



寒旱区农牧交错带 土壤风蚀运动特性 及其影响因子研究

申向东 李晓丽 邹春霞 著

Study on the Movement Characteristics of
Soil Wind Erosion and Its Influencing Factors in
Agro-pastoral Ecotone in Cold and Arid Regions



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

寒旱区农牧交错带

土壤风蚀运动特性及其影响因子研究

申向东 李晓丽 邹春霞 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书针对内蒙古阴山山脉区域土地沙化的特点,从地表土层的含水量、土壤质地、相对密度、机械稳定性、植被覆盖度等物理性质出发,通过对沙尘暴天气的风速、野外集沙仪收集到的土壤风蚀物的数据分析整理,考虑在风力的作用下,综合运用风沙颗粒运动学、流体动力学等学科的理论方法,对内蒙古阴山北麓地区土壤风蚀的主要影响因素及风蚀土壤的运动特性进行了分析研究。初步建立了阴山北部农牧交错带考虑土壤含水率、地面温度、地表风力、颗粒机械组成、土壤密度及地表残余物覆盖度的风蚀预测方程;以多年气象资料和野外实测资料为研究对象,提出基于最大熵原理的风速熵概率密度函数模型,并对其可行性和精确性进行了验证。

本书可供相关专业研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

寒旱区农牧交错带土壤风蚀运动特性及其影响因子研究 / 申向东, 李晓丽, 邹春霞著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 5

ISBN 978-7-5084-9814-0

I. ①寒… II. ①申… ②李… ③邹… III. ①寒带—干旱区—农牧交错带—土壤侵蚀—风蚀—研究 IV. ①S157.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第111739号

书 名	寒旱区农牧交错带土壤风蚀运动特性及其影响因子研究
作 者	申向东 李晓丽 邹春霞 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

土壤风蚀是世界上许多国家和地区的主要环境和社会问题之一。土壤风蚀过程是一个复杂的动力过程，它受众多因素（如风速、降水、地表土壤性质等）的影响，各因素之间的互相作用使风沙系统的运动特性、变化规律和耗能机理变得极为复杂。

内蒙古是我国荒漠化和沙化土地分布最为广泛的省（自治区）之一，截至2009年，内蒙古荒漠化土地面积仍有61.77万 km^2 ，占自治区总土地面积的52.2%；沙化土地总面积有41.47万 km^2 ，占自治区总土地面积的35.05%。

内蒙古阴山山脉横跨内蒙古中部，其蒙古语名字为“达兰喀机”，意思为“七十个黑山头”。阴山山脉是古老的断块山，它西起内蒙古巴彦淖尔市中部狼山，东止河北东部的桦山，东西长约1000km，南北宽达50~100km不等。阴山北部分为低丘陵区、坡平原区及北缘高平原区，大致包括巴彦淖尔市的乌拉特后旗、乌拉特中旗，包头市的固阳县、达茂旗，呼和浩特市的武川县，乌兰察布市的四子王旗、察右中旗、察右后旗、商都县、化德县等10个旗县，土地面积为114954 km^2 ，而风蚀土地面积达97914.39 km^2 ，占总土地面积的85.18%。根据赵羽、金争平等对内蒙古土壤侵蚀强度的划分，内蒙古阴山北部的四子王旗、达茂旗等地为土壤剧烈侵蚀区，同时也是形成华北沙尘天气的风沙源之一。

本书针对该区域土地沙化的特点，从地表土层的含水量、土壤质地、相对密度、机械稳定性、植被覆盖度等物理性质出发，通过对沙尘暴天气的风速、野外集沙仪收集到的土壤风蚀物的数据分析整理，考虑在风力的作用下，综合运用风沙颗粒运动学、流体动力学等学科的理论方法，对内蒙古阴山北麓地区土壤风蚀的主要影响因素及风蚀土壤的运动特性进行了分析研究。初步建立了阴山北部农牧交错带考虑土壤含水率、地面温度、地表风力、颗粒机械组成、土壤密度及地表残余物覆盖度的风蚀预测方程。初步掌握了该区域地表土层冻融规律及颗粒分布特征；该区域地表土壤在冻融循环过程中不仅温度发生了显著的变化（一般可由 -15°C 升高到 25°C ），同时温度的升高导致土壤水分的不断蒸发，土壤含水率逐渐减小。在地表土壤冻结前耕地实验

场地地表土壤的含水率平均为耕地 6%~7%、普通草地 6%~8%，而在土壤解冻后，土壤的平均含水率在 1%左右，其颗粒组分在冻结前后没有太大的变化。但温度急剧升高是形成疏松地表条件和导致其土壤抗剪强度急剧减小的主要原因。建立了当地地表土颗粒分布参数模型，能精确地模拟耕地地表土颗粒分布规律。建立了地表土土壤温度、土壤含水率与土壤抗剪强度之间的定量关系式。从单颗粒土壤在气流中所受的作用力出发，采用 4/5 阶 RKF 算法，得到了沙粒最大跃移高度 H_m 关于风蚀物粒径 D 和垂直起跳初速度 v_0 的通用双因子预测模型。

