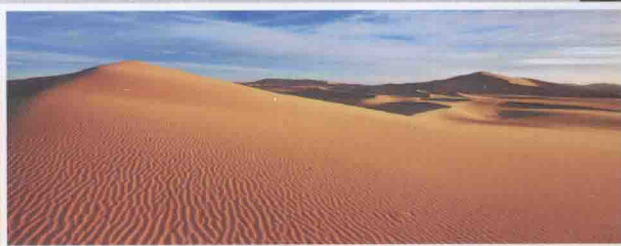


梅凡民 著



中国北方典型区域风蚀粉尘释放的 实验观测和数值模拟研究

西北工业大学出版社

中国北方典型区域风蚀粉尘释放的 实验观测和数值模拟研究

梅凡民 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书通过野外和室内风洞实验研究了地表微团粒的粒度分布特征、空气动力学粗糙度变化趋势,建立了摩擦风速与跃移通量和粉尘释放通量的定量关系,验证了 DPM 粉尘释放模型可靠性,建立了北方粉尘源区表土微团粒的粒度分布、空气动力学粗糙度和网格点有效粗糙度的参数化方案,模拟了中国北方典型区域粉尘释放通量的时空变化趋势,为进一步确定中国北方粉尘释放源区、沙尘暴预报和风沙灾害防治提供了依据。

本书可供环境科学、自然地理学、第四纪地质学和大气科学等相关领域的研究人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国北方典型区域风蚀粉尘释放的实验观测和数值模拟研究/梅凡民著. —西安:西北工业大学出版社,2013.7

ISBN 978-7-5612-3722-9

I. ①中… II. ①梅… III. ①风蚀—粉尘—释放—实验模拟②风蚀—粉尘—释放—数值模拟 IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 164822 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:<http://www.nwpu.com>

印刷者:兴平市博闻印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12.25

字数:295 千字

版次:2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

前 言

中国北方干旱与半干旱地区的风蚀粉尘释放不仅影响了区域的环境质量和生态安全,而且由于粉尘气溶胶具有的物理和化学性质,中国北方粉尘释放、输送和沉降过程还影响全球气候系统以及海洋生态系统,其影响还具有全球性环境效应。为了全面地理解风蚀粉尘释放、输送和沉降过程所产生的环境效应,准确、定量地估计粉尘释放的强度是一项重要的基础性工作。

由于风蚀粉尘的释放涉及了十分复杂的物理过程和机制,有关粉尘释放的实验观测和数值模拟工作还存在诸多的不确定性。本书在前人研究工作的基础上,以中国巴丹吉林沙漠戈壁区和内蒙古阴山以北的沙漠化农田和草原区等典型区域为代表,通过建立粉尘释放模拟的地表参数化方案和空气动力学参数化方案,特别是通过建立沙漠化区域的地表参数和空气动力学参数化方案来改进中国北方风蚀粉尘的模拟研究;利用野外实验观测研究等手段,建立了表土微团粒的粒度分布、空气动力学粗糙度和摩阻风速等参数与跃移通量和粉尘释放通量的定量关系,验证了 DPM 粉尘释放模型的可靠性;借助于室内风洞模拟实验,研究了粗糙床面的边界层特征和空气动力学粗糙度对跃移启动和粉尘释放的影响,发展了空气动力学粗糙度的模式和精度。这些研究对进一步理解粉尘释放的物理机制、改进沙尘暴预报、风沙灾害的防治以及粉尘气溶胶的环境效应的评估有参考价值。

本书共分 9 章,主要内容包括中国北方风蚀区表土微团粒的粒度分布特征及其对粉尘释放的影响;空气动力学粗糙度对风沙输运和粉尘释放的影响;粉尘释放模型的比较与分析;中国北方风蚀区不同地表覆盖类型风蚀强度的数值模拟;中国北方典型粉尘源区不同地表覆盖类型下表土的起动摩阻风速;中国北方典型粉尘源区摩阻风速的变化与分布;中国北方典型粉尘源区释放强度的数值模拟;研究结论与展望。

在成书的过程中,笔者得到了导师中国气象科学研究院张小曳教授、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的王涛教授的悉心指导和帮助,得到了中国科学院地球环境研究所和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的老师和学友的帮助,得到了西安工程大学环境与化学工程学院的领导和同事的鼓励和帮助,在此致谢。

本书得到国家自然科学基金面上项目(40975094)和国家重点基础研究规划项目(2006CB403701)资助,在此一并致谢。

本书涉及的很多研究工作还处于探索阶段,加之笔者认识能力有限,错误疏漏在所难免,错误和不当之处敬请读者批评指正。

西安工程大学环境科学与工程系

梅凡民于西安

2013 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 风蚀粉尘释放实验观测与数值模拟研究的进展	1
1.2 研究目的和内容	3
参考文献	4
第 2 章 中国北方风蚀区表土微团粒的粒度分布特征及其对粉尘释放的影响	8
2.1 引言	8
2.2 研究方法	10
2.3 结果分析	19
2.4 讨论和结论	28
参考文献	29
第 3 章 空气动力学粗糙度对风沙输运和粉尘释放的影响	31
3.1 引言	31
3.2 研究方法	33
3.3 结果与分析	39
3.4 结论	84
参考文献	86
第 4 章 粉尘释放模型的比较与分析	90
4.1 引言	90
4.2 粉尘释放模型的比较分析	92
4.3 Marticorena 和 Alfaro 应力分解模型的比较分析	97
4.4 结论	101
参考文献	102
第 5 章 中国北方风蚀区不同地表覆盖类型风蚀强度的数值模拟	105
5.1 引言	105
5.2 研究方法	105
5.3 结果与分析	109
5.4 结论和讨论	110

