



刷状草方格固沙障机织工艺与防沙效果研究

屈建军^{1,2,3}, 王涛^{2*}, 牛清河², 柳本立², 谭立海², 肖建华², 殷代英²

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 干旱区生态安全与可持续发展国家重点实验室, 兰州 730000;

3. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

* E-mail: wtao1214@lzb.ac.cn

收稿日期: 2023-09-05; 接受日期: 2024-03-01; 网络版发表日期: 2024-08-07

南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项项目(编号: GML2019ZD0601)、中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA23060201)、国家自然科学基金(批准号: 41730644)、甘肃省自然科学基金(批准号: 22JR5RA050)和中国科学院青年创新促进会会员项目(编号: 2023448)资助

摘要 草方格固沙障因其固沙效果好、成本低廉且环保的特点, 被认为是中国乃至世界各地防沙治沙的最有效方式, 亦被称为“中国魔方”。但长期以来, 草方格沙障的施工方法未得到改进, 依然需要有经验的工人利用铁锹将麦草扎入沙地中, 形成半隐蔽式草方格, 这一过程耗时耗力, 不能满足当前我国防沙治沙事业提质增效的新时代要求。本文研制了一种将麦草通过机械编织而成的刷状草方格固沙障, 使草方格沙障施工效率提高60%以上。通过对刷状草方格固沙障防沙效果开展系统的风洞实验和野外观测研究发现: (1) 与传统草方格沙障相同, 刷状草方格固沙障内部形成了明显的气流减速区和流向涡旋, 沙障顶部出现了明显的抬升气流。当风速低于 20 m s^{-1} 时, 固沙障可使地表风速降低80%以上; (2) 刷状草方格与传统草方格沙障对风沙流的扰动作用相同, 沙障内输沙率随高度变化不再遵循指数递减规律, 输沙率随高度增加先增大后减小, 在沙障顶部出现最大值; (3) 刷状草方格固沙障固沙效率(R_s)随风速的增大线性减小, 但在一般沙漠地区 R_s 可达到90%以上。刷状草方格有望替代传统草方格固沙障, 减轻劳动强度, 提高施工效率, 为草方格沙障的机械化编织和智能化施工提供技术支撑。

关键词 草方格沙障, 沙漠化治理, 风沙流, 防沙工程, 风洞实验

1 引言

19世纪80年代末, 里海东岸铁路风沙防治工程在紧靠铁路路基处, 利用芦苇方格阻挡流沙入侵和防止路基风蚀, 这可能是最早用芦苇方格固沙的记载^[1]。1956年包兰铁路建设过程中, 俄罗斯治沙专家彼得洛夫院士根据里海铁路防沙工程中使用半隐蔽芦苇方格

沙障的经验, 建议利用中卫当地的麦草, 通过人工踩铁锹的方法, 将平铺麦草沿中部扎入沙地中, 形成直立的半隐蔽式麦草方格沙障^[2]。老一代治沙工作者反复实验发现, 麦草方格沙障既保护了沙生植物不被风蚀沙埋, 又防止了就地起沙^[3]。腾格里沙漠包兰铁路沙坡头实验路段最终采用以草方格固沙、树枝阻沙的“以固为主、固阻结合”的治沙模式(图1(a)), 取得了显著的

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1601–1610
Qu J J, Wang T, Niu Q H, et al. Study on weaving technology and sand control effect of brush straw checkerboard barriers (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1601–1610, doi: 10.1360/SST-2023-0282

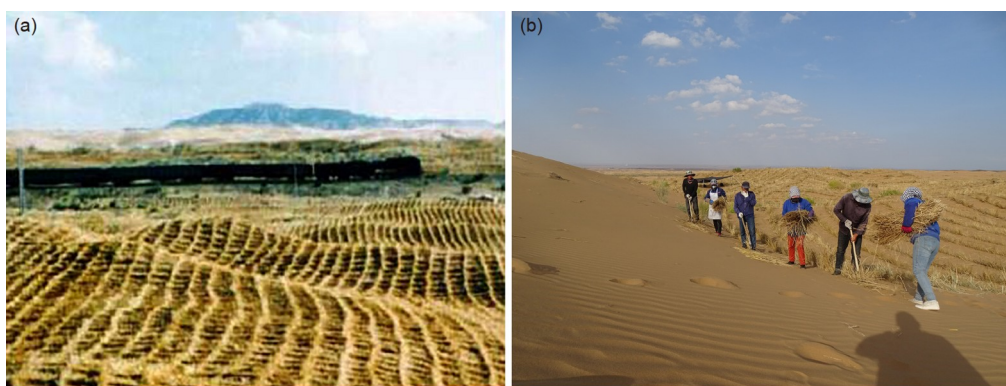


图1 (网络版彩图) (a) 包兰铁路腾格里沙漠段铺设的草方格沙障; (b) 工人扎设草方格沙障

Figure 1 (Color online) (a) Straw checkerboard barriers laid in the Tengger Desert section of the Baotou-Lanzhou Railway; (b) workers install straw checkerboard barriers.

