

# 横孔与竖孔 HDPE 板栅栏防风 效益对比的风洞模拟

尚小伟<sup>1</sup>, 王云正<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 霍毅<sup>1</sup>, 屈建军<sup>2,3</sup>, 朱志昊<sup>2,3</sup>

[1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 3. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127]

**摘要:** [目的] 开展孔径大小相同而开孔方向不同的高密度聚乙烯(HDPE)板栅栏风洞模拟试验, 为 HDPE 板阻沙栅栏的应用和发挥更佳效应提供理论依据。[方法] 通过对不同开孔方向的横孔与竖孔 HDPE 板栅栏进行风洞模拟试验, 比较其风速廓线、空气动力学参数、流场和防风效能差异, 分析横孔结构与竖孔结构对 HDPE 板栅栏的防风效益影响。[结果] 在 HDPE 板栅栏 -1 H(H 表示栅栏高度, 1 H=23 cm) 前和 9 H 后, 风速随高度增加呈对数分布规律( $p<0.05$ )。竖孔栅栏与横孔栅栏相比, 风速廓线更稳定, 空气动力学粗糙度和摩阻风速更高。HDPE 板横孔栅栏在底部出现加速区(-1 H 到 2 H), 减速区随风速增大分裂成两部分(1—5 H 和 8—15 H); 而竖孔栅栏通过地表风速梯度衰减实现沙粒定向输移, 减速区随风速增加变化较小。在 HDPE 板栅栏 -7 H 到 -1 H 处, 栅栏的防风效能有小幅度提升(5.1%~8.4%); 在 -1 H 到 1 H 处, 防风效能大幅度下降(19.6%~28.0%); 在 1 H 后, 防风效能逐渐提升直至稳定(43.3%~55.6%)。较高风速时, 竖孔栅栏防风效能高于横孔栅栏 50.4% ( $p<0.05$ )。随着风速变大, 横孔栅栏防风效能显著下降( $p<0.05$ ), 而竖孔栅栏防风效能几乎不变( $p>0.05$ )。[结论] HDPE 板竖孔栅栏对风速降低的综合效果更强, 更稳定, 更持久, 在防沙治沙领域有广泛的推广与应用价值。

**关键词:** HDPE 板栅栏; 横孔; 竖孔; 防风效能

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)04-0134-09

中图分类号: S157.2, S288

**文献参数:** 尚小伟, 王云正, 刘建国, 等. 横孔与竖孔 HDPE 板栅栏防风效益对比的风洞模拟[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 134-142. Shang Xiaowei, Wang Yunzheng, Liu Jianguo, et al. Wind tunnel simulation comparing windproof performance of high-density polyethylene board fences with horizontal versus vertical holes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 134-142. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.029; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.029.

## Wind tunnel simulation comparing windproof performance of high-density polyethylene board fences with horizontal versus vertical holes

Shang Xiaowei<sup>1</sup>, Wang Yunzheng<sup>1</sup>, Liu Jianguo<sup>1</sup>, Huo Yi<sup>1</sup>, Qu Jianjun<sup>2,3</sup>, Zhu Zhihao<sup>2,3</sup>

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 2. Guangdong Provincial Laboratory of Southern Marine Science and Engineering, Guangzhou, Guangdong 511458, China; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

**Abstract:** [Objective] Wind tunnel simulation tests of high-density polyethylene (HDPE) board fences with the same hole diameter but different opening directions were conducted in order to provide a theoretical basis for the better application and better effect of HDPE board sand-blocking fences. [Methods] Wind tunnel simulations compared wind speed profiles, aerodynamic parameters, flow field characteristics and windbreak efficiency between fences featuring holes oriented horizontally versus vertically. The analysis focused on the impact of hole orientation (horizontal vs. vertical) on windproof performance. [Results] Both fence types exhibited logarithmic wind speed distributions at -1 H (H = fence height of 23 cm) upwind and 9 H downwind ( $p<0.05$ ). The

收稿日期: 2025-03-10

修回日期: 2025-05-02

采用日期: 2025-05-05

资助项目: 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科研项目“沙漠地区光伏建设与生态治理耦合系统研究”(NW-RD037-2023); 内蒙古自治区科技重大专项“揭榜挂帅”项目(2024JBGS00130203)

第一作者: 尚小伟(1993—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持与沙漠化防治研究。Email: shangxiaowei@nwepdi.com。

通信作者: 朱志昊(1998—), 男(回族), 宁夏回族自治区石嘴山市人, 硕士, 主要从事风沙防治工程研究。Email: 1019731487@qq.com。

vertical hole configuration demonstrated superior profile stability, with higher aerodynamic roughness and greater friction speed than its horizontal counterpart. Flow field analysis revealed that the horizontal fence exhibited notable near-surface acceleration zones (from  $-1 H$  to  $2 H$ ), and its deceleration zone split into two parts ( $1-5 H$  and  $8-15 H$ ) in response to increased wind speed. However, the vertical fence effectively regulated sand transport through controlled speed gradient attenuation, and its deceleration zone changed little with the increase in wind speed. In particular, the vertical fence's deceleration zone maintained stable aerodynamic characteristics across the wind speed regimes. Windbreak efficiency progression showed three phases: a moderate improvement of  $5.1\%-8.4\%$  (from  $-7 H$  to  $-1 H$ ), abrupt decline of  $43.3\%\sim 55.6\%$  (from  $-1 H$  to  $1 H$ ), and a gradual increase in stability ( $43.3\%-55.6\%$ ) post  $-1 H$ . At higher wind speeds, the windbreak efficiency of the vertical fence was  $50.4\%$  higher than that of the horizontal fence ( $p < 0.05$ ). Notably, the efficiency of the horizontal fence decreased by  $45.6\%$  with increasing wind speed ( $p < 0.05$ ), whereas the vertical fence maintained consistent performance ( $p > 0.05$ ). [Conclusion] HDPE fence with vertically oriented holes demonstrated superior comprehensive wind speed reduction capacity, remarkable flow field stability, and maintained performance across variable wind conditions, indicating significant potential for large-scale application in sand control and desertification prevention engineering.

