

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.

刷状沙柳沙障固沙性能风洞模拟

姚正毅¹,屈建军^{1,2},肖建华¹,王茹燕³,韩胜利³,陆文赋⁴

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 2.西北大学 城市与环境学院,陕西 西安 710127;
3.内蒙古鄂尔多斯造林总场,内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4.宁夏大学,宁夏 银川 750000)

摘要:与传统的沙柳沙障人工逐根布设不同,刷状沙柳沙障采用机械编织形成,有类似拒马的外形,布设后稳定性好,也便于施工。对一种以沙柳枝条为原料的刷状沙障固沙性能进行了风洞模拟。结果表明:(1)在第1道沙障前风速略有降低,在第1、2、4道沙障处,风速增加较大。在经过每道沙障后,风速下降较大,形成一个降速区。(2)沙障正下方沙面多表现为侵蚀状态。迎风的第1道沙障,侵蚀现象最严重,随着时间推移,甚至发生掏蚀现象。沙障之间多处于堆积状态,第1格堆积最严重,其后堆积程度减弱。(3)沙障设置后,风沙流结构呈复杂的指数下降曲线。8、12、16、20 m·s⁻¹风速下的集沙量分别减少86.8%、81.6%、53.4%、67.8%。这表明刷状沙柳沙障有较好的固沙性能。由于沙障的扰动,沙物质向上飘散,使地表10~14 cm高度以上进沙口的集沙量有所增加。

关键词:沙柳;刷状沙障;风洞模拟;固沙

文章编号:1000-694X(2024)03-290-08

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00113

中图分类号:S288

文献标志码:A

0 前言

机械沙障是工程治沙的主要措施,其主要作用是增大地表空气动力学粗糙度,降低近地表风速,阻滞和拦截过境风沙流,从而起到快速固定流沙的作用^[1-2]。机械沙障在中国防沙治沙事业中有着极为重要的作用,广泛应用于交通线路沙害防治,以及草原和农田沙害治理。1958年中国第1个综合防沙体系在包兰铁路沙坡头段建成,成功运用了机械沙障和人工植被相结合的防护体系,保证了铁路安全运营,从而获得国家科技进步特等奖,为中国乃至世界树立了成功治沙的典范^[3-5]。塔里木沙漠公路是世界上最长的穿越流动沙丘区域的公路,沙害防治工作难度极大。最初的防沙固沙方案以机械沙障为主,包括阻沙栅栏(芦苇栅和尼龙网栅)和芦苇方格,取得了巨大的成功,后来被人工植被防护林取代^[6-8]。青藏铁路和兰新高铁的建设给高海拔、严寒、大风、极端干旱和缺水的防沙工作带来了更大的挑战,机械沙障在材料上进行创新,才能适应恶劣环境。采用石块代替稻草、麦草、芦苇,形成石

块棋方格沙障,用混凝土板代替荆棘条、芦苇、树枝、尼龙网形成阻沙栅栏,保证在环境极端恶劣情况下防沙工程防护作用的发挥^[9-11]。

随着科技水平不断提高,机械沙障也在不断发展、进化。机械沙障主要从两个维度来发展。一是材料上的改进。在早期的防沙治沙工程中,应用的全是自然材料,如利用麦草、芦苇、稻草等草本植物材料及黏土设置半隐蔽式沙障,利用高秆作物秸秆,以及荆条、沙柳、树枝等灌木、乔木材料等设置高立式阻沙栅栏。这些材料因受来源、环境、材料价格、施工便利性等影响,存在诸多不利因素。人工预制、合成材料的应用,使得材料的便利性提高、价格降低,这些材料主要有高密度聚乙烯(HDPE)、尼龙网、纤维板、石膏板、混凝土板等^[12-13]。为了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。PLA沙障以玉米、马铃薯、红薯等富含淀粉的农作物为原材料,约10 a可自行降解^[14-15]。二是沙障设置技术上的突破。最初的草方格、人工合成材料,都需要人

收稿日期:2023-09-25; 改回日期:2023-12-11

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0008)

