

中国风沙防治工程

王 涛 等 / 编著



科学出版社

中国风沙防治工程

王 涛 等 / 编著



科学出版社

北 京

谨以本书纪念中国沙漠科学研究 60 周年！并纪念中国沙漠科学研究的开拓者和奠基人朱震达先生！

本书的出版由国家重点基础研究计划“干旱区绿洲化、荒漠化过程及其对人类活动、气候变化的响应与调控”项目(2009CB421300)资助！

前 言

实践出真知！任何一门自然科学都是人类认识生存环境、适应环境条件和利用自然资源的经验总结。

中国的沙漠与沙漠化科学有计划、有组织、有目标的研究与实践真正开始于铁路的风沙防治工程，即 20 世纪 50 年代早期，建设中的包头-兰州铁路必须通过腾格里沙漠南缘 40 多公里的流动沙丘地带，遇到如何维护风沙危害环境下的铁路正常运营和保障列车安全通过的问题，通过第一代沙漠科技工作者的努力，圆满地解决了关键科学问题，完成了系统的铁路风沙防治工程，取得了显著的经济-社会-生态效益，很好地为国家经济建设任务做出了贡献！今天，沙漠与沙漠化科学已成为一门独立的学科，她迈出的每一个脚印无不是在瞄准国家重大需求、解决重大工程的风沙危害问题而获得进展的。近 60 年前建立的沙坡头沙漠科学研究所，已经发展成为享誉中外的沙漠与沙漠化科学研究和实践的基地。包兰铁路沙坡头段风沙防治工程创造了中国乃至世界沙漠铁路建设史上的奇迹，形成的风沙防护体系模式确保了包兰铁路 50 余年畅通无阻成果获得了“国家科技进步特等奖”，成为联合国第一批“全球环境 500 佳”单位。沙坡头的防沙治沙经验已经走向全国、全世界，从铁路延伸到公路和沙漠油田基地，从工矿交通延伸到农田、牧场，从流沙地区延伸到戈壁地区，一条条穿越塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠、库布齐沙漠的沙漠公路串联起沙漠中的人工绿地，使“死亡之海”变成石油工业的支柱和旅游胜地。我们已经积累了针对穿越沙漠、戈壁铁路和公路、沙漠区文物名胜和海滨沙地的风沙防治技术，风沙运动与灾害防治工程已经发展成为沙漠与沙漠化科学的重要分支——风沙防治工程学，现在是对这些工程理论和实践进行系统总结的时候了。

地球是已知的唯一一个存在高级生命的星球，阳光、空气、水和陆地是陆生生命存在四要素。自从出现海陆分离，地球上就有风沙运动。“风沙”是风吹沙尘移动现象的通俗称谓，指的是沙尘物质被风动力驱使，脱离原来位置（风蚀），移动（搬运）到异地堆积（风积）的过程。对生活在风沙区的人类生存环境 and 经济活动来说，风沙运动过程就伴随着风沙灾害。为适应风沙环境，避免风沙危害人类，整治和改善风沙环境是根本，中国沙漠与沙漠化科学的先行者朱震达先生写道：“治沙工程的实质即风沙环境的整治，一方面是如何使已经发生沙害的土地得到防治（包括工矿、道路），恢复其生产力，使土地退化的

状况得到改善;另一方面对具有潜在沙害危险的土地是如何预防其发展,使土地资源得以可持续利用,交通得以畅通无阻,发挥更大效益”。

数学家追求用最简单的数学公式解析复杂的问题,风沙防治工程追求的是用最简单易行的方法解决风沙危害问题,常用的防治风沙技术看似简单,如草方格固沙、栅栏阻沙等;方法虽然简单易行,但内含着深奥的道理,有些机制至今仍众说纷纭。工程中遇到的许多问题靠科学实验来解决,“工程以科技为先导,科研以工程为依托”是风沙防治工程成功的基本经验之一。

在中国科学院沙坡头沙漠科学研究所建站 30 年的时候,陈舜瑶在她的《沙都散记》一书中歌颂了几代治沙人面对艰苦生活环境“甘之若饴”和对科学求真务实、开拓进取的精神面貌;对于我们新一代沙漠科学工作者而言,在继承老前辈“甘于吃苦,团结协作,积极探索,勇于奉献”精神的同时,应该努力地学习和工作,为沙漠与沙漠化科学的发展服务。为此,我们组织一些亲身经历和正在承担一些重大风沙防治工程的人员,本着总结已有的经验和成果,为国家在西部大开发中实施的更多风沙灾害防治工程提供比较翔实资料的目的,编写了这本《中国风沙防治工程》专著。

本书由王涛统稿。各章编写分工如下:

