屈建军,朱志昊,彭怀午,等.刷状葵骨固沙障材料性能与固沙效益[J].中国沙漠,2026,46(5):52-63.

刷状葵骨固沙障材料性能与固沙效益

屈建军[1,2],朱志昊[2],彭怀午[3],李玉进[3]

(1.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东 广州 511458;2.西北大学 城市与环境学院,陕西 西安 710127;3.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710100)

摘要:受全球极端气候影响,中国沙质海岸与南海珊瑚沙岛礁风水侵蚀强烈,需要借鉴内陆行之有效的草方格沙障进行固沙,然而传统的麦草等秸秆固沙材料难以应用于严酷的高湿、高盐雾海洋环境。本文作者就地取材,选用耐风耐盐且广泛分布于热带亚热带的棕榈树叶脉—葵骨替代麦草秸秆,为了获得更好的防风固沙效益,作者进而研制出一种适宜沙质海岸与珊瑚沙岛礁固沙的三维结构的刷状葵骨固沙障。通过拉伸试验测量材料强度,利用风洞模拟试验监测刷状葵骨固沙障流场特征、风沙流结构和蚀积状态变化。结果表明:(1)葵骨杨氏模量较大,可达78 GPa,具有较强的抗拉性,强度较高。(2)刷状葵骨固沙障内存在较大减速区,最明显的减速发生在第2个障格内至第3个障格后(x=200~500 cm),防风效能整体呈先增加再平稳波动后减少的趋势。(3)不同风速下,刷状葵骨固沙障的风沙流结构均显示出良好的固沙作用,平均固沙率可达91.1%,且沙粒主要截留在前缘第1个障格内。综上所述,刷状葵骨固沙障具有较强的耐风水蚀性能,固沙效果好,就地取材,经济环保,施工效率高,可广泛应用于沙质海岸与珊瑚沙岛礁的风沙防治。

关键词:葵骨;刷状沙障;拉伸试验;风洞模拟试验

文章编号:1000-694X(2026)05-052-12 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00050

中图分类号:S775 **文献标志码**:A

0 引言

中国内陆沙漠和沙漠化地区,对于风沙活动规律及其危害防治研究已有70多年的历史[1],特别是麦草和稻草方格沙障,被称为“中国魔方”,为内陆近地面风沙流边界层防止风沙危害的一种经济实用、功能独特、效果显著而应用最为广泛的防风固沙措施[2-3]。而相较于内陆沙漠与沙漠化地区,中国海岸风沙危害防治起步较晚[4]。中国沿海湿润沙化土地现有96.02万公顷,分布广泛,这使得海岸风沙防治工作显得尤为重要,对于保障沿海地区的生态安全、经济发展和社会稳定具有重要意义[5]。中国南海分布有多个沙质的岛礁、沙洲[6-7]。与石质岛屿不同,受全球变化影响,极端气候增多和海平面抬升[8],中国南海沙质岛礁受到风水强烈侵蚀[9-10],易使珊瑚沙流失、岛礁面积缩小,致使众多国防和民用设施受到风沙危害,且存在国土面积减小的危险。由于沙质海岸与岛屿高盐雾、强风和强紫外线的严酷海洋环境[5],内陆通常采用的麦草等秸秆也难以应用于海洋环境。因此,亟待研发适宜于沙质海岸与岛礁的固沙障新材料。

葵骨来源于大叶蒲葵(*Livistona saribus*,图1A)的叶脉,蒲葵属于热带、亚热带常绿乔木,属棕榈科,广泛分布于中国广东、海南及印度尼西亚等地[11]。蒲葵在中国华南地区主要是用于工艺品加工、园林道路绿化以及一些建筑和公共场所配套装饰等[12]。蒲葵叶每年收割,将其叶脉-葵骨取出,可扎成葵骨条(图1B)[13]。葵骨因其耐水耐盐,且具有刚性弹性的刚柔特性,通常被用于制作扫把(图1C)[14]。其产量大成本低,防护时间持久且稳定。为此,我们选择葵骨作为珊瑚沙岛礁固沙材料。

传统的施工方法需要有经验的工人利用铁锹将麦草扎入沙地中,形成半隐蔽式沙障,这一过程

收稿日期:2026-01-20;**改回日期**:2026-03-26

资助项目:南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才队伍经费项目(GML20220014);国家重点研发计划项目(2022YFB4202100)

作者简介:屈建军(1959—),男,陕西西安人,博士,教授,博士生导师,研究方向为风沙防治工程。E-mail:qujianj@lzb.ac.cn

通信作者:朱志昊(E-mail:1019731487@qq.com)



图1　蒲葵树、葵骨和葵骨扫把

Fig.1　*Livistona saribus*, Kuigu, and Kuigu broom

耗时耗力且效率不高[15]。而本文作者研制了一种将葵骨通过机械编织而成的刷状网绳式葵骨固沙障(CN 219808163 U)[16],实现刷状葵骨草绳机械化生产,使葵骨固沙障施工效率可以提高60%以上。为了验证刷状葵骨固沙障的具体效果如何,我们利用拉伸试验和风洞试验,对刷状葵骨固沙障的材料性能和固沙效益进行了系统性观测,为沙质海岸与珊瑚沙岛礁的风蚀防治提供新的材料和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　拉伸试验

拉伸试验于2023年6月中旬在中国科学院西北生态环境与资源研究院进行,使用液晶数显电子万能力学试验机(LDW-20),试验机类型为等加负荷型(CRL),测试标准为《GB/T 1938−2009 木材顺纹抗拉强度试验方法》,拉伸方向为经向,对21根葵骨进行拉伸试验。

杨氏模量(YM)可表示材料抵抗弹性形变的能力,为材料的正应力(σ)与正应变(ε)的比值:

$$YM = \sigma/\varepsilon = (F/A)/(\Delta L/L_0) \quad (1)$$

式中:F为拉伸力,单位N;A为横截面积,单位mm^2;ΔL为位移长度,单位mm;L_0为原长度,单位mm。

1.2　风洞模拟试验

1.2.1　试验设计

风洞模拟试验于2023年5月下旬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实验室进行。该风洞气流为直流闭口吹气式,可调风速1~40 m·s^{-1},测量精度在±0.3%~±0.5%,试验段横截面1.2 m×1.2 m,长度21 m,边界层最大厚度为0.5 m,配有风速测量仪风速控制平台、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[17]。

试验材料选取由葵骨机械化生产而成的刷状葵骨草绳,直径20 cm。在风洞内用刷状葵骨草绳沿风向布设3个相邻方格沙障,每个方格沙障内径1 m、高度20 cm(图2)。为了研究刷状葵骨固沙障的固沙性能,选取来自腾格里沙漠区域沙子铺设成厚度为10 cm沙床。

