

猫头刺盾状移动式固沙障防沙效应风洞模拟试验研究

陆文赋¹, 屈建军^{1,2}, 赵爱国², 朱志昊¹, 王磊¹, 李敏岚², 孟晨¹

(1.宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 2.中国科学院
西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 猫头刺盾状移动式固沙障是运用仿生学原理,由盾状铁网筛与上方扎制固沙灌木猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)茎叶构成的一种新型固沙障。对猫头刺盾状移动式固沙障的防风固沙效应进行试验,以确定最佳固沙障类型,并揭示其防风固沙机理,为野外工程防沙措施的选择和制定提供理论依据。[方法] 通过风洞模拟试验,在6,10,14,18 m/s 4个风速条件下测量了猫头刺盾状移动式固沙障的风速流场,并在10,14,18 m/s 3个风速条件下对该固沙障进行了携沙风吹蚀试验。对照分析了原位自然型与不同类型,不同大小仿生猫头刺盾状移动式固沙障的防风沙效应。[结果] ①气流在经过猫头刺盾状移动式固沙障时速度均会减弱,形成明显的减速区。在6 m/s时,减速沉降区均达到了20 H(H为沙障高度,H=11 cm);随着风速增加,减速沉降区缩小。风速10与14 m/s时,减速沉降区为15 H;且在风速18 m/s时,也能维持15 H的减速沉降区。②3种风速梯度下,猫头刺盾状移动式固沙障的平均输沙量是无沙障的13.8%(10 m/s风速),21.1%(14 m/s风速),23.4%(18 m/s风速)。[结论] 结构完整,直径更大的猫头刺盾状移动式固沙障具有最好的防风沙效果。该移动式仿生固沙障防风沙效果好,可移动,可组合并可机械化编制,在防治荒漠化、防风固沙领域有广阔的应用前景。

关键词: 风洞模拟; 猫头刺; 盾状; 移动式固沙障; 流场; 风速廓线

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0084-09

中图分类号: S288, U216.41⁺3

文献参数: 陆文赋, 屈建军, 赵爱国, 等. 猫头刺盾状移动式固沙障防沙效应风洞模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 84-92. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240628.002; Lu Wenfu, Qu Jianjun, Zhao Aiguo, et al. Wind tunnel simulation experimental study on sand fixation effects of shield-shaped movable sand barriers made with *Oxytropis aciphylla* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 84-92.

Wind Tunnel Simulation Experimental Study on Sand Fixation Effects of Shield-shaped Movable Sand Barriers Made with *Oxytropis Aciphylla*

Lu Wenfu¹, Qu Jianjun^{1,2}, Zhao Aiguo², Zhu Zhihao¹, Wang Lei¹, Li Minlan², Meng Chen¹

(1.School of Ecology and Environment, Ningxia University,
Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2.Northwest Institute of Eco-environment
and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The shield-shaped movable sand barrier is a new type of sand fixation barrier. The barrier is made according to bionic principles and composed of a shield-shaped iron mesh screen supporting the stems and leaves of the sand fixation shrub, *Oxytropis aciphylla*. The sand fixation effects of shield-shaped movable sand barriers were determined to choose the optimized type of sand fixation barrier to reveal the wind break and sand fixation mechanisms of shield sand barriers, in order to provide theoretical references for the selection and formulation of sand control measures in field projects. [Methods] A wind tunnel simulation experiment was conducted. The wind speed and flow field of the shield-shaped sand fixation barrier were measured at four wind speeds of 6, 10, 14, and 18 m/s. The wind erosion experiments were conducted on the sand fixation barriers at three wind speeds of 10, 14, and 18 m/s. Comparative analysis was conducted on the windbreak and sand fixation effects of in-situ natural and different size bionic barriers.

收稿日期: 2023-02-12

修回日期: 2023-12-22

资助项目: 宁夏回族自治区 2022 年重点研发计划项目“刷状网绳式系列草方格编织与微生物撒播智能化协同装备研发及试验示范”(2022BEG02003); 中科院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程专项沙漠边缘扩张带稳固技术与示范”(XDA23060201)

第一作者: 陆文赋(1998—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化治理。Email: 12020130852@stu.nxu.edu.cn。

通信作者: 屈建军(1959—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 研究员, 主要从事风沙防治工程、沙漠环境方面的研究。Email: qujianj@lzb.ac.cn。

[Results] ① When the airflow passed through the shield-shaped movable sand fixation barrier, its velocity weakened, forming a significant deceleration zone. At 6 m/s, the deceleration settlement zone reached 20 H (H means the height of barriers, $H=11$ cm). As wind speed increased, the deceleration settlement zone decreased. At 10 and 14 m/s wind speed, the deceleration settlement zone was 15 H . At 18 m/s wind speed, the barrier also maintained a deceleration settlement zone of 15 H . ② Under the three wind speeds, the average sediment transport capacity of the new type of shield-shaped movable sand fixation barrier was 13.8% (10 m/s wind speed), 21.1% (14 m/s wind speed), and 23.4% (18 m/s wind speed) of the sediment transport capacity without sand barriers. [Conclusion] The shield-shaped movable sand fixation barrier with a complete structure and a largest diameter had the best wind and sand prevention effect. The shield-shaped movable bionic sand fixation barrier had good wind and sand prevention effects, and can be moved, combined, and mechanically woven. It has a broad application potential in the field of desertification prevention, and wind and sand fixation.

