

基于风洞模拟试验的典型机械防沙工程防护效益对比

潘加朋^{1,2,3}, 张克存¹, 安志山^{1,2}, 张宏雪^{1,2,3}, 薛承杰^{1,2,3}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站,甘肃敦煌736200;
2.中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点试验室,兰州730000;3.中国科学院大学,北京100049)

摘要:为探究3种典型机械防沙工程措施实施后所体现的防护效益,通过风洞模拟试验,以敦煌黑山嘴地区的典型机械防沙工程为参考,对草方格与尼龙网格状沙障及阻沙栅栏的防风、固阻沙效益进行系统的对比分析。结果表明:草方格与尼龙网格状沙障的布设均能有效降低风速,当指示风速为20 m/s时,1.5 cm高度的风速降低率分别达到82.5%与80.9%,同时极大地增加流沙地表粗糙度,显著影响当地的风速变化;此外,两者在不同高度对风速削弱能力差异明显;草方格与尼龙网格状沙障也深刻影响当地风沙流结构,其中草方格沙障的固沙能力主要体现在近地表;阻沙栅栏前后平均输沙率降低44.2%,同时对当地流场结构影响深刻。综合分析可知,草方格与尼龙网格状沙障防风、固沙效益良好,阻沙栅栏阻沙效益显著。研究结果可为当地机械防沙工程建设提供指导,同时对其他地区防沙工程布设予以借鉴。

关键词:风洞试验;风沙治理;防护效益;敦煌

中图分类号:X171 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)06-0104-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.014

Comparative Analysis of Protective Benefits of Typical Mechanical Sand Control Projects Based on Wind Tunnel Simulation Experiment

PAN Jiapeng^{1,2,3}, ZHANG Kecun¹, AN Zhishan^{1,2}, ZHANG Hongxue^{1,2,3}, XUE Chengjie^{1,2,3}

(1. Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Dunhuang, Gansu 736200;
2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to explore the protection benefits of three typical mechanical sand control engineering measures after implementation, through wind tunnel simulation experiments, taking the typical mechanical sand control engineering in Heishanzui area of Dunhuang as a reference, the wind and solid sand resistance benefits of grass grid and nylon grid sand barrier and sand-blocking fence were systematically compared and analyzed. The results show that both grass grid and nylon grid sand barrier can effectively reduce the wind speed, when the indicate wind speed is 20 m/s, the wind reduction rates at 1.5 cm height reach 82.5% and 80.9%, meanwhile, the surface roughness of quicksand is greatly increased, which significantly affects the local wind speed. In addition, these two sand barriers have obvious differences in the ability to weaken the wind speed in different heights. The grass grid and nylon grid sand barrier also have significant influence on the local wind-sand flow structure, the sand-fixing ability of grass grid sand barriers is mainly reflected in the near surface. The average sediment transport rate before and after the sand barrier is reduced by 44.2 %, and it has a profound impact on the local flow field structure. Comprehensive analysis shows that the grass grid and nylon grid sand barrier have good windproof and sand-fixing benefits, and the sand-blocking fence has significant sand-blocking benefits. The research results can provide guidance for the construction of local mechanical sand control projects, and provide reference for the layout of sand control projects in other areas.

Keywords: wind tunnel test; sandy erosion control; protecting efficiency; Dunhuang

收稿日期:2023-03-31

资助项目:国家重点研发项目(2020YFA0608403-1);国家自然科学基金项目(42171083);甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA066)

第一作者:潘加朋(1999—),男,硕士研究生,主要从事风沙灾害与防沙工程研究。E-mail:panjiapeng@nieer.ac.cn

通信作者:张克存(1978—),男,博士,研究员,主要从事风沙灾害与风沙工程研究。E-mail:kecunzh@lzb.ac.cn

风沙活动主要指风沙地貌发育中的侵蚀、搬运和堆积过程,在此过程中造成的人畜伤亡、沙埋农田及牧场、大气环境恶化等直接导致区域风沙灾害^[1]。风沙灾害一直以来都是影响我国生态文明建设及社会经济发展的重要因素,近年来,随着全球气候变化与人类活动影响,我国风沙灾害风险显著提升,风沙治理工程也面临着严峻考验^[2-4]。风沙治理工程中的机械防沙工程,由于其防护效益较好、施工速度快且价格低廉,已在实际工程中得到广泛普及^[5-7]。现有研究已在机械防沙工程的防护特征、效益评价等方面有较为深入的了解,席成等^[8]对乌兰布和沙漠穿沙公路所布设的高立式尼龙网格状沙障防护特征研究发现,在不同风能环境下其有效防护距离差异显著;石涛等^[9]对库布齐沙漠光伏电站内芦苇沙障研究发现,其有效降低近地表风速,对风沙流拦截作用明显;董智等^[10]通过风洞模拟试验研究发现,不同规格的土工格栅沙障积沙效应随孔隙度增大而减小;张帅等^[11]利用风洞试验对硬质地 HDPE 沙障防风效益研究表明,其防风效果与高度呈正相关,而孔隙度则与之相反。上述研究中,对机械沙障防护效益评价主要通过野外观测与风洞试验来实现,但目前野外观测局限性较大,易受环境影响^[8-9,12],而传统的风洞试验设计仅考虑机械沙障自身性质,未以具体工程为参考^[10-11],模拟结果缺少针对性。故以敦煌黑山嘴地区典型机械防沙工程为参考设计风洞试验,从而对3种典型机械防沙工程防护效益进行系统的对比分析。