参考文献	110
第 6 章 中国北方典型粉尘源区不同地表覆盖类型下表土的起动摩阻风速	112
6.1 引言	112
6.2 研究区域概况	112
6.3 研究方法	115
6.4 结果与分析	116
6.5 讨论	124
6.6 结论	125
参考文献	125
第 7 章 中国北方典型粉尘源区摩阻风速的变化与分布	126
7.1 引言	126
7.2 研究方法	126
7.2 结果和分析	127
7.3 结论	138
参考文献	139
第 8 章 中国北方典型粉尘源区释放强度的数值模拟	140
8.1 引言	140
8.2 研究方法	140
8.3 结果和分析	141
8.4 讨论	157
8.5 结论	159
参考文献	160
第 9 章 研究结论与展望	163
9.1 研究结论	163
9.2 有关问题的讨论	166
9.3 研究展望	167
参考文献	183
后记	188

第1章 绪 论

1.1 风蚀粉尘释放实验观测与数值模拟研究的进展

1.1.1 风蚀粉尘的环境效应

由于地表风蚀而注入大气的粉尘粒子是全球,特别是北半球大气气溶胶的主要组分之一^[1-2]。这些悬浮的粉尘颗粒在大气物理和大气化学过程以及全球气候和生态系统中扮演着重要的角色。通过对太阳辐射的吸收和散射以及对地面、大气中红外辐射的吸收而改变地-气辐射平衡^[3-4],它会引起全球和区域气候系统的调整 and 变化;通过可以改变大气的酸碱度^[4],它对对流层光化学反应过程、硫酸盐和硝酸盐的输送、沉降以及臭氧的浓度和分布有着重要的影响^[5-6]。土壤风蚀与粉尘释放过程对区域和全球生态系统的生产率也有着重要的影响,长距离输入海洋的粉尘影响了海洋的生物地球化学过程和海洋生物率等^[7-8]。这一系列连锁反应可能改变海陆热力差异,引起全球或区域气候系统的变化^[9]。

干旱与半干旱地区土壤风蚀和粉尘释放不仅对全球和区域的气候、生态系统产生了重要的影响,而且诱发严重的自然灾害。沙漠化、土地退化和沙尘暴等影响了国民经济发展、生产建设以及生活环境质量,甚至威胁到人类的生存。

为了定量评价粉尘气溶胶的气候和生态效应,控制土壤风蚀和沙尘暴的发生,准确获得土壤风蚀和粉尘释放强度是十分必要的。

根据肯尼思·派伊的评述^[10],粉尘的科学研究大约有 200 多年的历史。20 世纪 30 年代美国中、西部严重的土壤风蚀和苏联 20 世纪 50~60 年代干草原的黑风暴促使了美、苏两国科学家对土壤风蚀开始系统地进行研究,这些研究主要侧重于风沙流和输沙过程,同时也涉及了粉尘的观测、采样收集、化学成分和矿物成分等方面的研究工作。20 世纪 50 年代以来,随着对深海陆源碎屑沉积物的研究工作的开展,科学家开始更多地关注于粉尘的粒度、化学和矿物学特征和粉尘的远距离输送问题。近年来,随着人们对粉尘输送沉降的气候效应和环境效应的关注,也直接带动了粉尘气溶胶研究的发展。20 世纪 80 年代以来,各国研究人员先后在太平洋、大西洋、印度洋以及亚洲、欧洲、非洲、北美洲开始对气溶胶做大量而全面的观察和采样工作,为研究大气粉尘成分、颗粒分布以及粉尘、释放、传输、沉降的过程机制、粉尘活动的时空规律积累了大量的数据,得到了许多重要认识^[1-9]。

目前,大气粉尘的研究工作主要集中在以下几个方面:①大气粉尘作为重要的驱动因子^[1-9],它的气候与环境效应的研究已成为目前气溶胶研究的热点之一。例如,粉尘的辐射强度、粉尘对过去和现今气候变化的作用、注入海洋的大气粉尘产生的生物地球化学效应等。②与粉尘的气候效应研究相联系,全球粉尘释放、输送和沉降的模拟工作为定量地了解粉尘源区的排放通量及排放清单、粉尘的粒度分布、输送路线、沉降通量以及粉尘事件的时空变化等方面信息提供了依据。③粉尘的观测和遥感监测研究。由于目前对粉尘气溶胶的了解是极其

有限的,通过野外观测和遥感监测,对了解大气粉尘的矿物成分、元素组配、粒度分布、粉尘来源和粉尘模拟模型验证有着重要的意义,而遥感监测更是研究粉尘事件时空变化的有效手段。目前,这方面的工作正处于不断地完善之中,全球粉尘的监测网也正逐步建成。④沙尘暴的气象学和气候背景研究。

