

库布齐沙漠新材料沙障的风速廓线特征

郭彩贇^{1,2,3}, 韩致文^{1,2}, 钟帅^{1,2,3}, 李爱敏^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 菏泽学院城市建设学院, 山东菏泽 274015)

摘要: [目的] 在库布齐沙漠杭锦旗独贵塔拉工业区测试 HDPE 网和植物纤维网新材料沙障防沙技术, 为工程沙障对比优选提供理论支持。[方法] 采用 Met One 014 A/024 A 型 8 通道风速风向仪 (CR200 X 数采仪), 观测沙障内 20, 80, 150 和 200 cm 这 4 个高度的 1 min 平均风速, 对比分析不同材料、规格、高度的方格沙障及前沿高立式阻沙栅栏影响下的风速廓线特征。[结果] (1) 几种不同规格和高度的 HDPE 网和植物纤维网方格沙障及前沿高立式阻沙栅栏, 都能显著降低近地表风速, 具有良好的防风固沙效应。(2) 方格沙障中心风速垂直变化幅度和变化规律, 仅与沙障平面规格和裸露高度密切相关, 与试验材料基本无关; 相同平面规格的方格沙障, 裸露高度越大, 防风效果越显著; 相同裸露高度的方格沙障, 小规格沙障的防风效果较为显著。(3) 沙障防风固沙效益对比, 需要充分考虑地貌部位、坡向、坡度、地表状况等的影响, 对比观测未实施防沙措施的裸沙区对应地貌部位的输沙强度、风沙流场等因素, 以便准确获取工程沙障效益参数。[结论] 库布齐沙漠采用的新材料工程沙障措施具有显著的防风效应, 在库布齐沙区的生态治理领域具有良好的推广前景。

关键词: 库布齐沙漠; 防沙试验; 新材料沙障; 风速廓线

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0260-06

中图分类号: S157.1, X171

文献参数: 郭彩贇, 韩致文, 钟帅, 等. 库布齐沙漠新材料沙障的风速廓线特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5):260-265. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.044; Guo Caiyun, Han Zhiwen, Zhong Shuai, et al. Wind profile characteristics of new materials sand-barriers in Hobq desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5):260-265. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.044

Wind Profile Characteristics of New Materials Sand-Barriers in Hobq Desert

GUO Caiyun^{1,2,3}, HAN Zhiwen^{1,2}, ZHONG Shuai^{1,2,3}, LI Aimin^{1,2,3,4}

(1. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Urban Construction, Heze University, Heze, Shandong 274015, China)

Abstract: [Objective] The experiments about the new materials of HDPE net and plant fiber net were conducted in Hangjin Banner, Duguitala industrial zone of Hobq Desert, in order to provide theoretical support for the sand-barrier optimization. [Methods] The Met One 014 A/024 A 8 channel anemometers (acquisition instrument CR200 X) were used to observe the 1 min-averaged wind speed at the heights of 20 cm, 80 cm, 150 cm and 200 cm, and the wind profiles under the effects of sand-barriers with different materials, specifications, heights of the checkboard barriers and the highly-set vertical sand barriers were comprised and analyzed. [Results] (1) The high parallel sand-barriers, HDPE and plant fiber net sand-barriers with different specifications all could significantly reduce the surface velocity, they also had good sand-fixing benefit. (2) The vertical wind variation range and regularity measured in the center of the checkboard barriers were found strongly related to the sand-barrier plane specification and the exposing height, no relation was found with the materials. Under the same test specification condition, the higher the exposed height was, the much

收稿日期: 2017-01-21

修回日期: 2017-03-16

资助项目: 国家科技支撑计划项目“库布齐沙漠生态综合治理产业发展技术与示范”(2015BAC06B01-01); 国家自然科学基金项目“基于床面侵蚀堆积观测的新月形沙丘向沙丘链演变研究”(41371025)

第一作者: 郭彩贇(1990—), 女(藏族), 甘肃省肃南县人, 硕士研究生, 研究方向为风沙灾害防治。E-mail: guocaiyun@lzb.ac.cn.