黑山嘴位于敦煌绿洲的西南角,南接鸣沙山,北邻党河,为典型的沙漠—绿洲过渡带,也是敦煌绿洲南缘重要的风沙口^[13]。其地表类型以流沙为主,盾状沙丘和沙饼零星分布其间,区域南侧沙漠腹地金字塔沙丘广布,为风沙灾害的发育提供丰富沙源。由于黑山嘴境内大风天气频繁且风沙活动强烈,当地生态环境遭到严重破坏。为遏制当地风沙灾害发展,黑山嘴进行大规模风沙治理,主要措施包括草方格与尼龙网格状沙障、阻沙栅栏及人工种植植被,植被以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)为主。具体布设方式为在区域南侧流动沙丘设置草方格与尼龙网格状沙障,中部平坦流沙地以人工种植梭梭为主,区域北侧设置6道60 cm高度阻沙栅栏,中间阻沙带宽为18 m,同时在阻沙带内撒播骆驼刺种子。经过多年治理后,黑山嘴的生态环境得到一定恢复,各类机械沙障防护效益显著。

基于此,依据黑山嘴自然条件及机械防沙工程,通过风洞模拟试验对3种典型机械防沙工程措施(即草方格、尼龙网格状沙障与阻沙栅栏)的防风、固阻沙效益进行对比分析,以期为当地机械防沙工程建设提

供指导,同时为其他地区防沙工程的布设予以借鉴。

1 材料与方法

试验在中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室的野外环境风洞进行,该风洞试验段长21 m,横断面为1.2 m×1.2 m(图1)。试验模型参考敦煌黑山嘴地区野外机械防沙工程,根据研究区环境条件,当地主要通过布设草方格、尼龙网格状沙障及阻沙栅栏以实现风沙灾害防治。为确保沙障模型在风洞中能再现黑山嘴地区大气边界层与风沙流的运动特征,试验需满足几何相似与动力相似,其中,几何相似指模型与原型间保持一定缩尺比,动力相似指两者对应点上表征力的物理参数相同^[14]。试验中沙障模型采用原型材料,将1.0 m×1.0 m草方格、尼龙网格状沙障以1:1的缩尺比在流沙地表依次设置7个网格,间距为1.0 m;孔隙度为40%,高度为0.6 m阻沙栅栏则按1:5的缩尺比进行布设。同时,根据各沙障间差异对草方格及尼龙网格状沙障分别选取8,12,16,20 m/s的4组指示风速,对阻沙栅栏选取8,10,12,14,16,18,20 m/s的7组指示风速进行分析,最大程度满足试验相似条件,确保试验结果能准确反映黑山嘴实际工况的防风及固阻沙效益。

为保证试验所采集数据准确可靠,依据试验当时气象条件,使用数字式微压差计系统对进出口风速进行调节,并通过“X”型防沙毕托管对风速进行观测,其中,风速观测点则依次设置在距试验床面1.0,1.5,3.0,6.0,12.0,20.0,35.0,50.0 cm的8个高度且采样间隔时间为2 s,测量时,将其与压力传感器相连,利用数据采集仪直接储存到微机上;输沙量则采用集沙仪进行量测,布设在洞体中央距一侧60 cm处,同时,对草方格沙障、尼龙网格状沙障与阻沙栅栏的输沙量采用不同规格的集沙仪进行量测,2种集沙仪入口断面分别为1.0 cm×0.5 cm和2.0 cm×2.0 cm。

试验使用外来风沙进行供给,为保证试验结果能准确模拟各工程在敦煌黑山嘴当地的防护效益,试验沙样选取当地所采集的天然沙样,并在每次更换试验材料时,保证各仪器位置不变;不同沙障在各风速下试验结束后,重新对沙面进行布置,确保沙源充足。

对草方格、尼龙网格状沙障2种措施防风效益的评价通过风速廓线及其参数、防风效能来反映,而草方格、尼龙网格状沙障与阻沙栅栏3种措施的固阻沙效益则通过其输沙量、输沙率在不同高度分布情况来判断。其中,防风效能指在相同条件下对环境及其在工程措施作用下进行风洞模拟试验后所测得的风速,通过环境风速与工程措施下风速的差值与环境风速的比值进行计算,具体公式为:

$$K = \frac{U_{\text{环境}} - U_{\text{工程}}}{U_{\text{环境}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为防风效能(%); $U_{\text{环境}}$ 、 $U_{\text{工程}}$ 为同一高度流沙地表与工程措施下风洞试验所测得的平均风速(m/s)。