**Keywords:** HDPE board fence; horizontal-hole; vertical-hole; windproof efficiency

高密度聚乙烯 (high density polyethylene, 简称 HDPE) 材料阻沙栅栏具有化学稳定性、耐热性和耐冻融性, 且抗紫外线性能强, 耐老化, 施工过程方便<sup>[1-3]</sup>, 在光伏电站、铁路、公路、居民点的风沙防治中得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。王逸敏等<sup>[6]</sup>对比 HDPE 栅栏和草方格沙障对植被的影响, 得出 HDPE 栅栏中植被的物种数大于同期草方格沙障中的物种数。祁帅等<sup>[7]</sup>对比不同类型沙障对沉积物的影响, 得出土壤颗粒组成优化表现为: HDPE 栅栏 > 沙柳沙障 > PLA 沙障。李敏岚等<sup>[8]</sup>研究 HDPE 栅栏与草方格沙障对土壤水分的影响, 发现 HDPE 栅栏蓄水保水效果高于草方格沙障。

HDPE 栅栏的高度与孔隙度是影响其防风效益的核心参数。张凯等<sup>[9]</sup>运用数值模拟方法研究 HDPE 栅栏周围的风沙流场, 建议在现场布设时使用  $40\%\sim 50\%$  孔隙度的栅栏, 在经济条件允许的情况下可考虑适当增加栅栏高度, 以保证路基免受风沙侵蚀。张帅等<sup>[3]</sup>通过风洞模拟试验对比不同规格

HDPE 栅栏防风效能, 发现在一定范围内, 栅栏防风效果与高度呈正相关关系, 与孔隙度呈负相关关系, 高度和孔隙度对栅栏防风效能的影响较大。尽管高度与孔隙度起着关键性作用, 但栅栏结构能改变局部气流结构、调控沙粒沉积模式, 直接决定栅栏对风沙活动防护效应的高低, 间接影响风沙防治工程的长期稳定性与维护成本<sup>[10]</sup>。董治宝<sup>[11]</sup>也提出栅栏结构设计优化是其提供防风固沙效能的重要突破口。

目前 HDPE 板栅栏均为横向开孔, 在使用过程中常常引起底部掏蚀严重 (图 1a 和 1b)。国内外采用秸秆树枝材料的阻沙栅栏, 因便于栽植均为竖向, 开孔也为竖向 (图 1c 和 1d)。HDPE 板作为阻沙栅栏, 其竖状孔的防风固沙效果到底如何 还未见报道。因此, 对孔径大小相同而开孔方向不同的 HDPE 板栅栏进行风洞模拟试验, 对比其风速廓线、流场和防风效能差别, 分析 HDPE 横竖孔板栅栏防风效应差别, 为 HDPE 板阻沙栅栏更好的应用和发挥更佳效应提供理论依据。



图1 野外 HDPE 板栅栏和秸秆树枝栅栏

Fig.1 HDPE board fence and straw branch fence in field

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

风洞模拟试验于 2022 年 9 月在中国科学院西

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  $1\sim 40$  m/s, 测量精度  $\pm 0.3\%\sim \pm 0.5\%$ 。试验段横截面  $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ , 长度  $21\text{ m}$ , 边界层最大厚度  $0.5\text{ m}$ , 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<sup>[12]</sup>。

试验材料分别选用孔径为 8 cm×2.5 cm 的横向

开孔 HDPE 板栅栏(图 2a)和竖向开孔 HDPE 板栅栏(图 2b)。2 种栅栏孔隙度相同。HDPE 板栅栏长 120 cm,高 23 cm,分别将横孔与竖孔栅栏布设在风洞的试验段。

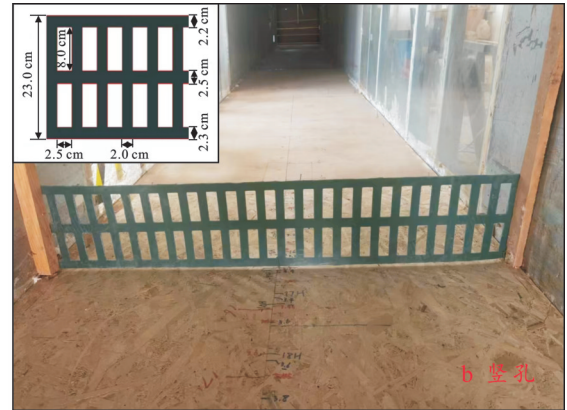
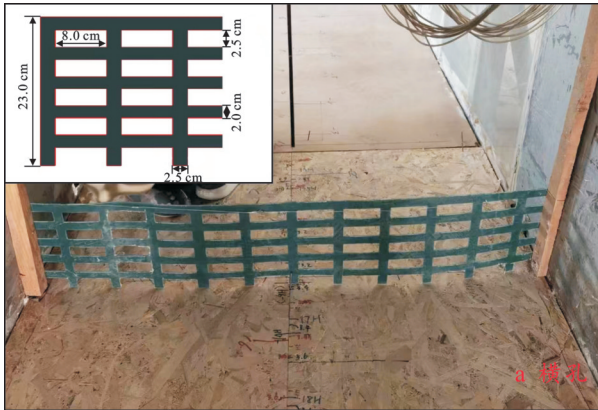


图 2 横孔和竖孔 HDPE 板栅栏

Fig.2 HDPE board fence with horizontal-hole and vertical-hole

1.2 数据收集与分析

分别选取 3 组风洞试验指示风速 (10, 15, 20 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,垂直方向设定与风洞底面分别相距 0.2,0.4,0.8,1.6,3.2,6.4,12.8,20.0,35.0,50.0 cm 共 10 个测点。HDPE 板栅栏

水平方向测点在栅栏上风向处距离定义为负值,栅栏下风向处距离定义为正值,沿风向测点分别与栅栏相距 -7,-5,-3,-2,-1,0,1,2,3,5,7,9,11,13,15 H (H 表示栅栏高度,1H=23 cm),共 15 个测点(图 3)。对于每个风速测量点,风速数据采集的持续时间为 30 s,风速记录频率为 1 s,每次记录时间为 20 s。