本书并以多年气象资料和野外实测资料为研究对象，提出基于最大熵原理的风速熵概率密度函数模型，并对其可行性和精确性进行了验证。基于小波理论得到了研究区域的气候结构特点、风蚀侵蚀力特征、扬沙和沙尘暴天气的发生、发展规律及其相互间的关系。指出该区域的沙尘日数，在较大时间尺度处于增强的偏少期，较小尺度表现出由少到多的过渡，且年代际变化较为显著，较强的振动周期为 16 年左右。

本书的研究成果项目得到了国家自然科学基金、科技部重大基础前期研究专项、内蒙古自然科学基金、内蒙古高等学校科研基金等资助。

本书的研究成果在国家核心期刊及大型国际会议共发表学术论文 24 篇，被三大国际检索系统收录 12 篇，其中 SCI 为 1 篇，EI 为 6 篇，ISTP 为 5 篇。

参加本书所涉内容的项目研究人员有内蒙古农业大学申向东、李晓丽、邹春霞、王晓飞、王海龙、姬宝霖、李平、郭冬梅、逯海燕、刘铁军、韩廷、李勇、田金亮、张雅静、李桂庆、张爱军，以及水利部牧区水利科学研究所李振刚等。

本书执笔人是申向东、李晓丽、邹春霞。其中，申向东撰写第 1、2、4、8 章；李晓丽撰写第 5、6、7 章；邹春霞撰写第 3 章。

本书所研究的内容属于交叉学科，同时野外试验测试工作难度较大，内蒙古阴山北部的地貌形态、气候变化等较为复杂，许多问题仍在研究与探索阶段，加之著者水平有限，书中难免有不足之处，敬请诸位读者和专家批评指正。

申向东

2012 年 3 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 土壤风蚀的研究意义	1
1.2 国内外研究的理论方法	2
1.3 研究的内容和方法	7
2 阴山北麓的地质环境及气候	9
2.1 地质地貌及地理环境	9
2.2 人为活动对土壤风蚀沙化的影响	13
3 基于信息熵原理和小波分析法的农牧交错带沙尘暴和扬沙发生规律	18
3.1 信息熵原理	18
3.2 加速遗传算法的实现过程	20
3.3 沙尘暴天气的周期性变化和突变特征	21
3.4 风速因子的变化特征	28
3.5 气温和降水因子的动态变化特征	33
3.6 相对湿度因子	56
3.7 风蚀气候指数的动态变化特征	57
4 地表层土壤的机械组成	65
4.1 土壤的机械组成	65
4.2 表层土壤颗粒的实验分析	67
4.3 耕地表层土壤颗粒的预测模型	69
4.4 土壤颗粒分布的分形特征	77
5 土壤结构的机械稳定性	83
5.1 土壤结皮	83
5.2 土壤结皮与土壤性质的关系	86
5.3 有机质	87
5.4 土壤的密度	88
5.5 相对密度	88
6 土壤风蚀实验设计及实验结果分析	90
6.1 实验设计与布置	90

6.2	实验测定的内容	90
6.3	耕地土壤风蚀试验结果的分析	94
6.4	普通草地土壤风蚀试验结果的分析	102
6.5	风蚀物粒径与母质(地表)颗粒的关系	108
6.6	地表风蚀前后颗粒粒径变化的比较	109
7	风蚀土壤运动特性的分析	111
7.1	风蚀土壤的运动特点	111
7.2	风场的特点	111
7.3	风沙流中沙粒的动力学特性	114
8	结论与展望	149
8.1	结论	149
8.2	展望	154
	参考文献	156

1 绪论

1.1 土壤风蚀的研究意义

土壤风蚀已成为世界上许多国家和地区的主要环境问题之一，它不仅是沙漠化的重要组成部分，而且是首要环节。据统计，全球约有 100 多个国家和地区发生土壤风蚀，约有 10 亿人口受到危害。全世界每年有 600 万 hm^2 ($1\text{hm}^2=10000\text{m}^2$) 的耕地变成沙漠，经济损失达 423 亿美元，其中以风蚀荒漠化最为严重，全球有 505 万 km^2 的土地因风蚀而发生退化，约占总退化土地面积的 46.4%^[1]。我国受土壤风蚀及土地沙漠化影响较大，约占国土总面积的 1/2 以上，60% 以上的贫困县处于北方干旱和半干旱的风沙地区。干旱和半干旱地区降水稀少而集中，蒸发持续又旺盛，风力强劲且频繁，植被低矮并稀疏，土质疏松而贫瘠，生态环境十分脆弱，因此风蚀表现尤为强烈。研究表明，北方干旱、半干旱及部分湿润地区沙漠、戈壁和沙化土地面积约为 166.9 万 km^2 ，占我国陆地面积的 17.2% 左右，且自 20 世纪 90 年代以 $2460\text{km}^2/\text{a}$ 的速度扩展，我国北方许多地区处于中度和强度风蚀的影响下^[2-5]，尤以旱作农田区最为严重。耕作农田已成为中国北方农牧交错带最主要的风蚀源地之一。研究发现^[6]，内蒙古阴山以北地区近 50 年农田风蚀厚度为 $1\sim 3\text{mm}/\text{a}$ ，风蚀模数为 $1500\sim 4500\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。因此，土壤风蚀研究已迫在眉睫。

