

环保公益性行业科研专项经费系列丛书

可移动式风蚀风洞 及其辅助系统设计原理与应用

姬亚芹 吴丽萍 金陶胜/著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

可移动式风蚀风洞及其辅助系统 设计原理与应用

姬亚芹 吴丽萍 金陶胜 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是以南开大学 NK-1 可移动式风蚀风洞及其辅助系统设计为核心,详细研究了风蚀风洞及其辅助系统的设计、集沙仪、排沙器和原状取土器。内容包括国内外可移动式风蚀风洞概述;可移动式风蚀风洞设计的理论基础;可移动式风蚀风洞气动结构设计;大气边界层实验模拟方法;可移动式风蚀风洞辅助系统及测量;土壤风蚀物采集器——集沙仪;排沙器和原状取土器。

本书可供环境科学、生态学、地理学、机械、水土保持等领域科研、工程技术人员及有关风洞研发单位开展相关工作时参考,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

可移动式风蚀风洞及其辅助系统设计原理与应用 / 姬亚芹, 吴丽萍, 金陶胜. —北京: 科学出版社, 2014. 9

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-041613-1

I. 可… II. ①…②吴…③金… III. 风蚀-风洞-计算机辅助设计
IV. ①S157.1②V211.74-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 183931 号

责任编辑: 李 敏 刘 超 / 责任校对: 鲁 素

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 无极书装

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>

北京厚德则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 9 月第一次印刷 印张: 14 3/4 插页: 2

字数: 300 000

定价: 110.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编著委员会

顾 问：吴晓青

组 长：赵英民

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

序 言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，“十一五”环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略，建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项启动实施，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；发布了502项新标准，现行国家标准达1263项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目234项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研

院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011年10月

前 言

土壤风蚀是一种自然现象，自古有之。我国存在大面积的沙漠、沙地、草地和季节性裸露农田，尤其北方（干）旱（多）风同期的气候特点，导致土壤风蚀严重。土壤风蚀不仅造成风蚀地区土壤流失，肥力降低，农牧民生活水平下降，更造成沙尘所经地区环境空气颗粒物浓度超标、人体健康受损、能见度下降、江河淤积、地表径流和水路交通受阻。因此，包括风蚀起尘机制机理、影响因素、预测模型、控制技术、管理对策等一系列与土壤风蚀防治有关的研究受到了广泛重视。风蚀风洞作为土壤风蚀相关研究中重要的研究手段和必备工具，自土壤风蚀定量化研究之初，其作用就受到了研究者的青睐。而可移动式风蚀风洞作为风蚀风洞的一种特殊类型，日益受到人们的重视，一些研究单位相继研发和制造了可移动式风蚀风洞。

本书共7章。第1章简要介绍了国内外可移动式风蚀风洞，总结了几个典型的可移动式风蚀风洞的特点。第2章介绍了可移动式风蚀风洞设计的理论基础，主要包括相似理论、误差理论、异常值检验与剔除方法，继而介绍了动力学相似准数、流场主要特征参数、平均风速剖面模拟和边界层湍流特性模拟等相关理论问题，为风蚀风洞的设计奠定了理论基础。第3章介绍了NK-1可移动式风蚀风洞气动结构的设计依据、结构尺寸，详细介绍了风洞实验段、尾部扩散段、收缩段、转角段、过渡段、进气段、动力段的结构尺寸设计依据和方法，然后介绍了能量比估算方法以及配套风机的设计、选型和效率校核等。第4章介绍了大气边界层实验模拟方法部分，主要介绍了国内外大气边界层主动和被动模拟两种方法和流体力学模拟大气边界层的相关方法和最新进展，最后分别以南开大学可移动式风蚀风洞粗糙元和棒栅系统以及内蒙古农业大学可移动式风蚀风洞的被动模拟装置为例，进行了详细的模拟装置设计的方法、过程介绍和结果验证。第5章介绍了南开大学NK-1可移动式风蚀风洞的数据采集与控制系统、风速测试系统、接地与安全保护问题，然后介绍了该风洞空风洞情况下流场动力学性能检测方法和结果。第6章介绍了国内外集沙仪的研究进展，从集沙仪设计的基本原则入手，详细介绍了南开大学研制的集沙仪和中国农业大学研制的集沙仪的尺寸和相关性能测试方法和结果。第7章介绍了排沙器和原状取土器的最新进展，重点介绍了内蒙古农业大学设计制造的排沙器和原状取土器，为相关单位开展类似研究提供借鉴。

