

DOI:10.12171/j.1000-1522.20180282

硬质地 HDPE 沙障防风效益的风洞试验

张 帅^{1,2} 丁国栋^{1,2} 高广磊^{1,2} 孙桂丽³ 赵媛媛^{1,2}
于明含^{1,2} 丛智杰¹ 包岩峰⁴

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 宁夏 盐池 751500; 3. 新疆农业大学林学与园艺学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】研究硬质地 HDPE 网沙障防风效能。【方法】按照 1:10 的比例制作不同高度(1、2 和 3 cm)、不同边长(10、15 和 20 cm)、不同孔隙度(0.5 和 0.6)的硬质地 HDPE 网沙障模型, 通过布设测点模拟出不同配置模式下沙障网格纵截面流场图及风速稳定后沙障网格内水平流场图, 并运用地统计学的方法进行空间自相关分析。【结果】空间自相关分析中 18 种不同配置模式的沙障有 16 种符合高斯模型, 2 种符合球状模型, 且所有模型 R^2 均高于 0.97, 空间相关度小于 25%, 变程大于测点间距, 表明不同沙障网格都具有强烈的空间自相关性, 且测点间距合理。气流在通过沙障时可顺畅的从沙障孔隙中穿过, 不会造成气流的抬升加速作用, 因此障后近地表及沙障上方的风速均低于相同高度处的对照风速。硬质地 HDPE 沙障防风效能在本研究设置的变量梯度范围内与高度呈正相关关系, 与边长和孔隙度呈负相关关系, 高度和孔隙度对防风效能的影响较大。【结论】硬质地 HDPE 材料性质稳定, 不会产生塑性变形, 抗老化能力强, 且防风效果较好, 应用前景较好。

关键词: 硬质地; HDPE 沙障; 空间自相关; 风速流场

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)03-0127-07

引文格式: 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.

Wind tunnel test on windproof benefit of horniness HDPE sand barrier

Zhang Shuai^{1,2} Ding Guodong^{1,2} Gao Guanglei^{1,2} Sun Guili³ Zhao Yuanyuan^{1,2}
Yu Minghan^{1,2} Cong Zhijie¹ Bao Yanfeng⁴

(1. School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Sandy Land, Yanchi 751500, Ningxia, China;
3. Forestry and Horticulture Department, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
4. Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study was to research the benefit of horniness HDPE sand barrier on windproof. [Method] We have made horniness HDPE sand barrier model of different heights (1, 2 and 3 cm), lengths (10, 15 and 20 cm), and porosity (0.5 and 0.6) according to the 1:10 ratio. We simulated the vertical flow field map and the horizontal flow field map of stable wind speed grid under different configuration modes by laying out the measuring points, and used the geostatistical method to carry out spatial autocorrelation analysis. [Result] In the spatial autocorrelation analysis, there were 16 kinds of sand barriers in 18 different configuration patterns conforming to the Gauss model, 2 conformed to the spherical

收稿日期: 2018-09-15 修回日期: 2018-11-18

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题“沙化土地抗逆树种筛选与适地适树研究”。

第一作者: 张帅, 博士生。主要研究方向: 荒漠化防治研究。Email: xxwoshizsxx@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 丁国栋, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 荒漠化防治。Email: dch1999@263.net 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

model, and the R^2 of all the models was higher than 0.97, the spatial correlation was less than 25%, and the change range was larger than the distance between the measuring points. It showed that the different sand barriers all had strong spatial autocorrelation, and the distance between measuring points was reasonable. The airflow can smoothly cross the pores when passing through the sand barrier, which will not cause the lifting and acceleration of the air flow. Therefore, the wind speed near the surface and above the barrier was lower than the control wind speed at the same height. The wind-proof performance of the horniness HDPE sand barrier was positively correlated with the height within the variable gradient range set in this study, and negatively correlated with the side length and porosity. [Conclusion] The horniness HDPE material has stable properties, no plastic deformation, strong anti-aging ability, good windproof effect and good application prospects.

