

甘肃农业大学

硕士学位论文

民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流的观测研究

姓名：王自龙

申请学位级别：硕士

专业：水土保持与荒漠化防治

指导教师：赵明;王立

20090601

摘 要

风沙运动作为土壤风蚀与沙尘暴的一种重要的物理过程,对自然环境与人类造成了严重的影响。近年来由风沙运动引发的灾害在中国引起了极大的关注,而深入研究风沙运动机理目前被认为是全面了解和防治风沙灾害的关键因素,因此科学家在此方面进行了大量的研究。

基于此,本文在以往学者的研究基础上,对民勤绿洲外围特定环境背景条件下不同下垫面的风沙流流量进行观测研究,通过观测数据的定量和定性分析揭示不同下垫面条件对风沙流流量、风沙流结构的影响,研究民勤不同下垫面类型特有的风沙流运动规律和特征,为民勤绿洲防沙治沙规划、荒漠化防治工程实施及固沙措施的选择提供理论依据和科技支撑。

研究结果表明:

1.流动沙丘上风速 (V) 与近地面 0~50cm 内输沙率 Q ($g/cm.min$)之间的数学关系是幂函数曲线 ($Q=aV^b$); 从总体趋势上看,风沙流流量的分布是沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部。近地面 0~30cm 气流层内输沙率($g/cm^2.min$)与高度 $h(cm)$ 的关系遵从负指数函数 $Q=ae^{bh}$ (a 、 b 为常数); 0-30cm 高程内最大含沙量出现在最底层 (0-2cm), 占总数的 40%, 为蠕动沙量; 相同条件下输沙率顶部>中部>底部。

2.砾质沙地上风速 (V) 与近地面 0~50cm 内输沙率 Q ($g/cm.min$)之间的数学关系是幂函数曲线 ($Q=aV^b$); 近地面 0~30cm 气流层内输沙率($g/cm^2.min$)与高度 $h(cm)$ 的关系遵从负指数函数 $Q=ae^{bh}$ (a 、 b 为常数); 0~30cm 高程内最大含沙量出现在最底层 (0~2cm), 占总数的 21%, 沙粒的运动以跃移为主; 在同一风速条件下, 输沙率的大小与地表粗糙度成反比、与沙丘盖度成反比。

3.白刺沙包上从全年度近地面 0-50cm 内风沙流总流量来看: $Q_{背风坡底部} > Q_{迎风坡底部} > Q_{顶部}$; 白刺包上白刺的盖度大小对风沙流流量影响显著,白刺的盖度越小,风沙流流量越大。白刺沙包三个部位 0~30cm 高程内最大含沙量均固定在最底层 (0~2cm), 分别为 32.53%、27.98%、33.45%, 0~8cm 内的含沙量占总量的 70%左右; 近地面 0~30cm 气流层内输沙率($g/cm^2.min$)与高度 $h(cm)$ 的关系都遵从幂函数 $Q=ah^b$ (a 、 b 为常数); 背风坡的输沙率最大, 迎风坡底部略大于顶部。

4.尼龙网、粘土和麦草沙障的风沙流总流量分布都遵循沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部;。尼龙网沙障、粘土沙障和麦草沙障的含沙量最大值分别出现在 14~16cm、22~24cm 和 22~24cm 处,分别占总量的 17.74%、17.53%和 19.13%;三种沙障的防风固沙效益 $Q_{\text{粘土}} < Q_{\text{麦草}} < Q_{\text{尼龙}}$ 。

5.在梭梭林地上,随着疏透度的增大,风沙流流量成指数函数 $Q = 412.38e^{0.7877L}$ ($R^2 = 0.9127$) 递增。不同疏透度条件下的风沙流结构都符合幂函数递减规律 $Q = ah^b$ (a 、 b 为常数);疏透度为 47%的梭梭林带优于疏透度为 36%的梭梭林带。三种疏透度条件下风沙流最大含沙量均固定在最底层 (0~2cm),分别为 44.47%、48.78%、38.60%,并且 0~8cm 内的含沙量占总量的 80%左右;30%<最佳疏透度<50%。

6.从 08 年全年度监测的风沙流总流量看,无盖度流动沙丘>白刺平坦砾质沙地>梭梭林>白刺包>粘土沙障>麦草沙障>尼龙沙障;从风沙流总流量的季节性分布来看,春季>夏季>冬季>秋季。

关键词:民勤 风沙流结构 输沙率 风沙流流量 下垫面

Summary

Sand movement and soil erosion as a major dust storm physical processes of the natural environment and human impact of causing serious in recent years, sand movement caused by the disaster in China has aroused a great deal of concern, and in-depth study of the mechanism of sand movement is now considered a key factor in wind that comprehensive understanding and prevention of disasters, so the scientists in this respect a great deal of research.

Based on this, this article studies scholars in the past, based on the specific circumstances of Minqin oasis peripherals different background conditions of the sand surface for observation and study of traffic flow through the observation data revealed quantitative and qualitative analysis of different surface conditions on the sand stream flow, flow structure of sand to study the different surface types Minqin unique movement of the sand flow and the characteristics of the planning for the Minqin oasis desertification, desertification control projects and the implementation of fixing the choice of measures to provide a theoretical basis, and science and technology support.

The results show that:

1.No cover on the movement of dunes wind speed (V) and near the ground within the 0-50cm sediment transport rate Q ($g / cm.min$) the mathematical relationship between the power function curve ($Q = aV^b$); from the general trend, the sand the distribution of flow is at the top of the largest sand dune, sand dunes in central Secondly, the sand dunes at the bottom of the smallest.Surface 0-30cm layer of sediment flow rate ($g/min.cm^2$) and height h (cm) to comply with the negative exponential relationship between the function $Q = ae^{bh}$ (a , b are constants); 0~30cm height of the largest sediment appear in the bottom (0~2cm), accounting for 40% of the total for the peristaltic sediment; transport rate under the same conditions at the top of the largest and central second, bottom of the smallest.

2.Nitraria gravelly sand flat wind speed (V) and near the ground within the 0~50cm sediment transport rate Q ($g / cm.min$) the mathematical relationship between the power

function curve ($Q = aV^b$); near-surface airflow 0~30cm layer of sediment transport rate ($\text{g}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$) and height h (cm) to comply with the negative exponential relationship between the function $Q = ae^{bh}$ (a, b are constants); 0~30cm height of the largest in the bottom sediment (0~2cm), accounting for 21% of the total, the movement of sand to the main saltation; in the same wind conditions, the sediment transport rate is inversely proportional to the size and surface roughness, and is inversely proportional to sand cover.

3. Nitraria sandbags on the ground from the whole financial year, about 0~50cm sand flow in terms of total flow: $Q_{\text{at the bottom of the leeward slope}} > Q_{\text{at the bottom of the windward slope}} > Q_{\text{at the top}}$; Nitraria Nitraria package on the cover of sand the size of the impact of significant flow, the cover Nitraria smaller, the greater the wind flow. Nitraria three parts of sand Height 0~30cm sediment are the largest fixed at the bottom (0~2cm), respectively, 32.53%, 27.98%, 33.45%, 0~8cm of the sediment concentration of 70 total % of; near-surface 0~30cm layer of sediment flow rate ($\text{g}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$) and height h (cm) are to comply with the relationship between the power function $Q = ah^b$ (a, b are constants); leeward slope of the sediment transport rate the most, slightly larger than at the bottom of the wind at the top of the slope.

4. Nylon mesh, clay and straw sand barrier of wind-sand current distribution of the total flow at the top of the sand dunes followed $>$ the central sand $>$ sand dunes at the bottom; Nylon mesh barrier sand, clay and straw sand barrier sand barrier, respectively, the maximum sediment concentration in the 14-16cm, 22~24cm and 22~24cm, the total accounted for 17.74%, 17.53% and 19.13%; three sand barrier against wind and sand-fixation efficiency of the $Q_{\text{clay}} < Q_{\text{intermedium}} < Q_{\text{nylon}}$.

5. Ammodendron lam in the ground, with the increase in porosity, sand flow into the exponential function $Q = 412.38e^{0.7877L}$ ($R^2 = 0.9127$) increase. Different porosity of the sand flow under the condition of the structure are in accordance with the law of diminishing power function $Q = ah^b$ (a, b are constants); porosity ammodendron for 47% of the forest better than the porosity of 36% of Haloxylon forest. Three porosity sand flow under conditions of maximum sediment concentration are fixed at the bottom (0~2cm), respectively, 44.47%, 48.78%, 38.60%, and 0~8cm of the sediment concentration in total about 80%; 30% < the best porosity < 50%.

6.From the 2008 annual monitoring of the total traffic flow of the wind, the free movement of sand dunes cover> Nitraria gravelly sand flat> ammodendron Lin> Nitraria package> clay sand barrier> intermedium sand barrier> nylon sand barrier; from the wind flow the seasonal distribution of the total flow, the spring> summer> winter> autumn

Key Words: Minqin; Structure of drifting sand flux;The trend sand transport rate;wind-sand flow flux;Underlying surface

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得甘肃农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名: 马 静

日 期: 2009 年 6 月

甘肃农业大学

学位论文版权认定和使用授权书

研究生姓名: 王自龙

所在学院: 林学院

学位级别: 硕士

学科专业: 水土保持与荒漠化防治

学位论文题目: 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流流量的观测研究

本人于 2008 年 03 月 10 日至 2009 年 05 月 10 日在导师 赵明、王立

指导下, 从事 荒漠化防治

的研究。

产权内容: 通过观测数据的定量和定性分析揭示民勤绿洲外围特定环境背景条件下不同下垫面条件对风沙流流量、风沙流结构的影响, 研究民勤不同下垫面类型特有的风沙流运动规律和特征。

现认定以下条款:

1、本人毕业后发表与研究内容有关的文章, 作者第一署名为甘肃农业大学。

2、学位论文中包含的研究成果的知识产权归 甘肃农业大学。

未经指导教师和 甘肃农业大学 同意,

本人不得私自从事与课题有关的任何开发和盈利性活动。

3、本人完全了解甘肃农业大学有关保留、使用学位论文的规定, 有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版, 允许论文被查阅和借用。本人授权甘肃农业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索, 可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 王自龙

导师签名: 王立

签字日期: 2009 年 6 月 10 日

签字日期: 09 年 6 月 10 日

学位论文作者毕业后去向:

工作单位:

电 话:

通讯地址:

邮 编:

第一章 引言

风沙运动作为土壤风蚀和沙尘暴的一种重要的地球物理过程,对自然环境与人类生产与生活造成了严重的危害和损失,而风沙流的运动实际上就是风沙运动最常见最频繁的一种运动形式^[1]。风沙流是气流及其搬运的固体颗粒(沙粒)的混合流^[2]。它的形成依赖于空气与沙质地表两种不同密度物理介质的相互作用,而它的特征对于风蚀风积作用的研究及防沙措施的制定有重要意义^[3]。风沙流是风沙物理学研究的核心内容,也是风沙地貌、沙漠化、风沙工程的基础理论之一,在整个风沙学科中占有及其重要的地位^[11]。近年来由风沙运动引发的灾害在中国引起了极大的关注,研究风沙运动机理目前被认为是全面了解和防治风沙灾害的关键因素,因此对于风沙流的研究国内外学者已经从能量分布、跃移沙粒的轨迹、风沙流层中沙颗粒的垂向浓度分布以及沙颗粒带电效应等多个角度进行了深入的研究^[12-17]。如果没有风蚀过程发展导致风沙流的出现,就不可能有因沙粒输送和堆积过程中引起的各种沙害。如在沙漠公路地段,风沙危害主要源于防沙体系沙物质的侵入和防沙体系内部因近地面气流变异而产生的风蚀与堆积^[4]。所以,防治沙害、改善沙区生态环境的根本措施还在于抑制或削弱风沙流的强度。风沙流运动明显而强烈地受地形地貌和下垫面结构的影响,因此不同地区的风沙流运动有着特定的流量和表现形式。

据联合国环境规划署的报告,沙漠面积已占地球陆地面积的 20%。与此同时,土地沙漠化的发展也非常迅速。到 1991 年,共有大约 36×10^9 公顷的面积正处于土地沙漠化的景况中。流沙的蔓延,沙漠的不断扩展,已造成了对人类的严重威胁。环境问题直接关系到人民的生存与生活质量,也影响着社会经济的可持续发展。

在我国土地沙化是最为严重的生态环境问题,全国风沙化土地面积达 $168.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 17.36%, 并且正以每年 2460 km^2 的速度^[18] 不断扩展, 相当于每年损失一个中等县的土地面积, 这对以世界 7% 的耕地养活占世界 22% 人口的我国而言是一个十分重大的威胁, 完全可以说土地沙化已成为中华民族的心腹之患, 特别是在我国的西北华北北部及东北西部的广大干旱半干旱地区, 气候干燥, 沙源丰富, 经常出现风沙活动。尤其是春季, 大风和干旱同期, 风沙现象最为严重。风沙运动之危害, 其影响地区之广阔, 同洪水, 干旱, 暴风等自然灾害一样可怕。它可以掩埋农

场牧场、毁坏庄稼、吹走表土和种子,严重侵蚀着人类赖以生存的土地。同时,风沙运动还可以阻碍交通,掩埋铁路公路,危机行车安全。对社会与经济可持续发展造成了极大的威胁,引起了全社会和中国政府的高度重视,为了解决并有效控制风沙灾害,对风沙运动的特征和规律的研究和掌握刻不容缓。

风沙流是指含有沙粒的运动气流,是一种沙粒的群体运动^[19]。风沙流是由流动的空气——风,主要是近地面风与固体沙物质组成的气固两相流,是风沙物理的核心内容之一,也是风沙地貌、沙漠化、防沙工程实践的基础理论之一,在整个风沙学科中占有极其重要的地位^[20];因而半个多世纪以来,引起了国内外学者的热切关注,取得了一定的成果。但与建立完善的理论体系,广泛而又成效地应用于生产实践的目标还有一段距离,有许多工作要做。与国际上相比,国内风沙流研究稍显薄弱,整体研究水平欠高,这与我国沙漠化危害程度、防沙治沙的重要性不十分相称。如何在较短时间内革新、创建研究手段、方法,提高研究水平,这是从事风沙流研究人员面临的问题。

