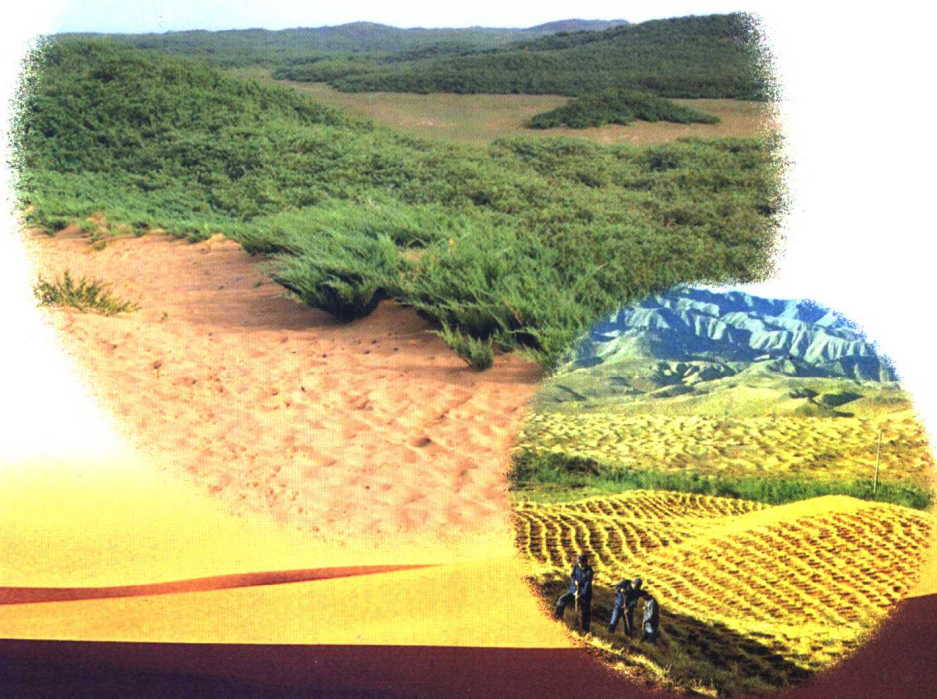


沙害防治技术

陈广庭 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

沙害防治技术

陈广庭 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

沙害防治技术/陈广庭编著. —北京: 化学工业出版社,
2004. 2

ISBN 7-5025-5155-7

I. 沙… II. 陈… III. 沙害-防治-技术 IV. P941.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 005781 号

沙害防治技术

陈广庭 编著

责任编辑: 侯玉周

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 顾淑云

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 18 字数 318 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5155-7/X · 371

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

实施西部大开发，加快中西部地区发展是党中央国务院根据邓小平同志关于我国现代化建设“两个大局”的战略思想，高瞻远瞩、审时度势、总揽全局，面向新世纪做出的重大战略决策，对于加快我国现代化建设步伐，维护国家和社会稳定，实现中华民族的伟大复兴，具有十分深远的意义。

2000年起，西部大开发迈出了实质性的步伐。每年有上千公里高等级公路通车、世人瞩目的青藏铁路建设也在夜以继日地向前推进。生态建设方面，国家在继续进行三北防护林工程建设的同时，开展了全国防沙治沙工程和退耕还林(草)工程。这些政策和工程已经取得一定的效益。根据最近的监测和实地考察，20世纪80年代我国北方沙漠化严重发展的农牧交错区已有大面积的沙漠化土地得到了不同程度的治理。

西部有着丰富的自然资源。但是生态环境脆弱，自然条件严酷，水资源匮乏，干旱、严寒和风沙、冰雪、滑坡、泥石流等灾害经常发生。历史上西北地区开发较早，我们的祖先在西北荒原上开创了灿烂的丝绸之路文明，为人类社会的进步做出了重大的贡献。但是，由于人类过度开发利用自然资源，生态环境遭到大范围的破坏，在半干旱草原牧区、农牧交错地区和干旱区绿洲，出现了沙漠化土地迅速发展的严

