

内蒙古草原煤矿区排土场不同规格树枝沙障的防风效益

丛龙宇^{1,2}, 许丽^{1,2*}, 张春良³, 陈翔³, 刘瑞瑶¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区风沙物理学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018;
3. 内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:为探究草原煤矿区排土场边坡不同规格机械沙障的防风效益,以排土场边坡设置的树枝沙障为研究对象,对不同规格(0.5 m×0.5 m、1.0 m×1.0 m、1.5 m×1.5 m)高度为30 cm的树枝沙障内不同高度(10、20、30、50、200 cm)的风速进行测定,同时以未铺设沙障的边坡作为对照,比较分析3种规格沙障防风效能、空气动力学粗糙度和风速廓线特征。研究表明,3种规格沙障的防风效能表现为0.5 m×0.5 m>1.0 m×1.0 m>1.5 m×1.5 m,且均在10 cm高度处防风效能最为显著,其防风效能随着高度的增加呈减小趋势;空气动力学粗糙度和摩阻风速均表现为0.5 m×0.5 m>1.0 m×1.0 m>1.5 m×1.5 m>对照;不同沙障的风速廓线在50 cm高度内均呈现出不规则的“S”形曲线变化特征,50 cm高度以上风速廓线与对照相似。结果显示0.5 m×0.5 m树枝沙障防风效益最好,可有效改善近地表土壤风蚀情况,建议在草原煤矿区排土场推广设置。

关键词:草原;沙障;排土场;防风效能;空气动力学粗糙度

中图分类号:S775

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)02-0141-07

Windproof Efficiency of Tree Branch Sand Barriers with Different Sizes at the Dump Area of Coal Mining in Inner Mongolian Grassland

CONG Long-yu^{1,2}, XU Li^{1,2*}, ZHANG Chun-liang³, CHEN Xiang³, LIU Rui-yao¹

(1. Inner Mongolia Agricultural University, College of Desert Management, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;
2. Key Laboratory of Wind and Sand Physics of Inner Mongolia, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;
3. Inner Mongolian Grass Ecological Environment (Group) Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to explore the windproof benefits of mechanical sand barriers with different sizes at the dump slope of coal mining in Inner Mongolian grassland, tree branch sand barriers with different sizes (0.5 m×0.5 m, 1.0 m×1.0 m and 1.5 m×1.5 m) and branch height of 30 cm were designed on the dump slope. Wind speeds at different heights (10, 20, 30, 50, 200 cm) within the branch sand barriers were measured. The slope without setting sand barrier was taken as the control to compare and analyze the windproof efficiency, aerodynamic roughness and wind speed profile characteristics of the sand barriers with three sizes. The results showed that the windproof efficiency of the three sand barriers was in the order of 0.5 m×0.5 m>1.0 m×1.0 m>1.5 m×1.5 m, the windproof efficiency was most significant at the height of 10 cm and tended to decrease with the increase of the height being measured. Both aerodynamic roughness and friction speed showed 0.5 m×0.5 m>1.0 m×1.0 m>1.5 m×1.5 m>control. The wind speed profiles of different sand barriers showed an irregular "S" curve within 50 cm height, and above 50 cm height were similar to the control. To sum up, the size 0.5 m×0.5 m branch sand barrier has the best windproof

收稿日期:2023-02-02 修回日期:2023-03-22

基金项目:内蒙古典型矿区生态修复技术集成与示范(2020ZD0020)。

第一作者:丛龙宇。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:2279965503@qq.com

* 通信作者:许丽,博士,教授。研究方向:水土保持以及矿区生态修复。E-mail:xulinmg@163.com

effect, which can effectively improve the wind erosion of the near-ground surface soil. It is recommended to promote setting in the grassland coal mining area.

Key words: grassland; sand barrier; dump; windproof efficiency; aerodynamic roughness

进入 21 世纪后,随着草原工业化的盲目推进,大面积天然优质草场转变为矿山建设工业园区,在矿山建设开采过程中,频繁且不合理的开采利用给原本脆弱的草原生态环境带来了更大的压力^[1-4]。尤其是露天煤矿的开采,大面积的采挖和填土导致草原地形地貌被破坏^[5],表层土壤剥离导致植被覆盖率、土壤肥力大幅下降,加速了自然因素引发的土壤侵蚀,增加了水土流失、土地沙化、盐渍化和滑坡等的发生率^[6-9]。由采矿废弃物堆积形成的排土场由于表层基质极不稳定且在恢复初期无植被覆盖^[1],极易受到风的侵蚀作用,造成土壤养分流失、肥力下降,地上植被功能降低^[10-12],进一步加剧了土壤风蚀。因此,草原矿区排土场生态修复亟需解决。

