

甘肃农业大学

硕士学位论文

棉秆沙障防风固沙效益比较

姓名：李瑞军

申请学位级别：硕士

专业：水土保持与荒漠化防治

指导教师：王继和;李毅

20090601

中文摘要

我国沙漠面积 71.29 万 km^2 ，仅次于澳大利亚和沙特阿拉伯，列世界第三位。随着全球气候变暖，我国沙漠化程度日趋严重，沙尘暴日益频繁，沙漠化土地约 53.25 万 km^2 ，土地沙化的面积不断扩张成为当前最为严重的生态问题。特别是我国西北地区土地沙化现象更为严重，虽然中国西部大开发过程中，建立了规模宏大的以退耕还林和植树种草为主体的防沙治沙措施，此举，对于改善西部生态环境将会起到巨大的推动作用。不过由于这些地区风沙危害特别严重，生态环境极端恶劣，采用生物固沙措施极为困难，工程防沙成为一种十分必要和不可取代的防沙措施。机械固沙措施是工程防沙的主体，经过科学工作者不断努力，对机械沙障的规格及防沙效益不断进行研究，在材料上也不断的创新，走出了一条经济实用、功能独特、效果显著而应用最为广泛的防风固沙措施之路。

棉秆沙障是以我国干旱地区废弃的棉秆为原料，以我国治沙工作者对沙障的研究理论为基础，结合研究区状况，编织成集束式和栅栏式沙障。

本文通过对孔隙度为 40% 的栅栏式棉秆沙障和棉秆集束式沙障内风速和风蚀风积量的观测，分析其防风固沙效益，得出以下结论：

1 设置棉秆沙障改变下垫面的性质，增加了下垫面的粗糙度，有效地降低了过境风沙流的速度。经实验观察，栅栏式方格沙障所在地表粗糙度为流沙的 $10^{1.62}$ 倍，其风速变异系数和风速降幅最大，达到 0.48 和 75 %。

2 棉秆沙障改变了近地层气流的紊动特性，减弱风沙流的输沙势能，使风沙流中的沙粒大量沉积，而且沙障前沿积沙多，后部积沙少。

3 棉秆沙障经过长期的蚀积作用，最终达到蚀积平衡状态，形成凹曲面，从而达到稳定沙面固定流沙的作用。

4 受主风向的影响，栅栏式棉秆沙障形成了与集束式沙障不同跨障式凹曲面，由于沙障积沙的最高点不在沙障处，所以沙障不易被沙埋，延长了沙障的寿命，进一步提高了其防沙治沙的效能。

5 通过对三种沙障的防风固沙效益进行比较分析，集束式棉秆沙障容易沙

埋，栅栏行列式沙障易倒伏，栅栏式方格沙障比较稳定。

6 通过对其防沙固沙效益的比较分析，证实作为防沙新材料的栅栏式棉秆沙障的防护效益十分显著，其设置方式是科学可靠的，在该地区取代尼龙网和塑料网材料等投资比较大的防沙固沙材料完全可行。

7 栅栏式棉秆沙障具有编织原料丰富，成本低廉，施工容易，对环境无污染等优点，可作为机械沙障中的一种新型沙障在工程防沙中具有推广应用的前景。

关键词： 工程防沙 棉秆沙障 防沙效益 蚀积量

SUMMARY

China's desert area of 712, 900 km², second only to Australia and Saudi Arabia, is listed third in the world. With global warming, the extent of desertification in China is becoming more worsening, and dust storms also become more frequently, China's desertification area is about 532, 500 km², continues to expand of desertification become the most serious ecological problems. Particularly, in some of Northwest China the desertification becomes even more serious, although the process of China's western development, the establishment of large-scale planting trees and grass in returning farmland to forests as the main measures to combat desertification, which, for improving the ecological environment in west will play a huge promoting role. Because of sand-wind harms in these areas is particularly serious, and extreme worst ecological environment, the use of biological measures is extremely difficult to use in combating sand-wind, mechanical desert controlled as a very necessary measures and can not be replaced by the others. Mechanic Sand-fixing measures is the main works of engineering sand prevention and controlled, by the exert of scientists, the study on specification of sand barrier and sand-effective, and the innovation of using materials, the measures of combating sand-wind and sand-fixation pushed out a way, which is economical and practical, with unique features and be most used widely and effectively.

The cotton haulm sand barrier was woven into a cluster-type sand barrier and fence-type sand barrier by wasted cotton haulm in arid areas of China as raw materials, which is based on theoretical studies of mechanic sand barriers, and combined with state of the study area.

In this paper, from the observation of wind speed and wind erosion and sand accumulation capacity in fence-type cotton haulm sand barrier with the porosity of 40% and cluster-type cotton haulm sand barriers, and then analyses the wind

prevention and sand-fixation efficiency we can draw the following conclusion:

1 Setting cotton haulm sand barrier changed the nature of surface, increased the roughness of surface and effectively, reduces the flow rate of sand in transit. By measures of observation, the roughness of checkerboard-style barrier of fence location was $10^{1.62}$ -fold, and its coefficient of variation of wind speed and decreased wind speed are 0.48 and 75%.

2 The Cotton haulm sand barrier changed the characteristics of turbulent air flow on the surface layer and weakened wind energy, so that a large number of sand deposition, the amount of sand at forefront of the barrier and is more than that of the rear of the plot.

3 After long-term role of erosion and accumulation the cotton haulm sand barrier ultimately reach a state of equilibrium corrosion and formed a concave surface, so as to achieve an important function that stabilize the surface and fixed quicksand.

4 By the impact of the main wind direction, fence-style cotton haulm sand barrier formed a cross-barrier-type concave surface which different from cluster-style, as a result of accumulating sand barrier is not at the highest point of the sand barrier, the sand barrier cannot be buried by sand easily, thus the using life of sand barrier to be extended and further improve the effectiveness of its anti-desertification.

5 After comparative analysis to the efficiency of wind prevention and sand-fixation of three type sand barriers, cluster-type cotton haulm is buried easily by sand, and cavalcade sand barrier fence easy to lodging, checkerboard-style barrier fence is relatively stable.

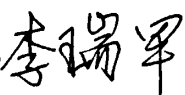
6 After comparative analysis of its sand-fixing effectiveness, confirmed that as a new material sand barrier, the fence-style cotton haulm protective benefits is very significant, and its setting way is scientific and reliable, in the region of arid area to replace the sand dune-fixing material like nylon net and plastic nets which investment is relatively large is entirely feasible.

7 The fence-type cotton haulm sand barrier has rich raw materials to woven, low cost and easy to construction, no environmental pollution etc, that can be used in mechanical desert control as a new type sand barrier widely.

Key words: Mechanical desert control; cotton haulm sand barrier; benefits of desert control; wind erosion and sand accumulate capacity

独创性声明

本人声明，本人所承交的学位论文是本人在导师指导下时行的研究工作及取得的研究成果。文中除特别加以标注的地方外，论文中不包含其它人其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含有获得甘肃农业大学及其他教育机构的学位及证书材料。

学位论文作者签名 

2009年6月7日

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： 李瑞军 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： 棉秆沙障防风固沙效益比较

本人于 2007 年 12 月 20 日至 2009 年 4 月 20 日在导师 王继和 李毅
指导下，从事 棉秆沙障防风固沙效益比较
_____ 的研究。

产权内容： 棉秆沙障防风固沙效益比较

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，作者第一署名单位为甘肃农业大学。

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： 李瑞军
签字日期： 2007 年 6 月 10 日

导师签名： 李毅
签字日期： 年 月 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电 话：

通讯地址：

邮 编：

1 选题背景

沙漠化(Sandy Desertification)是当今世界人类共同面临的一个重大环境及社会问题,地球表面 43%的土地分布在干旱地区,110 多个国家受土地荒漠化之害,全世界每年为此造成的损失 420 亿美元之巨,我国是世界上受沙化危害最严重的国家之一。八大沙漠、四大沙地是我国主要沙源地,南方沿江、河、海也有零星沙地分布。据国家林业局第二次沙化土地监测结果显示,截止 2005 年底,全国沙化土地面积达 174.3 万平方公里,占国土面积的 18%,涉及全国 30 个省(区、市)841 个县(旗)。全国流动沙丘面积 42.72 万平方公里,固定及半固定沙地 46.30 万平方公里,戈壁及风蚀劣地 71.14 万平方公里,其他 14.14 万平方公里。近几年来,在我国的沙漠化土地中,其中已经沙漠化了的土地为 17.6 万平方公里,潜在沙漠化危险的土地有 15.8 万平方公里,在湿润地带的风沙化土地有 1.9 万平方公里。受沙漠化影响的人口达 500 余万人,有近 400 万公顷的旱农田和 500 万公顷的草场受其影响^[1],我国土地资源不断被侵蚀的形势十分严峻,土地沙化和沙漠化的发展趋势愈演愈烈,人类生存和发展的空间逐步缩小,土地生产力的严重衰退,严重制约着我国经济的发展。

土地沙化成因是自然因素和人为活动共同作用的结果。我国北方降水稀少,植被稀疏,加之全球气候变暖,持续干旱少雨,对土地沙化起到了加剧作用。加上人对土地资源和水资源的不合理利用,使得沙漠化的程度进一步加剧。

沙漠化程度不断加剧的现象已引起了我国历届政府的高度重视,自上世纪 50 年代后期至 60 年代中期,随着中国科学院治沙队的成立,为我国沙漠化防治事业奠定了坚实的基础。与此同时,国务院在 1958 和 1959 年召开的两次治沙会议,不仅明确了沙漠治理的方向,而且也制定了有关政策法令,为我国工程防沙研究和实践带来了良好的契机。当时,在全国范围内成立了许多沙漠治理和研究机构。如中国科学院兰州沙漠研究所的前身中国科学院治沙队就是在当时的背景下成立的,后来相继又建立了民勤治沙站(甘肃省治沙研究所的前身)、榆林治沙站(陕西省治沙研究所的前身)、章古台固沙站(辽宁治沙研究所的前身)等。中国科学院兰州沙漠研究所于 1967 年建成了国内第一座专门从事风沙环境有关课题实验研究的风沙环境风洞,并于 1988 年以设计制造了一座中型的野外土壤风蚀风洞,实验室配备能够承担各类关于风沙环境的基本理论

和风沙危害的防治设计的实验研究课题。

自 1977 年在肯尼亚首都内罗毕召开的联合国荒漠化大会以后,我国在沙漠化研究取得了丰硕的成果。研究内容包括:① 我国北方干旱、半干旱及部分半湿润地区土地沙漠化发生、发展过程及其类型、特点等;② 沙漠化现状、分布特征及其所引起的环境变化;③ 典型沙漠化地区防治示范研究;④ 对沙漠化土地大范围的遥感与地面普查及其沙漠化的监测和制图等^[2],2001 年 8 月 31 日第九届全国人民代表大会常务委员会第二十三次会议通过,《中华人民共和国防沙治沙法》,为我国防沙治沙提供了法律保障。

2005 年,国务院颁布了《全国防沙治沙规划》(2005-2010 年),我国防沙治沙工作开始步入了法治化的轨道。规划指出我国年降水量 200 毫米以下的干旱沙漠边缘及绿洲类型区的主攻方向是保护和拯救现有天然荒漠植被和绿洲,抑制流沙侵袭;将目前不具备治理条件和具有特殊生态保护价值且相对集中连片的沙化土地划为若干封禁保护区,实行严格的封禁保护;建立科学的上下游用水制度;在沙漠前沿建设灌草乔、带片网合理配置的防风阻沙林草带,阻止流沙扩展,在绿洲外围建设以防风、固沙、减灾为主要目的的大型综合防护林体系。

2006 年 6 月 22~29 日,国际标准化组织环境管理标准化技术委员会(ISO/TC207)第 14 届年会在北京召开,来自世界 50 多个国家的 500 余名代表出席会议。在本次年会上,中国联合埃及和西班牙提出的沙漠化治理的国际标准提案,为我国的沙漠化治理工作提供技术支撑。

我国政府对防治沙漠化进行大力支持,进入甘肃民勤,最醒目的就是温家宝总理的批示"决不能让民勤成为第二个罗布泊!"