重危害，并且总体上处在“局部治理、总体发展”的局面。在进行西部大开发时，我们应该汲取历史的经验教训，依据西部环境的特点，合理开发利用自然资源，按环境本身的规律办事，保护、修复和重建西部生态环境，给子孙后代留下适宜生存的环境。

随着西部大开发战略和中国科学院“知识创新试点工程”的实施，我国的沙漠科学也迎来了发展的大好时机。2001年，温家宝同志批示：“沙漠科学研究和治沙工作，对于改善我国生态环境，促进经济和社会发展，具有特殊的重要性。沙漠研究所是综合研究沙漠和沙漠化的科研机构。要重视和加强研究所的工作，充分发挥其人才集聚、专业齐全、具有雄厚研究基础的优势，为我国沙漠化的研究和治理做出新的贡献。”2000年“中国北方沙漠化过程及其防治研究”项目被列入科技部《国家重点基础研究发展规划》，项目研究的重点放在沙漠化治理的原理、战略措施、模式、技术方法方面。

陈广庭先生是我所研究员和博士生导师。他曾从事多项科研工作，积累了丰富的知识。他主持“八五”国家重点科技攻关课题“塔里木沙漠石油公路防沙治沙技术研究”和“塔中4油田联合站防沙工程”，主持设计了塔里木沙漠公路全线的防沙工程，获得国家科技进步一等奖、中国科学院“有突出贡献的中青年专家”称号和香港求实科学基金会“重大科技成就”奖。

由陈先生主笔编写的《沙害防治技术》，总结了我所沙漠与沙漠化重点实验室的老一代沙漠科学工作者在沙漠辛勤耕耘所获得的经验，希望能给立志治沙事业的年轻人一些有益的指导。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所所长



2003年11月

前 言

20 世纪末，党中央根据邓小平同志关于我国现代化建设“两个大局”的战略思想，高瞻远瞩、审时度势、总揽全局、与时俱进，做出了“实施西部大开发，加快中西部地区发展”的重大战略决策，并且把西部生态和基础设施建设放到先行的重要位置。中共十六次代表大会对我国全面实现小康社会，推进中国特色的社会主义现代化建设做了部署，给西部开发增添了新的动力。

我国西部国土辽阔，能源矿产资源丰富，少数民族聚居，生态环境退化，人民生活相对贫困。西部大开发战略就是为缩小地区差距、贫富差距，为我国实现全面小康，达到中等发达国家水平而采取的重大决策。干旱和由干旱所引起的一系列环境问题是我国西北五省和内蒙古开发建设和经济、社会持续发展首先要面对的重大问题。

西北五省和内蒙古地区的干旱是所处地理位置、大气环流、地质地理条件所决定的，合乎自然规律的和本质性的现象，是不以人的意志为转移的基本生态环境条件。沙漠是干旱区特有的和常见的地理单元，是地球不可或缺的部分；沙漠化实质是在干旱区气候进一步干旱化的基础上，人类的过度开发活动所导致的生态环境进一步恶化。我国西北五省和内蒙古，并包括毗邻的地区有沙漠、戈壁、风蚀地和沙漠化土地 156.6 万平方公里。风沙灾害是进行西北（包括内蒙古）

和西藏地区大开发，进行工业、交通建设，能源、农业开发建设首先要遇到的问题。

土壤风蚀、风沙流、流沙堆积和沙丘迁移等风沙活动是沙漠和沙漠化土地共同的环境特征。气候干旱、缺少植被覆盖的地方，只要地表有足够的沙物质、风速大于 $4\sim 5\text{ m/s}$ 等起沙风的基本条件，便会出现风沙活动。

应当说，风沙问题不是今天才遇到的新问题，治沙也不是今天才摆在我们面前的新任务。从古到今，生活在西北风沙地区的人们，为了能在这里生存下去，在与风沙斗争中积累了不少治沙经验。风沙研究者也对沙粒起动、运移规律，对风沙流特性等做了深入的研究。遗憾的是，对风沙物理学的研究与群众治沙经验缺乏有机的结合。本书就是抱着衔接两个方面的目的，一是总结我国 50 年的治沙经验，二是用风沙物理的概念解释防沙工程设置的原理，努力解决防沙工程中“怎么办”和“为什么这样办”两个问题。客观地说，进行二者的结合并非易事，又限于个人的知识水平、从事工作地域以及所遇到问题的局限性，谬误之处难免。