Keywords: wind tunnel simulation; *Oxytropis aciphylla*; shield-shaped; movable sand fixation barrier; flow field; wind profile

中国关于的沙障研究主要聚焦于在沙漠治理^[1]、植物固沙^[2]、风洞^[3]和数值模拟^[4]、沙障自动铺设机^[5]等方面。而水土保持^[6]、风速流场^[7]、输沙量^[8]、防沙治沙措施^[9]、防沙新材料、新技术等则为近年来的研究热点^[10]。麦草沙障作为推广范围最大,最典型的机械固沙措施,防沙效果显著,愈来愈被沙区群众接受,并取得了巨大防沙效益。但由于近年来麦草材料价格升高,而需求量却逐年增大,导致防沙材料供应量出现较大缺口。一些代替麦草的材料如玉米、葵花(*Helianthus annuus*)、芦苇(*Phragmites australis*)、沙柳等枝条和石块等制成的沙障相继出现,其防风固沙效益也得到了广泛报道^[11]。但是,这些材料因受来源、环境、材料价格、运输成本、施工便利性等影响,其防护效果不一,且存在诸多不利因素。例如,黏土沙障成本较低但是防风固沙效果较差。麦草沙障虽在布设初期防风固沙效果好,却又有作用年限短成本较高的缺点。因此,传统的机械固沙材料需要拓展,人工仿生材料应运而生。如塑料固沙网、尼龙固沙障、羽翼袋沙障、HDPE 功能性固沙网等。为了满足环境保护与生物可降解的需求,先后设计生产了聚乳酸(PLA)固沙袋和 PLA 固沙网格沙障^[12-14]。值得注意的是,以草方格为首的沙障代表的是辅助的、过渡的机械固沙措施,而植物固沙才是主要的、长远的、有生命的沙障。然而,恶劣的自然环境,尤其是剧烈的风沙活动,导致直接栽种固沙植物不易成活。故而,模仿固沙灌木构型、质地,利用植物材料实现防风固沙,将具有很好的科学和实践价值。怎样模仿天然固沙植物的防风固沙过程,将植物的空间结构形态与机械固沙特性相结合,量化仿生新材料、新技术的防沙效益,最终确定最优结构选型,对未来的防风固沙实践工作,将具有重要借鉴意义。

孙涛等^[15]发明了仿真固沙灌木。该发明是从园林绿化中获得灵感,结合多种植物构件优势组合而成的立体化化学固沙材料。它是以高分子聚合材料,添加抗老化剂加工而成。刘虎俊等^[16]对仿真固沙灌木的应用进行了试验研究,证实其结合多种植物构件优势组合而成,是化学固沙的立体化,也是植物固沙的工程优化。但是,该沙障在环保降解方面仍有不足,且其构件、枝系结构和形状与天然灌木比较还有待优化。

因此,可机械化编制和智能化施工的新型生态环保护的低成本固沙障是目前治沙工作中的一个重研究方向。仿生猫头刺灌丛的盾状沙障是我们项目组最新发明的一种可移动、可组合和可机械化编制的新型沙障。本文拟通过风洞试验,定量研究仿生猫头刺灌丛的盾状沙障的防护效益,旨在构建一种有望替代传统固沙措施的新型固沙技术设施,并为后续的防沙固沙工程实践提供理论指导。

1 试验材料

中国对猫头刺的分布、种群特征及其防风固沙作用等开展了丰富的研究^[17-22]。猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)属豆科棘豆属,为强旱生垫状矮小半灌木,高8~20 cm。根粗壮,根系发达。茎多分枝,开展,全体呈球状植丛。叶轴宿存,木质化,长2~6 cm,下部粗壮,先端尖锐,呈硬刺状,老时淡黄色或黄褐色,嫩时灰绿色,密被贴伏绢状柔毛(图1)。猫头刺主要分布于半荒漠地带的固定、半固定沙丘及沙地上。猫头刺广泛分布于中国内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆等地,俄罗斯西西伯利亚和蒙古南部也有分布^[19-22]。研究表明^[20],猫头刺在防风固沙中发挥着重要作用,是重要的固沙植物。



图 1 猫头刺灌丛构型

Fig.1 Morphological structure of *Oxytropis aciphylla* shrubs

本文利用猫头刺茎叶和盾状钢丝网筛作为试验材料,编制成猫头刺盾状移动式固沙障。猫头刺盾状移动式固沙障模型如图 2 所示。本研究所用猫头刺材料于 2022 年 7 月 16 日采自宁夏回族自治区中卫市沙坡头区样地内。研究区有较多猫头刺分布。该沙障可以广泛生产,成本低,取材简易,可移动并且任意组合,在防治荒漠化、防风固沙领域具有广泛的应用前景。作为环境友好型产品,未来可以采用机械化编制并大规模生产,是一种可替代传统草方格的新型固沙障。本文对该固沙障进行风洞模拟试验,分析不同风速条件下沙障前后的流场分布和输沙量特征,确定最佳选型,以使之适用于在沙坡头等沙区的应用与推广。