Key words: horniness texture; HDPE sand barrier; spatial autocorrelation; wind speed flow field

荒漠化是制约我国干旱区发展的自然灾害之一^[1], 目前风沙危害防治措施分为机械、化学、生物 3 类, 其中机械措施具有低成本、见效快、不需水源等优点, 在我国广大沙区已被广泛应用^[2-3]。尤其是一些重大工程, 机械措施成为一种十分必要的防风固沙措施^[4-5]。机械措施通过各种工程设施的建设, 对风沙起到固、阻、输、导的作用, 达到防止风沙危害的目的^[6-8]。沙障作为常见的机械措施, 有增大地表粗糙度, 减弱地表风速, 改变沙粒搬运形式和降低搬运能力等作用^[9-10]。目前, 国内沙障多采用芦苇、麦草等易老化材料, 由于机械化收割导致麦草长度过短以及不同行业需求的增长, 传统材料来源已十分困难^[11]。

现有研究针对不同的材料进行了研究, 如土工格^[12]、粘土^[13]、沙柳^[14-15]、麦草^[16-17]和聚乳酸(PLA)^[18-19]等。塑料网沙障因为成本低、轻便、可工业化生产等优点得到了广泛的应用^[20-21], 其中高密度聚乙烯(HDPE)材料(图 1)因具有较强的耐受性和稳定性以及可回收利用的环保特性引起越来越多的重视^[22]。高密度聚乙烯(HDPE)材料根据加工方式不同会产出多种成品, 过去的研究中所采用的塑料网多选用质地较软的材料, 如遮阳网等, 受力时容易产生拉伸, 影响使用寿命。本研究针对受力时不会产生形变的硬质地高密度聚乙烯(HDPE)材料进行风洞试验研究, 分析其防风效能。

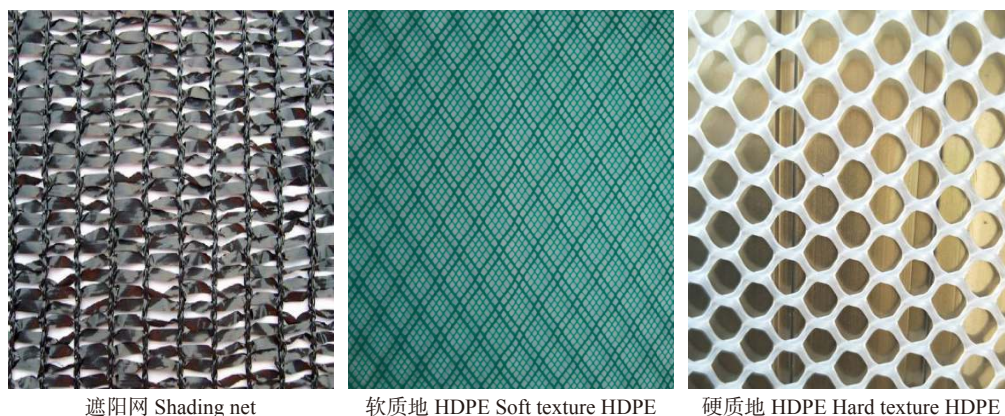


图 1 不同类型高密度聚乙烯(HDPE)塑料网

Fig. 1 Different types of high-density polyethylenhdpe (HDPE) plastic net

1 研究方法

1.1 风洞试验系统

本研究试验在北京林业大学西山校属鹫峰实验林场风沙物理实验室完成, 室内直流式风洞全长 24 m, 试验段长 12 m, 横截面积为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 实用风速为 $3 \sim 42 \text{ m/s}$, 有效试验横截面风速脉动小于 1.5%。风速的测量使用 KIMO VT200 热线风速仪, 并借助于三维移测系统, 测点移动精度为 1 mm。

在利用风洞进行模拟试验时, 为保证试验结果的可靠性, 需满足一定的相似条件, 主要包括几何相似、运动相似和动力相似^[23]。几何相似是指模型和实物保持固定的比例, 本研究不同配置模式的模型均采用 1:10 的比例, 满足几何相似要求; 运动相似是指风速廓线的相似; 动力相似是指模型与实物在对应点的受力场成几何相似^[24]。本研究中风洞试验系统可以满足运动相似和动力相似的自模拟要求。

1.2 实验方法

根据常见硬质地高密度聚乙烯(HDPE)材料成品,我们设置孔隙度变量为 0.5 和 0.6,布设不同配置模式的沙障,规格分别为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 和 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,沙障高度分别为 10、20 和 30 cm。按照 1:10 的比例制作模型, $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 规格沙障模型制作 5 行 10 列, $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 和 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 规格沙障模型制作 3 行 7 列,分别测量不同模式沙障网格内气流稳定后风速,模拟风速流场,计算防风效能。并利用地统计学方法统计风速频数,分析空间相关性,确保模拟试验的可靠性。