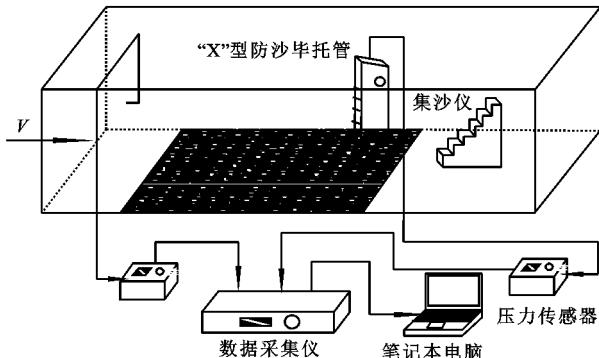


图1 风洞试验布设示意

2 结果与分析

2.1 2种措施的防风效益

2.1.1 草方格沙障 风速廓线变化趋势与沙障防风效益高度相关,对各指示风速下流沙地表及其在草方格沙障作用下各高度风速测量值进行拟合,拟合系数均 >0.8 ,表明两者风速沿高度变化均符合对数分布规律(图2)。不同指示风速下同一高度层草方格沙障作用下的风速明显小于流沙地表,当指示风速为8 m/s时,1.5 cm高度流沙地表风速为4.155 m/s,而在草方格沙障作

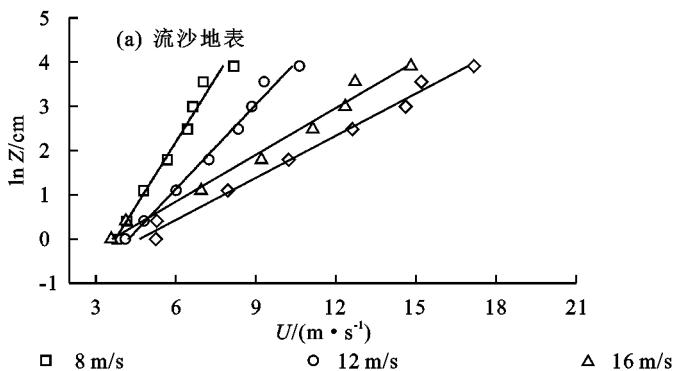


图2 流沙与草方格沙障近地表风速廓线

表1 流沙地表及其在草方格沙障作用下拟合的风速廓线方程、粗糙度及摩阻速度

风速/ (m·s⁻¹)	流沙				草方格沙障		
	风速廓线拟合方程(R^2)	Z_0/cm	$U_*/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风速廓线拟合方程(R^2)	Z_0/cm	$U_*/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
8	$\ln Z = -3.494 + 0.947U(0.976)$	0.030	0.422	$\ln Z = 0.495 + 0.442U(0.826)$	1.640	0.905	
12	$\ln Z = -2.634 + 0.629U(0.988)$	0.072	0.636	$\ln Z = 0.665 + 0.304U(0.881)$	1.944	1.316	
16	$\ln Z = -1.220 + 0.347U(0.984)$	0.295	1.153	$\ln Z = 0.639 + 0.236U(0.917)$	1.895	1.695	
20	$\ln Z = -1.440 + 0.314U(0.989)$	0.237	1.247	$\ln Z = 0.401 + 0.213U(0.943)$	1.493	1.878	

注: R^2 为风速廓线拟合方程的拟合系数; Z_0 为地表粗糙度(cm); U_* 为摩阻速度(m/s)。下同。

2.1.2 尼龙网格状沙障 对各指示风速下流沙地表及其在尼龙网格状沙障作用下的风速廓线分析(图3)可知,在一定指示风速下其风速测量值随高度变化存在明显差异,且拟合系数均 >0.85 ,表明两者在各

高度下其风速仅为 0.631 m/s,降低 84.8%;当指示风速为 20 m/s 时,1.5 cm 高度风速降低率达 82.5%,其布设有效降低流沙地表风速。

进一步对风速廓线方程分析(表1)可知,流沙地表在草方格沙障作用下风速增长率明显下降,可见草方格沙障布设不仅有效削弱下垫面风速,同时也对风速变化产生显著影响。根据风速廓线方程 $\ln Z = a + bU$,通过 $Z_0 = \exp^{(a)}$ 与 $U_* = k/b$ (k 为冯卡门常数,一般取 0.4)可求得各指示风速下流沙地表及其在草方格沙障作用下地表粗糙度(Z_0)与摩阻速度(U_*)。结果表明,在草方格沙障作用下,地表粗糙度随指示风速增加呈先上升后下降趋势,当指示风速为 12 m/s 时,地表粗糙度最大,为 1.944 cm,相同条件下流沙地表粗糙度仅为 0.072 cm,增长率高达 2 600%;而草方格沙障作用下摩阻速度表现为随指示风速增加呈上升趋势,当指示风速为 20 m/s 时,其上升至 1.878 m/s,相较于流沙地表增加近 0.48 倍,大幅降低风沙流对地表的侵蝕能力,有效提升流沙地表抗风蚀能力。

综上分析,草方格沙障布设深刻影响流沙地表气流场,导致其风速显著降低,风速增长率明显下降。同时,其大规模布设也大大提高流沙地表粗糙度,使其风沙活动量远低于流沙地表,进而再黑山嘴表现出良好的防风效益^[15]。

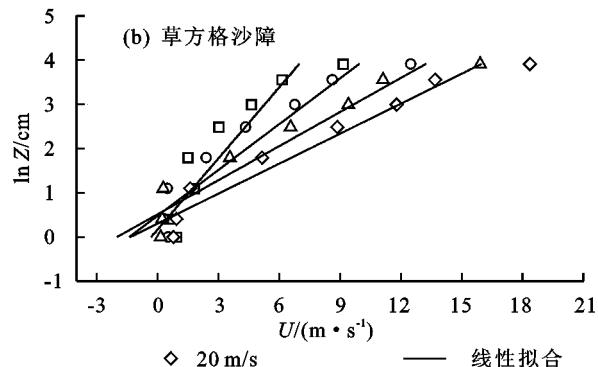


图2 流沙与草方格沙障近地表风速廓线

高度内风速变化均符合对数分布规律。两者风速均随指示风速增加而呈上升趋势,且流沙地表在尼龙网格状沙障作用下同一高度层风速均明显降低。当指示风速为 8 m/s 时,1.5 cm 高度流沙地表风速为