机械沙障作为防治土壤风蚀的重要措施之一^[13],其原理是通过增大地表粗糙度,使近地表风速减弱,从而达到防风固沙的目的^[14]。近几十年来,许多学者针对机械沙障在不同地区的防风效益^[15-18]开展了大量的试验研究工作,提出了适合不同地区的沙障布设模式,Qiu 等^[19]利用模型计算不同规格麦草沙障的风速廓线,建议在流动沙丘设置 1.0 m×1.0 m 规格沙障,高度为 10~20 cm。魏翔鸿等^[20]在乌兰布和沙漠通过对不同规格和高度的尼龙网格沙障内风速进行观测,得出 30 cm 高度 1.0 m×1.0 m 规格沙障的防风效果最好。朱泊年等^[21]对乌珠穆沁沙地 PLA 防风效能进行分析,发现 0.5 m×0.5 m PLA 沙障防风效能高于其他大规格沙障。李生宇等^[22]在古尔班通古特沙漠研究了草方格沙障对油田公路扰动带的影响,认为 1.0 m×1.0 m 草方格沙障的固沙措施能减弱沙漠环境对公路的扰动危害。韩庆杰等^[23]研究表明在沿海地区设置带状化学材料沙障,对恢复海岸带生态系统起到重要的作用。目前机械沙障的应用技术和防护效益研究在流动沙丘以及公路铁路等地取得了很大的进展。但在易受风沙侵害的草原煤矿区排土场研究相对比较薄弱,并且鲜有报道。

基于此,本研究选取内蒙古锡林郭勒盟的贺斯格乌拉露天煤矿为典型研究区,在其排土场边坡铺设不同规格的树枝沙障,并通过野外观测沙障作用下近地表风速变化规律,探究不同规格沙障的防风效果,以期草原煤矿区土壤风蚀防控提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贺斯格乌拉南露天煤矿排土场(119°06′00″—119°14′25″E, 45°54′00″—46°22′30″E)。属于半干旱、半湿润大陆性季风气候区,年平均降水量 322 mm,年际变化较大,年内分布不均。大风主要发生在春季,秋季次之,冬季最少,夏季次少^[24]。年均风速 4~5 m/s,主导风向为西风,次风向为西北风和西南偏西风,受气旋环流作用的影响,秋季与春季盛行西和西北风,夏季以东南和南风为多,最大风速 24~28 m/s,局部瞬间风速 34 m/s。试验区排土场为人为翻扰后形成的堆积土体,其表层覆土土壤是由煤矿前期开采时剥离的原表层土,经过二次倒运后,覆于排土场表层,土壤类型主要包括黑钙土、草甸土和栗钙土。覆土初期无植被覆盖。

1.2 沙障材料与设置

试验区排土场边坡于 2021 年春季完成覆土,表层覆土深度约 10 cm,试验小区选择在排土场迎风向边坡,坡度约 30°,将坡面人工整平后,进行树枝机械沙障设置。沙障材料使用锡林郭勒盟正蓝旗产小黄柳枝条,选择长度约 50 cm 的枝条,插入地面以下约 20 cm,露出地面 30 cm,插枝间距约 5 cm,粗细合理搭配。沙障设置 3 个规格(0.5 m×0.5 m、1.0 m×1.0 m 和 1.5 m×1.5 m),在同一边坡以未铺设沙障的试验小区作为对照(铺设效果见图 1)。

1.3 风速测定方法

2021 年秋冬季,在不同规格沙障区域设置观测点,测定其防风效益指标。在每个观测点设置多通道风向风速仪,测定距地表 10、20、30、50、200 cm 共 5 个高度处的风速及风向。风速风向数据的采集使用美国生产的 HOBO 便携式气象站,风杯风速计间隔 2 s 计数 1 次。每种规格沙障观测 40 min,同时以未铺设沙障的同一边坡设置观测点作为对照。观测结束后,结合风向标从中选择来风方向与沙障铺设方向垂直且风速稳定时刻的风速数据进行处理分析。

1.4 防风效益参数计算

1.4.1 防风效能 防风效能是衡量防风效益的重要指标,以降低风速的比例来表示^[25]。计算公式为

$$E_h = \frac{(V_{h0} - V_h)}{V_{h0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_h 为高度 h 处的防风效能(%); V_{h_0} 为对照高度为 h 处平均风速(m/s); V_h 为沙障内高度为 h 处平均风速(m/s)。本研究中沙障高度为 30 cm,对于高于 200 cm 高度处风速影响甚微,因此选取 200 cm 高度风速(h_0)作为基准,来比较不同沙障的防风效能。