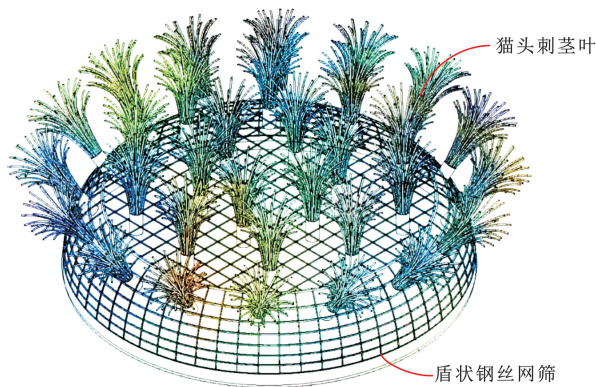


图 2 盾状移动式固沙障设计图

Fig.2 Design diagram of shield-shaped movable sand barrier

2 研究方法

2.1 风洞参数

本研究风洞模拟试验在中国科学院西北生态环境与资源研究院沙坡头野外风洞试验室进行。该风洞气流为直流闭口吹气式,可调风速为 1~40 m/s,试验段横截面为 1.2 m×1.2 m,长度 21 m,配有野外

土壤风蚀风洞操作控制系统、多通道防沙风速风压自动采集系统、数码相机、台式计算机和秒表等设备。

2.2 模型设计

本试验一共测量了 4 类 7 种固沙障模型的风速流场:①未胶粘猫头刺茎叶的空白大、小模型;②仅在顶部胶粘猫头刺茎叶的不完整大、小模型;③顶部以及四周均胶粘猫头刺茎叶的完整大、小模型;④野外采集的大小相近的原生猫头刺植物模型。大型模型的直径为 45 cm,小型模型的直径为 40 cm,高 11 cm。该沙障由直径 52.5 cm(小型的为 42 cm),高 11 cm 的盾状钢丝网筛倒扣于地表,在其网格上插入固沙灌木猫头刺茎叶构成(图 3),茎叶出漏于网筛之上的高度约 10 cm,钢丝网筛的丝径 1 mm,孔径 5~20 mm,可插入不同粗细的茎叶。野外施工时,按品字形或模拟自然的随机布设方式,布设难度低,施工方便。下方铁质盾状结构用于固定构架和集聚流沙,上方盾状结构模拟野外猫头刺的天然灌丛形状,运用仿生学原理,起到防风固沙作用。该沙障的成本主要包括,盾状钢网筛的材料和加工费,茎叶采集、插设、野外布设的人工费用和运费三部分组成。钢网筛根据大小不同,其单价约为 11~13 元,单个沙障的人工费约为 2~3 元,加运费后单个固沙障的总成本约为 14~17 元。沙障按品字形或模拟自然的随机布设方式,以平均间距 100 cm,每 1 km²布设 240 000 个来计算,成本约为 264~384 万元/km²。为减少材料获取难度及成本,实际施工中,可现场采集周边乡土植物的茎叶来代替猫头刺。例如,旱区常见的梭梭、白刺、柽柳、杨树等,且茎叶长度可长可短,具体参数可依据实际取材而定。

2.3 试验方法

为了量化和界定新型固沙障的流场特征及固沙效应,我们分别开展了净风和携沙试验。试验所用沙床用沙取自宁夏沙坡头腾格里沙漠。野生植物模型采集自沙坡头野生猫头刺灌丛,形状近圆形,直径约 40 cm。

2.3.1 净风试验 试验针对 7 种固沙障模型,分别选取 4 组风速(6,10,14,18 m/s),使用皮托管对不同高度和水平位置的流场特征进行测定。皮托管设置在风洞横截面中央(图 4),垂直方向设定 2,4,8,16,32,64,128,200,350,500 mm 共 10 个测点。试验过程中皮托管固定,通过移动固沙障来改变水平方向流场测点。测点分别为固沙障前缘在皮托管上风向 $-0.5H$, $-1H$, $-2H$, $-3H$, $-4H$, $-5H$, $-6H$, $-8H$, $-10H$;固沙障后缘在皮托管下风向 $0H$, $0.5H$, $1H$, $2H$, $3H$, $4H$, $5H$, $6H$, $8H$, $10H$, $15H$, $20H$ (H 表示固沙障高度, $H=11$ cm)^[23]。



a 未胶粘猫头刺茎叶的空白大、小模型



b 仅在顶部胶粘猫头刺茎叶的不完整大、小模型



c 顶部四周均胶粘猫头刺茎叶的完整大、小模型



d 野外采集的大小相近的原生猫头刺植物模型

图 3 盾状固沙障模型结构

Fig.3 Model structures of shield-shaped sand fixation barriers

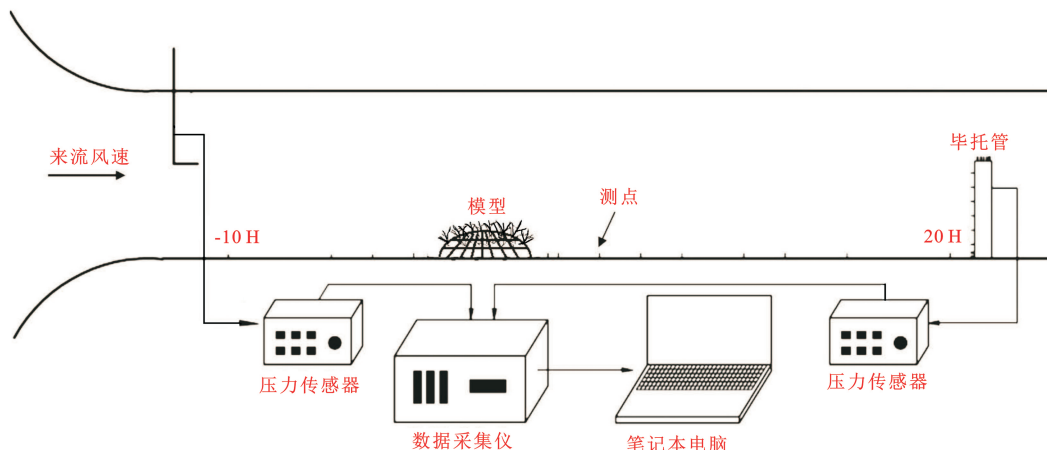


图 4 猫头刺盾状移动式固沙障防风效应风洞试验布局图解

Fig.4 Layout diagram of wind tunnel experiment on effects of shield-like movable sand fixation barriers with *Oxytropis aciphylla*