基于此,本课题在以往学者的研究基础上,以民勤绿洲外围特定环境条件为背景,主要以风沙流流量即以研究时间间隔、研究过沙断面总的沙粒通过量和风沙流结构即输沙率随高度的变化趋势为研究对象,通过不同下垫面条件对风沙流流量和风沙流结构影响的观测研究,定量的测定以寻求其规律,通过观测数据的定量和定性分析,揭示不同下垫面条件对风沙流流量和风沙流结构的影响,研究民勤不同下垫面类型特有的风沙流运动规律和特征,为该地区区域性防沙工程提供基础理论和科技支撑。从而可以为风沙流运动的研究以及整个荒漠化的防治提供一定的可靠的理论依据。

第二章 综述

2.1 风沙流的研究现状及发展趋势

风沙运动作为土壤风蚀与沙尘暴的一种重要的物理过程,对自然环境与人类造成了严重的影响。而风沙运动实际上就是风沙流的运动。近年来由风沙运动引发的灾害在中国引起了极大的关注,研究风沙运动机理目前被认为是全面了解和防治风沙灾害的关键因素,因此对于风沙流的研究国内外学者已经从能量分布、跃移沙粒的轨迹、风沙层中沙颗粒的垂向浓度分布以及沙颗粒带电效应等多个角度对此进行了深入的研究^{[12][14][17]}。

气流在单位时间内通过单位宽度或面积所搬运的沙量,叫做风沙流的固体流量,也称为输沙率。输沙率不仅是研究风沙物理的重要参数,而且是合理制定工矿、交通、农田、村庄等保护对象沙害防治的主要依据;具有重要的实践意义^[9]。风沙流流量是指设定研究时间段,通过研究断面总的沙粒通过量。一段时间、某一研究断面(如某一固沙工程)的风沙流总流量研究的很少,风沙流流量对制定防沙治沙规划和评价治沙工程具有重要意义。因此,只有准确的确定输沙率和风沙流流量,才能有效地制定防沙治沙工程措施,从而控制风沙危害,起到事半功倍的效果。

风沙流结构是指风沙流中的沙量在垂直高度上的分布规律,是风与地表相互作用的产物。地表风沙流结构分布特征是研究风沙流过程及其控制措施的物理学原理。许多工作者分别在风洞试验、野外观测、理论分析、数值模拟方面做过大量的相关研究。Bagnold^[75]、Chepil^[76]、Williams^[77]、Sorensen^[78]和吴正^[79]等发现输沙量分布沿垂线符合指数递减规律。而河村龙马^[80]、Zingg^[81]以及兹纳门斯基^[82]等指出输沙量垂线分布在床面附近严重偏离指数分布。刘贤万^[83]和董治宝^[84]等发现在床面附近某一高度以下的输沙量小于指数分布预测值。而 Butterfield^[85]等在风洞实验中得出床面附近的输沙量大于对应位置指数分布值。这些文献分析结果均表明沙量在垂直高度上大体遵循指数分布规律,偏离预测分布的主要原因还是取决于地表机械组成、地面物质水分含量和下垫面结构等因素的影响。在特定的风速下,下垫面对其影响占绝对优势。主要是由于不同下垫面对沙颗粒的启动风速、跃移高度、能量衰减影响程度不同。

风沙问题早已引起人们的注意,从 19 世纪来人们就开始了有目的的认真考察研

究风沙运动与沙漠化,但首次把风沙和荒漠沙丘的研究从定性描述改变为定量的动力过程研究是英国工程师拜格诺(R.A.Bagnold)创造性地应用与他同时代的学者冯卡门(vonKarman)、普朗特(L.Prandtl)等建立的现代流体力学理论,结合他多年在利比亚沙漠中^[21]的野外观测和一系列风洞试验^{[22][23]}后撰写并于1941年出版了至今是风沙运动研究中最重要著作《风沙物理及荒漠沙丘物理学》(《The Physics of Blown Sand and Desert Dunes》)^[24]。该著作在单个沙漠粒运动物理学、小尺度作用、泥沙积聚、沙丘内部结构、沙丘演变与移动以及鸣沙等方面首次作了系统而全面的分析,得出许多重要结论,提出了很多颇有价值的科学见解。

几乎在同一时间,由于受当时美国大平原和加拿大西部频繁发生的沙尘暴(“黑风暴”)的影响,科学界对土壤风蚀的研究空前重视。在Bagnold的研究工作基础上美国土壤学家切皮尔(W.S.Chepil)深入进行了风蚀动力学机制、影响因子、尘暴的沉积学特征、风蚀流失量的估计、防风蚀措施及研究仪器设备的研制等研究^[25-29]工作,第一次全面地论述了土壤风蚀问题,既增强了对风沙流的理解,也为风沙应用研究树立了典范,Chepil因之被誉为现代土壤风蚀科学的开拓者。

前苏联学者的风沙流研究可以兹纳门斯基为代表,主要研究各种粗糙表面的风沙流堆积规律^[30]。日本学者河村龙马等也对风沙运动进行了研究^[31]。随着人们对风沙运动认识水平的提高,国内外学者从60年代后期开始致力于建立风沙流中颗粒运动的数学模型,这其中以Owen的工作最为著名。需要特别说明的是,60年代航天技术的进步促进了行星探测事业的发展,国外一大批宇航工程师和地质工作者在试图解释地球、火星、金星和土卫六表面地貌的过程中,发展了源于Owen的单颗粒运动模型,并且很大程度地提高了利用风洞模拟复杂环境中风沙运动的能力。从文献资料的数量上看,这一时期是风沙研究蓬勃发展的时期,由解释行星地貌形成过程带动的风沙运动研究热潮一直持续到上世纪80年代初。

1985年,在丹麦Aarhus大学举行了风沙物理学的研讨会,对自Bagnold以来的风沙物理学研究进行了全面而系统的总结。在此之前,理论研究主要是针对单个颗粒运动进行的,即属于细观研究的范畴。Aarhus会议之后,更多的注意力转向如何利用单个颗粒的运动特征去解释风沙流的整体特性,即开始用细观研究得到的规律去解释宏观现象。从这个意义上说,Aarhus会议是风沙物理学研究中一个重要的里程碑。

我国由于风洞建成较晚(1963年正式投入使用),风沙流研究工作多在野外。最近几年,传统的风洞实验多考虑了湿度、植被、坡度、粗糙度等对风沙流的影响,更有不少

人重视各种自然环境条件下(如海滨、沙丘地、农田、盐湖)风沙流的时空变化规律,以满足实际工作的需要。

国内外近几年风沙流的研究有增热趋势^{[32][33]},这与全球荒漠化问题日益突出的大环境不无关系。在研究手段方面,风洞实验、数值模拟和野外实测齐头并进。研究内容将会集中在以下几点:

1)风沙流基本物理过程的进一步研究,重点包括颗粒群的碰撞机制,颗粒群运动与气流的相互作用。

2)各种因子对风沙流的影响,这些因子包括湿度、坡度、植被盖度、表面粗糙度等。

3)气流湍流性质对风沙流的影响。近地面风均为发达湍流,湍流的某些特征,如隙向性局部速度突然增大(猝发过程)对风沙传输会有一定影响。这也许与沙粒的蚀积规律有很大关系,因此亦有一些学者在这方面作了探索^{[34][35]},是一个新的研究方向。

4)各种环境条件下风沙流的时空变化,包括沙丘地、农田、草场、海滨等。我国的风沙流研究既要考虑国际趋势,又需结合本国实际。国内有稳定的研究机构、经费支持,又有广阔的应用市场,这是许多工业化国家所不能比拟的。今后一段时间国内风沙流的研究可能会在以下几个方面展开。

5)两种碰撞过程的研究。颗粒与床面的碰撞、气流颗粒间的碰撞仍将是研究热点,但重点应放在颗粒碰撞过程清晰图式的获取和全套数据的测试。

6)加强野外实测工作,获取各种风成地表的风沙流参数特征,建立风沙流变化与蚀积地貌间关系。这一研究在国内有很大地域优势,是风沙流研究可望取得突破进展的重要方向。

7)与沙漠化、土壤风蚀、防沙工程研究相结合,建立各种环境条件下的起沙风、输沙率以及蚀积模式数据,以适应实际需要。

8)开展数值模拟研究。国际上这一方法应用已愈十年,国内还未见报导,从风沙流的复杂性及计算机的飞速发展,这一方法的应用必然有增无减,应尽快迎头赶上。

9)加强多学科交叉研究。风沙流研究涉及地貌学、流体力学、边界层气象学、土壤学等多种学科。多学科的联合攻关显然是发展趋势。过去国内风沙流研究多由地学工作者独立进行,最近个别力学人员对此亦有了兴趣^[36],是一可喜现象。

10)引进研制各种观测和实验仪器。国外虽然有精密先进的科研仪器,但专门测试风沙环境的并不多,测试精度也不是很高,因此引进仪器的同时,还必须注重仪器自行研制、改装。

2.2 输沙率的研究现状及发展趋势

Bagnold(1941)^[37]从分析运动沙粒动量变化出发,给出了在风洞中单宽输沙率与摩阻速度 u_* 的三次方成正比的公式,为:

$$Q = C \sqrt{\frac{D}{D_0}} \frac{\rho_s}{g} \mu^3 \quad (1-1)$$

其中 $D_0 = 25\text{mm}$, C 是随沙粒的级配而变化的经验常数,称为 Bagnold 常数。对于均匀沙, $C=1.5$;对于天然混合沙, $C=1.8$;对于粒径分布很广的沙, $C=2.8$ 。

Bagnold 公式作为一个经典成果,许多工作都是立足于对其进行改进而展开的。

Bagnold 公式仅当 u_* 趋于零时才给出单宽输沙率为零,这与实际事实不符。在实际情形中,在 u_* 上升到接近或达到一临界起动摩阻速度 u_{*c} 之前是不存在沙粒运动的,从而输沙率仅在风速达到或超过临界值时才为非零。

Kawamura(1951)^[38]认为存在沙粒跃移运动时,作用于沙床面的剪切力为跃移沙粒冲击造成的剪切力和直接由风作用的剪切力之和,给出

$$Q = K \frac{\rho_s}{g} (\mu_* - \mu_{*c})(\mu_* + \mu_{*c})^2 \quad (1-2)$$

其中经验常数 K 对于平均粒径为 0.25mm 的沙为 2.78。

Owne(1964)^[29]做了两条假定,一为跃移沙粒对跃移层外气流的影响与床面粗糙度对跃移层厚度的影响类似,二为跃移浓度通过调节自身使气流施加于地面的剪应力足够维持动态下的床面,最终建立了单一轨道沙粒跃移模型。这一模型在描述风沙流颗粒运动方面非常有名,给出的输沙率为

$$Q = \frac{\rho_s}{g} \mu_*^3 \left[0.25 + 0.44 \frac{\rho_s g d / \rho_s \mu_*^2}{C_D (10 \mu_* D / \nu)} \right] \left[1 - 0.0064 \frac{\rho_s g D}{\rho_s \mu_*^2} \right] \quad (1-3)$$

其中, ν 为空气的动力学粘性系数。owen(1964)^[39]探讨了输沙率对粒径的依赖关系,发现对于比较小的 D 和 u_* , 输沙率近似地与粒径的平方根成正比,与 Bagnold(1941)^[37]的结论一致;对于比较大的 D 和 u_* , 输沙率近似地与粒径的四分之三次方成正比,与 Zingg(1953)^[40]的结论一致。周又和等人^[41]通过在风洞中采

用集沙仪测量了“均匀沙”和天然“混合沙”风沙流在跃移层内单位面积输沙率随高度的分布,并运用最小二乘法获得了单位面积输沙率随高度和风速变化的经验公式。

Bangold 公式推导中假定出射速度和碰撞速度都正比于 u_* , 这一假定为后来的一些实验结果所证实^[42]。ungar and Haff(1987)^[43]的稳态跃移模型却显示了当气流摩阻速度在一个很大的范围内变化时,跃移沙粒与表面的碰撞速度保持相对不变,从而得出输沙率随摩阻速度增加的速度小于摩阻速度的三次方。

八十年代末九十年代初在跃移的数值模型方面取得了很重要的进展^[44-48]个过程分别为流体起动,颗粒运动,冲击起动和风场修正)理解上的进步。图 2.1 显示了风沙流起动阶段风速廓线和每次碰撞平均击溅起的沙粒数的逐渐变化过程。由于几个过程之间的相互耦合,Anderson and Haff(1988, 1991), Werner(1990)和 McEwan and Willetts(1991)^[44-47]给出的模型不能得出单宽输沙率具体的解析表达式,只有 sornesne(1991)^[48]的模型给出了一个单宽输沙率的解析表达式,为

$$Q = C_s \frac{\rho_s}{g} \mu_* (\mu_* - \mu_{*c}) (\mu_* + 7.6 \mu_{*c} + 2.05 m/s) \quad (1-4)$$

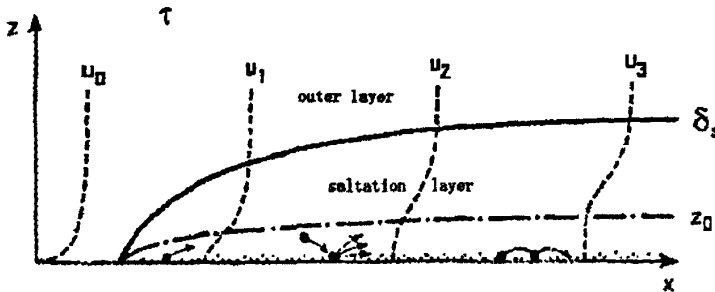


图 2.1 风沙流起动阶段风速廓线和每次碰撞平均击溅起的沙粒数的变化图

Fig2.1 The changes of the wind speed profile of Wind flow start-up phase and the sand of each collision the average passing attack

虽然在风沙输运的数学模型上取得了很大的进步,然而现有的这些模型不能够对给定条件下的输沙率给出可靠的预测^[45]。

Y P shao and An Li(1999)^[51]对大气边界层流动采用大涡模拟方法,对颗粒轨道采用 Lgarnage 模型,除此之外,郑晓静等人^[52]还成功实现对多场(风场—温度场—电场—沙粒)藕合和多因素(沙粒带电、混合粒径、脉动效应、空中碰撞等)影响的风沙流的理论模拟:他们揭示了风沙流结构的分层特征:贴近沙床附近输沙量随高度线性增加、