沿风向在沙障模型居中一列的中线设置纵截面风速流场测点,初始测点位置为沙障前 30 cm,测点最低高度为 1 cm,最高高度为 10 cm,相邻测点间距离 1 cm。测量至风速达到稳定状态后,在下一个网格中布设水平风速流场测点,测点高度为一倍障高,测点距离网格边缘为 1 cm,测点间隔为 1 cm。

2 结果与分析

2.1 空间自相关

运用地统计学对不同布设模式沙障的风速频数进行空间相关性分析如表 1 所示,我们可以看到,18 种配置模式中有 16 种符合高斯模型,有 2 种符合球状模型,且所有模型 R^2 均高于 0.97,表明模型有较高的拟合性。空间相关度(SCD)是指可度量空间自相关的变异所占的比例,由块金值(C_0)与基台值($C + C_0$)的比值所得,一般认为空间相关度小于 25% 时,系统具有强烈的空间相关性,比值在 25% ~ 75% 之间时,系统具有中等的空间相关性,比值超过 75% 时,系统空间相关性较弱。变程(A)又被称为自相关距离,是指空间具有相关性的最大距离。从表 1 我们可以看到,所有配置模式的空间相关度(SCD)均远小于 25%,且测点间隔小于变程,这表明本研究中测点间距合理,模拟结果较为准确。

表 1 不同布设模式沙障空间自相关分析

Tab. 1 Spatial autocorrelation analysis of sand barrier in different layout modes

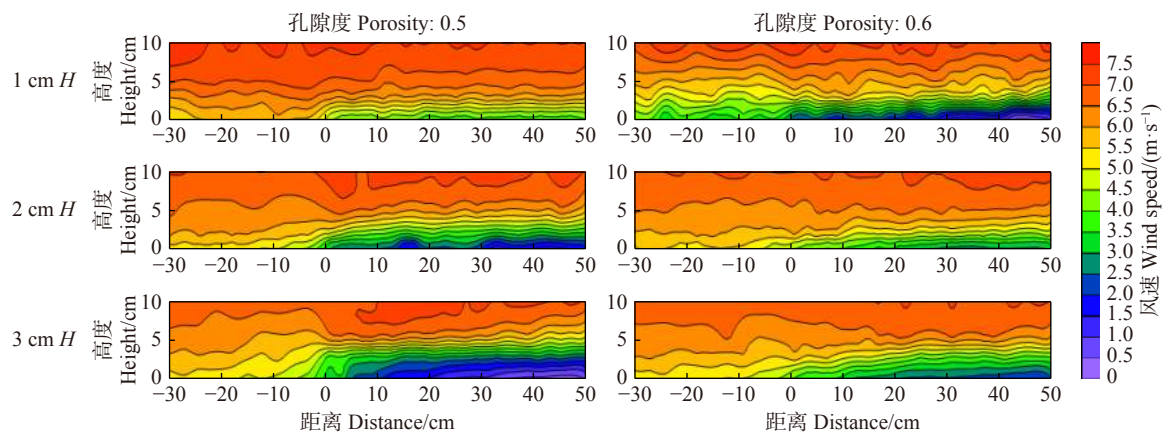
孔隙度 Porosity	边长 Side length/cm	高度 Height/cm	模型 Model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill ($C + C_0$)	SCD/%	变程 Range (A)	R^2	RSS
0.5	10	1	高斯 Gaussian	0.000 01	0.015 8	0.06	14.9	0.998	0.38×10^{-7}
		2	高斯 Gaussian	0.002 40	0.069 5	3.45	27.2	0.992	2.07×10^{-7}
		3	高斯 Gaussian	0.000 01	0.028 7	0.03	17.0	0.986	1.96×10^{-7}
	15	1	球状 Spheroidal	0.000 01	0.027 3	0.04	13.5	0.979	2.63×10^{-7}
		2	高斯 Gaussian	0.000 45	0.054 8	0.82	16.9	0.982	3.65×10^{-7}
		3	高斯 Gaussian	0.000 16	0.031 4	0.51	20.2	0.991	0.30×10^{-7}
	20	1	高斯 Gaussian	0.000 02	0.024 7	0.08	21.5	0.972	2.83×10^{-7}
		2	高斯 Gaussian	0.000 27	0.016 5	1.64	15.6	0.989	3.15×10^{-7}
		3	高斯 Gaussian	0.000 13	0.035 2	0.37	19.2	0.968	2.37×10^{-7}
0.6	10	1	高斯 Gaussian	0.000 19	0.026 4	0.72	17.8	0.984	1.47×10^{-7}
		2	高斯 Gaussian	0.000 32	0.017 9	1.79	20.1	0.978	2.35×10^{-7}
		3	高斯 Gaussian	0.000 18	0.032 5	0.55	16.7	0.982	0.26×10^{-7}
	15	1	高斯 Gaussian	0.000 24	0.031 8	0.75	18.3	0.993	1.78×10^{-7}
		2	球状 Spheroidal	0.000 53	0.026 5	2.00	17.7	0.985	3.24×10^{-7}
		3	高斯 Gaussian	0.000 37	0.014 7	2.52	18.2	0.975	1.64×10^{-7}
	20	1	高斯 Gaussian	0.000 42	0.013 2	3.18	19.3	0.982	0.67×10^{-7}
		2	高斯 Gaussian	0.000 21	0.035 7	0.59	15.7	0.994	2.12×10^{-7}
		3	高斯 Gaussian	0.000 01	0.015 3	0.07	16.3	0.974	2.45×10^{-7}