通讯作者: 韩致文(1963—), 男(汉族), 甘肃省会宁县人, 博士生导师, 研究员, 主要从事风沙地貌与防沙工程研究。E-mail: hzwen@lzb.ac.cn.

the velocity was reduced. At the checkboards with the same exposure height, the reducing effect of velocity with small size sand-barrier was more obvious. (3) The determination of the sand-fixing effect of sand-barriers with different specifications should take a full consideration of the influences of the topography position, slope direction, slope gradient and surface conditions. Besides that, it also needs to observe the sediment transport intensity, sand-flow field and other factors of the bare land topography that is not within the measurement zone. All these are essential to obtain the effectiveness of the engineering barrier accurately. [Conclusion] The sand barrier of the new material used in the Hobq desert had excellent effects of reducing velocity, and it has great application prospect in the ecological field.

Keywords: Hobq desert; desert preventive experiment; new material sand barriers; wind profiles

风速廓线即风速随高度的分布曲线。自 Bag-nold^[1]首次提出风速廓线术语以来,一直是风沙物理学研究的重要内容之一。拜格诺风速廓线遵循对数分布规律,在半对数纸上为通过点(u' , z')的直线:

$$U_g = 5.75V_*' \lg \frac{y}{k} + U_t \quad (1)$$

式中: k ——卡曼常数(0.4); U_t ——床面冲击启动风速(m/s); y ——空气动力学粗糙度; V_*' ——摩阻风速(m/s)。

Zinging 等^[2]认为,卡曼常数应随含沙量的增大而减小,将拜格诺风速廓线卡曼常数 k 修改为 0.375; Owen P. R. 也修改了拜格诺风速廓线的卡曼常数,建立的欧文风速廓线公式^[3](2)中摩阻流速 $V_*'^2$ 与摩阻流速 V_*' 存在相反的作用,二者互相制约使得风沙流底层的风速随高度增加而升高的过程变得较为缓慢,风速廓线在风沙流底层发生弯曲。

$$U_g = \frac{V_*'}{k} \lg \frac{2gy}{V_*'^2} + C \quad (2)$$

式中: C ——常数 9.7; V_*' ——摩阻风速(m/s); k ——卡曼常数(0.375); g ——高度(cm); y ——空气动力学粗糙度。

刘贤万^[4]、王洪涛等^[5]通过试验证明,净风和挟沙风在同样轴线风速条件下的剪切风速迥异,净风中的剪切风速只反映了地表粗糙度阻力,而挟沙风中的剪切风速包括地表阻力和跃移层阻力。在中性大气层结条件下,净风条件下边界层中的风速符合公式^[6]:

$$U_z = \frac{u_*'}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

式中: U_z ——高度 z 处风速(m/s); u_*' ——摩阻风速(m/s); k ——常数; z ——高度(cm); z_0 ——空气动力学粗糙度。而风沙流环境下扬沙边界层的内边界层风速廓线在半对数纸上向上凸,外边界层风速廓线接近于普朗特对数形式。

影响风速廓线分布形式的有地形坡度^[7-8]、植被盖度^[9-10]、沙丘表面砂粒粒径^[11-12]和沙障孔隙度^[13-14]等多种因素。目前关于风速廓线研究方法多为修正

不同于普朗特—拜格诺风速廓线的风沙流廓线系数,分段拟合风沙流风速廓线,使用其他函数拟合风沙流风速廓线和数值模拟等。

本文针对库布齐沙漠自然环境特征及沙漠化防治技术需求,在杭锦旗独贵塔拉工业区试验了 HDPE 网和植物纤维网新材料沙障防沙技术,观测了沙障中心 20, 80, 150 和 200 cm 等 4 个高度的 1 min 平均风速,对比分析了不同材料、规格、高度的方格沙障及前沿高立式阻沙沙障影响下的风速廓线特征,以期工程沙障对比优选提供理论支持。