风蚀是风将地表的沙及土壤物质吹起及搬运的吹蚀和地表物质受到风沙流冲击、摩擦磨蚀的一种较为复杂的动力作用过程^[7-9]。其实质是在风力的作用下使表层土壤中细颗粒和营养物质的吹蚀、搬运与沉积的过程。风蚀的强度受风力大小、空气稳定度、地面粗糙度、沙粒或土粒的粒径及其与地表物质的连接程度等因素的影响。当风速达到起沙风速时，地表颗粒便开始运移，产生风沙运动。根据索科洛夫、Bagnold^[10-11]等的研究，风沙运动依风力、土粒或沙粒大小和质量不同，有 3 种基本的运动形式：①悬移，它是指粒径一般小于 0.1mm 的较细颗粒在气流的作用下悬浮在空气中的运动方式，可被风卷扬到高空，随风飘到远处；②跃移，它是指颗粒在风力的作用下脱离地面，在地表跃移前进的运动方式，研究表明，粒径在 0.1~0.15mm 的颗粒最容易以跃移的形式运动。大约 90% 的跃移只在地表附近 30cm 的范围内运动；③表面蠕动，它是指粒径在 0.5~2mm 的风力所不能单独移动的粗颗粒，主要靠比其细小的跃移颗粒冲击而获得能量向前蠕动，是一种不离开颗粒和支撑表面的全接触式运动。

土壤风蚀过程是一个包括气候、植被、土壤、地形地貌等多种因子的综合的自然地理过程。这些因子发生变化，会导致土壤风蚀程度乃至方向的变化。同时由于风蚀，土壤颗粒在空间上重新分布和分选，可能对所作用到的土壤、与土壤有关的微地形和任何与该土壤有关的农业活动都产生深刻的影响。严重的土壤风蚀不仅危害本地，造成地表细粒物质、土壤养分和有机质的大量流失，使表土粗化，导致土地生产力下降，影响农作物的正

常生长,给农业生产带来严重的损失;而且可能殃及四方,产生大范围的粉尘污染和其他的风沙问题,污染人类和生物的生存空间,影响人类的身体健康和生命安全,并对交通、通信和水利等设施构成危害。例如,1934年5月美国发生的一场典型的沙尘暴,横扫美国2/3的国土面积,把逾3亿t的土壤卷入大西洋。仅这一年美国就毁掉数百万公顷农田,250万人口外迁,冬小麦减产510万t。在20世纪30年代的美国西部大平原地区,许多农场犁底层以上的土壤往往在一场沙尘暴中就会被全部刮走,使土壤彻底失去生产能力。20世纪30年代以来,加拿大的沙尘暴造成经济损失500多亿元;20世纪50年代以来的中亚里海—咸海的沙尘暴不但具有沙尘暴的普通危害,而且由于沙尘暴中含有大量的有毒化学物质,造成土壤和空气污染,引起当地居民身体的严重畸形;20世纪60年代末到70年代初发生在非洲撒哈拉地区的沙尘暴造成了600万的生态难民,对自然环境破坏严重;20世纪90年代澳大利亚的沙尘暴引起许多人遭遇哮喘病。风蚀使大平原地区的土壤结构不断粗化。Lyles与Tatarko研究表明^[12],1948~1984年,堪萨斯州西部地区的土壤由于风蚀大多数都发生粗化,1984年的土壤有机质含量仅为1948年的1/5。在我国,土壤风蚀对土地生产力也造成了严重的危害。据董光荣等研究^[13],1949~1994年我国共有6670km²的耕地沦为沙丘和沙地,每年丧失的耕地为14.80km²,每年为此损失粮食达 3.712×10^7 kg以上,相当于9.3万人口的年口粮。每年由于风蚀损失土壤有机质、氮素和磷素高达 5.598×10^{10} kg,相当于价值170亿元的各类化肥。沙尘暴已经成为干旱、半干旱地区严重的自然灾害,近年来沙尘暴的发生越来越频繁,导致了环境的极度恶化,直接威胁受灾地区社会经济的持续发展。例如,2006年4月17日北京市遭受近年来最大的浮尘,仅一夜便降下30多万t的沙尘。

1.2 国内外研究的理论方法

国外较早的风蚀研究始于20世纪30年代,主要表现在科学界对美国风蚀问题的关注上。该阶段对风蚀的研究主要集中在地质学领域^[14-21]。

1941年Bagnold的代表著作《风沙和荒漠沙丘物理学》详细地论述了土壤风蚀的物理机制,成为影响半个世纪以来风沙有关领域的理论基础,标志着土壤风蚀科学研究的开始。他通过野外调查和风洞试验来确定引起沙粒运动的力学机制,提出了沙粒的运动主要是发生在距地表100cm左右的高度范围内,而大气旋流在保持沙粒运动中只起很小的作用。并对稳定地表和被侵蚀地表上空的风速剖面、沙粒移动的起动风力、沙粒的跃迁蠕动、风沙流量顺风发展与饱和现象及地表沉积特性等问题进行了全面的研究。同时,他还创造性地应用和发展了冯·卡门(Von Kannan)、普朗特(Prantl)及谢尔德(Shield)的现代流体力学理论,建立了“风沙物理学”理论体系。之后,彻皮尔(Chepil)等对土壤风蚀影响因子作了大量的研究。1956年,他提出土壤水分含量是影响土壤风蚀的另一个重要因子。当土壤颗粒表面附着薄膜水时,水膜的静电作用使颗粒间的黏着力增大,具有强的抗风蚀能力。土壤可蚀性随着土壤水分增加量的平方而减少,当土壤水分达到15%时,则不会发生风蚀。1958年,彻皮尔等研究认为影响风蚀的气候因子主要有降水、气温、湿度和风况;决定土壤易受侵蚀的特性有土壤质地、土壤密度和结构的稳定性。并