1.2.2　数据收集

试验分别选取6、10、14、18、22 m·s^{-1}风速对流场变化进行测定。流场结构采用皮托管测定,皮托管设置在风洞横截面中央。垂直方向设定10个测量高度,即z=0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、6.4、12.8、20、35、50 cm(z是距离风洞底面的高度)。试验过程中,通过移动皮托管改变流场测点。沙障周围测点共39个(图3A),即x=−300、−200、−140、−100、−60、−40、−20、−10、20、30、40、60、80、100、110、140、150、160、180、200、220、230、260、270、280、300、320、340、350、380、390、400、420、440、480、520、580、680、780 cm,x表示与第一个沙障前缘的距离,负值为第一个沙障前缘上风向的测点,正值为第一个沙障前缘下风向的测点。对于每个风速测量点,风力数据采集的持续时间为30 s,记录频率为1 s。

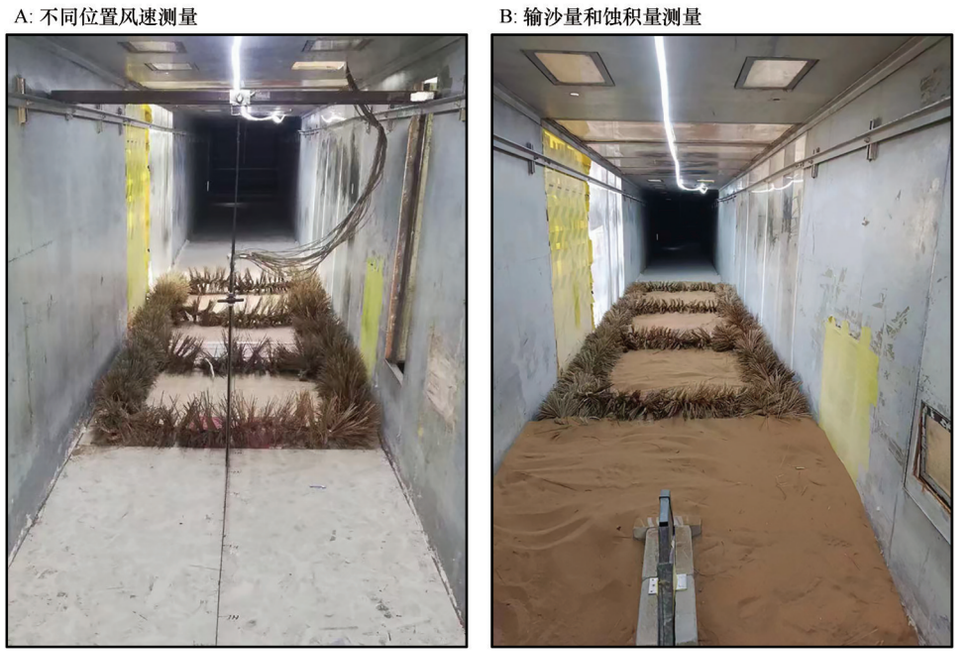


图2 刷状蒺骨沙障试验风洞布设

Fig.2 Layout of brush Kuigu barrier test in the wind tunnel

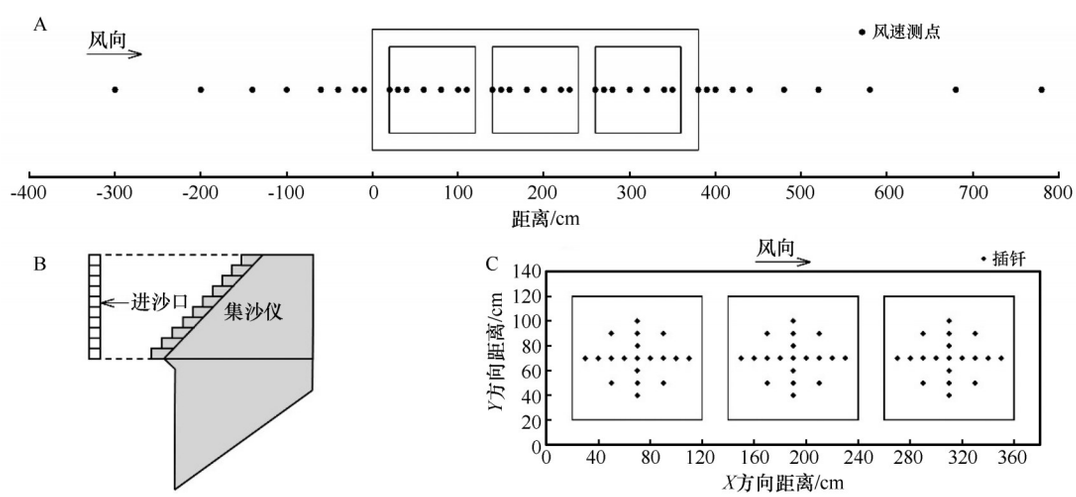


图3 风速测点(A)、集沙仪(B)及 插钎位置(C)

Fig.3 Wind speed measuring point (A), sand sampler (B) and insertion rod position (C)

防风效能主要用于评价沙障对风速削减程度，体现沙障的保护能力：

$$E_{ixz} = (v_{iz} - v_{ixz})/v_{iz} \times 100\% \quad (2)$$

式中：i为净风风速，单位m·s^{-1}；x为测点水平相对位置，单位cm；z为皮托管各测点高度，单位cm；v_{ixz}为在净风风速为i的条件下坐标为(x,z)点的平均风速，单位m·s^{-1}；v_{iz}为位于x=−300 cm处各高度z在净风风速i下的平均风速，单位m·s^{-1}；E_{ixz}表示净风风速i下位于水平距离x和高度z的防风效能，单位%，其数值越大表示防风效果越好。

刷状蒺骨沙障布设于10 cm厚沙床表面。距最后一个沙障后缘60 cm处放置风洞专用集沙仪(图3B)，该集沙仪共有10个进沙口，进沙口高2 cm、宽2 cm，可以收集0~20 cm高度处的来沙。在风速6、10、14、18、22 m·s^{-1}的风速下分别吹蚀20、15、10、5、2 min。每次吹蚀完成后，取出集沙仪，使用千分位天平逐个称量每个集沙管内收集的沙物质质量。总输沙率(q_t)为不同高度输沙率之和，固沙率(Rs)由如下方程表示：

$$Rs = (1 - q_{tg}/q_{tf}) \times 100\% \quad (3)$$

式中：q_{tg}为布设沙障后总输沙率，单位 g·cm^{-2}·min^{-1}；q_{tf}为无沙障时总输沙率，单位 g·cm^{-2}·min^{-1}。

同时，运用插钎法对沙障内沙面的蚀积情况进行测量，在沙面上插入带有刻度的插钎，插钎长度为 20 cm，直径为 0.15 cm，插钎的 0 刻度处与沙面平齐。在 6、10、14、18、22 m·s^{-1}的风速下分别吹蚀 20、15、10、5、2 min。吹蚀后观察每个插钎沙面处刻度，获得沙面蚀积状态。蚀积测点布置如图 3C 所示，每个障格内有 19 根插钎，共 57 根插钎。