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区概况

试验区位于鄂尔多斯高原北缘,地理坐标 108°53'43"E, 40°26'25"N, 广泛分布流动沙丘。该区属于典型温带大陆性干旱气候,具有夏秋温暖少雨,冬季风大干燥的气候特点,年均降水量约 186 mm, 年均蒸发量 2 278.7~3 274.4 mm, 年均气温 6.3 °C, 年均风速 3.2 m/s, 最大瞬时风速 30 m/s, 风向多为南、东南风。

1.2 材料选取

综合考虑库布齐沙漠的自然环境和防沙材料的运输成本,试验工程选取高密度聚乙烯网与植物纤维网 2 种强度高、无污染的透风式防沙新材料。

高密度聚乙烯,英文名为 high density polyethylene,简称 HDPE。该材料是一种结晶度为 80%~90%,支链化程度很小,符合《RoHS 指令》要求的热塑性树脂材料,最大密度 0.940~0.965 g/cm³,具有较强的化学稳定性和良好的透风率^[15-16],抗风化能力强,绝缘性能好,分子量等级较高,抗环境应力开裂性较强,使用寿命长达十年之久,且绿色环保,能回收重复利用,多用于薄膜、吹塑、防沙工程等^[17]。为适应沙漠高低温环境,延长沙障抗老化时间,本试验使用的 HDPE 材料中添加了 HALS-3 受阻胺光稳定剂、抗氧化剂和紫外线吸收剂,极大提升了材料抗老化能力。HDPE 纱网孔隙度 60%左右,颜色墨绿,以纬编方式制作而成。

植物纤维材料是一种来源于农作物秸秆的快速再生植物,其主要成分为纤维素、木质素和半纤维素,少量成分为脂肪族化合物、含氮化合物、果胶及无机物。抗老化能力较强,能降解,抗风蚀,纱网采用平纹交织工艺机织方式生产,纱网孔隙度 60%左右,是环境友好型新型防风固沙材料。

1.3 试验设计

为对比不同材料和规格试验沙障的风速廓线形式,本试验在库布齐沙漠杭锦旗独贵塔拉镇工业区选取高大流动沙丘区作为试验地,布置了新材料沙障固沙试验区,面积约 16 000 m²。试验设计了 1.0 m×1.0 m($h=20$ cm),1.5 m×1.5 m($h=20$ cm),3.0 m×3.0 m($h=50$ cm),5.0 m×5.0 m($h=100$ cm)等规格的 HDPE 网和植物纤维网方格沙障以及 HDPE 网前沿高立式阻沙沙障($h=100$ cm)。外露高度 20 cm 的 1.0 m×1.0 m 和 1.5 m×1.5 m 试验沙障采用高度为 40 cm 的抗老化塑料立柱固定,立柱抗弯强度 12.5 N/mm²,使用寿命 10 a 左右;外露高度 50 cm 的 3.0 m×3.0 m 和 5.0 m×5.0 m 方格沙障,固定立柱采用长度 100~180 cm 的木桩制作,立柱钉入沙面下约 20~70 cm,将纱网缠绕固定于立柱。不同规格的方格沙障布置完成后,在试验区前沿三面构建 200 cm 高、总长约 740 m 的 HDPE 网高立式阻沙栅栏,构成方格沙障与高立式阻沙措施镶嵌组合的综合防沙体系。沙障规格与技术参数见表 1。

表 1 试验材料与沙障规格

沙障类型	沙障材料	沙障规格		试验面积/ hm ²
		平面尺寸/m	高度/cm	
低立式方格沙障	HDPE 网	1.5×1.5	20	0.24
		1.0×1.0		0.20
	植物纤维网	1.5×1.5	20	0.24
		1.0×1.0		0.20
高立式方格沙障	HDPE 网	3.0×3.0	50	0.20
		5.0×5.0		110
	植物纤维网	3.0×3.0	50	
		5.0×5.0		110
前沿高立式阻沙沙障	HDPE 网	740	200	

1.4 风速观测

采用多套 Met One 014 A/024 A 型多通道风速风向仪(CR200 X 数采仪),同步安置在试验区地形与地貌部位相近的不同材料规格方格沙障中心、前沿阻沙沙障内外及试验区外沙丘相应部位,对不同材料与规格方格沙障中心 4 个高度(20, 80, 150, 200 cm) 1 min 平均风速开展同步观测,获取相同风沙流场环境下,不同材料、不同规格方格沙障中心、高立式阻沙