1.4.2 空气动力学粗糙度 空气动力学粗糙度是指风速为 0 时所对应的几何高度,可以反映地表对风速的减弱作用^[26]。使用最小二乘法求得,方程如下

$$U_h = a + b \ln h \quad (2)$$

根据空气动力学粗糙度定义,得

$$Z_0 = \exp(-a/b) \quad (3)$$

摩阻风速公式

$$U^* = Kb \quad (4)$$

式中: U_h 为距地面高度 h 处的平均风速(m/s); a 、 b 为拟合系数(a 为截距, b 为斜率); h 为距地面的垂直高度(cm); Z_0 为近地表空气动力学粗糙度(cm); U^* 为摩阻风速(m/s); K 为卡曼常数,值为 0.4。

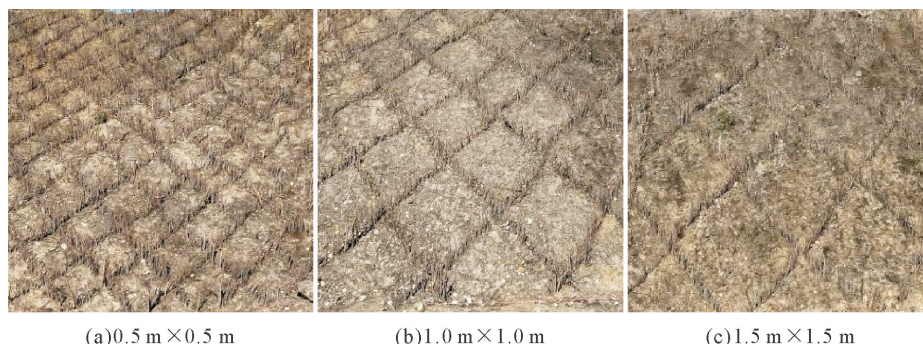


图1 不同规格树枝沙障铺设效果

Fig. 1 Laying effects of different sizes of tree branch sand barriers

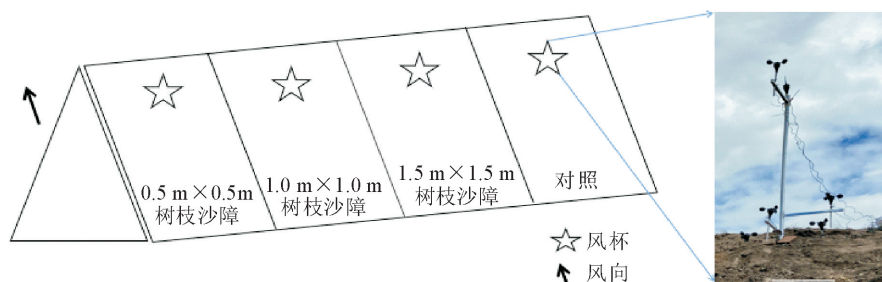


图2 风杯布设示意图

Fig. 2 Wind cup layout

1.4.3 风速廓线方程 风速廓线的定义为近地表自然风速在垂直方向上的分布特征,即风速随高度的分布曲线^[27]。可用普朗特-冯·卡门对数分布率描述风速廓线方程

$$U_h = U^* / K \times \ln(h/Z_0) \quad (5)$$

1.5 数据分析与处理

采用 Microsoft Office Excel 2016 整理所测风速数据,使用 SPSS 24(one-way ANOVA)对不同规格、高度的风速进行方差分析,并使用 Duncan 法进行差异显著性检验,利用 Origin2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 近地表防风效能比较分析