目前,国内研究人员对我国沙漠化土地的治理已经有了两点明确的认识:首先是针对我国目前重点治理强烈发展中的和严重沙漠化土地的模式具有的局限性等问题,必须进行探讨,从整体上遏制我国北方半干旱草原地区沙漠化的发展趋势,应当将生态建设的重点由强烈发展中和严重沙漠化土地转向正在发展中的和潜在的沙漠化土地。其次需要有明确的、系统的沙漠化防治的指导方略。中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室根据对以往防沙治沙经验和教训的总结,形成了"三十字"防沙治沙方略:全面保水,强调自然恢复;条块绿化,适度人工抚育;集中发展,建设沙区小康^[3]。

在我国内蒙、甘肃等地，部分地区已经开始探索新的土地沙漠化的防治战略，并已经在局部地区取得了较好的成效，这些局部地区取得的成功经验，可以对我国沙漠化土地治理的战略转型，起到很大的借鉴作用。

2 研究的目的是意义

工程防沙是指采用各种机械手段，防治风沙危害的技术体系，其防治的核心是采用各种技术措施降低近地表层的风速，减少气流中的输沙量，延缓和阻止沙丘的前移，以达到削弱和避免风沙危害的目的^[4]。工程防沙的主要目的是固定流沙，改变风沙流的运动规律，机械沙障是工程防沙措施的重要组成部分，它与生物固沙措施相辅相成，配合使用，在生物固沙措施方面起主要辅助作用，特别是在风沙危害特别严重的地区，由于流沙贫瘠，环境恶劣，各种生物在此无法生存，生物固沙短期内难于见效，机械固沙措施显得非常重要而且必要，但是由于防沙治沙事业所用原材料相对短缺，成为防沙治沙工程面临的一个严峻现实。尽管科学工作者经过不断地努力，对工程固沙措施的规模及其防沙效益深入研究，为生态恢复和防治荒漠化做出了巨大的贡献，麦草、粘土、塑料网及尼龙网沙障相继被应用，在某些沙区取得了较好的防风固沙效益，然而通过长期的实践发现，这些沙障的应用都出现了一定的局限性：麦草沙障在设置 3~5 年就丧失其功能，就地重设又很困难。粘土沙障是一种不透风结构的固沙型沙障，它固定沙丘的性能较好，它只适用于有粘土层的地方，材料来源比较困难，对过境流沙的拦截作用不大。塑料网格、尼龙网格等新材料内含多种化学成分，对环境有一定的污染，而且设置成本较高，限制了推广应用。

我国干旱区大面积种植棉花，产生了大量的棉秆，甘肃省治沙研究所就地取材，用当地废弃的棉秆做成了栅栏式棉秆沙障，通过试验发现，以其为材料编制作栅栏式棉秆沙障和集束式棉秆沙障，可以起到有效地降低风速，固定流沙的作用，在控制沙粒流动，减少风沙危害方面效益显著，是一项重要的防风固沙措施，可以引起流沙浅层的理化变化，形成了特有的沙结皮，从而起到固定流沙的作用。而且材料来源丰富，价格低廉，做工简单，施工容易，环境污染量小等优点，可逐步取代以往传统的防沙材料，防止一些固定半固定流沙的活化、草地沙化、荒漠化程度的进一步加剧，起到重要的作用。作为一种新型

的防风固沙材料，具有广阔的利用前景。

3 研究现状

3.1 国内外工程防沙的研究进展及现状

工程治沙措施按所采用的材料和实施的目的不同，分为机械沙障固沙、风力拉沙、水力拉沙和化学固沙等几个方面。从阻止风沙，改变风沙运动规律着手，主要有铺设沙障、设置高立式栅栏，利用各种材料（包括化学材料）覆盖、网膜技术手段。文献表明，正式采用现代风沙工程来防治风沙危害，大概是从19世纪末开始实行的。1880年，当时正在修建中的里海东岩铁路急需进行防护，施工前在紧靠路基的地方采用芦苇和旧枕木阻挡沙子入侵和防止路基吹蚀；在沙丘表面用碎石粘土或喷洒石油海水进行覆盖；在沙地上栽种植物。但由于措施在紧靠铁路的两侧，因此防沙效果并不理想。上世纪40年代，原苏联在中亚荒漠地区修筑铁路中，用半隐蔽式沙障在沙丘的2/3以下部位，以借助风力拉平沙丘，有草方格固定沙地，阻滞地表流沙和促进方格内植株的萌发和生长。埃夫法德等在苏丹港铁路修筑中和澳大利亚在马依拉—维多利亚铁路防沙上，都采用过带下风口的输沙板（我们称之为下导风工程）。印度在修筑海德巴拉—周得普尔等铁路时，曾使用固沙植物建立“活沙障”和用立式或平铺沙障的办法来固定沙丘和拦截流沙。美国为防止密西西比—太平洋铁路被沙埋，曾在线路迎风一侧设置高档风沙土墙，也取得良好的效果^[5]。我国于20 世纪50年代初开始，随着集二、包兰和兰新铁路线的相继修建，在原苏联专家的帮助下，也采用各种立式和半隐蔽沙障，来保护铁路的施工和营运。特别是50 年代后期至60 年代中期，随着中国科学院治沙队的成立，新中国沙漠研究的倡导者竺可桢教授明确指出了“改造沙漠是我们的历史任务”，要求沙漠研究和治理要密切联系国家经济建设，和生产实践结合起来^[6]。从此我国科学工作者经过不断的努力，创造了中国近50 年的治沙实践史，在工程防沙方面取得成效最为显著的要属铁路和公路风沙防护体系的建立。1958 年，在我国建成世界上第一条穿越流动沙丘累计长达40 多公里的铁路干线（包兰铁路），为防治风沙危害，构建了前沿1m 高的立式栅栏阻沙带、内侧1×1m 草方格沙障固沙带和砾石平台缓冲输沙带的防护体系，保证了铁路的安全运营^[7]。

20 世纪90 年代,我国在塔克拉玛干沙漠中修筑了世界上最长的连续穿越流动沙丘长达446km 的沙漠公路,在先期实验研究成果支持下,建立了以半隐蔽式芦苇方格沙障和高立式阻沙栅栏相结合的机械防护体系,并取得了显著的效果^[8~11]。这些研究成果也应用于我国其它沙漠地区铁路、公路以及农田等的沙害防治^[12~13]。

GIS建立完善中国沙漠化监测、评估与决策、管理系统。进一步在沙漠化地区的资源环境和高效农业的研究与实践方面利用“3S”等高新技术,建立资源环境信息系统,实现快速的信息处理更新,为区域可持续发展服务。

3.2 我国机械沙障的研究状况

机械沙障是采用柴、草、树枝、粘土、卵石、板条等材料,在沙面上设置各种形式的障蔽物,以此控制风沙流动的方向、速度、结构,改变蚀积状况,达到防风阻沙,改变风的作用力及地貌状况等目的,简称沙障。它是工程治沙的主要措施之一^[14]。机械沙障主要设置在普遍沙源充足,起沙风频数高,作用时间长,风沙地貌形态类型复杂多样,防沙难度大,荒漠化现状严重,其它固沙措施短期内难以见效的情况下。我国沙源广阔,受风沙危害的面广且强度大,机械防沙措施也从民间的防沙墙砾石压沙走向麦草沙障,尼龙(塑料)网等科学防沙措施,科学工作者不断从沙障规格及防沙效益两方面都进行了有益的探讨,主要表现为:

3.2.1 根据不同的立地条件及防治目的,选择不同的防沙治沙措施。

(1) 为保障铁路多年来畅通无阻,在包兰铁路沙坡头段成功地设计建成了以阻沙栅栏带、草方格与植物固沙带为主体,辅以人工灌溉防护林带与砾石输沙平台带的铁路防护体系,树立了是我国铁路沙害治理的典范^[15]。

青藏线哈尔盖—格尔木段位于青藏高原,横穿柴达木沙漠,集沙漠特征与高原气候于一体。在该段铁路防沙中,采用了竹片栅栏与碎石方格相结合的阻、固措施,其中碎石方格是在铁路防沙中首次使用,在该地采用碎石方格固沙既有使用寿命长,又有取材方便的优点,是我国高原地带铁路沙害治理的又一范例^[16]。

(2)1991年初开始在建立塔里木沙漠公路的防沙体系,于1996年10月建成,采取了阻固结合的机械防沙体系。首先沿公路走向,在距离公路两侧一定距离

处设置高立式沙障,保障了公路的正常运行^[17]。

(3)敦煌莫高窟是我国乃至世界古代灿烂文化艺术的瑰宝,长期受到风沙危害,自 60 年代先后采取各种防沙措施对莫高窟进行防护。目前的防护体系根据莫高窟风沙运动规律和危害方式,以切断或削弱鸣沙山沙源和固定流沙,并消除沙砾质戈壁面的就地起沙为目的,在窟顶建立一个在空间上由阻沙带、固沙带和输沙带组成,以机械、生物、化学措施构成的防护体系^[18~20]。

(4)在沙漠与绿洲过渡带的植被恢复及造林中,因风大沙多、土壤水分条件差,一般以生物措施为主,辅助以机械沙障,起到稳定沙面,调节水分,改善土壤理化性质的作用。沙障的设置多为就地取材,以粘土和麦草较为普遍。在甘肃民勤^[21~23]、青海共和县^[24~25],内蒙古乌审旗等地的沙区^[26]造林和植被重建中,通过使用各种材料和类型的机械沙障配合植物措施,削弱了风沙活动的强度、使近地表风速大大降低,保护栽植和播种的固沙植物,免受风蚀和沙埋,同时还可以改善沙地的水分状况,有利于植物的成活和生长。

3.2.2 对机械沙障防护原理、规格与防护效益的研究

沙障设置的基本原理就是增加下垫面的粗糙度,改变风沙流结构,降低其携沙的能量,从而防止风沙流的进一步危害。影响沙障防沙效益的主要因素有:沙障的孔隙度、规格、设置方式、当地风况和沙源状况等。上世纪 30 年代以来,随着风沙物理学研究的不断深入,为机械沙障的设置提供了理论依据。使得众多专家学者对风沙流的运动规律、风沙流的防治、沙障的类型与设置技术得以深入细致的研究,尤其是对麦草沙障,高立式栅栏沙障及粘土沙障的研究,取得了丰硕的成果,为以后机械沙障的设置及应用具有重要的指导作用。

凌裕泉通过对草方格沙障的研究表明^[27],假设障内沙面为一段圆弧,沙面最高点处圆的弦切角为干沙的休止角,进而从理论上得出草方格沙障内最大风蚀深度与方格边长之间的解析关系式;刘贤万对草方格沙障^[28]则进行了大量风洞实验,给出了翔实的数据与图表,并对实验结果作出了令人信服的分析。王振亭等^[29]针对草方格沙障防护区域内流场的特点,提出一个单排理想窝列模型,用以模拟实际风沙流场。在此基础上,利用流体力学的分析方法,给出了在初始时刻床面水平时草方格沙障间距与出露草头高度的对应关系:

$$\lambda_0 = h_0/L$$

式中 λ_0 为特征参数, L 为沙障间距, h_0 为出露草头高度。孙显科等^[30]对机械沙障固沙原理进行了研究, 提出了不以粗糙度而以障内沙面蚀积强度作为衡量沙障固沙效能的综合标志, 主张通过障埂占位、通过对障埂高度和障埂间距的调节控制风沙流的蚀积机制, 在此基础上推导了控蚀公式:

$$r=h-KL$$

式中 r 为蚀积强度, h 为障埂高度, L 为沙障间距, K 为沙障深宽比值。表达了障埂高度和沙障间距对障内沙面蚀积的控制关系, 并以 K 值等于 1/10 作为沙障成败优劣的判断标准。

