吝批评指正。

1.1.1 沙尘天气	1
1.1.2 尘卷风	2
1.2 粉尘活动的沙粒荷电及静电场	3
1.3 风扬粉尘研究概述	4
1.3.1 沙尘天气中尺度预报	6
1.3.2 风沙物理学	7
1.3.3 尘卷风的观测与数值模拟	8
1.4 风沙运动研究亟待解决的相关问题	10
1.4.1 粉尘活动过程的气固两相流	10
1.4.2 近地层大气流动的模拟	12
1.4.3 沙尘天气数值预报的沙尘质量参数化	13
1.4.4 沙尘天气及粉尘活动过程研究的一些科学问题	14
1.5 本书的结构与指导思想	14
参考文献	15
第2章 风沙运动物理机制与风沙流	19
2.1 风沙地貌及植被层阻糙度	19
2.2 风沙运动的天气及热力条件	26
2.2.1 层流和尘卷风的一种动力触发机制	28
2.2.2 大范围扬尘/扬沙的大气动力机制	32
2.3 粉尘的启动、搬运与沉积	33
2.3.1 沙粒的启动运动	35
2.3.2 沙粒的运动	41
2.3.3 沙粒的沉降及风沙流	45
2.3.4 风沙流的静电场	63
2.3.5 粉尘沉积	67
2.4 结语	69

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风扬粉尘的形式及分类	1
1.1.1 沙尘天气	1
1.1.2 尘卷风	2
1.2 粉尘活动的沙粒荷电及静电场	3
1.3 风扬粉尘研究概述	4
1.3.1 沙尘天气中尺度模拟	6
1.3.2 风沙物理学	7
1.3.3 尘卷风的观测与数值模拟	8
1.4 风沙运动研究亟待解决的相关问题.....	10
1.4.1 粉尘活动过程的气固两相流	10
1.4.2 近地层大气湍流的模拟	12
1.4.3 沙尘天气数值预报的沙尘通量参数化	13
1.4.4 沙尘天气及粉尘活动过程研究的一些科学问题	14
1.5 本书的结构与指导思想.....	14
参考文献	15
第 2 章 风沙运动物理机制与风沙流	19
2.1 风沙地貌及植被层粗糙度.....	19
2.2 风沙运动的天气及热力条件.....	26
2.2.1 黑风暴和尘卷风的一种动力触发机制	28
2.2.2 大范围扬尘/扬沙的大气动力机制.....	32
2.3 粉尘的启动、搬运与沉积	33
2.3.1 沙粒的悬移运动	35
2.3.2 沙粒的起动	41
2.3.3 沙粒的跃移及风沙流	46
2.3.4 风沙流的静电场	63
2.3.5 粉尘沉积.....	67
2.4 结语.....	69

参考文献	69
第 3 章 风沙运动气固两相流基础	74
3.1 沙粒及沙粒群的几何性质	74
3.1.1 单颗粒的基本几何特征	74
3.1.2 颗粒群的粒度分布与平均当量直径	76
3.2 气固两相流的数学模型	78
3.2.1 两相流基本数理模型	78
3.2.2 双流体模型通用控制方程组	80
3.2.3 气固两相层流运动控制方程组	81
3.2.4 气固两相湍流运动控制方程组	85
3.3 风沙运动的气固两相分层流动模型	95
3.4 结语	101
参考文献	102
第 4 章 大涡模拟数学模型及方程组	105
4.1 大涡模拟方法在大气边界层的应用	105
4.2 Navier-Stokes(N-S)方程组	106
4.3 大涡模拟的数学模型	107
4.3.1 大涡模拟的湍流理论基础	107
4.3.2 大涡模拟的基本方法	109
4.3.3 大涡模拟控制方程组及封闭	112
4.3.4 常见亚格子模式	114
4.3.5 大涡模拟的极限性质	118
4.3.6 常见亚格子模式的比较	120
4.4 亚格子脉动有效特征尺度及其改进亚格子模式	123
4.4.1 亚格子脉动特征尺度	123
4.4.2 亚格子脉动有效特征尺度	124
4.4.3 改进 Sagaut 混合尺度模式	126
4.4.4 算例	128
4.5 分区并行计算	137
4.5.1 并行平台	137
4.5.2 分区并行算法的实现和内边界处理	139
4.6 结语	145
参考文献	145
第 5 章 近地层大气湍流的大涡模拟	150
5.1 近地层大气湍流研究概述	150