作者简介:姚正毅(1969—),男,甘肃镇原人,博士,研究员,主要从事沙漠化与风沙工程研究。E-mail: yaozy@lzb.ac.cn

通信作者:屈建军(E-mail: qujianj@lzb.ac.cn)

员来施工铺设,劳动强度大,经济效益差。机器取代人工设置防沙沙障成为一种趋势。目前,以多功能立体固沙车为代表的沙障铺设发展迅速,通过不断地试验、改进,设备的性能不断提高,必将在中国的防沙治沙事业上发挥更大作用^[16-17]。

由于人工费用在防沙治沙工程中占比越来越高,研发可机械化生产的沙障成为防沙治沙工作中的重要方向。刷状沙障就是最新发明的一种可机械化编织的新型沙障。刷状沙障以麦草、稻草、芦苇、草绳、尼龙绳等为原料,经机器绕卷,生产成长条刷状网绳,取代传统的草方格,实现了沙障生产的装备化。刷状网绳生产装置的工作效率比过去人工扎设草方格提高60%以上,使草方格的施工方式由“扎”变为“铺”,劳动强度降低,工作效率提高,材料可以节省一半以上。刷状网绳式草方格的强度高,使用寿命可由3 a延长至6 a,且可以重复使用。这项技术现已获得国家专利(CN210766711U)^[18],治沙效果已得到学界权威专家的认可^[19]。

本文研究了一种新型刷状沙障的固沙性能。该沙障以沙柳枝条为原料,替代稻草,经机械编织成刷状沙障^[20]。本论文对该固沙障的固沙性能进行了风洞模拟实验,绘制出了不同风速下各模型的风速流场图,同时又测定了在该沙障的保护下,流动沙面的蚀积状况及风沙流结构特征。

1 材料

由沙柳枝条在风洞内布设4道沙障,间距1.2 m(图1)。沙障所用枝条直径0.5~1.7 cm,长度18.1~21.3 cm,每米沙障的枝条密度57.5~61.7根,平均58.8根,每根0.73~0.85 kg·m⁻¹。铺设后形成沙障实际高度16~18 cm。

2 方法

风洞模拟试验在中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头野外风洞进行,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±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。

分别选取10、15、20 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2、4、8、16、32、64、



图1 沙柳沙障风洞布设

Fig.1 Layout of brush shaped sand barrier in wind tunnel

128、200、350、500 mm共10个测点。试验过程中,通过移动皮托管改变流场测点。测点分别为-5H、-4H、-3H、-2H、-1H、0H、1H、2H、3H、4H、5H、6H、8H、10H、11H、12H、13H、14H、15H、16H、17H、18H、19H、21H、23H、25H、27H(H表示沙障高度,取值20 cm)。对于每个风速测量点,风力数据采集的持续时间为30 s,数据来自风速记录频率为1 s,每次记录时间为20 s。

为了验证沙障的固沙性能,在风洞地板铺10 cm厚的沙粒(取自腾格里沙漠)。运用插钎法对沙障内流沙表面的蚀积情况进行测量,在沙面上插入带有刻度的铁签,铁签长20 cm、直径0.15 cm,使铁签的0刻度处与沙面平齐。在8、10、16、20 m·s⁻¹的风速下分别吹蚀10、4、2、1 min。吹蚀后观察每个铁签沙面处刻度,获得流沙表面蚀积状态。流沙蚀积测点布置如图2所示。

在最后一道沙障后10H安置风洞专用集沙仪(图2),该集沙仪共有60个进沙口,进沙口高1 cm、宽2 cm,可以收集0~60 cm高度处的来沙。在风速8、10、16、20 m·s⁻¹的风速下分别吹蚀10、4、2、1 min。每次吹蚀完成后,取出集沙仪,逐个称量每个集沙管内收集的沙物质质量。

总输沙量(q_t)为不同高度输沙量之和,总输沙量减少率(Rs)^[12]由如下方程表示:

$$Rs = \left(1 - \frac{q_{tg}}{q_{tf}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: q_{tg} 为布设沙障后总输沙量(g); q_{tf} 为无沙障时总输沙量(g)。