固沙效果^[4], 确保了包兰铁路安全运营. 这一成果和技术在1984年获得国家科技进步特等奖. 自1956年之后, 70年多来, 人们一直沿用人工扎制草方格沙障的方法, 进行防风固沙. 麦草方格沙障因其成本低廉且环保的特点, 被认为是中国乃至世界各地治沙的最有效方式^[5], 亦被称为“中国魔方”. 但它的不足之处是, 在施工过程中需要有经验的工人利用铁锹将麦草扎入沙地中(图1(b)), 形成半隐蔽式沙障. 这一过程耗时耗力, 据统计两人一天最多只能扎设3.6亩草方格沙障. 目前主要的轧制工人是以经验为主的中老年群体, 轧制工人愈来愈缺乏. 21世纪以来, 尽管我国荒漠化和沙化土地面积持续减少, 但荒漠化和沙化状况依然严重. 目前全国沙化土地面积达 $172.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 仍有 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 未得到有效治理(《第五次中国荒漠化和沙化状况公报》), 治理速度 $19.8 \times 10^4 \text{ hm}^2 \text{ a}^{-1}$, 沙漠化治理还需150年, 全国防沙治沙形势依然十分严峻. 因此, 迫切需要研发可替代人工劳动的机械化草方格施工工艺和机织设备. 受草绳和瓶刷的启发, 本文研制了一种将草绳夹带麦草通过机械编织而成的刷状草方格固沙障^[6], 实现了麦草方格沙障的机织化生产. 机织草方格能减轻劳动强度、提高生产和施工效率, 并适应复杂沙丘地形施工.

草方格沙障具有非常好的固沙效果, 其固沙原理主要表现在以下三个方面. 首先, 草方格沙障的粗糙元作用, 使地表空气动力学粗糙度增大成百上千倍, 提高摩阻起沙风速, 从而降低风沙流强度^[7,8]; 其次, 草方格沙障可拦截地表跃移沙粒, 使输移沙粒遇阻沉积, 沙面由风蚀变为堆积^[9]; 第三, 草方格沙障改变近地表

流场, 沙障边缘风速降低至沙粒起动阈值以下, 形成一个阻滞和旋涡减速区, 使沙粒发生沉降堆积. 而方格中间风速恢复增强, 沙面发生风蚀. 沙障内部的这种气流场格局, 最终使草方格内逐渐形成蚀积凹曲面^[10,11], 而稳定凹曲面的形成则是草方格沙障固沙作用的关键. 沙漠地表, 风沙流中90%运动沙粒集中在近地表30 cm高度范围内, 其中80%集中在0~10 cm^[12]. 因此, 草方格沙障高度一般设置为20~30 cm. 前人通过不断的探索和试验发现, 1 m×1 m规格草方格沙障的固沙效果最好, 同时, 材料和施工成本也相对较低^[11,13].

相较于传统的草方格固沙障, 刷状草方格固沙障在施工效率上, 比过去人工扎设草方格提高60%以上. 然而, 刷状草方格固沙障防风固沙效率较之传统草方格固沙障如何? 目前还未开展相关研究. 本文通过对刷状草方格固沙障防沙效果的系统风洞模拟实验和野外观测研究, 旨在为防沙工程的优化设计及其实际应用提供理论依据和技术支撑.

2 材料与方法

2.1 刷状草方格固沙障的编织工艺和施工流程

该发明的机械原理是利用两条草绳夹持草帘通过机械旋转, 最终形成像毛毛虫一样的刷状草绳^[14]. 先是制作草帘, 将干的散装麦草或稻草通过中间固定聚合线聚拢固定成草帘, 每段草帘长度约10 m, 宽度为20~25 cm. 然后制作固结草绳, 使用通用的草绳制作设备制作, 草绳直径2.5~3.5 cm, 每段草绳长度同样约为10 m, 直径为2.5~3.5 cm. 将同等长度的草绳和草帘

通过专用设备聚合为一体, 制作成多段刷状草绳. 具体生产过程是通过上下两根草绳夹持草帘输入转筒装置(图2(a)), 然后将草绳和草帘同时用专用扭转设备拉出. 草绳紧贴在草帘中间, 经过转筒拧结、轨道牵引, 使草绳和草帘合为一体. 最终, 一条由草绳拧结草帘而成的, 长约10 m的刷状草绳被生产出来, 刷状草绳直径为20~25 cm. 由机械装置生产的一条条刷状草绳被运往治沙区, 再由工人将刷状草绳铺设在沙地上. 将刷状草绳按照草方格网状铺设, 相互交叉固定成方格网, 无需压埋(图2(b)).

传统人工扎设草方格治沙技术机械化水平低, 导致施工效率低下, 每人每天最多扎设1.8亩草方格. 同时, 草方格使用寿命短, 一般2~3年便风蚀腐烂^[8], 固沙前期需补充扎设2~3次, 过度消耗人力物力. 刷状草方格技术机械化程度高, 刷状网绳生产装置操作简单, 易学易用, 刷状草方格野外铺设省时省力, 每个工人每天平均可铺设3亩刷状草方格, 工作效率比传统人工扎设草方格提高60%以上. 生产的刷状网绳麦草密集粗壮, 埋入沙土中不易腐烂、损坏, 可以连续使用5年以上^[6], 便于大面积的防沙固沙, 沙漠化治理成本也随着治理规模的增大而大幅降低.

2.2 风洞实验设计与模型布设

在中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头沙漠试验研究站风沙环境风洞内开展了刷状草方格流场和固沙效率风洞模拟实验, 风洞大小及测量参数见参考文献^[15]. 刷状草方格模型大小设置为1 m×1 m, 高度设置为20 cm. 在风洞实验段入口下风向12~15.8 m处, 设置3组刷状麦草方格沙障. 共设计4组实验风速,

分别为8, 12, 16和20 m s⁻¹.