本书各章节编写和审阅人员如下：第1章由吴丽萍、姬亚芹编写；第2章由吴丽萍（第1~3节）和金陶胜（第4~5节）编写；第3章由吴丽萍编写，李光里审阅；第4章由金陶胜和付雪梅编写；第5章由吴丽萍编写，李光里审阅；第6章由王嘉珩和姬亚芹编写；第7章由朱振宇和姬亚芹编写。全书由赵静波和张诗建负责文字和格式校对，姬亚芹负责统稿，审定终稿。

本书得到国家环保公益性行业专项资金支持。

书稿几经修改, 希望尽可能详细地介绍可移动式风蚀风洞领域的最新进展、设计理论、设计实例, 以及在可移动式风蚀风洞实验中必备的重要设备——集沙仪和原位取土器等相关设备, 希望为相关研究人员开发设计新的可移动式风蚀风洞及其相关设备提供理论基础和典型案例, 为促进土壤风蚀研究向纵深化、系统化、定量化等方向发展服务。

在本书编写过程中, 引用了大量的论文、专著等相关资料, 限于篇幅未能在参考文献中一一列出, 谨向文献的作者致以深深的歉意, 并表示衷心的感谢。特别感谢沈阳航空航天大学的徐让书老师、李光里老师和李国文老师在南开大学可移动式风蚀风洞设计、流体力学模拟和制造过程中的大力支持和协作。

由于作者水平有限, 书中难免有疏漏和不妥之处, 热切希望读者批评指正。

作 者

2014 年 4 月

目 录

第 1 章 国内外可移动式风蚀风洞概述	1
1.1 可移动式风蚀风洞的产生、作用与特点	1
1.1.1 土壤风蚀研究与风蚀风洞	1
1.1.2 可移动式风蚀风洞的地位与作用	5
1.1.3 可移动式风蚀风洞的类型及主要特点	6
1.2 可移动式风蚀风洞研究进展	8
1.2.1 国外可移动式风洞研究进展	8
1.2.2 国内移动式风蚀风洞研究进展	13
参考文献	22
第 2 章 可移动式风蚀风洞设计的理论基础	28
2.1 理论基础概述	28
2.1.1 相似理论	28
2.1.2 误差理论	31
2.1.3 异常值检验与剔除	33
2.2 可移动式风蚀风洞设计的动力学相似准数	39
2.2.1 大气边界层湍流运动方程与相似准数	39
2.2.2 流动雷诺数 (Reynolds number)	42
2.2.3 罗斯贝数 (Rossby number)	42
2.2.4 弗劳德数 (Froude number)	43
2.2.5 普兰特数 (Prandtl number)	43
2.2.6 皮克莱数 (Peclet number)	44
2.3 含沙气流流场	44
2.3.1 颗粒起动与受力分析	44
2.3.2 运动方程	47
2.3.3 含沙流场动力学相似准则	48
2.4 平均风速剖面模拟	50
2.4.1 对数律表示法	50
2.4.2 指数律表示法	53
2.5 大气边界层湍流特性模拟	55
2.5.1 湍流强度模拟	55
2.5.2 脉动风功率谱模拟	56
2.5.3 湍流积分尺度模拟	57

2.5.4 静压梯度模拟	58
参考文献	58
第3章 可移动式风蚀风洞气动结构设计	63
3.1 可移动式风蚀风洞洞体设计	63
3.1.1 风蚀风洞洞体气动方案与结构设计	63
3.1.2 风蚀风洞洞体气动结构介绍	65
3.1.3 实验段 (working section) 设计	65
3.1.4 尾部扩散段 (diffusing section) 设计	71
3.1.5 收缩段 (contraction section) 设计	71
3.1.6 转角段 (turning section) 设计	74
3.1.7 稳定段 (stability section) 设计	76
3.1.8 过渡段 (transition section) 设计	78
3.2 风洞能量比估算	78
3.2.1 能量比定义	78
3.2.2 实验段能量损失估算	79
3.2.3 尾部扩散段能量损失估算	81
3.2.4 收缩段能量损失估算	82
3.2.5 稳定段能量损失估算	83
3.2.6 转角段能量损失估算	85
3.2.7 过渡段能量损失估算	87
3.2.8 进气段能量损失估算	87
3.2.9 动力段能量损失估算	88
3.2.10 风机选择	89
3.3 动力段设计	90
3.3.1 风扇设计	90
3.3.2 导流片设计	98
3.3.3 整流罩设计	102
3.3.4 风扇效率校核	104
参考文献	105
第4章 大气边界层实验模拟方法	107
4.1 模拟方法	108
4.1.1 被动模拟方法	109
4.1.2 主动模拟方法	113
4.2 CFD 数值模拟技术	115
4.2.1 大气边界层控制方程	116
4.2.2 湍流的数值模拟方法	117
4.2.3 CFD 软件求解过程	120
4.2.4 多孔介质模型	121