达到极值进入饱和层、沿高度按负指数规律衰减, 所得数值结果与砾漠大风情形下观测的实验结果和风洞实验结果吻合较好。他们的模拟还有效揭示了地表热扩散产生的垂向风场对风沙流发展过程的影响^[53], 同时, 他们的结果还表明: 沙粒带电和风沙电场对沙粒跃移运动的轨迹以及风沙流的起沙率、输沙率以及风沙流达到稳定的时间均有明显影响^[54-55]; 在此基础上, 他们还实现了对风沙电场的理论预测, 这为预测其它星球的风沙电场以及风沙地貌提供了有效途径^[56]。

o'Brien & Rindluab(1936)^[57]就曾根据美国哥伦比亚河口的实测资料得到了风速与天然沙(平均粒径近于 0.2mm)输沙率之间的关系为

$$Q = 9.96 \times 10^{-5} (\mu_* + 10.5)^3 \quad (1-5)$$

虽然上式仅是一个经验公式, 但就输沙率近似与摩阻速度的三次方成正比这一点来看, 它和有一定基础的 Bagnold 公式(1941)^[37]和 Kwaamuar 公式(1951)^[38]还是比较接近的。鉴于实验中蠕移沙粒不好收集, 许多研究人员从跃移沙粒引起的输沙率进行研究。

zingg(1953)^[40]通过考虑跃移沙粒的浓度分布来研究输沙率, 他将跃移沙粒浓度的垂向分布外推到床面后进行积分, 再配合天然沙的风洞实验, 得到的结果为

$$Q = C_z \left(\frac{D}{D_0} \right)^{3/4} \frac{\rho_s}{g} \mu_*^3 \quad (1-6)$$

其中, C_z 约为 0.73。由于没有考虑沙床蠕移沙粒的贡献部分, 故所给出的单宽输沙率偏小。

Horikwaaandshen(1960)^[58]用中值粒径为 0.2mm 的沙粒进行了单宽输沙率实验, 指出 Kwaamura 公式中常数 K 应取为 1.0, 同时测定结果表明: 当 $u_* < 0.4\text{m/s}$ 时, Kawamura 公式较好; 而当 $0.4\text{m/s} < u_* < 0.7\text{m/s}$ 时, 则 Bganold 公式更为有效。

Bucklye(1987)^[59]研究了稀疏植被对输沙率的影响, 在实验过程中, 0.5m 高度的风速最大达到 15m/s, 植被盖度最大达到 17%, 单宽输沙率可表示为

$$Q = C[V(1 - \alpha R) - V_i]^3 \quad (1-7)$$

其中, C 为 Bganold 常数, V_i 为起动风速, R 为植被盖度, a 为依赖于植被几何特征的常数, 对于小的直立的或分散的草本沙丘植物, $a=0.018$, 对于小的无茎干的植物, $a=0.046$ 。对于一个比较大的 R, 单宽输沙率就减小为零, 这都是与实际相符合的。

八九十年代, 一系列的中国学者对输沙率问题展开了野外观测和实验研究, 主要

有马世威(1988), 申建友等(1988), 贺大良(1993)等^[60-62]。然而他们的工作将输沙率与野外 2m 高度处的风速或风洞轴线的风速联系起来, 并没有给出其特定的实验条件下的风速廓线, 即没有将测得的输沙率与摩阻速度联系起来, 故不便于与已有结果进行比较以判定其有效性。

Oreeley et al.(1996)^[63]在 California 的 pismo 海滩, 选择了一块长为 100m(平行于风向), 宽为 20m 的试验场地。他们用四排气压计来获取风速廓线, 用温度探头来判断大气稳定性, 用风信旗来判断风向。为获取输沙率, 一个 3m 长, 10m 宽(垂直于风向), 0.5m 深的沙陷阱被放置在下风向处, 同时排列了 168 个集沙仪。

实验结果表明, Bagnold 公式(1941)^[37]和 lumberg&Greeley(1993)^[64]修正的 White 方程给出的输沙率与从沙陷阱所测得的输沙率吻合得最好, 其中由 Blumberg&Greeley(1993)^[64]修正的 white 方程为

$$Q = 2.61\mu_*^2 \frac{\rho_s}{g} \left(1 - \frac{\mu_{*c}}{\mu_*}\right) \left(1 + \frac{\mu_{*c}}{\mu_*}\right)^2 \quad (1-8)$$

Jackson(1996)^[65], Jackson and McCloskey(1997)^[66]采用一个新的高频取样的集沙仪, 一个气压计和风信旗作了两批野外试验, 其中集沙仪是圆形的, 有一个水平开口, 能够对输沙率进行连续的测量(对输沙率每一秒的值进行测量)。实验结果显示输沙率能够在风速变化的瞬时就对其发生响应, 输沙率是风速的二次多项式。但是, 由于集沙仪是圆形开口, 无法判断其集沙宽度为多少, 因此他的实验没有给出单宽输沙率随风速变化的具体表达式。在单宽输沙率的实验方面, 传统做法是将集沙仪测得的单位面积输沙率描绘在坐标纸上, 经过适当的经验外推到集沙仪以外的区域后, 采用计算其曲线所围面积就给出单宽输沙率的实验值(刘贤万, 1995)。显然, 这种方法依赖于外推的合理性和面积计算的精度。这是单宽输沙率实验精度提高的一个重要障碍。同时, 关于集沙仪的积沙效率和蠕移沙粒的收集或计算中的适当处理, 目前还没有定论。

第三章 研究区概况与研究方法

3.1 研究区概况

3.1.1 自然地理状况

3.1.1.1 地形地貌特征

民勤县位于甘肃省河西走廊东部的石羊河流域下游,东经 $101^{\circ}49'$ ~ $104^{\circ}12'$ 、北纬 $38^{\circ}03'$ ~ $39^{\circ}28'$,隶属甘肃省武威市区。民勤县南邻凉州区,东北西三面与阿拉善左旗、右旗、金昌市接壤。其东北被腾格里沙漠包围,西北有巴丹吉林沙漠环绕,中部有石羊河冲积成狭长而平坦的绿洲带,是我国典型的荒漠绿洲之一。其中,绿洲部分按地形、水利条件及历史习惯分为昌宁、环河、坝区、泉山、湖区等五个自然区。

民勤属于典型的大陆干旱气候。气候干燥、多风沙,降水少、蒸发强烈、光照充足、温差大。年平均气温 7.6°C ,多年平均极端最高气温 39.4°C ,极端最低气温 30.8°C ,多年平均降水量 113.8 mm ,年均蒸发量 2604.3 mm ,干燥度 5.15 ,年均日照时数 2799.4 h , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3036.4°C ,无霜期 175 d ,主导风向为 NW 和 WNW,年平均风速 2.45 m/s ,多年平均瞬时最大风速 23 m/s ,年平均 8 级以上大风日数 37.7 d ,沙尘暴日数 26.8 d ,年均扬沙日数 32.9 d ,浮尘日数 18.9 d 。多年来,由于人为的过度开采地下水,地下水位已降至 20 m 以下,荒漠植被衰败、退化现象严重,生态环境非常脆弱。

民勤的地貌以荒漠沙丘围绕绿洲为基本特征。发源于祁连山的石羊河流经中游的武威绿洲后自红崖山与阿拉古山之间的低凹地带进入盆地,流向东北。在盆地石羊河两岸分布着面积达 $1.2\times 10^5\text{ hm}^2$ 的民勤绿洲,全县总土地面积 $1.5909\times 10^6\text{ hm}^2$,由沙漠、戈壁、山地、绿洲 4 部分组成。其中沙漠和戈壁分布最广,沙漠面积达 $1.315\times 10^5\text{ hm}^2$,占总土地面积的 82.66% ;绿洲仅限于石羊河下游窄而狭长的区域。面积 $2.6\times 10^5\text{ hm}^2$ 。为总面积的 16.3% ,耕地面积只占总土地面积的 4.29% 。绿洲边缘风沙线长达 408 km ,是我国的重点沙害区之一。地势为四周高,多为剥蚀残丘和大面积流动、半流动沙丘及戈壁,中心偏北为绿洲农业区,呈浅锅底状盆地,平均海拔 1350 m ,相对高差大,海拔界于 $1000\sim 1936\text{ m}$ 之间,多数在 1300 m 左右。民勤绿洲的沙源有东、西、中三大沙窝部分。

西沙窝:即巴丹吉林大沙漠东缘。处于绿洲外围,风沙线长 210 km ,宽度

2~5km, 面积达 $7 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。它是侵害县境西部农田的沙源。巴丹吉林流沙在主风向西北风的作用下, 经雅布赖山南端与独青山之间谷口, 穿过梭梭门子, 直卷民勤西边风沙前沿, 侵入绿洲腹部。西来的大沙流遇到草木障碍减速沉降, 经年累月, 堆积成为各种沙丘。风力回流作用使沙丘越积越高, 层层叠叠, 波浪起伏, 成为沙丘链、沙垄、复合沙山, 严重威胁农田、水库、道路、村庄。

东沙窝: 腾格里大沙漠西缘, 处于绿洲外围, 总面积达 $5.5 \times 10^5 \text{hm}^2$ 以上, 占全县总面积的 36%, 是绿洲东部的沙源。在主风向作用下, 流沙向东南方向移动, 侵害绿洲。

中沙窝: 错纵布列于羊路、东坝、双茨科诸乡农田西缘, 直插农田绿洲中间, 总面积 14×10^4 多亩, 其中流沙、半固定沙地、丘间低地接近 $1 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。绿洲废弃河道是其纵向储库, 西北风是其横向运移的动力。

3.1.1.2 地质特征

民勤因所处地形、地貌条件, 自古承受了石羊河及其上游诸支流大量洪积、冲积物以及本身的湖积物质, 后来随自然条件变迁沙漠侵入, 又接纳了大量风积物, 故县境主要是在此两类成土母质上发育而成。按照大的分类可以分为耕作土壤和荒地土壤两类。其中耕作土壤分布于绿洲腹地, 地势稍高处, 土层深厚, 比较肥沃, 主要种类有土头地、沙土地、漏沙地、盐碱地四类。荒地土壤类型主要包括灰钙土、草甸土、风沙土和盐土四类。

民勤历史上水草丰盛, 沼泽和草甸植被是过去绿洲主要原生植被。以后水源减少, 湖水干涸, 沙漠入侵, 原生植被退化, 逐渐演变为现在的荒漠植被类型, 生长衰弱, 并有进一步退化的趋势。绿洲内部及边缘地带: 荒漠化草甸植被, 生长耐盐灌丛(如盐瓜瓜、珍珠)和草甸草本(芦苇、冰草、芨芨、苔草等); 盐地及典型盐土地带为盐生荒漠植被, 生长白刺等盐生小灌丛; 绿洲两侧广大灰漠土区域, 土壤一般含盐较少, 属沙质荒漠植被, 生长极疏, 多以沙生或荒漠小灌丛为主, 其中白刺最多。

3.1.1.3 降雨量特征

水资源的匮乏量在逐年增加^{[57][58]}民勤治沙站气象站的观测, 从 1961 年到 2002 年的 40 多年来, 降水量在 42.2~185.1 之间波动变化(详见图 3.1)。年降水量的 74.7% 分布在 6、7、8、9 月份, 其中 7、8 月份最大。降水量的地域分布自南至北逐步递减, 靠近武威盆地的环河区为 140mm 左右, 北部湖区仅有 90mm 左右。持续干旱或湿润的时间很短, 没有明显的旱化趋向^[69-71]。

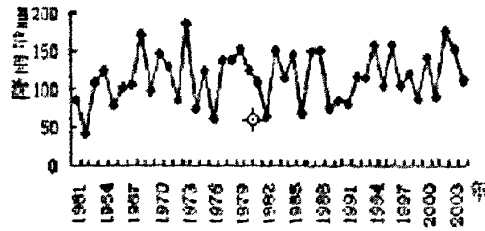


图 3.1 降雨量年变化图

Fig3.1 Rain to measure the year to change The diagram

3.1.1.4 风速分布特征

据观测统计,民勤沙漠区多年定时最大风速为 23m/s。多年平均风速为 2.55m/s。在 1 年当中,平均风速出现 2 个峰值,第 1 个峰值出现在 3~5 月份,第 2 个峰值出现在 11~12 月份。由此可见,在当地,风沙流主要活动在 3~5 月份,其次是 11~12 月份。

风向的分布特征:(1)西北风分布频数最高,东风次之,东北北风最少。(2)从分布季节看,3~5 月份的西北风最多,5~9 月份东风较多,7~10 月份无风的记录较多。(3)从一昼夜看,西北风主要分布在下午至傍晚,9~20 时占全天的 72.0%,无风记录主要出现在 21~8 时,占 71.9%。(4) $\geq 6\text{m/s}$ 的风主要是西北风,东南风主要是 $< 6\text{m/s}$ 的风。(5)大风的方向与河西走廊的走向一致^[72]。

3.1.1.5 沙丘特征

民勤沙区的沙丘主要包括新月型沙丘、新月型沙丘链、沙堆、沙垄和复合型沙丘链几种类型。移动方式有:前进式、摇摆式和摆动前进式 3 种。风是产生沙丘移动的动力因素,沙丘本身的高度是沙丘移动速度的决定因素,植被、沙丘的水分状况和起伏地面的起伏程度对沙丘移动有直接的影响。沙丘移动速度受风速、风向、沙丘形状、沙丘高度(体积)、沙丘的排列密度、周围地形、周围开阔状况以及植被盖度等多种因素的影响,其总的状况是沙丘越高大移动越缓慢。同时由于风沙日数增多,从而加快了沙丘的移动速度,沙丘的移动速度逐年呈直线上升趋势。沙丘移动方向以自西北向东南方向为主。在移动过程中沙丘的大小、形状可能发生变化,2 个或 2 个以上的沙丘可能相接形成 1 个沙丘链或沙垄,也可能使 1 个高大沙丘在位移过程中分裂为 2 个或 2 个以上的小沙丘^[72]。

3.1.2 人口经济状况

民勤地域辽阔，土壤肥沃，素有“塞上奥区”之誉。民勤县现管辖 18 个乡镇，244 个行政村，1750 个生产合作社，总人口 3.07×10^5 人，其中农村人口 2.48×10^5 人，占总人口的 $5/6$ 。已兼有粮油、棉花、瓜子、甜瓜、甜菜、林果、蔬菜、畜禽、药材、小杂粮等十大商品基地，并配套完善了与之相应的批发市场和龙头加工企业，初步形成了农工贸一体化的农业产业化经营机制。