利用毕托管进行风速测量(图3(a)), 共11个测量高度, 分别为 $z = 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3, 6, 12, 20, 35, 50$ 和60 cm. 沿风洞实验段中线和来流方向, 对模型内外不同位置风速廓线进行移动测量, 共38个测量点, 即 $x = -2, -1.4, -1, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.7, 2.8, 3, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.9, 4, 4.2, 4.4, 4.8, 5.2, 5.8, 6.8$ 和7.8 m(x 为距第一方格沙障前沿的距离, 负值为距第一方格沙障前沿上风向测点, 正值为下风向测点). 风速采集频率设置为0.5 s, 每个测量点采集时间设置为30 s, 取采集风速的平均值. 利用38个测量点的风速廓线数据, 在Origin 2021制图软件中绘制刷状草方格流场图, 所用插值方法为双线性插值法. 沙障前后不同位置风速减弱率计算公式如下^[16]:

$$R_{(x,z)} = \left(1 - \frac{u_{(x,z)}}{u_{0(x,z)}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中, $u_{(x,z)}$ 是不同测量点各对应高度处风速, 单位m s⁻¹; $u_{0(x,z)}$ 是未受刷状草方格干扰时各对应高度处的风速, 统一使用沙障上风向2 m处风速, 单位m s⁻¹.

输沙量测量过程中, 在距离风洞实验段入口1 m处铺设沙床, 沙床长14 m, 宽1.2 m, 厚0.1 m, 沙粒粒径介于0.075~0.5 mm. 为保证测量过程中供沙充足, 每次测量之前补充沙量并平整沙面. 输沙量测量使用垂直梯度集沙仪(图3(b)), 集沙仪高60 cm, 每1 cm高度设置一个集沙口, 集沙口内径为2 cm. 集沙仪安装在刷状草方格下风向0.5 m处, 在8, 12, 16和20 m s⁻¹实验风速下, 输沙量采集时长分别为20, 10, 5和2 min. 对不同高度集



图2 (网络版彩图) (a) 刷状草绳机织生产现场; (b) 刷状草方格固沙障铺设过程

Figure 2 (Color online) (a) Process of machine preparation of brush straw rope; (b) laying process of brush straw checkerboard barriers.

沙盒中收集的沙量进行称重, 再除以集沙口面积和测量时间, 便可得到不同高度输沙率(Q_z). 不同高度 Q_z 之和为总输沙率(Q_t), 刷状草方格的固沙效率(R_s)计算使用以下公式:

$$R_s = \left(1 - \frac{Q_{tf}}{Q_{tg}}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中, Q_{tg} 是未布设刷状草方格时的总输沙率, 单位 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Q_{tf} 是布设刷状草方格后的总输沙率, 单位 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

2.3 试验示范与野外观测

为了进一步验证刷状草方格固沙障在野外的实际

固沙效率, 2020年4月, 在腾格里沙漠南缘沙坡头地区的流动沙丘上布设了刷状草方格固沙障(图4), 开展试验示范研究. 2021年4月28日和29日, 对示范区内刷状草方格固沙障开展了固沙效率观测. 沿主风向(NW)在固沙带上风向、第5方格、第21方格和第43方格各布设一个平口式集沙仪(图4). 固沙带上风向观测点位于丘间低地, 地势较为平坦开阔, 作为对照观测点, 代表裸沙地表原始输沙量; 第5方格位于沙丘迎风坡坡脚; 第21方格位于沙丘迎风坡中下部; 第43方格位于沙丘迎风坡中上部. 按照深入固沙带的距离, 从空间上对比刷状草方格沙障的固沙效果. 观测期内风速、风向数据见表1.



图 3 (网络版彩图) (a) 不同位置风速测量; (b) 输沙量测量

Figure 3 (Color online) (a) Measurement of wind speeds at different positions; (b) measurement of sediment transport.

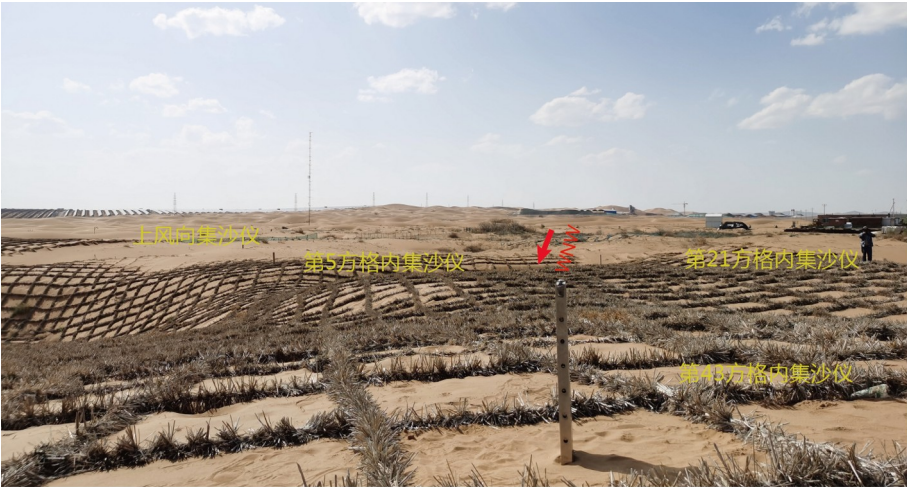


图 4 (网络版彩图)刷状草方格固沙障固沙效率野外观测照片

Figure 4 (Color online) Sand fixation efficiency of brush straw checkerboard barriers was measuring in the field.