2　结果与分析

2.1　拉伸试验

拉伸试验得到 21 条拉伸力–位移曲线（图 4）。整体来看，曲线分为两种类型：第 1 类曲线拉力达到最大值时葵骨瞬间断裂，为瞬间断裂曲线（图 4 中除

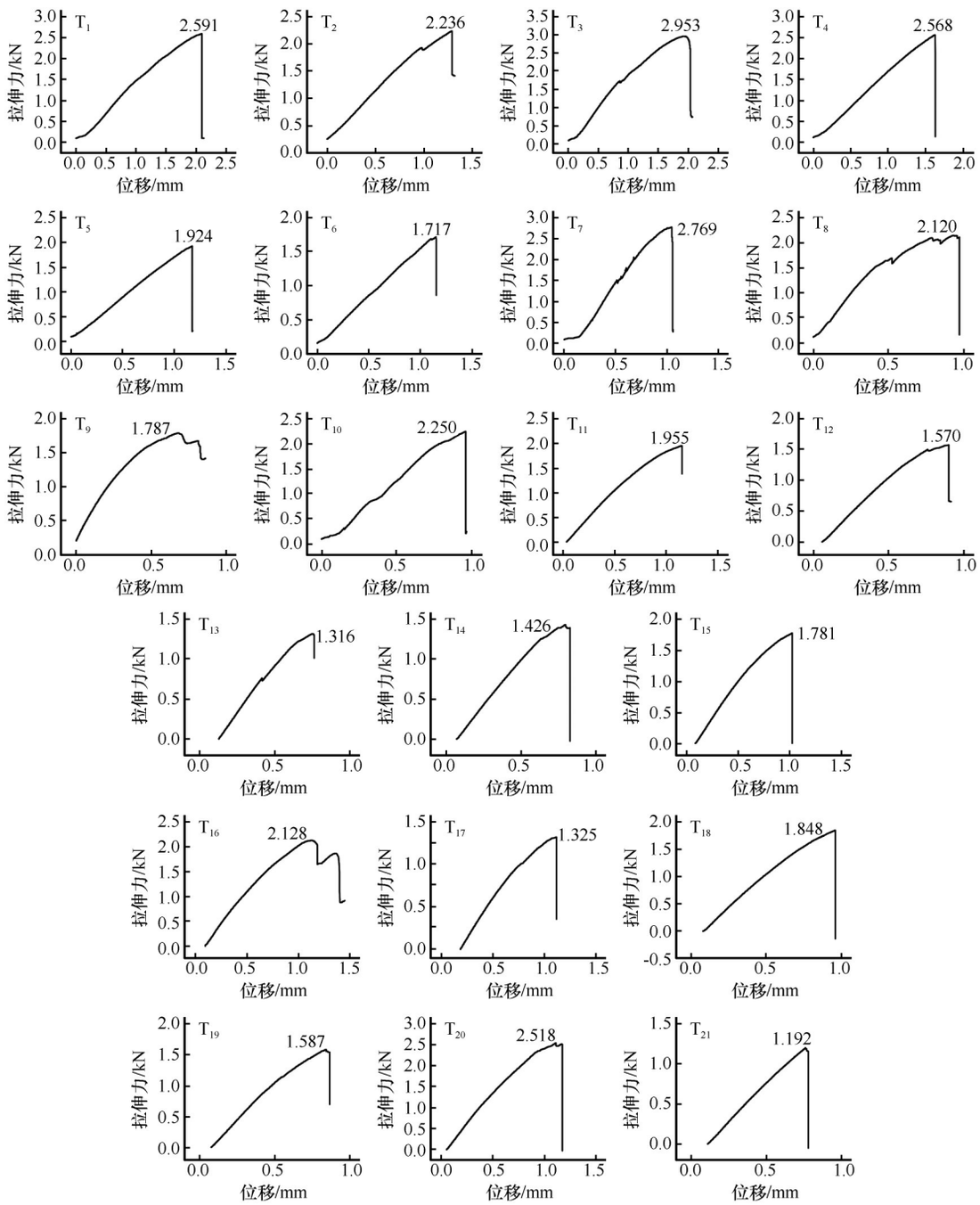


图 4　葵骨拉伸力-位移曲线

Fig.4　The tensile force-displacement curves of Kuigu

T_9和T_{16}试验曲线）；第2类曲线为葵骨一侧断裂，另一侧缓慢断裂，为缓慢断裂曲线（图4中T_9和T_{16}试验曲线）。

由两类断裂力学曲线可以看出，两类曲线最高点之前曲线趋势基本相同。拉伸初始阶段，拉伸力曲线为一段平稳曲线，呈现持续升高趋势。达到最高点之后，第1类瞬间断裂曲线拉伸力出现骤减，并由于载荷持续衰减设备停止拉伸，葵骨完全分离。第2类缓慢断裂曲线，在达到最高点之后出现小段骤减曲线，葵骨一段出现缺口，并未完全分离；继续拉伸，拉伸曲线出现小幅升高，达到次高点，此时葵骨处于临界分离状态；之后拉伸曲线出现骤减，拉伸停止，葵骨分离成两部分。

表1展示了葵骨拉伸试验结果。最大拉伸力为1.979±0.502 kN，横截面积为2.812±0.611 mm^2，位移长度为1.124±0.369 mm，原长度为119.991±28.002 mm，应力为0.726±0.214 GPa，应变为0.010±0.004，杨氏模量为77.906±20.567 GPa。

表1 葵骨拉伸试验结果

Table 1 The tensile test results of Kuigu

试验编号	最大力/kN	横截面积/mm^2	位移/mm	长度/mm	应力/GPa	应变	杨氏模量/GPa
T_1	2.591	2.270	2.100	118.34	1.141	0.018	64.321
T_2	2.236	2.871	1.287	96.88	0.779	0.013	58.627
T_3	2.953	3.003	1.957	116.00	0.983	0.017	58.287
T_4	2.568	2.470	1.629	164.90	1.040	0.010	105.244
T_5	1.924	2.260	1.177	124.80	0.851	0.009	90.268
T_6	1.717	1.875	1.156	124.00	0.916	0.009	98.227
T_7	2.769	4.550	1.046	68.20	0.609	0.015	39.679
T_8	2.120	2.640	0.974	55.20	0.803	0.018	45.511
T_9	1.787	3.875	0.685	85.48	0.461	0.008	57.548
T_{10}	2.250	2.816	0.962	80.52	0.799	0.012	66.877
T_{11}	1.955	3.220	1.157	129.30	0.607	0.009	67.851
T_{12}	1.570	2.750	0.902	122.00	0.571	0.007	77.218
T_{13}	1.316	2.900	0.755	133.90	0.454	0.006	80.481
T_{14}	1.426	3.100	0.794	128.00	0.460	0.006	74.156
T_{15}	1.781	2.205	1.025	134.20	0.808	0.008	105.751
T_{16}	2.128	2.100	1.138	133.00	1.013	0.009	118.430
T_{17}	1.325	2.500	1.121	154.00	0.530	0.007	72.810
T_{18}	1.848	2.625	0.962	132.50	0.704	0.007	96.965
T_{19}	1.587	3.045	0.841	132.00	0.521	0.006	81.803
T_{20}	2.518	3.360	1.171	133.80	0.749	0.009	85.628
T_{21}	1.192	2.625	0.768	152.80	0.454	0.005	90.346