全县粮食生产以优质小麦、玉米和啤酒大麦为主，年总产量 $1.5 \times 10^9 \text{kg}$ ，是甘肃省重要的商品粮基地；农产品遐迩闻名，大板黑瓜籽、小茴香、黄河蜜瓜和白兰瓜等名优产品远销海外；甘草、锁阳、发菜、沙米、和沙葱等名贵野生资源极具挖掘潜力，开发前景看好。

民勤地区全县的 GDP 从 1990 年以来持续稳定地增长，2007 年，民勤县实现生产总值 2.653×10^{10} 元，同比增长 12.88%；固定资产投资达到 1.36×10^{10} 元，增长 40.45%；完成大口径财政收入 6.271×10^7 元，增长 14.37%；一般预算收入 3.218×10^7 元，增长 24.68%；社会消费品零售总额达到 6.84×10^9 元，增长 15.54%；农民人均纯收入达到 3869 元，增长 8%；城镇居民可支配收入达到 6382 元，增长 13.6%。

县境内省级及县级公路比较完善，乡村公路四通八达，通讯设施齐备。全县土地面积约 $1.6 \times 10^4 \text{km}^2$ ，全县在册耕地面积 9.5×10^5 亩，人均耕地面积 3.5 亩。

乡镇企业规模和效益同步增长，总产值年均递增 40% 以上。近几年，科教兴县、教学“普九”、邮电通讯，精神文明建设和社会治安综合治理等多项工作先后获得了全国和全省先进。

丰富的农业资源与严酷的自然条件的巨大反差，极大的制约了民勤经济的发展。特别是水资源日益减少的危机产生了一系列非良性循环。绿洲内 90% 的水量用于农业灌溉。由于灌溉技术落后，灌溉水利用率低，灌溉定额偏高，地下水管理失控等原因，致使地下水位大都下降了 15m 左右，水质恶化，盐碱地面积扩大，部分灌区弃耕，沙生植物死亡，沙丘活化，农业生产成本上升，昔日“粮仓”今日以面临于旱化、沙漠化、盐碱化和贫困化的四难境地，直接威胁着绿洲存亡。

3.1.3 实验区状况

试验区位于民勤主绿洲区的南部西侧的沙井子地区。研究区域沿主风向从绿洲开始，穿越天然白刺林和人工梭梭林，直到流动沙地，长度 8km，宽度 200m。研究区内包括了流动、半固定和固定沙地以及丘间低地，其中半固定、固定沙丘以天然白刺

(*Nitraria tangutorum*)和人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林群落为主。研究区土壤类型主要为风沙土。

3.2 研究的总体思路

根据监测的研究断面类型建立风沙流流量和风沙流结构观测样地。其中包括无盖度流动沙丘样地3个,天然白刺包样方9个,地形相似的三种不同类型机械沙障样地各3个;砾质沙地样地3个;梭梭林样地7个;

该项研究是配合同区域内的沙尘暴观测系统(水平梯度8km,垂直梯度50m,可以准确定量测定沙尘水平通量、垂直降尘量、气溶胶浓度、和风速风向等要素的时空变化)进行的。风沙流流量观测时间为2008年1~12月的每场起沙风(风速大于5.0m/s)。风沙流结构观测时间为08年3~7月份,此段时间正值风季,具有典型的地域性气候特征。

采用甘肃省民勤荒漠草地国家野外科学观测研究站研制的“风沙流流量计”(专利号: ZL 2006110105285.0),自动收集不同风向近地表 0-50cm 层次内的内风沙流流量。采用风向跟踪滤袋式积沙仪分层收集和测定不同下垫面 0~30cm 气流层内(每层 2cm×2cm,共 15 层)的输沙量及风沙流结构。

测定样地、观测样点附近的植被高度及盖度、沙丘的形态、风速和风向、样地沙土容重、地表粗糙度、林地疏透度、灌丛的植被盖度等要素。

3.3 实验方法

3.3.1 风沙流流量的测定

3.3.1.1 样地的选取

不同下垫面样地选择:根据研究内容和民勤的实际情况共建立风沙流流量观测样地22个,其中包括:①迎风面宽80m、高6米、坡度为25°~40°的无盖度流动沙丘样地3个;②分布有小型新月形沙丘和白刺沙包(沙丘和白刺沙包的平均密度为21%)的平坦砾质沙地样地3个;③天然白刺沙包样地3个;④选择了地形相似的三种不同类型机械沙障(1m×1m 麦草方格沙障、1m×1m 尼龙网格沙障和梗距为2m 的行列式黏土沙障)的样地各3个,共9个;⑤不同疏透度的梭梭林样地4个。

观测时间:2008年1~12月的每场起沙风(风速大于5.0m/s)。

3.3.1.2 观测内容

一段时间(如一年)、某一研究断面(如某一固沙工程)的风沙流总流量研究的

很少,民勤地区未见研究。风沙流流量对制定防沙治沙规划和评价治沙工程具有重要意义。本研究拟采用甘肃省治沙研究所的专利仪器风沙流流量计和风沙流实时监测仪实地监测民勤绿洲外围不同地段的风沙流流量,从而确定民勤绿洲各季节或全年的风沙流流量。具体的监测的范围和内容是:

①无盖度流动沙丘风沙流流量。②砾质沙地风沙流流量。③白刺沙包不同部位风沙流流量。④不同类型沙障的风沙流流量。⑤梭梭林带风沙流流量⑥不同下垫面条件下风沙流流量。

3.3.1.3 观测方法

风沙流流量采用甘肃省民勤荒漠草地国家野外科学观测研究站研制的“风沙流流量计”(专利号: ZL 2006110105285.0),自动收集不同风向近地表 0~50cm 层次内的内风沙流流量,每场起沙风过后取出沙样进行烘干称量并记录。

样地植被测定采用 100m×100m 样方调查各项植被要素,同时采用 1m×1m 的小样方进一步准确确定各观测样点附近的植被高度及盖度(重复 5 次);

沙丘的形态测定采用卷尺和罗盘仪,主要测量沙包的长、宽、高及迎风坡和背风坡的长度和坡度。

风速和风向采用梯度风速、风向自动监测系统(甘肃省民勤荒漠草地国家野外科学观测研究站)测定。风沙流过程中的平均风速是用起沙风开始到结束的平均风速代替。本实验中均选取 2m 高处风速(m/s),数据采集频率为 5min。

样地沙土容重采用环刀法测定,重复 5 次。

地表粗糙度的计算公式为: $\log Z_0 = (\log Z_2 - \log Z_1 \times \mu_2 / \mu_1) / (1 - \mu_2 / \mu_1)$ ^[9]。 (3-1)

式中: Z_0 为地表粗糙度; μ_1 和 μ_2 分别为同一时刻 $Z_1=1m$ 、 $Z_2=9m$ 高度处风速。

林地疏透度采用加拿大产的 winCAM 颜色分析软件计算得出,在林带防护作用最大的季节拍摄林带的垂直纵断面的数值照片,然后用 winCAM 颜色分析软件计算疏透度 L。

3.3.2 风沙流结构的测定

3.3.2.1 样地的选取

本项监测的研究断面包括民勤三种典型下垫面(沙漠、沙漠-绿洲、防风固沙林),长度 8km,宽度 200m,其中有流动、半流动、半固定和固定沙地以及丘间低地。半流动、半固定、固定沙丘以白刺群落为主,丘间低地多分布人工梭梭林。非地带性土壤为风沙土。该项研究是配合同区域内的沙尘暴观测系统(水平梯度 8km,垂直梯度 50m,

可以准确定量测定沙尘水平通量、垂直降尘量、气溶胶浓度、和风速风向等要素的时空变化)进行的。根据研究内容和民勤的实际情况共建立样方样地34个,其中包括流动沙丘样地3个,白刺包样方9个,麦草、尼龙网、粘土沙障样方各3个,丘间砾质沙地样地6个,梭梭样地7个。观测时间为2008年3~7月份,此段时间正值风季,具有典型的地域性气候特征。

3.3.2.2 观测内容

气流中所搬运的沙子在搬运层内随高度的分布特征,称为风沙流结构。风沙流的结构受地表机械组成、地面物质水分含量、风速和下垫面结构影响。根据民勤地区的防沙治沙实际需求做以下5方面观测研究:

①无盖度流动沙丘风沙流结构。②白刺平坦砾质沙地风沙流结构③白刺不同沙包部位的风沙流结构。④不同疏透度的梭梭林带的的风沙流结构。⑤不同类型沙障对风沙流结构的影响

3.3.2.3 观测方法

在观测时段内,采用风向跟踪滤袋式积沙仪分层收集和测定不同下垫面0~30cm气流层内(每层2cm×2cm,共15层)的输沙量及风沙流结构。具体方法是:在达到起沙风以上风速时,将积沙仪埋设于待测的样地(下口底部与地面平齐),观测开始时记录时间并同时打开积沙仪的各个进沙口,观测结束时记录时间并同时关闭各个进沙口,每次观测时间依据风速等条件而定。将积沙仪带回实验室,用1/1000g感量的电子秤称量各个高度层内沙样。

同时,采用100m×100m样方调查植被要素,同时采用1m×1m的小样方确定各观测样点的植被高度及盖度(重复5次);白刺沙包采用卷尺和罗盘仪对其形态进行测量,主要包括沙包的长、宽、高,以及灌丛的植被盖度、迎风坡和背风坡的坡度。风速采用设置在观测样地的风速梯度自动测定系统(甘肃省治沙研究所研制)测定,本实验中均选取2m高处风速,数据采集频率为5min;采用环刀法测定各个观测样点的沙土容重(重复5次);利用各观测样点两个不同高度的风速测定值计算土壤粗糙度,计算公式为: $\log Z_0 = (\log Z_2 - \log Z_1 \times \mu_2 / \mu_1) / (1 - \mu_2 / \mu_1)$ [9] 式中: Z_0 为地表粗糙度; μ_1 和 μ_2 分别为同一时刻 $Z_1=1m$ 、 $Z_2=9m$ 高度处风速(为5min平均风速值)。疏透度的测定采用拍照法,在林带防护作用最大的季节来确定疏透度,拍照林带的纵断面,然后在照片上

用求积仪计算林墙透光面积与总面积的比值,计算公式为 $L = \frac{S}{S_0} \times 100\%$

式中， L —疏透度； S —林墙上透光孔隙的总面积； S_0 —整个林墙垂直面面积。

3.4 研究的技术路线

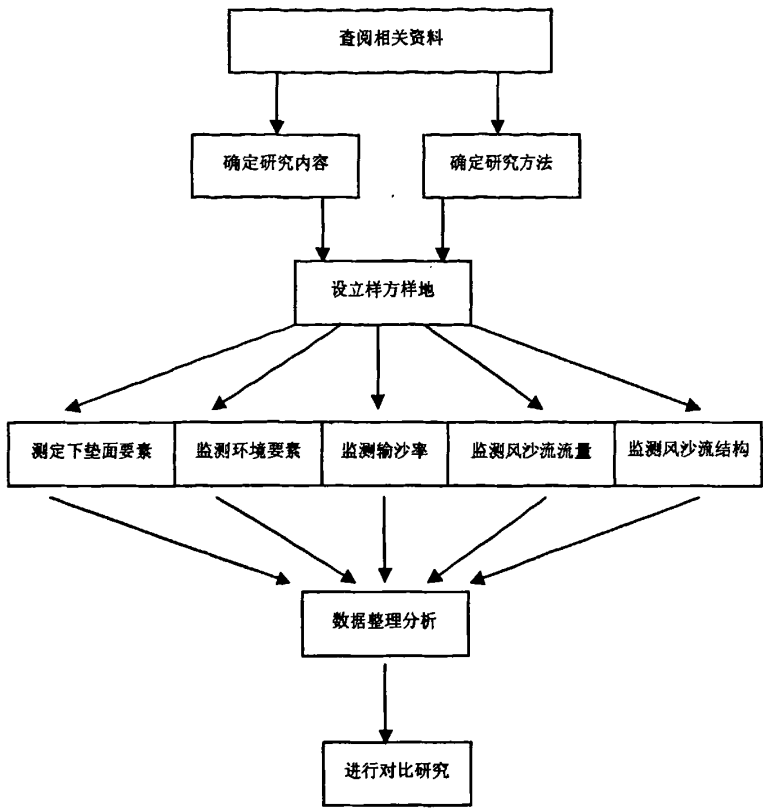


图 3.2 试验研究的技术路线

Fig3.2 Experimental Study on the Technology Roadmap

本研究以气象学、风沙物理学为理论依据，主要应用野外调查，室内分析测试等手段，对不同下垫面条件下风沙流结构和功能进行分析研究，根据研究结果对民勤现有防风固沙体系进行评价，为民勤生态系统的恢复或重建提供理论。依其技术路线如下(图 3.2)

第四章 不同下垫面条件下风沙流流量的研究

4.1 结果与分析

4.1.1 流动沙丘风沙流流量

4.1.1.1 流动沙丘输沙率与风速的关系

众所周知地表输沙率除了与地形地貌及沙粒粒径有着密切的关系之外还与与风速有重要关系。本研究通过 2008 年 18 次风沙流过程，测定了民勤典型流动沙丘迎风面底部、中部和顶部 0~50cm 高度层次内输沙率（Q）与风速（v）的关系（图 4.1）。输沙率随着风速的增大而增加，增加的速度遵从幂函数

关系，回归方程为：

$$Q_{底}=0.0001v^{5.3574}(R^2=0.8792);$$

$$Q_{中}=0.0004v^{4.7818}(R^2=0.9349);$$

$$Q_{顶}=0.0009v^{4.4009}(R^2=0.9038);$$

$$Q_{平}=0.0004v^{4.8315}(R^2=0.9460)。$$

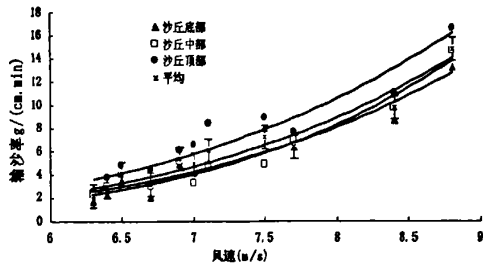


图 4.1 流动沙丘输沙率与风速的关系（近地面 0-50cm）

Fig.4.1 the trend of sand transport rate and wind velocity on moving sand dunes (0-50cm in the surface layer)