5.2	近地层中性层结的数值模拟	153
5.2.1	中性近地层湍流的经典理论	153
5.2.2	中性近地层湍流的大涡模拟	155
5.3	植被层参数化模式	166
5.3.1	Belcher 下垫面粗糙单元阻力源项模式	167
5.3.2	Shaw 植被层源项模式	169
5.3.3	Massman 植被层模式	173
5.3.4	Ayotte 植被层模式	174
5.3.5	几种植被层模式的比较	174
5.4	均匀植被层湍流的模拟	175
5.4.1	植被湍流模拟数学模型	175
5.4.2	平均风速廓线	178
5.4.3	亚格子脉动的特征尺度修正系数	181
5.4.4	植被层的湍流统计量	183
5.4.5	均匀植被层的零位移厚度	193
5.5	条带状均匀植被层湍流的模拟	195
5.5.1	条带状均匀植被层的结构及参数	195
5.5.2	计算区域、初始条件和边界条件	196
5.5.3	平均流向风速	197
5.5.4	风速等值线	199
5.5.5	条带状均匀植被层的湍流统计量	202
5.5.6	零位移厚度	207
5.6	结语	208
	参考文献	208
第 6 章	尘卷风的物理机制及流场模拟	213
6.1	尘卷风形成的物理机制	213
6.2	尘卷风演化的数学模型及模拟	217
6.2.1	引言	217
6.2.2	CBL 尺度的大涡模拟	221
6.2.3	尘卷风尺度的大涡模拟	225
6.3	尘卷风尺度的准静态模型及模拟	236
6.3.1	尘卷风模拟的准静态模型	236
6.3.2	不同地面处理方法的尘卷风流场	239
6.3.3	不同环境参数下的尘卷风流场	243
6.4	结语	270

参考文献	270
第7章 尘卷风扬尘颗粒轨道模型及模拟	273
7.1 颗粒相稀相的单颗粒轨道模型	273
7.2 颗粒碰撞与离散单元法 (DEM)	274
7.2.1 颗粒间接触力模型	274
7.2.2 DEM 运动方程及算法	279
7.2.3 搜索算法及其改进	280
7.3 CFD-DEM 控制方程及求解	286
7.4 粗糙颗粒及离散单元模型的修正	289
7.5 颗粒传热离散单元法 (TDEM)	294
7.6 尘卷风扬尘的模拟	297
7.7 结语	304
参考文献	304
第8章 风沙运动静电场起电机制及模拟	307
8.1 颗粒动力学静电起电机制	307
8.2 沙粒带电的动力学模型	308
8.3 分散性沙粒系统的带电过程模拟	310
8.3.1 数值模拟	310
8.3.2 相对湿度与静电场变化	316
8.4 风沙运动静电场模拟	317
8.5 结语	318
参考文献	319
第9章 沙尘天气的中尺度模拟基础	321
9.1 沙尘天气中尺度模拟概述	321
9.2 中尺度模拟的起沙模式与参数化	323
9.3 沙尘天气中尺度模拟的问题与改进	325
9.3.1 沙尘天气中尺度模式	325
9.3.2 沙尘天气的扬尘机制	326
9.4 沙尘天气中尺度模拟展望	328
参考文献	329

第1章 绪 论

1.1 风扬粉尘的形式及分类

风扬粉尘(eolian dust)是指可以被风吹起而悬浮在空中的固体颗粒,或者这种颗粒的沉积物^[1]。在地球上,风扬粉尘是一种重要的环境污染物,威胁着人类的生活和健康,而造成风扬粉尘的原因除了自然因素外还有人为的因素。

地表严重风蚀(eolian abrasion)和荒漠化(desertification)加剧了粉尘的活动,特别是尘暴(dust storm)、强沙尘暴(sand-dust storm)事件在世界各地不断发生,严重降低这些地区的大气质量,造成很大的经济损失,而且对其他地区的环境质量也有重要影响。

粉尘活动或风沙运动,与大陆干旱度、地表状况及局部大气运动有密切关系。能够启动和搬运地表粉尘的强风发生在许多不同的气象条件下,并且具有各种尺度。西北干旱、半干旱地区的粉尘活动形式主要有尘卷风(dust devil)、扬尘、扬沙,乃至尘暴和强沙尘暴,同时伴随强烈的静电场,对大型能源工程、输变电设施等的安全有重要影响。

1.1.1 沙尘天气

大范围的风扬粉尘称为沙尘天气。每年的春季或秋季,锋面低压过境可能是大范围扬尘和扬沙的主要原因,粉尘经常被冷锋前或后的大风扬起,其中高空急流在粉尘搬运中起着重要的作用。