2.2 风洞模拟试验

2.2.1 流场特征

图5显示了不同风速下无沙障时的风速廓线，其遵循对数分布，风速与高度之间的关系可以用回归方程表示：

$$u_z = a + b \cdot \ln z \quad (4)$$

式中：u_z为高度z cm处的风速，单位m·s^{-1}；z为高度，单位cm；a和b是回归系数。拟合优度R^2均大于0.93，所有回归关系均具有统计学意义（P<0.001）。

图6展示了6、10、14、18、22 m·s^{-1}风速下刷状葵骨沙障周围边界风速的变化，负风速代表逆风气流的出现。当沙障存在时，流场经历了强烈的干扰。当气流接近沙障时，呈现拥挤的向上爬行趋势。在所有第1个障格的顶部出现了倾斜向上的加速喷射

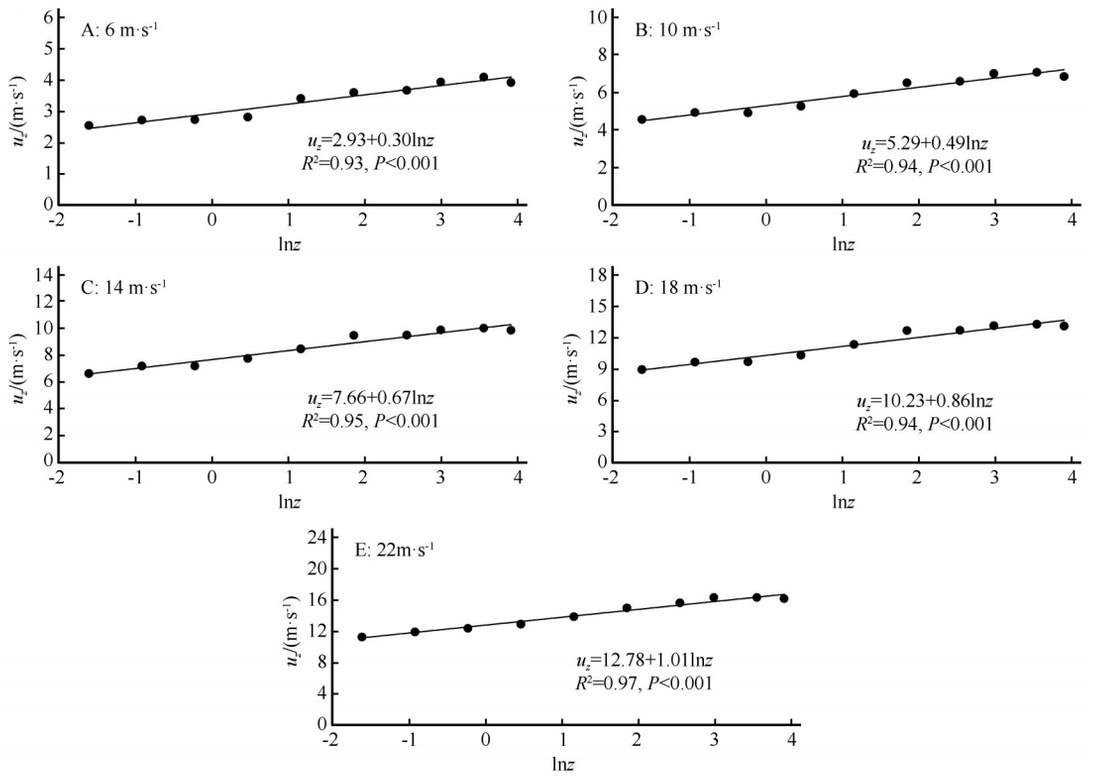


图 5　无沙障时风速廓线

Fig.5　Wind speed profiles without sand barrier

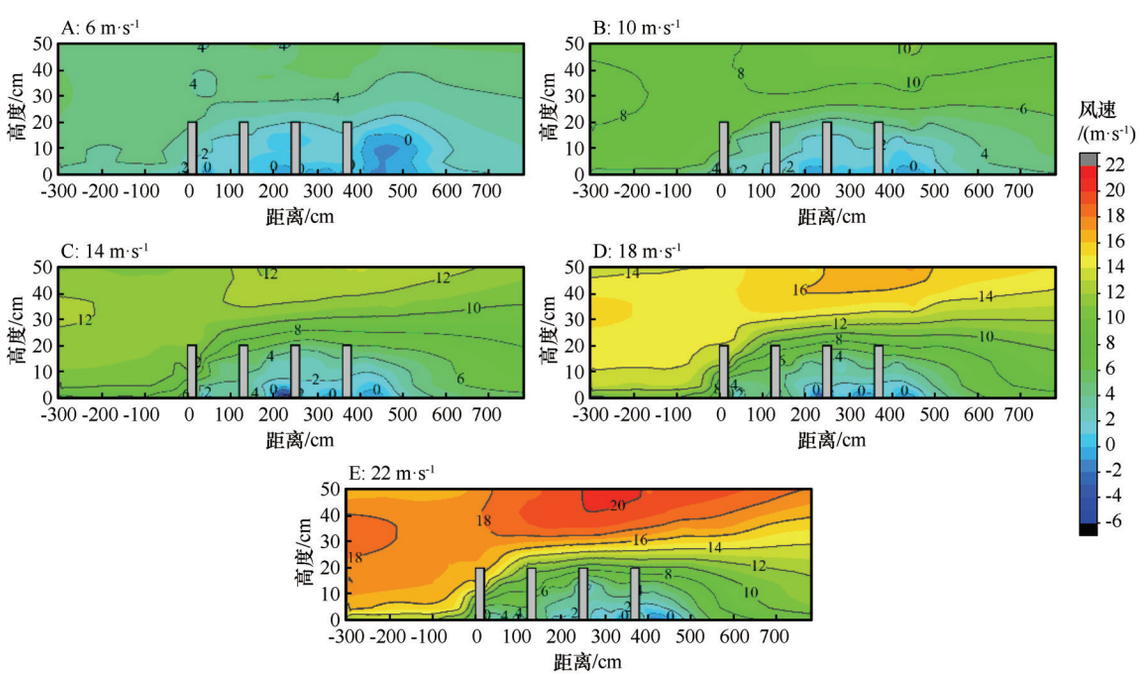


图 6　不同风速下刷状蒺藜沙障流场

Fig.6　Flow field of the brush Kuigu barriers under different wind speeds

流，在沙障高度以下，都有一个很大的减速区。气流经过沙障，风速逐渐被消减，直到在第 3 个障格后一段距离，风速降低幅度开始减弱，随着距离增加趋于稳定。最明显的减速发生在第 2 个障格内至第 3 个障格后（x=200~500 cm）。随着风速增加，沙障的减速区域有所减少。