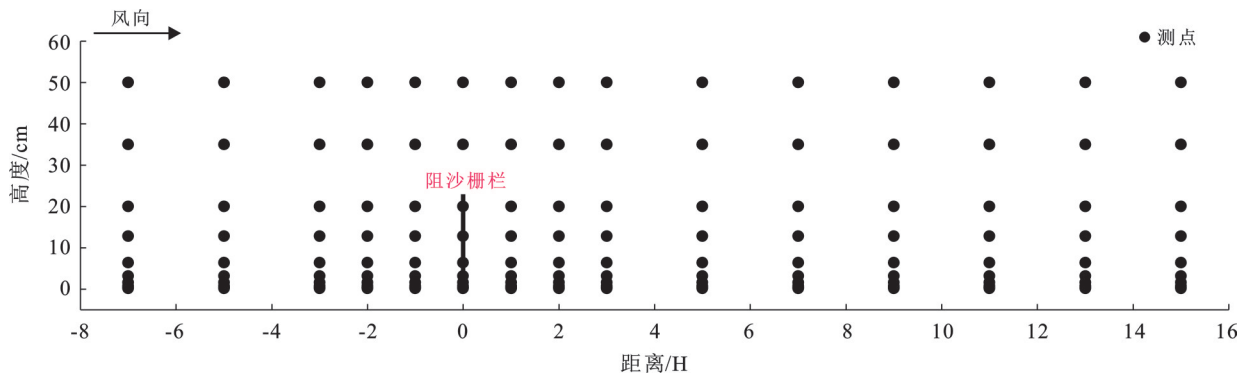


图 3 HDPE 板栅栏风速测点分布

Fig.3 Distribution of wind speed measuring points of HDPE board fences

风洞内部气流不存在温度梯度,呈中性层结,在空洞条件下部分位置的风速廓线满足对数分布规律<sup>[13]</sup>,公式为

$$u_z = (u_* / k) \ln(z / z_0) \quad (1)$$

式中:  $u_z$  为高度  $z$  处的风速 (m/s);  $u_*$  为摩阻风速 (m/s);  $z_0$  为空气动力学粗糙度 (cm);  $z$  为观测点高度 (cm);  $k$  为卡门常数,一般取 0.4。

运用最小二乘逼近实测风速廓线法计算空气动力学粗糙度和摩阻风速<sup>[13]</sup>,首先将  $a = u_* / k$  代入公式(1)得:

$$u_z = a \ln(z / z_0) = a \ln z - a \ln z_0 \quad (2)$$

再将  $b = -a \ln z_0$  代入公式(2)得:

$$u_z = a \ln z + b \quad (3)$$

通过最小二乘法可将风速廓线数据拟合公式(3)形式,从而得到  $a$  和  $b$  具体数值。空气动力学粗糙度 ( $z_0$ ) 和摩阻风速 ( $u_*$ ) 计算公式为

$$z_0 = \exp(-b/a) \quad (4)$$

$$u_* = ka \quad (5)$$

防风效能主要用于评价栅栏对风速削减程度,体现栅栏结构的保护能力<sup>[14]</sup>,计算公式如下:

$$E_{imn} = (v_{in} - v_{imn}) / v_{in} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $i$ 表示风洞试验指示风速(m/s); $m$ 表示布设测点水平相对位置; $n$ 表示皮托管各测点高度(cm); $v_{imn}$ 表示在指示风速为*i*的净风环境下坐标为( $m, n$ )点的平均风速(m/s); $v_{in}$ 表示在无栅栏环境下,各高度( $n$ )在3种指示风速( $i$ )下的平均风速(m/s); $E_{imn}$ 表示指示风速( $i$ )下位于水平距离( $m$ )和高度( $n$ )的防风效能,其数值越大表示防风效应越好。风速10 m/s下,阻沙栅栏后1 H,20 cm高度处防风效能公式中角标可表示为*i*=10, $m$ =1, $n$ =20。

实际应用中,气流带动沙粒90%发生在距地面30 cm以下高度范围内<sup>[15]</sup>。因此本文选取35 cm高度处风速对比防风效能变化趋势,足以确保超过90%的沙物质运移在此高度之下。

对35 cm高度及以下的防风效能数据进行正态检验和方差齐性检验,数据不符合正态分布且方差不齐,因此对其进行非参数检验中的Mann-Whitney

U检验,比较相同风速下横孔栅栏与竖孔栅栏防风效能是否存在显著差异,以及同种栅栏在不同风速下的防风效能是否存在显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 风速廓线特征

在10 m/s风速下,无栅栏空洞和HDPE板横孔、竖孔栅栏周围的风速廓线特征见图4。在栅栏前方(-5 H和-1 H处),风速廓线逐渐偏离空洞入流廓线。随着距离栅栏越近,风速逐渐减小,横孔栅栏前方风速减小幅度大于竖孔栅栏前方。在栅栏后方附近(1 H和3 H处),高度3.2 cm以下,竖孔栅栏对风速的减弱效果高于横孔栅栏,在高度6.4~35.0 cm之间,则反之。在栅栏后一段距离处(9 H和15 H),风速进一步减小,逐渐趋于稳定,风速廓线结构逐渐与入流廓线相似,横孔栅栏对风速减弱效果高于竖孔栅栏。