深入研究了土壤风蚀的动力机制,包括土壤颗粒在风力作用下的运动性质、土壤颗粒起动条件、气流输沙能力及风沙流的磨蚀作用等土壤物理性质;土壤颗粒组成、土壤结构、土壤化学及有机质对土壤特性和抗风蚀力的影响等的土壤风蚀因子;研究了由土壤风蚀产生的沙尘暴的沉积学特征。在同一时期还有许多研究者,津格(Zingg)也利用风洞或在现场进行了大量的研究,Chepil和Zingg等研究成果为形成早期的土壤风蚀方程(WEQ)奠定了基础。

1965年,伍德拉夫(Woodruff)和西多韦(Siddoway)正式提出了“风蚀方程(WEQ)”,标志着系统的土壤风蚀的理论体系已经初步形成。但由于当时的科学发展水平和研究条件的限制,土壤风蚀研究的量化水平尚需进一步的提高。加拿大、前苏联及澳大利亚等国根据具体的土壤风蚀问题与特点,也相继开始了土壤风蚀的研究。

20世纪60年代的计量革命和计算机技术的发展与应用,使土壤风蚀的研究走向了定量模型研究。众多学者利用现代化的观测仪器和实验设备,全面地检验、完善和重建各种风蚀模型,使其具有更广泛的应用价值。20世纪70年代初期袭击非洲撒哈拉地区及部分亚洲地区的持续干旱,激发了全球对沙漠化问题的极大关注,而土壤风蚀作为土地沙漠化过程的首要环节,在沙漠化的动力机制方面得以充分的研究,而且从区域性的研究走向了国际化研究。自1977年以来,与风沙研究、土壤风蚀研究和沙漠化有关的国际性的学术活动明显增多,其中重要的国际会议有4次,即1985年在丹麦Aarhus召开的“风沙物理学会议”、1990年在丹麦Sandbjerg召开的“纪念Bagnold和Owen国际会议——风蚀机制与侵蚀环境”、1994年在美国加利福尼亚召开的“风沙过程对全球变化的响应”国际会议及1998年在英国牛津召开的“第四届国际风沙研究会议”。4次国际会议集中讨论的是沙漠化、沙粒运动、土壤风蚀、风沙沉积物、风蚀防治、风沙过程与全球变化及新技术应用等课题,反映了土壤风蚀研究的最新动态和发展趋势。

20世纪80年代以来,人们又开始致力于发展综合性的、基于物理过程的风蚀模型。Pasak于1973年提出的风蚀预报模型旨在预测单一风蚀事件。格利高里(Gregory)于1988年提出了德克萨斯侵蚀分析模型(TEAM)以期利用计算机程序来模拟风速廓线发育,以及各种长度田块上的土壤运动。该模型从理论分析出发,结合实地观测资料确定了其中若干系数,开辟了理论模型与经验模型相结合的思路,但其考虑的因子仍然十分有限,是一个十分简化的过程模型,不能够全面地反映风蚀过程,因而不能应用于复杂的实际情况,预测结果仍有待于检验。澳大利亚学者邵亚平(Yaping Shao)等于1996年在综合目前有关风沙流及大气尘输移的实验与理论研究成果基础上提出了风蚀评价模型(WEAM),用以估算农田风沙流及大气尘输移量^[14]。WEAM模型注意到在土壤风蚀预报中宏观研究与微观研究脱节的研究现状,试图通过微观与宏观研究理论的集成来建立基于物理过程基础的风蚀预报模型。模型引进了先进的地理信息系统管理技术,在土壤风蚀预报研究与其他环境科学研究的接轨方面作了探索,但该模型未能充分考虑多因子间的相互作用。20世纪90年代,美国农业部组织了一个多学科的科学队伍来推进土壤风蚀预报技术,推出了WEPS模型。WEPS是一个连续的以过程为基础以日为时间尺度的模型,可以模拟每日的天气、田间条件及风蚀状况。具有模拟田间条件和土壤蚀积时空变异的能力,它不仅模拟基本的风蚀过程,而且模拟改变土壤风蚀易感性的过程。WEPS还具有

植物风蚀伤害评价、悬浮土壤流失量计算等功能,是目前结构最完整、手段最先进的风蚀预报模型,成为风蚀定量评价、指导风蚀防治实践及环境规划与评价的重要技术工具。

在此期间也得到了关于土壤风蚀因子的研究成果。1985年, Fryrear 提出植被覆盖度也是影响土壤风蚀的最主要因子,地表植被覆盖物的种类和结构特征是影响风蚀的重要因素。他在1983年曾以实验研究得出风蚀率随植被覆盖度的增加呈指数函数减少的规律。1994年, Skidmore 等提出温度和降水也是影响风蚀的重要气象因子。1999年, Merrill 等认为土壤和植被因素决定了风蚀潜在的危险程度,土壤因素包括土壤的可蚀性、地表粗糙度和土壤水分含量;植被因素包括地表植物种类及其残茬覆盖程度。