4.155 m/s,而其在尼龙网格状沙障作用下风速仅为1.631 m/s;当指示风速为20 m/s时,1.5 cm高度风速则降低80.9%,尼龙网格状沙障布设有效阻挡风沙流运移过程,大幅降低地表的风速,但相较于草方格沙障,其对地表风速削弱作用较低,对风速大小及变化幅度影响也均小于草方格沙障。

根据两者风速廓线方程求出其他地表粗糙度与摩阻速度(表2),结果表明,当指示风速逐渐增加时,尼龙网格状沙障作用下地表粗糙度变化趋势波动幅度较大,在指示风速为8 m/s时达到最大值0.79 cm;而其摩阻速度

则随指示风速增加明显上升,在指示风速为20 m/s时达到最大值1.556 m/s,相较于流沙地表增加0.25倍。与草方格沙障作用下地表粗糙度与摩阻速度相比,尼龙网格状沙障作用下两者增加幅度均较小,但仍能对流沙地表风速大小及其变化产生显著影响。

由此可见,尼龙网格状沙障的布设能有效增大下垫面地表粗糙度与摩阻速度,进而增强其对风速的削弱作用,防风效益显著^[16]。但相较于草方格沙障,其粗糙度增大幅度较小且成本较高,应根据环境适当调整布设规模,与草方格沙障综合使用以达到最佳防风效益。

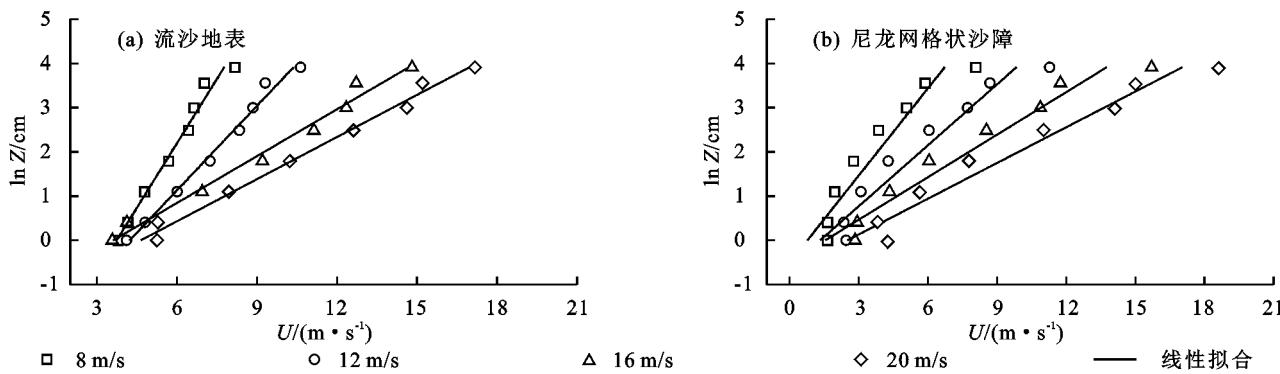


图3 流沙与尼龙网格状沙障近地表风速

表2 流沙地表及其在尼龙网格状沙障作用下拟合的风速廓线方程、粗糙度及摩阻速度

风速/ (m·s⁻¹)	流沙				尼龙网格状沙障		
	风速廓线拟合方程(R^2)	Z_0/cm	$U_*/(m·s^{-1})$	风速廓线拟合方程(R^2)	Z_0/cm	$U_*/(m·s^{-1})$	
8	$\ln Z = -3.494 + 0.947U(0.976)$	0.030	0.422	$\ln Z = -0.236 + 0.587U(0.894)$	0.790	0.681	
12	$\ln Z = -2.634 + 0.629U(0.988)$	0.072	0.636	$\ln Z = -0.422 + 0.427U(0.930)$	0.656	0.937	
16	$\ln Z = -1.220 + 0.347U(0.984)$	0.295	1.153	$\ln Z = -0.354 + 0.302U(0.944)$	0.702	1.325	
20	$\ln Z = -1.440 + 0.314U(0.989)$	0.237	1.247	$\ln Z = -0.552 + 0.257U(0.935)$	0.576	1.556	

2.1.3 2种措施的防风效能 防风效能是评估机械防沙工程防风效益的重要指标,对草方格与尼龙网格状沙障的防风效能分析(表3)可知,2种措施均能有效降低地表风速,当指示风速为8 m/s时,1.5 cm高度草方格沙障防风效能达到84.82%,除此高度外,其余高度防风效能均随着指示风速增大而逐渐降低,当高度达到50 cm时,草方格沙障防风效能已减小至-7.42%,无法有效降低地表风速;当指示风速为8 m/s时,1.5 cm高度尼龙网格状沙障防风效能为60.75%,随着高度增加,防风效能均随着指示风速增大呈递减趋势。