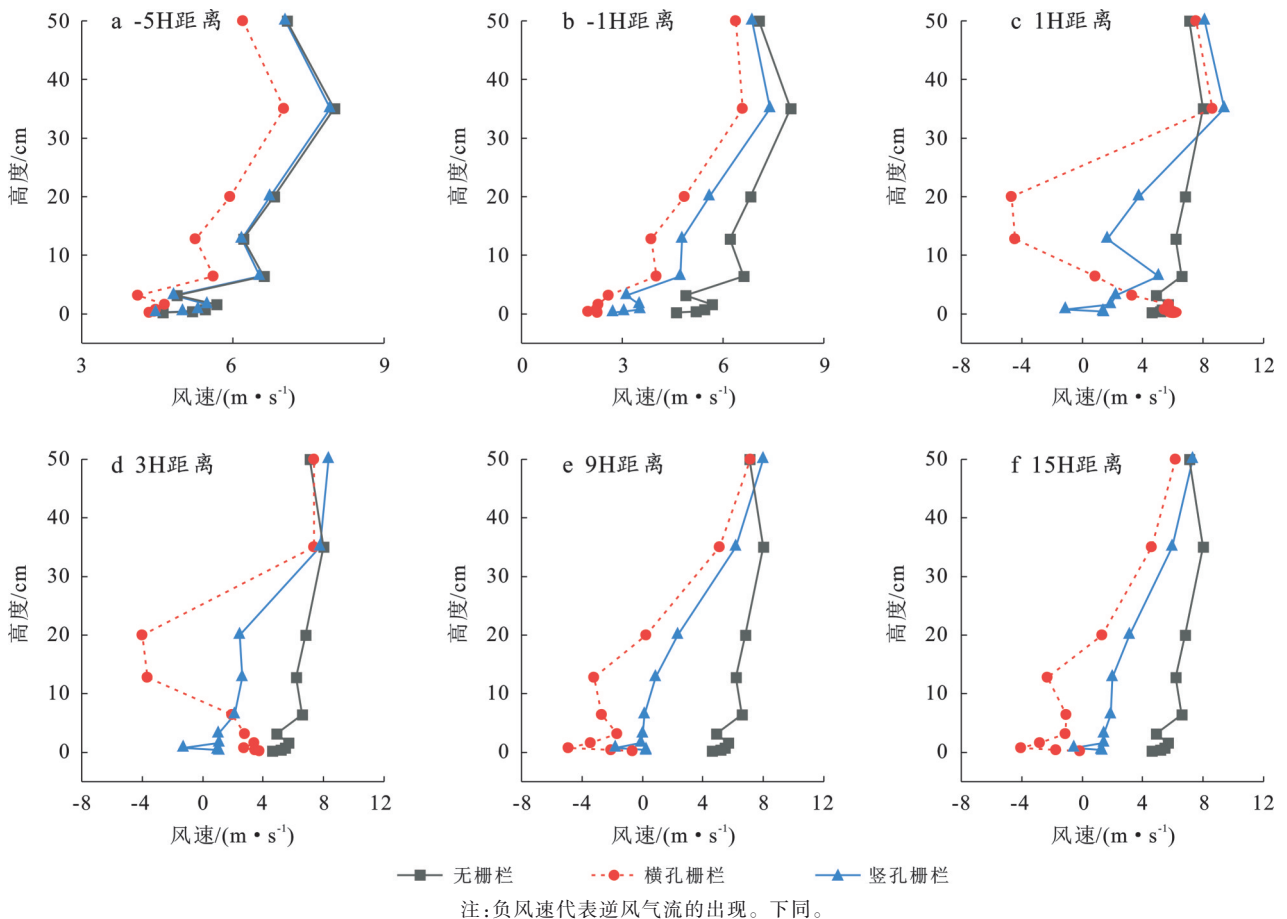


图4 10 m/s风速下不同测点处风速廓线

Fig.4 Wind speed profiles at different measurement points at 10 m/s wind speed

在试验过程中,当风速为15,20 m/s时,HDPE板栅栏周围的风速廓线呈现相似的变化规律(如图5和图6所示)。在栅栏前方(-1 H处),风速廓线已偏离空洞入流廓线。在栅栏后方附近(1 H处),