第一章 绪论 王涛执笔

第二章 中国风沙环境 王涛执笔

第三章 风沙防治的风沙物理学基础 董治宝执笔

第四章 风沙防治的工程地质学基础 姚正毅执笔

第五章 风沙灾害防治的技术原理与措施分类 王涛、陈广庭执笔

第六章 防治风沙危害的工程措施 王涛、张伟民执笔

第七章 生物治沙措施 赵哈林执笔

第八章 沙产业与沙区资源 董治宝、王涛执笔

第九章 中国风沙治理工程的基本模式 王涛执笔

第十章 国家生态建设与风沙防治工程 陈广庭执笔

第十一章 风沙区农田沙害防治 赵哈林执笔

第十二章 包兰铁路宁夏中卫沙坡头段流沙治理 陈广庭执笔

第十三章 兰新铁路玉门段戈壁风沙流沙害防治 陈广庭执笔

第十四章 青藏铁路(格拉段)沿线风沙灾害特点及应对措施 屈建军、姚正毅执笔

第十五章 塔中沙漠公路防沙体系建设——以塔中沙漠公路为例(上) 陈广庭执笔

第十六章 塔中沙漠公路防沙体系建设——以塔中沙漠公路为例(下)
陈广庭执笔

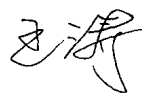
第十七章 塔中油田基地防沙与绿地建设 陈广庭执笔

第十八章 世界文化遗产地保护——敦煌莫高窟风沙防护工程 王涛、
张伟民执笔

第十九章 海岸风沙防治 屈建军、张克存执笔

《中国沙漠》编辑部的金炯编审、郝美玲副编审为本书在编辑、排版和图件制作付出了辛勤的劳动，特此表示衷心感谢！

由于作者水平有限，在编写本书过程中错漏和不足之处在所难免，敬请读者和专家批评指正。



2010年12月于兰州

目 录

前言

第一篇 理 论 篇

第一章 绪论	3
第一节 风沙防治工程学及其研究内容	3
第二节 国内外风沙防治工程的回顾和展望	5
参考文献	12
第二章 中国风沙环境	14
第一节 中国沙区自然环境基本特征	14
第二节 中国风沙环境的形成与演化	36
参考文献	60
第三章 风沙防治的风沙物理学基础	62
第一节 近地层气流	62
第二节 风沙颗粒的起动	70
第三节 风沙流通量廓线	81
第四节 沙丘移动	93
参考文献	110
第四章 风沙防治的工程地质学基础	114
第一节 中国风沙堆积的物理特征	114
第二节 风成沙的化学成分和矿物成分	131
第三节 风成沙的工程力学特征	132
参考文献	137

第二篇 技 术 篇

第五章 风沙灾害防治的技术原理与措施分类	141
第一节 防风固沙技术原理	141
第二节 措施分类	163
参考文献	170
第六章 防治风沙危害的工程措施	171
第一节 工程防沙简述	171
第二节 格状沙障	171
第三节 阻沙栅栏	178
第四节 覆网措施	186
第五节 砾石铺压	192
第六节 喷洒固沙剂措施(DST)	197
参考文献	201

第七章 生物治沙措施	202
第一节 天然荒漠林保护.....	202
第二节 绿洲防风阻沙林带建设.....	210
第三节 封沙育草与植物固沙.....	219
参考文献.....	229
第八章 沙产业与沙区资源	231
第一节 沙产业.....	231
第二节 气候资源.....	238
第三节 水资源.....	248
第四节 土地资源.....	260
第五节 植物资源.....	265
参考文献.....	268

第三篇 工 程 篇

第九章 中国风沙治理工程的基本模式	271
第一节 若干典型地区风沙治理工程的实例分析.....	271
第二节 若干重大工程的防沙体系建设实例分析.....	277
第三节 中国治沙工程的模式.....	280
第四节 风沙灾害治理工程中值得重视的若干问题.....	282
参考文献.....	285
第十章 国家生态建设与风沙防治工程	286
第一节 实施国家生态和风沙治理工程的背景条件.....	287
第二节 《全国生态环境建设规划》和《全国生态环境保护纲要》.....	289
第三节 国家重大风沙防治和防治荒漠化工程.....	304
参考文献.....	309
第十一章 风沙区农田沙害防治	310
第一节 风沙区农田沙害主要特征.....	310
第二节 沙区农田的保护.....	315
第三节 沙害农田的治理与改造.....	327
参考文献.....	333
第十二章 包兰铁路宁夏中卫沙坡头段流沙治理	335
第一节 腾格里沙漠东南缘的环境条件.....	336
第二节 铁路防沙体系的建立.....	343
第三节 生态环境变化和防沙效果.....	364
参考文献.....	373
第十三章 兰新铁路玉门段戈壁风沙流沙害防治	375
第一节 兰新铁路玉门段的自然环境.....	376
第二节 玉门段铁路防沙林体系建设.....	397
参考文献.....	420
第十四章 青藏铁路(格拉段)沿线风沙灾害特点及应对措施	422
第一节 青藏铁路沿线自然概况.....	423
第二节 青藏铁路风沙灾害形成发育特点.....	429