3 结果

3.1 风洞实验

3.1.1 刷状草方格固沙障对气流场产生了强烈的扰动作用

由图5可知, 刷状草方格固沙障对气流场产生了强烈的扰动作用. 气流在沙障正前方遇阻, 沿沙障向上爬升, 在沙障顶部出现倾斜向上的抬升气流. 在刷状草方格内部及下风向, 方格高度以下出现气流减速区, 第2方格至下风向1.2 m处(1.4~5 m)出现反向气流, 形成涡旋. 在沙障下风向, 随距离的增加流场逐渐恢复, 减速区逐渐变小, 涡旋消失. 另外, 随实验风速的增加, 沙障内部及下风向气流减速区逐渐变小, 而沙障顶部抬升气流更加明显, 说明刷状草方格固沙障对气流的削弱作用随风速的增大而变小, 防护效果变弱.

计算刷状草方格高度以下各高度(0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3, 6, 12和20 cm)风速在不同测量点的平均减弱率 $R_{c(x,z)}$. 如图6所示, 随着距离刷状草方格固沙障距离的接近, $R_{c(x,z)}$ 逐渐增大, 在第2方格内 $R_{c(x,z)}$ 达到最大

值. 当实验风速为8, 12, 16和20 m s^{-1} 时, $R_{c(x,z)}$ 最大值分别为85.20%, 83.60%, 84.00%和81.58%. 在第3方格及下风向1.2 m范围内 $R_{c(x,z)}$ 基本保持稳定, 随后随距离的增加 $R_{c(x,z)}$ 逐渐降低.

3.1.2 刷状草方格输沙率及固沙效率

对比刷状草方格下风向不同高度输沙率与未布设草方格时沙床表面不同高度输沙率(图7). 与沙床表面相比, 刷状草方格高度以下输沙率明显减小, 刷状草方格下风向距地表20 cm高度范围内输沙率(q_z)接近 $0 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 而在刷状草方格高度以上, 由于沙障发挥了阻沙作用, 因此部分20 cm以下无法通过的沙粒随抬升气流进入到更高高度, 导致输沙强度有所增强. 沙障下风向20 cm高度以上输沙率较裸沙地表均有所增大, 且实验风速越大输沙强度越强, 从而导致沙障固沙效率随风速的增大而降低. 裸沙地表输沙率随高度增加指数递减(图7(a)~(d)), 而固沙方格下风向风沙流结构不再遵循指数递减规律. 根据式(2), 刷状草方格固沙

表 1 观测期内风速、风向数据

Table 1 Wind speed and direction data during the field observation period

日期	起止时间	观测时长	平均风速 (m s^{-1})	2 min平均最大风速 (m s^{-1})	风向
2021-04-28	09:20–18:00	8小时40分	5.46	7.53	WNW
2021-04-29	07:40–14:20	6小时40分	5.08	7.45	WNW

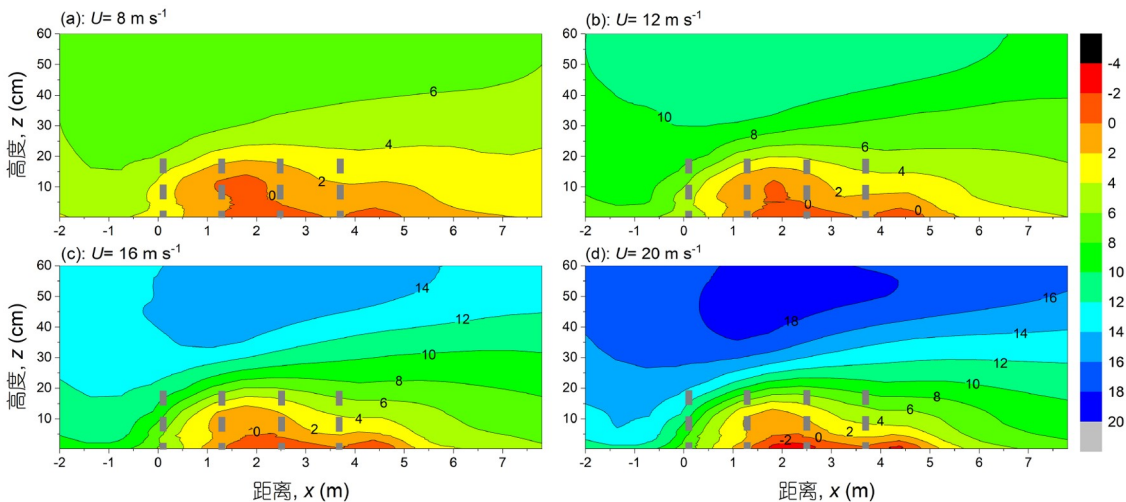


图 5 (网络版彩图)不同实验风速下刷状草方格固沙障流场图. (a) 8 m s^{-1} ; (b) 12 m s^{-1} ; (c) 16 m s^{-1} ; (d) 20 m s^{-1} .
Figure 5 (Color online) Flow field diagrams of brush straw checkerboard barriers under different experimental wind speeds. (a) 8 m s^{-1} ; (b) 12 m s^{-1} ; (c) 16 m s^{-1} ; (d) 20 m s^{-1} .