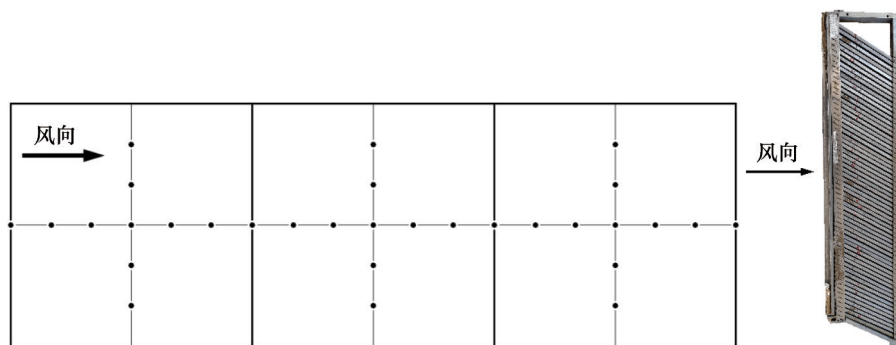


图2 流沙表面蚀积特征测点布置及集沙仪

Fig.2 Layout of measurement points for erosion and accumulation characteristics on surface of mobile sand in the wind tunnel and sand trap for collecting sands

3 结果

3.1 流场特征

在风速10、15、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,在第1道沙障前的1.5~2H处,风速略有降低,降低幅度为0.5~1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3)。在第1道、第2道和第4道沙障处,风速都略有增加,增加幅度在1~2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,增速幅度随沙障位置依次降低。在每道沙障后,都形成一个降速区。第1道沙障后的风速降低区面积较小,降速幅度较低,防沙功能较弱。第2道沙障后的风速降低区面积最大,降速幅度最大,最大降速幅度分别为5~6、6~8、8~10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。沙障的防沙功能在第2格内表现得最大。在第3道沙障和第4道沙障后,同样形成风速降低区,但面积依次减少,降速幅度依次降低,显示出防沙功能依次降低。因此,每道沙障后风速减小,第1道沙障的风速减小作用较低,第2道沙障的风速减小作用最大,其后的第3道、第4道沙障风速减小作用依次降低,但都高于第1道沙障。

3.2 流沙表面蚀积特征

运用插签法对沙障内流沙表面的蚀积情况进行了测量(图4)。4道沙障的正下方都表现为侵蚀状态。第1道沙障下方侵蚀最严重,侵蚀深度0.6~2.2 cm,第2、3、4道沙障下方侵蚀深度依次减小。两道沙障之间主要表现为堆积状态,堆积高度向下风向依次递减。但是不同风速的蚀积状态有所不同。8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速吹风时间较长,为10 min,吹蚀实验的蚀积状态基本达到了“终极状态”,表现为第2道和第3道沙障下方侵蚀度相等,都为0.5 cm,而第1道和第4道沙障处于实验区域的边界,表现为侵蚀