2.3.2 携沙试验 将沙障平铺于 10 cm 厚的积沙表面,每组试验前,均补充沙样,并用钢尺刮平,以保证沙床的厚度、长度、表面形态一致。利用直立式积沙仪收集 0—60 cm 高度的输沙量。在预试验中确定了起沙风速为 6 m/s,故设置 10, 14, 18 m/s 三组试验风速。分别收集了 0—60 cm 的总输沙量,与各 1 cm 高度处的输沙量。对每个模型,在 10, 14, 18 m/s 的风速下分别吹蚀 4, 2, 1 min, 并在障后 10 H 处摆放

直立式积沙仪。该积沙仪进沙口规格为 0.5 cm × 1 cm, 高度梯度为 1 cm, 共 60 个进沙口, 可以收集 0—60 cm 高度内的输沙。吹蚀完成后, 用天平称取每个高度层收集的沙重。计算总输沙量的减少率利用如下方程计算:

$$R_s = (1 - q_{tg} / q_{tf}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: q_{tg} 为布设沙障模型后总输沙量 $[g / (cm^2 \cdot min)]$; q_{tf} 为对照无沙障模型时的总输沙量 $[g / (cm^2 \cdot min)]$ 。

3 结果与分析

3.1 不同沙障模型的流场特征

在净风条件(试验风速为 6, 10, 14, 18 m/s)下,进行各固沙障模型的流场测定试验。图 5 为不同类型沙障模型的流场结构特征图。由图 5 可知,在各沙障模型后,风速都显著减小,在背风侧出现了明显的弱风速区。气流在通过沙障后产生了遇阻抬升区、集流加速区、减速沉降区和消散恢复区。首先,可以从流场图上看到,沙障迎风侧密集分布有平行于沙障表面的风速等值线,说明气流在沙障前遇到阻碍,并沿迎风侧向上爬升;随后气流爬升至沙障顶部汇聚形成强大加速区,即集流加速区;当气流通过固沙障时发生了减速、分离。根据伯努利定律,气流的迅速分离会在沙障底部附近形成一个低压区,导致其背风侧反向涡形成。这解释了为何在各沙障模型背风侧的减速沉降区都出现了负风压,并导致风向发生了偏转。最后,气流流经背风侧,经过不同长度的减速沉降区风速明显降低,并逐渐恢复到迎风侧的风速,产生消散恢复区^[24-25]。

在风速 6 m/s 时,风速梯度较小。集流加速区的高度均达到了 0.15 m。减速沉降区均达到了 20 H 。空白模型与不完整模型在该风速条件下的负风速区拉大,在 2—15 H 处都存在明显较大的负风压。且在高度上分为了 0—0.02 m 与 0.02—0.1 m 两个独立的负风速区间。与之相对的,完整模型与植物模型仅在障后 0—2 H 后有明显的负风速区,在 10 H 后风速就回归正值。

在风速 10 m/s 时,空白模型在 0—8 H ,高 0.05 m 处有负风速区。而不完整模型由于仅在顶部有猫头刺茎叶附着,在 0.1 m 附近高度处受到了较大的影响,扰流现象非常严重。在流场图上表现为除与空白模型相同的负风速区外,还在同等距离、高度 0.05—0.15 m 的区域也产生了负风压。风速迅速降低,且梯度变化剧烈,在 10 H 处重新开始减速沉降。而完整模型与植物模型减速沉降区均为 15 H 左右,呈较为平滑的曲线,仅与空白模型相同,在 0—8 H ,高度 0—0.02 m 处有一段较低的负风速。

在风速 14 m/s 时,情况与 10 m/s 时基本一致,唯一区别是植物模型和完整模型的优势得以体现。空白对照模型和不完整模型的减速沉积区变小至 10 H 与 12 H ,证明其防沙效益开始降低。而完整模型与植物模型减速沉降区均保持在 15 H 处。