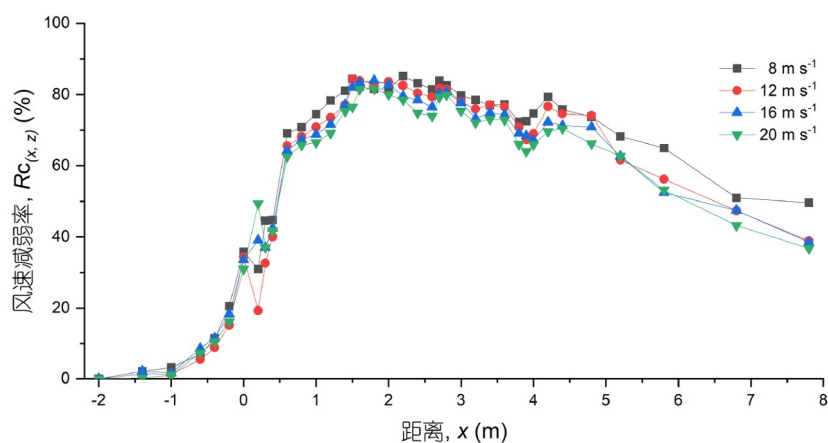


图 6 (网络版彩图)不同实验风速下的刷状草方格风速减弱率

Figure 6 (Color online) Wind speed reduction rates of the brush straw checkerboard barriers under different experimental wind speeds.

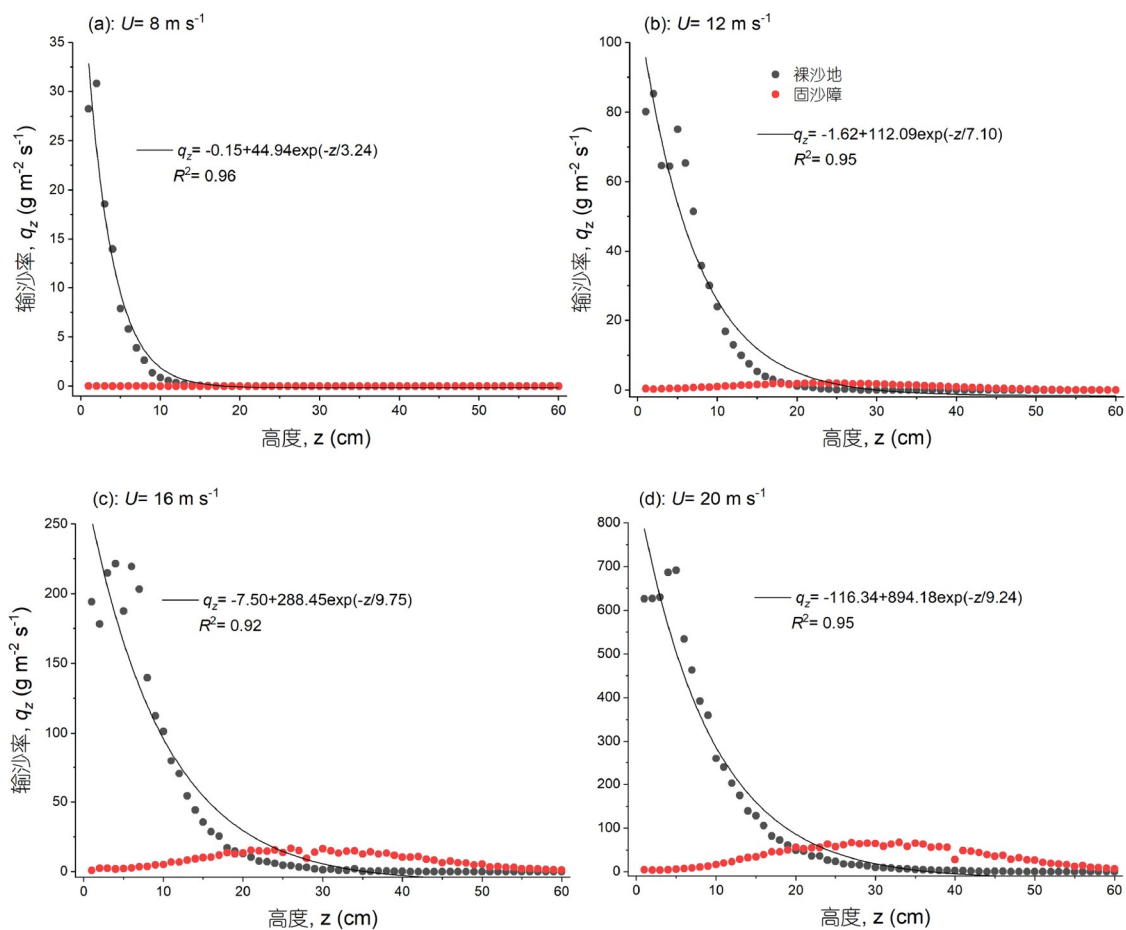


图 7 (网络版彩图)不同实验风速下刷状草方格上风向和下风向处不同高度输沙率. (a) 8 m s^{-1} ; (b) 12 m s^{-1} ; (c) 16 m s^{-1} ; (d) 20 m s^{-1}

Figure 7 (Color online) Sediment flux density profiles upwind and downwind of the brush straw checkerboard barriers under different experimental wind speeds. (a) 8 m s^{-1} ; (b) 12 m s^{-1} ; (c) 16 m s^{-1} ; (d) 20 m s^{-1} .