从总体变化趋势上看沙丘顶部的输沙率最大，沙丘中部其次，底部最小。这是由于在风场中风速随高度遵循幂函数曲线递增^[19]，风速增大，输沙率相应增大。民勤典型的新月形流动沙丘底部、中部和顶部的平均输沙率分别为 5.55g/cm.min（6.3m/s~8.8m/s）、5.64g/cm.min（6.3m/s~8.8m/s）和 7.35g/cm.min（6.3m/s~8.8m/s），2008 年全年平均输沙率为 5.97g/cm.min（6.3m/s~8.8m/s）。

4.1.1.2 流动沙丘不同部位的风沙流流量

相同风速条件下，监测的数据组内风沙流流量出现 $Q_{底}>Q_{中}$ 或 $Q_{底}<Q_{中}$ 的情况，从测定的风速资料可以看出在每一场风沙流过程中，风向的变化不是始终如一的，甚至在同一场风沙流中出现一种或多种相反的风向，风向的变化导致沙源形态的变化，从而导致无盖度流动沙丘坡底和中部输沙量的波动性变化，顶部的风沙流流量在所有的测量数据组内均大于坡底和中部，显而易见是由于高度的增加风速呈幂函数曲线递

增^[19]，顶部的风沙流流量受主风向风影响显著。

从 2008 年全年的平均风速来看，春季（3~5 月）平均风速最大，秋季（9~11 月）平均风速最小，从 08 年全年度的风沙流月分布来看，风沙流流量最大的月份出现在 4 月，占到了全年风沙流总流量的 19.9%，春季的风沙流流量占总流量的 44.1%，而秋季的风沙流流量只占总流量的 10%。从整个测量时段内 0~50cm 风沙流总流量来看，沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部，这也与输沙率总体变化趋势相同（表 4.1）。

表 4.1 流动沙丘不同部位风沙流流量月变化

Tab4.1 Monthly variation of wind-sand flow flux on different partof moving sand dune

时 间	平均风速 (m/s)	风沙流流量 (kg/m)			
		底部	中部	顶部	平均
1 月	7.2	3824.8	4529.3	5856.2	4736.8
2 月	7.3	2410.5	2318.2	3325.6	2684.8
3 月	7.6	1521.8	1831.0	5078.3	2810.4
4 月	7.4	5608.8	10275.2	16545.6	10809.9
5 月	7.3	14050.9	9940.0	7235.9	10408.9
6 月	7.1	4553.9	6777.7	11997.4	7776.3
7 月	6.8	4757.3	3375.3	4681.6	4271.4
8 月	6.6	1751.3	2831.2	3943.6	2842.0
9 月	6.5	1211.4	1143.8	1988.7	1448.0
10 月	6.3	1323.2	1534.6	2421.0	1759.6
11 月	6.3	2011.8	1874.3	2789.8	2225.3
12 月	6.8	1846.3	2732.4	3467.1	2681.9
合计		44872.0	49163.0	69330.8	54455.3

4.1.2 砾质沙地风沙流流量

4.1.2.1 砾质沙地输沙率与风速的关系

图 4.2 是在砾质沙地 3 个样地 11 次风沙流过程中 0~50cm 高度层次内输沙率(Q)与起沙风速 (v) 的关系曲线。从图 2 可以看出：它们的数学关系曲线遵从幂函数方程，拟合方程为：

$$Q=1.4E-8v^{8.9307}(R^2=0.8376)。$$

当风速<7.5m/s 时，输沙率呈增大趋势，但比较缓慢，当平均风速>7.5m/s 时，输沙率增大趋势明显，说明随着风速的增大，气流搬运的沙量急剧增大。与图 4.1 相比较，流动沙丘上的平均输沙率是白刺平坦砾质沙地上的 6.3 倍，这说明当风速相同的条件下沙源对输沙率的大小起着决定性的作用，所以防沙治沙的根本还是在于遏制沙源。

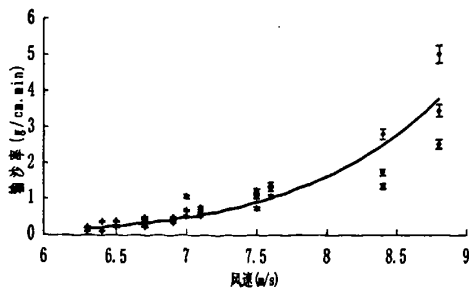


图 4.2 砾质沙地输沙率与风速的关系（近地面 0~50cm）

Fig4.2 the trend sand transport rate and wind velocity on

4.1.2.2 砾质沙地的风沙流流量

从 08 年全年度近地面 0~50cm 内风沙流总流量来看，流动沙地的风沙流流量是砾质沙地的 9.9 倍（表 4.1，表 4.2），而流动沙地的输沙率是砾质沙地的 6.3 倍，这主要是由于一方面砾质沙地上白刺对近地层风沙流起到了一定的阻碍作用，另一方面砾质沙地的地表粗糙度以及硬度远大于流动沙丘，在跃移中落下的沙粒和地面碰撞时，在愈来愈大的程度上是反弹多、飞溅少，沙粒在碰撞后反弹跳得更高和更远^[20]，而沙粒运动高度的增大必然导致整体含沙量的减小，从而导致两种下垫面风沙流流量的显著差异。这进一步证实了在风速等其他因素基本相同的情况下沙源对风沙流流量起着决定性的因素。

从全年的平均风速来看，春季（3~5 月）平均风速最大，秋季（9~11 月）平均风速最小，从 08 年全年度的风沙流月分布来看，风沙流流量最大的月份出现在 4 月，占到了全年风沙流总流量的 21.6%，春季的风沙流流量占总流量的 44%，而秋季的风沙流流量只占总流量的 9.5%（表 4.2）。

表 4.2 砾质沙地风沙流流量月变化

Tab4.2 Monthly variation of wind-sand flow flux on gravel sandy land

时间	平均风速 (m/s)	风沙流流量 (kg/m)			
		样地 1	样地 2	样地 3	平均
1 月	7.2	487.3	511.4	582.8	527.2
2 月	7.3	420.1	411.7	496.6	442.8
3 月	7.6	319.7	289.3	245.2	284.7
4 月	7.4	1456.5	1064.3	1037.0	1185.9
5 月	7.3	1110.7	834.1	903.1	949.3
6 月	7.1	801.3	668.4	739.5	736.4
7 月	6.8	427.7	542.8	389.4	453.3
8 月	6.6	184.2	197.6	177.6	186.5
9 月	6.5	128.8	133.7	146.1	136.2
10 月	6.3	146.1	111.7	129.8	129.2
11 月	6.3	274.4	282.1	219.8	258.8
12 月	6.8	231.1	217.4	174.2	207.6
合计		5987.9	5264.5	5241.1	5497.8

4.1.3 白刺沙包不同部位风沙流流量

民勤地区风况的特点是，西偏北风占优势，研究区内所有的白刺沙包迎风坡方向均在西北方向，且多数沙包迎风坡上有不同程度的白刺覆盖，背风坡基部上几乎无植被。从研究结果可以看出：

①在整个观测时段内，不论风速、不论白刺包上白刺的密度、盖度、高度如何变化，背风坡底部的风沙流流量总是大于顶部和迎风坡底部。这是由于沙粒在迎风坡底部被风力吹动，以后顺着斜坡跳跃和滚动搬运，向着丘顶推进；跳跃上移的沙粒到达丘顶后，因气流在背风坡受到沙丘本身掩护作用，于背风坡形成具有水平轴的涡流，气流速度减弱，跳跃沙粒不能被气流搬运，借助于惯性的作用跳跃沙脊一段距离后，受重力影响下落堆积于背风坡^[19]（图 3.3）。

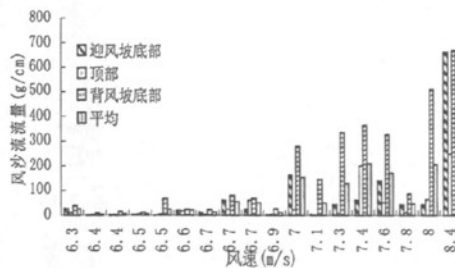


图 4.3 白刺包不同部位风沙流流量在 18 场起沙风中的分布（近地面 0~50cm）

Fig.4.3 wind-sand flow flux distribution at different Place of *Nitraria tangutorum* dune in 18 wind feild (0~50cm in the surface layer)

②在 8 次风沙流过程中个白刺沙包风沙流流量平均值迎风坡

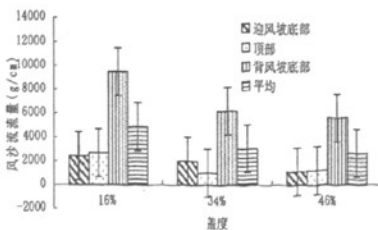


图 4.4 白刺包风沙流流量在不同盖度条件下的分布（近地面 0~50cm）

Fig.4.4 wind-sand flow flux distribution on different coverage of *Nitraria tangutorum* (0-50cm in the surface layer)

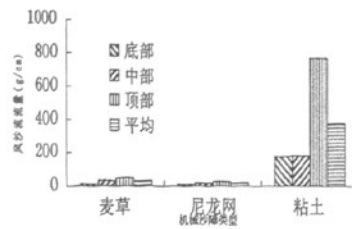


图 4.5 麦草沙障、尼龙网沙障和粘土沙障不同部位风沙流总流量分布图（近地面 0~50cm）

Fig.4.5. wind-sand flow flux at different place of wheatstraw checkerboard, nylon sand barrier and clay fence belt. (0-50cm in the surface layer)

底部<顶部; 在 10 次风沙流过程中迎风坡底部>顶部,但是从风沙流总流量看, 是迎风坡底部>顶部 (图 4.3)。经分析表明, 导致白刺沙包迎风坡底部与顶部风沙流变化的原因主要是, 风沙流过程中风场风向虽然均以西北风为主, 但不同风沙流过程的风向的变化差异较大, 甚至有时候会出现与主风向完全相反的风向, 由于沙丘形状和白刺枝条防护作用的各向异性, 从而导致迎风坡底部与顶部风沙流流量和输沙率的变化。

③白刺包的盖度与风沙流流量存在密切关系 (图 4.4), 本研究监测了盖度为 16%、34%和 46%的 3 种白刺沙包。从监测结果看, 随着白刺盖度的增加, 白刺沙包不同部位的风沙流流量均减少, 在当地自然条件下盖度为 16%的白刺沙包平均风沙流流量为 4866.1g/cm、盖度为 34%为 3066.2g/cm、盖度为 46%为 2557.1g/cm, 盖度增加 65.2%, 风沙流流量减少 45.4%。

4.1.4 不同类型沙障的风沙流流量

本文研究了麦草、尼龙、粘土 3 种材料沙障样地的迎风坡面底部、中部和顶部风沙流流量, 目的是确定民勤常用机械固沙材料的防沙效果。结果表明 (图 4.5):

①粘土沙障沙丘顶部的风沙流流量是麦草沙障的 15 倍, 是尼龙网沙障的 27 倍, 而从沙丘上三个部位的风沙流流量平均值来看粘土沙障是麦草沙障的 12 倍, 是尼龙网沙障的 19 倍。从防风固沙的效果来看, 尼龙网沙障的防沙能力最好, 麦草沙障次之, 粘土沙障最弱, 所以可以综合它们的防风效益以及造价, 因地制宜的合理安置沙障, 使之发挥最大的效益。

②这三种沙障底部、中部和顶部的风沙流流量分布与无盖度流动沙丘的风沙流流量分布具有很好的一致性, 即从风沙流总流量分布来看, 沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部, 在个体风沙流流量分布中, 有底部>中部的情况出现, 这主要是由于风向的瞬时改变次数增多或是在一场起沙风里与主风向相反的风占的比例增多而引起。

③与整个监测时段内无盖度流动沙丘三个部位的风沙流总流量相比较, 无盖度流动沙丘的风沙流流量是粘土沙障的 630 倍, 是麦草沙障的 7563 倍, 是尼龙网沙障的 11975 倍, 在风沙流发生的过程里, 沙物质有很大含量在近地表层运动, 例如, Butterfield 在风洞模拟试验中发现, 风沙流中 79%的沙物质在 1.8cm 高度以下运行^[73]; Chepil 的研究结果表明, 0~5cm 高度内搬用的沙物质占总搬运量的 60%~80%^[74]; 吴正在我国沙漠沙漠地区的观测也表明气流中挟带的沙物质 90%以上分布在沙质地表 30cm 以下的高度内^[20]。所有这些实验的结果都表明风沙运动是一种贴近地面的沙

物质的搬运过程,这也解释了铺设机械沙障的沙丘上风沙流流量远小于无盖度流动沙丘风沙流流量的原因,可见沙障的应用在防风治沙工程中的重要性。

4.1.5 梭梭林带风沙流流量

民勤地区由于干旱少雨,植物根系对水分竞争激烈,人工种植的梭梭林由于密度、盖度的不合理配置,导致梭梭林带退化严重,甚至出现大片死亡的情况。所以,在民勤地区特殊环境下,确定梭梭林带在一个合理的疏透度(L)下使其防风固沙效益发挥到最大具有重大意义。

本实验选择疏透度为 36%、47%、59%、78% 的四种梭梭林带进行观测。在 10 次不同风场里测量的结果表明:

①梭梭林带疏透度为 36% 的风沙流流量 ($Q_{36\%}$) 到疏透度为 47% 的风沙流流量 ($Q_{47\%}$) 变化有增大趋势,但是变化不明显,甚至在几组测量中出现 $Q_{36\%} > Q_{47\%}$ 的情况。从林带退化的实际情况和防风治沙的效果考虑,此地区疏透度为 47% 的梭梭林带优于疏透度为 36% 的梭梭林带。

②疏透度为 59% 的梭梭林带风沙流流量 ($Q_{59\%}$) 明显大于 $Q_{47\%}$,而疏透度为 78% 的梭梭林带输沙量 ($Q_{78\%}$) 的增大非常显著,从 10 次测量的平均值来看, $Q_{78\%}/Q_{59\%}=3.6$ 、 $Q_{78\%}/Q_{47\%}=6.9$ 、 $Q_{78\%}/Q_{36\%}=11.1$ 。所以疏透度为 78% 的梭梭林带在民勤地区以防风固沙为目的的配置是不合理的(图 4.6)。

③随着疏透度的增大,风沙流流量成多项式 $Q=1992L^2 - 6522.7L + 5914.3$ ($R^2 = 0.9767$) 或指数函数 $Q=412.38e^{0.7877L}$ ($R^2 = 0.9127$) 递增。综合以上情况,民勤地区梭梭林带疏透度为 50% 左右是较为合理的配置。