第三节 青藏铁路格拉段沙害现状调查与趋势分析·····	431
第四节 现有防沙措施防沙效益监测和评价·····	445
第五节 防沙新材料开发·····	452
第六节 青藏铁路格拉段沙害综合治理模式·····	458
参考文献·····	464
第十五章 塔中沙漠公路防沙体系建设——以塔中沙漠公路为例(上) ·····	466
第一节 流动沙漠地区公路总论·····	466
第二节 塔中沙漠公路沿线的风沙环境和公路沙害·····	472
第三节 塔中沙漠公路工程防沙体系·····	506
参考文献·····	526
第十六章 塔中沙漠公路防沙体系建设——以塔中沙漠公路为例(下) ·····	527
第一节 塔中沙漠公路沿线固沙植物立地条件评价和分区·····	527
第二节 塔中沙漠公路生物治沙试验段建设·····	533
第三节 塔中沙漠公路防护林生态工程建设·····	561
第四节 防护林生态工程建设大事记·····	568
参考文献·····	569
第十七章 塔中油田基地防沙与绿地建设 ·····	570
第一节 塔中沙漠油田基地环境要素分析·····	572
第二节 沙漠油田基地防沙绿化规划设计·····	582
第三节 沙漠腹地植物引种及育苗技术·····	589
第四节 沙漠油田基地防风固沙林营造技术·····	601
第五节 塔中沙漠油田基地草坪建植技术·····	607
参考文献·····	612
第十八章 世界文化遗产地保护——敦煌莫高窟风沙防护工程 ·····	613
第一节 风沙环境·····	613
第二节 风沙防治的指导原则·····	623
第三节 工程总体布局及结构配置·····	624
参考文献·····	629
第十九章 海岸风沙防治 ·····	631
第一节 海岸风沙防治简述·····	631
第二节 研究区自然概况·····	632
第三节 风沙危害类型及成因·····	635
第四节 防护体系的组成与配置·····	638
第五节 防护体系的效益分析·····	641
参考文献·····	651
彩色照片	

中国风沙防治工程

第一篇

理论篇



第一章 绪 论

人类对风沙灾害的认识和防治是伴随着在干旱、半干旱地区的社会-经济活动而展开的,历史时期以来,生活在风沙区的人们逐渐积累了比较丰富的风沙防治和沙地开发利用的经验。在中国,18 世纪初,陕西、甘肃风沙区的农民就使用黏土压沙的方法阻沙造地;到 20 世纪 40 年代,陕西省靖边县杨桥畔的农民利用引水拉沙和引洪淤地等方法防沙造田。但是在 20 世纪 50 年代以前,还没有系统地开展风沙灾害的理论研究及防治工程的实践。

20 世纪 50 年代初,中国科学院沈阳林业土壤研究所开始组织科研人员在辽宁省彰武县章古台地区进行樟子松固沙的引种实验和护田防风沙林网建设的研究和试验工作。1952 年,铁道部铁道勘测设计院和中国科学院地理研究所合作,在对拟议中的包头至兰州铁路线路进行踏勘过程中,开始了对腾格里沙漠南缘风沙活动及其灾害过程的初步观测。同一时期,在陕西北部沙区也开展抵御风沙灾害的防护林营造的调查研究。自 1959 年始,中国科学院治沙队开展了对北方所有沙漠、沙地、戈壁和风蚀劣地等区域的综合考察,为认识区域环境和利用资源进行了系统研究和实践,也对风沙运动规律、风沙灾害过程及其有效的防治工程有了系统的研究和实践。

近 60 年来,作为沙漠与沙漠化科学的主要组成部分,风沙防治工程领域紧紧围绕国家沙漠与沙漠化地区自然资源利用、社会经济建设和环境保护的需要,开展了大量的野外考察和定位、半定位观测试验,改进科学研究的方法和技术,融合传统或经典学科的研究思路和方法,使该研究成为既有明确的研究范围、内容、方法和理论基础,又有防沙治沙技术应用体系的独立的学科领域——风沙防治工程学。取得了包括“国家科技进步特等奖、一等奖”和第一批“联合国全球环境 500 佳奖”等在内的一大批科研成果和近 200 亿元的直接经济效益,得到了政府、地方、民众、科学界和国际社会的普遍认可。但是,与其他传统和经典学科不同,作为一门只有几十年历史的风沙防治工程学,无论在学科的理论基础、研究对象、内容、范围、方法和技术手段、风沙灾害和沙漠化防治实践等诸多方面都还需要更多的努力,取得更多的成果,为丰富和发展我国沙漠与沙漠化学科做出贡献。