风速大幅下降,但在高度3.2 cm以下,横孔栅栏风速高于空洞风速。在栅栏后方一段距离处(9 H和15 H),风速逐渐趋于稳定,风速廓线结构逐渐与入流廓线相似。

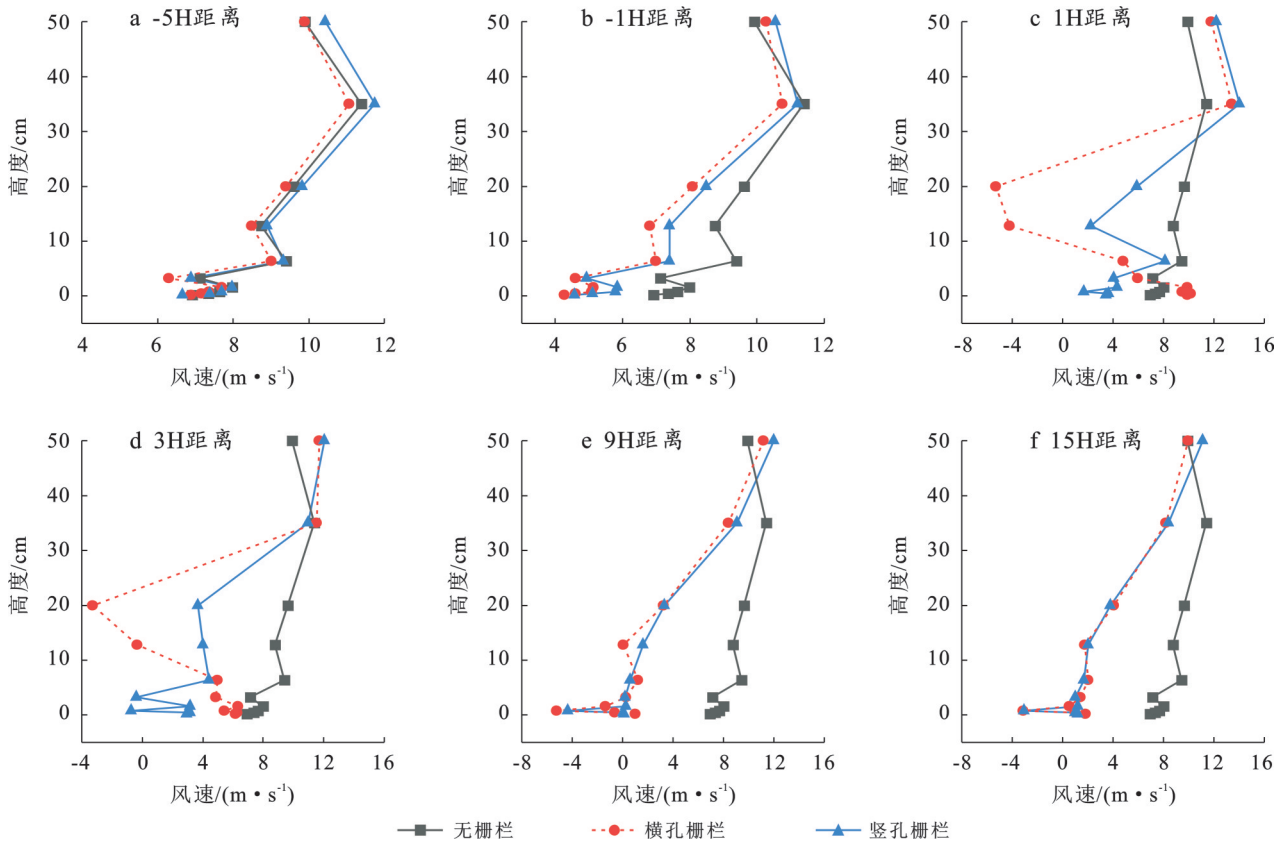


图 5 15 m/s 风速下不同测点处风速廓线

Fig.5 Wind speed profiles at different measurement points at 15 m/s wind speed

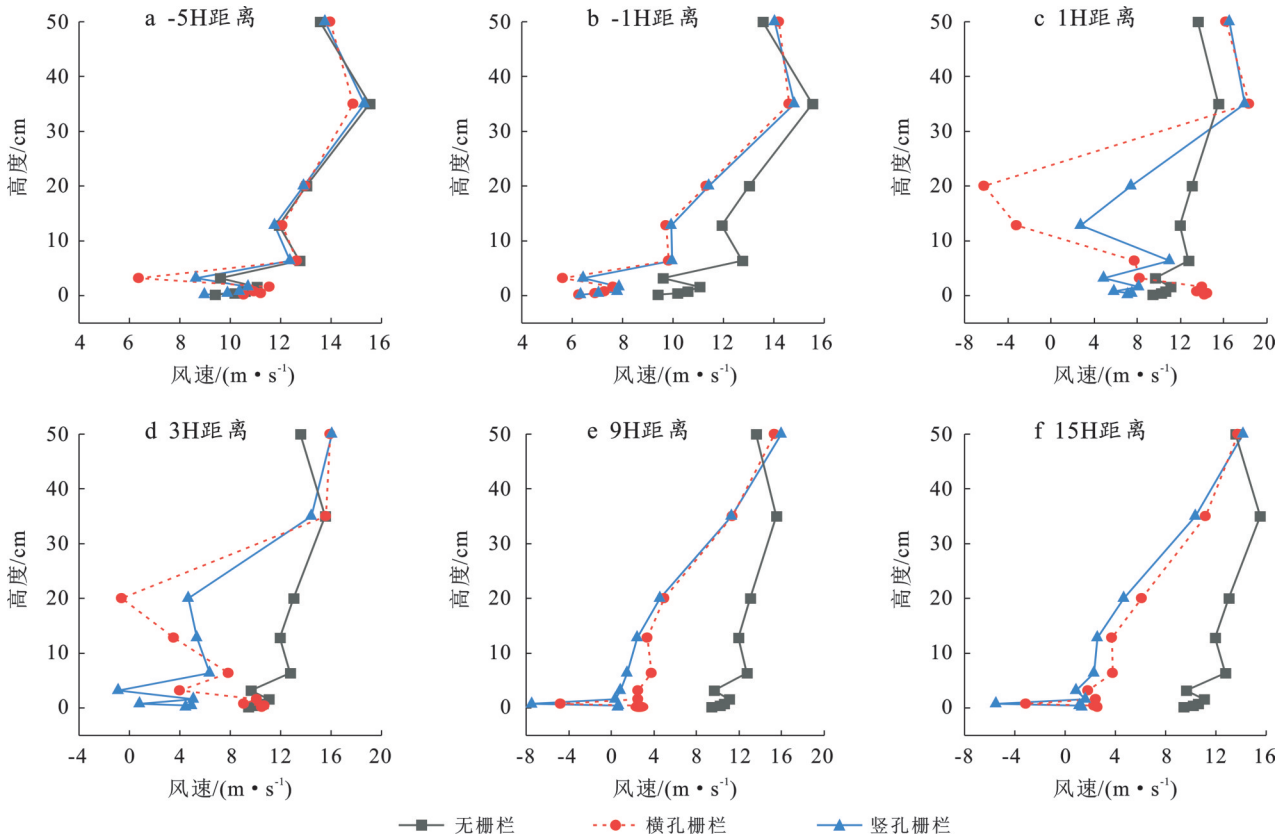


图 6 20 m/s 风速下不同测点处风速廓线

Fig.6 Wind speed profiles at different measurement points at 20 m/s wind speed

以高度对数值为自变量,平均风速为因变量,选取-1 H, 9 H和15 H三处进行风速廓线拟合,对比空洞、横孔栅栏和竖孔栅栏空气动力学粗糙度和摩阻系数(表1)。风速廓线拟合系数均高于0.3,拟合具有统计学意义( $p < 0.05$ ),可见选取位置上风速廓线在垂直高度上基本符合对数分布规律。栅栏后9 H处空气动力学粗糙度和摩阻风速达到最大

值,表明随着距离增加,空气动力学粗糙度和摩阻风速呈现先增大后减小趋势。在栅栏后9 H和15 H处,在10 m/s风速下,横孔栅栏空气动力学粗糙度和摩阻风速高于竖孔栅栏,而在20 m/s风速下,则反之。可见在风速较小时,横孔栅栏对气流削减效果好,而风速较大时,竖孔栅栏对气流的削减程度更强。

表1 不同风速下风速廓线对数拟合方程、空气动力学粗糙度及摩阻风速  
Table 1 Logarithmic fitting equations for wind speed profiles, aerodynamic roughness and friction wind speeds at different wind speed

相对位置	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	栅栏类型	拟合方程	$z_0/\text{cm}$	$u_* / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2$	$p$
对照	10	空洞	$u_z = 0.498 \ln z + 5.364$	0.001	0.199	0.748	$< 0.01$
	15		$u_z = 0.665 \ln z + 7.687$	0.001	0.266	0.735	$< 0.01$
	20		$u_z = 0.886 \ln z + 10.536$	0.001	0.354	0.714	$< 0.01$
-1 H	10	横孔栅栏	$u_z = 0.829 \ln z + 2.568$	0.045	0.332	0.812	$< 0.01$
		竖孔栅栏	$u_z = 0.783 \ln z + 3.455$	0.012	0.313	0.810	$< 0.01$
	15	横孔栅栏	$u_z = 1.120 \ln z + 5.123$	0.010	0.448	0.788	$< 0.01$
		竖孔栅栏	$u_z = 1.099 \ln z + 5.617$	0.006	0.440	0.784	$< 0.01$
	20	横孔栅栏	$u_z = 1.456 \ln z + 7.338$	0.006	0.582	0.731	$< 0.01$
		竖孔栅栏	$u_z = 1.422 \ln z + 7.613$	0.005	0.569	0.768	$< 0.01$
9 H	10	横孔栅栏	$u_z = 1.288 \ln z - 2.388$	6.386	0.515	0.336	$< 0.05$
		竖孔栅栏	$u_z = 1.222 \ln z - 0.062$	1.052	0.489	0.521	$< 0.05$
	15	横孔栅栏	$u_z = 1.839 \ln z - 0.704$	1.466	0.736	0.484	$< 0.05$
		竖孔栅栏	$u_z = 1.944 \ln z - 0.383$	1.218	0.778	0.549	$< 0.01$
	20	横孔栅栏	$u_z = 2.074 \ln z + 1.584$	0.466	0.830	0.472	$< 0.05$
		竖孔栅栏	$u_z = 2.554 \ln z - 0.444$	1.190	1.022	0.518	$< 0.05$
15 H	10	横孔栅栏	$u_z = 1.161 \ln z - 1.697$	4.313	0.464	0.397	$< 0.05$
		竖孔栅栏	$u_z = 0.978 \ln z + 1.175$	0.301	0.391	0.579	$< 0.01$
	15	横孔栅栏	$u_z = 1.489 \ln z + 0.726$	0.614	0.596	0.511	$< 0.05$
		竖孔栅栏	$u_z = 1.620 \ln z + 0.624$	0.680	0.648	0.529	$< 0.05$
	20	横孔栅栏	$u_z = 1.963 \ln z + 1.765$	0.407	0.785	0.548	$< 0.01$
		竖孔栅栏	$u_z = 2.145 \ln z + 0.405$	0.828	0.858	0.517	$< 0.05$