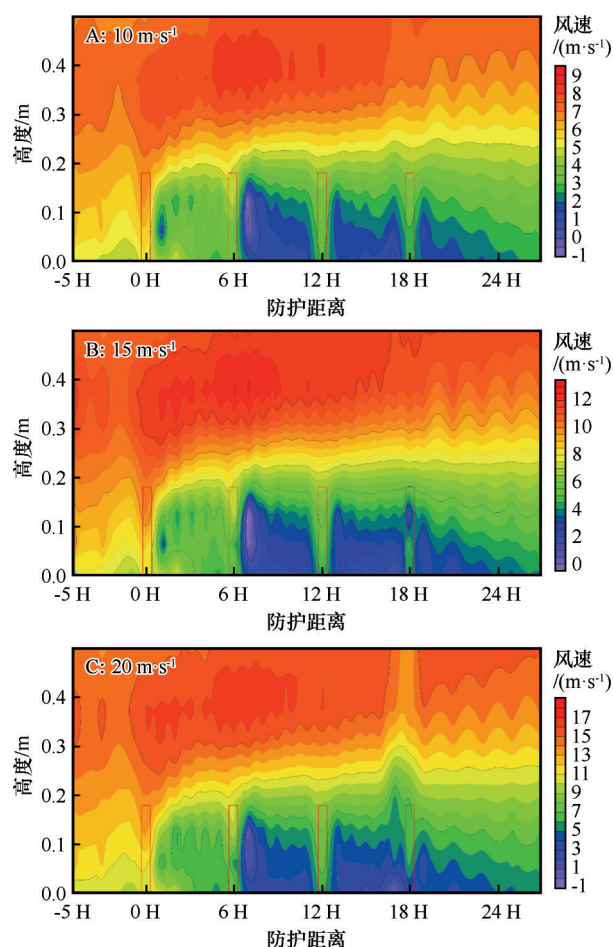


图3 不同风速下刷状沙柳沙障流场(条框表示沙障位置)

Fig.3 Low field of brush shaped sand barrier under different wind speeds

深度最大(1.3 cm)和最小(0.3 cm)。

10、16、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下,吹蚀时间分别为4、2、1 min,吹蚀实验的蚀积状态未能达到“终极状态”,第2道和第3道沙障下方侵蚀深度还未达到相等状态。但是根据现有的结果类推,现侵蚀的地方将继续侵蚀,现堆积的地方即继续堆积,随着时间推移,

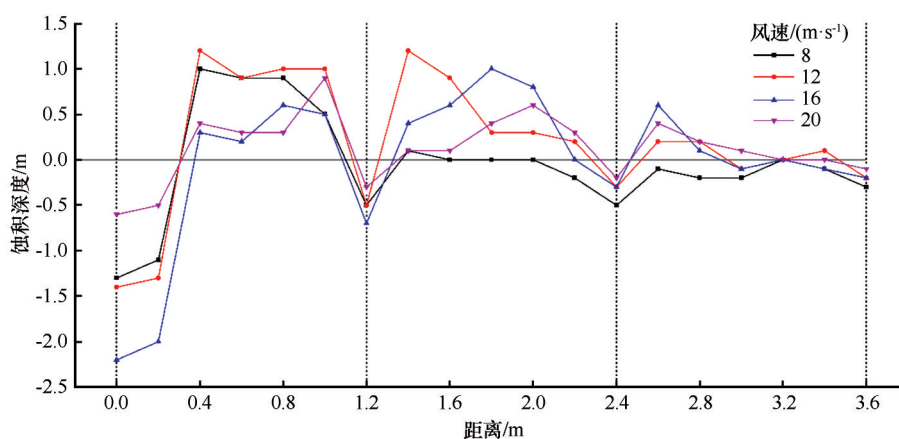


图4 不同风速下流沙表面蚀积状况(虚线表示沙障位置)

Fig.4 Erosion and accumulation characteristics on surface of mobile sand under different wind speeds in the wind tunnel (dashed lines indicate the location of sand barriers)

蚀积会达到一个稳定状态,即第2道和第3道沙障下方侵蚀深度最终会相等,形成一个凹面和凸面依次排列的稳定沙面。

因为吹风时间都未到10 min,12、16、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速很难与8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速进行严格的比对,只能根据实验结果预测在10 min时间下的蚀积状态。即在10 min时,12、16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下沙障具有良好的预防流沙侵蚀作用,在20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以上风速下,沙障预防流沙侵蚀作用减弱。

由于插签法的测点不够密集,沙面蚀积的一些细节特征未能在图4上完全反映出来。图5是蚀积实验结束后的照片,可以看到沙障下方有明显的凹坑,沙障两侧有明显的隆起,形成尖堆。从类似的刷状稻草沙障的野外应用经验来看,随着时间的延长,隆起的尖堆有可能被风削平,凹坑也可能被填平,植物的枯枝落叶等物质充填到沙障的枝条缝隙之间,起到了降低沙障孔隙度的作用,沙障的固沙作用会进一步增强。