1.1.2 风蚀粉尘释放的实验与模拟的研究进展

粉尘释放的野外观测研究为粉尘释放模拟研究提供了实测数据的支持,它对模型检验、完善和发展有着重要的意义。目前,粉尘释放通量的观测方法主要采用的是浓度梯度法和湍流通量法^[14],它需要同步观测记录在至少两个高度以上的风速梯度、温度梯度和粉尘浓度梯度等数据。由于野外观测的周期较长,且需要自动气象观测站、粉尘采样仪和积沙仪等设备,因而限制了野外观测研究的进行。目前粉尘释放过程进行定量观测的实验研究工作主要是由巴黎大学研究小组完成的^[15-16],他们分别研究了尼日尔和西班牙的沙质土和壤质土上粉尘释放过程中摩阻风速、空气动力学粗糙度和土壤微团粒的粒度分布等参数与跃移通量和粉尘释放通量的定量关系,并对研究小组提出的 DPM(Dust Production Model, DPM)粉尘释放模型进行了初步的验证。

多年来,中国学者对毛乌素沙地和中国其他的干旱与半干旱地区表土风蚀过程的野外观测实验^[17-20],这些风蚀实验主要研究了在不同沙丘类型或不同植被覆盖度条件下跃移通量与风速的统计关系,但缺乏对跃移通量与摩阻风速、空气动力学粗糙度以及实验点的表土微团粒的粒度分布的研究,因此这些实验研究对定量地理解粉尘释放的物理机制、验证相关的粉尘释放模型是不够的。中、日合作的亚洲沙尘项目(ADEC)的敦煌实验对戈壁地区粉尘释放做了较为系统的观测研究^[21-23],就粉尘释放的野外观测实验来说,此前国内几乎为空白。但应该注意的是,敦煌实验在粉尘释放通量观测中用近地面的粉尘浓度代替粉尘释放通量,这会给实际结果带来一定的误差。

就粉尘释放数值模拟而言,在一些野外的风蚀起尘观测、室内风洞的实验研究和风沙物理学研究理论的支持下,提出了很多半经验的模型。这些模型从简单到复杂,一步步发展起来,包括 Gillette 模型^[24]、美国国家环境保护局的粉尘释放模型^[25-26]、邵亚平的粉尘释放模型^[13]和 DPM 粉尘释放模型等^[12,27]。由于研究者对粉尘释放物理机制的理解有所差异以及模拟粉尘释放过程的侧重点不同,因而这些模型结构、适用范围以及可靠性可能存在着较大的差异。相比较而言,DPM 粉尘释放模型比较详细地刻画了粉尘释放的物理过程和机制,且经过初步验证,是比较可靠的模型。

20 世纪 90 年代以来,张小曳通过对中国九大沙漠、青藏高原和黄土高原的大气粉尘做了系统的野外观测工作^[28-36]。依据 1994 年在中国九大沙漠对近地层气溶胶化学特性的分析^[29-30],采用元素示踪法比较了粉尘气溶胶的示踪特征,发现以塔克拉玛干沙漠为中心的“中国西部高粉尘沙漠区”和以巴丹吉林沙漠为主体的“中国北部高粉尘沙漠区”是亚洲沙尘暴的两个主要源区。随后有关粉尘大气和沉降通量的研究工作确认了上述两个主要源区的分布^[31-33],类似的源区位置被后来利用美国国家环境保护局粉尘排放源清单计算的结果所证实^[37-38],也被有关沙尘暴发生次数和频率以及空间变化的研究所证实^[39-40]。

在上述工作的基础上,张小曳利用大气化学模型计算了亚洲粉尘的释放量和沉积通量^[31],提出了亚洲粉尘年平均注入大气粉尘约为 $8 \times 10^8 \text{ t}$,其中有 $4 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8 \text{ t}$ 沉降到北

太平洋, 2.4×10^8 t 沉降在中国沙漠, 7.3×10^7 t 沉降在黄土高原, 6.8×10^7 t 沉降在中国的历史沉降区, 其总释放量对全球粉尘释放量有重要贡献。从黄土-第四纪地质研究角度, 张小曳从粉尘的粒度、元素组配、沉积通量、大气载荷等方面发现第四纪冰期-间冰期旋回的气候变化以及所代表的大气环流调整。随着中国北方粉尘的监测网的逐步建立和实际观测的加强, 为研究中国北方粉尘元素组配、粒度分布和大气载荷等信息积累了大量数据。

宣捷等利用美国国家环境保护局空旷地表的起尘模型^[37-38], 根据中国土壤质地的资料、风速资料及蒸发降水资料计算了北方风蚀区的粉尘释放量, 发现粉尘释放主要在新疆、内蒙古的沙漠和戈壁地区, 与前人研究的粉尘源区位置的分布基本一致。