障在8, 12, 16和20 m s⁻¹四组实验风速下的固沙效率 R_s 分别为99.88%, 90.88%, 76.76%和68.78%, 平均值为84.08%. 拟合结果显示, 随风速的增大, R_s 线性减小(图8).

3.2 刷状草方格固沙效率野外观测

野外观测结果与风洞实验结果相似, 固沙带上风向流沙地表输沙率随高度增加指数递减, 而固沙方格内风沙流结构不再遵循指数递减规律(图9(a)和(b)). 固沙障高度以下输沙率明显减少, q_z 接近0 g m⁻² s⁻¹; 固沙障高度以上, 由于风速较小输沙率增加并不明显. 随着向固沙带内部的深入, 沙障固沙效率逐渐增大, 在第5, 21和43方格内, 刷状草方格固沙障固沙效率 R_s 分别为91.75%, 99.29%和98.26%, 平均值为96.43%(表2).

4 讨论

4.1 刷状草方格固沙障流场特征

草方格固沙障通过降低近地表风速和增加地表空气动力学粗糙度来阻止沙粒起动和传输[7,17]. 风洞实验结果表明, 刷状草方格固沙障在不同实验风速下, 方格内形成明显的减速区和流向涡旋, 这与传统草方格沙障内流场模拟结果一致[18]. 由于风速的降低, 气流携带的沙粒落入固沙障内, 能够飞越固沙障的沙粒减少, 而沙障内的沙粒也无法起动. 因此, 刷状草方格固沙障可以有效固定流沙. 流向涡旋搬运沙障内的沙

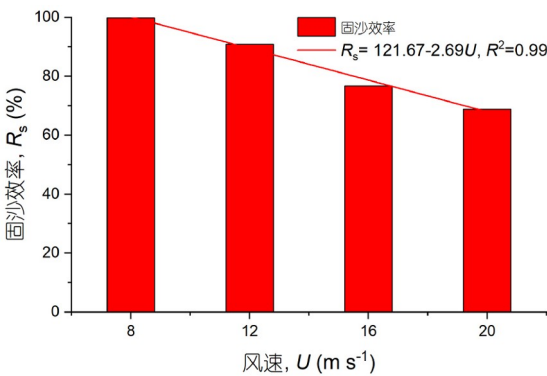


图 8 (网络版彩图)不同实验风速下刷状草方格固沙效率
Figure 8 (Color online) Sand stabilization efficiency of the brush straw checkerboard barriers under different experimental wind speeds.

表 2 刷状草方格固沙障固沙效率(R_s (%))

Table 2 Sand stabilization efficiency (R_s (%)) of the brush straw checkerboard barriers measured in the field

位置	2021-04-28	2021-04-29	平均值
第5方格	92.13	91.38	91.75
第21方格	99.22	99.36	99.29
第43方格	98.43	98.10	98.26

粒向四周运动, 重新沉积和分布, 最终在固沙障内部形成一个稳定的凹曲面[19]. 沙障顶部气流遇阻抬升[20], 在抬升气流的作用下, 一部分沙粒被携带至沙障上方传输. 另外, 随实验风速的增加, 沙障内气流减速区逐渐变小, 而沙障顶部抬升气流更加明显, 说明刷状草方

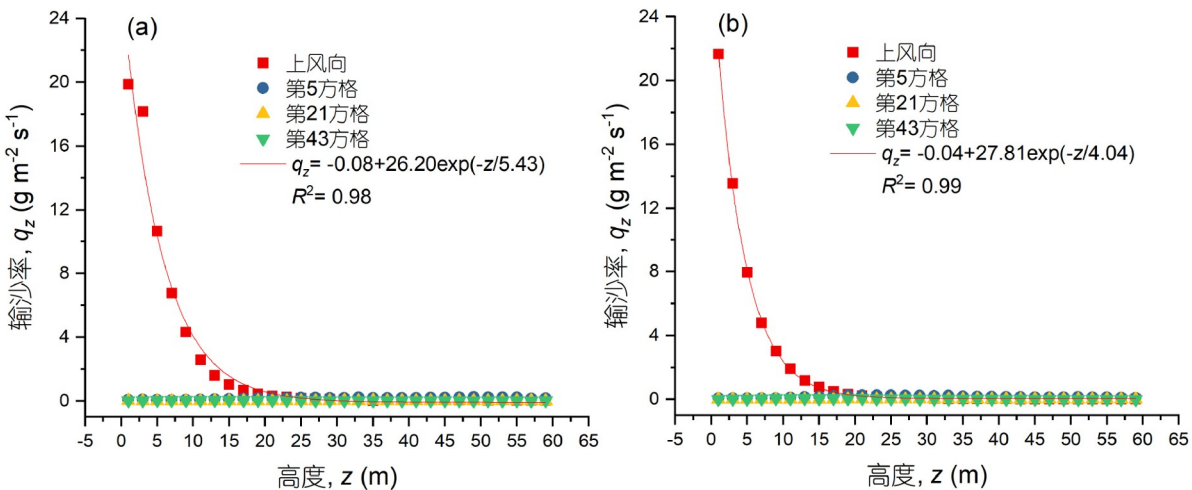


图 9 (网络版彩图)不同观测位置输沙率随高度变化曲线. (a) 2021年4月28日; (b) 2021年4月29日
Figure 9 (Color online) Sediment flux density profiles in different measurement points. (a) April 28, 2021; (b) April 29, 2021.