在风速 18 m/s 时,风速梯度较前 3 组风速更大,等值线更为密集,功能分区也更明显。除了完整模型

与植物模型之外的其他模型,减速沉积区均缩至 5 H 左右,没有超过 10 H 的模型。而植物模型与完整模型的减速沉降区仍能维持在 15 H 较好的区间内。

3.2 不同风速下各模型流场总体特征

综合对比图 5 来看,空白、不完整、完整、植物模型的流场结构特征有相似之处。从纵向来看,风速自地表沿垂直方向随高度的增大而增大。从横向观察,气流在通过各沙障模型时风速都有不同程度的降低。不同之处是减速沉降区的宽度与负风速区的分布范围。在风速不超过 10 m/s 时,各模型的减速沉降区都能维持在 20 H 这一区间。随着风速的加大,空白模型的减速沉降区显著缩小,这是因为它没有猫头刺茎叶的扰动,倒扣于地表的盆形钢丝网筛。在高风速下对风动能的削弱作用有限。各沙障模型在各风速下均在障后 0—5 H ,高度 0—0.1 m 处产生了负气压。仅在顶部有猫头刺茎叶的不完整模型,则在风速 <14 m/s 时在高度 0.1—0.2 m 处有第二个显著的负压区。这是因为它结构不完全,在模型顶部有明显的紊流现象。虽然不完整模型仅就削弱风速方面与完整模型差距不大,但因为其结构的不完整性,导致负压区扩大,沙障所受风压不稳定,在障后 0—8 H 区间有明显的负风速;而完整模型的风速流场曲线更平滑,与植物模型一样都具有较为稳定的风速削减效应。

3.3 不同沙障模型的阻沙效果

不同风速下不同固沙障在 0—60 cm 的总输沙量对比如表 1 所示。

(1) 风速 10 m/s 时,输沙量主要集中在 0—5 cm。无沙障对照为 5.23 g/(cm²·min),而小、大完整模型的输沙量为 0.49,0.95 g/(cm²·min),是对照的 9% 与 18%。在较低风速下,各模型间差异不大,其中小完整模型的输沙量最小。输沙量表现为:小完整模型 < 大空白模型 < 大完整模型 < 植物模型 < 小空白模型 < 小不完整模型 < 大不完整模型 < 无沙障对照,且输沙量差值很小。

(2) 风速 14 m/s 时,除无沙障对照外,各沙障模型的输沙量在 5—15 cm 高度的范围内稳定增加,主要集中于 0—10 cm 这一区间,空白对照为 31.43 g/(cm²·min)。而小、大完整模型的输沙量为 7.73, 5.53 g/(cm²·min),是对照的 24.5% 与 17.6%。风速提升后,明显表现为大、小完整模型输沙量曲线与植物模型高度重合,且为输沙量最少的三组。值得注意的是,不完整模型由于扰流导致输沙量较空白模型反而更大。输沙量表现为:大完整模型 < 大空白模型 < 小完整模型 < 小空白模型 < 大不完整模型 < 小不完整模型 < 无沙障对照,且不完整模型与其他模型的差值大幅拉大。