不同风速下，刷状蒺藜沙障整体防风效能可分为 3 个部分（图 7）。防风效能增加阶段（x=−300~

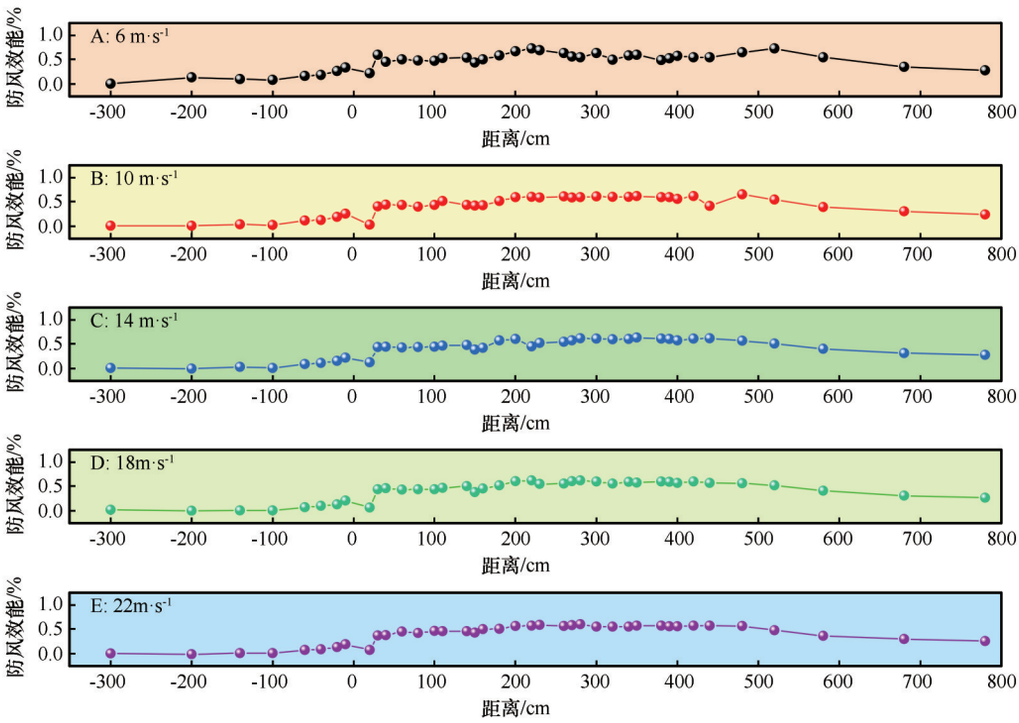


图7 不同风速下刷状蒺藜沙障防风效能

Fig.7 Windbreak efficiency of the brush Kuigu barriers under different wind speeds

30 cm)：防风效能先是在x=−300~−10 cm范围缓慢提升18.7%~33.7%，而后在x=−10~20 cm范围下降9.9%~22.4%，最后在x=20~30 cm范围内快速提升29.3%~37.8%；防风效能波动阶段(x=30~520 cm)：防风效能在36.2%~72.4%范围内平稳波动；防风效能下降阶段(x=520~780 cm)：防风效能逐渐下降22.4%~44.9%直至稳定。

2.2.2 风沙流结构特征

风速6 m·s^{-1}时，集沙仪未收集到沙粒，输沙率整体为0 g·cm^{-2}·min^{-1}。其余风速下，无沙障时输沙率随高度增加而减少，最大输沙率在最靠近沙面部分，刷状蒺藜沙障可显著降低沙障高度以下输沙率(图8)。

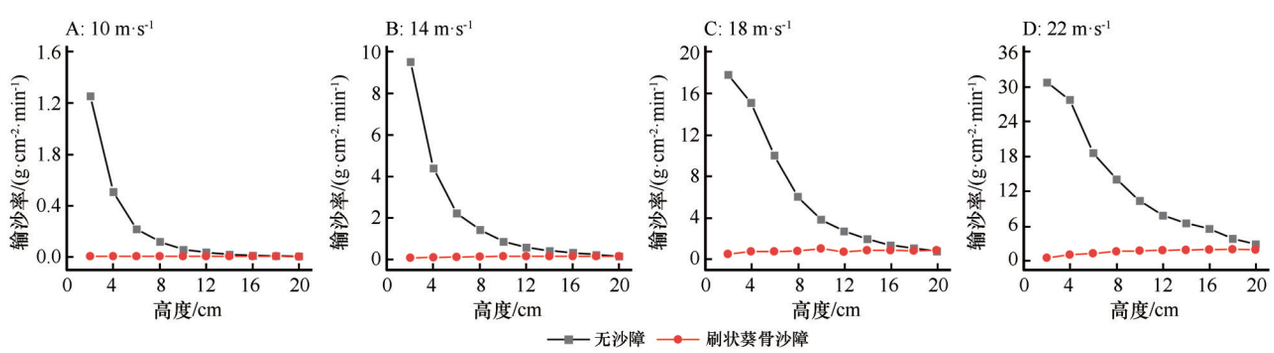


图8 不同风速下输沙率分布

Fig.8 Sediment flux density profiles under different wind speeds

在10、14、18、22 m·s^{-1}风速下，没有沙障干扰时，输沙率随高度增加呈指数减少趋势(图9)，拟合曲线公式为：

$$q_z = c + d\cdot\exp(-z/f) \quad (5)$$

式中：q_z为高度z cm处输沙率，单位g·cm^{-2}·min^{-1}；z为高度，单位cm；c、d、f均为回归系数。表2展示了回归分析结果，拟合优度(R^2)均大于0.97，均有统计学意义(P<0.001)。

图10为布设刷状蒺藜沙障的风沙流结构。由于6 m·s^{-1}风速下，集沙仪未收集到沙子，因此没有获得拟合曲线。其余风速下，风沙流结构的拟合曲线除18 m·s^{-1}外均呈复杂的3次函数曲线分布，

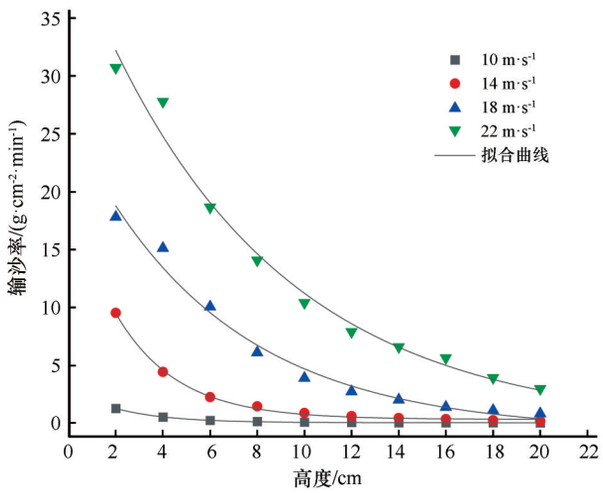


图 9　不同风速下无沙障输沙率拟合曲线

Fig.9　Fitted curves of sediment flux density without sand barriers under different wind speeds

10 m·s^{-1}风速呈下降趋势，14 和 22 m·s^{-1}风速呈增加趋势。拟合曲线公式为：

$$q_z = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (6)$$

式中：q_z为高度 z cm 处输沙率，单位 g·cm^{-2}·min^{-1}；z 为高度，单位 cm；a_0、a_1、a_2、a_3均为回归系数。表 3 展示了回归分析结果，除 18 m·s^{-1}风速外，其余风速拟合优度(R^2)均大于 0.96，均有统计学意义(P<0.001)。