由于在草方格等半隐蔽式沙障的外缘, 外来流沙的掩埋常常导致固沙有效面积大量减少, 需要在沙障区域的外围设置阻沙栅栏, 以阻挡外来流沙, 保护半隐蔽式沙障固沙带。通过对不同形式的栅栏防护效果的比较, 目前已得出一些重要的经验性结论, 如前苏联学者彼得洛夫^[31]的野外观察认为横条透风栅栏比纵条透风栅栏的防护效果好; 吴正等^[32]认为阻沙栅栏在风向较为单一的沙流地区应用较好; 凌裕泉等^[33]的实验也表明栅栏对来自主风向沙流的阻沙效率平均可达 70%—80%。为了有效设计栅栏的几何尺寸, 如栅栏高度和孔隙度 (即栅栏孔隙面积与总面积之比), 许多研究人员还开展了大量的风洞试验, 刘贤万等^[34]通过风洞实验研究了栅栏的孔隙度对栅栏防护范围和阻沙率的影响, 表明栅栏的孔隙度是影响其防护范围效益的最重要的因素。这些野外观测和风洞测试结果, 为栅栏的设计提供了有效的依据。众多研究者都进行过探讨, 并取得较为令人满意的结果^[35~40]。

沙障的规格或间距是影响沙障效益的重要指标。我国沙坡头治沙队在苏联专家的指导下设置的草方格沙障, 是我国机械沙障在其防沙规格上的一大突破, 从此我国机械沙障沿着这个方向不断开拓创新, 常兆丰等^[41]对麦草沙障合理间距进行了理论分析, 提出确定机械沙障间距的基本原理是障间风蚀沙量等于积沙量, 即:

$$S_{凹}=HL\cos\alpha-S_{障}$$

式中 H 为障高, L 为障间斜距, α 为沙面坡度, $S_{凹}$ 为凹曲面面积, $S_{障}$ 为障体面积。并指出障间凹曲面面积与障间距及沙面坡度之间存在着显著的回归关系, 运用这种回归关系建立障间风蚀沙量等于积沙量的等式方程。计算出沙面

坡度 $0^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 和 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的粘土沙障和麦草沙障间距是 253~185cm 和 261~155cm; 粘土沙障高度应为适宜高度范围内的最小值; 粘土沙障在障高为 15 cm、沙面坡度 $>8^{\circ}$ 时障间没有风蚀。麦草沙障在坡度 $>10^{\circ}$ 时障间没有风蚀; 15 cm 高的粘土沙障和固沙有效高度 13cm 的麦草沙障的最小间距分别是 185 cm 和 155 cm; 若需要在固定就地沙面的基础上接纳外来流沙或者需要风蚀部分就地沙粒时, 可将接纳沙量或风蚀沙量的平均厚度作为参数之一计算障间距, 按照风蚀沙量小于等于积沙量的障间距设置的沙障。

这些理论研究表明了我国在工程防沙方面取得的辉煌成果, 他们对我国防沙治沙事业的贡献将为以后机械沙障的设置及改进提供了宝贵的经验和理论依据。

3.2.3 机械沙障材料的改进

风沙流是指含有沙粒的运动气流, 是一种沙粒的群体运动^[42], 如果没有风蚀过程的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。因此, 防治沙害、改善沙区生态环境的根本措施还是选择合适的材料抑制或削弱风沙流的强度。我国在机械防沙及沙漠化的治理在理论研究的基础上充分利用了地方资源, 不同类型的沙障具有不同的作用, 在选用沙障类型应根据防护目的, 因地制宜灵活的确定, 必要时不同的沙障配套使用, 以此充分发挥各种沙障的长处。

至于选用沙障材料时, 则主要应考虑取材容易, 价钱低廉, 固沙效果好, 副作用小等因素。一般多采用麦草, 板条、砾石和粘土等较易取得的材料为主。防沙材料本身不仅对携沙气流产生影响, 而且不断地受携沙气流的打磨风化, 使得防沙材料难以长期地发挥最大的防沙效益。在全球沙漠化日趋严重的当今, 面对防沙治沙事业所用原材料相对短缺的严峻现实, 迫使风沙理论研究者去开发或研制具有防沙功能的新材料, 并逐步取代以往的防沙材料(作物秸秆等)。

根据防风固沙工程的需要, 沙障形态各异, 有栅栏型、板型、板孔型、网眼型等等。从上世纪五十年代初开始, 我国科研人员就引进了麦草方格沙障, 并在不断的实践工作中作了改进, 同时在科研人员的不断探索和创新中发明了各种新型沙障, 如粘土沙障、树枝栅栏型沙障、卵石沙障等材料 and 形式的沙障。这些沙障取材方便、设置简单、效果较好, 得到了广泛的应用, 起到了良

好的防风固沙效果。但是随着时间的推移,一些沙障的局限性也慢慢显露出来。

这里值得注意的是,我国科技工作者以防沙治沙工程上就充分考虑了取材与效益这两个重要的因素。在粘土比较多的地方,采用粘土,设置成格状或行列式为主沙障,如全面平铺则对沙地水分条件会带来一定的副作用;卵石比较充足的地方,平铺卵石,即能减弱蒸发又少截流降水,保障水的条件比较好;而麦草沙障由于基部孔隙加大不但促进水分的蒸发,而且草障本身截留水量也较大^[43]。芦苇设立式沙障作为固沙造林的先行措施或重沙害区独立的防沙措施在我国广大沙区已被广泛应用^[44~45]。阻沙栅栏,又称高立式沙障,是目前特别是近几十年来,国内外对栅栏在防治风沙灾害中的作用已进行了大量的研究,并取得了一些实质性的进展^[46~50]。

从防沙材料应用范围来看,为开发和引进防沙新材料,我国于 2002 年 2 月开始采用尼龙网和涤纶包心丝网与塑料经编网分别在内陆沙漠地区和海岸沙滩地区设置格状沙障。尼龙网和塑料网作为一种新型的防沙材料,虽然造价相对较高,但可以不断提高其抗老化性能和抗风沙作用,并且具有可工业化生产,便于施工等优点。特别在一些风沙灾害比较严重的地区,如工矿、交通、国防等,用尼龙网和塑料网作为防沙材料其防护效果非常明显,具有广阔的应用前景^[51~52]。

另外,尼龙网和塑料网使用寿命比作物秸秆长,不易腐烂,虽然一次性投资成本较高,但总的经济效益还是合理有效的,同时也有利于生态环境的改善,在防沙过程中其作用比一般沙障好得多。

我国自 2002 年首次从马来西亚引入植物纤维材料“生物垫”用于防沙治沙,“生态垫”是一种新型的植物覆盖材料,是棕榈油生产中的主要副产品,由油棕树果架制成,在生产过程中不使用任何化学添加剂,能够生物降解,可以改良土壤,增加土壤有机质含量,改善土壤结构和提高土壤持水能力,从而降低土壤侵蚀和肥力流失。到 2006 年初,我国共铺设生态垫 1247150 平方米,造林和恢复植被 366 公顷^[53]。

4 研究区概况

4.1 自然地理特征

4.1.1 地理位置

民勤绿洲地处河西走廊东段，石羊河下游，行政区划上属甘肃省武威市，其地理位置在北纬 $38^{\circ} 05' \sim 39^{\circ} 06'$ ，东经 $103^{\circ} 02' \sim 104^{\circ} 02'$ 之间。北部、东部和西部的部分与内蒙古阿拉善盟接壤，西部的一部分与金昌市为邻，南靠武威市凉州区。总面积约 $1.6 \times 10^4 \text{km}^2$ ，其中荒漠和荒漠化土地约 $1.53 \times 10^4 \text{km}^2$ ，占总面积的 94.51%，海拔 1000~1936m。全县由沙漠、戈壁、剥蚀山地、盐碱地和绿洲平原组成，其中沙漠面积 8039.2km^2 ，占全县总面积的 49.81%，戈壁、低山丘陵面积 5266.67km^2 ，占总面积的 30.14%，非农盐碱地 1949.40km^2 ，占总面积的 12.08%，绿洲耕地面积只占全县总面积的 5.11%。

民勤绿洲是依靠河西走廊内陆河之一的石羊河水系的变迁而形成的，由两个盆地组成，其中绝大部分是位于石羊河下游的民勤-潮水盆地，地势由西南向东北倾斜，坡降 $1/1000 \sim 1/500$ ，该盆地将民勤划分为坝区、泉山区和湖区三部分；另外，绿洲西部与金昌市相邻也由一片绿洲，属于石羊河水系西大河下游的冲、洪积扇，称为昌宁盆地。民勤绿洲三面环沙，是甘肃省乃至全国沙漠危害最严重的地区之一，古有“十地九沙，非灌不殖”之说，是一个“地尽水耕”的灌溉绿洲，有水即为良田，无水便成荒漠，农业生产和绿洲存在都强烈依赖于水资源。考虑到荒漠化防治的重点是有效的保护绿洲，而荒漠化又主要发生于绿洲内部和绿洲边缘地带。因此，确定研究区域的范围包括绿洲平原、荒漠—绿洲过渡区。

4.1.2 地貌

全县由低山丘陵、平原和沙漠三种基本地貌类型组成。环绕四周的红崖山，黑山等是走廊北山的北延部分，风蚀严重，山势平缓。西北，东北，东南是浩瀚的沙漠，沙丘逶迤，流沙遍地，它们分别是巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的一部分。低山丘陵：山地多分布在县境四周，北部有抱疙瘩山、雅布赖山、北山、独青山；西部有长沙岭、红山梁；东部有半个尖山、红岗山；南部有馒头山、红崖山、阿拉古山；中部有狼跑泉山，秣山，苏武山，莱菔山等，由于外营力长期剥蚀的结果，岩石外露或地表面被碎石或沙覆盖，多数呈岛状孤山，少数为梁状。山体小，山势平缓。除北部抱疙瘩山海拔 1936m（全县最高点）外，其余海拔高度 1700~1500m 之间，相对高度 100~450m 之间，山地

总面积 162.7km^2 ，占全县总面积的 1.02% 。平原地貌：平原地貌按形态成因，可分为冲积平原、湖积平原、湖积~冲积平原、洪积~冲积平原及山前倾斜平原等五类。自西南而东北，由冲积、湖积~冲积及湖积逐渐递变。山前洪积倾斜平原，多分布在南部和西北部的山前，由季节性洪水搬运、沉积而成，地面坡降较大，呈波浪状起伏。风积平原：全县到处可见，集中分布在西北、东北、东南三处，常与沙丘交错分布，是由长期的风力剥蚀搬运，堆积而形成的覆沙平地地貌类型。戈壁，多分部在北山山前一带，是由季节洪水冲蚀，“土”被带走，沙石残留，形成戈壁景观，面积 3573km^2 ，占全县总面积的 22.3% ，植物稀疏，甚至成不毛之地；冲积~洪积平原主要分布在绿洲盆地上部的坝区、环河区、泉山区和昌盛区，由石羊河携带的泥沙沉积而成，地势平缓，坡降很小，一般在 0.1% 左右，是灌溉农业的精华地带；湖积平原，主要分布在绿洲北端的湖区，是石羊河灌溉余水的汇集地区，石羊河水携带泥沙发生静水沉积所形成，地表盐碱发育，风蚀严重。