第一节 风沙防治工程学及其研究内容

一、风沙防治工程学的概念

“风沙”是风沙运动的简称,是以风作为主导外营力的土壤颗粒或沙尘被吹蚀、搬运和堆积的过程,也可以简单理解为风吹沙(土)移动现象。地面物质在风力的驱动下,脱离原来的位置,进入运动状态,地面物质损失,称为风蚀;当其动能耗尽时停留在一个新的位置,就产生堆积,是为风积。土壤颗粒或沙尘在风的作用下可以有 3 种运动方式:①贴近地面的蠕动或滚动,称蠕移;②在近地面层一定高度跳跃,称跃移;③在低空大气层中的悬浮移动,称悬移。气象学上把有一定风力,存在风沙运动的天气现象称为风沙天气。风沙活动的天气现象也有 3 种:①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;②沙尘暴天气除了有强大的风力条件,近地面有沙粒的蠕移和跃移外,沙尘随空气在低层空气中作垂向的运动是沙尘暴的重要特征;③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、影响能见度的天气现象。

风沙运动过程对人类生存环境和健康的危害就是风沙灾害,其实质就是风力作用下沙尘物质的吹

蚀、搬运和堆积过程中产生的对耕地、草场和建筑的损毁和破坏,以及风沙环境污染对人类身体器官的危害。风沙运动经常改变着地表形态,并对其覆被产生破坏。当受到风蚀时,土壤结构遭到破坏,腐殖质层损失,肥力降低;混合在气流中,组成挟沙气流,称为“风沙流”,比“净”气流具有更大的侵蚀能力,对土壤(或岩石)和构(建)筑物具有更大的侵蚀(磨蚀)能力,还能够切割植物的茎、叶等机体,损坏植被的营养器官;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(沙尘物质)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,风对地面和地面构(建)筑物的侵蚀或堆积掩埋。就是说,整个风沙运动过程中都有危害。风沙流是一种气体+沙粒的气固两相流。气体和固体介质所组成的风沙流是一种非常不稳定的两相流。在风沙流运行过程中,部分颗粒受重力因素的制约,随时产生停积,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在风沙运动中随时都在进行。自然界沙土的移动,包括沙丘的移动,都是以风沙流的形式来实施的(陈广庭, 2004)。

中国风沙活动活跃并造成频繁风沙灾害的区域主要是沙漠、戈壁和沙漠化土地,面积约为 170 万 km^2 ,其中现代沙漠化土地近 40 万 km^2 ,主要分布于干旱、半干旱和部分半湿润地区。最近 50 多年来,沙漠化土地持续扩张,且扩张速率趋于加快,由此造成近 20 年里经济损失高达 450 亿元 $\cdot$ 年 $^{-1}$ 。进入 21 世纪以后,在国家对相关风沙防治工程项目的大力投入下,风沙灾害有所减弱,沙漠化过程呈现局部逆转、整体趋稳的态势;但由于风沙活动区域范围较大,且分布于自然环境较恶劣的地带,风沙防治任务仍然十分艰巨。

地球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和生产活动有负面影响,这就是灾害现象。人类的构、建筑物也毫无例外地受到风沙的危害,风沙危害的实质是挟沙气流对人工植被,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。风沙运动反其道而行之,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,小到使土地生产力下降,影响居住或行车安全,大到荒废土地,废弃住宅和道路。

风沙防治工程学是在认识风沙运动与风沙灾害的基础上,开展防风治沙理论与工程实践的一门科学,是一个有宏观地域性、学科综合性和应用实践性的学科领域。开展风沙防治工程学研究的主要区域是北方干旱、半干旱和部分半湿润地区,主要对象为近地面蠕移和跃移的风沙运动(风蚀-风积)过程、造成的危害及其防治。就目前的科技水平,防治以悬移为主的沙尘暴过程还很有难度。

二、风沙防治工程学的主要研究领域

中国风沙防治工程学的研究和实践要求紧紧围绕风沙地区的社会经济发展与环境修复等目标。风沙防治工程的核心,就是采取多种技术措施减少气流中的输沙量,削弱近地表层的风速,延缓或阻止沙丘的前移,以达到削弱或避免风沙危害的目的(朱震达等, 1998)。风沙防治工程的基本任务是针对风沙流及沙丘移动危害的风沙环境的整治,由于风沙运动及其危害的防治是复杂的系统过程,需要风沙防治工程学综合运用地学、生物学、环境科学、工程科学以及社会经济学等各类学科的知识,在风沙防治工程实践中逐步形成以风沙物理学、恢复生态学、生物工程学、造林学、农学等为基础的风沙