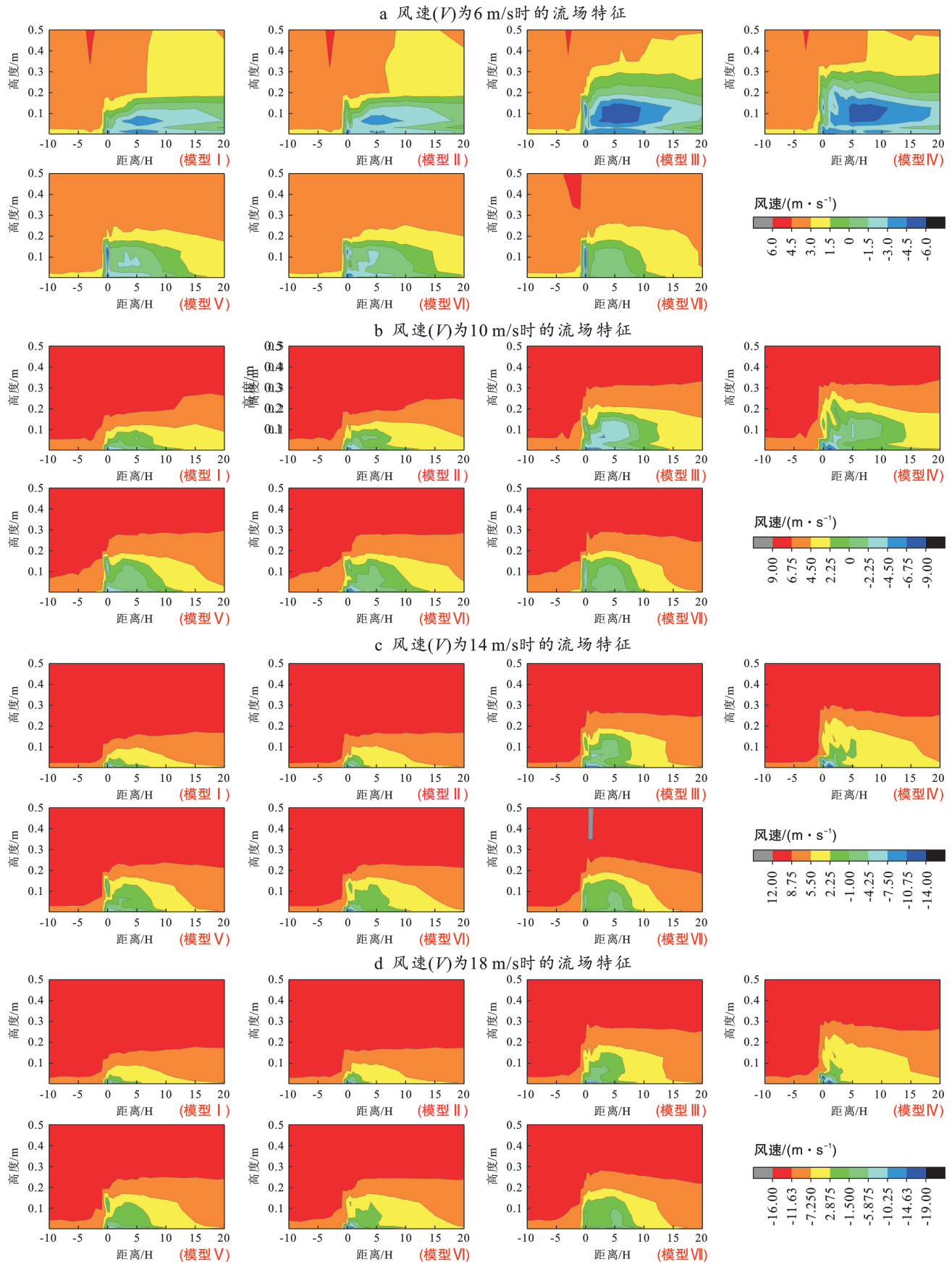


图5 不同风速下各国沙障模型流场结构特征
 Fig.5 Flow field structure characteristics of various sand fixation barrier models under different wind speeds

表 1 各风速下 7 种不同固沙障在 0—60 cm 的总输沙量对比
Table 1 Comparison of total sediment transport of seven sand fixation barrier models at 0—60 cm under different wind speeds

固沙障类型	不同风速下总输沙量/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)		
	10 m/s	14 m/s	18 m/s
无沙障对照	5.23	31.43	108.90
小空白模型	1.11	9.30	49.87
大空白模型	0.52	6.30	31.70
小不完整模型	1.90	20.84	91.22
大不完整模型	2.02	12.15	64.17
小完整模型	0.49	7.73	27.97
大完整模型	0.95	5.53	23.01
植物模型	1.04	5.78	23.66

(3) 风速 18 m/s 时, 输沙量在各高度均有采集, 部分模型在 10—15 cm 区间的输沙量有明显升高, 输沙量主要集中于 0—15 cm 这一区间, 无沙障对照为 $108.9 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。而小、大完整模型的输沙量为 $28, 23 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, 是对照的 25.7% 与 21.1%。输沙量表现为: 大完整模型 < 植物模型 < 小完整模型 < 大空白模型 < 小空白模型 < 大不完整模型 < 小不完整模型 < 无沙障对照。随着风速的进一步升高, 仅有

两个完整模型与植物模型的输沙量差值很小。另一个特点是每一组对照的大模型输沙量均低于相同处理的小模型。

布设沙障模型后输沙量在沙障的阻隔高度下均有显著的下降(图 6), 表明沙障模型能有效地抑制风沙流对沙床的侵蚀。在 10, 14, 18 m/s 的风速下, 各沙障模型的总输沙量减少率 R 分别为: 小空白模型 78.8%, 70.4%, 54.2%; 大空白模型 90.1%, 80.0%, 70.9%; 小不完整模型 63.7%, 33.7%, 16.2%; 大不完整模型 61.4%, 61.3%, 41.4%; 小完整模型 90.6%, 75.4%, 74.3%; 大完整模型 81.8%, 82.4%, 78.9%; 植物模型 80.1%, 81.6%, 78.3%。

可以发现, 猫头刺盾状移动式固沙障能显著地减少输沙量, 直径较大的模型输沙量整体比小模型输沙量略小。且随着风速增大, 完整的猫头刺盾状移动式固沙障模型的固沙效果保持较好, 并与野生猫头刺植物模型的输沙量基本一致。因为完整的沙障模型与植物模型, 具有完整的猫头刺灌丛构造及茎叶结构, 在风力吹蚀过程中, 有效削弱了风沙流强度, 增强了固沙障的阻沙效果。

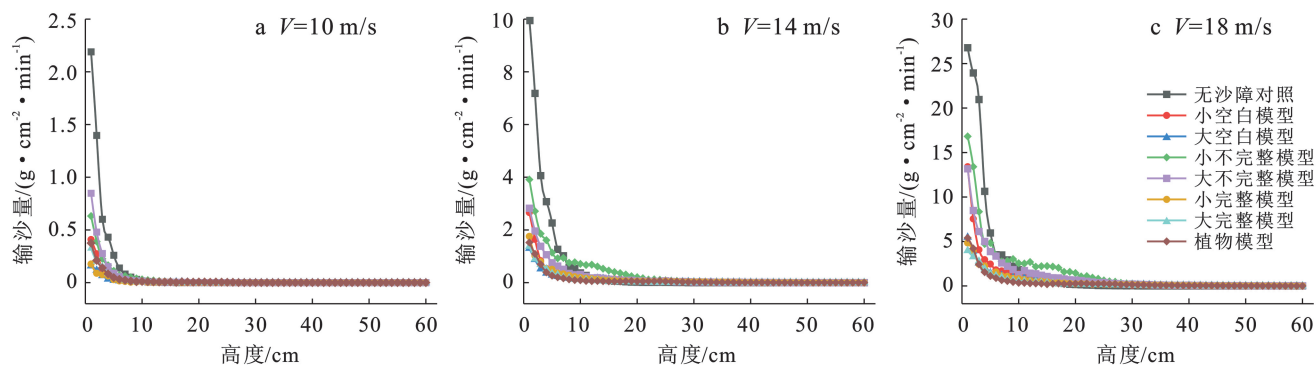


图 6 不同风速下各固沙障模型输沙量的变化特征

Fig.6 Variation characteristics of sediment discharge in various sand fixation barrier models under different wind speeds