最近龚山陵和张小曳利用 NARCM(Northern Aerosol Regional Climate Model)模拟了2001年春季亚洲粉尘释放、输送和沉降过程, 捕捉到了主要的沙尘暴事件^[41]; 利用 DPM 粉尘释放模型模拟了小于 $40 \mu\text{m}$ 亚洲粉尘释放通量, 提出亚洲粉尘的主要源区为塔克拉玛干沙漠、内蒙古北部和西部沙漠、浑善达克和科尔沁沙地以及蒙古戈壁沙漠等(从2001年的3月1日到5月31日, 上述源区粉尘释放总量约有 2.528×10^8 t)。张小曳、龚山陵等通过对过去43年亚洲粉尘释放通量的模拟研究, 发现亚洲沙尘暴的10个主要源区的分布, 其中非中国源区对沙尘暴的贡献约为30%。内蒙古源区、以塔克拉玛干沙漠为中心的中国西部沙漠源区和以巴丹吉林沙漠为中心的中国北部沙漠高粉尘源区贡献了亚洲粉尘释放总量的70%左右, 它们可被视为亚洲沙尘暴的3个贡献量最大的源区。

1.2 研究目的和内容

宣捷的研究中存在的问题^[37-38]: 就使用的模型来看, 本身存在缺陷, 如模型在描述粉尘释放机制上存在不足; 就输入参数来看, 也存在一些问题, 如中国没有实测的土壤可蚀性指数的数据; 对植被覆盖、砾石覆盖等条件下的空气动力学粗糙度参数的研究不足, 整个北方地区仅取两个数值反映表土的空气动力学粗糙度, 显然难以反映不同植被覆盖和砾石覆盖条件下的空气动力学粗糙度参数, 表土的起动风速取 $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这对裸露的流沙可能是合适的, 但对其他的地表覆盖类型是不合适的。

龚山陵和张小曳的研究工作虽然考虑了沙漠(沙地)、戈壁、农田等的粉尘释放通量^[41], 但所使用的土壤质地分类沿用的是中国科学院南京土壤研究所发表的土壤分类系统, 仍有细化的必要; 且没有详细对比中国北方地区的戈壁、农田和草原的粉尘释放通量, 这方面的工作有待完善。

针对前人在实验观测和数值模拟中存在的局限性, 笔者试图从以下几个方面开展研究, 以进一步理解中国北方粉尘释放机制、粉尘释放强度与地表参数的定量关系等, 并提供理论依据。

1.2.1 中国北方粉尘源区表土微团粒的粒度分布特征及其参数化

表土微团粒的粒度分布是影响粉尘释放通量的重要参数。前人曾对撒哈拉沙漠的表土微团粒的粒度分布特征作过研究^[42], 但他们的研究主要侧重于沙质土的表土微团粒的粒度分布, 没有提及砾质沙土和壤质土的微团粒的粒度分布特征。就中国北方粉尘释放源区而言, 目前还没有现成的表土微团粒的粒度分布数据可直接用于粉尘释放通量的模拟, 而撒哈拉沙漠

的数据也不宜直接套用。鉴于此,研究中国北方粉尘源区表土微团粒的粒度分布特征是十分必要的,特别是中国北方沙漠的边缘地区分布着大面积戈壁、阴山北麓还存在面积较大的沙质化和砾质化的草原和农垦区,因此获得这些地区表土微团粒的粒度分布特征及参数对准确模拟戈壁、干草原农垦区和草原牧区的粉尘释放通量有着重要的作用。本书试图通过对中国北方代表性地貌和土壤类型微团粒的粒度分布特征进行研究,建立符合中国北方实际的表土微团粒的粒度分布参数化方案,并在此基础上模拟表土微团粒的粒度分布特征对粉尘释放的影响。

1.2.2 实验研究空气动力学粗糙度对风沙输运和粉尘释放的影响

通过对毛乌素沙地地表微团粒的粒度分布特征、空气动力学粗糙度、摩阻风速、跃移通量和粉尘释放通量的野外观测,理解平坦沙地空气动力学粗糙度、摩阻风速的时间变化趋势,建立摩阻风速与跃移通量和粉尘释放通量的定量关系,以验证粉尘释放模型的可靠性。通过风洞实验,系统研究粗糙元几何参数对空气动力学粗糙度的影响,建立空气动力学粗糙度的经验模型,分析粗糙副层和惯性副层空气动力学粗糙度差异,揭示粗糙副层空气动力学粗糙度与跃移起动的关系,为完善粗糙床面的粉尘释放的数值模拟研究提供依据。

1.2.3 中国北方粉尘释放典型源区粉尘释放通量的模拟

分别以巴丹吉林沙漠戈壁地区、阴山北麓干草原农垦区和草原牧区为研究区域,通过野外方法实测确定表土微团粒的粒度分布参数。根据野外调查确定表土的覆盖砾石的高度和覆盖率、土壤团块的分布和覆盖状况,根据研究区域植被分布类型图和地貌图以及相关的植被生态资料确定研究区域内植被的高度、覆盖率及对应的空气动力学粗糙度,同时考虑过度放牧过程对植被高度、覆盖率等因素^[43-44]的影响,模拟不同地表覆盖类型下表土的起动摩阻风速和跃移通量,以确定不同地表覆盖类型的风蚀强度。

根据 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格点有效空气动力学粗糙度和1993—2003年的NECP(National Centre for Environment Prediction, NECP)的风速资料,研究区域内摩阻风速的时空变化趋势,以确定不同区域风的可蚀性以及驱动风蚀过程的湍流动量,为模拟研究区域内不同网格点粉尘释放通量时空变化趋势提供参数。

根据实测的代表性表土微团粒的粒度分布数据,提出不同地貌类型下表土微团粒的粒度分布的参数化方案;根据 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格点地貌类型、表土类型和植被覆盖类型等信息提出网格点内不同地表类型的空气动力学粗糙度的参数化方案;根据 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格点的摩阻风速数据,模拟研究区域内不同网格点粉尘释放通量的时空变化趋势。

粉尘释放的观测与模拟研究对准确的评估粉尘气溶胶的气候效应、生物地球化学效应、沙尘暴天气的预报以及风沙灾害的防治有积极的理论和实践意义。

参 考 文 献

- [1] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol [J]. Geophys Res., 1996, 101(D14): 19237-19244.