沙漠：在西北、东北和东南三处与风积平原交错分布，盆地内部亦有零星分布。如三渠柴湾、六坝西部的新粮地沙窝和红沙堡沙窝等，东北、东南的沙窝属腾格里沙漠的西延部分，西北部的沙漠属巴丹吉林沙漠的东延部分，总面积 8148.1km^2 ，占全县总面积的 49.81% 。按形态特征分为沙堆、沙垄、新月型沙丘、新月型沙丘链、抛物线沙丘及近三角锥形沙丘，相对高度为 $5\sim 20\text{m}$ ；按动力过程分为，主风近似于同一方向形成的沙丘，如沙垄，多分布于西北部；两个相反风向形成的沙丘，如新月型沙丘、新月型沙丘链，多分布于东南及北部。按植被覆盖程度分为，固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘。

4.1.3 气候

本研究区属于温带干旱气候区，具有典型的大陆性气候特点。气候特征是常年干燥，降水稀少，蒸发强烈，昼夜温差大，日照充足，风大沙多。研究区年平均气温 7.4°C ，一年中最热月是 7 月，平均温度 22.4°C ，最冷月为一月，平均气温 -10.3°C ，平均年较差达 32.7°C ，平均日较差 15.9°C ，极端最高气温 41°C （1977 年 7 月 22 日），极端最低气温 -30.8°C （1991 年 12 月 27 日），无霜期 175d ， $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温 3036.4°C 。

研究区全年降水稀少，蒸发强烈。年平均降水量 115.2mm ，降水最高年份

185.1mm(1973 年), 最低 42.2mm(1962 年); 降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 的天数只有 36d, 而且全年降水不均匀, 变率大, 降水年平均绝对变率 27.7mm, 相对变率 24.5%; 年平均降水量多集中于 7、8、9 三个月, 占全年降水量 73%。年平均蒸发量 2419.6mm, 是降水量的 21 倍, 蒸发量最大的是 5、6 月, 月平均蒸发 382.6mm, 占全年的 16%。

研究区多年平均风速 $2.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 年平均风速最大出现在 1993 年 ($4.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 最小值出现在 2005 年 ($1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 全年盛行西北、西北偏西风, 夏秋季东风比较盛行。多年月风速 4 月份最大, 达到 $3.12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 1 月最小, $1.85\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 9、10 月份次小, 多年定时最大风速可达 $23.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。春季风大沙多, 自 20 世纪 70 年代以来, 平均每年出现 $\geq 17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风 28.2d, 年平均扬沙 37.8d, 沙尘暴 25.8d。研究区日照充足, 热量丰富, 日照时数较长, 多年平均日照时数 2832.1h, 4~9 月份平均每天日照达 9h 以上, 12~14h 的长日照 45 天, 年平均日照百分率 64%, 太阳直接辐射全年平均 $573\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, 光合有效辐射全年达 $287\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

4.1.4 土壤

根据成土条件、成土过程和土壤表面属性, 研究区土壤可分为地带性土壤灰棕漠土和非地带性土壤风沙土、盐土、草甸土和绿洲灌耕等土五类。灰棕漠土: 研究区的地带性土壤, 主要分布于海拔 1500m 以下的低山剥蚀山丘和山前倾斜洪积扇形地, 质地较粗, 细土物质很少, 成土过程不受地下水的影 响, 土壤粘粒在剖面中的分布随母质不同差异较大。通常母质多洪积、沉积物或现代风积沙, 发育层次不明显, 无腐殖质层, 0~5cm 为鳞片状结构, 灰棕黄色; 5cm 以下为黄棕色轻壤土, 块状结构, 有白色石灰斑点或网纹, 较紧实, 通层石灰反应强烈, Ph 值 8.0~8.2, 比重 $2.48\sim 2.8\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 有机质含量 0.4~0.7%。根据成土过程和剖面属性可分为灰棕漠土、山地灰棕漠土、山地石膏灰棕漠土、沙砾质灰棕漠土、沙化灰棕漠土和盐化灰棕漠土 6 个亚类。风沙土: 由风积沙性母质发育而成。按成土阶段分为流动风沙土、半固定风沙土、固定风沙土 3 个亚类。流动风沙土就是流动沙丘和平沙地, 地表植被稀疏, 土质粗糙, 物理性粘粒含量很少; 半固定风沙土在微弱的生物成土作用下形成, 沙丘表面呈半固定状态; 固定风沙土已处于土壤“稳定”发育阶段, 植被覆盖度达

30%以上。盐土：主要分布在民勤县的湖盆草场，母质多湖积沉积物。根据成土过程和剖面特征可分为典型盐土、草甸盐土、矿质盐土 3 个亚类。典型盐土盐分组成以氯化物为主，其次为硫酸盐，表层含盐量达 8%左右；草甸盐土盐分组成以硫酸盐为主，其次为氯化物，含盐量一般低于典型盐土；矿质盐土主要是氯化钠盐矿和芒硝矿。

4.1.5 植被

民勤绿洲在历史上是水草丰盛的地区，沼泽和草甸植被为绿洲的主要原生植被。随着地表水逐渐减少，地下水位的不下降，原生植被不断退化，逐渐演变为现在的荒漠植被类型，这些植被类型有进一步衰退的趋势。据民勤县林业局的资料，地下水位的下降已导致 $6.87 \times 10^4 \text{hm}^2$ 的天然和人工植被衰退甚至死亡，其中天然灌木林 $4.91 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，沙枣林 $1.22 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，人工灌木林 $0.75 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。研究区的植被类型主要由人工和天然植被两部分组成。人工植被主要分布在绿洲边缘地带，主要以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为主的防风固沙林，面积约 $4.5 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。研究区的天然植被具有组成种类少、层片结构简单、生产力低等特点。研究区共有种子植物约 150 多种，分属 36 科 115 属，主要由旱生、超旱生的灌木与半灌木和小灌木组成，多数群落的盖度在 15%以下，固定沙丘植被盖度 30%左右，流动沙丘的植被盖度 5%以下。根据植被的特征，将天然植被分为：砾质荒漠植被，主要建群植物有珍珠(*Salsolapasserina*)、红沙(*Reaumuria soongorica*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)和戈壁针茅(*Stipa gobica*)等。沙砾质荒漠植被，主要建群种包括白刺(*N.tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia areanaria*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)等。盐渍化草甸植被，主要植物种有盐爪爪(*Suaeda heteroptera*)、芦苇(*Phragmites communis*)、马蔺(*Iris lacteal*)、怪柳(*T. ramosissima*)等。

4.1.6 水文

民勤绿洲境内的地表水资源是发源于祁连山，经武威汇流入境的石羊河。石羊河水系由祁连山东段冷龙岭北坡的各支流组成，产流区东西长 200 km，南北宽 50km，产流面积 $1.11 \times 10^4 \text{km}^2$ ，占全流域面积的 27%。石羊河流域自西向东为西大河、东大河、西营河、金塔河、杂木河、黄羊河、古浪河和大靖河等

8 条支流组成, 多年平均天然径流量 $14.874 \times 10^8 \text{m}^3$, 占全流域地表水资源量的 94%, 另外马营河、深沟、河沟、大沙沟、大井沟、马蹄沟、沙沟河、柳条河、土门泉、石节子沟、花庄沟等 11 条小沟小河的年平均径流量为 $0.476 \times 10^8 \text{m}^3$, 山前山区产水量 $0.583 \times 10^8 \text{m}^3$, 全流域地表水资源总量为 $15.933 \times 10^8 \text{m}^3$ 。河流出山后, 其中东大河、西大河的地表水进入金昌市, 最后进入昌宁盆地, 其它 6 条支流的地表水被上游凉州区和古浪县引水灌溉后的余水、季节洪水和灌溉渗漏水经石羊河流入民勤, 进入红崖山水库。民勤绿洲的地表径流受上游灌区人类生产活动的影响较大, 每年灌溉期径流量很小, 非灌溉期有较多的水量。据民勤县水利部门的实测资料, 石羊河流域在 20 世纪 50 年代进入民勤绿洲的地表水为 $5.42 \times 10^8 \text{m}^3$, 60 年代后期为 $4.55 \times 10^8 \text{m}^3$, 自 20 世纪 60 年代末以来, 由于上游灌区工农业生产发展较快, 用水量大幅度提高, 再加上上游修建水库使进入民勤绿洲的地表径流锐减, 2000 年的入境径流仅为 $1.14 \times 10^8 \text{m}^3$ 。地表来水量的持续减少, 使民勤绿洲开采地下水便成为必然的选择。民勤绿洲的地下水资源包括与地表水不重复的地下水天然补给量和与地表水重复的补给量。与地表水不重复的地下水补给量, 包括两部分: 一是降水、凝结水补给量, 总量 $0.108 \times 10^8 \text{m}^3$, 其中昌宁盆地 $0.03 \times 10^8 \text{m}^3$, 红崖山灌区 $0.04 \times 10^8 \text{m}^3$, 环河灌区为 $0.037 \times 10^8 \text{m}^3$; 二是地下径流侧向补给, 民勤绿洲可消耗的地下径流 $0.4886 \times 10^8 \text{m}^3$, 其中昌宁盆地为 $0.155 \times 10^8 \text{m}^3$, 环河 $0.15 \times 10^8 \text{m}^3$, 红崖山灌区 $0.127 \times 10^8 \text{m}^3$ 。与地表水重复的补给量包括地表水渠系有效渗入量 $0.823 \times 10^8 \text{m}^3$, 地表水田间有效渗入量 $0.0528 \times 10^8 \text{m}^3$ 。民勤绿洲地下水补给的总资源量为 $1.4626 \times 10^8 \text{m}^3$ 。民勤绿洲地表水 20 世纪 70 年代已经不能满足农业生产的需要, 于是开始大规模开采地下水资源, 年均超采量为 $1.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。据李忆春等^[54]分析, 现累计超采地下水资源量为 $50 \times 10^8 \text{m}^3$ 。大量超采导致地下水位持续下降, 形成漏斗。现已在绿洲内部形成了以县城、泉山和西渠镇为中心的总面积为 968km^2 的 3 个大漏斗, 漏斗中心水位每年下 $0.61.0 \text{m}$ 。随着地下水位的持续下降, 浅层地下水矿化度也大幅度升高, 地下水矿化度每年以 $0.3 \sim 1.48 \text{g.l}^{-1}$ 的速度上升, 大部分地区的矿化度在 $1.0 \sim 3.0 \text{g.l}^{-1}$ 之间。农业灌溉和饮用地下水不断向更深层次发展, 90 年代开始开采 300m 的深层地下水, 这样深、浅层混合开采, 长期以往势必导致深层地下水的污染。