本书分五章。第一章介绍了风沙灾害的概念，风沙危害的方式和治理方法分类，还回顾了群众在与沙害抗争过程中发现和创新治沙方法以及风沙工程学者研究风沙危害的进展；第二章集中介绍了风沙运动的一些规律。包括近地风的性质，运动沙的性质和二者形成气固两相流——风沙流的过程，风沙流的结构特征，风沙流与地面沙物质之间不断变换的蚀积关系。最后还介绍了常用风沙物理参数的获取方法；第三章集中介绍生物固沙的原理和方法；第四章介绍了非生物的各种防治沙害的方法原理。第五章举出中国农田、工矿交通防沙治沙的工程实践，还介绍了沙区群众治理风沙，改造沙丘，扩大耕地的“土”办法。

我们已经进入一个法制的时代。依法办事是每一个公民的行为准则。本书的最后还特别附录了对许多人来说还不怎么熟悉的《中华人民共和国防沙治沙法》。

感谢化学工业出版社出版这本书。本书由陈广庭执笔编写，张志谦、赵存玉协助校对植物拉丁名称；全书的插图由何宝山同志清绘。希望能为征战沙漠，为从事沙漠地区各项建设事业的人们与风沙危害作斗争中提供一些可以借鉴的经验。也是对关心沙漠治理事业的人们的一种报答。