总体来说,2种措施防风效能均表现为在一定指示风速下随高度增加而降低,但当高度一定时,两者防风效能则随指示风速变化表现出明显差异,1.5 cm高度草方格沙障防风效能先上升后下降,而50 cm高度尼龙网格状沙障在各指示风速下其防风效能则明显优于草方格沙障;草方格沙障在近地表对风速的削弱能力显著,而尼龙网格状沙障在距地表50 cm及以上降低风速能力已明显强于草方格沙障。两者布设虽均能体现良好的防风效能,但其对风速大小削弱高度及程度仍存在较大差异,使得草方格沙障在黑山嘴的防风效益整体上优于尼龙网格状沙障。

表3 不同机械防沙工程的防风效能

指示风速/ (m·s⁻¹)	1.5 cm 高度防风效能/%		6 cm 高度防风效能/%		20 cm 高度防风效能/%		50 cm 高度防风效能/%	
	草方格	尼龙网格状	草方格	尼龙网格状	草方格	尼龙网格状	草方格	尼龙网格状
	沙障	沙障	沙障	沙障	沙障	沙障	沙障	沙障
8	84.82	60.75	73.72	51.12	30.33	23.57	-11.98	1.11
12	93.52	51.15	66.90	40.89	23.62	12.74	-17.31	-3.03
16	84.71	29.01	61.22	34.22	23.86	11.87	-7.42	-6.06
20	82.48	27.73	49.63	23.54	19.34	3.43	-6.96	-8.57

2.2 3种措施的固阻沙效益

在典型机械防沙工程中,固沙、阻沙是遏制风沙灾害发展的主要途径,前者指对流沙进行固定,后者则表示对过境的风沙流进行阻滞、拦截,两者差异明显。故根据3种措施自身特征,本研究分别对草方格、尼龙网格状沙障及阻沙栅栏的固阻沙效益进行对比分析^[14,17]。

2.2.1 草方格沙障 图4a、图4b为流沙地表及其在草方格沙障作用下输沙率沿高度的变化,对其分析可知,当指示风速低于12 m/s时,两者输沙率随高度变化并无明显差异,固沙效益不明显;当指示风速高于16 m/s时,流沙地表各高度输沙率在草方格沙障作用下差异显著,流沙地表输沙率主要集中在距地表10 cm高度内,且随高度上升迅速减小,而在草方格沙障作用下,输沙率在距地表20 cm高度迅速增加后基本保持不变。整体来看,草方格沙障作用下输沙率变化随指示风速增加变化剧烈,波动明显,20 m/s时其输沙率减小27.89 g/(cm²·min),固沙效益明显。

进一步对两者输沙量累计百分含量分析(图5)可知,各指示风速下流沙地表输沙量均集中分布在20 cm高度后保持不变;在草方格沙障作用下,除指示风速为8 m/s时,输沙量均匀分布在各高度,其余各指示

风速下输沙量均在距地表20 cm高度内保持不变,而后迅速增加,表明其对风沙流阻碍作用均集中在近地表,在距地表20 cm高度内固沙能力显著,对当地风沙流结构影响深刻。而草方格沙障主要是通过增大地表粗糙度以降低风速,从而削弱气流挟沙能力,使其与流沙地表输沙率、输沙量随高度变化均出现明显差异^[18-19]。由此可知,大规模布设草方格沙障能有效减少流沙地表输沙率与输沙量,使其分布特征差异明显,同时,对风沙流迁移过程起到良好抑制作用。

2.2.2 尼龙网格状沙障 分析流沙地表及其在尼龙网格状沙障作用下输沙率沿高度变化(图4)可知,各指示风速下流沙地表在尼龙网格状沙障作用下平均输沙率明显降低,当指示风速为20 m/s时其变化最为明显,输沙率范围从0.64~40.57 g/(cm²·min)减少至1.44~5.30 g/(cm²·min)。从输沙率变化曲线来看,两者均表现为先上升后下降趋势,且其变化幅度随指示风速增加而增大。当指示风速为20 m/s时差异最为显著,表现为流沙地表输沙率主要在距地表10 cm高度内呈上升趋势,而其在尼龙网格状沙障作用下此高度增加至20 cm,但输沙率却大幅降低,极大地阻碍风沙流对沙粒迁移过程并深刻影响流沙地表输沙率的变化情况。