注: SCD. 空间相关度。Note: SCD, spatial correlation degree.

2.2 纵截面风速流场

不同配置模式的沙障纵截面风速流场如图 2、3 和 4 所示,横轴正坐标为沙障布设区域,负坐标为障前区域。我们可以看到气流在通过不同配置模式的沙障后近地表风速明显下降,表明不同规格的沙

障均具有较好的防风效能。且沙障对风速的影响范围相对一致,仅限于近地表,高度为 5 cm 时风速即恢复至原风速水平。沙障上方的风速要低于原风速,说明沙障孔隙度大于 0.5 时气流可以顺畅通过空隙,不会因受到沙障阻挡而产生抬升加速的现象。



H , 沙障高度。下同。 H , height of sand barrier. The same below.

图2 边长为10 cm的沙障中线纵截面流场图

Fig. 2 Flow field diagram of the middle line longitudinal section with a side length of 10 cm

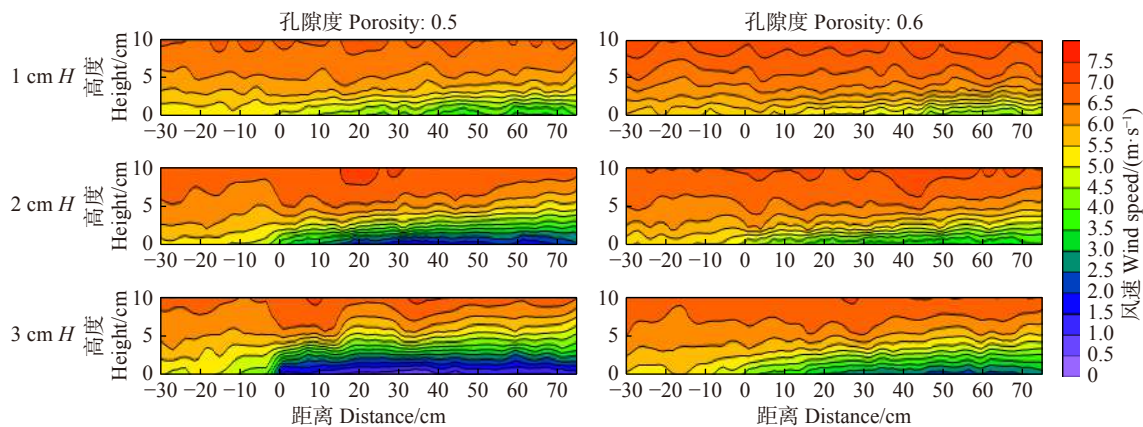


图3 边长为15 cm的沙障中线纵截面流场图

Fig. 3 Flow field diagram of the middle line longitudinal section with a side length of 15 cm