从气象学角度,沙尘天气概括了不同浓度的粉尘活动过程,包括浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。大气中的粉尘浓度影响到水平能见度。因此,常用水平能见度区别不同的沙尘天气。

(1) 浮尘天气。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。

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

(3) 沙尘暴天气。强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。

(4) 强沙尘暴天气。大风将地面尘沙吹起,使空气很混浊,水平能见度小于500m的天气现象。

通常根据天气预报区域的观测结果,确定沙尘天气过程的形式,进行沙尘天气的预报、警报。

(1) 在同一次天气过程中,我国天气预报区域内5个或5个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了浮尘天气,称为浮尘天气过程。

(2) 在同一次天气过程中,我国天气预报区域内5个或5个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了扬沙天气,称为扬沙天气过程。

(3) 在同一次天气过程中,我国天气预报区域内3个或3个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了沙尘暴天气,称为沙尘暴天气过程。

(4) 在同一次天气过程中,我国天气预报区域内3个或3个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了强沙尘暴天气,称为强沙尘暴天气过程。

有关国家标准规定:①预计未来24h内将有沙尘天气过程发生,且影响范围较大或影响到京津地区时,向社会公众发布沙尘暴警报;②预计未来24h内将有沙尘暴或强沙尘暴天气过程发生,并将造成严重影响时,向社会公众发布沙尘暴警报。

对于西北干旱、半干旱地区,每年的春季为尘暴事件多发期,大范围扬沙、沙尘暴天气等大气边界层内的粉尘活动被大家所重视^[2~4]。沙尘暴,特别是强沙尘暴,是一种带有巨大破坏力的自然现象,在其过境前后,气象要素变化十分剧烈^[5]。例如,1977年4月22日发生在甘肃河西走廊的黑风暴天气过程中,张掖站黑风暴过后10min内,气压猛升2.8hPa,气温下降6.8K,风向由偏东转为西北偏西,平均风速猛增到20m/s以上,瞬时最大风速超过30m/s。又如,在1993年5月5日的黑风暴天气过程中,甘肃金昌市10min内气压涌升3.1hPa,永昌3min内气压涌升2hPa,并且气压曲线都出现涌升后又降低的“气压鼻”现象。

1.1.2 尘卷风

西北干旱、半干旱地区在非尘暴事件多发期,如夏季,大气边界层内粉尘活动也很频繁^[6,7]。较强的太阳热辐射被地面吸收继而传递给底层空气,造成接近地面的空气温度急剧上升。热空气的密度相对较低,在浮力的作用下迅速上升而形成对流。在一定的条件下,一种以垂直涡形式存在的特殊对流经常发生在大气对流边界层内——尘卷风,如图1.1所示。它对地表微小粉尘的垂直迁移起着关键性的作用^[8~10]。

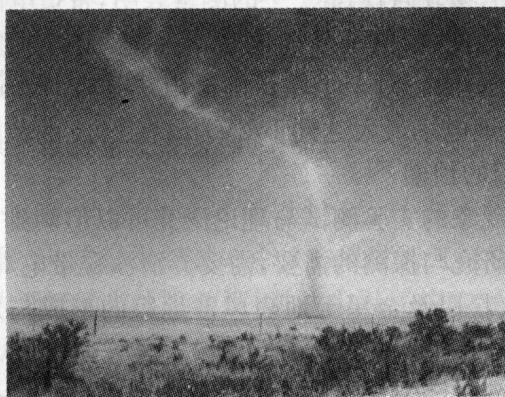


图 1.1 尘卷风

根据观测,尘卷风的气象要素特征是温升 $4\sim 8\text{K}$,压降 $2.5\sim 4.5\text{hPa}$,最大切向速度和垂直上升速度大约分别为 15m/s 。Sinclair^[11]观测美国 Arizona 地区的尘卷风直径一般为数十米,尘柱高度小于 600m ,而据 Hess 和 Spillane 等^[12]在澳大利亚的观测,尘卷风的直径在 $32\sim 141\text{m}$,尘柱高度在 $300\sim 660\text{m}$ 。

同样,尘卷风搬运风沙的潜力是巨大的,一些较大较强烈的尘卷风高达几千米,能把大量的粉尘卷起而后被平流风带到很远的地方。根据 Metzger^[13]的估计,一个较大的尘卷风能够把大约 2000kg 的粉尘带到空中。Hall^[14]在 1.5m 和 300m 高度上,对升离地面的气携粉尘的测量结果表明,亚利桑那州图森附近沙漠地区的尘卷风在炎热的夏日可升扬粉尘 $250\text{kg}/\text{km}^2$;尘卷风作用于裸露的泥灰路面可使多达 $250\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的粉尘被带入 Arizona 地区 1km 厚的大气底层,比车辆交通的贡献要大一个数量级。