- [2] Andreae M O. Climate effects of changing atmospheric aerosol levels [M]// Henderson-sellers A. Future Climate of the World. Amsterdam:Elsevier, 1995.
- [3] Overpeck J D, Lacis R A, Healy R. Possible role of dust-induced regional warming in abrupt climate change during the last glacial period [J]. *Nature*, 1996, 384:447 - 449.
- [4] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, et al. Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106:18015 - 18027.
- [5] Dentener F J, Carmichael G R, Zhang Y, et al. Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere [J]. *J. Geophys Res.*, 1996, 101:22869 - 22889.
- [6] Harrison S P, Kohfeld K E, Roelandt C, et al. The role of dust in climate changes today, the last glacial maximum and in the future [J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54:43 - 80.
- [7] Duce R A, Tindale N W. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36:1715 - 1726.
- [8] Martin J M R, Gordon M. Northeast Pacific iron distributions in relation to phytoplankton productivity [J]. *Deep-sea Res.*, 1988, 35:177 - 196.
- [9] Zhang X Y, Lu H Y, Arimoto R, et al. Atmospheric dust loadings and their relationship to rapid oscillations of the Asian winter monsoon climate: two 250-kyr loess records [J]. *EPSL*, 2002, 202:637 - 643.
- [10] 肯尼思·派伊. 风蚀粉尘及粉尘沉积物[M]. 台益和, 张选阳, 译. 北京:海洋出版社, 1991.
- [11] Joussaume S. Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model [J]. *J. Geophys Res.*, 1990, 95 (D2): 1909 - 1941.
- [12] Marticorena B, Bergametti G, Amount B, et al. Modeling the atmospheric dust cycle: 2. Simulation of Saharan dust source [J]. *J. Geophys Res.*, 1997, 102 (D4): 4387 - 4404.
- [13] Shao Y. A model for mineral dust emission [J]. *J. Geophys Res.*, 2001, 106 (D17): 20239 - 20254.
- [14] Gillette D A. Fine particulate emissions due to wind erosion [J]. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 1977, 20:890 - 987.
- [15] Gomes L, Arrúe J L, López M V, et al. Wind erosion in semi-arid agricultural area of Spain: the WELSONS project [J]. *Catena*, 2003, 52 (3 - 4): 235 - 256.
- [16] Gomes L, Rajot J L, Alfaro S C, et al. Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agriculture areas of Spain and Niger [J]. *Catena*, 2003, 52 (3 - 4): 257 - 271.
- [17] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 北京:科学出版社, 1980.
- [18] 赵景峰, 李崇舜, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中一井地区起沙风分析和输沙量的估算[J]. *干旱区地理*, 1995, 18(3): 39 - 46.

- [19] 黄富祥,牛海山,王明星,等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报,2001,56(6):700-711.
- [20] 韩致文,董治宝,王涛,等. 塔克拉玛干沙漠风沙运动若干特征观测研究[J]. 中国科学(D辑),2003,33(3):255-263.
- [21] 沈志宝,审彦波,杜明远,等. 沙尘暴期间戈壁沙地起沙率的观测结果[J]. 高原气象,2003,22(6):546-551.
- [22] 审彦波,沈志宝,杜明远,等. 敦煌春季沙尘天气过程中某些参量和影响因子的变化特征[J]. 高原气象,2003,22(4):378-383.
- [23] 王训明,陈广庭,韩致文,等. 塔里木沙漠公路沿线的起沙风和输沙强度[J]. 中国沙漠,1997,17(2):168-172.
- [24] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. J. Geophys. Res., 1988, 93(D11):14233-14242.
- [25] OAQPS (EPA). Guideline for development of control strategies in areas with fugitive dust problems [R]. 1977, EPA-405/2-77-029.
- [26] Cowherd C, Bohn J R, Cuscino T. Iron and steel plant open source fugitive emission evaluation [R]. EPA-600/2-79-103, 1979.
- [27] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distribution in source areas [J]. J. Geophys Res., 2001,106 (D16):18075-18084.
- [28] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S, et al. Late Quaternary records of the atmospheric input of eolian dust to the center of the Chinese loess plateau [J]. Quaternary Research, 1994, 41:35-43.
- [29] Zhang X Y, Shen Z B, Zhang G Y, et al. Remote mineral aerosol in westerlies and their contributions to the Chinese Loess [J]. Science in China (Serials D), 1996, 39(1):67-76.
- [30] Zhang X Y, Zhang G Y, Zhu G H, et al. Elemental tracers for Chinese source dust [J]. Science in China (Series D), 1996, 39(5):512-521.
- [31] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102:28041-28047.
- [32] Zhang X Y, Arimoto R, Zhu G H, et al. Concentration, size-distribution and deposition of mineral aerosol over Chinese desert regions [J]. Tellus, 1998, 50B: 4317-4331.
- [33] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Asian dust linked to global change [J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(1):169.
- [34] Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia:1. Network observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D9), 4261, doi: 10.1029/2002JD002632.