4.2 社会经济状况

民勤县地处巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的包围之中，三面环沙，气候干燥，是一个典型的荒漠绿洲区。民勤县按地面景观可分为荒漠区和绿洲区两大部分，其中荒漠区面积约占全县总面积的 95%，种植业发展的绿洲区仅占 5%。共有民勤、昌宁和环河三块绿洲，其中民勤绿洲可分为坝区、泉山区和湖区三部分。根据 2007 年统计资料，全县辖 18 个乡镇，244 个行政村，总人口 31.11×10^4 人，其中农业人口 23.18×10^4 人。2006 年民勤县人均国内生产总值 7657 元，城镇居民人均可支配收入 5618 元，农民人均纯收入 3582 元，农村人均生产粮食 778.6kg。民勤县也是一个绿洲农业县，2006 年全县耕地面积 $6.47 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，总播种面积 $6.31 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，其中粮食作物面积 $2.34 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；经济作物播种面积 $2.83 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，主要经济作物有黑瓜子、黄河蜜瓜、茴香、葵花子、棉花；饲草面积 $1.13 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。全县的粮经草比例为 38:45:17。畜牧业围绕建设草业大县，畜牧强县的目标，大力发展种草养畜，全县牛、羊、猪、鸡存栏分别达到 6.20×10^4 头、 83.08×10^4 只、 10.3×10^4 头、 136.6×10^4 只。林业发展紧紧围绕石羊河流域综合治理，坚持外治风沙，内建林网，完成人工造林 3353hm^2 ，森林覆盖率 10.86%；封闭机井 500 眼，压缩耕地 3333hm^2 。2006 年农业总产值 10.38×10^8 元，占全县国内生产总值的 44.97%。工业基础薄弱，没有支柱产业，工业产品主要以原煤、白酒、面粉、皮棉、地毯为主，工业设施十分陈旧，全县 2006 年工业企业销售产值 4.79×10^8 元。

5 实验设计

5.1 沙障设计原理及规格

在一定地型特征及当地的气候条件下，沙障的规格及设置方式与沙障效益的发挥有很大的相关性。沙障的设置方式不同，沙障的防沙效益也就受到了限制。沙障设置要与主风向垂直，单一风向的地区，沙障可设置为带状，多风向地区，沙障可设置为格状。但沙障间距较大，容易被风掏蚀，规格较小则易沙埋。沙障的高度、孔隙度和长度也是影响沙障防沙固沙效益的主要因素，本次实验在编织沙障时充分考虑到了这三个重要的因素。

5.1.1 沙障高度

根据风沙流的运动规律, 风沙流中的沙子有 80~90% 是在近地表 10~30m 的气流中, 且大多集中在贴近地表 10cm 的高度内通过^[55], 尤其是以 0~10cm 高程内的含沙量和输沙量最为集中和丰富。因此设置一定高度的沙障就会拦截风沙流中的沙粒, 阻止沙粒随风沙流继续移动, 防止沙害的进一步发生, 随着高度的增加固沙效果也会逐渐增强, 但是考虑到用材量和用工量, 本项实验编织了直径为 10cm 的集束型不透风沙障和高度为 30cm 的栅栏式透风型沙障。(图 1)

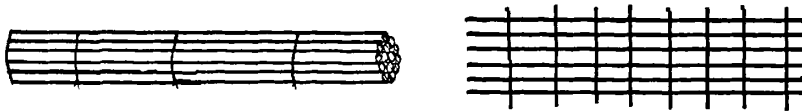


图 1 棉秆沙障编织及结构示意图

Fig 1 Cotton haulm fence

4.3.1.2 孔隙度

沙障孔隙度是沙障孔隙面积与沙障总面积之比。它是衡量沙障透风性能的指标。在实验区, 根据实验地区的风力情况和沙源情况设置沙障的孔隙度。孔隙度越小, 沙障越紧密, 积沙范围越窄, 积沙的最高点恰在沙障的位置上, 所以沙障很快被积沙所埋没, 失去继续拦沙的作用。反之, 孔隙度越大, 积沙范围延伸得越远, 积沙作用也大, 防护时间也长。如孔隙度大于 50% 时, 沙障前缘和沙障基部常被风蚀而造成损坏。为了发挥沙障较大的防护效能, 在障间距离和沙障高度一定的情况下, 沙障孔隙度的大小, 应根据各地风力及沙源情况来具体确定。一般多采用 25%~50% 的透风孔隙度。风力大的地区, 而沙源又小的情况下孔隙度应小, 沙源充足时, 孔隙度应大。

关于孔隙度与防沙效益的关系, 研究颇多。Ranga^[56]等研究表明栅栏的阻力主要受孔隙度和高度的影响。凌裕泉在沙坡头对不同孔隙度和高度的栅栏在防止前沿积沙作用的观测研究, 发现栅栏的孔隙度是影响其防护效益的最重要因素, 室内试验和野外观测均证实了当孔隙度达到 40% 左右时, 栅栏阻沙效果达到最佳状态^[57], 可见沙障的孔隙度对栅栏式沙障拦截风沙流的作用有很重要的影响, 它是透风型沙障能否起到很好的防沙效益的重要因素。这些研究成

果为本次实验的设置提供了宝贵的理论依据，结合实验的立地条件，本次实验的栅栏式沙障的孔隙度为 40%~50%。

4.3.1.3 长度

沙障的长度决定了沙障设置的行距，沙障设置后，增加了地面的粗糙度，过境风速减弱，携沙气流中的沙粒就会沉积下来，在障内形成积沙，同时过境风速也会对障内沙面产生风蚀作用，经过一段时间的风蚀风积变化，风蚀风积就达到一种平衡状态，在障内就形成了稳定的凹曲面，这是沙障达到了防沙固沙的理想效果。一般研究结果认为：无论障埂高度和障间距离如何变化，障间蚀积系数即沙障稳定后凹面的深度（从障埂顶部起凹曲面中部最深处）与障间距离的比值始终处于 $1/10 \sim 1/15$ 之间。这就说明可以通过调节沙障高度或是障间距离来控制沙面的蚀积状况。假如 10cm 高的沙障不被沙埋，也不被掏蚀，形成蚀积系数为 $1/10 \sim 1/15$ 的凹曲面，则障间距约为 100cm，本项实验的障间距定为 100cm，也就是说沙障的长度为 100cm。

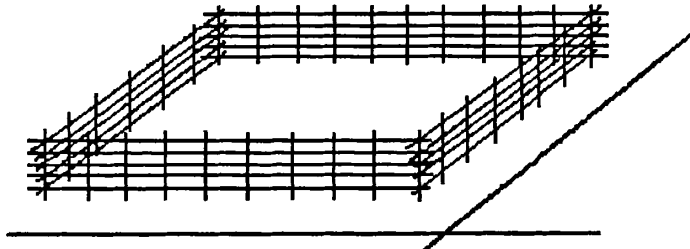


图 2 栅栏式棉秆沙障设置方式示意图
Fig 2 Mode of cotton haulm fence setting

5.2 实验设置

5.2.1 实验地概况

实验地选在甘肃省治沙所民勤治沙站双墩子一新月型沙丘上，沙丘高约 5m，纵向长约 300m，宽约 300m。沙丘上植被稀少，属一流动沙丘，沙丘地处巴丹吉林沙漠东南缘。地理坐标东经 $103^{\circ}05'$ ，北纬 $38^{\circ}38'$ ，海拔高度 1378.5 m，属大陆性荒漠气候，主要特点是冬春风速较大，以西北风为主，有明显的单一风向。多年平均大风日数 26.3 d，沙尘暴日 25d，扬沙日 37.5 d，浮尘日 29.7 d，年平均风速 2.5 m/s，起沙风速大于 5.0 m/s。

5.2.2 实验设置方法

为了有效的观测比较各种沙障的防沙效益,在沙丘迎风坡并排设置集束型和栅栏式两种棉秆沙障,集束型沙障设置为方格状 $1 \times 1\text{m}$, 栅栏式沙障设置为方格式 $1 \times 1\text{m}$ 和行列式 $1 \times 5\text{m}$ 两种。这样就在沙丘上设置了三个试验区,每个试验区分为沙丘下部、沙丘中部和沙丘上部三个观测点,进行风速及蚀积量的观测,同时在沙丘中部无沙障区设一对对照区,比较沙障内风速与流沙地的不同变化。沙障设置与主风向的夹角略大于 90° , 而不超过 100° , 沙丘顶部不设沙障。每个试验区面积为 $50 \times 100\text{m}$ 的长方形,实验地总面积为 15000m^2 长方形。(图 3) 设置时间为 2007 年 12 月。

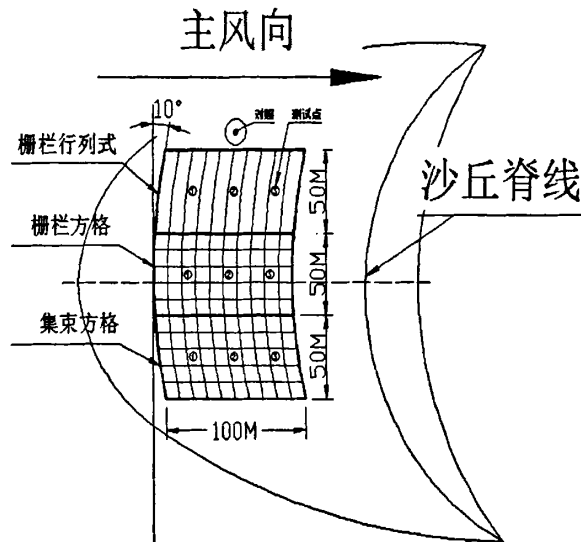


图 3 棉秆沙障实验设置示意图

Fig.3 Mode of cotton haulm fence setting

5.3 数据的观测

5.3.1 风速

在风沙活动比较频繁的季节观测其对风速的减弱作用,在起沙风条件下用野外便携式防沙风速廓线测量仪(ZL 02261931.3),在沙丘中部测量沙障内不同高度及相同高度不同风速的变化,由此将风速廓线仪不同高度及相同高度所采集的风速与流沙对照区作比较作为栅栏式棉秆沙障的阻风效益。

1 垂直方向风速的观测

沙障设置后,增加了沙面的粗糙度,对近地面风速的影响比较大,通过测量不同高度的风速,比较各沙障内垂直方向风速的脉动程度,分析三种设置方式不同沙障对风速的减弱作用,同时通过风速的变化计算出三种设置方式不同的沙障的粗糙度,分析其阻风效益。测量高度分别为 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 100cm, 观测频率为 10 秒 100 次,取其平均值为该高度的风速值。

对所得数据进行处理及标定,取得该时间段内的近平均风速,计算粗糙度。

$$\lg z_0 = \frac{\lg Z_2 - (U_2 / U_1) \lg Z_1}{1 - U_2 / U_1}$$

式中: Z_0 ——地表粗糙度(cm); U_1, U_2 ——分别是高度 Z_1, Z_2 处的风速(m/s), $Z_1=10\text{cm}$ 高度, $Z_2=100\text{cm}$ 高度。

2 水平方向风速的观测

当过境风经过垂直方向的沙障时,由于三种设置方式不同的沙障的阻风效益也就不尽相同,对不同结构类型的沙障内各高度的风速进行同步测定,分析其差异。测定高度分别为 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm, 80cm, 90cm, 100cm, 观测频率为 10 秒 100 次,取其平均值为该高度的风速值。

5.3.2 蚀积量

在每种沙障测试点①②③设 30cm 高的 8 #铁丝签,分析栅栏式棉秆沙障及集束式棉秆沙障的阻沙固沙效益。沙障设置后对沙障内的风蚀风积状况进行定期观测,分别在 3 月、6 月和 9 月份三次测量,沙障经过 3~5 月的强风季节后,有大量沙粒被沉积,以后在沙障内经过风蚀风积变化达到蚀积平衡。通过观测蚀积量的变化分析其对过境风沙流的拦截作用。(图 3)