栅栏内外以及无防护措施沙丘相应部位的风速同步实测资料。不同情形的观测时间 60~102 min,获取风速样本数 61~102 组。风速数据运用 Microsoft Office Excel 2007 整理,利用 Origin 9.0 和 SPSS 进行数据分析处理并作图,对比分析相同风沙流场环境下,不同材料规格、不同类型沙障及流动沙丘区相应部位的风速廓线形式与水平流场变化。

2 结果与分析

风速廓线分布形式反映了垂直方向上风速的变化趋势,指示近地表气流的基本活动规律。一般原始风沙流风速随着高度的增加,廓线形式遵循幂指数或者对数分布规律^[18-19]。防沙工程的主要原理就是改变沙面近地表特性、降低过境风速,从而达到防风固沙的目的^[20]。在流沙表面布设沙障能有效降低风速,风沙流经过工程沙障时遇阻消耗大量动能,拦截沙粒的同时降低来流的携沙能力,并影响风速廓线形式。

2.1 不同材料与规格沙障的风速廓线表达

2.1.1 不同措施风速廓线综合对比 试验区风速廓线分布反映了不同材料、不同规格试验沙障中心和前沿高立式阻沙栅栏内外垂直风速变化规律,由试验区不同情形下的风速廓线图(图 1)可见,前沿高立式阻沙栅栏、不同规格 HDPE 网和植物纤维网方格沙障,都有显著降风效应。其中 5.0×5.0 m($h=100$ cm) HDPE 网和植物纤维网方格沙障、1.0×1.0 m($h=20$ cm)半隐蔽沙蒿方格沙障和前沿高立式阻沙栅栏内,风速垂直梯度变化较小,平均风速也相对较低,说明这 4 种沙障的综合防风固沙效益相对显著。

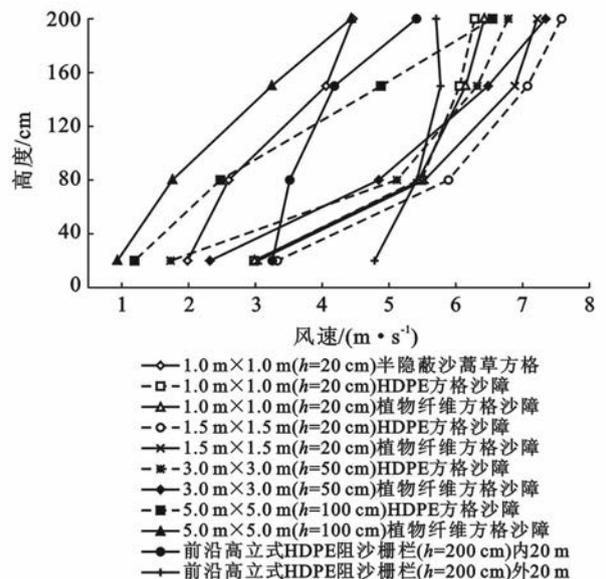


图 1 试验区不同措施下的风速廓线形式

2.1.2 HDPE 网前沿高立式阻沙沙障内外风速对比 前沿高立式阻沙栅栏能有效防止风沙侵入,提高工程措施防风固沙效益。图 2 为风速观测结果。

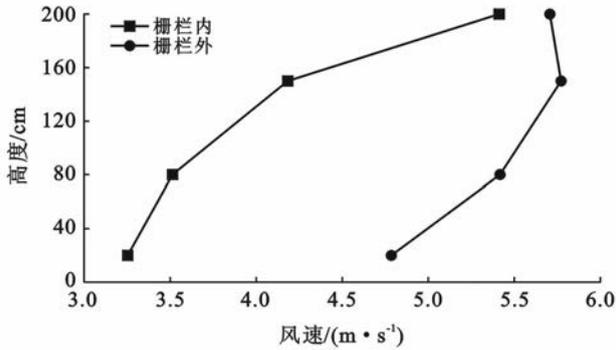


图 2 前沿阻沙栅栏内(下风向)外(上风向)2 m 处风速对比

由图 2 可知,试验工程区 HDPE 材料的前沿高立式阻沙栅栏($h=200$ cm)内(下风向)、外(上风向)200 cm 处风速廓线形式变化迥异:栅栏外(上风向)风速廓线呈对数函数形式分布,符合原始动床面风