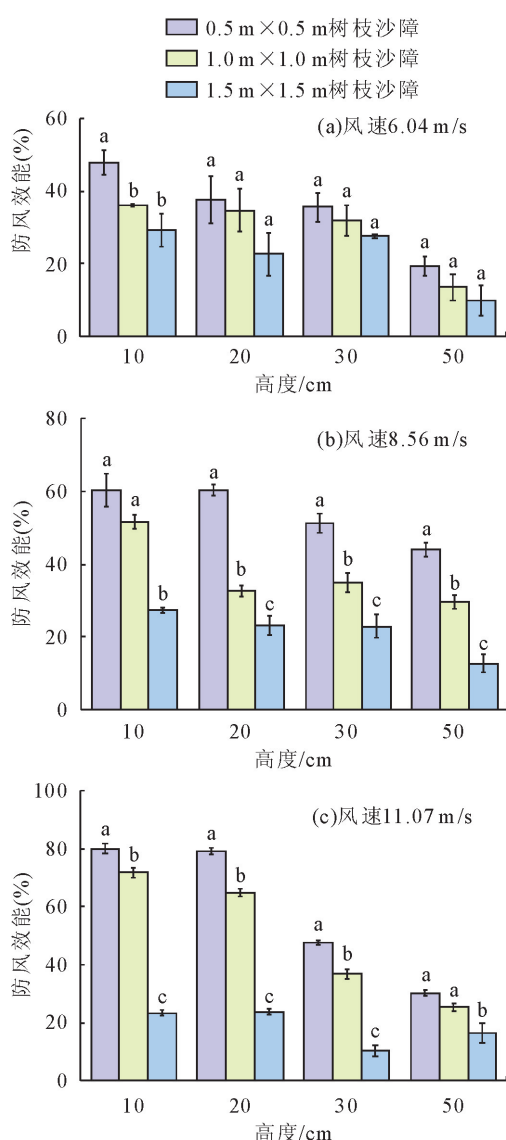
2.1.1 不同规格沙障在不同风速梯度下防风效能 由图 3 可知,3 种规格沙障均能起到较好的防风效果,规格越大,防风效果越差,且风速越高,其防风效能越大。当风速为 6.04 m/s 时,0.5 m x 0.5 m

规格的沙障在 10 cm 高度处的防风效能值显著高于 1.0 m x 1.0 m 和 1.5 m x 1.5 m 规格沙障($P < 0.05$),分别高了 11.73% 和 18.68%;20、30、50 cm 高度处 3 种规格的防风效能无显著差异($P > 0.05$)。当风速为 8.56 m/s 时,0.5 m x 0.5 m 沙障在 10 cm 高度处防风效能值显著高于 1.5 m x 1.5 m 沙障($P < 0.05$),高了 33.15%,在 20、30、50 cm 处防风效能均表现为 0.5 m x 0.5 m > 1.0 m x 1.0 m > 1.5 m x 1.5 m,且差异显著($P < 0.05$)。当风速为 11.56 m/s 时,3 种规格沙障在 10、20、30 cm 高度的防风效能差异显著($P < 0.05$),在 50 cm 高度处 0.5 m x 0.5 m 与 1.0 m x 1.0 m 沙障的防风效能无显著差异($P > 0.05$)。

2.1.2 相同规格沙障在不同风速梯度下防风效能

由图 4 可知,0.5 m x 0.5 m 规格的沙障在 10 cm 和 20 cm 高度处,防风效能均表现为在风速 11.07 m/s 时最大,分别为 79.97% 和 79.09%,与风速

8.56 m/s 和 6.04 m/s 时差异显著 ($P < 0.05$), 在 30 cm 和 50 cm 高度处, 防风效能随风速的增大呈现先增加后减小趋势; 1.0 m × 1.0 m 沙障在 10 cm 高度处, 防风效能随着风速的增大呈现增加趋势 ($P < 0.05$), 在 20 cm 和 50 cm 高度处, 风速 11.07 m/s 时防风效能与风速 8.56 m/s 和 6.04 m/s 时差异显著 ($P < 0.05$); 1.5 m × 1.5 m 沙障在 10、20、50 cm 高度处, 防风效能不同风速梯度下无显著差异 ($P > 0.05$)。