编者
2003 年 12 月

目录

第一章 风沙灾害 1

一、沙害的概念 2

二、风沙危害方式 3

1. 土壤风蚀 3
2. 磨蚀 5
3. 沙割 6
4. 沙埋 7
5. 沙尘暴和浮尘 9
6. 土地沙漠化对环境的影响 10

三、沙害和治理方法类型 11

四、沙害和沙害防治研究历史回顾 13

第二章 风沙运动的一般原理 17

第一节 近地风的性质 17

一、近地层风的紊动 18

二、风速沿垂直高度的分布 20

1. 稳定床面上的风速分布 20
2. 动床床面上的风速分布 24

第二节 沙物质 26

一、机械组成和形态特征 26

1. 机械组成 26
2. 沙粒颗粒形态和表面形态特征 30

二、化学成分和工程物理性质 33

1. 沙物质的矿物组成 33
2. 工程物理性质 34
3. 沙物质的化学组分 35

第三节 风沙流的性质 36

一、风沙流形成机制 37

1. 沙粒受力起动 37
2. 沙粒起动风速 43

二、沙粒在气流中的运行 46

1. 风力作用下沙粒运动的方式 46
2. 沙粒跃移运动的特征 49

三、风沙流的结构特征 52

1. 含沙量沿垂线的分布 52
2. 风沙流结构特征 55

四、风沙流输沙能力 57

1. 输沙率 57
2. 输沙率的野外测定 61
3. 风沙流饱和态与地面蚀积 62

第四节 野外风沙观测 63

一、野外风沙观测常用仪器设备 64

1. 风速仪 64
2. 集沙仪 65

二、常用风沙物理参数观测 66

1. 地面粗糙度观测 66
2. 沙粒起动风速观测 66
3. 输沙率观测 67

三、地形形态变化观测 68

1. 插钎法 68
2. 反复地形观测法 69

第三章 生物防沙 70

第一节 植被的物理意义和防沙原理 71

1. 植被层存在的物理意义 72
2. 植被层的作用 76

第二节 防沙植物的选择 81

1. 干旱区环境对防沙植物的基本要求 81
2. 我国各地常见固沙植物 82

第三节 沙区天然植被保护 86

1. 西北干旱区封沙育草的作用与可行性 87
2. 封沙育草区的管理和利用 90
3. 封育和保护荒漠林, 维护荒漠生态平衡 95

第四节 防护林体系建设 101

1. 绿洲周边防风阻沙林带的营造 101
2. 丘间低地造林固沙 104
3. 绿洲护田林网的营造 105
4. 旱农地区护田林网的营造 107

第五节 防止风蚀的农业措施 109

一、退耕还林还草, 进行农村牧区经济发展的战略调整 109

二、旱农地区防治风沙危害的农业措施 110

1. 改善土壤结构, 提高土壤肥力 111
2. 利用作物残留覆盖, 控制风蚀 113
3. 不同作物或草田带状间作 115
4. 营造灌丛林带

第六节 人工植被固沙 117

一、人工植被建设和前期的沙面固定措施 117

二、沙生植物人工繁育 121

1. 直播 121
2. 扦插 122
3. 压条 123
4. 苗木移栽 123

三、飞播植物固沙 124

四、灌溉、施肥 127

第七节 若干固沙植物种植技术要领 129

1. 黄柳 129
2. 胡枝子 130
3. 山竹岩黄蓍 130
4. 沙棘 131
5. 紫穗槐 131
6. 锦鸡儿 132
7. 沙蒿 133
8. 樟子松 134
9. 杨树 135
10. 胡杨 136
11. 花棒 137
12. 羊柴 138
13. 沙枣 140
14. 沙拐枣属 141
15. 沙地柏 142
16. 梭梭 143
17. 柺柳 145
18. 沙冬青 146
19. 铃铛刺 147
20. 巨野麦 147

第四章 工程治沙 149

第一节 机械阻沙 150

一、挡沙墙 150

二、截沙沟 152

三、阻沙栅栏 152

1. 扎制方法和埋设部位 152
2. 栅栏阻沙的基本原理 154
3. 影响栅栏工程效益的因素 158
4. 阻沙栅栏的效益评估 160

四、防沙网 161

第二节 沙障固沙 163

一、草方格沙障 163

1. 方法、部位和规格 163
2. 固沙原理和作用 165
3. 影响草方格固沙效应的因素 168
4. 草方格固沙效益评价 171

二、黏土沙障、砾石沙障和硬化沙埂沙障 175

三、沙袋沙障 178

四、散撒沙障 179

第三节 覆盖-黏合固沙 179

一、覆盖物封闭固沙 179

二、黏合剂固沙 181

1. 固沙剂黏合治沙发展概况 181
2. 固沙剂黏合治沙的原理、方

法及材料 186 3. 固沙剂黏合固沙工程施工工艺 193 4. 固沙剂黏合固沙效益 196

第四节 输导防沙 208

一、输沙断面 209

1. 输沙断面的作用原理 209 2. 公路输沙断面实例 211

二、下导风工程 214

1. 工程效益的风洞模拟实验 216 2. 野外试验和应用 217

三、羽毛排导沙 219

1. 羽毛排扎制方法 219 2. 羽毛排工程的作用原理和防沙机制 220 3. 羽毛排工程的设计原则 222

第五章 中国防沙体系工程建设 223

第一节 对沙害的宏观控制治理工程 223

1. 全国防治荒漠化工程 223 2. “三北”地区防护林体系建设工程 224 3. 京津周围风沙源治理工程 225

第二节 农田沙害防治工程 225

1. 要有明确的整治目标 226 2. 因地制宜的防治措施 226 3. 健全而完善的治理实施系统 226

一、新疆和田，代表极端干旱地带绿洲沙害的防治 228

二、甘肃临泽平川，代表干旱地带绿洲周围沙害的治理 229

三、陕西榆林，代表半干旱地带农牧交错区西部沙害的防治与沙地的开发利用 231

四、内蒙古奈曼旗，代表半干旱地带农牧交错地区东部沙害的治理 233

1. 较为开旷甸子地的坨甸交错地区以农为主的沙漠化土地整治 233
2. 坨甸交错，以固定及半固定沙丘为主，流沙星斑点状分布地区以牧业为主的沙漠化整治 234 3. 波状起伏的沙漠化土地治理 235