- [35] Zhang X Y, Gong S L, Arimoto R, et al. Characterization and temporal variation of Asian dust aerosol from a site in the northern Chinese deserts [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2003, 44:241 - 257.
- [36] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24), doi:10.1029/2003GL018206.
- [37] Xuan J, Liu G, Du K. Dust emission inventory in Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34:4565 - 4570.
- [38] Xuan J, Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36:4863 - 4876.
- [39] Sun J M, Zhang M, Liu T S. Spatial and temporal characteristics of dust storm in China and its surrounding regions, 1960 - 1999: Relations to source area and climate [J]. *Geophys Res.*, 2001, 106:10325 - 10333.
- [40] 周自江,章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954—2002)[J]. *科学通报*, 2003, 48(11):1224 - 1228.
- [41] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust and its transport and distribution during 2001 ACE - Asian; 2. Model simulation and validation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D9), doi:10.1029/2002JD002633.
- [42] Chatenet B, Marticorena B, Gomes L, et al. Assessing the microped size distributions of desert soils erodible by wind [J]. *Sedimentology*, 1996, 43, 901 - 911.
- [43] 王艳芬,汪诗平. 不同放牧率对内蒙古典型草原牧草地上现存量 and 净初级生产力及品质的影响[J]. *草业学报*, 1999, 8(1):15 - 20.
- [44] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 放牧胁迫下沙质草地植被的受损过程[J]. *生态学报*, 2003, 23(8):1505 - 1511.

第2章 中国北方风蚀区表土微团粒的粒度分布特征及其对粉尘释放的影响

2.1 引言

2.1.1 颗粒物粒度、粒度分析及粒度参数

在地球科学领域和工程领域常常涉及颗粒的大小即粒度问题,通常球体颗粒的粒度用直径表示,立方体颗粒的粒度用边长表示。地球环境系统中沉积物和环境介质中的悬浮物质以及工程系统的物料常常是不规则的,对这些不规则的矿物颗粒,可将与矿物颗粒有相同行为的某一球体直径作为该颗粒的等效直径。

实验室测定颗粒物粒度组成的方法有干筛筛析法、湿沉降法、显微镜法和粒度分析法等。干筛筛析法用于测定粒径大于 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以上复合颗粒或团聚体的粒度,因为该分析方法不破坏样品,如各种风成沉积物及表土的团粒结构,常用标准套筛来测定不同粒级微团粒的粒度分布。湿沉降法是利用斯托克原理,根据颗粒在水中的沉降速度来确定颗粒的粒度,主要用于测定粒径小于 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的物料粒度。由于经常在前处理过程中除去了样品中的胶结物质,如土壤中的有机质和碳酸盐,因而湿沉降法可认为测定的是单个颗粒的粒度。显微镜法通过逐个测定颗粒的投影面积来确定颗粒的粒度,光学显微镜的测定范围为 $150\sim 0.4\text{ }\mu\text{m}$,电子显微镜的测定下限粒度可达 $0.001\text{ }\mu\text{m}$ 或更小。

常用的粒度分析仪有激光粒度分析仪、超声粒度分析仪、消光法光学沉积仪及 X 射线沉积仪等。目前得到广泛应用的是激光粒度分析仪。激光粒度分析仪的基本原理是通过颗粒的衍射或散射光的空间分布(散射谱)来分析颗粒大小的。根据能谱稳定与否可将激光粒度分析仪分为静态光散射激光粒度仪和动态光散射激光粒度仪。静态光散射激光粒度仪主要适用于微米级颗粒的测试。

粒度参数指从累积曲线上求出来的能表示样品粒度分布特征的数值,如平均粒径和中值、标准偏差和分选系数、不对称系数等,这些数值是鉴别沉积环境的重要参数。

2.1.2 中国北方表土微团粒的粒度分布的研究现状及意义

沉积物粒度的研究主要是为了理解沉积物的形成环境,例如,沉积物是水成的还是风成的以及形成过程中环境动力的状况,如水流速度大小、风速大小以及与地貌特征的关系等。近年来,黄土沉积物的粒度特征研究试图去理解亚洲季风和第四纪环境的变化趋势。在土壤学研究中,土壤粒度分布特征是理解土壤形成过程、发生类型、物理性质、化学性质和生物学性质以及土壤肥力状况等的基本参数之一。对风沙科学而言,表土粒度分布特征研究对理解沙丘的形成、沙丘地貌的特征以及预测风蚀过程有着重要的意义。

自 20 世纪 60 年代以来,沙漠科学工作者先后对中国北方若干沙漠和沙地区域表土的粒

度分布特征进行了研究^[1-7],为理解沙丘的特征、成因和风蚀强度提供了依据。然而,这些研究很少涉及沙漠戈壁区域以及退化的农田和草原区表土微团粒的粒度分布特征的问题。在传统的土壤学研究中,粒度作为土壤基本参数加以研究,通常采用湿分析法获得单个颗粒的粒度分布特征,而很少考虑到土壤微团粒的分布特征。湿分析法中有时会涉及水稳定性团粒体的分布特征,以反映研究土样抵抗水蚀的能力。这些湿分析的水稳定性微团粒数据对研究风蚀过程是不合适的,因为风蚀过程是干分散的过程而非湿分散过程。