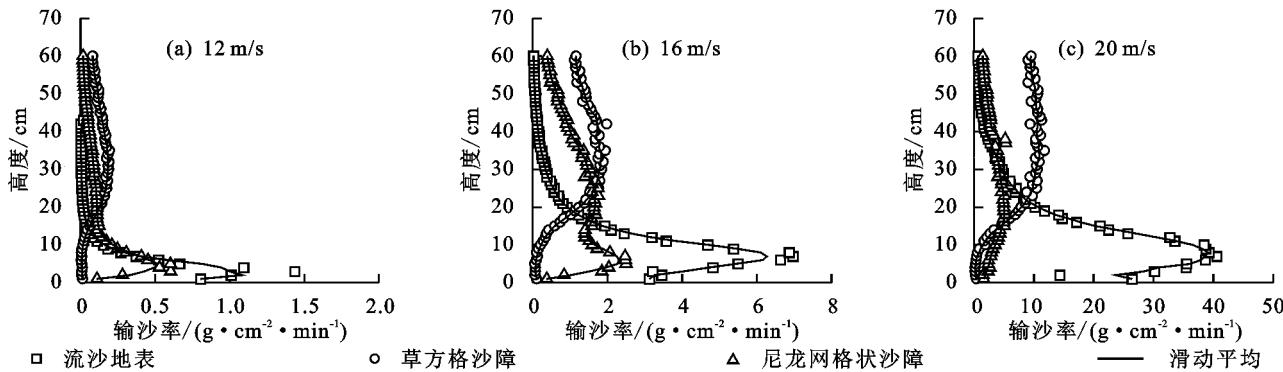


图4 各指示风速下流沙地表及沙障作用下输沙率沿高度变化

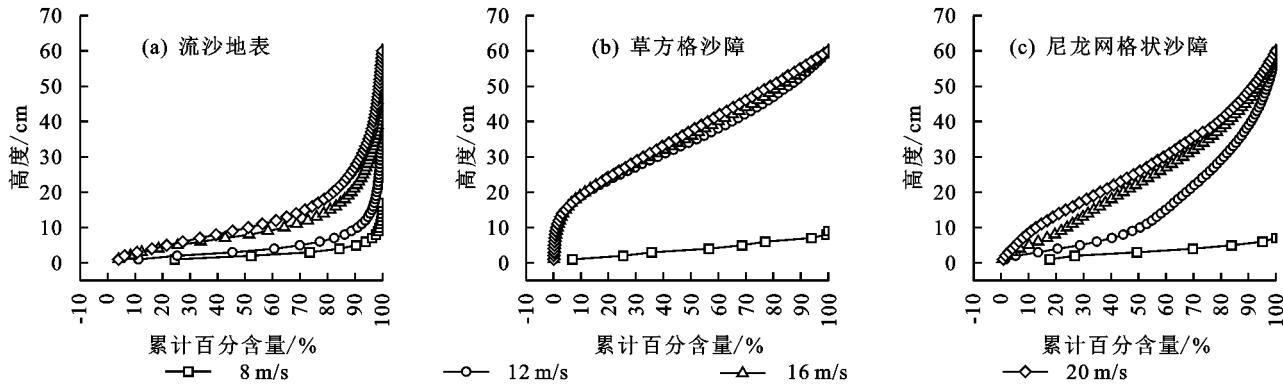


图5 流沙地表及沙障作用下输沙量累计百分含量

同样,两者输沙量累计百分含量也表现出较为明显差异(图5a,图5c):除指示风速8 m/s时尼龙网格状沙障作用下输沙量在距地表10 cm高度内迅速上升,其余指示风速下均表现为随高度增加近似均匀分布,而流沙地表输沙量主要集中在距地表30 cm高度

内,表明尼龙网格状沙障布设使流沙地表风沙流结构发生较大改变,分布特征出现明显差异,深刻影响一定高度内风沙流结构,很大程度上削弱风沙流对流沙地表侵蚀能力,固沙效益显著。

2.2.3 阻沙栅栏 对阻沙栅栏前后输沙率沿高度变

化分析(图6)可知,其变化趋势在各指示风速范围内差异明显,当指示风速低于12 m/s时,栅栏前后输沙率随高度变化差异较小;而当指示风速高于12 m/s时,栅栏前后输沙率差异明显,栅栏前输沙率整体呈下降趋势,栅栏后则与之相反。随着指示风速增大,两者间差异更加显著;当指示风速为12 m/s时,栅栏前输沙率在2~4 cm高度迅速下降后保持不变,栅栏后输沙率则在14~20 cm高度迅速上升;当指示风速为20 m/s时,栅栏前输沙率在2~20 cm高度表现为随高度减少,而同高度栅栏后输沙率变化则呈完全相反趋势,但其输沙率大小也明显下降,相较于阻沙栅栏前平均输沙率从126.42 g/(cm²·min)降低至

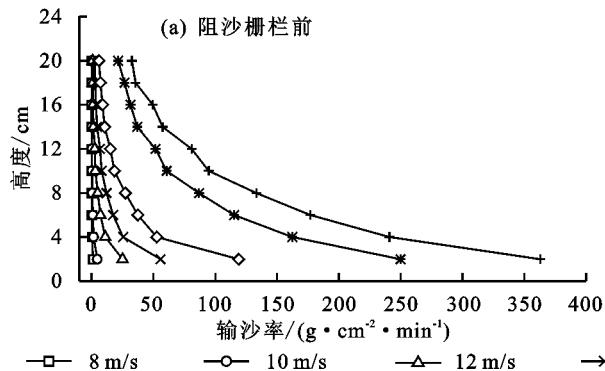


图6 阻沙栅栏前、后输沙率沿高度的变化

70.57 g/(cm²·min),降低44.2%,阻沙效益显著。

由图7可知,各指示风速下阻沙栅栏前输沙量累计百分含量也表现出明显差异,栅栏前输沙量累计百分含量随高度上升而增加,且随指示风速变化而在近地表差异明显,当指示风速为8 m/s时,2 cm高度栅栏前输沙量累计百分含量为66.58%,而其在同高度、指示风速为20 m/s时,仅为28.7%,整体呈随风速增加而减小趋势。而栅栏后的输沙量累计百分含量在各高度、各指示风速下均无明显差异,表明阻沙栅栏对当地风沙流阻碍作用明显,对当地风沙流结构影响深刻。因此,黑山嘴北侧所布设的阻沙栅栏能有效阻碍风沙流迁移过程,加之在其阻沙带间撒播骆驼刺,阻沙效益更为显著。