表 2　无沙障输沙率拟合分析结果

Table 2　Fitted analysis results of sediment flux density without sand barriers

风速 /(m·s^{-1})	c	d	f	R^2	P
10	0.016	3.046	2.220	0.999	<0.001
14	0.308	19.738	2.604	0.998	<0.001
18	−0.734	26.879	6.234	0.979	<0.001
22	−0.339	42.165	7.721	0.981	<0.001

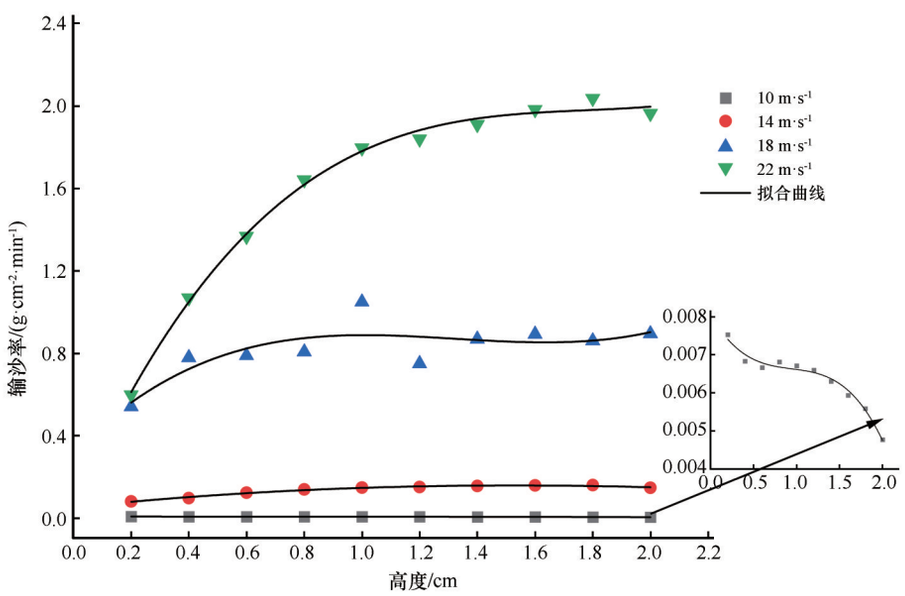


图 10　不同风速下刷状蒺藜骨沙障输沙率拟合曲线

Fig.10　Fitted curves of sediment flux density with the brush Kuigu barriers under different wind speeds

表 3　刷状蒺藜骨沙障输沙率拟合分析结果

Table 3　Fitted analysis results of sediment flux density with the brush Kuigu barriers

风速 /(m·s^{-1})	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2	P
10	0.008	−0.004	0.004	−0.001	0.967	<0.001
14	0.522	0.147	−0.055	0.003	0.981	<0.001
18	0.321	1.416	−1.134	0.286	0.474	>0.05
22	0.050	3.142	−1.737	0.326	0.994	<0.001

10、14、18 和 22 m·s^{-1}风速下固沙率分别为 97.2%、93.2%、86.5% 和 87.4%，固沙率均超过 86%，平均固沙率高达 91.1%，在刷状蒺藜骨沙障的阻挡效果下，总输沙率得到大幅下降(表 4)。

2.2.3　沙面蚀积状态变化

刷状蒺藜骨沙障障格内沙面蚀积状态变化如图 11 所示。风速 6 m·s^{-1}吹 20 min 无蚀积变化。其余风速下，第 1 个障格内积沙情况最严重，不同风速下积沙高度最高为 1.6 cm；第 2 个障格内沙面较为平稳，不同风速下蚀积范围分别为 0~0.4、−0.1~0.7、

表 4 总输沙率和固沙率

Table 4 Total sediment flux density and sand-fixing efficiency

风速 /(m·s^{-1})	无沙障时总输沙率 /(g·cm^{-2}·min^{-1})	刷状葵骨沙障总输沙率 /(g·cm^{-2}·min^{-1})	固沙率 /%	平均固沙率 /%
10	2.246	0.064	97.2	91.1
14	20.156	1.362	93.2	
18	60.853	8.235	86.5	
22	128.526	16.214	87.4	

−0.6~1.0、−0.2~0.9 cm；第 3 个障格内风蚀面积相较最大，不同风速下风蚀深度最高分别可达−0.2、−0.5、−0.3、−0.4 cm。

3 讨论

3.1 葵骨材料性能

葵骨由大叶蒲葵的叶脉制成，大叶蒲葵分布于中国东南部，适宜生长于肥沃、排水良好的土壤中，环境适应性较强[11]。蒲葵叶片的光能利用效率较高，具有较强的再生速率[18]，能够在适宜的生境中实现可持续收获。这些特性使得葵骨作为一种天然植物材料，兼具生态友好与资源可再生的双重优势，为其在风沙防治工程中的大规模应用奠定了良好基础。

葵骨的抗拉特性是一种重要的力学表现[19]，其断裂曲线分为瞬间断裂曲线和缓慢断裂曲线，与张东明等[20]研究结果一致。葵骨的杨氏模量反映其对抗弹性形变的能力[21]。徐得忠等[22]对比几种高寒草地草本植物根系强度，得出杨氏模量最大为冷蒿根系，有 6.111 GPa。石川等[23]对青藏高原的柠条锦鸡儿根系进行拉伸试验，其杨氏模量最大可达 2.393 GPa。葵骨杨氏模量经过试验测得为 78 GPa，远高于植物根系强度，其强度接近于铝及铝合金[24]。可见葵骨材料强度较高，具有较强的耐风水蚀性能，适宜用于制作固沙障。

相较于传统草方格沙障，刷状草方格沙障已实现机械化生产，生产出的沙障结构更结实，使用寿命也从 2~3 年提升至 6 年[15]。现已有稻草、麦草、芦苇、沙柳等植物材料制作而成的刷状沙障[15,25-26]，根据就地取材原则，珊瑚沙岛礁和沙质海岸固沙采用了东南沿海常见的葵骨材料，其强度高，获取方便，成本较低，制作而成的刷状葵骨固沙障可满足珊瑚沙岛礁和沙质海岸固沙要求。

3.2 刷状葵骨固沙障固沙效益

气流经过刷状葵骨固沙障时，受到三维刷状结构影响，产生许多小尺度湍流，风速得到减弱，在沙障内产生较大减速区，最明显的减速发生在第 2 个障格内至第 3 个障格后，与刷状草方格和刷状沙柳沙障流场相似[15,26]，展现出刷状结构沙障之间具有类似的削减风力效果。由于风速减弱，风沙流的携沙能力被大大削弱，能够跃过沙障的沙粒减少，大部分沙粒被留在沙障内部，起到固沙作用。从沙障防风效能可看出其对近地表风速的削减效果，刷状葵骨固沙障防风效能整体呈先增加再波动后减少的趋势，与刷状草方格防风效能趋势相同[15]，平均值在 39.1%~45.7%，可见在一定范围内刷状葵骨固沙障表现出良好的防风固沙效果。