4 结论

本研究通过模拟野外固沙植被猫头刺的形态特征, 运用仿生学原理, 发明了一种可机械化编制猫头刺盾状移动式固沙障, 并进行了风洞模拟试验, 确定了最佳选型, 可为流动沙丘治理提供理论支撑。它揭示了盾状沙障防风固沙机理, 可为野外工程防沙措施的选择和制定提供借鉴。

(1) 流场特征表明, 完整的仿猫头刺固沙障模型的减速沉降区更广, 且直径略大的大模型防风效果要比小模型略好, 与猫头刺植物模型相似度高。这说明猫头刺盾状移动式固沙障满足了仿生学的要求, 能有效降低风速, 具有良好的防风效益。而空白模型与不

完整模型, 前者阻风能力弱, 后者由于空间分布不均导致扰流频繁且强度较高, 其效果均不如完整的猫头刺盾状移动式固沙障。直径略大的大模型防风效果要优于小模型。这说明猫头刺盾状移动式固沙障的结构完整性对于其防风效益的保持具有重要意义。

(2) 各模型在 3 组风速下的吹蚀试验表明, 猫头刺盾状移动式固沙障能显著地减少输沙量。猫头刺盾状移动式固沙障的平均输沙量是无沙障对照的 13.8% (10 m/s 风速), 21.1% (14 m/s 风速) 和 23.4% (18 m/s 风速)。直径 40 cm 的完整猫头刺盾状移动式固沙障的输沙量在 10 m/s 风速时最低, 且各模型间差值较小。而直径 45 cm 的完整猫头刺盾状移动式固沙障的输沙量在 14 m/s 与 18 m/s 的风速时

最低,直径 40 cm 的完整模型与植物模型次之,且均相比其他模型在输沙量上有较大差值。尤其是直径 45 cm 的猫头刺盾状移动式固沙障,不仅流场图与植物模型相似,在输沙量方面,尤其是在高风速下,与野生的猫头刺灌木一样优秀,是一种符合风沙治理要求的新型固沙障。与流场图相照应,在高风速下($>14\text{ m/s}$),无猫头刺茎叶结构的空白模型,输沙量相比完整的仿猫头刺固沙障显著增大,而顶部具有猫头刺茎叶结构的不完整的模型,由于扰流频繁,固沙效益在各模型中最低。这说明猫头刺盾状移动式固沙障,其四周猫头刺茎叶结构的完整性,能有效提升该固沙障的固沙效益。

(3) 受风洞条件限制,本研究仅开展了单体猫头刺盾状移动式固沙障的风洞模拟试验,下一步计划利用沙坡头野外站,在野外开展新型固沙障在不同组合状态下的防风固沙效应试验。另外,进一步在沙柳、藤条、竹条等天然植物材料方面进行系统试验,在成本、取材、加工、生产等环节还需要更多的探索和改进。

参考文献(References)

- [1] 李红悦, 哈斯额尔敦. 机械沙障固沙效应及生态效应的研究综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(1): 63-67.
Li Hongyue, Hasi Eerdun. Sand-fixing effect and ecological effect of mechanical sand barriers: A review [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(1): 63-67.
- [2] 王强, 左合君, 李钢铁, 等. 巨菌草留茬沙障防风固沙效益及其适宜模式研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1234-1241.
Wang Qiang, Zuo Hejun, Li Gangtie, et al. Windbreak and sand-fixation efficiency and suitable modes of *Pennisetum giganteum* sand barrier [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1234-1241.
- [3] 张克存, 屈建军, 俎瑞平. 下垫面条件对风沙活动层气流紊动性影响的风洞模拟[J]. 水土保持通报, 2004, 24(3): 1-4.
Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping. Wind tunnel simulation to determine the effect of underlying sand laden layer surface characteristics on air current turbulence [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(3): 1-4.
- [4] 丁泊淞, 高丽, 程建军, 等. 斜插板式沙障插板倾角影响下风沙流特征的数值模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 132-137.
Ding Bosong, Gao Li, Cheng Jianjun, et al. Numerical simulation of wind-sand flow characteristics of inclined inserting-type sand fence under influence of inserting plant angle [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 132-137.
- [5] 舒庆. 防风固沙草方格铺设机器人设计及动力学分析[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
Shu Qing. Study on design and dynamic of straw-checker-board barriers paving robot [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2007.
- [6] 席琳. 荒漠化地区水土保持防治措施研究[J]. 河南科技, 2017(9): 77-79.
Xi Lin. Research on prevention and control measures of soil and water conservation in desertification areas [J]. Henan Science and Technology, 2017(9): 77-79.
- [7] 程建军, 智凌岩, 薛春晓. 箱体式活动沙障风沙流场特征[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 61-70.
Cheng Jianjun, Zhi Lingyan, Xue Chunxiao. Characteristic of wind-sand flow field of box-type movable sand barrier [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 61-70.
- [8] 闫德仁, 袁立敏, 黄海广, 等. 直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 79-85.
Yan Deren, Yuan Limin, Huang Haiguang, et al. Influence of gauze sand barrier on sediment transport and wind speed near surface [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 79-85.
- [9] 杨波, 李锋. 酒泉市治沙优化模式示范研究[J]. 中国水土保持, 2018(2): 31-33.
Yang Bo, Li Feng. Study on the optimization model of sand control in Jiuquan [J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2): 31-33.
- [10] 韩雪莹, 王涛, 杨文斌, 等. 中国沙障研究进展与热点分析: 基于 Vosviewer 和 Citespace 的图谱量化分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 153-163.
Han Xueying, Wang Tao, Yang Wenbing, et al. Research progress and hotspot analysis of sand barrier in China: Quantitative analysis of atlas based on Vosviewer and Citespace [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 153-163.
- [11] 闫婷, 黄海广, 闫德仁. 沙障治沙知多少[J]. 内蒙古林业, 2021(6): 40-42.
Yan Hai, Huang Haiguang, Yan Deren. What do you know about the application of sand barrier for combating desertification [J]. Inner Mongolia Forestry, 2021(6): 40-42.
- [12] 屈建军, 喻文波, 秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应实验[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1185-1193.
Qu Jianjun, Yu Wenbo, Qin Xiaobo. Wind-protecting efficiency of HDPE functional sand-fixing barriers [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1185-1193.
- [13] 高天笑. 羽翼袋沙障防风固沙机理的风洞模拟实验研究