图5 刷状沙柳沙障对流沙表面蚀积的影响(箭头所示为风向)

Fig.5 Impact of brush shaped sand barrier on surface erosion and accumulation of quicksand(the arrow shows the wind direction)

3.3 风沙流结构特征

通常情况下,流沙的表面单位面积单位时间内输沙量随高度的变化关系多呈指数形式^[15]:

$$q_z = a \cdot \exp(b \cdot z) \quad (2)$$

式中: q_z 为高度 z cm处的输沙量($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$); z 为进沙口高度(cm); a 和 b 为系数。

4种风速下输沙量随高度呈指数下降(图6),拟合关系的 $R^2 \approx 1$ 、 $P < 0.01$ 。

图7为在设置沙障情况下流沙表面风沙流结构特征。由于8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下测得的数据量较少,没有获得拟合曲线。其他风速情况下风沙流结构的拟合曲线基本一致,都呈复杂的指数下降曲线。具体

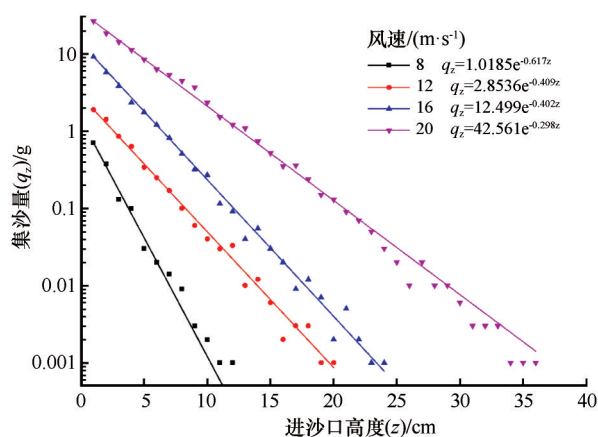


图6 风洞内无沙障风沙流结构特征

Fig.6 Characteristics of the wind-sand flow structure without barriers in the wind tunnel

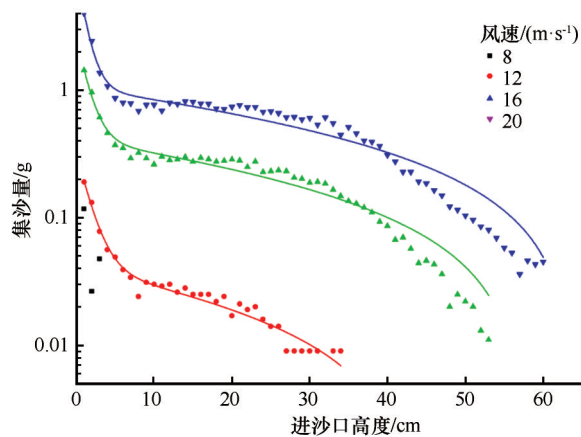


图7 风洞内刷状沙柳沙障风沙流结构

Fig.7 Wind-sand flow structure with brush shaped sand barriers in the wind tunnel

情况是:1[#]~5[#]进沙口的集沙量符合输沙量随高度增加呈指数下降趋势。6[#]~30[#]进沙口的集沙量则显示输沙量随高度增加呈直线下下降趋势。31[#]~60[#]进沙口的集沙量则又符合输沙量随高度增加呈指数下降趋势。总体拟合公式为:

$$q_z = q_0 + a_1 \cdot \exp\left(-\frac{z-z_0}{b_1}\right) + a_2 \cdot \exp\left(-\frac{z-z_0}{b_2}\right) + a_3 \cdot \exp\left(-\frac{z-z_0}{b_3}\right) \quad (3)$$

式中: q_z 代表高度为 z cm处的输沙量(g); z 代表高度(cm); q_0 、 z_0 、 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 、 a_3 、 b_3 都为回归系数。其值分别如表1所列,回归关系均具有统计学意义。

对比图6和图7可以看出,沙障设置后近地表进沙口的集沙量减少(8 m·s⁻¹除外)。尤其是第1个进沙口的集沙量急剧减少,由公式(1)计算可得,8、12、16、20 m·s⁻¹风速下总输沙量在沙障的阻滞作用