虽然尘卷风只是小尺度的局地现象,但是在某些地区频繁发生暗示着它们在环境的演化过程中可能具有重要的作用^[15](尽管这种看法还没有得到观测证实^[16])。

1.2 粉尘活动的沙粒荷电及静电场

由于粉尘颗粒间的不对称摩擦起电,粉尘剧烈活动将产生电场。Gill^[17]观测到,沙尘暴过境地带有强电场和电火花现象出现,同时对无线电信号产生干扰。在我国沙尘暴的频发地区,通信线路曾经为裸线,在强沙尘暴发生时,往往会产生很高的静电电压,如在甘肃民勤观测站,就曾在通信线路上观测到由沙尘暴产生的附加电压高达 2700V ^[18]。初步估计,电场力与沙粒的重力在一个数量级^[19]。因此,静电场产生以及对固体颗粒在空气流场中运动的影响不可忽视。

对于尘卷风的静电场方向, Freier^[20]的测量表明, 带负电的沙粒一般位于风沙流层的上部, 而带正电的沙粒位于贴近地表, 它们形成的电场与晴天电场方向相反, 强度远大于晴天电场法。对于尘卷风的静电场强度, Farrell 等^[21]估计一个强尘卷风中心 10m 内近地电场最大达到 10kV/m; 在 50m 的范围内电场强度也达到 4kV/m, 远远高于人们的预期^[10]。

尘卷风风沙带电现象的实验测试与理论研究可以追溯到 20 世纪 50 年代。由于对宇宙和其他星球研究与探测的需要, 需要弄清沙粒带电对风沙运动的影响, 也需要合理解释地球、火星以及金星等地表风沙地貌的形成与发展过程^[22~24], 特别是火星尘卷风的强度与范围比地球尘卷风要大得多。

20 世纪 90 年代以来, Schmidt 等^[25]通过试验表明, 在 12m/s 风速流沙地面上测量到地面最大电场达到 166kV/m(1.7cm 高度), 荷质比为 $60\mu\text{C}/\text{kg}$; 吹沙过程或沙尘暴中的粒子都带有某种特性的电荷, 而且细沙粒的荷质比远大于粗沙粒。

近年来, 我国开始了粉尘活动过程静电问题的研究, 研究内容主要涉及风沙电与风沙电场的实验、风沙电对电磁波传播的影响^[26]以及风沙电对风沙跃移运动的影响等^[27, 28], 尤以兰州大学郑晓静教授课题组的工作最为突出。利用风洞实验, 郑晓静等^[29, 30]对风沙流中沙粒带电的荷质比、风沙电场强度以及输沙率和风速廓线等宏观物理量进行了测量。结果发现, 对于“均匀沙”, 当运动沙粒的直径小于 $250\mu\text{m}$ 时, 沙粒带负电荷; 而当粒径大于 $500\mu\text{m}$ 时, 带正电荷; 沙粒的荷质比随沙粒粒径和风速的增大而减小, 随高度的上升而增加; 风沙流中的电场主要是由运动的带电沙粒形成的, 其电场强度方向垂直地面向上, 与晴天大气电场的方向相反; 在相同风速下, 由小粒径沙粒形成的风沙流, 其电场强度要大于大粒径沙粒情形的电场强度; 在相同粒径范围内, 电场强度随轴线来流风速和高度的增大而上升; 混合沙的风沙电场要比“均匀沙”的电场大得多, 在 20m/s 的风速情形, 前者的最大值要比后者高出 20 倍以上。在实验测量的基础上, Zheng(郑晓静)等^[31]基于风沙流统计耦合模式, 对风沙电场、风沙流自平衡发展过程中的起沙率和输沙率等进行了理论预测, 得到沙粒不同运动形式的风沙电场分布随高度、沙粒荷质比、风速等因素的宏观规律。

1.3 风扬粉尘研究概述

目前, 沙漠化已成为全世界的重大环境问题之一, 引起国际社会的广泛关注。自 1977 年联合国沙漠化大会之后, 沙漠化作为科学问题引起了全球范围内科学界的重视。沙漠化通过风沙运动, 以各种风沙地貌为主要景观标志, 以各种风扬粉尘形式形成粉尘的垂直输送, 甚至远距离输送, 影响大气环境质量。

由于粉尘活动的复杂性以及研究目的不同, 许多学者从不同的角度对粉尘活