- [D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- Gao Tianxiao. Wind tunnel simulation experiment study on the mechanism of wind-proof and sand-fixing with wing bag sand barrier [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [14] 屈建军,洪贤良,李芳,等.聚乳酸(PLA)网格沙障老化性能及防沙效果[J].中国沙漠,2021,41(2):51-58.
- Qu Jianjun, Hong Xianliang, Li Fang, et al. Aging resistance of polylactic acid sand barriers and its sand fixation effectiveness [J]. Journal of Desert Research, 2021,41(2):51-58.
- [15] 孙涛,王继和,满多清,等.仿真固沙灌木防风积沙效应的风洞模拟研究[J].水土保持学报,2011,25(6):49-54.
- Sun Tao, Wang Jihe, Man Duoqing, et al. Simulation effect of preventing wind and combating sand of simulated sand-fixing shrub in wind tunnel testing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(6):49-54.
- [16] 刘虎俊,朱国庆,郭春秀,等.两种仿真固沙灌木防风效应的野外观测[J].水土保持通报,2014,34(4):155-159.
- Liu Hujun, Zhu Guoqing, Guo Chunxiu, et al. Field investigation on wind preventing effect of two simulated shrub [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(4):155-159.
- [17] 曹蕾,廖贺贺,王旭,等.沙坡头自然保护区猫头刺种群生命表与生存分析[J].安徽农业科学,2016,44(4):32-36.
- Cao Lei, Liao Hehe, Wang Xu, et al. Life table and survival analysis of *Oxytropis aciphylla* in Shapotou Nature Reserve [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2016, 44(4):32-36.
- [18] 刘雪伟,贺学礼.沙坡头地区猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)根际 AM 真菌时空分布研究[J].河北农业大学学报,2008,31(5):52-56.
- Liu Xuewei, He Xueli. The spatio-temporal distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of *Oxytropis aciphylla* rhizosphere in the area of Shapotou [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2008,31(5):52-56.
- [19] 张广才,于卫平,张维江,等.盐池县猫头梁植物资源与群落类型[J].防护林科技,2004(增刊 1):45-48.
- Zhang Guangcai, Yu Weiping, Zhang Weijiang, et al. Plant resources and community types of Maotouliang in Yanchi County [J]. Protection Forest Science and Technology, 2004 (Suppl.1):45-48.
- [20] 贾丽娜,吴斌,丁国栋,等.宁夏盐池县 3 种常见沙生植物群落特征及阻沙能力[J].东北林业大学学报,2009,37(11):56-58.
- Jia Lina, Wu Bin, Ding Guodong, et al. Characteristics of three common sandborne plant communities and their sand holding capacity in Yanchi County, Ningxia [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009,37(11):56-58.
- [21] 牛得草,李茜,江世高,等.阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C : N : P 化学计量比的季节变化[J].植物生态学报,2013,37(4):317-325.
- Niu Decao, Li Qian, Jiang Shigao, et al. Seasonal variations of leaf C : N : P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013,37(4):317-325.
- [22] 张佳宁,胡小柯,朱国庆,等.民勤绿洲霸王群落的植物多样性[J].草业科学,2013,30(11):1819-1823.
- Zhang Jianing, Hu Xiaoke, Zhu Guoqing, et al. Species diversity of *Zygophyllum xanthoxylum* community in Minqin Oasis [J]. Pratacultural Science, 2013,30(11): 1819-1823.
- [23] 鱼燕萍,肖建华,屈建军,等.不同坡角公路路基流场的风洞实验[J].中国沙漠,2018,38(3):464-472.
- Yu Yanping, Xiao Jianhua, Qu Jianjun, et al. Wind Tunnel Test on flow field of highway subgrade with different slope angles [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(3):464-472.
- [24] 康文岩,王立,屈建军,等.包兰铁路沙坡头段不同编制结构的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟[J].中国沙漠,2020,40(2):94-99.
- Kang Wenyan, Wang Li, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel simulation experiment on the protective effect of different structures of sand-blocking fence in Shapotou section of Baotou-Lanzhou Railway [J]. Journal of Desert Research, 2020,40(2):94-99.
- [25] 李建国,屈建军,李芳,等.不同类型防沙堤流场的风洞实验模拟研究[J].中国沙漠,2012,32(2):291-299.
- Li Jianguo, Qu Jianjun, Li Fang, et al. Wind tunnel simulation on flow fields around different types of sand dikes [J]. Journal of Desert Research, 2012,32(2): 291-299.