4.3 模拟实例1——NK-1 可移动式风蚀风洞模拟装置	122
4.3.1 模型的选取	123
4.3.2 划分计算网格	123
4.3.3 引入多孔介质模型	124
4.3.4 参数设置	125
4.3.5 多孔介质模型模拟结果	126
4.3.6 引入棒栅验证	127
4.3.7 棒栅-粗糙元模拟装置对流场特性的影响	129
4.3.8 室内风洞实验研究	137
4.4 模拟实例2——OFDY-1.2 型风洞大气边界层模拟装置	140
4.4.1 平行棒栅与粗糙元的设计	140
4.4.2 具体调节和布置方法	140
4.4.3 风洞风速廓线调节结果与结论	141
参考文献	143
第5章 可移动式风蚀风洞辅助系统及测量	147
5.1 数据采集与控制系统	147
5.1.1 概述	147
5.1.2 系统硬件模块	148
5.1.3 系统软件模块	151
5.2 风速测试系统	152
5.2.1 风速测量方法概述	152
5.2.2 单点风速测量方法	154
5.2.3 平均风速剖面测量仪	156
5.2.4 测试系统组成	157
5.3 接地与保护	158
5.4 空风洞流场动力学性能检测	159
5.4.1 实验段流场性能检测	159
5.4.2 空风洞壁面边界层检测	175
5.4.3 风洞能量比检测	182
参考文献	183
第6章 土壤风蚀物采集器——集沙仪	184
6.1 集沙仪简介	184
6.1.1 国外集沙仪简介	184
6.1.2 国内集沙仪简介	193
6.2 集沙仪设计实例	200
6.2.1 集沙仪设计原则	200
6.2.2 南开大学集沙仪设计实例	201
6.2.3 内蒙古农业大学旋风分离式集沙仪设计实例	209

参考文献	212
第7章 排沙器和原状取土器	215
7.1 排沙器研究现状及设计	215
7.1.1 排沙器的研究现状	215
7.1.2 内蒙古农业大学排沙器	215
7.1.3 “喷沙”模拟装置	217
7.2 原状取土器	219
7.2.1 原状取土器的研究现状	219
7.2.2 内蒙古农业大学的原状取土器	219
参考文献	223

第 1 章 国内外可移动式风蚀风洞概述

风蚀风洞是伴随着土壤风蚀问题的研究而产生和发展起来的。土壤风蚀所产生的颗粒物会造成源地、途径地和汇地大气颗粒物污染加剧，并引发一系列环境与健康问题，探求风蚀机制及其控制途径，成为世界各国土壤保持和大气颗粒物污染防治领域的科学家和研究者共同努力的方向。环境风洞及可移动式风蚀风洞的开发与应用，极大地加速了土壤风蚀问题研究的进程。而可移动式风蚀风洞（movable wind erosion tunnel）的出现及其应用，在土壤风蚀影响因子、风蚀预报模型、抗风蚀机制、风蚀控制技术、风蚀控制管理措施、土壤风蚀危害等系统研究中发挥了极其重要的作用，已成为土壤风蚀成因以及管理与控制领域不可或缺的研究工具。本章简要介绍可移动式风蚀风洞的产生、作用与特点，分类介绍国内外可移动式风蚀风洞的发展与各自的特点和应用状况，归纳总结了可移动式风蚀风洞设计的基本准则和一般要求。