表1 刷状沙柳沙障风沙流结构参数

Table 1 Parameters of the wind sand flow structure with sand barriers in the wind tunnel

| 参数 | 风速/(m·s ⁻¹) | | |
|-------|-------------------------|----------|-----------|
| | 12 | 16 | 20 |
| q_0 | -0.05134 | -0.49579 | -1.38037 |
| z_0 | 1.14592 | 1.11136 | 1.03418 |
| a_1 | 0.04914 | 0.57152 | 1.8804 |
| b_1 | 1.60492 | 1.32901 | 1.08722 |
| a_2 | 0.09282 | 0.40067 | 1.05406 |
| b_2 | 1.63818 | 1.37296 | 1.11176 |
| a_3 | 0.09032 | 0.89532 | 2.40472 |
| b_3 | 74.88796 | 95.61356 | 113.33693 |
| R^2 | 0.98778 | 0.9806 | 0.97412 |
| P | <0.01 | <0.01 | <0.01 |

下均大幅下降,减少率分别为86.8%、81.6%、53.4%、67.8%,表明沙障有效地抑制了风沙活动强度。但在地表10~14 cm高度以上(10[#]~14[#])的进沙口的集沙量相对于无沙障有所增加,且高度越高,增加率越大。

设置沙障后风沙流结构的这种表现,是沙障发挥其功能的结果。沙障扰动近地表风沙流,削减了近地表风速,使近地表风沙流的携沙能力降低。同时由于沙障的扰动,使沙物质向上飘散,使地表10~14 cm高度以上的进沙口的集沙量相对于无沙障的增加了。

4 讨论

根据沙障外露高度将沙柳直立式沙障分为①高立式沙柳沙障,沙障外露高度>40 cm。②半隐蔽式沙柳沙障,沙障外露高度为20~40 cm。③低立式沙柳沙障,沙障外露高度为0~20 cm^[21-22]。低立式沙柳沙障孔隙度一般25%~50%,所用沙柳枝条直径多在0.7~2.0 cm,地下埋深30~40 cm^[23-25]。

风沙流经过半隐蔽式沙柳沙障时,一部分风沙流被迫抬升绕过沙障继续前进,另一部分分散穿过沙障间隙。在穿过沙障间隙时,受到沙柳枝条的扰动,气流状态由层流转变为紊流,摩擦阻力增加,产生空气涡旋,相互碰撞消耗动能,使风速降低,风沙流的携沙能力大大下降,大部分沙物质被释放,堆积在沙障两侧^[26-28](图8)。

刷状沙柳沙障高度与低立式沙柳沙障相同,孔隙度也大致相同。刷状沙柳沙障以长度为20 cm的

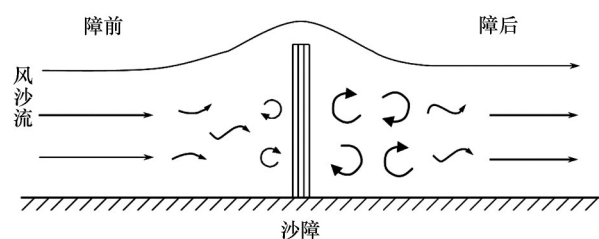


图8 风沙流通过直立式沙柳沙障示意图
(根据文献[18]绘制)

Fig.8 Schematic diagram of wind-sand flow passing through an upright sand barriers

沙柳枝条、草绳(直径1.0~1.5 cm)、尼龙绳等为原材料,经机器绕卷,生产成长条刷状沙柳沙障,每条长度9 m,实现了沙障生产的半自动化(图9)。刷状沙柳沙障有类似拒马的外形,布设后稳定性好,也便于施工。