6 实验结果与分析

6.1 沙障的防风效益

6.1.1 垂直方向不同风速变化

变异系数($CV=\text{标准差}/\text{平均值}$)反映一组数在单位均值上的离散程度。风

速变异系数可用来反映风速沿高度的变化幅度，变异系数越大说明风速值波动越大，沙障对近地表风速的影响越明显。

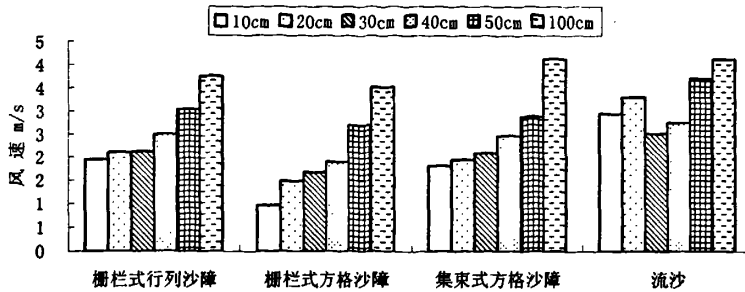


图 4 各沙障内垂直方向风速变化

Fig4. Wind velocity variation in a vertical direction above each type of sand barriers

在设有沙障设置的流沙上，0~100cm 的风速变异系数为 0.16，10cm 风速为 100cm 风速的 67%，降幅仅为 33%。设置不同结构及规格的棉秆沙障后，增加了地表的粗糙度，风速在 100cm 至 10cm 高度的风速值发生不同程度的改变，风速在垂直梯度上变化显著（图 4 和表 1）。栅栏式方格沙障所在地表粗糙度为流沙的 $10^{1.62}$ 倍，其风速变异系数和风速降幅最大，达到 0.48 和 75%，现场观测发现障体高度内风杯转动缓慢并发生间断，风感很弱，地表沙粒静止或少量缓慢蠕移；现场观测发现当流沙表面沙粒沿风向大量蠕移并伴有少量跃移时，30cm 高度的栅栏式行列沙障内沙粒运动明显减弱，由于障体阻力气流在障体前后基部形成小范围的涡流带动沙粒在原地做往返蠕动，由此可以认为 30cm 高度的棉秆栅栏式行列沙障有较好的固沙阻沙作用，相比之下，30cm 高度的栅栏式格状棉秆沙障具有很好的稳定性，地表粗糙度为流沙的 $10^{1.62}$ 倍，风速变异系数和风速降幅分别为 0.48 和 75%，高出同高度的行列状沙障 0.11 和 7 个百分点；集束式 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 沙障的风速变异系数和风速降幅分别是 0.27 和 53%，地表粗糙度分别为流沙的 $10^{1.18}$ 倍，野外观测发现设置初期集束式沙障内沙粒运动明显，但一定阶段的蚀积作用后沙面趋于稳定，观测还发现 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 集束式沙障存在障下掏蚀和沙埋现象，但设置过程简单、移动方便、容易维修，具有一定的优越性。

表 1 各类型棉秆沙障内风速变化特征值与地表粗糙度
Tab1. Values of wind speed change above each type of sand barriers

沙障类型	风速变异系数	风速降幅 (%)	Z_0
栅栏式行列沙障	0.37	68	$10^{1.46}$
栅栏式方格沙障	0.48	75	$10^{1.62}$
集束式方格沙障	0.27	53	$10^{1.18}$
流沙	0.16	33	10^0

6.1.2 水平方向风速变化

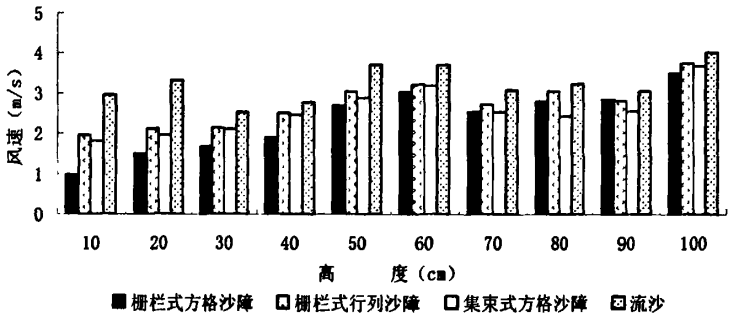


图 5 各沙障内水平方向风速变化

Fig5. Wind velocity variation in a level direction above each type of sand barriers

对不同结构类型的沙障内各高度的风速进行同步测定，分析其差异（图 5）。从 100cm 到 10cm，各类型沙障内随高度降低风速与流沙上对应高度的风速差距越来越大。相对于流沙表面风速，栅栏式方格沙障内风速降低幅度最明显，在 10cm 处，栅栏式方格沙障的风速仅为流沙上风速的 33%，风速降低了 67 个百分点，对风速的降低幅度明显高出栅栏式行列沙障 34 个百分点和集束式方格沙障 29 个百分点。到 40cm 处分别高出栅栏式行列沙障和集束式方格沙障 22 和 20 个百分点。而 50cm 处仅分别高出 9 个和 5 个百分点，50cm 以上三种沙障类型的风速降幅趋于一致。所以风速受沙障影响的范围主要在近地表 50cm 范围内，在这一范围内，栅栏式方格沙障的对风速的减弱作用最大。集束式沙障和栅栏式行列沙障结构截然不同，且设置高度相差 10cm 左右，但对风的影响程度相近（图 6）。

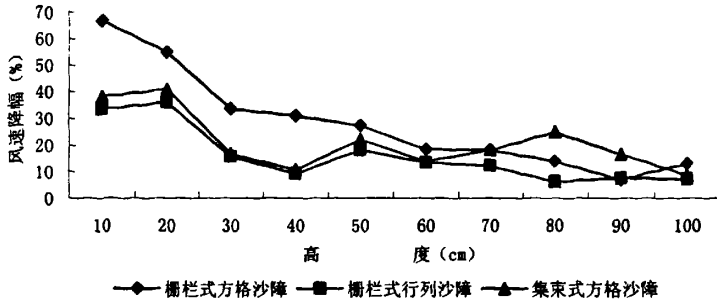


图 6 三种类型棉秆沙障内风速降幅

Fig6. Ratio of wind speed decrease of three types of sand barriers

6.2 沙障的固沙效益

沙障设置后, 改变了下垫面的性质, 由于一方面拦截了过境风沙流, 使大量沙粒沉积, 另一方面减弱了风速, 防止了过境风对沙面的进一步吹蚀。不同的沙障由于其设置方式不同, 他们的阻沙固沙效益也不相同。沙障设置后, 由于沙障的阻风作用, 挟沙气流在经过设有沙障的下垫面时, 风速减弱, 风沙流的携沙能力显著降低。由于的近地面风速不断减小, 挟沙气流中的大量沙粒会沉积下来。在实验地, 设置的沙障经过了 3~5 月份的强风季节, 三种沙障内均有积沙, 在以后的季节里, 过境风速较小, 沙障内风蚀现象比较明显。通过对三种不同沙障不同测试点蚀积量的时空变化进行分析, 发现由同一材料做成的棉秆沙障, 由于编织方式及沙障设置方式的不同, 它们的阻沙防沙效益也不相同。

图 7 为集束式方格沙障不同测试点蚀积量的时空变化情况图。由于测试点位于沙丘中下部, 处于风沙流前沿, 沙障内积沙比较多, 而且在沙丘下部沙障被沙埋的现象也比较严重, 风蚀风积的时空变化量比较大。而在沙丘上部的沙障内, 由于积沙较少, 沙障内蚀积量子时空变化与沙丘中下部的沙障相比, 变化量比较小。集束式沙障测试点①内沙障被沙埋, 蚀积量的时空变化并不明显。被埋沙障提起后可重新设置, 重设过程简单省力, 使沙障继续发挥防风固沙的效能。在测试点②, 沙障先是被沙埋, 后由于过境风的不继吹蚀, 最终在障内形成了凹曲面, 实验观测发现, 障内几乎没有形成结皮。测试点③由于前面沙障的阻风作用, 风沙流中的大量沙粒在前面沙障内沉积, 障内积沙很少, 在障内达到蚀积平衡, 蚀积量的时空变化并不明显, 障内形成凹曲面, (图 8) 且有结皮。凹曲面的形成对原有沙面有固定作用。

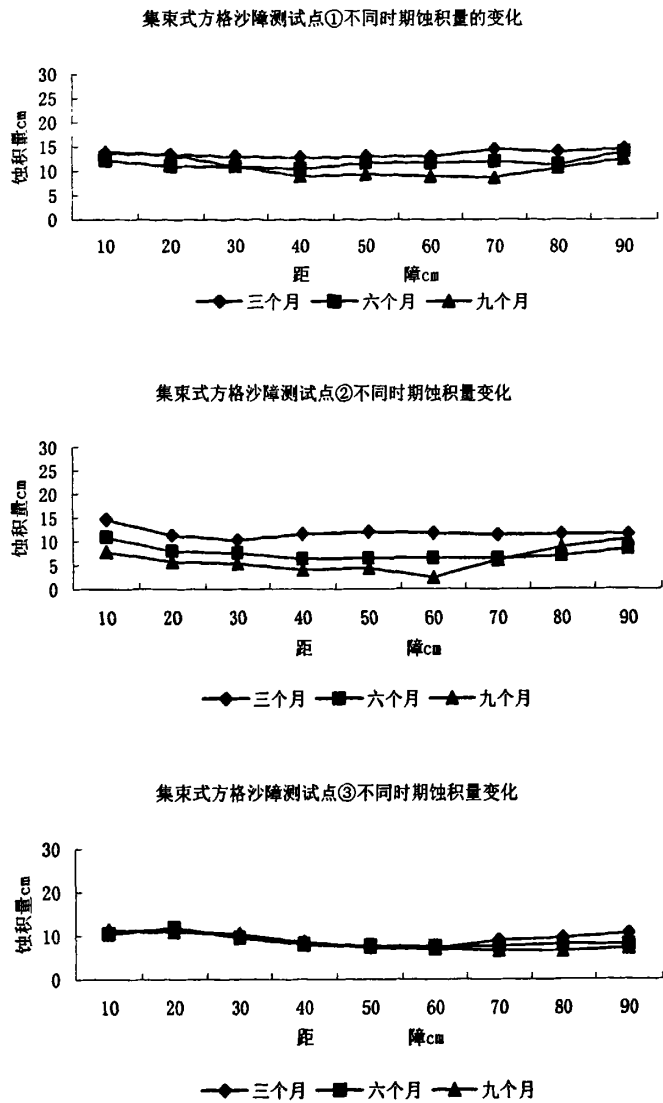


图 7 集束式方格沙障不同测试点蚀积量的时空变化情况

Fig6. Wind erode and accumulate capacity of variety testing point in variety bundle cotton haulm



图 8 集束式方格沙障凹曲面
Fig.8 Concave of bundle cotton haulm

栅栏式沙障的粗糙度大于集束型沙障，它对风沙流的拦截作用也比较强。

沙丘下部沙障内的积沙厚度要高于沙丘中部及上部沙障。由于沙障障体高于积沙厚度,各测试点沙障内蚀积量的时空变化并不明显。(图 9)