1.1 可移动式风蚀风洞的产生、作用与特点

1.1.1 土壤风蚀研究与风蚀风洞

1.1.1.1 土壤风蚀的定义

科学的风蚀（wind erosion）概念以侵蚀（erosion）概念为基础，erosion 一词源于拉丁语 erodere，原意为吃掉、挖掉。1894 年，Penck 将 erosion 引入地质学中，首次用以描述水流作用下地表固体物质的流失和沟壑、漕谷的形成。与 erosion 意义相近的，用于描述侵蚀现象的词还有 ablation（源于拉丁语 ablatio，意为带走）、corrosion（源于拉丁语，意为啃成碎片）、abrasion（源于拉丁语 abradere，意为刮掉）和 deflation 等。史培军等（1999）认为土壤侵蚀过程涉及侵蚀动力与下垫面相互作用过程。侵蚀是在各种外在物质（即外在地貌因子）作用下，土壤层或其下基岩（即土壤圈和岩石圈）的破损。依据侵蚀发生的水动力、风动力、温差、重力等作用力的不同，土壤侵蚀过程可划分为水蚀过程、风蚀过程、冻融侵蚀过程、重力侵蚀过程。

朱显谟（1956）提出，风蚀是风力作用对土壤圈或岩石圈进行损害和破坏，风蚀过程就是风力作用引起地表物质脱离地表并被搬运和再堆积的过程。董治宝和李振山（1995）指出，风蚀是侵蚀与塑造地球景观的基本地貌过程之一，也是发生于干旱、半干旱以及部分半湿润地区土地沙漠化的关键环节。因此在自然状态下，风蚀与水力侵蚀、重力侵蚀和冻融侵蚀等各类土壤侵蚀一样，只是自然力作用下的某种现象。Chepil 和 Milne（1939）研究认为，对于疏松干燥的细颗粒土壤、缺乏植被覆盖的裸露地表、开阔平坦的原野等区

域, 容易发生风蚀。戚隆溪和王伯懿 (1996) 指出, 风蚀是指松散的地表土壤颗粒被风吹起和输运的吹蚀过程, 以及地表物质受到风吹起颗粒撞击而破碎的磨蚀过程。吹蚀过程主要涉及流体动力学过程, 或者更严格地讲是气固两相流动过程。风蚀主要发生在干旱与半干旱气候区, 一般年降雨量在 250 ~ 300 mm 范围内的地区易受风蚀影响。土壤侵蚀分类分级标准 (SL 190—2007) 对风蚀的定义为: 风蚀即风力侵蚀, 指在气流的冲击作用下, 土粒、沙粒或岩石碎屑脱离地表, 被搬运和堆积的过程。

土壤风蚀是土壤侵蚀的一种类型。《风沙物理学》(丁国栋, 2010) 对土壤风蚀的描述是: 土壤风蚀是指土壤或土壤母质在一定风力的作用下, 土壤结构遭受破坏以及土壤颗粒发生位移的过程。Shao (2000)、董志宝等 (1995) 等认为, 土壤风蚀可以理解为: 土壤颗粒受风力作用产生位移, 这种位移包括土壤颗粒的夹带起尘、空间运移、重力沉降与沉积或地表土壤颗粒的蠕移、运移、沉积和再堆积过程。

上述这些过程表现为地表颗粒的磨蚀过程, 实质上是表层土壤中细颗粒物和营养物质的吹蚀、搬运与沉积的过程, 所产生的直接性生态后果表现为: 造成表土层大量富含营养元素的细微颗粒的损失, 致使农田表土层粗化、土壤肥力下降和土地生产力衰退, 是导致土地荒漠化的重要原因; 土壤风蚀过程易产生大量的气溶胶颗粒, 这些颗粒悬浮于大气中, 会造成所在地区乃至周边地区严重的环境污染, 是沙尘、扬沙等天气现象的重要来源。

1.1.1.2 土壤风蚀问题的研究与发展

自然界风力侵蚀的表现形式多种多样, 如各种鬼斧神工般的风蚀地貌以及黄土高原的形成等, 构成了自然环境的一部分。人类既无可能、也无必要对这些自然的自然过程强加改变, 胡云锋等 (2003) 将这种自然状态下的风力侵蚀称为“容许侵蚀”。由于人类的高强度、不合理活动, 风力侵蚀发生、发展的强度及影响范围逐渐增强、增大, 乃至引发环境灾害, 危及人类正常的生产、生活环境甚至于生命安全。例如, 20 世纪 30 年代中叶至 40 年代, 美国中西部大平原、加拿大西部大草原以及苏联中亚地区灾难性的“黑风暴”事件, 据估计, 这一时期美国大平原每年被侵蚀的土质重量与进入大气中的尘埃重量分别为 2.44 亿 t 和 0.77 亿 t, 每年来自撒哈拉地区的矿物质尘埃达 2.60 亿 t, 每年风从大地上搬运的粒径小于 $20\mu\text{m}$ 的细沙量超过 5 亿 t。探求风蚀机制及其控制途径成为世界各国土壤保持与颗粒物污染防治领域的科学家共同努力的方向。