格固沙障对气流的削弱作用随风速的增大而变小, 防护效果逐渐变弱。但是, 在8, 12, 16和20 m s^{-1} 四组实验风速下, 刷状草方格固沙障的风速减弱率 $RC_{(x,z)}$ 均可达到80%以上, 而通常沙漠地区风速一般不会超过20 m s^{-1} 。因此, 新型刷状草方格固沙障适合沙漠地区的流沙固定。

4.2 刷状草方格固沙障固沙效果

风洞实验和野外观测结果均表明, 裸沙地表输沙率随高度增加指数递减, 这已被前人的研究证明^[21,22]。然而, 当铺设刷状草方格固沙障之后, 输沙率随高度变化不再遵循指数递减方程, 输沙率随高度增加先增大后减小, 在沙障顶部出现最大值。风洞实验^[23]和数值模拟^[10]结果也显示, 在传统的草方格沙障内部及下风向, 输沙率随高度变化表现出先增大后减小的趋势, 这与我们的风洞实验和野外观测结果一致。这一现象的出现, 是由于沙障的阻沙作用导致气流爬升引起的, 抬升气流将一部分沙粒携带至沙障上方传输, 导致输沙率增大。这同时也说明, 刷状草方格固沙障对风沙流的扰动作用与传统草方格沙障相同, 二者具有相同的固沙原理。

野外观测结果表明, 传统草方格沙障可使输沙强度降低99.5%^[17]; 数值模拟结果表明, 当风速为10.0 m s^{-1} 时, 设置4个草方格沙障, 仅有1.4%的沙粒被输送至固沙障下风向, 固沙效率为98.6%^[10]。风洞实验结果显示, 刷状草方格沙障固沙效率 R_s 随实验风速的

增大线性减小, 在8, 12, 16和20 m s^{-1} 四组风速下, R_s 分别为99.88%, 90.88%, 76.76%和68.78%, 平均值为84.08%。野外观测结果也表明, 当风速小于8 m s^{-1} 时, 刷状草方格固沙障内部平均 R_s 为96.43%。风洞实验和野外观测结果均表明, 刷状草方格固沙障与传统的草方格固沙障具有同样高的固沙效率。刷状草方格实现草方格沙障的工业化生产和施工, 提高草方格沙障野外布设和施工效率, 大幅度降低沙漠化防治成本。

5 结论

本文结合风洞实验和野外观测, 对新型刷状草方格固沙障固沙效果进行了研究, 主要得出以下结论。

(1) 流场测试结果显示, 与传统草方格沙障相同, 在刷状草方格固沙障内部形成了明显的气流减速区和流向涡旋, 在沙障顶部出现倾斜向上的抬升气流。在8, 12, 16和20 m s^{-1} 四组实验风速下, 刷状草方格固沙障的风速减弱率 $RC_{(x,z)}$ 均可达到80%以上。

(2) 沙障顶部抬升气流的存在, 使一部分沙粒被携带至沙障上方传输, 刷状草方格固沙障内输沙率随高度变化不再遵循指数递减规律, 输沙率随高度增加先增大后减小, 在沙障顶部出现最大值。

(3) 刷状草方格固沙障固沙效率 R_s 随风速的增大线性减小, 但在一般沙漠地区其固沙效率 R_s 可达到90%以上, 与传统的草方格固沙障具有同样高的固沙效率。

参考文献

- 1 Петров М П, Xu G Y. Fixation of Mobile Sands (in Chinese). Beijing: Chinese Forestry Press, 1960. 101–129 [M·П·彼得洛夫著, 徐国镒. 流沙的固定. 北京: 中国林业出版社, 1960. 101–129]
- 2 Chen S Y. Shadu Scattered Memories (in Chinese). Lanzhou: Gansu People's Press, 1990. 44–59 [陈舜瑶. 沙都散记. 兰州: 甘肃人民出版社, 1990. 44–59]
- 3 Liu Y X. The establishment and effect of protecting system along the Baotou-Lanzhou Railway in Shapotou sandy area (in Chinese). J Desert Res, 1987, 7: 1–11 [刘嫒心. 包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建议及其效益. 中国沙漠, 1987, 7: 1–11]
- 4 Zhang C, 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. Aeolian Res, 2016, 20: 59–70
- 5 Zheng X J. Mechanics of Wind-blown Sand Movement. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, 261–285
- 6 Qu J J, Zhang G X, Niu Q H, et al. A kind of brush straw checkerboard sand barrier (in Chinese). China Patent. Utility Model Patents, 2020, ZL201921445173.9 [屈建军, 张国祥, 牛清河, 等. 一种刷状草方格沙障. 中国专利. 实用新型专利, 2020, ZL201921445173.9]
- 7 Bo T L, Ma P, Zheng X J. Numerical study on the effect of semi-buried straw checkerboard sand barriers belt on the wind speed. Aeolian Res, 2015, 16: 101–107