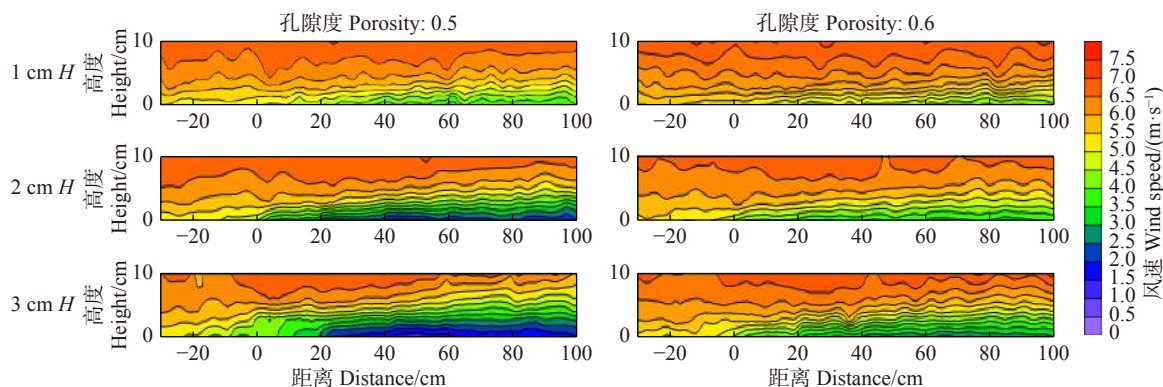


图4 边长为20 cm的沙障中线纵截面流场图

Fig. 4 Flow field diagram of the middle line longitudinal section with a side length of 20 cm

气流在经过沙障第一个网格后波动较强烈,随后变为平稳,在第4个网格后基本达到稳定状态,此时测定防风效能可较为准确的反应出沙障的实际防护效果。

从孔隙度来看,沙障边长为10 cm、高度为1 cm时,孔隙度为0.6的沙障配置模式障后风速低于孔隙度为0.5的沙障,但同时我们可以看到,前者障前风

速要明显低于后者,这可能是由系统误差导致,在下面的分析中我们将略过前者;其他配置模式中,沙障孔隙度为0.5时障后风速均低于孔隙度为0.6时,这表明孔隙度为0.5时沙障具有较好的防护效果。从沙障高度来看,沙障高度从1 cm增加到3 cm时,障后近地表风速由绿色逐渐降为蓝色,表明沙障高度与防风效能之间呈正相关关系,沙障越高,防护效果

越好。从沙障边长来看,不同边长的沙障障后风速色域较为接近,并不能直观看出,需要进行水平流场的分析。

2.3 水平流场防风效能

从2.2中可以得到,孔隙度为0.5、高度为3 cm的沙障防风能力最强,针对这一配置模式下不同边长沙障的风速流场图如图5所示。边长为10 cm时,气流通过沙障后会形成减速风影区,随后在网格中部由于涡流形成风速加速的区域,最后在靠近下

风向边缘时受到阻挡风速再次降低,此时网格内风速色谱以蓝色和绿色为主;边长为15 cm时,网格内风影区面积减小,在网格中形成较大范围的风速加速区,此时风速色谱以绿色、黄色和橙色为主;边长为20 cm时,网格内气流运动较为紊乱,在不同位置形成了多个涡流加速区,此时风速色谱以绿色和黄色为主。通过风速色谱我们可以看到,边长为10 cm时沙障的防风效果最好,边长为20 cm时次之,边长为15 cm时最差。