正是这一时期严重的沙尘暴引起了科学界对土壤风蚀危害的空前重视, 极大地刺激了风蚀问题研究的纵深发展。Bagnold (1941) 深入利比亚沙漠进行观测, 积累了丰富的现场资料; 同时利用室内风沙环境风洞进行相关研究, 获得了广泛的实验资料。以这些资料为基础, 创立了风沙物理学, 建立了《风沙和荒漠沙丘物理学》的理论体系。他将风-沙定性关系问题简化为可以定量测量的空气动力学问题来研究, 通过风沙环境风洞 (wind tunnel of blown sand environment) 实验和野外观测来确定引起沙粒移动的力学机制, 全面研究了稳定地表和被侵蚀表面上空的风速剖面、沙粒移动的起动风速、沙粒的跃移与蠕移等土壤风蚀问题, 为近代风蚀体系的认识与研究奠定了坚实的科学基础。遵循 Bagnold 的理论体系, Chepil (1945) 及其合作者对耕地的风蚀问题进行了长达 25 年的系统研究, 涉

及风蚀的影响因子以及沙粒的蠕移、输运和沉积机制,发表了具有重要学术价值的研究论文,讨论了吹蚀机制问题,分析了风蚀因子,确定了土壤可蚀性指标和气候指标,研制了风蚀仪器设备,初步建立了风蚀研究的理论-实践体系,被誉为现代土壤风蚀科学的开拓者。风蚀研究由此实现了由定性研究向定量研究的飞跃,可移动式风蚀风洞的雏形便在此阶段产生。自 1947 年可移动式风蚀风洞经美国农业部土壤风蚀实验室进一步的开发、改进与发展,在土壤风蚀影响因子的系统研究中发挥了极其重要的作用。20 世纪 60 年代,Woodruff 和 Siddoway (1965) 建立的世界第一个通用风蚀方程 (WEQ),便是基于该可移动式风蚀风洞的野外实验数据得到的。这里提到的风沙环境风洞是风沙研究的专用设备,用来模拟研究风对自然界地表结构的影响,以及风和沙粒在吹蚀、搬运、堆积过程中的相互作用与相互关系。可移动式风蚀风洞特指一类尺寸小、重量轻、可拆卸、容易移至野外并在真实地表条件下现场进行实验的研究工具。国外学者 Raupach (1990)、Nickling 和 Gillies (1993)、Leys 和 Raupach (1991)、Pietersma 等 (1996) 在其论文中多称之为便携式风洞 (portable wind tunnel),国内研究者朱朝云等 (1992)、吴正 (2003) 的相关文献中称为野外风蚀风洞 (field wind tunnel),荣姣凤 (2004)、范贵生 (2005) 发表的论文中称为可移动式风蚀风洞。

当然,由于自然条件的错综复杂,地表风蚀研究经历过几次大的发展浪潮,而每一次大的发展都更加强化和注重了风蚀风洞实验研究的实际应用。

(1) 国外土壤风蚀研究进展

国外土壤风蚀研究可分为 4 个阶段:定性描述阶段、定量研究阶段、风蚀方程的建立与完善阶段及风蚀预报系统的建立与完善阶段。

1) 定性描述阶段。20 世纪 30 年代前,科学家总结了对土壤风蚀认识的有关结论,包括风与土壤的相互作用、风蚀物质的损失与搬运等,认为通过深入了解土壤理化性质可以找出减轻土壤风蚀的办法,如增加土壤湿度和有机质含量、改良土壤结构、增加作物残留物、构建防风带等措施保护地表。

2) 定量研究阶段。20 世纪 30 年代中期,Bagnold 的代表作《风沙和荒漠沙丘物理学》标志着土壤风蚀迈入了定量研究阶段,是近代风蚀体系认识与研究的奠基石。