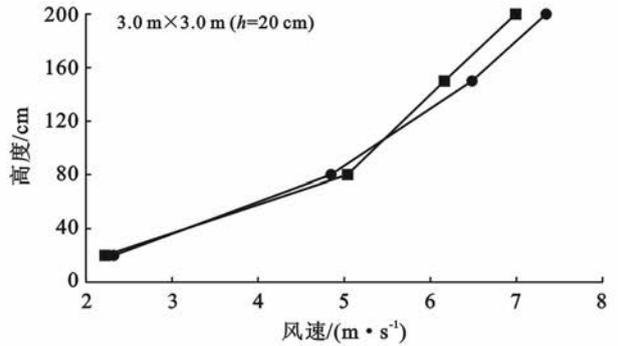
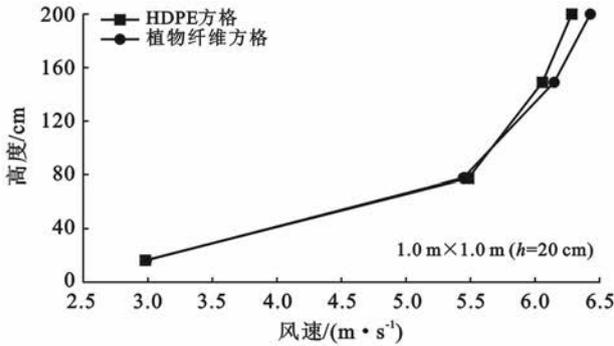


图 3 相同规格和高度,不同材料方格沙障中心风速对比

另外,纱网材料孔隙度决定了砂砾物质的穿透能力,是决定防沙效益的重要因素之一。不同孔隙度防沙网对流场的紊动特性影响不同,近地面风速廓线形式有差异,减弱风沙流的影响力度也不尽相同。凌裕泉等^[21]通过野外观测发现 30%~40%孔隙度的栅栏固沙效应最显著。还有学者^[22-23]通过风洞模拟试验确定了尼龙网在 40%孔隙度时防沙效益最显著。本次试验中使用的 HDPE 网与植物纤维网孔隙度皆在 60%左右。图 3 中所示相同规格、高度,不同材料纱网的风速廓线形式差异不大,部分原因是本试验中两种材料孔隙度较为接近,还不足以分析出孔隙度对风速廓线的影响力度。

2.1.4 相同材料不同规格与高度方格沙障中心风速对比 沙障平面规格与高度直接决定了沙障防风固

沙流风速廓线分布规律,而在栅栏内(下风向),因受到高立式前沿高立式阻沙栅栏阻拦干扰,风速廓线呈指数函数形式分布,与栅栏外风速廓线分布趋势相反。阻沙栅栏下风向近地表风速及其垂直变化幅度都较栅栏上风向相应高度处小,200 cm 高度附近风速值恢复,基本接近栅栏上风向来流风速,反映了高立式阻沙栅栏对自身高度以下区域风速的降低作用较显著,对风速垂直梯度变化规律的影响较大,具有沙障风沙物理学性能的典型性。

2.1.3 相同规格不同材料方格沙障中心风速对比 图 3 为相同规格不同材料方格沙障中心风速的对比结果,由图 3 可见,1.0 m×1.0 m($h=20$ cm)HDPE 网与植物纤维网方格沙障的防风效益差别甚微,3.0 m×3.0 m($h=50$ cm)HDPE 网与植物纤维网方格沙障的降风效果差别不大。