## 2.2 风速流场结构特征

图7表明,当气流接近栅栏时,部分气流穿过HDPE板栅栏孔隙,部分气流受到挤压而沿栅栏爬行,在栅栏顶部出现倾斜向上的喷射流。受到HDPE板栅栏干扰,在栅栏后方出现减速区。横孔栅栏在近地表和高度距地表15 cm处出现2个明显减速区,而竖孔栅栏仅在近地表出现1个明显减速区。此外,横孔栅栏在近地表的-1 H到2 H范围出现加速区。当来流风速为10 m/s时,横孔栅栏风速在2 m/s以下范围明显大于竖孔栅栏。随着来流风速增大,横孔栅栏风速在2 m/s以下范围逐渐分裂成2部分(1—5 H和8—15 H),并且面积大幅减小。而竖孔栅栏风速在2 m/s以下范围仅面积逐渐减小,起始

位置由0 H处到4 H处。随着来流风速增大,横孔栅栏近地表加速区风速最大范围由4 m/s以上范围变成12 m/s以上范围。

## 2.3 防风效能特征

不同风速下,35 cm高度处HDPE板栅栏防风效能可分为3个部分(图8)。-7 H到-1 H范围,栅栏防风效能有小幅提升(5.1%~8.4%);-1 H到1 H范围,栅栏防风效能大幅度下降(19.6%~28.0%);1 H到15 H范围,栅栏防风效能逐渐提升直至稳定(43.3%~55.6%)。风速为10, 15 m/s时,栅栏后方到5 H处,竖孔栅栏防风效能高于横孔,5 H后横孔栅栏防风效能高于竖孔。风速为20 m/s时,竖孔栅栏防风效能均高于横孔。风速为10, 15, 20 m/s时,横

孔栅栏防风效能最大值分别为 36.1%, 30.0% 和 28.6%, 竖孔栅栏防风效能最大值分别为 27.7%,

28.6% 和 34.5%。可见随着风速变大,横孔栅栏防风效能会下降,竖孔栅栏防风效能会上升。

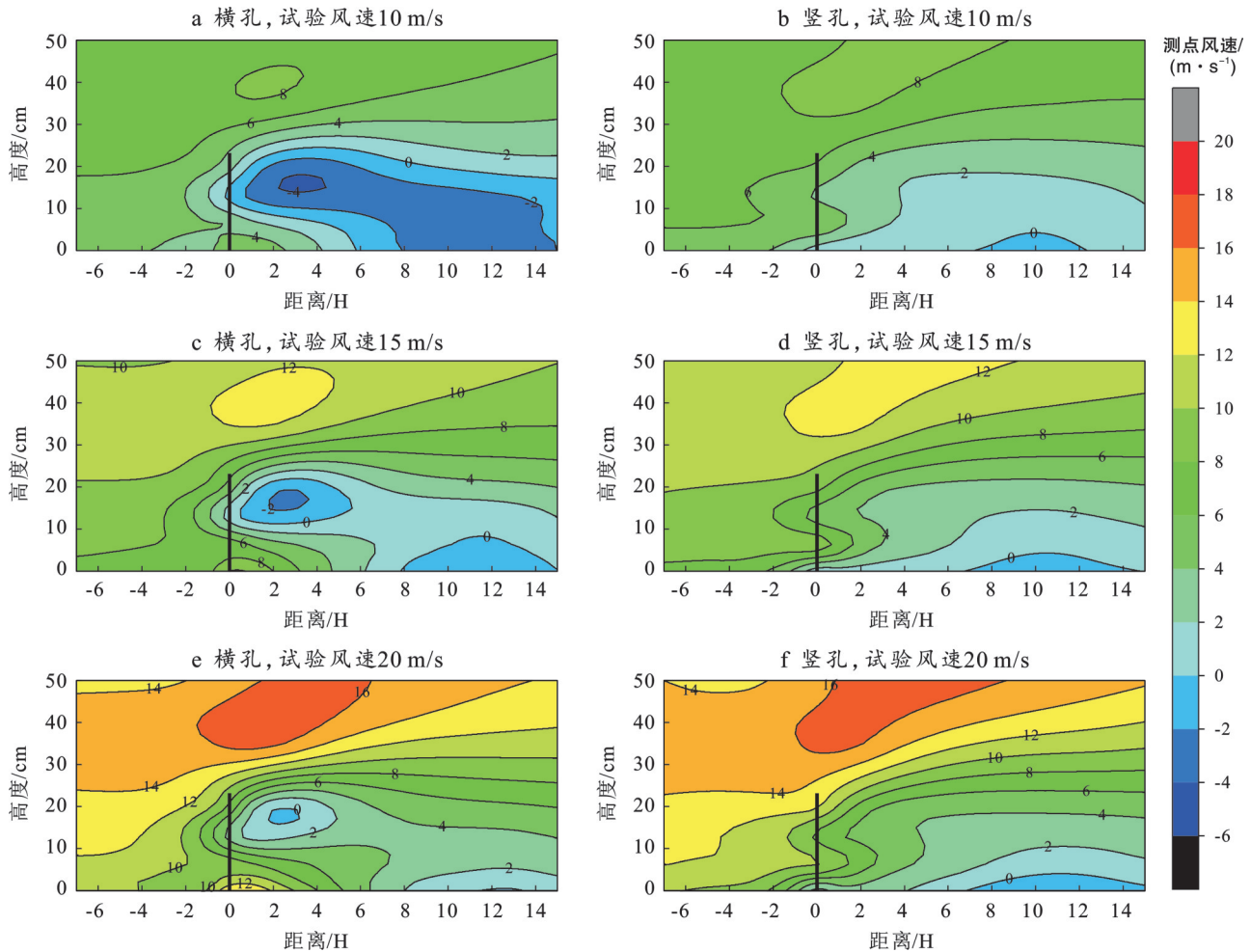


图 7 不同风洞试验风速下 HDPE 板栅栏风速流场

Fig.7 Wind speed flow field of HDPE board fence at different wind speeds of wind tunnel simulation

图 9 表明,在 20 m/s 风速下,竖孔栅栏防风效能较横孔栅栏高 50.4% ( $p < 0.05$ )。其余风速时横孔栅栏与竖孔栅栏的防风效能不存在显著差异 ( $p > 0.05$ )。横孔栅栏在不同风速时的防风效能存在显著差异 ( $p < 0.05$ ),风速 20 m/s 的防风效能较 10 m/s 低 45.6%。而竖孔栅栏防风效能随着风速变大未产生显著差异 ( $p > 0.05$ ),变化幅度小于 1.2%。