4. 邻近农田边缘沙丘起伏较大，丘间甸子地面积较小，以密集流动沙丘为主地区的沙漠化整治 225

五、河南延津及山东禹城等，代表半湿润地带黄淮海平原上斑点状沙害的治理 236

六、江西南昌，代表亚热带湿润地区河湖沿岸沙害的治理 237

七、广东福建沿海，代表热带湿润地区海岸沙丘的沙害治理 238

八、青海共和县沙珠玉，代表高寒地带沙害的治理 238

第三节 中国工矿交通沙害防治 239

一、包兰线沙坡头段铁路防护体系，代表流动沙丘地区铁路沙害防治 240

1. 包兰铁路中卫—干塘段沙害的一般情况 240 2. 阻固结合的防护体系 241 3. 植物固沙带的建立 242

二、兰新线玉门段铁路防护体系，代表戈壁地区铁路沙害防治 245

三、塔里木沙漠公路和塔中油田防沙工程，代表极端干旱区流动沙漠地区工矿交通的沙害防治 247

1. 沙漠公路沙害防治 249 2. 沙漠腹地公路和油田基地生物防沙和绿化 250

四、东胜精煤矿区，代表半干旱沙地地区工矿开发建设中沙害的治理 256

第四节 群众在治沙中的创造 257

一、风力拉沙——前挡后拉 257

1. 后拉不前挡 258 2. 先前挡再后拉 258 3. 乔、灌、草一齐上 259 4. 乔、灌、草结合前拉后挡 260 5. 高杆乔木直接上沙丘 261

二、引水拉沙，削平沙丘造田 261

1. 抓沙顶 262 2. 野马分鬃 263 3. 旋沙腰 263 4. 劈沙畔 264 5. 梅花瓣 264 6. 麻雀战 264 7. 羊麻肠 264

附录 中华人民共和国防沙治沙法 266

参考文献 275

第一章

风沙灾害

“风沙”是风沙运动的简称。可以简单理解为风吹沙（土）移动现象。地面物质被风吹动，从静止状态进入运动状态，称为风蚀。随风运动的物质其动能耗尽，重新停积下来，就是风积。沙粒（包括土粒）运动的方式有三种：贴近地面的蠕动（蠕移）、在近地面层一定高度跳跃（跃移）和在低空大气层中的悬浮移动（悬移）。风沙活动的天气现象也有三种：扬沙天气指近地面层的风沙活动，沙粒运动的方式包括蠕移和跃移；出现沙尘暴时风力强大，除近地面有沙粒的蠕移和跃移外，低空有沙尘的悬移，沙尘随空气在低层空气中做垂向的运动也是沙尘暴沙物质的重要特征；浮尘天气则主要是受沙尘暴影响的区域，或是沙尘暴过后出现的大气浮尘较长时间在空中悬浮，影响能见度的现象。防沙工程治理的对象主要为近地面蠕移和跃移的风沙。就目前的技术水平，防治沙尘暴还主要靠沙尘暴源区（产生风暴的中心）和路径的地面防护，防止地面风蚀起沙，沙尘暴一旦出现就很难对付，只能设法减少灾害损失。

风沙流是一种“大气+沙粒”的气固两相流。

风沙运动的实质是陆地表层（土壤）颗粒受到风能的驱动，脱离原在空间，运动（位移）和在异地堆积的过程。土壤或岩石颗粒被风吹失称为风蚀，被风蚀的土壤颗粒进入气流，气流夹带沙土颗粒成为夹沙气流。这种夹带沙粒的气固两项流一方面比“净”气流具有更大的动能，对土壤（或岩石）和构、建筑物具有更大的风蚀能力；另一方面由于气体和固体的质量差别很大，介质（空气）和被载运的质子（沙土颗粒）之间很容易产生分离，被载运的土壤颗粒随时随地停积，即堆积，同时又有新的质子加入运动的行列。这种气流和所经地面间的物质交换随时都在进行之中。自然界的沙土颗粒，包括沙丘的移动，都是通过夹沙气流的运动来实现的。