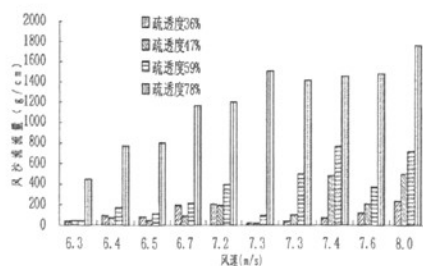


图 4.6 不同疏透度梭梭林风沙流流量 (近地面 0-50cm)

Fig4.6 wind-sand flow flux distribution On different shelterbelt porosity of *HaloxylonAmmodendron* forest in 10 wind field (0-50cm in the surface layer)

4.1.6 不同下垫面条件下风沙流总流量对比

不同的下垫面类型中,风沙流流量在每个月的统计中都遵循流动沙丘>砾质沙地>梭梭林>白刺包>粘土沙障>麦草沙障>尼龙沙障,并且流动沙丘的流量占到了总量的 88.9%,可见遏制沙源的前移是防风固沙的根本;砾质沙地流量占总量的 8.97%,主要是由于新月形沙丘、沙粒粒径、地表紧实度等因子影响使其与无盖度流动沙丘相比较风沙流流量大幅降低;白刺包与梭梭林风沙流流量总和只占总量的 1.99%,不足丘间砾质沙地的 1/4,而三种机械沙障的总和只占到总量的 0.19%,可以看出采取的防沙工程在整个防沙过程中的重要性和必要性。通过 08 年全年度监测的总风沙流流量可以看出,沙漠研究断面(200m)近地面 0~50cm 高度内的总风沙流流量($Q_{\text{沙漠}}$)为 4048t,防风固沙林 0~50cm 的总风沙流流量($Q_{\text{林}}$)为 122t,相对于沙漠下垫面,防风固沙林下垫面的总风沙流流量减少了 96.99%,可以通过常年观测风向与风沙流流量以及下垫面的变化规律,确定现有防风固沙林的防风固沙效益,从而为以后防风固沙林的建设起到一定的指导作用。

4.1.7 风沙流流量的季节分布

从整个监测的结果来看,民勤地区春季(3~5 月)共监测 15 场起沙风,主风向均为西北风,风沙流流量占全年总量的 44.67%,夏季(6~8 月)共监测 9 场起沙风,主风向均为西北风,风沙流流量占全年总量的 25.12%,秋季(9~11 月)共监测 7 场起沙风,风沙流流量占全年总量的 10.67%,冬季(1 月、2 月、12 月)共监测 11 场起沙风,风沙流流量占全年总量的 19.54%,可见 08 年全年度风沙流流量季节性分布为:春季>夏季>冬季>秋季,综合以往实验区的气象等观测资料发现:民勤地区的风季主要集中在春季,且春季的风沙流流量约占全年总流量的 40%-50%,所以春季的防沙固沙工作尤为重要;民勤地区不同年份冬夏两季的起沙风次数以及起沙风强度有较大波动,这必然导致冬夏两季风沙流流量与总流量比值的较大变动,可以通过对风沙流流量多年的监测以求取较精确的比值关系,从而可以将防沙固沙工作的时间比较准确的量化,起到事半功倍的效果。

第五章 不同下垫面条件下风沙流结构的研究

5.1 结果与分析

根据民勤地区特有的下垫面类型以及防沙治沙的实际需求做以下方面观测研究:

5.1.1 流动沙丘风沙流结构

选取民勤中等大小的新月形沙丘链为观测现场,沙丘链长度 80m、高度 6m、研究坡面坡度为 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、整个沙丘无植被存在,积沙仪设置在沙丘链的底部、中部、顶部。取 3 次观测的平均值,观测期间 2m 高度上的平均风速为 $9.0 \sim 9.5\text{m/s}$ 。

分析结果表明:

①流动沙丘的三个部位上,在 $0 \sim 30\text{cm}$ 高程内, $0 \sim 2\text{cm}$ 含沙量占总数的 40% (略变),为蠕动沙量^{[26][27]}, $2 \sim 4\text{cm}$ 含沙量占总数的 20%, $4 \sim 30\text{cm}$ 含沙量占总量的 40% (略变) (图 5.1)。

②流动沙丘 $0 \sim 30\text{cm}$ 气流层内输沙率($\text{g}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$)与高度 $h(\text{cm})$ 的关系遵从负指数函数,回归方程为:

$$Q = 0.2734e^{-0.2252h} \quad (R^2 = 0.8746), \quad Q = 0.4387e^{-0.2722h} \quad (R^2 = 0.8922), \quad Q = 1.271e^{-0.2842h} \quad (R^2 = 0.9550)。$$

③流动沙丘的平均输沙率 (6.67%) 出现的位置在在 $6 \sim 8\text{cm}$,流动沙丘最大含沙量出现在最底层 ($0 \sim 2\text{cm}$)。

④流动沙丘顶部输沙率是沙丘中部的 2.4 倍、沙丘底部的 3.5 倍,可以看出,在流动沙丘上,输沙率顶部 > 中部 > 底部。

5.1.2 砾质沙地风沙流结构

选取 3 种白刺沙包盖度的平坦砾质平沙地为观测现场,白刺沙包的盖度分别为 15%、40%和 60%,测量其风沙流结构,取 2 次观测的平均值,观测期间 2m 高处的平均风速为 9.5m/s 。

分析结果表明:

①砾质沙地上,在 $0 \sim 30\text{cm}$ 高程内, $0 \sim 2\text{cm}$ 含沙量占总数的 21% (略变), $2 \sim 4\text{cm}$ 含沙量占总数的 16%, $4 \sim 30\text{cm}$ 含沙量占总量的 63% (略变),可见沙粒的运动以跃移为主 (图 5.2)。

②砾质沙地 0~30cm 气流层内输沙率($\text{g}/\text{min} \cdot \text{cm}^2$)与高度 $h(\text{cm})$ 的关系也遵从负指数函数,回归方程为:

$$Q_{15\%}=0.2214e^{-0.2077h} (R^2=0.9952), Q_{40\%}=0.1311e^{-0.1879h} (R^2=0.9917), Q_{60\%}=0.0356e^{-0.1534h} (R^2=0.9523)。$$

③砾质沙地的平均输沙率出现在 8~10cm 高度处。样地 1 的 22.5 倍、样地 2 的 7.5 倍、样地 3 的 4.9 倍。在丘间砾质沙地上,随着新月型沙丘盖度的增大,输沙量随之减小,并且流动沙丘上的输沙率明显大于丘间砾质沙地,这说明在同一风速条件下,输沙率的大小与地表粗糙度成反比、与沙丘盖度成反比。

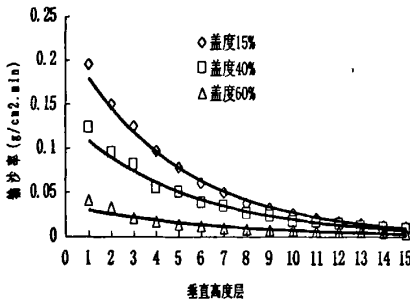


图 5.1 流动沙丘输沙率与高度的关系 (近地面 0~30cm)

Fig5.1 the trend of sand transport rate and height on moving sand dunes (0-30cm in the surface layer)

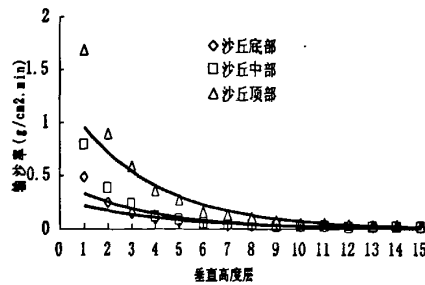


图 5.2 砾质沙地输沙率与高度的关系 (近地面 0~30cm)

Fig5.2 the trend sand transport rate and height on gravelly sandy land (0-30cm in the surface layer)

5.1.3 白刺沙包不同部位的风沙流结构

在同一个风场背景条件下,不同地形处风速有较大变化,另外沙丘的不同部位沙面的粒径组成变异明显,由此不同风沙地貌类型和沙丘的不同部位风沙流结构有所不同。图 5.3 是在平均风速为 9.4m/s 时测定的白刺沙包迎风坡底部、顶部、背风坡底部风沙流结构。

分析结果表明:

①输沙率随着高度的增大而减小,并且很好的遵循幂函数关系。迎风坡底部、顶部和背风坡底部的拟合方程分别为 $Q_{迎}=0.224h^{-1.4909} (R^2=0.9665)$ 、

$$Q_{顶}=0.0559h^{-0.9962} (R^2=0.9014) 、 Q_{背}=0.0811h^{-1.2913} (R^2=0.9841)。$$

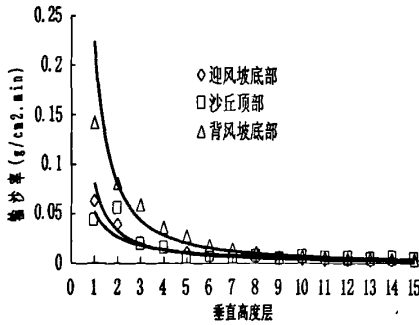


图 5.3 相同白刺包不同部位风沙流结构 (近地面 0-30cm)

Fig.5.3 structure of drifting sand flux at different Place of the same *Nitraria tangutorum* dune (0-30cm in the surface layer)

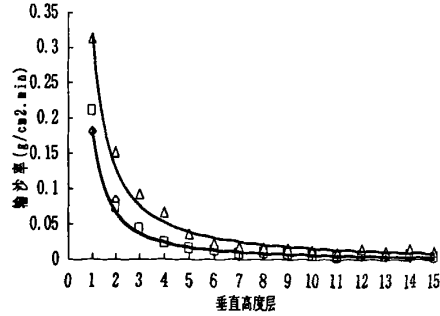


图 5.4 不同疏透度梭梭风沙流结构 (近地面 0-30cm)

Fig.5.4 structure of drifting sand flux On different shelterbelt porosity of *Haloxylon Ammodendron* forest (0-30cm in the surface layer)

②三个部位最大含沙量均固定在最底层 (0~2cm), 分别为 32.53%、27.98%、33.45%, 0-8cm 内的含沙量分别占总量的 72.15%、67.75%、74.87%。

③ $Q_{背}/Q_{迎}=2.19$ 、 $Q_{背}/Q_{顶}=2.16$, 可见背风坡的输沙率大于迎风坡底部和顶部, 这主要是由于风沙流越过沙丘后在背风坡发生风积作用, 迎风坡顶部输沙率略小于底部, 顶部 0~8cm 的含沙量也小于底部, 这是由于迎风坡面上白刺的存在而导致。

5.1.4 梭梭林带的风沙流结构

疏透度是指林墙上树干间和树冠中透光孔隙总面积与整个林墙垂直面积的百分比。民勤绿洲外围防护林主要以人工梭梭林为主, 所以研究梭梭林疏透度对风沙流结构的影响, 从而研究林带的防护作用、造林的密度 (株行距)、林带宽度、树种组成以及配置方式都有重要意义。本研究选取疏透度分别为 5%、30%、50% 的三个梭梭林带进行观测, 研究发现:

①不同疏透度条件下的风沙流结构都符合幂函数递减规律, 三种疏透度的拟合方程分别为 $Q = 0.1843h^{-1.4852}$ ($R^2 = 0.9618$)、 $Q = 0.1868h^{-1.4649}$ ($R^2 = 0.9435$)、 $Q = 0.3209h^{-1.311}$ ($R^2 = 0.945$) (图 5.4)。

②三种疏透度条件下风沙流最大含沙量均固定在最底层 (0~2cm), 分别为 44.47%、48.78%、38.60%, 并且 0-8cm 内的含沙量占总量的 81.32%、80.89%、76.93%, 底层含沙量百分比减小的原因主要是由于随着疏透度的增大, 对风沙流阻碍作用减小, 沉降量减小, 又因为地表不同程度的结皮而导致。

③ $Q_{30\%}/Q_{5\%}=1.06$, $Q_{50\%}/Q_{30\%}=1.88$.可见,疏透度为 5%和 30%的梭梭林带对输沙率的影响变化不大,这也反映了梭梭林带种植过密,增大了对地面水分的竞争,而并没有从实际上增大对风沙流的抑制,疏透度为 50%的梭梭林带比 30%的梭梭林带输沙率明显增大,可以推断,30%<最佳疏透度<50%.