干筛筛析法能够最大限度地避免表土微团粒的破坏,其测定的表土微团粒的粒度数据能更好地反映原位表土风蚀时最初的微团粒的粒度分布特征。Chatenet 等对来自撒哈拉沙漠、美国加利福尼亚和西班牙的 26 个地表土壤样品做了干筛粒度和元素组配的测定,并用对数正态分布模型对粒度测定结果做了拟合,建立了不同土壤类型对应的微团粒的粒度分布参数,把干旱区表土能够表示为四个正态分布的群体以不同的比例组合,即由粉细沙群体(silt sands)、细沙群体(fine sands)、粗沙群体(coarse sands)和含盐群体(salt sands)等组合成八种沙漠土壤类型及其粒度分布参数,为模拟撒哈拉沙漠粉尘释放强度提供了基本的参数。但考虑到中国北方粉尘释放区域的地质、地貌和土壤类型的复杂多样,前人关于撒哈拉沙漠表土微团粒的粒度数据不宜简单地套用到目前的研究之中,因此笔者试图利用干筛筛析法来系统地研究不同表土类型的微团粒的粒度分布特征,以准确模拟中国北方粉尘源区的风沙输运和粉尘释放过程。

应该看到,前人常用几何平均粒径和标准偏差等参数来描述中国北方表土粒度分布特征,这是描述粒度分布特征的传统统计方法。一些经典的输沙模型也常用平均粒度等参数来预测混合沙的输沙率。实际上,风蚀区域的表土都是由不同粒级颗粒组成的混合粒子,因此用平均粒度来表征所有粒子对输沙率的贡献还存在着不确定性。为了考虑不同粒级沙粒对输沙率和粉尘释放通量的贡献,前人利用对数正态分布模型来拟合任意表土样品中不同粒级颗粒的比例,为全面定量地模拟每一个颗粒对风沙输运和粉尘释放的贡献奠定了基础。虽然前人对中国北方沙漠表土的粒度分布特征做了大量的研究,但这些数据只提供平均粒径和标准偏差等参数,难以据此还原每一颗粒在样品中的比例,因而也不能直接用于模拟跃移通量和粉尘释放通量。

DPM 粉尘释放模型在参数化方案中全面地考虑了地表特征(如土壤粒度分布、空气动力学粗糙度和土壤水分等)和跃移颗粒冲击过程对粉尘释放通量的影响,具有明确的物理机制,并得到了室内与野外观测的验证,证明该模型是目前模拟粉尘释放通量的理想模型。

研究表土粒度对跃移通量的影响时,表土平均粒径是一个重要变量。在 DPM 粉尘释放模型中,基于一个可以调整参数的对数正态分布模型来连续地表示表土微团粒的粒度分布特征及其对跃移通量和粉尘释放通量的影响。实际上,以微团粒形式存在的土壤颗粒的粒度分布特征对粉尘释放的影响比单个沙粒的粒度分布特征更重要。

目前还没有能够直接用于模拟中国北方粉尘释放的表土微团粒的粒度分布数据,而其他地区表土微团粒的粒度分布数据也不宜直接套用,鉴于此,有必要研究中国北方表土微团粒的粒度分布特征。根据沙漠(沙地)、片状流沙覆盖的农田、沙砾质化的农田和草原等表土类型微团粒的粒度分布特征及其分布参数,从表土微团粒的粒度分布的角度分析沙漠(沙地)、片状流沙覆盖的农田、沙砾质化的农田和草原的粉尘释放通量的差异,为解决有关沙尘暴主要是发生在沙漠、沙地还是在农田和草原的问题,提供初步的判断依据。

2.2 研究方法

2.2.1 采样位置

表土样品采集深度为 0~50 mm, 分别采自塔克拉玛干沙漠及戈壁、古尔班通古特沙漠、新疆东部沙漠戈壁、吐鲁番哈密绿洲地区、河西走廊、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地以及内蒙古高原阴山以北地区干草原农垦区和草原牧区, 共 88 个。采样位置如图 2.1 所示, 表土类型和地表特征见表 2.1。

主要采集下列地表类型样品: 沙丘沙(风沙土)、平沙地(风沙土)、沙砾质戈壁(灰棕漠土)、绿洲地带的冲积沙、灌淤土、草甸土、盐土和灰钙土、沙砾质化农田和草原的栗钙土和棕钙土等, 它们基本代表了中国北方风蚀和荒漠化区域的表土类型^[8], 同类型的表土分别采自不同区域, 以反映大范围内表土微团粒的粒度分布的共同特征, 例如沙丘沙分别采自塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、河西走廊、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地, 通过这些不同地区的采样, 采集到了粉细沙、细沙、中沙等沙质土类型, 其他地表类型样品亦然。鉴于模拟大尺度的粉尘释放通量时, 目前很难反映微尺度地貌差异引起的表土微团粒的粒度分布差异, 因而对采样部位没有特别要求, 主要采集沙丘沙的顶部和起伏丘陵的上部, 同时随机地采集沙丘沙和起伏丘陵的下部, 平地 and 起伏的地表均采集表土样品。