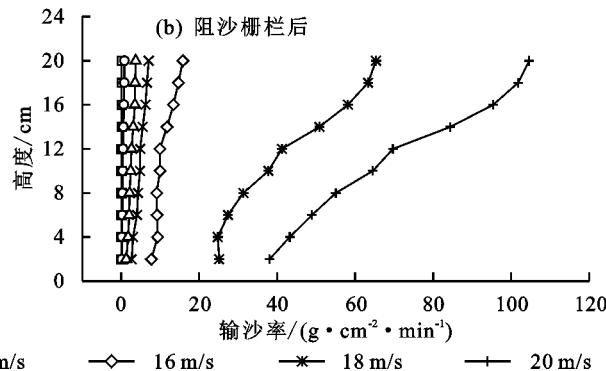


图6 阻沙栅栏前、后输沙率沿高度的变化

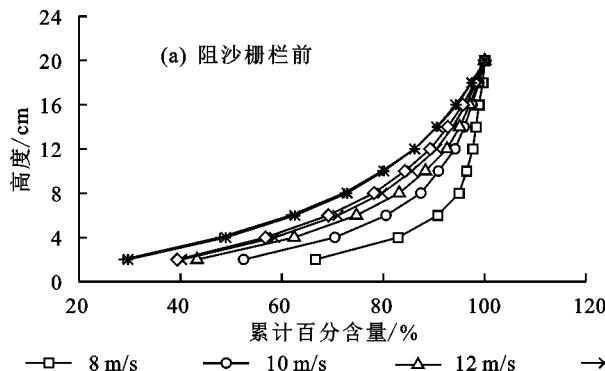
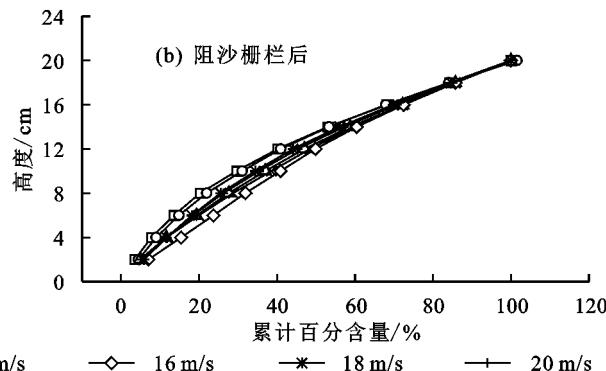


图7 阻沙栅栏前、后的输沙量累计百分含量



3 讨论

机械防沙工程是风沙治理的主要措施之一,其主要通过影响当地流场特性、风沙流结构等以实现良好的防风及固阻沙效益^[20-21]。敦煌黑山嘴机械防沙措施以草方格与尼龙网格状沙障、阻沙栅栏以及人工种植植被为主。通过风洞试验发现,草方格与尼龙网格状沙障均通过增大地表粗糙度以降低风速,从而对当地风沙流结构产生深刻影响,使得流沙地表在两者作用下其输沙率明显降低,与黎小娟等^[22]研究结果一致。尼龙网格状沙障的布设使得研究区当地近地表输沙率垂直分布特征明显改变,并表现出先增后减趋势。此外,由于2种沙障自身材料等差异,草方格沙障防风固沙效益主要体现在近地表,而尼龙网格状沙障则在较高处防护效益优于草方格沙障,故在机械防

沙工程建设中应结合当地地形按一定间距交错布设,地形起伏同样对其防护效益产生重要影响^[23]。本研究中,阻沙栅栏对风沙流阻碍明显,栅栏前后输沙率、输沙量在各指示风速下的分布均差异显著。张克存等^[24]在对青藏铁路沿线阻沙栅栏流场结构分析后发现,布设阻沙栅栏能有效阻截沙源,成效良好。而本试验中,阻沙栅栏后输沙率、输沙量分布均符合风沙流在其集流加速区与减速沉降区的运移特征,表明其阻沙效益良好,有效遏制当地的风沙活动。

风洞试验是评价机械防沙工程防护效益的重要途径之一,其对实际防沙工程的设计、建设有着重要的参考意义。当前,对机械沙障防护效益评价的方式仍以野外观测与风洞试验为主,但野外观测易受环境条件限制,风洞试验又多集中于研究机械沙障自身性质对其防

护效益的影响,忽视其布设环境、合理配置等因素,且存在与野外实际情况不一致的风险。本研究以敦煌黑山嘴布设机械防沙工程为参考设计风洞试验,根据当地环境控制试验参数,对其布设3种典型机械防沙措施进行系统的对比分析,研究结果均与野外观测相一致^[22,24],表明风洞试验可有效模拟黑山嘴环境,结论可信。本研究在对研究区内机械防沙措施防护效益进行系统对比分析的基础上,不仅针对性地为当地机械防沙工程建设提供数据基础、设计参考及评价模式,同时也为其他地区防沙工程建设予以借鉴。