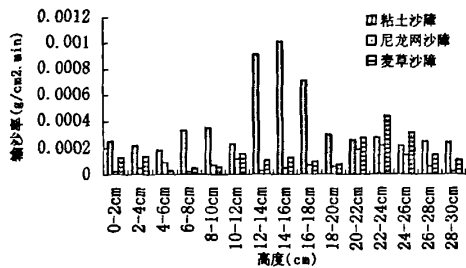


图 5.5 麦草沙障、尼龙网沙障和粘土沙障输沙率的垂直分布 (近地面 0-30cm)

Fig5.5. vertical distribution of the trend of sand transport rate at wheatstraw checkerboard、nylon sand barrier and clay fence belt. (0-30cm in the surface layer)

5.1.5 不同类型沙障对风沙流结构的影响

选取 4 个地形地貌、植被盖度、密度基本相似的样地,样地 1 上铺设梗高 0.21m、宽 1.7m 的条形粘土沙障,样地 2 上铺设 1m×1m、高 0.2m 的尼龙网方格沙障,样地 3 上铺设 1m×1m、高 0.18m 的麦草方格沙障,样地 4 上无沙障,分别在每个样地的底、中、顶部埋设风沙流流量计和风向跟踪滤袋式积沙仪,图 4.5 是不同沙障类型风速为

表 5.1 麦草沙障、尼龙网沙障和粘土沙障不同部位输沙量的分布

Tab5.1.Sand transport distribution at different place of wheatstraw checkerboard、nylon sand barrier and clayfence belt. (0-30cm in the surface layer)

地形地貌	沙丘底部输沙量 (g/cm ²)	沙丘中部输沙量 (g/cm ²)	沙丘顶部输沙量 (g/cm ²)	输沙量总量 (g/cm ²)
麦草沙障	14. 97	32. 94	44. 92	92. 83
尼龙网沙障	9. 73	19. 46	20. 96	50. 15
粘土沙障	160. 96	170. 96	709. 72	1041. 64
无沙障地	1678. 76	2423. 43	8536. 51	12638. 70

8.5m/s 时近地表从 0cm 开始每隔 2cm 一层共 15 个高度层风沙流结构的示意图。可以看出:①粘土沙障的含沙量($Q_{\text{粘土}}$)最大值出现在 14~16cm 处,占总量的 17.53%,在 12~16cm 气流层内含沙量占总量的 45.7%。尼龙网沙障的含沙量($Q_{\text{尼龙}}$)最大值

出现在 22~24cm 处, 占总量的 17.74%。在 20~26cm 气流层内含沙量占总量的 45.2%。麦草沙障的含沙量($Q_{\text{麦草}}$)最大值出现在 22~24cm 处, 占总量的 19.13%。在 20~26cm 气流层内含沙量占总量的 45.2%②从 0~30cm 平均输沙率看, $Q_{\text{黏土}}/Q_{\text{尼龙}}=4.7$, $Q_{\text{黏土}}/Q_{\text{麦草}}=2.5$, 表明三种沙障的

防风固沙效益 $Q_{\text{黏土}} < Q_{\text{麦草}} < Q_{\text{尼龙}}$, 而无沙障的样地输沙量 $Q_{\text{无}}/Q_{\text{黏土}}=12.1$ (表 5.1), 由此可以看出沙障的固沙效益还是非常明显的。

第六章 结论与建议

6.1 结论

通过民勤绿洲外围不同地段、不同下垫面类型、不同防风固沙工程的输沙率、风沙流流量和风沙流结构的监测数据和分析, 结论如下:

1) 无盖度流动沙丘上风速 (V) 与近地面 0~50cm 内输沙率 Q ($g/cm.min$) 之间的数学关系是幂函数曲线 ($Q=aV^b$); 从总体趋势上看, 风沙流流量的分布是沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部。0~30cm 高程内最大含沙量出现在最底层 (0~2cm), 占总数的 40% (略变), 为蠕动沙量^{[26][27]}; 近地面 0~30cm 气流层内输沙率($g/min.cm^2$)与高度 $h(cm)$ 的关系遵从负指数函数 $Q=ae^{bh}$ (a 、 b 为常数); 相同条件下输沙率沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部。

2) 白刺平坦砾质沙地上风速 (V) 与近地面 0~50cm 内输沙率 Q ($g/cm.min$) 之间的关系曲线也是幂函数曲线 ($Q=aV^b$); 起沙风速<平均风速<7.5m/s (左右) 时, 输沙率呈增大趋势, 但比较缓慢, 当平均风速>7.5m/s(左右) 时, 输沙率增大趋势明显; 0~30cm 高程内最大含沙量出现在最底层 (0~2cm), 占总数的 21% (略变), 沙粒的运动以跃移为主; 近地面 0~30cm 气流层内输沙率($g/min.cm^2$)与高度 $h(cm)$ 的关系遵从负指数函数 $Q=ae^{bh}$ (a 、 b 为常数); 在同一风速条件下, 输沙率的大小与地表粗糙度成反比、与沙丘盖度成反比。

3) 白刺沙包在整个观测时段内, 背风坡底部的风沙流流量总是大于顶部和迎风坡底部, 迎风坡底部和顶部的风沙流流量在单个风场中变化较大, 但是从全年度近地面 0~50cm 内风沙流总流量来看: $Q_{背风坡底部} > Q_{迎风坡底部} > Q_{顶部}$; 白刺包上白刺的盖度大小对风沙流流量影响显著, 白刺的盖度越小, 风沙流流量越大。白刺沙包迎风坡底部、顶部和背风坡底部三个部位 0~30cm 高程内最大含沙量均固定在最底层 (0~2cm), 分别为 32.53%、27.98%、33.45%, 0~8cm 内的含沙量占总量的 70% 左右; 近地面 0-30cm 气流层内输沙率($g/min.cm^2$)与高度 $h(cm)$ 的关系都遵从幂函数 $Q=ah^b$ (a 、 b 为常数); 背风坡的输沙率最大, 迎风坡底部略大于顶部。

4) 不论是铺设尼龙网、粘土还是麦草沙障的沙丘上, 风沙流总流量分布都遵循

沙丘顶部>沙丘中部>沙丘底部;粘土沙障、尼龙网沙障和麦草沙障的含沙量最大值分别出现在 14~16cm、22~24cm 和 22~24cm 处,占总量的百分比分别为 17.53%、17.74%、19.13%;三种沙障的防风固沙效益 $Q_{\text{粘土}} < Q_{\text{麦草}} < Q_{\text{尼龙}}$,所以因地制宜的合理安置沙障,使之发挥最大的效益非常重要。

5) 在梭梭林地上,疏透度为 47%的梭梭林带对于风沙流流量的影响优于疏透度为 36%的梭梭林带。疏透度为 78%的梭梭林带在民勤地区以防风固沙为目的的配置是不合理的。随着疏透度的增大,风沙流流量成多项式 $Q = 1992L^2 - 6522.7L + 5914.3$ ($R^2 = 0.9767$) 或指数函数 $Q = 412.38e^{0.7877L}$ ($R^2 = 0.9127$) 递增。不同疏透度条件下的风沙流结构都符合幂函数递减规律 $Q = ah^b$ (a 、 b 为常数)。三种疏透度 (36%、47%、78%) 条件下风沙流最大含沙量均固定在最底层 (0~2cm), 分别为 44.47%、48.78%、38.60%, 并且 0-8cm 内的含沙量占总量的 80%左右; 30%<最佳疏透度<50%,民勤地区梭梭林带疏透度为 40%左右是较为合理的配置。

6) 从 08 年全年度监测的风沙流总流量看,无盖度流动沙丘>白刺平坦砾质沙地>梭梭林>白刺包>粘土沙障>麦草沙障>尼龙沙障;从风沙流总流量的季节性分布来看,春季>夏季>冬季>秋季,防风固沙的重点应该放在春季;从历年气象资料推断在不同的年份冬夏两季的风沙流流量可能会有较大波动。

6.2 建议

风沙流是气流及其所搬运固体颗粒 (沙) 的两相流。随床面状态不同,沙粒搬运高度和浓度有较大区别与变化,这就产生了为风沙流所特有的结构。风沙流结构是指单位面积单位时间输沙量随高度的变化 ($Q=F(y)$)^[86]。风沙流输沙强度 (输沙率) 是指单位时间内通过单位宽度的风沙流所携带沙物质的数量。计算风沙流中固体流量 (即输沙量) 和揭示风沙流所搬运沙粒随高度分布 (即风沙流结构), 既有理论意义, 也是风沙工程中确定合理防沙方案、措施及其结构的主要科学依据。

Bagonld 最早建立了风沙流输沙量理论公式, Nbahob 也提出计算平坦沙地上风沙流输沙量理论公式^[87]; 随后, 国内外学者提出了颇多输沙率公式^[88-90], 有实测拟和公式^[90-91], 有风洞实验推导公式。共同之处是, 均认为风沙流中沙量的垂直分布呈指数分布^[92-93]。多数沙粒在 0~20cm 内传输^[94-95], 90%的沙量在 0~10cm 内传输^[96]。随着风速增大, 风沙流底层含沙量反而减少。朱震达等人^[97-98]的研究结果表明, 气流搬

运的沙量绝大部分(80%)集中分布在 0~10cm 高度内,含沙量的对数与高程之间具有良好的线性关系,即含沙量与高度之间遵循指数函数关系,输沙量随高度增加呈指数规律递减。然而,这些研究成果照搬到民勤地区的治沙实践中显然是不够的,显而易见,对于不同地域内的沙漠治理要根据当地的具体情况,通过栽植适应当地气候且效果显著的固沙植物以及铺设各种机械沙障等措施进行有效地治理。但是由于风速分向等诸多原因造成下垫面的差异,所以研究该地域特有下垫面对风沙流的影响,结合诸多先辈的研究成果,寻找到适合当地最有效的防风治沙的方法意义重大。

通过对民勤沙区综合防治体系建设提出以下建议:

1) 对离沙源最近的流动沙丘和丘间砾质沙地上风沙流流量和结构的研究,发现与以往工作者在不同地域内的研究具有高度的吻合性,所以对其防治的办法可以借鉴不同沙区防治的已有经验结合该区总结出的经验进行有效地治理。

2) 为防止白刺沙包前移的速度,在沙包迎风坡和顶部适量加大白刺的盖度或者通过尼龙网绳等穿插于白刺之中,使之有效地联结在一起抵御风沙流向沙丘背风坡移动而导致的沙丘整体前移速度。

3) 采取本研究中涉及到的三种机械沙障固沙时,从离沙源由近及远的顺序铺设粘土沙障、麦草沙障、尼龙网沙障,使之对风沙流流量进行最有效的阶梯式削弱。根据对这三种沙障上风沙流结构的研究,粘土沙障的梗高在 16cm、麦草沙障和尼龙网沙障的梗高在 24cm 较为适宜。

4) 改变梭梭林的疏透度至 40%左右,使之在合理利用地下水存活条件下,防风防沙效果最大化,并且在梭梭林地上人工种植一些高度为 0~8cm 左右的沙生植物(如沙米等),以削减梭梭林地上 0~8cm 内 80%的含沙量。

参考文献

- [1] 董治宝等,系统的研究实践的总结评《实验风沙物理与风沙工程学》[J].中国沙漠.1999,19(1): 94~96.
- [2] 董治宝等;直立植物防沙措施粗糙特征的模拟试验[J].中国沙漠.2000,20(3): 260~26.
- [3] 董光荣,李长治,金炯,等.关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J].科学通报.1987,32(4): 291~301.
- [4] 董治宝等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报.1996,16(4): 437~443.
- [5] 关德新等.林带中阻力分布的理论与实验研究[J].应用生态学报.1996,7(2): 129~133.
- [6] 申建友,董光荣,李长治.风洞与野外输沙率的分析与讨论[J].中国沙漠.1988,8(3): 23~30.
- [7] 叶笃正等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报.2000,55(5): 513~521.
- [8] 黄富祥等.毛乌素沙地不同防风材料降低风速效益的比较[J].水土保持学报.2001,15(1): 27~31.
- [9] 黄富祥等.毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙量定量关系[J].地理学报.2001,5(66): 700~710.
- [10] 刘连友.区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究-以晋陕蒙接壤区为例[J].地理学报.1999,54(1): 59~68.
- [11] 龚家栋,程国栋,张小由,等.黑河下游额济纳地区的环境演变[J].地球科学进展,2002,17(4): 491-495.
- [12] 王明远,姚云峰,王林和.额济纳荒漠绿洲环境容量与环境影响评价[J].林业科学研究,2000,13(6): 673-678.
- [13] 孙文新,曾群柱.黑河下游干旱地区环境变化研究[J].中国沙漠,1997,17(2): 149-153.
- [14] 胡春元,李玉保,高永,等.黑河下游生态环境变化及其与人类活动的关系[J].干旱区资源与环境,2000,14(增刊): 10-14.
- [15] 中国科学院兰州沙漠研究所黑河流域水资源考察队.黑河流域水资源合理开发利用的研究[J].中国沙漠,1987,7(4): 12-21.
- [16] 郭英卓.黑河下游水资源变化对生态环境的影响分析[J].海河水利,2000,(增刊): 7-8.
- [17] 施雅风,张祥松.气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势[J].中国科学.
- [18] 王涛,陈广庭,钱正安,杨根生,屈建军,李栋梁.中国北方沙尘暴现状及对策.中国沙漠,2001,21(4): 322--327.
- [19] 吴正等著,风沙地貌与治沙工程学(M).科学出版社,2003,17.
- [20] 吴正.风沙地貌学[M],科学出版社,1987.
- [21] Bagnold R.A.A further journey in the Libyan Desert.Geographical Journal,1933,82:103-139,211-235

- [22] Bagnold R A. The size-grading of sand by wind. *Proceedings of Royal Society London, Series A*, 1937, 163: 250-64.
- [23] Bagnold R A. The transport of sand by wind. *Geographical Journal*, 1937, 89: 409-438.
- [24] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes. London: Methun, 1941.
- [25] Chepil W S. Relation of wind to the dry aggregate structure of a soil. *Scientific Agriculture*, 941, 21: 488-507.
- [26] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Science*, 1945, 60: 305-320.
- [27] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: II. Initiation of soil movement. *Soil Science*, 1945, 60: 397-411.
- [28] Chepil W S, Milne R A. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind funnel. *Scientific Agriculture*, 1939, 19: 249-257.
- [29] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control. *Advances of Agronomy*, 1963, 15: 211-302.
- [30] 兹纳门斯基 AH 著. 杨郁华译. 沙地风蚀过程的实验研究及沙堆防止问题. 北京: 科学出版社, 1960
- [31] 河村龙马. 飞砂の研究. 东北理工研究所报告, 1951, 5: 95-112.
- [32] Lancaster N. Arid geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 1996, 20: 97-103.
- [33] Lancaster N. Arid geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21: 285-290.
- [34] Butterfield G R. Sand transport response to fluctuating wind velocity. In Clifford N T, French T, Hardisty J. *Turbulence: perspectives on flow and sediment transport*. Chichester: Wiley, 1993, 305-336.
- [35] Stout J E, Zobek T M. Establishing the threshold condition for soil movement in wind-eroding field. In *Proceedings of the international conference on air pollution from agricultural operations*. Kansas city, MO, 1996, 65-71.
- [36] 董飞 刘大有 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势. *力学进展*, 1995, 25: 368-391.
- [37] Bagnold RA. 1941. *The Physics of blown sand and desert dune*. New York: Methuen, London.
- [38] Kawamura, R., Study on sand movement by wind, Report of institute Sci. & Tech. Univ. Tokyo, 5(3), (1951): 95-112.
- [39] Owen, P. R., Saltation of uniform grains in air, *J. Fluid. Mech.*, 20, (1964): 225-242.
- [40] Zingg, A. W., Wind tunnel studies of the movement of sedimentary materials, In *Proceedings 5th Hydraulic Conference*, Bull, 24, Univ. of Iowa, city, (1953): 111-135.
- [41] Y H Zhou, X Guo, and X J Zheng. 2002. Experimental measurement of wind-sand Flux and sand transport for naturally mixed sands. *Physical Review E*, 66, 021305.