图9 刷状沙柳沙障机械化生产过程

Fig.9 Mechanized production process of brush shaped sand barrier

与传统低立式沙柳沙障相比,刷状沙障的沙柳枝条只需20 cm,材料节省了50%~60%,使沙障的施工方式由“扎”变为“铺”,劳动强度降低,工作效率提高60%以上。刷状沙柳沙障可以重复使用,当遭受沙埋时,只要把沙障从沙中提起,放回沙面即可,只要绳子(草绳及抗老化尼龙绳)不断开,刷状沙柳

沙障就可长期使用。

由于刷状沙柳沙障是摆放在沙面,越到边缘,枝条越稀疏。这种情况下,除了一部分风沙流被迫抬升绕过沙障,另一部分分散穿过沙障间隙(图10)。还有一部分被迫下移钻入下部绕过沙障。这样,沙障下部风力聚集,发生侵蚀,随着时间推移,甚至发生掏蚀现象,使沙障悬空,因此必须加强沙障迎风侧最前缘一道沙障的防护能力。

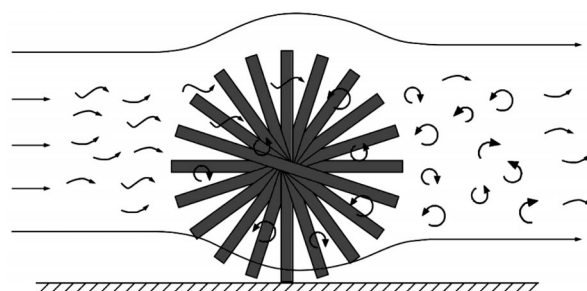


图10 风沙流通过刷状沙柳沙障示意图

Fig.10 Schematic diagram of wind-sand flow passing through a brush shaped sand barriers

5 结论

在第1道沙障前风速略有降低,在沙障0.6H、18H处,风速增加较大,在经过每道沙障后,风速下降较大,形成一个降速区。

沙障正下方沙面多表现为侵蚀状态。迎风的第1道沙障,侵蚀现象最严重,随着时间推移,甚至发生掏蚀现象。沙障之间多处于堆积状态,第1格堆积最严重,其后堆积程度减弱。

沙障设置后,风沙流结构呈复杂的指数下降曲线。8、12、16、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下的集沙量分别减少86.8%、81.6%、53.4%、67.8%,表明刷状沙柳沙障有较好的固沙性能。由于沙障的扰动,沙物质向上飘散,使地表10~14 cm高度以上进沙口的集沙量有所增加。

刷状沙柳沙障施工方法相对简单易行,劳动强度低,工作效率高,材料节省,可以重复使用。刷状沙柳沙障在固沙领域有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 319-330.
- [2] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 171-201.
- [3] 兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1991: 52-94.