沙害是风沙危害的简称。风沙运动经常改变着地球的形态，对地球表面的形态，包括植被产生破坏。人类的构、建筑物也毫无例外地受到风沙的危害，

风沙危害的实质是夹沙气流对人工植被及构、建筑物的风蚀或堆积造成的破坏。人们开垦土地，修筑房屋、道路等构筑物本身改造着地形形态，目的是改善自然环境为自身服务。风沙运动反其道行之，或者吹蚀土壤、掏蚀路基和磨蚀路面，或者在田地、房前屋后或路面积沙，小到减少土地收获、影响居住或行车安全，大到荒废土地、废弃住宅和道路。

地球是一个独特的球体，岩石圈和水圈的不均匀分布造成了陆地和海洋的分异，大气圈空气密度（压力）的不均匀形成了气体的流动（风场），大气圈与直接暴露的陆地表面接触经常发生风沙运动。生物圈对风沙运动起着复杂的影响，植被隔离大气圈和岩石圈，阻尼并影响风速，根系固着松散土壤颗粒，增加土壤抵抗风蚀的能力。动物采食植物，适度的采食会促进植物的生长，过度采食则破坏植被；动物还践踏土壤、破坏土壤结构，降低土壤的抗风蚀能力。人类是有意识支配的高级动物，人类为了自身的生存和发展在不断利用自然和按自己的意志改造着自然。要驾驭自然，首先要顺应自然的规律，大气圈、岩石圈和生物圈之间的相互作用，既创造了绚丽多彩的世界，也出现了许多不依人的意志为转移的自然现象。其中，有些现象对人的生活 and 生产活动有负面的影响，这就是灾害现象。

一、沙害的概念

什么是灾害？很难用三言两语讲清楚。日本学者金子史郎在其撰写的《世界大灾害》一书中，给灾害下了一个这样的定义：“它是一种自然现象，与人类关系密切，常会给人类生存带来危害或损坏人类的生活环境。这样的自然现象就称为灾害。”近十几年灾害科学兴起，灾害研究已经超出了“纯粹的”自然灾害的理念，如气候异常、海平面上升、酸雨、尘暴、沙漠化等生态环境灾难都打上了人类活动的烙印。并且，作为威胁人类生存和有损于人类自身利益的社会现象，诸如人口失控、交通事故、不慎失火、三废污染、车祸、战乱等也都成为灾害科学研究的范畴。现代“灾害”比较贴切的定义为：灾害是由自然原因、人为因素或二者兼有的原因，给人类的生存和社会的发展带来不利后果的祸害。灾害并不是单纯的自然现象或社会现象，而是一种自然-社会现象，是自然系统与人类物质文化系统相互作用的产物。

过去，我们通常所说的沙害限于风沙流和沙丘移动所造成的对农田、牧场、交通和工矿居民点的危害。沙害的实质是在风力作用下，地面沙物质在吹蚀、搬运和堆积过程中，对人类生活和生产设施的危害。而防沙、治沙或防沙、治沙工程即是采取各种技术措施，减少气流中的输沙量，削弱近地表风速，延缓或阻止沙丘前移，以达到削弱或避免风沙危害的目的。

随着土地沙漠化在世界的蔓延,沙害的概念也大为拓展。联合国防治荒漠化公约给荒漠化所下的定义为:干旱、半干旱和半湿润干旱地区的土地退化。并明确地把风力侵蚀及其堆积所造成的土地生产力下降,乃至土地资源丧失的环境退化过程(即沙漠化)作为荒漠化的最主要类型。这样“沙害”就不仅仅指风沙流和沙丘前移的具体危害,还包含整个生态环境退化、土地资源损失以及连带引起的地区经济滞缓,社会不稳定等的社会政治、经济问题,其核心是生态环境恶化。防沙治沙也从纯技术问题拓展到保护和改善生态环境,并且涉及地区环境、经济持续发展的方针、政策。例如 2002 年全国人民代表大会所通过的《防沙治沙法》,就涵盖了全国生态环境保护和治理的诸多问题(见附录)。