这说明在试验条件下,方格沙障中心部位的风速垂直变化幅度与分布规律,仅与试验沙障的平面规格和高度密切相关,而与沙障材料(HDPE 网,植物纤维网)基本无关。

沙的影响范围和高度。由 3.0 m×3.0 m($h=50$ cm)HDPE 网方格沙障与 5.0 m×5.0 m($h=100$ cm)HDPE 网方格沙障内风速对比(图 4)表明,5.0 m×5.0 m($h=100$ cm)方格沙障中心垂直风速的降风效应比 3.0 m×3.0 m($h=50$ cm)方格沙障中心显著。其中:100 cm 高度 HDPE 网方格沙障在外露高度(h)以下的风速被明显削减,100 cm 以上风速随高度快速增大。说明相同材料的试验沙障外露高度(h)越大,降风效果越显著。方格沙障在外露高度(h)以下风速被明显削弱,垂直高度上风速梯度变小,且越接近地面风速削减作用越显著,而外露高度(h)以上风速会因沙障上沿的抬升作用而快速增大。

2.1.5 地形地貌对试验沙障中心风速分布的影响 上述皆为相同地形与地貌部位条件下的风速特征对

比分析。地形与地貌部位对风速廓线和试验沙障的防风固沙效果有着不可避免的显著影响^[7-8]。试验区北缘沙面覆盖有大约 20 cm 高的沙蒿植被,且地貌不同于 1.0 m×1.0 m ($h=20$ cm) HDPE 网新材料方格沙障区。为分析地形地貌对试验沙障中心风速分布的影响,同步采集了试验区边缘沙蒿草方格沙障中心与 1.0 m×1.0 m ($h=20$ cm) HDPE 方格沙障中心的风速数据。

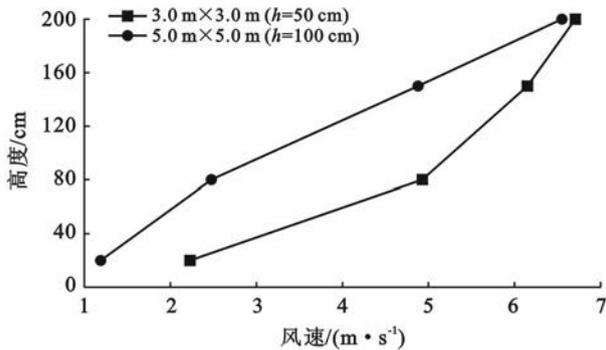


图 4 相同材料不同规格与高度 HDPE 方格沙障中心风速对比

由 1.0×1.0 m ($h=20$ cm) HDPE 网方格沙障与 1.0 m×1.0 m ($h=20$ cm) 半隐蔽沙蒿方格沙障中心风速及垂直分布对比(图 5)可以看出,1.0 m×1.0 m ($h=20$ cm) 半隐蔽沙蒿方格沙障因草头阻拦并增强了下垫面对风沙流的扰动,改变了过境风沙流场结构,使得半隐蔽沙蒿草方格内风沙流流场发生明显改

变,不再服从普通幂指数或对数函数关系,而呈线性形式分布;1.0 m×1.0 m ($h=20$ cm) HDPE 网方格沙障中心风速呈对数函数形式分布。半隐蔽沙蒿方格沙障位于试验区前缘位置,受到多风向影响,在饱和风沙流作用下边缘形成积沙,并逐渐掩埋沙蒿草方格沙障,填平凹曲面^[20],使沙蒿方格沙障防护效应减弱或丧失。而得益于前缘沙蒿方格沙障的防护作用,相邻的 1.0 m×1.0 m ($h=20$ cm) HDPE 网方格沙障中心风沙流挟沙量大幅减小,风速降低。