3) 风蚀方程的建立与完善阶段。20 世纪 30 年代末至 50 年代,“黑风暴”事件成为这一时期的标志。这一时期,美国的 Chepil 被誉为现代土壤风蚀科学的开拓者,风蚀动力学机制、风沙流磨蚀作用、风蚀流失量及其影响因素、土壤风蚀因子、风蚀强度等级以及土壤理化性质与土壤抗蚀性间关系等研究获得突破,风蚀研究理论体系的建立成为风蚀定量研究飞跃发展过程的标志。50 年代中期,苏联雅库波夫等通过野外观测和风洞模拟实验,探讨了微地形、土壤、植被等环境条件与土壤风蚀间的关系,在防风蚀的综合农业措施方面做出了卓越贡献。自此,涉及物理措施、生物措施、管理措施等农田防风蚀措施的研究得到重视与发展,土壤风蚀的研究由理论研究向应用研究转变。

4) 风蚀预报系统的建立与完善阶段。20 世纪 60 年代,计算机的应用使土壤风蚀研究出现新的转机,并得以在理论研究领域长足发展。Woodruff 和 Siddoway (1965) 首次建立了田间年风蚀量的估算模型——WEQ,使之成为这一时期的标志。80 年代,计算机技

术的迅速发展和深入渗透,美国农业部专家组综合风蚀科学、数据库、计算机技术等联合推进土壤风蚀预报的研究,提出了修正风蚀方程(RWEQ),90年代继续推出了风蚀预报系统(WEPS),最终取代WEQ。土壤风蚀程度与环境因素密切相关,WEPS具有模拟田间条件和土壤蚀积时空变异的能力,除模拟基本的风蚀过程,还能模拟土壤风蚀随环境条件影响变化的过程。该系统可以分别输出跃移、蠕移和悬浮土壤流失量方面的量化数据,这在土壤风蚀起尘对城市环境空气质量的影响研究中至关重要。WEPS是迄今为止影响因素最完整、手段最先进的风蚀预报模型,是大力推进风蚀定量评价研究、风蚀防治实践、环境规划与管理等工作的重要技术工具。

(2) 国内土壤风蚀研究概况

我国学者很早就注意到土壤风蚀问题及其引起的沙尘暴灾害,但风蚀研究工作进展缓慢,20世纪50年代以前,随着西方近代土壤侵蚀研究的不断发展和相关科学知识的传播,国内学者开始关注并认识土壤风蚀问题。国内土壤风蚀的研究过程大致可以归纳为四个阶段。

1) 萌芽阶段。1950年以前,国内研究者基于风沙物理学研究和沙漠研究,开始较详细地对我国干旱、半干旱地区的农田风蚀问题进行调查,区域涉及东北、内蒙古、新疆、陕北及黄河下游洪泛平原半湿润地区。这一阶段以定性和描述性研究为主,陈渭南等(1994)认为中国土壤风蚀科学研究在这一时期处于萌芽阶段。

2) 定性研究阶段。20世纪50~60年代,我国学者钱宁和林秉南、杨郁华、梁式弘等先后翻译出版了拜格诺的《风沙和荒漠沙丘物理学》、苏联兹纳门斯基的《沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题》、雅库波夫的《土壤风蚀及其防止》等专著,并翻译了大量学术论文,这些专著和论文成为防沙治沙工程的重要理论指导。在此基础上,在风蚀活动的自然条件、风蚀地形发育以及风沙运动规律、防沙措施机制等方面开展了系统性研究,建立了一批实验站,重点结合大型工程建设任务开展了农田风蚀沙害、交通干道风蚀沙害的防沙治沙技术实验研究。该阶段仍以宏观调查和定性分析为主。1967年,中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所建成了我国第一座环境风洞,开启了我国风沙物理实验研究的新纪元,风蚀研究由定性研究向半定量、定量研究转变。

3) 定量研究阶段。20世纪70~90年代,土壤风蚀的风洞实验研究迅速发展,1988年,中国科学院兰州沙漠研究所建成第二座沙风洞——土壤风蚀风洞,安置于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠实验研究站,方便野外研究。这一时期,风蚀的专项研究工作相继兴起和发展,研究方法包括野外观测、风洞模拟实验和理论分析。贺大良等(1986)、董光荣等(1987)在我国较早地应用风洞研究了地表粗糙度与人畜践踏等对土壤风蚀的影响。董治宝等(1995, 1996a, 1996b, 1996c, 1997a, 1997b)通过风洞模拟实验,对土地开垦、植被盖度、土壤含水量、土壤机械组成等主要风蚀因子与土壤风蚀强度之间的关系,进行了定量和半定量研究。朱朝云(1987)、赵存玉(1992)、哈斯(1994)等利用可移动式风蚀风洞研究了不同地表的土壤风蚀量和风蚀物垂直分布。董治宝和李振山(1998)通过风洞模拟实验,建立了风蚀率与风速等因素之间的数量关系。刘连友等(1999)利用风洞实验模拟测定了不同砾石覆盖密度与覆盖方式对土壤风蚀率的影响。