- [4] 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]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56: 449–464.
- [5] Zhang C L, Zou X Y, Pan X H, et al. Near-surface airflow field and aerodynamic characteristics of the railway-protection system in the Shapotou region and their significance [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71: 169–187.
- [6] Dong Z B, Chen G T, He X D, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 329–344.
- [7] Li C J, Wang Y D, Lei J Q, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China [J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13: 98–106.
- [8] 雷加强, 李生字, 靳正忠, 等. 塔里木沙漠公路防护林生态工程的综合生态环境效应 [J]. *科学通报*, 2008 (增刊 2): 169–178.
- [9] Wang T, Qu J J, Niu Q H, et al. Aerodynamic properties and shelter effects of a concrete plate-insert sand fence along the Lanzhou-Xinjiang High-Speed Railway in gobi regions under strong winds [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 861063.
- [10] Qu J J, Wang T, Niu Q H, et al. Mechanisms of the formation of wind-blown sand hazards and the sand control measures in gobi areas under extremely strong winds along the Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [J]. *Science China Earth Science*, 2023, 66: 292–302.
- [11] Cheng J J, Xue C X. The sand-damage-prevention engineering system for the railway in the desert region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 125: 30–37.
- [12] 韩致文, 郭彩霞, 钟帅, 等. 库布齐沙漠 HDPE 网和植物纤维网沙障防沙试验效应 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 681–689.
- [13] 李敏岚, 屈建军, 唐希明, 等. 高密度聚乙烯 (HDPE) 蜂巢式沙障对土壤水分的影响 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 136–144.
- [14] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(3): 118–125.
- [15] 屈建军, 洪贤良, 李芳, 等. 聚乳酸 (PLA) 网格沙障耐老化性能及防沙效果 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 51–58.
- [16] 刘晋浩, 周安民, 倪平利. 多功能立体固沙车: CN201774804U [P]. 2011–03–30.
- [17] 张林, 孙步功, 张克平, 等. 我国治沙机器的研究现状与展望 [J]. *林业机械与木工设备*, 2022, 50(12): 4–8.
- [18] 屈建军, 张国祥, 牛清河, 等. 一种刷状网绳式草方格沙障: CN210766711U [P]. 2020–06–16.
- [19] 张守功. 科学技术赋能防沙治沙 [N]. *人民日报*, 2023–07–21(19).
- [20] 屈建军, 柳本立, 孟晨, 等. 刷状沙柳沙障生产装置: CN219470885U [P]. 2023–08–04.
- [21] 高永, 虞毅, 龚萍, 等. 沙柳沙障 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1–9.
- [22] 高永. 沙柳沙障防沙治沙技术研究综述 [J]. *内蒙古农业大学学报 (自然科学版)*, 2022, 43(5): 56–60.
- [23] 蒙仲举, 任晓萌, 高永. 半隐蔽式沙柳沙障的防风阻沙效益 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 178–180.
- [24] 赵国平, 左合君, 徐连秀, 等. 沙柳沙障防风阻沙效益的研究 [J]. *水土保持学报*, 2008(2): 38–41.
- [25] 王翔宇, 丁国栋, 高函, 等. 带状沙柳沙障的防风固沙效益研究 [J]. *水土保持学报*, 2008(2): 42–46.
- [26] 赵国平, 胡春元, 张勇, 等. 高立式沙柳沙障防风阻沙效益的研究 [J]. *内蒙古农业大学学报 (自然科学版)*, 2006(1): 59–63.
- [27] 高永, 邱国玉, 丁国栋, 等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 111–116.
- [28] 张亚玲, 王翔宇, 高函, 等. 沙柳沙障防风效益模拟试验研究 [J]. *水土保持应用技术*, 2007(6): 3–5.

Wind tunnel simulation on the sand fixation performance of a kind of brush shaped *Salix psammophila* sand barrier

Yao Zhengyi¹, Qu Jianjun^{1,2}, Xiao Jianhua¹, Wang Ruyan³, Han Shengli³, Lu Wenfu⁴

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. General Afforestation

Farm of Ordos, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 4. Ningxia University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: Compared to traditional *Salix psammophila* sand barriers which should be manually inserted one by one, brush shaped *S. psammophila* sand barriers use mechanical weaving to form bottle brush barriers, which have a shape similar to horse resistance. This kind of barriers are easy to construct and have good stability after setup. Wind tunnel experiments were conducted to study sand fixation function of a brush shaped sand barrier made from *S. psammophila* branches. The results show that: (1) The wind speed slightly decreases in front of the first row of barrier, and increases significantly at position of the first, the second and the forth row of barrier. After pass through each row barriers, wind speed reduced greatly and formed deceleration zone. (2) The sand surface directly below the barrier often exhibits erosion effect. The erosion phenomenon is the most severe right under the first row barrier, and excavation occurs with time lapse. Between the sand barriers, the sand surface showed a state of accumulation, the first checkerboard accumulated the most severe, followed by a decrease in the degree of accumulation. (3) After setting up the barrier, the structure of the wind-sand flow exhibits a complex exponential decline curve. The sediment collection at wind speeds of $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ decreased by 86.8%, 81.6%, 53.4%, and 67.8%, respectively. This indicates that the brush shaped sand barrier has good sand fixation performance. Due to the disturbance of barriers, sand material drifts upwards, resulting in an increase in the amount of sand collected at the sand inlet above a height of 10–14 cm.

Key words: *Salix psammophila*; brush shaped sand barrier; wind tunnel simulation; sand fixation