从国际土壤风蚀的研究现状可以看出,土壤风蚀的研究经历了定性描述、动力学试验分析和定量模型研究3个阶段。目前,土壤风蚀研究的体系已经形成,研究内容也更加丰富,包括土壤风蚀动力学、土壤风蚀因子、土壤风蚀模型、土壤风蚀防治原理、土壤风蚀环境效应、土壤风蚀评价及研究方法论等。其中土壤风蚀流失量模型是这一科学体系中的核心,它应用科学的研究方法,以风蚀动力学和风蚀因子的研究为基础,用定量模型表达土壤风蚀过程,并作为土壤风蚀防治与评价的依据,代表着土壤风蚀研究的发展水平。因此,对土壤风蚀影响因子的研究将为土壤风蚀模型的定量研究奠定坚实的基础。

1.2.1 国内研究状况

在我国,很早就有对沙漠和沙漠地貌的认识和记载。但新中国成立前对风沙地貌的研究还是一片空白,专门的风蚀研究起步较晚^[22-29]。20世纪30~40年代,曾以宏观调查和定性分析为主进行了一些风蚀研究工作,提出营造防护林带、轮作、种草等措施以防治风蚀的建议。20世纪50年代,随着治沙工作的开展,推动了沙漠的科学研究。20世纪50~60年代,我国学者开始对风蚀、风沙活动的自然条件、风蚀地形发育及风沙运动规律开展了系统的研究。但仍以宏观调查和定性分析为主,研究手段上已开始应用航片分析、定位观测、风洞实验等比较先进的方法。从而获得了较以前系统、科学的资料,研究内容和涉及的空间也都大大扩展了。通过研究,从宏观上基本搞清了我国风蚀沙害的空间分布、危害方式及其区域差异,对引起土壤风蚀的自然与人为因素方面的认识也较以前深刻。从风的吹蚀与土壤水分蒸发、干裂等理化过程上分析风蚀机制,风蚀分类也较以前更为细致。直到1977年联合国在肯尼亚首都内罗毕召开世界沙漠化会议之后,引起了全球对土地荒漠化问题的极大关注。土壤风蚀作为沙漠化的首要环节而得到前所未有的重视,广泛地应用遥感手段、实地调查、定位观测、室内实验模拟等现代技术方法,深入开展了沙漠化的成因、过程、预测与整治研究,从定性描述走向定量分析,但尚未形成系统的研究,有关风蚀的论述散见于“沙漠学”(以朱震达和吴正为代表)、“水土保持”(以中国科学院西北水土保持研究所为代表)和“林学”(以北京林业大学及原内蒙古林学院为代表)研究中。1987年,董光荣等在我国率先开展了影响风蚀若干因素的试验研究,树起了我国风蚀研究的里程碑,尤其是他们关于土地翻耕、牲畜践踏对土壤风蚀的影响,提供了试验研究人类经济活动对土壤风蚀影响的新思路,带动了我国风蚀研究的深入发展。随后专门的风蚀研究相继兴起,如刘玉璋利用风洞模拟土壤结构、土壤水分、植被条件、耕作与放牧等因子对土壤风蚀的影响等,揭示出各种因素对风蚀过程的影响,并提出了不同地区

的风蚀防治措施。兰州大学郑晓静等^[5,32]通过对跃移粒子电荷的测量与电荷对粒子运动影响的研究,给出了沙粒电荷与临界风速和输沙率标准方程关系的有力解释。并通过对风沙流中的沙粒带电和由此产生的风沙电场的风洞实验研究,定量揭示出风沙流中沙粒所带的电荷量和风沙电场随高度、沙粒粒径及来流风速等参数的变化规律,发现沙粒受到的静电力对风沙流的形成和发展均有明显影响。而且还提出了由风沙流输沙率的风洞测量结果拟合得到单宽输沙率实验值的处理程序和拟合公式,有效提高了这一重要物理量的实验值精度,为检验存在较大差异的多达 50 余种理论预测公式的有效性提供了依据,并给出已有著名经验公式的适用范围。董治宝、陈渭南等学者以典型风沙土为研究对象,借助风洞模拟试验探讨了风沙土水分含量对临界风速及风蚀强度的影响,得到临界风速随土壤含水量的增加而呈线性增加,风蚀率随含水率的增加呈二次幂减少。1994 年,刘全友等^[30]对河北省坝上地区气候与沙化关系进行了研究。同时,哈斯等研究了该区域的耕作方式以及不可蚀性颗粒对土壤风蚀的影响^[31,33],并对土壤风蚀物的理化性质进行了初步分析和研究^[34-35]。董治宝等研究了风成沙粒度特征对风蚀可蚀性的影响、植被层特征对地表粗糙度的影响以及风蚀强度与植被盖度的关系,并由此提出一些防治土壤风蚀的建议^[36-38]。黄富祥等研究了毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙之间的关系,并完全依赖野外观测数据,建立了纯经验型回归模型以及在实测数据的基础上结合风沙动力学中的经典输沙率公式建立了半经验型模型^[39]。黄宁、武建军、郑晓静等从力学唯象理论出发,提出一确定沙粒起跳初速度分布函数粒一床的随机碰撞模型,给出了沙粒起跳初速度(包括旋转角速度)的分布函数——风沙运动跨尺度模型中的重要物理量,不仅弥补了现有实验测量的局限性,而且还为“磨蚀”现象的分析提供了理论依据^[5]。倪晋仁、李振山等^[2]提出了风沙两相流理论,对单一颗粒的起动和运动、颗粒群的输移、沙粒运动对气流速度的影响、风沙地表形态的形成机理及其模拟预测等多方面的内容进行了系统的研究。随着内蒙古农牧交错带耕地土壤的风蚀沙化现象加剧,许多学者开始致力于该区域的风沙运动规律、形成机制及影响因子特征等的研究。申向东等^[43-45](2003 年)首先提出研究该区域表层土壤的动力学机制的思想,随后李晓丽^[90]、王晓飞^[73]、逯海燕^[86]、郭冬梅等^[78](2005 年、2006 年)对表层土壤结构、粒度组成、结皮等变化规律进行了多方面的研究;申向东、李晓丽、张雅静、邹春霞等(2005~2010 年、2012 年)在野外实验的基础上研究了空气动力学参数、土壤风蚀颗粒的分布特征及其动力学特性、化学成分分布特征;并结合区域气候特征,引入小波分析法和最大熵方法对土壤风蚀影响因子的分布规律进行了分析,为深入了解内蒙古农牧交错带土壤风蚀机理及指定合理的防沙措施奠定了基础^[90-99]。