### 3 讨论

#### 3.1 横孔与竖孔 HDPE 板栅栏的风速廓线特征

风速廓线分布形式反映垂直方向上风速的变化趋势,显示近地表气流的基本活动规律<sup>[13]</sup>。在 HDPE 板栅栏前部分位置,由于栅栏对风速的影响还未显现,风速廓线与无栅栏时入流廓线基本重合,而当气流靠近栅栏,风速廓线受到影响,逐渐偏离入流廓线,出现低于空洞风速部分,这与以往研究相近<sup>[14]</sup>。由于 HDPE 板栅栏兼具透风性和柔韧性,当

气流经过栅栏会产生许多湍流<sup>[16]</sup>,导致风速廓线紊乱。随着距离增加,气流逐渐变得平稳,风速廓线又恢复成对数分布规律。风速廓线特征表明,横孔栅栏对风速的减弱效果更强,特别是在风速较低的时候,但是其风速廓线更紊乱,在近地表甚至出现高于空洞的风速,可以看出竖孔栅栏对风速的减弱效果更稳定。

空气动力学粗糙度可以直观地展现地表对风沙流与气流的阻碍程度,摩阻风速则直接展示地表所承受风的剪切应力的大小,在分析风速廓线特征时均是重要指标<sup>[17]</sup>。结合风速廓线变化规律与空气动力学粗糙度和摩阻风速来看,通过设置 HDPE 板栅栏,能有效减小风速,控制风沙流运动。在较低风速时,横孔栅栏对风速减弱效果更强,表现出较高的防风效益。但随着风速增大,横孔栅栏空气动力学粗糙度下降,而竖孔栅栏对风速减弱效果更稳定,在减弱风速和增大地面所承受风的剪切力方面表现更出色。

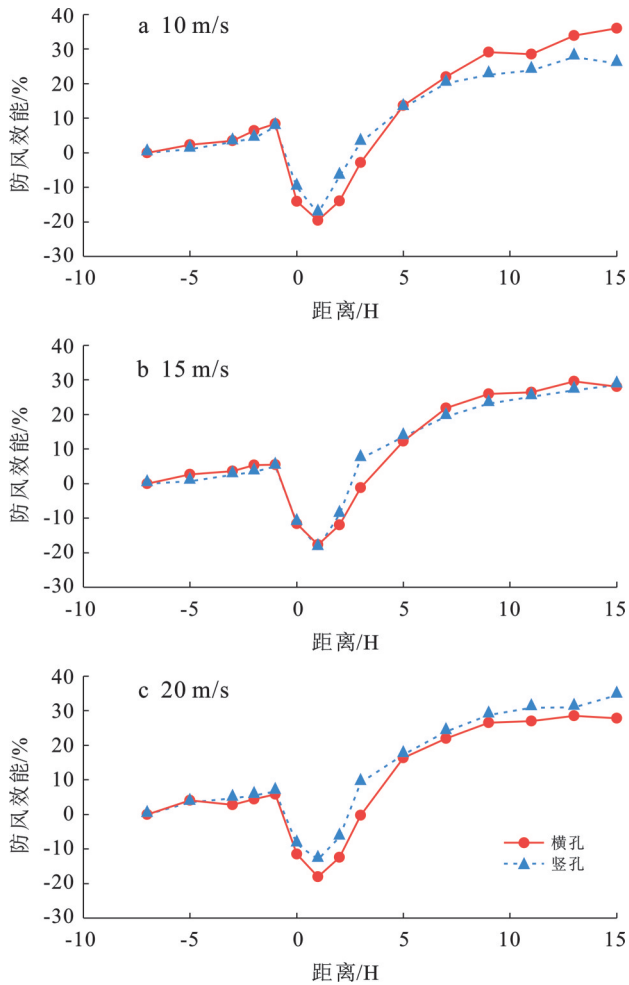
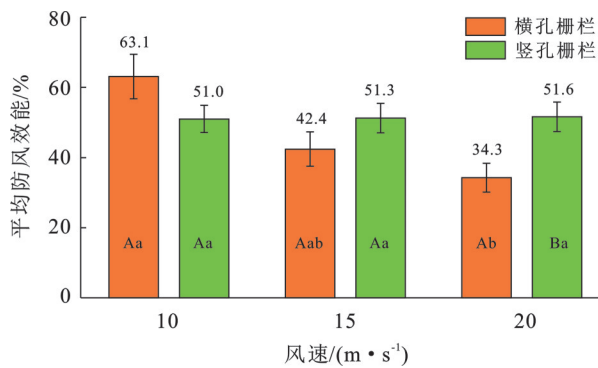


图8 不同风速下HDPE板栅栏防风效能  
Fig.8 Windproof efficiency of HDPE board fence at different wind speeds



注:不同大写字母表示相同风速下不同栅栏防风效能存在显著差异( $p < 0.05$ );不同小写字母表示相同栅栏在不同风速下防风效能存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图9 不同风速下HDPE板栅栏平均防风效能  
Fig.9 Average windproof efficiency of HDPE board fence at different wind speeds

### 3.2 横孔与竖孔HDPE板栅栏的风速流场特征

HDPE板栅栏的存在加速栅栏上方的风速,并且在栅栏顶部出现加速的喷射流<sup>[18-19]</sup>。在喷射流的作用下,风沙流在栅栏前被抬升,更多沙粒被气流携带

输送到栅栏之上<sup>[12]</sup>。HDPE板横孔栅栏底部出现加速区,与青藏铁路沿线阻沙栅栏流场特征相似<sup>[20]</sup>,可能是由于爬升气流不容易通过孔洞,受到挤压从而出现风力集中现象<sup>[21]</sup>,经过长时间吹蚀,栅栏就会出现掏蚀现象,从而影响其使用寿命。而竖孔栅栏作用于地表,显著增加地表粗糙度,使原来流经地表的气流成为一种特殊形式的“次生流”<sup>[10]</sup>,栅栏后方风速缓慢降低,有利于沙粒的疏导和分流,从而有效提升栅栏的使用寿命。随着风速增大,竖孔栅栏减速区范围变化较小,表明竖孔栅栏适应性强,对气流的减速作用更持久稳定<sup>[10,16]</sup>。