本书仍然以传统的,即狭义的沙害概念为准,所说的防沙治沙也以传统的具体工程、生物措施为主。

风沙运动、风沙现象,有时干脆简称为“风沙”,是风吹沙移现象的简单说法。它包括沙物质受风力作用,脱离原位置——风蚀、被风搬运和异地沉积的全部过程。风沙运动塑造地形形态,风沙流吹蚀树木的根基,掏蚀构(建)筑物的基础;风沙运动过程中产生的流沙停积可能压埋农田、沟渠或其他人类构(建)筑物;夹沙气流(风沙流)割打农作物的茎、叶,损坏植物的组织,还磨蚀构(建)筑物或机械设备,例如,风沙地区的铁道路轨要比非沙区磨蚀损失快得多。有人做过试验,风沙流对道轨的磨蚀量比净风要大数十倍。

人们通常所说的“沙害”是风沙危害的简单说法;“防沙”即通过各种人工措施,防治或减轻这种危害的损失。在这里风沙危害显然是指风沙运动过程中所产生的风蚀和风积对人类生活和安全生产的威胁。

二、风沙危害方式

1. 土壤风蚀

常见的地面风蚀现象称土壤风蚀,土壤风蚀是运动的空气流与地表颗粒在界面上相互作用的一种动力过程,它是沙粒运动和风沙流形成的开始。风蚀可分为迎面吹蚀、底面潜蚀和反向掏蚀三种。它们的主要作用力分别是风作用力、形状阻力或涡旋阻力和渗透压力。迎面吹蚀一般发生在物体或沙丘的正面;潜蚀发生在地表层里;而掏蚀则发生在背风面和侧面。迎面吹蚀使丘体逐渐萎缩,迎风面向上倾斜;而背面发生反向流动,进行反向掏蚀,形成凹口或凹陷带。所谓侧面副流和返弹回流,实质上是一种二次流,对物体产生侧向掏蚀。潜流指固体物质之间缝隙中的气流对物体的风蚀,如果地表是戈壁或草地,潜蚀就会发生,使地表粗化和裸露。

自然界的风蚀是错综复杂的，一般都是正向吹蚀和反向、侧向掏蚀同时进行，风蚀和沉积相间出现。常见的土壤风蚀是一个缓进的变化过程，形成风蚀凹地、风蚀蘑菇和风城地形。但沙尘暴过程中，由于空气不稳定，垂直上升力的强烈作用，土壤风蚀迅速，在疏松的耕地中常能一次吹蚀 5 cm 厚的土层。

由于自然条件错综复杂，地表状态千差万别，使得通过野外直接观测来研究土壤风蚀碰到了许多预想不到的困难。因此，利用风沙环境风洞来进行土壤风蚀的实验研究，早已受到风沙物理和土壤风蚀研究者的极大重视。20 世纪 30~40 年代，拜格诺就利用室内沙风洞对风沙运动进行了广泛的实验研究；50~60 年代初，W. S. 切皮尔（1950~1963）曾多次利用室内回型风洞及野外轻便土壤风蚀风洞，对影响土壤风蚀的因子如表面空气动力学粗糙度（以下简称粗糙度）和干团聚体结构、容重，以及影响土块结构及土壤风蚀度的水稳定性结构等土壤特性进行了一系列的实验研究，得出无植被干扰下影响土壤风蚀诸因子的一系列规律：

① 土壤表面粗糙度常数随风速、易风蚀部分土壤颗粒机配、形状及容重而变化。一地的环境条件比较稳定的情况下，只要该土壤表面的粗糙度常数在该地的较大风速下达到临界值，那么在通常的风速下，就不会发生风蚀。这就是风蚀防治的根据。

② 土壤风蚀量随易风蚀部分（颗粒或团块）容重的平方根而变化。且与其当量直径（等于 $\frac{d\sigma}{256}$ ， σ 是直径为 d 的分散土粒或团聚体的容重）的平方根成反比。