- 8 Qu J J, Ling Y Q, Zu R P, et al. Study on comprehensive sand-protecting efficiency of semi-buried checkerboard sand-barriers (in Chinese). *J Desert Res*, 2005, 25: 329–335 [屈建军, 凌裕泉, 俎瑞平, 等. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究. *中国沙漠*, 2005, 25: 329–335]
- 9 Zhou N, Zhang C L, Tian J L, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments (in Chinese). *Geogr Res*, 2014, 33: 2145–2156 [周娜, 张春来, 田金鹭, 等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征. *地理研究*, 2014, 33: 2145–2156]
- 10 Huang N, Xia X P, Tong D. Numerical simulation of wind sand movement in straw checkerboard barriers. *Eur Phys J E*, 2013, 36: 1–7
- 11 Qu J, Zu R, Zhang K, et al. Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers. *Geomorphology*, 2007, 88: 193–200
- 12 Wu Z. *Geomorphology of Wind-Drift Sands and Their Controlled Engineering* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003. 61–352 [吴正. 风沙地貌与治沙工程学. 北京: 科学出版社, 2003. 61–352]
- 13 Wang Z T, Zheng X J. A simple model for calculating measurements of straw checkerboard barriers (in Chinese). *J Desert Res*, 2002, 22: 229–232 [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: 229–232]
- 14 Qu J J, Zhang G X, Tang X M, et al. Device for the production of straw checkerboard sand barriers from brush netting ropes (in Chinese). China Patent. Utility Model Patents, 2020, ZL202021394727.X [屈建军, 张国祥, 唐希明, 等. 草方格沙障用刷状网绳的生产装置. 中国专利. 实用新型专利, 2020, ZL202021394727.X]
- 15 Wang T. Formation mechanism and control of blown sand disaster in Gobi areas with strong winds along the Lanzhou-Xinjiang High Speed Railway (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. 1–112 [王涛. 兰新高铁戈壁大风区风沙灾害形成机理及防治研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2018. 1–112]
- 16 Cornelis W M, Gabriels D. Optimal windbreak design for wind-erosion control. *J Arid Environ*, 2005, 61: 315–332
- 17 Qiu G Y, Lee I B, Shimizu H, et al. Principles of sand dune fixation with straw checkerboard technology and its effects on the environment. *J Arid Environ*, 2004, 56: 449–464
- 18 Xu B, Zhang J, Huang N, et al. Characteristics of turbulent aeolian sand movement over straw checkerboard barriers and formation mechanisms of their internal erosion form. *JGR Atmos*, 2018, 123: 6907–6919
- 19 Tian L, Wu W, Zhang D, et al. Characteristics of erosion and deposition of straw checkerboard barriers in alpine sandy land. *Environ Earth Sci*, 2015, 74: 573–584
- 20 Hesp P A, Smyth T A G. Jet flow over foredunes. *Earth Surf Processes Landf*, 2016, 41: 1727–1735
- 21 Dong Z, Liu X, Wang X, et al. Experimental investigation of the velocity of a sand cloud blowing over a sandy surface. *Earth Surf Processes Landf*, 2004, 29: 343–358
- 22 Lv P, Dong Z. The status of research on the development and characteristics of mass-flux-density profiles above wind-eroded sediments: A literature review. *Environ Earth Sci*, 2014, 71: 5183–5194
- 23 Wang T, Qu J, Niu Q. Comparative study of the shelter efficacy of straw checkerboard barriers and rocky checkerboard barriers in a wind tunnel. *Aeolian Res*, 2020, 43: 100575

Study on weaving technology and sand control effect of brush straw checkerboard barriers

QU JianJun^{1,2,3}, WANG Tao², NIU QingHe², LIU BenLi², TAN LiHai², XIAO JianHua² & YIN DaiYing²

¹ Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

² Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

³ College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

Because of its low cost and environmental protection characteristics, the straw checkerboard barrier, revered as the “Chinese Rubik’s Cube,” is globally recognized as a highly effective method for controlling wind-blown sand owing to its cost-effectiveness and eco-friendly nature. However, it does have a downside: its construction process is labor-intensive and inefficient, requiring experienced workers to manually insert wheat straw into the desert, forming a semi-hidden checkerboard sand barrier. Herein, we introduce an innovative solution designed to address these challenges, namely a mechanically woven brush straw checkerboard barrier. This technology, made from wheat straw, has significantly increased the construction efficiency of straw checkerboard barriers by over 60%. Through both wind tunnel experiments and field observations, we examined the effects of this new brush straw checkerboard barrier on the control of wind-blown sand. Our findings were as follows. (1) Similar to the traditional straw checkerboard barrier, the brush straw checkerboard barrier creates a noticeable airflow deceleration zone and flow vortex inside it, along with a prominent lifting airflow at the top of the sand barrier. When the wind speed is less than 20 m s^{-1} , the sand barrier can reduce wind speed by over 80%. (2) The brush straw checkerboard barrier’s impact on wind-blown sand flow mirrors that of the traditional straw checkerboard barrier. As height increases, the sand transport rate within the barrier no longer follows an exponential decrease; instead, it initially rises before falling, reaching its peak at the top of the sand barrier. (3) The sand fixation efficiency (R_s) of the brush straw checkerboard barrier decreases linearly as wind speed increases. However, R_s can still achieve more than 90% in desert areas. These findings suggest that brush straw checkerboard barriers could potentially replace traditional straw checkerboard barriers. They not only reduce workers’ labor intensity but also improve construction efficiency. Therefore, this technology offers promising prospects for mechanized weaving and intelligent construction of straw checkerboard barriers.

straw checkerboard barrier, desertification control, wind-blown sand flow, sand control engineering, wind tunnel experiment

doi: [10.1360/SST-2023-0282](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0282)