- [42] White B R, and schulz J C, 1977, Magnus effect in saltation. *J. Fluid Mech.*, 81:497-512.
- [43] Ungar, J.E., Haff, P.K., Steady state saltation in air, *Sedimentology*, 34, (1987):289-299
- [44] Anderson, R.S., P.K., Simulation of Eolian saltation, *Science*, 241, (1988):820-823.
- [45] Anderson, R.S., Sorensen, M. and Willetts, B.B., A review of recent Progress in our Understanding of aeolian sediment transport, *Acta Mech.*, [Suppl.], (1991):1-19.
- [46] Werner, B., A steady state model of wind-blown sand transport, *J. Geology*, 98, (1990):1-17.
- [47] McEwan, I.K., Willetts, B.B., *Acta Mech.*, [Suppl.], (1991):53-66.
- [48] Sorensen, M., An analytic of model of wind-blown sand transport, *Acta Mech.*, [Suppl.], (1991):67-51.
- [49] McEwan I K, and Willetts BB. 1993. Adaptation of the near-surface wind to the development of sand transport, *J. Fluid Mech.*, 252:99-115
- [50] 黄宁, 沙粒带电及风沙电场对风沙跃移运动影响的研究, 兰州大学博士论文, 2002.
- [51] Shao, Y., Li, A., Numerical modeling of saltation in the atmospheric surface layer *Boundary-layer Meteorology* 91:199-225, 1999.
- [52] Xiaojing Zheng, Lihong He, Youhe Zhou, 2004a, Theoretical model of the electric field Produced by charged Particles in windblown sand flux, *Journal of Geophysical Research*, Vol.109, D15208, doi:10.1029/2004JD004863.
- [53] Gaowei Yue, Xiaojing Zheng, 2006b, Electric field in wind-blown sand flux with thermal diffusion, *Journal of Geophysical Research*. (in Press)
- [54] Xiaojing Zheng, Ning Huang, Youhe Zhou. 2006c. The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud, *The European Physical Journal E*, vol.19:129-138.
- [55] Xiaojing Zheng, Huang, N., and Zhou, YH., 2003, Laboratory measurement of Electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement, *Journal of Geophysical Research*, 108(D10):4322.
- [56] Xiaojing Zheng, Z.T. Wang, Z.G. Qiu, 2004b, Impact craters in loose granular media, *The European Physical Journal E*, V.13, 321-324.
- [57] O'Brien, M.P., Rindlaub, B.D., The transportation of sand by wind, *Civil Engin.*, 5, (1936).
- [58] Horikawa, K., Shen, H.W., Sand movement by wind action (on the characteristics of Sand traps), *U.S. Beach Erosion Board Tech. Mem.*, 119 (1960):51.
- [59] Buckley R. The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind, *Nature*, 325, (1987):426-428.
- [60] 马世威, 风沙流结构的研究, *中国沙漠*, 8(3), (1988):8-22.

- [61] 申建友, 董光荣, 李长治, 风洞与野外输沙率的分析与讨论, 中国沙漠, 8(3), (1988):23-30.
- [62] 刘贤万, 1995, 实验风沙物理与风沙工程学.科学出版社, 北京.
- [63] Greeley.R.,Blumbeyr,D.G, and Williams, S.H., Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand,Sedimentology,43, (1996):41-52.
- [64] Blumberg, D.G., Greeley R., Field studies of aerodynamic roughness length, J.Arid Environment, 25, (1993):39-48.
- [65] Jackson, D.W.T., A new instantaneous aeolian sand trap design for field use, Sedimentology, 43, (1996):791-796.
- [66] Jackson, D.W.T.,McClosKey,J., Preliminary results from field investigation of aeolian sand transport using high resolution wind and transport measures, Geophys.Res.Letters.24(2) (1997):163-166.
- [67] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].地理科学进展.2001,20 (3): 227~233
- [68] 满多清,王继和,杨自辉.民勤荒漠区生态变化初探[J].甘肃林业科技.2001,26 (4): 28~31
- [69] 王继和,马全林.民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策[J].西北植物学报.2003,23 (12): 2107~2112
- [70] 俄有浩等.民勤水资源变化与林地水分条件变化关系研究[J].甘肃林业科技.2001,26 (4): 19~24
- [71] 常兆丰,仲生年,韩富贵.民勤沙漠区气候特征的分析[J].防护林科技.1999,40(3): 5~8
- [72] 韩富贵,常兆丰,仲生年.民勤沙区沙丘的基本特征及其移动规律研究[J].防护林科技.2005 (3): 4~6
- [73] Butterfield G R.Grain transport rates in steady and unsteady turbulent airflows[J].Acta Mechanica Supplement,1991,1: 97-122.
- [74] Chepil W S,Woodruff N P.Sedimentary characteristics of dust storm:II .Visibility and dust concentration[J]. Am.J. Sci., 1957.255: 104-114.
- [75] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen: London, 1941. 1-25.
- [76] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. Soil Science, 1945, 60: 305-320.
- [77] Williams G. Some aspects of the eolian saltation load. Sedimentology, 1964, 3: 257-287.
- [78] Sorensen M. Estimation of some aeolian saltation transport parameters from transport rate profiles. In: Barndorff-Nielsen O E (eds.). Proceedings of International Workshop on the Physics of Blown Sand. Aarhus University, Denmark,1985.141-190.
- [79] Wu Zheng, Ling Yuquan. A preliminary study of wind-blown sand movement and sand disaster prevention. Research of Sand Disaster Prevention, 1965, No.7: 7-14. [吴正, 凌裕泉. 风沙运动的

- 若干规律及防止风沙危害问题的初步研究.治沙研究, 1965, (第七号): 7-14.]
- [80] Kawamura R. Study of sand movement by wind. University Tokyo, Report of Institution of Science and Technology, 1951, 5(3/4): 95-112. [河村龙马. 飞砂の研究. 东京大学理工学研究所报告. 1985, 5(3/4): 95~112.]
- [81] Zingg A W. Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. 5th Hydraulic Conference Proceedings, Iowa Institute of Hydraulic, Iowa City, 1953, 111~135.
- [82] Znamensky A и. Experimental Research of Wind Erosion on Sands and Questions of Protection Against Sand Drifts. Beijing: Science Press, 120. [兹纳门斯基A и 著. 杨郁华译, 朱震达校. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题. 北京: 科学出版社, 120.]
- [83] Liu Xianwan. Experimental Physics and Engineering of Blown Sand. Beijing: Science Press, 1995. 136-381. [刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995. 136-381.]
- [84] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2006, 111(D16): Art. No.D16111.
- [85] Butterfield G R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport: High-resolution measurements in a wind tunnel. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(5): 393~412.
- [86] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社. 1995, 72~76.
- [87] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. New York: Methuen. 1941, 41~50.
- [88] Leatherman S P. Short communication: new aeolian sand trap design[J]. Sedimentology. 1978, 25: 303~306.
- [89] Fryberger S G, Al-Ssri A M, Clisham T J, et al. Wind sedimentation in the Jafu-rah Sand Sea, Saudi Arabia[J]. Sedimentology. 1984, 37: 23~43.
- [90] Sarre. R. D. Evaluation of aeolian sand transport measurements in tidal zone measurements, Staunton sands, England[J]. Sedimentology. 1988, 35: 671~697.
- [91] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社. 1987, 67~68.
- [92] Rasmussen K R, Mikkelsen H E. Wind tunnel observation of aeolian transport rates[J]. Acta Mechanica. 1991, (Sup): 135~144.
- [93] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: Nature of movement of soil by wind[J]. Soil Science. 1995, 60: 305~320.
- [94] 邹学勇等. 风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数[J]. 科学通报. 1992, 3 (723): 2175~2177.
- [95] Sharp R P. Wind-driven sand in Coachella valley, California[J]. Geological Society of America Bulletin. 1964, 75: 785~804.

- [96] Williams G. Some aspects of the aeolian saltation load[J]. *Sedimentology*. 1964, 3: 257~287.
- [97] 朱震达. 应用实验方法研究风沙地貌形成过程的若干特征[J]. *治沙研究*. 1962, 4: 48~61.
- [98] 朱震达, 吴正. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社. 1981, 110.

致 谢

三年硕士研究生生活马上就要结束了，回首这三年的人生历程，太多的人需要我去感谢，自己的每一点成长、每一点成果都包含了许多人的关怀和鼓励，正是由于他们的支持和帮助使我得以顺利走过这段日子。

首先要感谢我的导师赵明研究员和王立教授，赵老师提供了良好的学习工作条件，指导我学习和工作的方向。在导师的悉心指导下完成的这篇论文，凝聚着导师的大量心血。导师正直又谦逊的品格、渊博的知识、敏锐的科研洞察力、对科学事业执着的探索和创新精神给我留下了深刻的印象，并时时激励我不断奋发向上。三年之中，导师积极创造学习和实践机会，对我学习和实践中遇到的问题不厌其烦、耐心细致的指导和帮助。值此论文完成之际，谨向导师表示深深的感谢。

论文的研究工作得以顺利完成，特别感谢甘肃省治沙所的杨自辉研究员，在做试验期间给了我很多珍贵的意见，感谢王辉教授对我论文写作的大力支持，同样感谢王多泽、詹科杰、王强强、郭树江等工作人员给予我的无私帮助。特别感谢同学杨卫君、范永佳、靳虎甲、马开、李瑞军、冯向东等给予我的富有成效的讨论和对本论文仔细的校对，使我能够及时解决工作中遇到的问题。并感谢每一位支持、鼓励和帮助过我的亲人、老师和朋友。

本硕士论文研究期间受到国家自然科学基金(30872069)的资助，在此表示衷心的感谢！

最后，再一次向所有关心、帮助我的人说声“谢谢”，真诚祝福你们健康快乐。

王自龙

2009 年 5 月

个 人 简 介

王自龙，男，甘肃省兰州人，1981 年 12 月 13 日生，汉族。2002 年考入甘肃农业大学草业学院，2006 年 7 月获得农学学士学位，2006 年 9 月考入甘肃农业大学林学院，就读于水土保持与荒漠化防治专业，师从赵明研究员。

在硕士研究生学习阶段，导师在学业上悉心的指导、生活上无微不至的关怀为我成长创造了千载难逢的条件。尤其我的动手能力、科研素质、科研精神、科研写作能力、科研思维及自学能力都得到了显著的提高，为以后的工作奠定了扎实的基础。从入学至今，主要参与了国家“十一五”攻关课题、国家自然科学基金重点项目等。在《水土保持学报》和《湖北农业科学》发表学术论文两篇。

参加项目：

2007 年 4 月，参与国家自然科学基金课题“基于空气动力学流动阻力及绕流理论的植被防风蚀机理研究”，负责外业调查和试验方案设计与布设；

2008 年 4 月，参与国家“十一五”攻关项目“沙区农田和草场风蚀防控与人居安全保障技术研究”，负责外业调查和试验方案设计与布设；

第一导师简介

赵明，男，1962 年 5 月出生。1984 年毕业于内蒙古林学院沙漠治理专业，1985 年 1 月北京林业大学进修仪器分析，1992 年 1 月-12 月西安外国语学院进修英语，1995 年赴美国科罗拉多州立大学进修农业系统。

参与研究实施了甘肃省“七五”重点攻关课题“——固沙树种蒸腾耗水量研究”和“八五”省重点攻关项目“非称量蒸渗仪的研制与应用”。1988 年，参与主持甘肃省科委下达的联合国援助项目“滴灌技术的引进与研究”。这一项目 1990 年通过技术鉴定，并获甘肃省林业科技进步三等奖。1992-1999 年，主持了国家“八五”攻关协作子项目“干旱、半干旱地区防护林建设与水分平衡研究”。成果获得了甘肃省科学技术进步一等奖。1997 年，主持了“发菜人工栽培试验研究”。2000-2004 年，主持了国家 948 项目“沙漠蕨种源及栽培技术引进”。2004 年，主持了“甘肃省治沙研究所能力建设”项目，项目的关键内容是建成国家标准荒漠生态研究站和近地表沙尘暴观测系统，设计完成了“风向跟踪滤袋式沙尘水平干收集仪”、“程序控制称重式沙尘垂直干设计仪”、“水位恒定式沙尘垂直湿设计仪”、“吸入式沙尘水平湿设计仪”、“风向跟踪滤袋式集沙仪”和“自计式自动供水蒸发皿”、“程序控制称重式沙尘垂直干收集仪”等仪器设备。先后主持了“民勤绿洲小规模养殖业发展配套技术研究”、“民勤绿洲边缘生态经济型综合治沙技术研究”、主持了国家科技部下达的多边国际合作项目“中澳合作治沙技术示范工程”等十多个项目，这些项目都取得了可喜的成果。

获得的荣誉：1994 年获第三届中国林学会青年科技奖；1994 年被评为武威地区“十大优秀青年知识分子”；1995 年被共青团武威地委授予“新长征突击手”称号；1997 年获首届甘肃省青年科技奖；1999 年入选甘肃省跨世纪学术技术带头人，被列入甘肃省“333”科技人才工程；2001 年被甘肃省政府列为陇原科教之星；2001 年获三北防护林体系(1978—2000 年)建设先进工作者，2002 年获首届甘肃省绿化奖章。2004 年被评为甘肃省学科带头人。

第二导师简介

王立，男，汉族，1963年8月生，九三学社社员。1986年7月毕业于北京林业大学水土保持系，获学士学位。现为甘肃农业大学林学院副教授，硕导，在读博士。任甘肃农业大学林学院院长助理，兼任甘肃农业大学现为甘肃林学会、甘肃水土保持学会会员。

长期从事水土保持与荒漠化专业、园林专业的教学、科研及工程规划设计工作。在教学上，先后讲授了《水土保持工程》、《园林工程》、《节水灌溉技术》、《水文与水资源学》、《水力学》、《流域治理与流域管理》、《流域水文学》等本科生及研究生课程。

在科研上，致力于水土保持与荒漠化综合防治、水文与水资源、旱生植物、药用植物等领域的研究工作；作为主要完成人参加完成了多项科研课题的研究工作，获得了省教育厅、省林业厅、省科技厅的奖励，取得科研成果5项。

参编的《水土保持林学》教材获得了省林业厅奖励，参编的专著《黄土高原旱地农业——理论、技术、潜力》已由中国农业出版社出版。近年来，作为第一完成人和主要执笔人发表的论文十余篇。

先后获林业部科技进步三等奖、甘肃省科技进步三等奖、甘肃省林业科技进步二等奖、甘肃省教委科技进步三等奖。1999年被评为“甘肃省高等学校跨世纪学科带头人”，2000年入选甘肃省“333科技人才工程人选”。