不同小写字母代表同一高度不同规格沙障防风效能差异显著 ($P < 0.05$)。

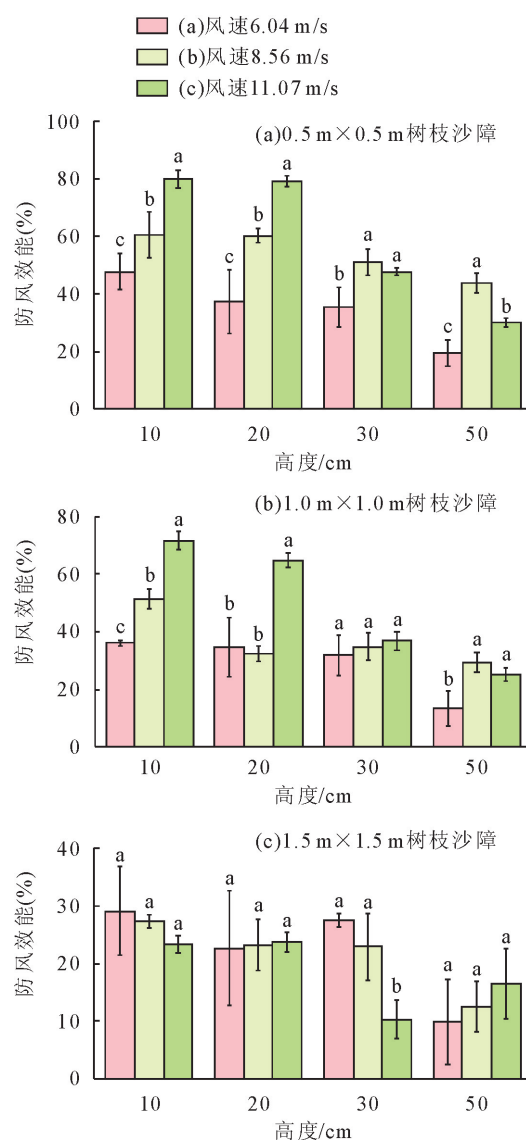
图 3 不同规格沙障在不同风速梯度下防风效能

Fig. 3 Comparison of windproof efficiency among different sizes of sand barrier under different wind speeds

2.2 空气动力学粗糙度分析

由表 1 可以看出, 在 3 种风速下空气动力学粗糙度和摩阻风速均表现为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} > 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} > 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} > \text{对照}$ 。当风速为 6.04

m/s 时, $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 和 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 沙障的空气动力学粗糙度分别是对照的 2.45、2.16、1.83 倍; 当风速为 8.56 m/s 时, 3 种规格沙障的空气动力学粗糙度分别是对照的 2.45、1.89、1.48 倍; 当风速为 11.07 m/s 时, 3 种规格沙障的空气动力学粗糙度分别是对照的 4.56、3.82、1.59 倍, 随着观测风速的增大, $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 和 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 沙障内的空气动力学粗糙度呈现增大趋势, 其中 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 沙障变化最明显, 而 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 沙障内的空气动力学粗糙度呈先增大后减小的趋势。摩阻风速与空气动力学粗糙度的变化趋势基本一致。摩阻风速最大值出现在 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 沙障内, 为 1.37 m/s, 并且随着沙障的规格的增大, 摩阻风速呈减小趋势。



不同小写字母代表同一规格不同高度沙障防风效能差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 相同规格沙障在不同风速梯度下防风效能

Fig. 4 Comparison of windproof efficiency of the same size of sand barriers under different wind speed gradients

表 1 不同规格沙障的空气动力学粗糙度与摩阻风速

Table 1 Comparison of aerodynamic roughness and friction speed of sand barriers with different sizes

沙障规格	风速/(m·s ⁻¹)					
	6.04		8.56		11.07	
	空气动力学粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s ⁻¹)	空气动力学粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s ⁻¹)	空气动力学粗糙度/cm	摩阻风速/(m·s ⁻¹)
0.5 m×0.5 m	6.82±0.72 a	0.70±0.03 a	10.76±0.32 a	1.00±0.02 a	10.85±0.12 a	1.37±0.01 a
1.0 m×1.0 m	6.00±0.52 ab	0.69±0.02 a	8.30±0.10 b	0.96±0.01 ab	9.09±0.28 b	1.31±0.02 a
1.5 m×1.5 m	5.09±0.12 b	0.66±0.01 ab	6.53±0.19 c	0.94±0.02 b	3.79±0.06 c	1.02±0.01 b
对照	2.78±0.27 c	0.59±0.03 b	4.40±0.18 d	0.88±0.02 c	2.38±0.16 d	0.98±0.03 b

注:不同小写字母代表不同规格沙障空气动力学粗糙度和摩阻风速差异显著(P<0.05)。

2.3 风速廓线比较分析

由图 5 可以看出,在 3 种风速梯度下 3 种规格沙障风速廓线均呈不规则的“S”形曲线变化特征,“S”曲线风速变化主要范围是距地面 0~50 cm。0.5 m×0.5 m 和 1.0 m×1.0 m 沙障在 10~30 cm 高度处风速变化较小,在 30~50 cm 高度处风速迅

速增大。1.5 m×1.5 m 沙障在风速为 11.07 m/s 时与对照风速廓线变化特征较为相似,说明风速为 11.07 m/s 时,1.5 m×1.5 m 沙障的防风效果一般。3 种规格沙障在 50 cm 高度以上风速廓线与对照相似,由此可见,30 cm 高度的机械沙障对于 50 cm 以上高度处的风速作用较小。