防治工程学。

总之,风沙防治工程学要瞄准国家西部大开发的需求,以自然与人为因素及其相互作用为主线,以地球系统科学为框架,以区域可持续发展为目标,注重全球变化背景下的风沙环境演变、风沙运动规律及原理、风沙过程的成灾机制、风沙灾害防治工程技术体系的研究。可望解决其中的一些重要科学问题,发展沙漠与沙漠化科学领域的基础理论体系,促进相关学科的交叉和本学科的发展。研究的重点领域主要包括:

(1) 风沙环境形成演化与全球变化。研究风沙运动形成的环境背景及其演化,探讨对应与全球变化的风沙运动强弱格局和危害程度;研究不同时空尺度我国北方风沙环境形成演化的过程和风沙灾害之成因机制,研究风沙环境的形成演化与全球变化的关系及其对全球变化的响应;研究过去特征时期如 2000 年、500 年、200 年和 100 年来的风沙环境背景的变化,预测未来 50~100 年中国风沙环境和风沙灾害可能的变化趋势。

(2) 风沙运动学。开展沙尘颗粒启动、滑移、跃移以及悬移运动的动态追踪,运动沙粒间、运动沙粒与地表冲撞过程中的能量传输与转换过程与规律等方面的研究,构建沙粒运动学理论的数学表达式,寻求数学方程(组)的求解途径;开展定沙床风速廓线特征及若干空气动力学特征参数的确定与变化规律、不同风力及沙物质条件下风沙流固体流量结构、速度场、能量结构特征及其数学模型和风速廓线与风沙流结构的耦合研究,建立和求解风沙两相流体动力学方程组。

(3) 风沙动力(实验)地貌学研究。通过沙丘地貌的气流场特征、风沙运动特征以及蚀积平衡研究,探索不同类型沙丘的形成与演变规律;通过沙丘与近地表气流场的反馈研究,探索二次流的形成与发育规律及其在风沙地貌及形成与演变中的作用;风沙地貌空间组合规律及其与气流场的关系。

(4) 土壤风蚀研究。研究不同尺度风沙运动的力学建模及转换关联,揭示土壤风蚀过程的物理机制;建立土壤风蚀的定量模型与土壤风蚀的容忍量,确定土壤风蚀的定量评价指标体系与区划。

(5) 风沙防治工程的生物学研究。沙地植物种群对抗风沙运动的干扰机理及适应对策,植物从个体到种群对风沙灾害过程中环境变化的响应,沙地植被的受损与恢复过程及其稳定性,沙地主要植物的耗水规律和水分循环,不同下垫面和土壤物理——化学性质变化过程中风沙活动强度的变化规律、退化植被恢复蔓延过程及恢复演替的主要特征和规律,不同分布格局与结构植被防风固沙阻沙的力学机制,对应风沙运动及其灾害过程中植物生存策略的转换特征和机制,退化植被恢复的主要驱动机制、功能特征和自我恢复机制与人工修复机制。

(6) 风沙防治工程战略与模式。总结北方风沙运动与危害的现状及其发展趋势,风沙灾害地区土地覆盖与配置的最佳模式和植被建设的生态密度,人—地关系协调发展的途径和措施、确定风沙防治的重点治理区域,改进综合防治区划;针对各种风沙活动过程的控制技术,开展以下研究:不同阻沙、固沙措施工程的气流场特征、风沙流结构与蚀积规律,揭示其阻沙固沙原理;通过模拟实验与野外观测,给出防沙治沙工程设计的力学原理与调控模式,探讨防风固沙工程体系的最佳模式;提出适合不同区域风沙防治工程的新模式与新技术,并就典型地区的社会、经济与环境协调发展提出相应的对策及政策建议,为国家防沙治沙工作提供决策依据、理论依据和技术支撑。

第二节 国内外风沙防治工程的回顾和展望

一、国外风沙防治工程和风沙工程学研究动态

任何一门自然科学的发生、发展总是与人类经济活动的需求相关联的。风沙工程学的形成和发展过程更是如此,最初的工程实践与沙漠地区铁路和公路的修筑关系最为密切。随着科学技术的进步和寻求发展的需要,人类获取资源并作用环境的空间范围不断扩大和对土地、矿产和生物资源的利用程