③ 土壤风蚀度和直径 <0.02 mm 及 >0.84 mm 的水稳定性颗粒的百分比成反比。

我国学者董光荣等（1986）、贺大良等（1986）、刘贤万等（1990）利用野外采集的原状土样做的草原土壤风蚀风洞实验的初步结论有：

① 一般退化草场的风蚀率，在连续 11 级大风（无沙源）条件下，仅 10^{-3} g/(cm² · min)；而前方有沙源（定供）的条件下，可达 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ g/(cm² · min)。对稍湿的退化草场及沙砾质荒滩吹蚀率略低一些，但量级基本相同。这是一个十分巨大的数值，如按美国农田最大容忍风蚀率 12.5 t/(a · hm²) 计算，实验结果将是此标准的 10~100 倍。

② 土壤风蚀量与指示风速值呈近似 3 次方关系，而挟沙风比纯气流风蚀量大 4 倍（粉沙质壤土）和 5 倍（固定风沙土）以上。

③ 一般退化草场风蚀过程的顺序是：坑蚀、掏蚀、沟蚀和片蚀，形成不同沙漠化草场景观；而沙砾质荒滩，由于直接吹蚀、掏蚀和潜蚀，主要是产生

不同程度的粗化。

④ 植被和粗颗粒物覆盖都有较强的抗风蚀能力。风蚀对突起的土体迎风面要比平坦地表强烈。翻耕和牲畜过分践踏都会大大提高土壤的风蚀量。

土壤风蚀的风洞实验表明,在同一风速下,挟沙气流对土壤的风蚀量是净风对土壤风蚀量的4~5倍。这是因为净风中土壤表面颗粒仅受到风的作用力,而在挟沙气流中还有跃移和滑移沙粒对土壤表面产生的冲击和摩擦。因此,风沙的磨蚀作用大大加剧了土壤风蚀。风沙的磨蚀在各种风蚀地貌(风棱石、风蚀柱、风蚀蘑菇、风蚀雅丹和风城等)的发育过程中看得最为清楚。

必须指出,风洞试验也还有许多重大的问题没有解决。首先,沙粒、试验模型与有限空间和野外无限空间实物、实际地形是无法比拟的,风洞试验的相似性问题始终缠绕着风沙物理研究者。其次,模拟气流并不能代表真正流场,也即试验气流过于的简化。尽管如此,在目前,通过风洞试验进行风蚀过程和风沙物理的研究还是惟一可以简化条件参数,在较短时间内研究较长时间的风沙物理过程的最可靠方法。

2. 磨蚀

挟沙气流对建筑物、设备设施的摩擦损失称为磨蚀,以物体的外打磨和沙尘进入机械转动部分产生的内研磨等造成对物体的危害。

风沙流对物体的外打磨,是指其对物体四周的打磨作用。然而,物体各面的受力是不同的,当加沙气流吹蚀圆形或扇形的物体表面时,气流分离。大约有43%左右表面是迎面吹蚀,压力是正的,其他表面压力是负的。表面压力为负值时,表面受到的是形状阻力或涡旋阻力作用,产生反向掏蚀。对于非光滑、非标准圆柱,由于有棱角、有凹槽,流体绕流的分离线就不随流体速度而变化,而是固定在棱角线上发生。当气流变成风沙流后,正面风蚀和反面掏蚀就要强烈得多。因为风沙两相流体的密度比气流大,粗颗粒发生迎面冲击,细颗粒起研磨剂作用,因此,对物体的撞击磨蚀作用比纯气流大得多。

强沙尘暴过程中,在密集沙土颗粒持续不断的撞击下,暴露在风沙流中的物体要经受巨大的冲击力。1999年4月24日,汽车行进在南疆托克逊-吐鲁番路段时,遇强沙尘暴,汽车挡风玻璃被风沙砸碎,司乘人员被救援离开车辆,后半夜沙尘暴停止,车辆暴露在沙暴中约9h,吉普车(北京213)下半身被积沙埋没,车身三面的喷漆被打掉,内部机械磨损损坏。据了解,在戈壁地区,无风沙线路14~15年的铁路钢轨垂直磨耗仅1mm,而风沙线路能达4~9mm。

风沙流打磨高度与风沙流运动高度是一致的。平沙地上,当风速不大时,一般只有数厘米高度;在较大风速下,也超不过几十厘米。对低矮沙丘群,一