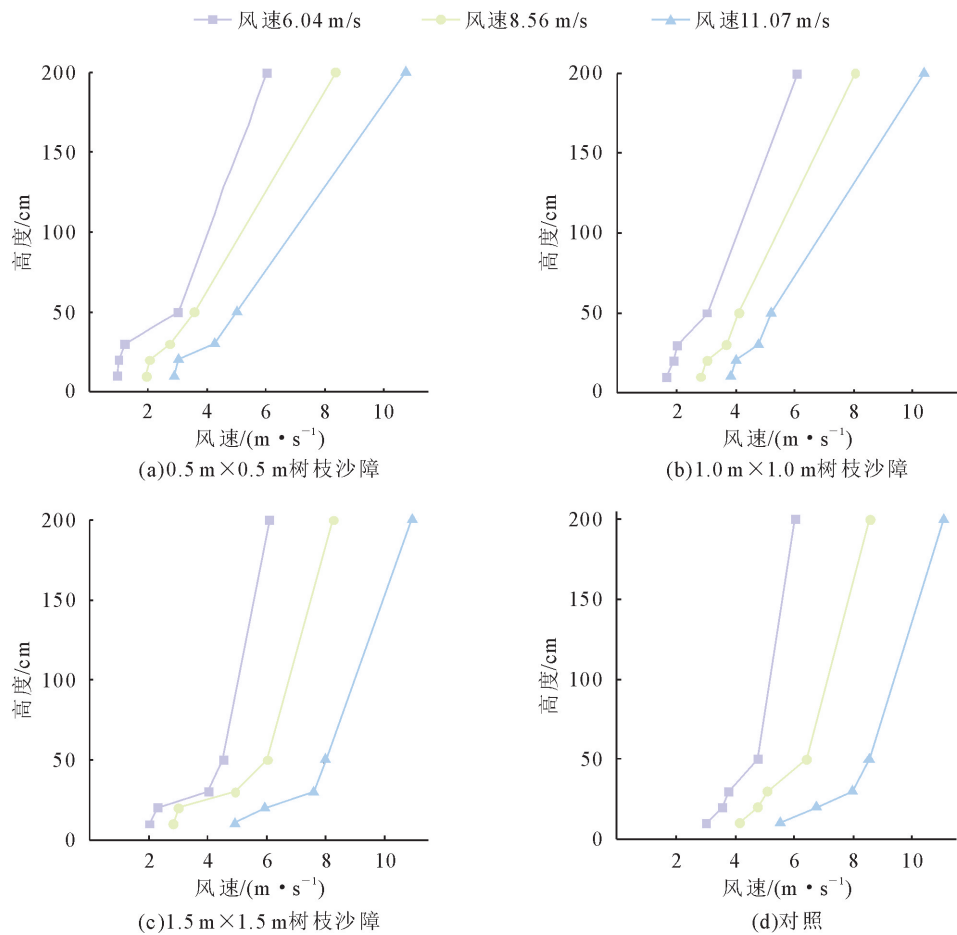


图 5 不同风速梯度下不同规格沙障与对照风速廓线

Fig. 5 Sand barriers with different sizes and control wind speed profiles under different wind speed gradients

3 结论与讨论

草原煤矿区排土场边坡由于表层基质极不稳定且在恢复初期无植被覆盖,极易受到风的侵蚀作用,造成土壤养分流失、肥力下降,地上植被功能降低,

进而进一步加剧了土壤风蚀^[28]。因此,在覆土后的裸露排土场边坡铺设机械沙障,通过增大地表粗糙度,从而降低近地表风速,有效的控制土壤风蚀。

本研究发现,随着沙障规格增大,障内防风效能呈现降低趋势,并且随着观测高度不断增加,其防风

效能也逐渐减小,在 10 cm 高度处,风速降低最为明显。0.5 m×0.5 m 树枝沙障内各高度的防风效能均高于其他两种规格沙障,其中 1.5 m×1.5 m 树枝沙障防风效果最差。该结论与田美荣等^[29]对呼伦流域沙地铺设芦苇沙障的研究结果相似,其研究表明,不同规格芦苇沙障设置后对减弱地表风速差异显著,并且在不同观测高度防风效能表现也不相同。朱泊年等^[21]也在乌珠穆沁沙地研究发现,0.5 m×0.5 m PLA 沙障防风效能高于其他大规格沙障,防风效能可在 10~20 cm 高度处达到最大。这是由于树枝沙障所形成的方格对气流产生了阻挡作用所致。另外,当气流经过沙障时,在沙障的阻挡作用下产生摩擦,由于气流产生了无数不定的紊流,这些来自不同方向的紊流间相互抵消,消耗一部分动能,使经过沙障的气流流速减弱。而观测高度高于沙障的铺设高度时,沙障的防护作用就会减弱,此时的气流摩擦力减小,削减风速的作用不明显。