度加深,一方面在资源利用过程中对生态环境干扰加深,导致原非沙漠环境的地区出现了新的风沙活动——土地沙漠化问题;另一方面把沙漠极端环境资源的利用开发提上了议事日程。随之,沙害防治问题日益突出地摆在人类面前,风沙防治工程在世界各地迅速开展。

1. 风沙工程实践开始于海岸沙丘的治理

早在16世纪40年代,丹麦就颁布了防治海岸沙丘危害的法令,随后英国、荷兰、波兰、德国及波罗的海沿岸国家都因受海岸沙丘之危害而采取各种治沙措施(朱震达等,1998)。19世纪80年代初,里海东岸铁路修建中风沙防护方案的制订与实施,正式拉开了现代风沙防治工程的序幕。当时的防治方案较为简单,在紧靠铁路路基处,用芦苇和旧枕木阻挡流沙入侵和防止路基风蚀;沙丘表面用碎石、黏土覆盖和喷洒盐水固沙。由于缺乏系统的科学理论指导,防沙效果并不理想。可以认为,这一时期为现代风沙防治工程的雏形期,N. A. Sokolov于1884年在彼得堡出版了《沙丘形成发展及内部结构》一书,是有关治沙方面的一本科学著作。

20世纪以来,随着内陆沙漠的开发,治沙已从海岸沙丘转向沙漠中铁路公路沙害的治理。30年代,西亚和北非沙漠地区发现了蕴藏量可观的石油、天然气。在石油开发中,阿尔及利亚、沙特阿拉伯、阿曼、阿联酋、伊朗等国家分别在撒哈拉沙漠、内夫德沙漠、鲁卜尔哈利沙漠、胡泽斯坦阿瓦士沙漠地区修建了许多公路,这些公路主要穿行于戈壁或固定、半固定沙丘区,也有小段穿越沙丘低矮的流沙地段。防沙工程以喷洒原油(重油)和其他固沙剂为主;20世纪60年代,苏联加快开发卡拉库姆荒漠地区,修筑了长约200 km的查尔朱-马雷公路,铺设了布哈拉-乌拉尔天然气输送管线,为了防治沙害,采取了多种防护措施,还专门成立了涅罗森(一种固沙剂)固定流沙的研究中心。有不少的著作不仅讨论了有关沙丘形成发育等问题,如Б. А. Федорович, А. И. Энаменский和Monique Mainguet等作者,而且也讨论了有关沙害治理及对环境的影响问题(朱震达等,1998)。

2. 19世纪后半叶的欧洲工业革命,促进了各地的工农业发展,土地开发过程中风力吹蚀已经严重地影响到干旱、半干旱地区的农业生产,为风沙防治学科提出了新的课题,促进了风蚀科学研究的发展

1911年,Free总结了前人有关土壤风蚀的文献目录中,就有2475篇关于风与土壤相互作用、风蚀土壤物质的损失与搬运方面的文献(Bagnold, 1941)。此时土壤保护学家亦开始认识到,增加土壤凝聚力(增加土壤湿度、有机质含量或改良土壤结构)或保护地表(增加作物残留物、防风带)可以减少土壤风蚀(景可等,2005)。

20世纪30年代和50~60年代,北美西部平原和苏联中亚地区先后发生的黑风暴,引起人们对土壤风蚀、运移、堆积的高度关注,美国和加拿大先后颁布了土地法令,采取有效措施防治土壤风蚀的同时,风蚀和风沙运动的研究获得突出的进展。英国物理学家拜格诺(Bagnold, 1941)进行了一系列风沙运动的基本实验研究,1941年问世的代表作《风沙和荒漠沙丘物理学》,创造性地应用和发展了冯·卡门(von Karman)、普朗特(Prantl)以及谢尔德(Shield)创立的流体力学理论(Woodruff),创立了“风沙物理学”,开了风沙物理与风沙工程基础理论研究的先河。美国科学家研究了沙粒起动过程和模式、风沙两相流的结构,并在风沙物理学方面不断进步;切培尔研究了土壤性质与风蚀的关系,确定了土壤的可蚀因子。

在前苏联,随着对卡拉库姆沙漠地区的大规模开发,防治铁路和运河风沙危害问题提上议事日程。在风沙危害防治工程中,对地貌要素的评价予以特别重视,提出民用及工业设施在开发过程中,保护和利用以前形成的地貌要素,恢复和完善有利的工程地貌环境,保持地貌单元的动态平衡;研究了流沙分类,确定防止风蚀和沙埋及其他风沙过程的风沙工程体系;进行了流沙生物土壤改良和沙地农业开发的技术措施(巴巴耶夫)。土壤风蚀及其防止(雅柯波夫)、铁路防沙(彼得普梁多夫)、沙地风