在实验沙区,位于风沙流前沿的沙障沙埋现象比较严重,但数量较少,而沙丘中上部的沙障积沙较少,几乎没有被沙埋的现象发生。

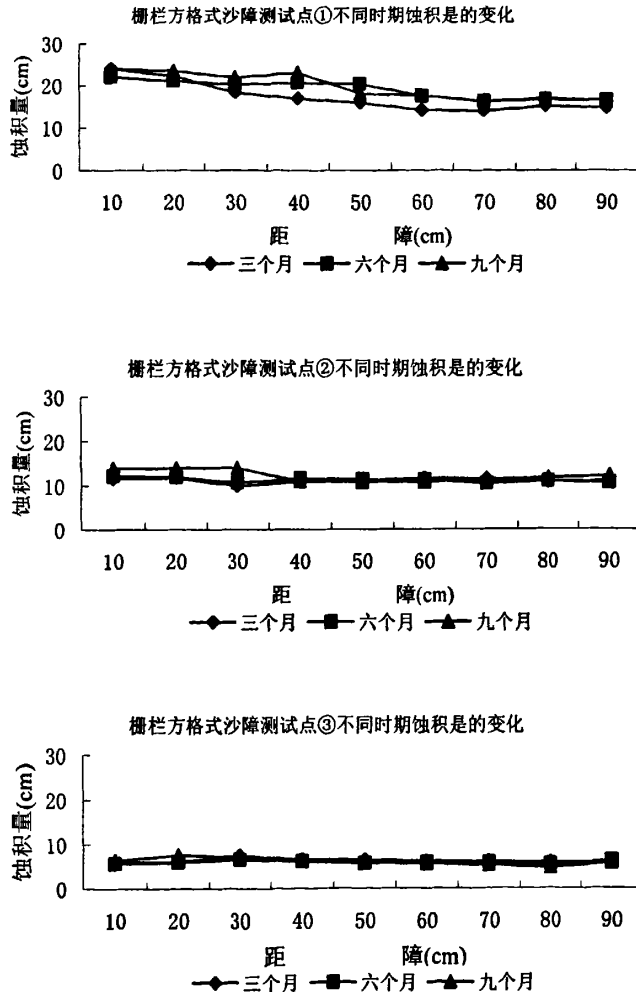


图 9 栅栏式方格沙障不同测试点蚀积量的时空变化情况

Fig9. Wind erode and accumulate capacity of variety testing point in variety fence chalkboard cotton haulm

栅栏式棉秆沙障属透风型沙障,当风沙流经过沙障时,当风沙流经过疏透型沙障时,有一部分气流在障前碰撞受阻而回旋,使障前风速急剧降低,风沙流的携沙能力降低,沙粒在障前沉落;另一部分气流则从沙障空隙中穿过,在穿过的过程中,由于受到沙障材料的摩擦、阻挡和分割,气流的能量明显被消

耗，风速减弱，从而使部分沙粒在障后发生沉降。同时受主风向的影响，被风蚀的沙粒也会沙障后沉积，这样就形成了一种跨障的凹曲面。这种凹曲面对原有沙面仍有固定作用。(图 10)

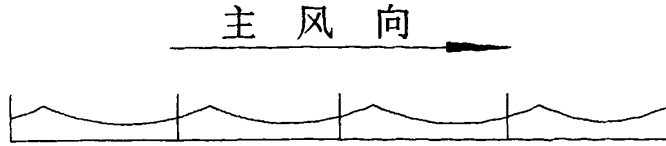
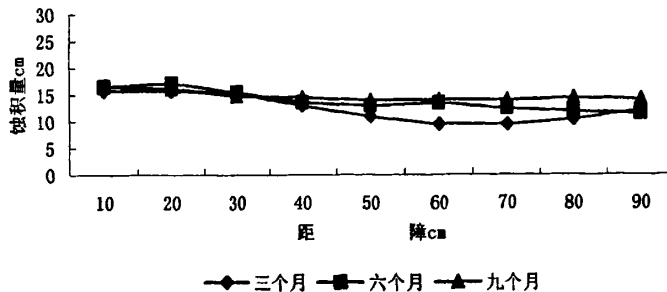


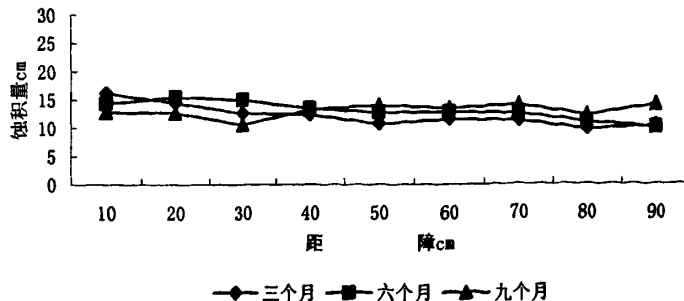
图 10 栅栏式沙障凹曲面
Fig.10 Concave of cotton haulm fence

栅栏式行列式沙障的设置与栅栏方格式沙障相比，用材比较少，蚀积量的时空变化也与栅栏式方格沙障相似，由于这行列式沙障的粗糙度要小于方格式沙障，沙障内积沙主要在沙丘的中下部，且中下部沙障有倒伏现象，强风季过后，需要重新设置。(图 11)

栅栏行列式沙障测试点①不同时期蚀积量变化



栅栏行列式沙障测试点②不同时期蚀积量变化



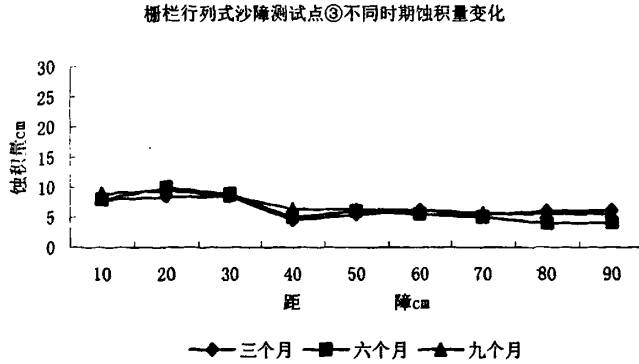


图 11 栅栏行列式沙障不同测试点蚀积量的时空变化情况

Fig11. Wind erode and accumulate capacity of variety testing point in variety fence
cavalcade cotton haulm

通过对三种沙障的防风固沙效益进行比较分析，棉秆沙障纺织为栅栏式较集束式有明显的防沙效益，栅栏式沙障设置为方格式较行列式有明显的防沙效益。由于栅栏式方格状沙障形成的跨障式凹曲面的积沙最高点没有落在沙障处，使得沙障不易被沙埋，延长了沙障的防风固沙效益。(图 12)



图 12 栅栏式方格沙障内积沙示意图

Fig.12 Mode of sand accumulate in cotton haulm fence

7 讨论与结论

7.1 讨论

(1) 栅栏式棉秆沙障属于透风型沙障，在一定孔隙度条件下，当风沙流中的一部分沙粒沉降在沙障内时，由于过境风的进一步的吹蚀，穿过沙障孔隙，最后在沙障背后沉积下来，积沙的最高点不在沙障处，防止沙障被沙埋的危害，这是栅栏式沙障的优越性所在。

(2) 积沙风沙流的主要的危害方式。实验的野外观测发现，沙障设置后，由于沙障对风沙流的削弱作用，使得风沙流中的大量沙粒在沙障内沉降，处于风沙流前沿的沙障容易被沙埋，因此在沙源比较强的地区，可设置障体比较的

高的透风型沙障，防止沙埋效果比较好。

(3) 野外观测发现，除去沙埋部分，集束式沙障在防止沙面被风蚀，固定流沙的功能比较好。由于集束式沙障属于不透风的沙障，当过境风经过沙障时，受到沙障的阻拦，风蚀现象发生在沙障的中间部位，而在沙障四周形成积沙，最后在沙障内部形成稳定的凹曲面，达到固定流沙的效果。而且这些被沙埋的沙障经过简单的重设可重新发挥其防风固沙的效能。

(4) 视当地沙源状况，地貌类型及气象条件，各种沙障可配合使用。在实验地区，沙源比较充足，而且风沙危害主要集中在 3~5 月份强风季节，沙障内凹曲面的形成主要是在以后的弱风季节不断地风蚀所形成，因此可在风沙危害比较强的前沿设置栅栏式沙障而在栅栏式沙障之后再设集束式沙障，可进一步提高沙障的防风固沙效益。

(5) 棉秆沙障设置后，不仅固定了流沙，而且改变了立地条件，使得当地的土壤结构，水分状况等都发生了一定的变化，为进一步进行生物固沙措施创造了条件，对这些变化的研究使得棉秆沙障具有重要的科研前景。

7.2 结论

(1) 机械沙障的固沙作用主要在于对近地表气流的干预与削弱。棉秆沙障设置后，增加了地面的粗糙度，降低了风速，防止了过境风对裸露沙面的进一步吹蚀；同时由于风速的降低，进而影响了风沙流的强度，使得风沙流的携沙能量减弱，也就是防止了风对沙的搬运能力，有效防止了沙害。

(2) 棉秆沙障编织为栅栏式较集束式有明显的防风固沙效益，栅栏式沙障设置为格状较行列式有明显的防风固沙效益。结合立地条件可在风沙流强度大，沙源充足的地区可设置栅栏式方格沙障，在风沙流强度小，沙源较少的绿洲外围地带可设置集束式沙障。

(3) 栅栏式沙障设置后，由于形成了不同于集束式沙障的跨障式凹曲面，障内积沙的最高点不在沙障部位，有效地减少了沙障的沙埋率，延长了沙障的寿命，提高了沙障的防沙效益。

(4) 通过对其防沙固沙效益的比较分析，证实作为防沙新材料的栅栏式棉秆沙障的防护效益十分显著，其设置方式是科学可靠的，在该地区取代尼龙网和塑料网作物等投资比较大的防沙固沙材料完全可行。

(5) 栅栏式棉秆沙障具有取材方便成本低、对环境无污染、设置后二次修复容易、减小了维护成本等优点，可在干旱区进行广泛的开发应用。

致 谢

在论文脱稿付印之际，首先，向辛勤培养我的导师王继和研究员和李毅教授致以最真诚的感谢和最崇高的敬意！也向三年来给本授过课的各位老师致以崇高的敬意！在三年的求学生涯中，无论学习与生活都得到了二位导师的悉心指导与关怀，三年来，本人在汲取精神食粮的同时，也被恩师从严治学、献身科学、以苦为乐的精神所感染，使人倍受鼓舞。置身于两位恩师的谆谆教诲之中，受益匪浅，终身难忘。

其次，感谢甘肃省治沙研究所刘虎俊工程师对本人实验方面的指导与帮助，也感谢孙涛和马瑞对本人实验的帮助。实验期间，与他们一起进出沙漠，选择实验地点，进行实验设置，数据测量与分析，苦乐相融，亲身体会了科研工作者的艰辛与乐趣。

也感谢马开、李登航、李栋、靳虎甲、王婷婷等 2006 级同窗学友在学校学习期间的热情帮助与勉励。

本人也将不胜感激辛勤审批此文的专家及对此文提出宝贵意见和建议的同行！

李瑞军

二零零九年六月

参考文献

- [1]中国地质环境信息网 <http://www.cigem.gov.cn/readnews.asp?newsid=1526>
- [2]王涛, 赵哈林. 中国沙漠科学的 50a. 中国沙漠, 2005, 25(2):145-165.
- [3]新华网 http://news.xinhuanet.com/focus/2004-08/10/content_1752818.htm
- [4]吴正, 2003 吴正 等著. 风沙地貌与治沙工程学. 科学出版社, 2003, 21-22.
- [5]刘贤万实验风沙物理与风沙工程学科学出版社 1995, 122
- [6]董治宝. 中国风沙物理研究五十年 (I). 中国沙漠, 2005, 25(3): 293-305
- [7]凌裕泉. 流沙地区铁路沙害治理体系配置的风沙物理学原理. 中国沙漠研究与治理 50 年, 2005, 113-125.
- [8]徐新文, 胡玉坤, 潘伯荣. 塔里木沙漠公路防沙体系的防护效益. 干旱区研究, 1998, 15(1): 21-26.
- [9]王训明, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益分析. 中国沙漠, 1999, 19(2): 120-127.
- [10]韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治. 地理学报, 2003, 58(2): 201-208
- [11]金昌宁. 塔克拉玛干沙漠流动沙丘分布区公路修筑及沙害防治研究. 兰州大学博士学位论文, 2006. [12]吴正. 塔克拉玛干沙漠成因探讨. 地理学报, 1981, 36: 280-291.
- [13]左合君等, 2005 左合君, 董智, 魏江生, 等. 沙漠地区高速公路防沙体系效益分析. 水土保持学报, 2005, 12(6): 222-225.
- [14]张奎壁, 邹受益, 治沙原理与技术 1990, 9, 111
- [15]赵性存. 包兰铁路中卫至甘塘段沙漠路基的修筑. 流沙治理研究 (二), 1988, 1-7.
- [16]于云江, 史培军, 鲁春霞. 青藏铁路客城区段风沙流特点及沙害防治措施的研究. 自然灾害学报, 2001, 10(1):30~36.
- [17]左合君, 董智, 魏江生, 等. 沙漠地区高速公路防沙体系效益分析. 水土保持学报, 2005, 12(6): 222-225.
- [18]张伟民, 王涛, 薛娴, 汪万福, 郭迎胜, 刘金祥. 敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系探讨. 中国沙漠, 2000, 20(4):409~414.