此外,在不同的风速梯度下,沙障的防护效益也不尽相同。当风速为 6.04 m/s 时,3 种规格树枝沙障防风效能差别较小,其空气动力学粗糙度和摩阻风速均无显著差异。当风速为 11.07 m/s 时,0.5 m×0.5 m 和 1 m×1 m 树枝沙障在各个高度的防风效能均显著高于 1.5 m×1.5 m 树枝沙障。0.5 m×0.5 m 树枝沙障动力学粗糙度显著高于 1 m×1 m 和 1.5 m×1.5 m 树枝沙障。但 0.5 m×0.5 m 树枝沙障的成本分别是 1.0 m×1.0 m 和 1.5 m×1.5 m 树枝沙障的 2~3 倍。并且与对照相比,1.5 m×1.5 m 树枝沙障仍具有一定的防护效益。高永等^[30]研究表明,当风速较高时,规格较小的沙障比规格较大的沙障防风效益高;而在风速较小时,小规格沙障的防风效益低于大规格沙障。因此在沙障规格选取时要结合研究区的经济条件与自然状况选择合适的设障规格。

风速廓线为近地表风速在垂直方向上沿高度的变化趋势,一般情况下,风速廓线分布特性符合对数或幂指数分布规律。对比在不同风速梯度下 3 种规格的树枝沙障的风速廓线,在低风速梯度下,3 种树枝沙障均符合“S”形曲线变化特征,但在高风速下,1.5 m×1.5 m 沙障的风速廓线则与对照的变化趋势相近,导致这种现象的原因是布设沙障增加了地表的起伏程度,从而可以改变试验区微地形,导致气流与地表间的摩擦阻力增大,改变地表风速流场,而沙障规格越大,增加地表粗糙度的作用越小,进而对近地表风速的影响越弱。

综合考虑研究区自然状况与生态修复要求,建议草原煤矿区排土场恢复初期在边坡布设 0.5 m×

0.5 m 树枝沙障,从而改善近地表土壤风蚀情况,促进植被恢复和土壤改良。

参考文献:

- [1] 张琳,陆兆华,唐思易,等.露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价[J].生态学报,2021,41(14):5764-5774. ZHANG L, LU Z H, TANG S Y, *et al.* Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open-pit coal mine waste dump[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5764-5774. (in Chinese)
- [2] 张莉,王金满,刘涛.露天煤矿区受损土地景观重塑与再造的研究进展[J].地球科学进展,2016,31(12):1235-1246.
- [3] 荣颖,胡振琪,付艳华,等.中美草原区露天煤矿土地复垦技术对比案例研究[J].中国矿业,2017,26(1):55-59.
- [4] FANG A M, BAO M H, CHEN W Q, *et al.* Assessment of surface ecological quality of grassland mining area and identification of its impact range[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(5): 1-19.
- [5] 孙梦媛,刘景辉,米俊珍,等.植被复垦对露天煤矿排土场土壤化学及生物学特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(4): 206-212. SUN M Y, LIU J H, MI J Z, *et al.* Effect of vegetation restoration on soil chemical biological properties in the opencast coal mine[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 206-212. (in Chinese)
- [6] 张俊娇,胡杨,史常青,等.不同修复模式下排土场植被与土壤水热肥变化[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(3): 88-93. ZHANG J J, HU Y, SHI C Q, *et al.* Changes of vegetation and soil water, temperature and nutrient under different remediation modes in a dump[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3): 88-93. (in Chinese)
- [7] 李晗,吕刚,李叶鑫,等.露天煤矿排土场不同植被恢复模式土壤养分和酶活性的差异性[J].生态学杂志,2022,41(5): 919-924.
- [8] 董立巍,朱仰勇.风蚀区露天矿水土流失防治措施探讨[J].内蒙古煤炭经济,2019,(2):1-2.
- [9] 陈三雄,谢莉,陈家栋,等.露天开采矿区土壤重金属污染状况评价[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,(3):59-63. CHEN S X, XIE L, CHEN J D, *et al.* Evaluation on soil heavy metal pollution in open-pit mining areas[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2012, (3): 59-63. (in Chinese)
- [10] 张志伟,尹惠妍,周尧治,等.不同设置年限沙障对沙漠土壤理化性质的影响[J].西北林学院学报,2020,35(5):68-77. ZHANG Z W, YIN H Y, ZHOU Y Z, *et al.* Effects of sand barriers with different ages on physicochemical properties of desert soil[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 68-77. (in Chinese)
- [11] 丁国栋.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2010. DING G D. *Aeolian physics*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [12] 张奎壁,邹受益.治沙原理与技术[M].北京:中国林业出版社,1990.