### 3.3 横孔与竖孔HDPE板栅栏的防风效能特征

气流在接近栅栏时开始受到干扰,导致风速降低,从而增强栅栏的防风效能。在HDPE板栅栏附近,栅栏的防风效能出现大幅度下降。这一现象可能是由于栅栏对气流的直接阻挡作用,导致气流在栅栏附近产生涡流紊乱,从而降低栅栏的防风效能<sup>[22]</sup>。在HDPE板栅栏后方,栅栏的防风效能逐渐提升直至稳定。表明在一定范围内,随着栅栏距离的增加,气流逐渐稳定,栅栏的防风效能随之增强<sup>[9]</sup>。在20 m/s较强风速下,竖孔栅栏防风效能显著高于横孔栅栏( $p < 0.05$ ),HDPE板栅栏主要在风力强劲地区使用,可见竖孔这种结构对于HDPE板栅栏提高防风效益有重大意义。随着风速变大,横孔栅栏更容易出现风力集中现象,导致其产生更强的加速区,防风效能显著下降( $p < 0.05$ ),而竖孔栅栏提供更加均衡的风速减缓效果,防风效能未出现显著差异( $p > 0.05$ ),显示出更加稳定的防风效果。

## 4 结论

(1) 在HDPE板栅栏-1 H前和9 H后,风速廓线偏离入流廓线,呈对数分布规律;在1 H和3 H处,横孔栅栏出现比空洞风速还高的加速范围。竖孔栅栏与横孔栅栏相比,风速廓线更稳定,在较高风速下,减弱风速和增大地面所承受风的剪切力方面表现更出色。

(2) HDPE板横孔栅栏底部出现加速区,使其容易出现掏蚀现象,影响使用寿命。而HDPE板竖孔栅栏作用于地表,风速缓慢降低,沙粒疏导和分流效果好,有效提升其使用寿命。竖孔栅栏与横孔栅栏相比,对气流减速效果更稳定。

(3) 在HDPE板栅栏-7 H到-1 H,栅栏的防风效能有小幅提升;在-1 H到1 H,防风效能出现大幅度下降;在1 H后,防风效能逐渐提升直至稳定。在较高风速下,竖孔栅栏防风效能显著高于横孔栅

栏( $p < 0.05$ )。随着风速变大,横孔栅栏防风效能显著下降( $p < 0.05$ ),而竖孔栅栏平均防风效能几乎不变( $p > 0.05$ )。

### 参考文献(References)

- [1] 邴丹琿,谈嫣蓉,陈文业,等.我国沙障的研究进展与应用综述[J].中国水土保持,2023(7):37-40.  
Bing Danhui, Tan Yanrong, Chen Wenye, et al. Research progress and application of sand barriers in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(7):37-40.
- [2] 洪贤良,屈建军,张建青,等.高密度聚乙烯(HDPE)防沙网使用寿命评估[J].中国沙漠,2020,40(3):1-6.  
Hong Xianliang, Qu Jianjun, Zhang Jianqing, et al. Test and evaluation methods of the useful life for HDPE net sand barriers [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3):1-6.
- [3] 张帅,丁国栋,高广磊,等.硬质地HDPE沙障防风效益的风洞试验[J].北京林业大学学报,2020,42(3):127-133.  
Zhang Shuai, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Wind tunnel test on windproof benefit of horniness HDPE sand barrier [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3):127-133.
- [4] 张凯,杨子江,王起才,等.格库铁路HDPE板沙障孔隙率与有效防护距离关系[J].中国铁道科学,2019,40(5):16-21.  
Zhang Kai, Yang Zijiang, Wang Qicai, et al. Relationship between porosity and effective protection distance of HDPE board sand barrier on Golmud-Korla railway [J]. China Railway Science, 2019,40(5):16-21.
- [5] 李凯崇,周沁,丁录胜,等.新疆戈壁区HDPE板沙障风沙防护机理及效果评价[J].中国铁道科学,2019,40(3):10-14.  
Li Kaichong, Zhou Qin, Ding Lusheng, et al. Prevention mechanism and effect evaluation of HDPE sand barrier in Gobi area of southern Xinjiang [J]. China Railway Science, 2019,40(3):10-14.
- [6] 王逸敏,刘康,屈建军.沙障对流沙地植被和土壤养分的影响[J].中国沙漠,2019,39(3):56-65.  
Wang Yimin, Liu Kang, Qu Jianjun. Effects of sand barriers on vegetation and soil nutrient in sand dunes [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(3):56-65.
- [7] 祁帅,汪季,党晓宏,等.3种低立式沙障内表层沉积物粒度特征研究[J].干旱区研究,2021,38(3):875-881.  
Qi Shuai, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Grain size characteristics of surface sediments in three low vertical sand barriers [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3):875-881.
- [8] 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.  
Li Minlan, Qu Jianjun, Tang Ximing, et al. Influence of HDPE honeycomb sand fixation on soil moisture [J]. Journal of Desert Research, 2020,40(1):136-144.
- [9] 张凯,王起才,张兴鑫,等.格库铁路HDPE板栅栏有效防护距离[J].交通运输工程学报,2020,20(5):105-115.  
Zhang Kai, Wang Qicai, Zhang Xingxin, et al. Effective protection distance of HDPE board fence in Golmud-Korla Railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020,20(5):105-115.
- [10] 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.
- [11] 董治宝.中国风沙物理研究五十年(I)[J].中国沙漠,2005,25(3):293-305.  
Dong Zhibao. Research achievements in aeolian physics in China for the last five decades (I) [J]. Journal of Desert Research, 2005,25(3):293-305.
- [12] 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.  
Zhu Zhihao, Qu Jianjun, Zhao Aiguo, et al. Wind tunnel test on wind-blown sand prevention effects of two kinds of magnesium cement board sand barriers [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(2):1-10.
- [13] 丁国栋,赵媛媛.风沙物理学[M].3版.北京:中国林业出版社,2021.  
Ding Guodong, Zhao Yuanyuan. Aeolian physics [M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2021.
- [14] 王茂林,宋玲,刘杰,等.双排尼龙阻沙网-草方格联合沙障防风效应的风洞实验[J].中国沙漠,2024,44(3):9-17.  
Wang Maolin, Song Ling, Liu Jie, et al. Wind tunnel experiment on windproof effect of double-row nylon sand-blocking net-grass square combination [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(3):9-17.
- [15] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.  
Wu Zheng. Aeolian landform and sand control engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [16] Wang Tao, Qu Jianjun, Niu Qinghe. Comparative study of the shelter efficacy of straw checkerboard barriers and rocky checkerboard barriers in a wind tunnel [J]. Aeolian Research, 2020,43:100575.