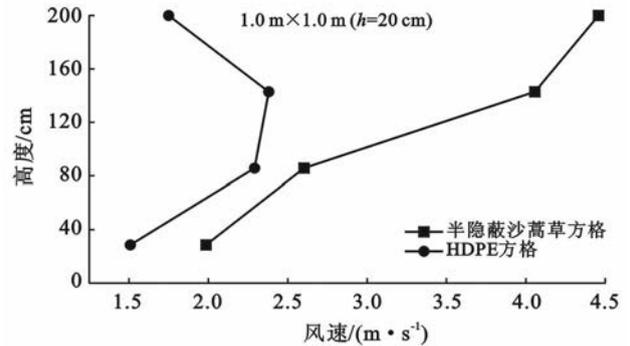


图 5 地形地貌对试验沙障中心风速分布的影响

2.2 风速廓线函数形式

贴地层风速廓线一般有幂指数函数和对数函数几种常见形式^[10]。观测数据分析结果显示,试验区不同规格沙障内风速廓线函数多遵循此规律(表 2)。

表 2 试验区不同部位风速廓线函数拟合情况

沙障类型与位置	函数形式	回归方程	拟合参数		
			R^2	F 值	p 值
1.0 m×1.0 m HDPE 网方格 ($h=20$ cm)	对数函数	$V=-1.266+1.463 \ln h$	0.975	77.102	0.013
1.0 m×1.0 m 植物纤维网方格 ($h=20$ cm)	对数函数	$V=-1.455+1.517 \ln h$	0.987	149.128	0.007
1.5 m×1.5 m 植物纤维网方格 ($h=20$ cm)	对数函数	$V=-2.515+1.851 \ln h$	0.998	878.136	0.001
1.5 m×1.5 m HDPE 网方格 ($h=20$ cm)	对数函数	$V=-2.501+1.768 \ln h$	0.998	6 178.553	0.001
3.0 m×3.0 m HDPE 网方格 ($h=20$ cm)	对数函数	$V=-3.864+2.028 \ln h$	0.998	844.318	0.001
3.0 m×3.0 m 植物纤维网方格 ($h=50$ cm)	幂函数	$V=0.52 h^{0.503}$	0.998	1 323.105	0.001
5.0 m×5.0 m 植物纤维网方格 ($h=100$ cm)	指数函数	$V=0.831 e^{0.009h}$	0.990	206.808	0.005
5.0 m×5.0 m HDPE 网方格 ($h=100$ cm)	幂函数	$V=0.365 h^{0.528}$	0.997	738.086	0.001
前沿高立式阻沙栅栏外 2 m ($h=200$ cm)	对数函数	$V=3.322+0.59 \ln h$	0.973	71.225	0.014
前沿高立式阻沙栅栏内 2 m ($h=200$ cm)	指数函数	$V=2.942 e^{0.003h}$	0.927	25.572	0.037
1.0×1.0 m 半隐蔽沙蒿方格 ($h=20$ cm)	对数函数	$V=1.626+0.015 \ln h$	0.974	75.736	0.013

3 结论

(1) 高度 (h) 分别为 20, 50, 100 和 200 cm 的 1.0 m×1.0 m, 1.5 m×1.5 m, 3.0 m×3.0 m, 5.0 m×5.0 m 规格的 HDPE 网和植物纤维网新材料方格

沙障及前沿高立式阻沙栅栏,有效降低近地层风速,减弱输沙强度,改变风速廓线分布,具有显著的防风固沙效应。

(2) 高度 200 cm 的 HDPE 网前沿阻沙栅栏内 2.0 m 处(下风向, $V=2.942e^{0.003h}$) 与栅栏外 2.0 m

处(上风向, $V=3.322+0.59 \ln h$)风速及其廓线形式差异较大,反映了前沿高立式阻沙栅栏降风作用的显著性和对风速垂直分布的明显改变,具有沙障风沙物理学性能的典型性。

(3) 试验沙障高度不同,20,80,150,200 cm 这4个观测高度的1 min 平均风速变化幅度有较大差异。试验方格沙障中心风速垂直变化幅度及变化规律,仅与沙障平面规格和高度密切相关,而与试验材料(HDPE网,植物纤维网)基本无关。相同平面规格的方格沙障,外露高度(h)越大,降风效果越显著;相同外露高度(h)的方格沙障,小规格沙障的降风效果较显著。沙障外露高度(h)以下的风速被明显削弱,且越接近地面风速削减作用越显著,外露高度(h)以上因沙障抬升作用引起风速迅速增大。