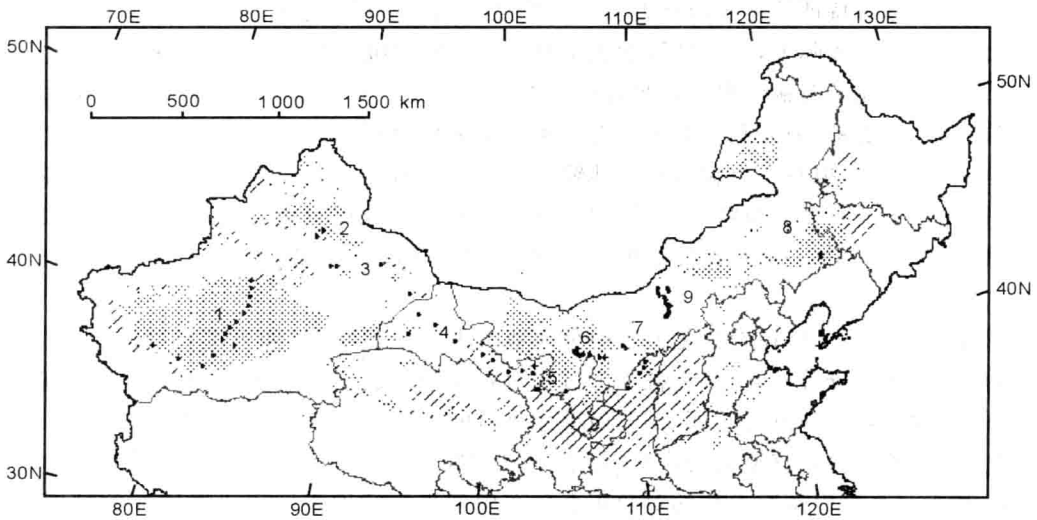


图 2.1 土壤样品位置

1—塔克拉玛干沙漠样品, TK1~13, TK 样品号为 5, 27, 35, 43, 46, 94, 98(数据来自文献[2]);

2—古尔班通古特沙漠样品, GT1~3; 3—新疆东部沙漠戈壁区样品, EXJ1~4; 4—河西走廊样品, HX1~10;

5—腾格里沙漠 TG1~10; 6—乌兰布和沙漠, WB1~10; 7—毛乌素沙地, MS1~8;

8—科尔沁沙地 HQ1~2, HQ12, HQ23, HQ31~33, HQ35, HQ38~39, HQ41, (数据来自文献[5]) KQ1, KQ2, KQ23, KQ35;

9—内蒙古阴山以北石质丘陵地区和层状高原地区, IM1~22

表 2.1 表土样品位置、地表特征和表土质地

编号	纬度 (°)	经度 (°)	海拔高度 m	地表特征	黏粒含量 %	粉沙含量 %	沙粒含量 %	黏粒+粉 沙含量 %	土壤质地
TK1	41.46	84.21	950	蓬松盐土 局部 有结皮	5.49	55.99	39.63	61.48	粉壤质 土壤
TK2	41.07	84.24	939	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	1.26	10.71	87.78	11.97	沙质土壤
TK3	40.64	84.31	953	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	1.63	8.96	89.09	10.59	沙质土壤
TK4	40.18	84.33	983	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	1.08	6.31	91.89	7.39	沙质土壤
TK5	39.76	84.15	1 019	粗平沙地,含砾 沙,塔克拉玛干 沙漠	1.88	11.80	85.90	13.67	砾质沙土 或砾质壤 沙土
TK6	39.32	83.81	1 117	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	2.06	5.44	92.23	7.50	沙质土
TK7	38.92	83.54	1 145	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	1.48	4.83	93.64	6.31	沙质土
TK8	38.64	83.34	1 149	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	1.99	5.55	92.37	7.54	沙质土
TK9	38.31	83.17	1 189	流动沙丘沙,塔 克拉玛干沙漠	1.21	6.85	91.86	8.06	沙质土
TK10	38.15	84.00	1 326	含砾沙,戈壁景 观,塔克拉玛干 沙漠	2.03	15.54	82.25	17.57	砾质沙土 或砾质壤 沙土
TK11	37.41	82.85	1 348	细粉沙,流动沙 丘沙,塔克拉玛 干沙漠	2.32	20.39	77.19	22.72	沙质壤 沙土
TK12	36.84	82.34	1 655	含砾沙,戈壁景 观,塔克拉玛干 沙漠	2.34	26.06	71.30	28.39	砾质沙土 或砾质壤 沙土
TK13	37.23	79.11	1 458	含砾沙,戈壁景 观,塔克拉玛干 沙漠	3.03	21.17	75.52	24.20	砾质沙土 或砾质壤 沙土
MS1	38.61	109.96	1 315	半固定沙地,毛 乌素沙漠	1.72	8.02	90.09	9.74	沙质土壤
MS2	38.94	110.05	1 247	半固定沙地,毛 乌素沙漠	1.23	4.35	94.11	5.58	沙质土壤
MS3	39.66	108.78	1 473	半固定沙地,毛 乌素沙漠,表层 沙粗	1.01	10.27	88.68	11.28	沙质土壤