蚀过程的实验研究和沙堆防止问题(Знаменский)、沙漠风蚀的物理原理(Иванов)、沙漠化物理学(Ваз等)等风沙物理与风沙工程学著作陆续出版,标志着风沙防治工程的措施不断拓展,理论研究有了长足进步,风沙防治工程走上了有理论指导下的技术日臻完善时期。

比较起来,以苏联为代表的治沙工程研究重视防、固沙的实践,轻视物理机制的探索;相反,美国重视风沙物理的研究,很少涉及固沙方法的解决。

3. 20 世纪 60 年代,北非萨赫勒地区连续干旱,土地荒漠化加速,荒漠化形成机制的研究在全球普遍开展

根据联合国环境署的资料,由风力作用所引起的土地荒漠化面积占荒漠化土地总面积的 41.7%。根据 F. Joly 的资料,全球遭受风力侵蚀及堆积作用的土地达 4 773.4 万 km², 占全球陆地面积的 36.5%。因而在这样广大面积的地区进行生产建设,在不同程度上都要受到“风沙”的影响,遇到防治沙害和利用沙地资源的问题,“治沙”就是在这种情况下所提出的,它是一个与保护生态有关的环境问题。联合国环境署于 1992 年 2 月曾指出:“荒漠化过程是全球有生产能力的土地资源损失的主要原因和机制,造成受影响地区经济的不稳定,并给其他地区的社会和经济的稳定性带来了压力,妨碍了受影响地区的可持续发展。从环境方面讲,这一过程还造成全球生物多样性的损失,地表生物生产力的损失……”,所以,作为荒漠化主要内容的风沙防治(治沙),在世界范围内具有广阔的科学阵地并与生产建设密切相关。联合国萨赫勒办公室于 1985~1991 年的荒漠化及干旱的评估活动中,分别以水蚀及风蚀作为衡量环境变化的指征,而风蚀则以流沙出现、沙丘活化作为标志。在阿拉伯世界的荒漠化评估中,也把风力作用分为风对沙质地表的破坏和风蚀地表沙质的移动(即沙丘的移动)两大类。由此可见,以流沙固定为主的风沙防治工程在土地荒漠化防治中具有重要地位。1992 年,联合国环境发展大会的“荒漠化防治行动纲领执行情况”的报告也认为“沙丘固定是最有深刻影响的一个方案”(朱震达等,1998)。

20 世纪 40 年代,苏联在卡拉库姆沙漠地区修筑铁路时,已开始尝试用草方格固定流沙,用半隐蔽式沙障铺在沙丘 2/3 以下部位,借助风力拉平沙丘等机械工程手段防治铁路沙害;以阿尔及利亚为代表的撒哈拉北部沙漠国家曾采用高立式塑料网大方格沙障、水泥条格状沙障防沙,营造枣椰林绿洲以分割沙丘;以伊朗为代表的亚洲西部沙漠国家则赖以丰富的石油产品,采用喷洒原油、乳化石、高分子聚合物有机材料和无机合成化学材料的化学工程固沙并配合植物固沙;埃及用草方格沙障防止地中海沿岸沙丘对绿洲的危害,都不同程度地取得一定效果。

二、中国风沙防治工程和风沙工程学的发展历程

中国的干旱、半干旱区土地广袤,风沙危害严重。勤劳的沙区群众在与沙害;斗争中积累了丰富的治沙和沙区土地开发经验。据可靠的记载,清代初(康、雍时期)一些地方政府就开始组织民众营造防护林,深受风沙危害的群众自发组织的“森林会”,到清末已经遍及沙区。处在毛乌素沙漠南缘的靖边县知事丁锡奎总结群众治沙经验写下了《劝民种树俚语》,歌中不但说出了森林“能吸云雨,补地缺(培肥土壤),能培风水(涵养水源)”的道理,还道出了在干旱沙区种树要大苗深栽(“入土八九分,土外留少些,头年插根深,次年容易活”)的秘诀。1942 年,中共靖边县委书记惠中权发动群众栽种旱柳和沙柳、拧条,建水浇地 466.67 hm²,使风沙受到遏制,农牧业获得丰收。毛泽东主席对惠中权的业绩给予高度评价,亲笔写下“实事求是,不尚空谈”八个大字赠给他。同时,20 世纪 30 年代,靖边县杨桥畔的群众创造了引水拉沙、改造沙丘地为耕地;榆林县沙区群众采用“前拉后档”风力拉沙、扩大滩地的办法。