响。这一时期是我国土壤风蚀研究专向化、系统化、定量化全面发展的阶段。

4) 应用与发展阶段。20 世纪 90 年代以来, 计算机技术、数理化方法、遥感解译、室内动态仿真模拟等现代技术方法的出现与飞速发展, 结合实地调查、定位观测等常规技术手段, 我国土壤风蚀研究迅速发展, 获得了区域治理途径与措施、区域土地资源开发利用等一系列应用研究成果。严平 (2000) 通过对 ^{137}Cs 剖面分布态势的分析, 探讨了不同土类的现代风蚀过程, 且根据 ^{137}Cs 模型计算出青藏高原风蚀地区的土壤风蚀速率。

(3) 土壤风蚀研究展望

胡云锋等 (2003) 提出, 土壤风蚀研究的根本任务是对土壤风蚀的范围、强度及数量进行监测、评价和预测预报。因此, 对于土壤风蚀的物理机制、过程的深刻理解, 包括对风蚀作用发生、发展和减弱消亡过程的各类影响因子的研究与理解, 是实现土壤风蚀研究任务的基础。

在土壤风蚀问题的研究过程中, 无论是土壤颗粒的夹带起尘、空间运移及沉降淀积过程的研究, 还是风蚀作用发生、发展和减弱消亡过程的研究, 均与时间尺度密切相关。由于土壤风蚀的季节主要发生在冬春旱风同期的季节, 因此风蚀规律研究的时间尺度涉及年际尺度、月尺度、季尺度; 而风蚀的物理机制, 如土壤颗粒发生跃移、蠕移、悬移的影响因子等, 需要以小时, 甚至分钟等更小的时间尺度进行实时监测。因此, 随着风蚀研究向定量模型化方向的快速发展, 移动式风蚀风洞的应用也越来越显示出对于风蚀研究的重要性和经济价值。国内外关于风沙移动规律、气流夹带起沙机理、风蚀分布的地带性规律、风蚀强度与风蚀量、土壤风蚀因子的影响等风蚀理论与基础的研究, 都需要依靠野外风洞。美国、苏联、澳大利亚和加拿大等采用保护性耕作措施与退耕还林、植树造林、建立防风屏障等措施治理沙尘暴, 治理速度快、效率高、经济性强, 其治理成效均离不开便携式风蚀风洞在保护性耕作措施研究中的利用。可见, 随着土壤风蚀问题研究的深入和细化, 可移动式风蚀风洞成为必备的研究工具。

1.1.2 可移动式风蚀风洞的地位与作用

土壤风蚀研究的发展历程体现了风蚀研究对风蚀风洞技术进步和演化的带动与促进作用, 而风蚀风洞技术的发展又一直推动着风蚀研究向深度和广度方向发展, 二者相互促进、相辅相成。国外自 20 世纪 30 年代中期, 便进入了室内风洞实验结合野外观测的土壤风蚀定量化研究阶段。利用风蚀风洞, 包括室内大型风蚀风洞或可移动式风蚀风洞, 可以模拟并观测各种气象条件和地表状况下的风蚀过程, 尤其是土-气边界层中的起沙和降尘过程。风蚀风洞是开展时空尺度特征的土壤风蚀定量化研究的必备工具, 从风蚀研究的初始阶段就成为风沙物理学家和土壤风蚀研究者进行风蚀研究的首选工具。

土壤风蚀研究最重要的两种方法: ①现场实测法。通过在野外现场 (农田等) 布置集沙仪直接测量。②实验模拟法。包括室内 (固定式) 风蚀风洞模拟实验和野外风蚀风洞模拟实验。室内开展风洞模拟实验前, 需要从野外现场挖取一定规格的土样放置于风洞实验段, 通过风扇系统产生各种等级的风力以模拟自然风场。其存在的主要问题是研究所使用