随着计算机技术和风洞设备的完善及高新技术的引入,我国的土壤风蚀及荒漠化研究取得了较大的发展,得到了许多丰硕的研究成果。但总的来说,我国的土壤风蚀研究起步较晚,与国际研究水平尚相距甚远,这与我国风蚀问题的广泛存在不相适应。而且与国际综合治理沙尘暴的经验相比,我国在治理的思路和手段上不够全面,最重要的一点是由于人们没有认识到沙尘暴的尘源大部分来自耕地,因而忽略了对耕地的保护,缺乏对耕地土壤风蚀方面的研究。因此,开展裸露耕地土壤风蚀及其影响因子特性的定量化研究,旨在为该区域采取合理的沙尘治理措施提供理论基础。

1.2.2 研究意义

根据以上对全球和我国土壤风蚀问题及其造成的严重危害的了解,得出研究土壤风蚀特性意义重大。本书以内蒙古阴山北麓农牧交错带为研究对象,主要对该区域裸露耕地土壤风蚀及其影响因子的动态特性进行研究,为合理治沙提供理论基础。其研究意义主要表现在以下几个方面:

(1) 内蒙古阴山北麓农牧交错带属于典型的干旱区。它处于北方农牧交错带的中段北部地带,它西起内蒙古巴彦淖尔市中部狼山,东止河北东部的桦山,大致包括巴彦淖尔市的乌拉特后旗、乌拉特中旗,包头市的固阳县、达茂旗,呼和浩特市武川县,乌兰察布市的四子王旗、察右中旗、察右后旗、商都县、化德县等 11 个旗县,土地面积为 417.3 万 hm^2 ,宽 70~80km,属于典型的干旱半干旱地区。该地区 30 年年平均降水量为 364.4mm,由东南向西北递减,最南部可达 400mm,大部分农区为 250~300mm,北部不足 200mm。冬、春、秋三季降水很少,主要集中在夏季,一般占到全年的 2/3 左右,且多为阵性降水。年平均相对湿度为 50%~59%,其中 8 月降水最大,为 66%~71%,5 月最小,为 36%~44%。年蒸发量 1993~2752mm,为年降水量的 5~11 倍。年平均地面温度为 5.2℃,其中最热的 7 月为 17.1~25.7℃,最冷的 1 月为 -16.1~-14.2℃。阴山北麓全年风沙天数平均为 8~15d,由南向北递增,风沙和沙尘暴以春季最为集中,风蚀土地面积达 97914.39 km^2 ,占总土地面积的 85.18%,是荒漠化强烈发展区。

(2) 该区从南到北地势逐渐低平,地貌依次从中山丘陵、低山丘陵、缓坡丘陵、波状高原到高平原,其荒漠化主要表现为土壤的沙漠化和戈壁化。由于人口增长的压力,大量开垦草原成为旱作农田,据 1998~1999 年环保部门监测,在以往的 13 年中耕地面积扩展了 54%,致使原有的牧区逐渐向北和更干旱的地区退缩,草场面积递减。同时农业生产方式十分落后,农业生产经营方式粗放,农田沿袭传统的耕作方式,使用铧式犁翻耕,地表裸露,干燥疏松,休闲期长,特别是冬、春季节,地表缺少覆盖,加上气候干旱、风大,耕地存在严重的风蚀沙化。乌兰察布市每年因风蚀使地表土壤减少 2~4mm。其中农田风蚀量是草原的 2~4 倍,退化草原占草原总面积的 46.4%,风力侵蚀模数高达 2000~10000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。阴山北麓地区每年受荒漠化危害的农田一般占农田总面积的 40%。日益严重的土地风蚀沙化不但造成农业生产效益低而不稳,农牧民生活贫困,还导致当地及周边地区生态环境的恶化。中国科学院地质学部“风沙问题专家组”指出,内蒙古中部的退化草地、撂荒地及早作农田是对京津造成严重危害的沙尘暴的沙尘源之一。也有研究表明,内蒙古高原阴山北麓农牧交错带旱作农区耕地和退化的草原是京津地区沙尘暴沙尘物质的最主要提供者之一。因此,根治这类沙尘暴要从治理内蒙古中部的农田沙化着手。