(4) 试验选用的沙障材料 HDPE 网和植物纤维网孔隙度较为接近,野外试验条件下不足以对比沙障的孔隙度对风速廓线的影响,故未考虑沙障孔隙度对风速廓线形式的影响。对比评价沙障的防风固沙效益,还应充分考虑地形与地貌部位、坡向、坡度、地表状况(物质组成、植被覆盖及粗糙度等因素)的作用,对比观测无防沙措施的流沙区对应地貌部位的输沙强度、风沙流场及地面粗糙度等因素,以便准确获取沙障的效益参数。

[参 考 文 献]

- [1] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[J]. *Nature*, 1974,18(4):167-187.
- [2] McEwan I K, Willetts B B. Adaptation of the near-surface wind to the development of sand transport[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993,252(1):99-115.
- [3] Mitha S, Tran M Q, Werner B T, et al. The grain-bed impact process in aeolian saltation[J]. *Acta Mechanica*, 1986,63(1):267-278.
- [4] 刘贤万. 试验风沙物理与风沙工程学[M]. 1版. 北京:科学出版社,1995:488-500.
- [5] 王洪涛,董志宝,钱光强,等. 关于风沙流中风速廓线的进一步试验研究[J]. *中国沙漠*, 2003,23(6):721-724.
- [6] Dong Zhibao, Qinan Guangqiang, Lu Ping, et al. Turbulence fields in the lee of two-dimensional transverse dunes simulated in a wind tunnel[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2009,34(2):204-216.
- [7] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞试验研究[J]. *水土保持研究*, 1999,6(4):75-79.
- [8] 哈斯,董光荣. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面气流与坡面形态的关系[J]. *中国沙漠*, 1999,19(1):1-5.
- [9] 赵彩霞,郑大玮,何文清. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. *植物生态学报*, 2005,29(1):68-73.
- [10] 毛东雷,雷加强,曾凡江,等. 策勒不同下垫面风速廓线时空差异研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014,28(11):171-177.
- [11] Liu Jie, Song Mengxuan, Chen Kai, et al. An optimization methodology for wind lens profile using computational fluid dynamics simulation[J]. *Energy*, 2016, 109:602-611.
- [12] Grimenes A A, Thue-Hansen V. Annual variation of surface roughness obtained from wind profile measurements[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2004, 79(1/2):93-102.
- [13] Ranga K G R, Gardea R J, Singhb S K, et al. Experimental study on characteristics of flow past porous fences[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1988,29(1/2/3):155-163.
- [14] 屈建军,井哲帆,张克存,等. HDPE 蜂巢式固沙障研制与防沙效应试验研究[J]. *中国沙漠*, 2008,28(4):599-604.
- [15] 冯博,冷金华,陈弦,等. 高密度聚乙烯/石墨/碳纤维导热复合材料性能的研究[J]. *塑料工业*, 2013,41(6):78-82.
- [16] 邵鹏程,王雁玉,李渤,等. 高密度聚乙烯的研究及应用[J]. *塑料制造*, 2011(4):98-100.
- [17] 巫晓鑫. 尼龙6和高密度聚乙烯的耐热改性及性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [18] 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*, 2013,33(1):65-71.
- [19] 马世威. 沙漠学[M]. 1版. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1998:209-220.
- [20] Anderson R S, Haff P K. Wind Modification and Bed Response During Saltation of Sand in Air[M]. *Aeolian Grain Transport 1*: Springer Vienna,1991:21-51.
- [21] 凌裕泉,金炯,邹本功,等. 栅栏在防止前沿积沙中的作用:以沙坡头地区为例[J]. *中国沙漠*, 1984,4(3):16-25.
- [22] 张克存,俎瑞平,方海燕. 不同孔隙度尼龙网对风沙流减弱作用的风洞模拟[J]. *水土保持学报*, 2004,18(4):4-6.
- [23] 康惠惠,潘韬,盖艾鸿,等. 生态退化与恢复对三江源区土壤保持功能的影响[J]. *水土保持通报*, 2017,37(3):7-14.