中国有组织地实施风沙防治工程和进行风沙工程学研究是近 60 年的事。中国的风沙防治工程从

包兰铁路的防沙实践开始,并且为中国的沙漠科学研究奠定了基础。

20世纪50年代中期,包兰铁路穿越腾格里沙漠东南缘流沙区修筑,为了铁路工程施工的急需,在路基施工中,在线路两侧设置了一些高立式的栅栏,防止风沙流的侵袭,保证了施工的顺利进行。同时,机械固沙和植物固沙并举建设铁路两侧的固沙带。铁路固沙是一种保护沙漠路基不可缺少的措施。它与一般的农田防沙、工矿企业防沙有所不同。铁路轨道一旦受到流沙埋没,即使沙量很少,埋没不深,也要受到严重危害。轻则要临时停车影响正常运行,重则列车出轨,使生命财产遭受重大损失。所以,在沙漠地区修筑铁路,必须在路基两侧控制流沙移动(李鸣冈,1980)。借鉴国外经验和反复试验,形成了“阻、固”结合的沙坡头铁路防沙工程系统。同时,为了深入研究风沙环境和防沙问题,中国科学院在沙坡头设立了沙漠科学观测研究站,这个站一直站在沙漠科学研究的前沿,今天已经发展成为国家生态网络系统中重要的基础站点。

建设在腾格里沙漠东南边缘的包兰铁路沙坡头地段的防沙工程体系,在空间上由两个基本条带组成,即:①设立在流沙迎风方向最前沿的、由高立式栅栏构成的阻沙区;②设置半隐蔽式麦草 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 方格沙障和沙障内按一定密度配置栽植固沙植物,形成人工植被的防沙体系主体——固沙区。“阻”、“固”两个条带顺主风方向排列,在铁路的迎风侧形成一定范围的防护区域,构成了铁路防沙工程体系。这个防沙体系有特定功能目标,由不同单元(不同功能区)有机组合而成,形成一个统一的整体,是人们依据风沙活动规律和植物生境条件建立的人工系统。作为人工系统的沙坡头铁路防沙工程体系从试验、设计以至后来的施工管理,都始终把防止铁路沙害作为系统的总目标,并在总目标的要求,完善、优化系统的功能(刘恕,1989)。作为体系主要环节的固沙区,由于要求其功能稳定、可靠,因而结构较为复杂。因为在人工植被形成之后,才能使固沙带的效应得以完全发挥,维持持续的功能。所以,人工植被结构的完善具有特殊的重要性。沙坡头地区优化人工植被的结构是通过如下两方面的措施来调整的:①改进人工植被的配置图式,变全面栽植为带状栽植;②注重不同特点的根系植物相互适当搭配,利用其间分布特征可组合成谐和配置。

兰新铁路穿越腾格里沙漠段的防沙工程研究获得“国家科技进步特等奖”。在沙坡头沙漠科学研究所建站20周年和30周年的时候,分别出版了《流沙治理研究》和《流沙治理研究(二)》,系统总结了流沙固定的经验;建站50年时,“以固为主、固阻结合”的流沙固定与铁路防护体系建设的理论与实践成果,不仅应用于沙区的治理、交通干线沙害防治和荒漠地区生态恢复与生态工程建设的实践,而且也应用到国防建设和世界文化遗产——敦煌莫高窟风沙危害防护体系中。流沙治理与生态恢复的成功模式得到了UNEP、UNDP和FAO等联合国机构的高度关注,并成功地推广到非洲荒漠化防治的实践中,50多年的工作为我国沙漠科学和沙区长期生态学从无到有的发展奠定了基础(李新荣,2009)。

在工程实践中,人们对风沙运动过程有了初步了解和认识,对于防沙措施的成功经验和失败的教训有了直观的感受和对人工固沙带的植被演替规律有了总结。为了驾驭自然规律就应该深入了解和研究风沙运动规律及其沙害防治措施和技术。可以说,生产建设的急需是应用风沙工程学产生和发展的基础和动力。

1967年建成的我国第一个风沙环境风洞为风沙运动和防沙原理的试验研究提供了基础条件(贺大良等,1981;1983;王涛,2009)。近年来,随着研究手段的不断改善,研究范围已经拓展到道路、农田、村庄以及工矿设施等诸多领域的沙害防治问题,所用的研究方法有模拟实验、野外观测和数值模拟等。研究的内容及草方格、栅栏以及防护林带等主要防沙措施的空气动力学原理(屈建军等,2009)。

风沙运动是一种近地大气层的表面运动现象和物理过程,它能够在风洞实验条件下重演。这就为风沙问题的研究提供了实验设备,使风沙运动研究进入一个崭新的历史时期。在风洞中模拟各种风沙现象及其运动规律的研究是从沙粒在气流中运动形式开始的。并通过风洞实验研究,对各种类型的典型风沙工程,如草方格和黏土沙障工程,栅栏、林带和林网工程,下导风工程,羽毛排工程,输沙桥工