- ZHANG G B, ZOU S Y. Principles and techniques of sand control[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [13] 靳灵娜, 党晓宏, 高永, 等. 库布齐沙漠北缘机械沙障对地表土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持通报, 2021, (3): 50-55.
- JIN L N, DANG X H, GAO Y, *et al.* Effects of mechanical sand barriers on erodibility on northern edge of kubuqi desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, (3): 50-55. (in Chinese)
- [14] 高永. 沙柳沙障防治沙技术研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2022, 43(5): 56-60.
- GAO Y. A review on sand control and sand management technology of *Salix psammophila* barriers[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2022, 43(5): 56-60. (in Chinese)
- [15] 袁立敏, 黄海广, 闫德仁, 等. 不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 172-179.
- YUAN L M, HUANG H G, YAN D R, *et al.* Effect of wind-preventing and sand fixation of belt sand barrier under different degree of sand burial[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 172-179. (in Chinese)
- [16] 左忠, 潘占兵, 张安东, 等. 干旱风沙区农田防护林网空间风速与地表风蚀特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 135-141.
- ZUO Z, PAN Z B, ZHANG A, *et al.* Spatial wind speed and surface wind erosion characteristics of farm-shelter forest network in arid sandy area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 135-141. (in Chinese)
- [17] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 64-70.
- WANG Y W, LUO L, ZHENG F, *et al.* Windbreak effect of sand-fixation forest on the edge of oasis in Minqin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 64-70. (in Chinese)
- [18] 周兰萍, 张德魁, 马全林, 等. 金塔县不同固沙模式的防风效益观测研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 186-189, 217.
- ZHOU L P, ZHANG D K, MA Q L, *et al.* Protection benefit of different sand-fixing measures in Jinta county[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 186-189, 217. (in Chinese)
- [19] 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(3): 449-464.
- [20] 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.
- WEI X H, ZUO H J, YAN M, *et al.* Compound rules of wind-proof effect of nylon grid sand barrier[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1584-1591. (in Chinese)
- [21] 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.
- ZHU B N, DANG X H, MENG Z J, *et al.* Effects of biodegradable poly lactic acid (PLA) sand barrier on wind prevention and sand fixation in urumqi sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 431-437. (in Chinese)
- [22] 李生宇, 雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用——以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例[J]. 干旱区研究, 2003(1): 7-10.
- LI Y S, LEI J Q. The ecological restoration functions of the straw-checker sand-barriers—a case study along the desert highways in the Gurbantonggut desert[J]. Arid Zone Research, 2003(1): 7-10. (in Chinese)
- [23] 韩庆杰, 倪成君, 屈建军, 等. 不同防沙工程措施对海岸带沙地植被恢复和土壤养分的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 155-163.
- HAN Q J, NI C J, QU J J, *et al.* The effect of different sand control engineering measures on vegetation restoration in coastal of sandy area and soil nutrient[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(2): 155-163. (in Chinese)
- [24] 张英华. 1991—2020年乌拉盖大风变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2021, (3): 35-36.
- ZHANG Y H. Analysis on variation characteristics of strong wind in ulagai from 1991 to 2020[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, (3): 35-36. (in Chinese)
- [25] 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, (3): 118-125.
- DANG X H, GAO Y, YU Y, *et al.* Windproof efficiency with new biodegradable PLA sand barrier and traditional straw sand barrier[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, (3): 118-125. (in Chinese)
- [26] 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠, 2003(4): 3-12.
- LIU X P, DONG Z B. Review of aerodynamic roughness length[J]. Journal of Desert Research, 2003(4): 3-12. (in Chinese)
- [27] 王文彪, 党晓宏, 张吉树, 等. 库布齐沙漠北缘不同作物秸秆平铺式沙障的防风效能[J]. 中国沙漠, 2013, (1): 65-71.
- WANG W B, DANG X H, ZHANG J S, *et al.* Wind profile characteristics of new materials sand barriers in hobq desert[J]. Journal of Desert Research, 2013, (1): 65-71. (in Chinese)
- [28] 王舒菲, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区排土场重构土壤质地空间特征研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 40-51.
- WANG S F, CAO Y G, BAI Z K, *et al.* Spatial characteristics of reconstructed soil texture in dumping site of loess open-pit mining area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 40-51. (in Chinese)
- [29] 田美荣, 田雨欣, 杨伟超, 等. 不同规格芦苇沙障生态保护成效研究[J/OL]. 环境工程技术学报: 1-10[2023-03-05].
- TIAN M R, TIAN Y X, YANG W C, *et al.* Study on conservation effectiveness of reed sand barrier with different types[J/OL]. Journal of Environmental Engineering Technology: 1-10[2023-03-05]. (in Chinese)
- [30] 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(3): 111-116.
- GAO Y, QIU G Y, DING G D, *et al.* Effect of *Salix psammophila* checkerboard on reducing wind and stabilizing sand[J]. Journal of Desert Research, 2004(3): 111-116. (in Chinese)