(3) 开展耕地土壤风蚀特性的研究是制定合理治沙计划的基础。近年来,我国政府在沙漠化防治方面也做了大量工作。其中,影响较大的就有 20 世纪 50~60 年代的沙漠地区综合考察,60~70 年代广泛开展的群众治沙,70~80 年代的三北防护林体系建设工程,90 年代启动的全国防沙治沙工程,并且都取得了一定的成效。但遗憾的是生态环境局部改善,整体恶化的形势没有得到根本逆转,沙漠化土地的面积不但没有减少反而逐年增加,沙漠化土地扩展的速度已经从 70 年代的每年增加 1560 km^2 ,达到 90 年代后期的

2460km²。因此,采取植树、种草等措施来防治沙尘暴,虽然短期内取得了一定的成效,但没有从根本上治理沙尘暴,而且沙尘暴越演越烈,已影响到首都北京及周边地区。遏制沙尘暴,必须寻根追源,对症治理。中国科学院对沙尘暴的成分和来源进行了分析和研究,结果表明产生沙尘的地表物质主要来自耕地,造成沙尘暴的主要原因是退化的耕地和草地,而不是沙漠。中国农业大学高焕文等研究表明,北京沙尘暴70%的沙尘来自北京外围冬季裸露耕地。因此,研究耕地土壤风蚀的发生规律、特性具有一定的现实意义。

(4) 土壤风蚀影响因子特性的研究是土壤风蚀研究必不可少的部分。土壤风蚀是一个开放的、复杂的、非线性的巨系统,也是一个动态的非平衡的复合系统。影响土壤风蚀的有气象、土壤、植被、人类活动等多方面的因素,在时间和空间上存在着相当多的影响变量,而土壤风蚀对其影响因素具有强烈的依赖性、敏感性,表现出了明显的混沌特性。因此,对风蚀影响因子的研究有助于进一步了解该区域风蚀形成的气象学条件和风蚀使土壤的蜕变过程。

1.3 研究的内容和方法

本书将在已有研究成果的基础上,针对内蒙古阴山北麓风蚀严重的地区,从研究地表土壤及收集的风蚀物理和化学性质入手,结合风沙运动动力学的理论模型,运用风沙颗粒运动学、两相流体动力学等学科的理论方法,寻求建立干旱区地表土风蚀运动的特点及风沙流量主要影响因素的关系。并将信息科学中熵的概念和最大熵原理、人工智能算法中加速遗传算法应用于风蚀影响因子的分布规律研究中,并结合小波分析原理,寻求和探讨内蒙古阴山北麓农牧交错带裸露耕地土壤风蚀及其倾向因子的特征规律,为合理提出防治农田沙漠化措施奠定理论基础。

本书针对该区域土地沙化的特点,从地表土层的含水量、土壤质地、相对密度、机械稳定性、植被覆盖度等物理性质出发,通过对沙尘暴天气的风速、野外集沙仪收集到的土壤风蚀物的数据分析整理,考虑在风力的作用下,综合运用风沙颗粒运动学、流体动力学等学科的理论方法,对内蒙古阴山北麓地区土壤风蚀的主要影响因素及风蚀土壤的运动特性进行了分析和研究。初步建立了阴山北部农牧交错带考虑土壤含水率、地面温度、地表风力、颗粒机械组成、土壤密度及地表残余物覆盖度的风蚀预测方程。掌握了该区域地表土层冻融规律及颗粒分布特征;该区域地表土壤在冻融循环过程中不仅温度发生了显著的变化(一般可由-15℃升高到25℃),同时温度的升高导致土壤水分的不断蒸发,土壤含水率逐渐减小。在地表土壤冻结前耕地实验场地地表土壤的含水率平均为耕地6%~7%、普通草地6%~8%,而在土壤解冻后,土壤的平均含水率在1%左右,其颗粒组分在冻结前后没有太大的变化。但温度急剧升高是形成疏松地表条件和导致其土壤抗剪强度急剧减小的主要原因。建立了当地地表土颗粒分布参数模型,能精确地模拟耕地地表土颗粒分布规律。建立了地表土壤温度、土壤含水率与土壤抗剪强度之间的定量关系式。

从单颗粒土壤在气流中所受的作用力出发,采用4/5阶RKF算法,得到了沙粒最大跃移高度 H_m 关于风蚀物粒径 D 和垂直起跳初速度 v_0 的通用双因子预测模型。

本书以多年气象资料和野外实测资料为研究对象，提出基于最大熵原理的风速熵概率密度函数模型，并对其可行性和精确性进行了验证。基于小波理论得到了研究区域的气候结构特点、风蚀侵蚀力特征以及扬沙和沙尘暴天气的发生、发展规律及其相互间的关系。指出该区域的沙尘日数，在较大时间尺度处于增强的偏少期，较小尺度表现出由少到多的过渡，且年代际变化较为显著，较强的振动周期为 16a 左右。