4 结 论

(1)草方格与尼龙网格状沙障布设大大增加流沙地表粗糙度,对风速削弱作用显著,当指示风速为20 m/s时,两者作用下1.5 cm高度风速降低率分别达82.5%,80.9%;在对两者防风效能进行分析后发现,其在不同高度对风速削弱能力差异明显,在不同高度防风效益差异显著。草方格与尼龙网格状沙障布设也导致地表输沙率及输沙量沿高度分布差异明显。当指示风速为20 m/s时,两者输沙率主要在距地表20 cm高度内先增加后稳定不变或呈下降趋势,而流沙地表则表现为在距地表10 cm高度内先增加后迅速减小;两者输沙量分布也出现明显分异,其中,草方格沙障固沙能力集中体现在近地表,而尼龙网格状沙障则在各高度固沙效益均较为显著。此外,阻沙栅栏前后输沙率、输沙量差异明显,当指示风速为20 m/s时,其平均输沙率降低44.2%,深刻影响当地的流场结构,阻沙效益良好。

(2)草方格与尼龙网格状沙障及阻沙栅栏的布设虽均起到良好的防风及固阻沙效益,但3种机械防沙措施间防护效益仍存在明显差异。风洞试验表明,草方格、尼龙网格状沙障以防风、固沙为主,且前者近地表防护效益明显优于后者,而阻沙栅栏则以阻截风沙流运移过程为主。对今后风沙治理工程设计与调整具有重要指导意义,其布设模式等亦可直接应用于敦煌黑山嘴机械防沙工程建设中。

参考文献:

- [1] 史培军,严平,袁艺.中国北方风沙活动的驱动力分析[J].第四纪研究,2001,21(1):41-47.
- [2] 刘燕燕,孙桂丽,吉小敏,等.2000—2020年博尔塔拉蒙古自治州沙漠化风险评价[J].水土保持通报,2022,42(3):66-73.
- [3] 王旭,王昀,陈宝欣,等.塔里木盆地风沙灾害强度和频次的时空分布特征[J].干旱区地理,2021,44(6):1590-1600.
- [4] 张志伟,杨发相,吴吉龙,等.新疆沙漠空间分布格局与类型结构[J].干旱区研究,2014,31(4):763-770.
- [5] 郑延录.南疆戈壁区机械防沙措施阻沙效益的风洞测试研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):892-900.
- [6] 朱泊年,党晓宏,蒙仲举,等.乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障防风固沙效益[J].水土保持研究,2023,30(2):431-437.
- [7] 王睿,周立华,陈勇,等.库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J].干旱区研究,2017,34(2):330-336.
- [8] 席成,左合君,王海兵,等.高立式尼龙网沙障防风阻沙特征及其合理配置[J].干旱区研究,2021,38(3):882-891.
- [9] 石涛,蒙仲举,崔向新,等.库布齐沙漠光伏电站内芦苇沙障的防风固沙效益[J].水土保持通报,2020,40(5):166-171.
- [10] 董智,李红丽,汪季,等.土工格栅沙障防风积沙效应风洞模拟实验[J].中国水土保持科学,2007,5(1):35-39.
- [11] 张帅,丁国栋,高广磊,等.硬质地HDPE沙障防风效益的风洞试验[J].北京林业大学学报,2020,42(3):127-133.
- [12] Zhang C L, LI Q, ZHOU N, et al. Field observations of wind profiles and sand fluxes above the windward slope of a sand dune before and after the establishment of semi-buried straw checkerboard barriers[J]. Aeolian Research, 2016, 20(1): 59-70.
- [13] 安志山,张克存,谭立海.沙漠—绿洲过渡带风沙活动特征:以敦煌黑山嘴地区为例[J].中国沙漠,2016,36(6):1653-1658.
- [14] 刘贤万.实验风沙物理与风沙工程学[M].北京:科学出版社,1995.
- [15] 马小明,吕萍.3种典型地表风沙流通量廓线研究现状[J].中国沙漠,2016,36(2):302-306.
- [16] 魏翔鸿,左合君,闫敏,等.尼龙网方格沙障防风效应复变规律[J].干旱区研究,2019,36(6):1584-1591.
- [17] 石麟,李红悦,赵雨兴,等.毛乌素沙地流动沙丘不同沙障组合措施的防风固沙效益评价[J].干旱区研究,2023,40(2):268-279.
- [18] 吴启东.浅析草方格沙障措施在防风固沙中的作用[J].农技服务,2014,31(11):20.
- [19] 刘姝颖,李宁,陆小辉.草方格在防风固沙工程中的应用[J].辽宁林业科技,2014(3):67-68.
- [20] 孙涛,刘虎俊,朱国庆,等.3种机械沙障防风固沙功能的时效性[J].水土保持学报,2012,26(4):12-16,22.
- [21] 丁新辉,刘孝盈,刘广全.我国沙障固沙技术研究进展及展望[J].中国水土保持,2019(1):35-37,69.
- [22] 黎小娟,李宁,周智彬,等.尼龙网方格沙障的风沙流颗粒分布特征[J].水土保持学报,2016,30(5):128-134.
- [23] 马学喜,王海峰,李生宇,等.两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比[J].水土保持通报,2015,35(3):344-349.
- [24] 张克存,屈建军,姚正毅,等.青藏铁路格拉段风沙危害及其防治[J].干旱区地理,2014,37(1):74-80.