以往经过沙障干扰的风沙流结构，沙障高度以下一般为指数递减趋势[25]，但在刷状葵骨固沙障的干扰下，不同风速的风沙流结构表现不同，在沙障高度下（0~20 cm），风沙流结构难以形成统一的分布。在加速喷射流[27]的作用下，许多沙粒在沙障的前方被吹起，被加速向上的气流夹带和输送到沙障上方，而后受到沙障干扰，风沙流能量减弱，沙粒分布又发生变化。在 10 m·s^{-1}较低风速下，风沙流能量本身较弱，受到沙障减速，导致沙障后方风沙流结构中沙子主要分布于较低高度，而在 14 m·s^{-1}和 22 m·s^{-1}风速下，风沙流能量变强，能携带更多沙子，导致沙障后方风沙流结构中沙子主要分布于较高高度。

沙粒主要集中于刷状葵骨固沙障第 1 个障格，第 2 个障格内沙面较为平稳，在第 3 个障格内出现了风蚀现象。可见风沙流经过沙障，能量逐级损耗，沙粒逐级沉降，沙粒主要被第 1 格沙障所截留。不同风速下平均阻沙率高达 91.1%，高于刷状草方格沙障（84.1%）和刷状沙柳沙障（72.4%），可以看出刷状葵骨固沙障有很好的固沙效果，能将大量沙粒截留在沙障内部。

刷状固沙障拥有良好的固沙效益，并且生产过程实现机械化，大幅降本增效，推动了大规模、标准化治沙。以机械化生产线为核心的制造体系，能够快速、精准地生产出规格统一的沙障构件，不仅直接压缩了成本，更关键的是保障了沙障质量的稳定

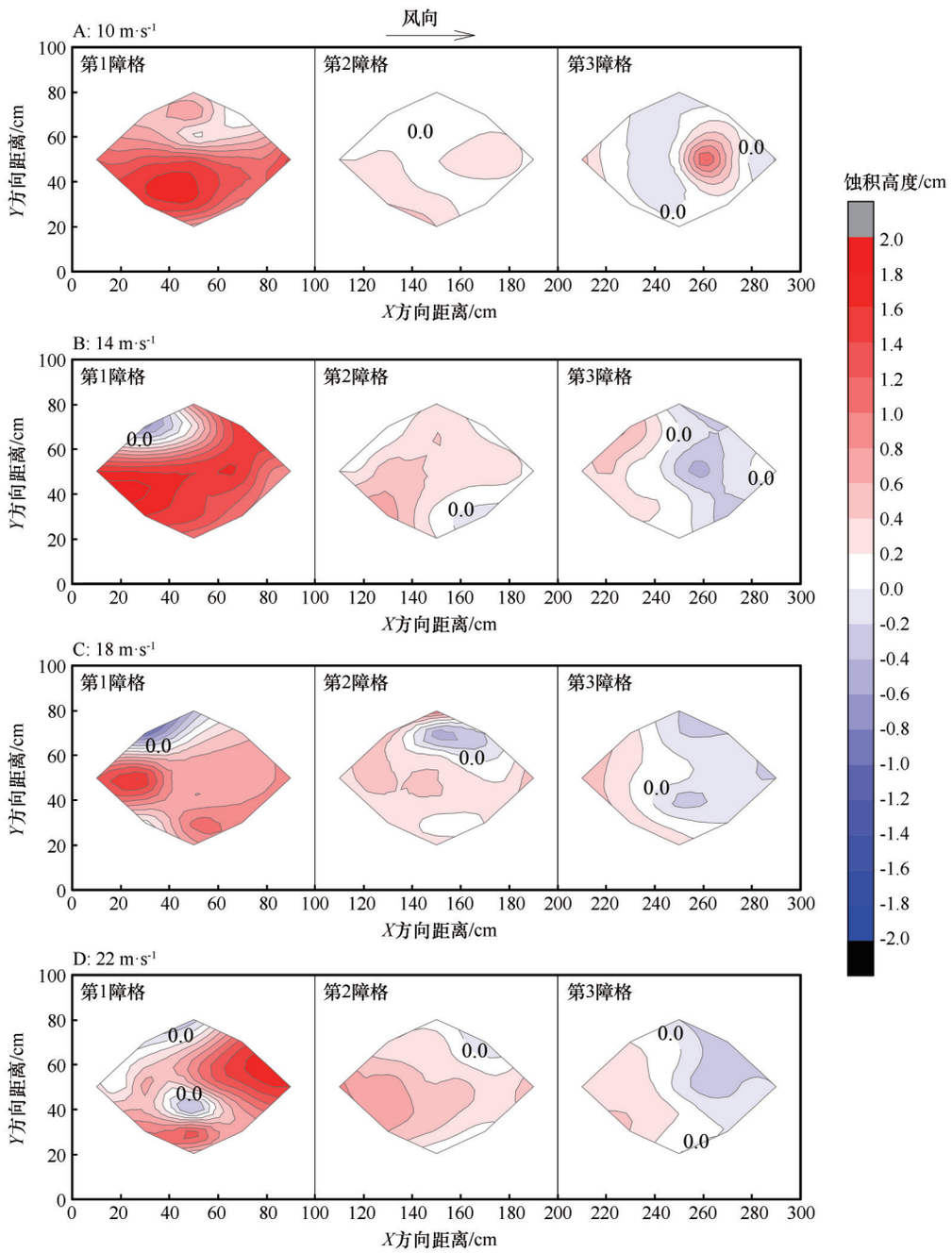


图 11　不同风速下沙障蚀积状态变化

Fig.11　The change of erosion or deposition status inside the brush Kuigu barriers under different wind speeds

性和耐久性，为风沙防治工程的长期效果奠定了坚实基础。施工过程正向人机协同方向迈进——在标准化环节引入轻便机械辅助，在关键决策与精细处理中保留人工优势。这种渐进式的改良，既延续了传统经验的智慧，也为后续有条件、分步骤的机械化转型积累实地数据与操作经验，推动施工方式向更高效、更人性化的方向平稳演进。一般情况下，刷状固沙障使用麦草秸秆，制成刷状麦草固沙障。而通过因地制宜和就地取材策略，可结合不同区域形成不同材料刷状固沙障，大大减少了运输成本。新疆盛产芦苇，可制成刷状芦苇沙障；内蒙古沙柳分布较多，可形成刷状沙柳沙障；沿海地区蒲葵分布广泛，通过将其叶脉制成葵骨，可得到刷状葵骨固沙障。综上所述，刷状固沙障在风沙防治工程中推广与应用前景广泛。

4　结论

葵骨断裂有瞬间断裂曲线和缓慢断裂曲线两

类，其杨氏模量较大，可达78 GPa，具有较强的抗拉性，强度较高。

气流经过刷状葵骨固沙障，风速逐渐被削减，直至在第3个障格后一段距离，风速降低幅度开始减弱，随着距离增加趋于稳定。最明显的减速发生在第2个障格内至第3个障格后（x=200~500 cm），防风效能整体呈先增加再平稳波动后减少的趋势。

10 m·s^{-1}风速下刷状葵骨固沙障风沙流结构呈3次函数下降趋势，14和22 m·s^{-1}风速下呈3次函数增加趋势。葵骨沙障阻沙率均高于86%，平均阻沙率高达91.1%。

刷状葵骨固沙障的第1个障格内积沙情况最严重，第2个障格内沙面较为平稳，第3个障格内侵蚀面积相对最大，沙粒主要被第一格沙障所截留。

刷状葵骨固沙障材料性能强，固沙效果好，经济环保，施工效率高，具有广泛的推广与应用前景。

致谢：感谢中国科学院西北生态环境资源研究院的王振亭研究员和杨婉佳博士对拉伸试验的帮助，感谢中国科学院西北生态环境资源研究院的赵爱国高级工程师团队对风洞模拟试验的帮助。

参考文献：

[1] 王涛.中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的70年：I.初创篇[J].中国沙漠，2022，42(1)：1-4.