2 阴山北麓的地质环境及气候

2.1 地质地貌及地理环境

2.1.1 地理位置

内蒙古高原为古生代末期华力西运动褶皱隆起的地块,受燕山运动的影响较深。一些凹陷内沉积了白垩纪湖相地层。第三纪后气候变干,湖泊缩小,部分地方有湖沼相沉积。第四纪高原总的处在强烈干燥剥蚀阶段。白垩系、第三系湖相红色泥岩、沙质泥岩夹砂砾岩和砂岩;富含砾(碎)、卵石的黏砂土或粉砂的花岗岩、凝灰岩、玄武岩、片岩、混合岩的风化物等残积坡积物;以砂砾石、砂和黏砂土为主,发育于河流、冲沟和宽浅洼地之中的冲积洪积物,覆盖在起伏或平坦的高原面上,厚为0.3~3m不等;草原环境下,风积或坡积粉细砂或黏砂,经过黄土化过程,呈现垂直节理和大孔隙等黄土特征的沙质黄土等。这些沉积物的黏粒含量低,粗、细沙含量可大于60%,内聚力小,质地松散、易风蚀,为内蒙古高原区土地的沙漠化提供了丰富的沙源。

内蒙古高原于草原农垦区地貌最基本的特点是波状缓起伏、残山丘陵和宽浅洼地相间。阴山山地南侧以数层“坝”的形式截然与山一系列盆地分开,北侧则缓缓向高原过渡,农垦区一般位于阴山的北坡。

内蒙古阴山北麓又称为后山地区,主要包括乌兰察布盟的四子王旗、察右中旗、察右后旗、商都县、化德县,包头市的固阳县和达茂旗,呼和浩特市武川县,锡林郭勒盟的太仆寺旗和多伦县,以及巴彦淖尔市的乌拉特中旗东部,共11个旗县173个乡镇,总面积为417.3万 hm^2 ,有190.3万人口,如图2-1所示。该区域地处我国农牧交错带的中段,宽度为70~80km,西有乌兰布和沙漠和库布齐沙漠,东部是浑善达克沙地,西北是荒漠草原区,东北是退化的干草原,是整个农牧交错带中生态最为脆弱和最贫困的地区之一。

按照地形与气候特征,阴山北麓农牧交错带大致可分为3个类型:①南部丘陵区,该区域多缓坡丘陵,土层较为深厚,土地利用以农业为主,年降水量为400~500mm,



图2-1 内蒙古阴山北麓区位图

集中在6~9月，风蚀主要发生在开垦的农田；②中部波状高原区，农、牧业兼营，降水量一般为300~400mm，风蚀较严重，水蚀较轻；③北部草原区，土地利用以牧业为主，降水量在300mm以下，风蚀严重，草场退化明显^[43~47]。

本研究区域选在内蒙古阴山北麓农牧交错带的中部波状高原区四子王旗，处于北纬41°33′和41°06′，东经111°38′和111°27′，海拔1490.70m。

2.1.2 气候与水文条件

从气候条件来讲，阴山北麓地处我国中温带北部和半干旱偏旱气候区。年均气温达1.5~4.0℃，其中最热的7月气温为17.1~25.7℃，最冷的1月气温为-16.1~-14.2℃，无霜期为83~109d。年降水量由东南向西北递减，最南部可达400mm，北部不足200mm。其中，夏季降水占全年总降水的2/3以上，且多为阵性降水。全年8级以上大风日数平均在20~80d，且由南向北增多，全年盛行西北风或西风。下面以四子王旗为例，对其1960~2004年共45a的气象资料进行分析（见表2-1），发现以下特点。

表 2-1 四子王旗 45a 月平均气象资料（1960~2004 年）

月份	平均降雨量 (mm)	平均地温 (℃)	平均风速 (m/s)	平均大风日数 (d)	平均扬沙日数 (d)	平均沙尘暴日数 (d)
1	3.1	-15.92	3.34	1.4	0.4	0.4
2	3.4	-11.5	3.53	2.2	0.7	0.5
3	6.0	-2.10	4.02	3.7	1.4	1.6
4	11.7	7.91	4.88	7.3	2.8	2.8
5	26.3	16.53	4.67	7.2	2.2	1.5
6	39.1	21.94	3.93	4.6	0.5	0.3
7	74.1	23.82	3.16	2.0	0	0
8	83.2	20.95	2.93	1.4	0	0
9	37.2	14.34	3.29	1.6	0.1	0
10	20.2	5.26	3.56	2	0.1	0
11	5.6	-5.43	3.83	2.2	0.6	0.3
12	3.0	-13.45	3.51	1.6	0.5	0.4

(1) 降雨量时空分布极不均匀。45a年平均降水量为313.0mm，主要集中在夏、秋季节（6~10月），占全年降雨量的81.6%，11月至翌年5月占18.4%。

(2) 该区域属于典型的干寒区。年平均地面温度为5.2℃，3月下旬开始升温到4月出现正值，地温变化率较大，6~8月月平均地温在20℃以上，是地表温度的全年最高时期。

(3) 该区域风大而多沙尘。全年盛行以北风为主，随不同季节变化。冬、春季以西北风和西风为主，夏、秋季以东南风为主。年平均风速为3.72m/s，3~5月风速较大，大风、扬沙和沙尘暴天气频繁，均居全年之首。其中，大风天气约占全年的49%，扬沙天气约占全年的68.8%，沙尘暴天气约占全年的75.6%。可见，大风、沙尘天气主要发生