- [19]汪万福, 张伟民, 李云鹤. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治研究. 敦煌研究, 2000, 1:42~48.
- [20]汪万福, 王涛, 张伟民, 张国彬, 邱飞, 詹红涛. 敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系设计研究. 干旱区地理, 2005, 28(5):614~620.
- [21]马全林, 王继和, 刘虎俊, 詹科杰. 机械沙障在退化人工梭梭林恢复中的应用. 干旱区研究, 2005, 22(4):526~532.
- [22]马全林, 王继和, 詹科杰, 刘虎俊. 塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景. 水土保持学报, 2005, 19(1):36~39.
- [23]常兆丰, 仲生年, 韩富贵, 李爱德. 民勤沙区风害及防风固沙林的效益观测研究. 甘肃环境研究与监测, 1997, 10(4):11~14.
- [24]柴发盛. 土方格沙障在防沙治沙造林中的作用. 青海农林科技, 2003, 3:58~60.
- [25]石蒙沂, 张登山, 段庆光. 共和盆地机械沙障固沙的效益分析. 青海环境, 1992, 2(2):80~83.
- [26]刘吉军, 徐秀芳. 机械沙障在乌审旗造林中的推广应用. 内蒙古林业科技, 2006, 32(4):46~47.
- [27]凌裕泉. 草方格沙障的防护效益[A]. 流沙治理研究[C]. 银川:宁夏人民出版社, 1980.
- [28]刘贤万. 草方格沙障的风洞实验. 流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社, 1988. 326—334.
- [29]王振亭, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型. 中国沙漠, 2002, 22(3):229~232.
- [30]孙显科, 郭志中. 沙障固沙原理的研究. 甘肃林业科技, 1999, 24(2):7~12.
- [31]彼得洛夫. 人工沙障的制作原理及其在防沙中的应用. 世界沙漠研究, 1980(4):36—40.
- [32]吴正, 董治宝, 李保生, 等. 阻沙工程、风沙地貌与治沙工程. 北京:科学出版社, 2003. 331—335.
- [33]凌裕泉, 金炯, 邹本功, 等. 栅栏在防止前积沙中的作用——沙坡头地区的栅栏阻沙实验研究. 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠实验研究站. 流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社, 1991. 297-308.
- [34]刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京:科技出版社, 1995. 149-165
- [35]刘贤万. 草方格沙障的风洞实验[A]. 流沙治理研究(2)[C]. 银川:宁夏人民出版社, 1991.
- [36]朱震达, 赵兴梁, 凌裕泉, 等. 治沙工程学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998.
- [37]王继和, 徐先英, 马全林. 甘肃治沙研究工作的主要进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3):93-100.

- [38]王振亨, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 229-232.
- [39]孙庆伟, 王涛, 韩致文, 等. 北疆铁路沿线风沙危害的研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 182-186.
- [40]柯丛茂. 草(枝条)方格沙障沙害预测预报模型的研究[J]. 南昌水专学报, 2000, 16(2): 49-53.
- [41]常兆丰, 仲生年, 韩福桂, 刘虎俊. 粘土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究. 中国沙漠, 2000, 20(4): 455~457.
- [42]吴正等著, 风沙地貌与治沙工程学 (M). 科学出版社, 2003, 17
- [43]张奎壁, 邹受益, 治沙原理与技术 1990, 9, 117-118
- [44]汪万福, 李最雄, 刘贤万, 等. 敦煌莫高窟顶灌木林带防护效应研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 306-312.
- [45]韩致文, 刘贤万, 姚正义, 等. 复膜沙袋阻沙体与芦苇高立方格沙障防沙机理风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 40-44.
- [46]Lee S J, Park K C, Park C W. Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 1453-1463.
- [47]Bofah K K, Alhinai K G. Field tests of porous fence in the regime of sand land wind [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 23: 309-319.
- [48]Borges A R, Viegas D X. Shelter effect on a row of coal piles to prevent wind erosion [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 29: 145-154.
- [49]Judd M J, Raupach M R, Fininigan J J. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: velocity elds [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 80: 127-165. [50]Lee S J, Kim H B. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80: 311-326.
- [51]屈建军, 凌裕泉, 刘贤万, 等. 尼龙网栅栏防沙效应研究[J]. 兰州大学学报, 2002, 38(2): 171-176.

- [52] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3):276-280.
- [53] 作者. 文题 [N]. 报纸名, 出版日期(版次)06 年 7 月 30 日《光明日报》报道,
- [54] 李忆春, 陈发虎. 民勤盆地水资源可持续利用对策-2000 年民勤水资源利用调查[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 465~469
- [55] 张奎璧, 邹受益. 治沙原理与技术[M]. 北京:中国林业出版社, 1990.111-113
- [56] Ranga R K G, Garde R J, Singh S K, et al. Experimental study on characteristics of flow past porous fences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 29: 155-163.
- [57] 凌裕泉, 金炯, 邹本功, 等. 栅栏在防止前沿积沙中的作用[J]. 中国沙漠, 1984, 3(4):16-25.

作者简介

李瑞军，男，汉族，生于 1977 年 6 月，甘肃省通渭县人。

2006 年考入甘肃农业大学林学院，学习水土保持与荒漠化防治专业，在校期间，按学校培养计划，完成各学科的学习。2007.10——2008.11 随导师在甘肃省治沙研究所实习，参与甘肃省自然基金项目（3ZS041-A25-015，0711RJYH004）、国家科技支撑计划项目（2007BAD46B03）等基金项目的完成，并完成硕士论文。

导师简介

王继和, 男, 汉族, 1977 年毕业于兰州大学生物系, 大学学历, 研究员, 博士生导师。现任甘肃省治沙研究所所长, 兼任中国治沙暨沙产业理事、中国植物学会植物园协会理事、甘肃省植物学会理事、甘肃省林学会理事、中国地理学会沙漠分会理事、甘肃林学会治沙专业委员会副理事长。获甘肃省科技进步一等奖 1 项, 二等奖 2 项, 三等奖多项, 国家科技攻关优秀成果 1 项。在国内外学术刊物上发表论文 90 余篇, 出版专著 2 部, 主编出版论文集 2 本。1997 年, 参加了在加拿大举行的“第十八届国际草场大会”, 作为专家先后对新西兰、澳大利亚、菲律宾和加拿大等国进行过考察;1998 年被甘肃省外经贸厅评为“双边援助先进工作者”;1999 年被武威市政府评为“科技兴区优秀专家”;2001 年被评为国务院特贴专家;2006 年被甘肃省人民政府聘为“甘肃省特聘科技专家”;同时被评为“十五”期间“甘肃省十大杰出科技人才”。

科研工作及获奖情况:

(1)主持联合国开发计划署援助中国项目“甘肃沙漠综合治理与持续农业”, 获甘肃省科技进步一等奖(排名 1);

(2)主持国家“九五”重大科技攻关项目“荒漠化土地治理技术与示范”, 获国家科技攻关计划优秀科技成果;

(3)主持国家自然科学基金项目“甘肃荒漠区珍稀濒危植物绵刺生理生态特性研究”, 获甘肃省科技进步二等奖(排名 1);

(4)参加国家自然科学基金项目“荒漠化发生机制与优化防治模式的研究”;

(5)主持省列项目“民勤绿洲农业可持续发展技术与示范”, 获甘肃省林业科技进步一等奖(排名 1);

(6)参加省列课题“民勤固沙林生态定位观测研究”, 获甘肃省科技进步二等奖(排名 6);

(7)1998 年获甘肃省外贸厅“多、双边技术援助先进工作者”称号;

(8)1999 年获甘肃武威地区“科技兴区优秀专家”称号;

(9)获得国务院政府特殊津贴;

(10)2006 年被甘肃省人民政府聘为“甘肃省特聘科技专家”;

(11)2006 年被评为“十五”期间“甘肃省十大杰出科技人才”。

李毅，男，汉族，中共党员。1983 年 7 月，毕业于甘肃农业大学林学系林学专业，获得农学学位。2002 年 6 月，毕业于甘肃农业大学草业科学院，获得博士学位。现为甘肃农业大学林学院教授、博士生导师，甘肃农业大学林学院院长。主要讲授“林木遗传学”、“林木育种学”及“园林植物遗传育种学”三门课程。

主要科研工作及获奖情况：

1983 年 9 月—1992 年 2 月，甘肃农业大学林学院助教。科研项目主要参加者，完成了由甘肃省科委下达“杨树花粉辐射杂交育种”、“河北杨良种选育”两项课题。其中“杨树花粉辐射杂交育种”获 1985 年甘肃省科技进步二等奖；“甘肃省河北杨基因资源调查及利用的研究”获 1991 年甘肃省林业科技进步一等奖、1992 年甘肃省科技进步三等奖。

1993 年 3 月—1997 年 5 月，甘肃农业大学林学院讲师。科研项目主要完成人，完成由甘肃省林业厅下达的“胡杨良种选育”和教委下达的“胡杨基因资源调查及无性繁殖技术的研究”等科研课题。1997 年，“胡杨基因资源及胡杨良种选育”获甘肃省科技进步三等奖。

1993 年 8 月—1996 年 10 月，参加中国——加拿大林业合作项目“中国陇南工厂化育苗”研究，进行苗木的快速繁殖与无土栽培技术的研究。1994 年 4 月赴加拿大进行“植物营养”和“计算机”专业技术培训，重点学习、研究植物生长发育过程中的营养需求与供应、营养分析、工厂化育苗的培养基质、无土培养等方面的理论基础和技术要点及计算机分析、操作技术。

1997 年 6 月—2002 年 9 月，任甘肃农业大学林学院副教授。主持国家自然科学基金项目“青海云杉天然群体遗传结构研究”、甘肃省林业厅“箭胡毛杨良种繁育技术及推广研究”和“甘肃省银杏基因资源收集、保存和利用的研究”、甘肃省教委“杨树种质资源生物技术保存方法的研究”等科研课题。其中，“箭胡毛杨良种繁育与推广”获得 2002 年甘肃省科技进步三等奖；“森林植物学及其相关课程教学建设与改革实践”获 1999 年度甘肃省教委教学成果三等奖。

2002 年 10 月—今，任甘肃农业大学林学院教授。主持国家自然科学基金项目“青海云杉天然群体遗传结构研究”、中国科学院“西部之光”资助项目“西北干旱区抗旱树种种质资源收集、保存及快繁的研究”、国家科技攻关计划

课题“西部生态种苗快繁技术开发”子项目“西北干旱区抗旱生态树种快繁技术研究”等课题。“杨树种质资源生物技术保存方法的研究”获得 2003 年甘肃省科技进步三等奖。