[2] 吴正等.风沙地貌与治沙工程学[M].北京：科学出版社，2003.

[3] 张志山，赵洋，牛清河，等.机织沙障与人工结皮协同增效固沙技术体系：沙坡头模式2.0版[J].中国沙漠，2025，45(3)：21-30.

[4] 吴正，吴克刚.中国海岸风沙研究的进展和问题[J].地理科学，1990，10(3)：230-236.

[5] 李娜，屈建军，安兰兰，等.中国沙质海岸风沙防治研究进展[J].中国沙漠，2025，45(2)：217-224.

[6] 赵焕庭，王丽荣，袁家义.南海诸岛珊瑚礁可持续发展[J].热带地理，2016，36(1)：55-65.

[7] 崔鹏伟，戴好富，朱安红.南海岛礁生态现状、保护与发展策略[J].热带作物学报，2023，44(9)：1917-1924.

[8] IPCC. Climate change 2021：the physical science basis[R]. Cambridge，UK：Cambridge University Press，2021.

[9] 王彦希，屈建军，沈城，等.雷州半岛灯楼角砂质海岸的侵蚀及防治[J].中国沙漠，2025，45(1)：10-19.

[10] 赵中伟，赵璇，陈天然，等.西沙群岛珊瑚礁2015-2023年间海岸地貌演化与其区域海洋环境特征的关联性研究[J].热带海洋学报，2025，44(4)：25-44.

[11] 徐龙，贺鹏程，张统，等.不同原生境的6种棕榈科植物叶片水力性状的对比研究[J].热带亚热带植物学报，2020，28(5)：472-478.

[12] 罗行斌，王宁，苟琼友，等.蒲葵再生纤维素纤维纺丝工艺及形态探讨[J].棉纺织技术，2017，45(12)：9-13.

[13] 陈振益.新会侨乡传统葵艺采风纪实及研究：兼论葵艺的传承发展之路[J].美术大观，2014(4)：74-75.

[14] 欧阳湘.20世纪50年代新中国在港澳地区开展的市场争夺战[J].党的文献，2014(2)：71-78.

[15] 屈建军，王涛，牛清河，等.刷状草方格固沙障机织工艺与防沙效果研究[J].中国科学：技术科学，2024，54(8)：1601-1610.

[16] 屈建军，柳本立，孟晨，等.防沙障用刷状葵骨草绳生产装置：CN202320556235.3[P].2023-03-20.

[17] 朱志昊，屈建军，赵爱国，等.两种形状镁水泥板沙障防风积沙效益的风洞试验[J].中国沙漠，2024，44(2)：1-10.

[18] 高传友.广西地区常见棕榈科植物光合特性研究[J].水土保持研究，2016，23(2)：183-188.

[19] 张乔艳，唐丽霞，潘露，等.基于根系化学组成的抗拉力学特性分析[J].南京林业大学学报(自然科学版)，2020，44(1)：186-192.

[20] 张东明，藉俊杰，张奋飞，等.谷子枝梗断裂特性与拉伸试验研究[J].农机化研究，2022，44(2)：156-161.

[21] 段继琪，李建兴，王波，等.4种消落带适生草本根系抗拉特性及与微观结构的关系[J].水土保持研究，2024，31(6)：130-138.

[22] 徐得忠，张旭，陈耀，等.鄂陵湖区高寒草地草毡层草本植物单根抗拉力学特性试验[J].水土保持通报，2024，44(6)：1-11.

[23] 石川，梁燊，刘亚斌，等.青藏高原东北部黄土区灌木柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性研究[J].水土保持研究，2023，30(5)：184-192.

[24] Amirkhanlou S，Ji S X.Casting lightweight stiff aluminum alloys：a review[J].Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences，2020，45(3)：171-186.

[25] 朱志昊.刷状草沙障防风固沙效益及对土壤功能恢复的影响研究[D].银川：宁夏大学，2024.

[26] 姚正毅，屈建军，肖建华，等.刷状沙柳沙障固沙性能风洞模拟[J].中国沙漠，2024，44(3)：290-297.

[27] Hesp P A，Smyth T A G.Jet flow over foredunes[J].Earth Surface Processes and Landforms，2016，41(12)：1727-1735.

Material performances and sand-fixing benefits of brush Kuigu barriers

Qu Jianjun[1,2], Zhu Zhihao[2], Peng Huaiwu[3], Li Yujin[3]

(1.*Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou* 511458, *China*; 2.*College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an* 710127, *China*; 3.*POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an* 710100, *China*)

Abstract: Affected by global extreme climate, the sandy coasts and coral sand islands and reefs in the South China Sea suffer severe erosion from wind and water. There is an urgent need to adopt effective sand barriers inspired by the straw checkerboard barriers used inland. However, traditional sand-fixing materials such as wheat straw and other crop residues are difficult to apply in the harsh marine environment. To address this, the authors propose the use of "Kuigu" (the palm leaf veins), a locally sourced material known for its erosion resistance and abundance in tropical and subtropical zones, as an alternative to traditional wheat straw. This leads to the development of a three-dimensional brush sand barrier made from Kuigu, suitable for stabilizing sandy coasts and coral sand islands and reefs. The material's mechanical strength was assessed via tensile testing, and its sand-fixing benefit was evaluated through wind tunnel simulations measuring flow field characteristics, wind-sand flow structure, and erosion-deposition patterns. Key findings include: (1) The Young's modulus of Kuigu is large, up to 78 GPa, with strong tensile resistance and high strength. (2) The brush Kuigu barriers created a significant deceleration zone. The most pronounced reduction in wind speed occurred from the second barrier to the area behind the third barrier (x=200−500 cm downwind). Overall windbreak efficiency initially increased, fluctuated steadily, and subsequently decreased with distance. (3) Under different wind speeds, the brush Kuigu barriers demonstrated consistent effectiveness in sand-fixing through wind-sand flow structure, achieving an average sand-fixing efficiency of 91.1%, with the majority of sand intercepted within the first barrier. To sum up, the brush Kuigu barrier demonstrates strong wind and water erosion resistance, high sand-fixing efficiency, local sourcing, cost-effectiveness, environmental sustainability, and high construction efficiency, making it suitable for widespread application in sand control on sandy coasts and coral sand islands and reefs.

Key words: Kuigu; brush sand barrier; tensile test; wind tunnel simulation test