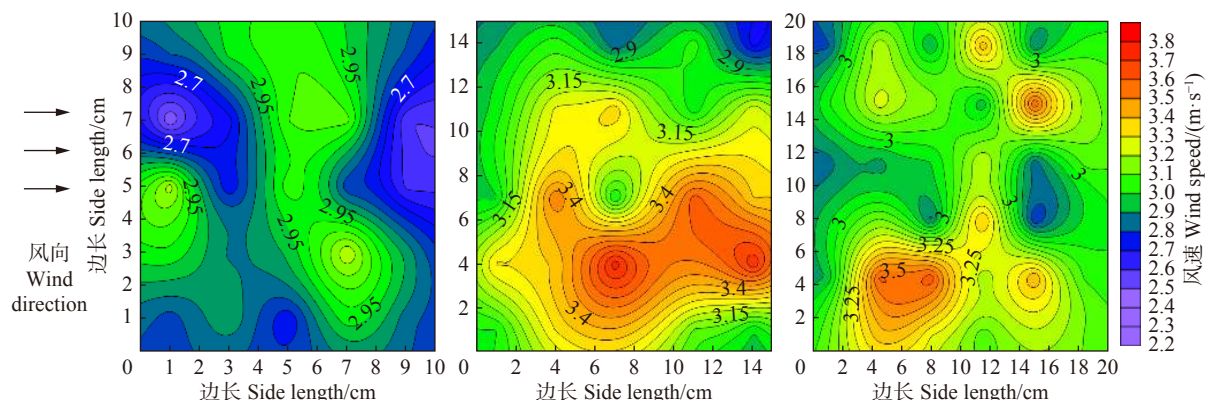
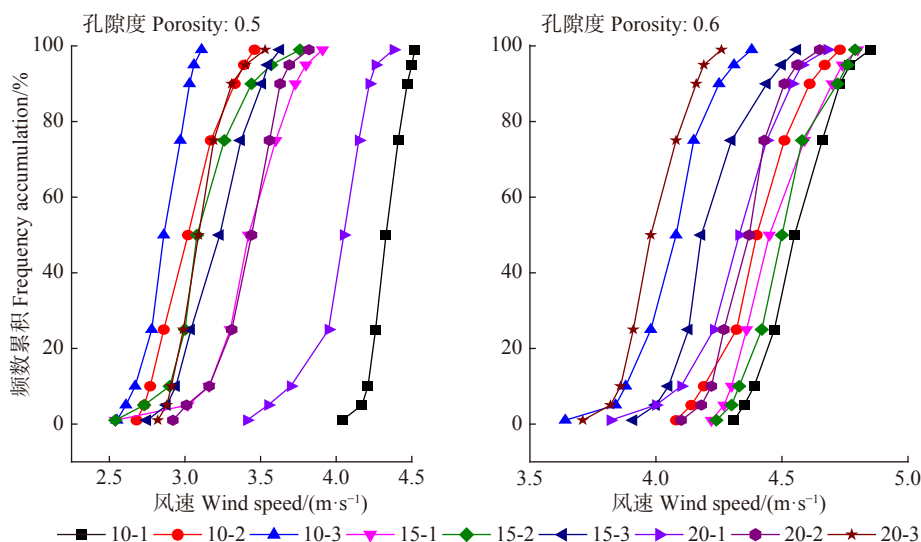


图5 不同边长沙障风速流场图

Fig. 5 Wind flow field diagram of sand barrier with different side lengths

统计不同配置模式沙障的风速频数如图6所示,可以看到不同风速频数累积曲线呈现出相似的结构,极值所占比例较小,频数分布相对集中,线体近似于斜率较大的线性函数。沙障高度对风速的影响较明显,除孔隙度为0.5边长为15 cm的配置模式

外,其他高度为1 cm的沙障风速频数大多超过4 m/s,不同孔隙度风速最低沙障网格高度均为3 cm。孔隙度为0.5时,防风效能较好的沙障网格风速频数大部分分布在2.75~3.5 m/s,孔隙度为0.6时风速频数主要分布在4~4.75 m/s。



10-1表示边长为10 cm,高度为1 cm的沙障;10-2表示边长为10 cm,高度为2 cm的沙障,以此类推。10-1 represents the sand barrier with 10 cm side length and 1 cm height, 10-2 represents the sand barrier with 10 cm side length and 2 cm height, and so on.

图6 不同沙障风速频数累积曲线

Fig. 6 Frequency accumulation curves of wind speed for different sand barriers

统计不同沙障防风效能如表2所示,孔隙度为0.5时,除边长为10 cm高度为1 cm的沙障网格外,

其他配置模式的沙障防风效能均超过0.5,平均防风效能为0.58;当孔隙度为0.6时,所有配置模式的沙

表2 不同沙障防风效能

Tab. 2 Windbreak efficiency of different sand barriers

孔隙度 Porosity	边长 Side length/cm	高度 Height/cm	防风效能 Windbreak efficiency
0.5	10	1	0.46
		2	0.62
		3	0.64
	15	1	0.58
		2	0.61
		3	0.60
	20	1	0.50
		2	0.57
		3	0.61
0.6	10	1	0.43
		2	0.45
		3	0.49
	15	1	0.44
		2	0.44
		3	0.48
	20	1	0.46
		2	0.46
		3	0.50

障防风效能均不超过 0.50, 平均防风效能为 0.46。边长对防风效能的影响较小, 由 10 cm 增大到 20 cm 时平均防风效能分别为 0.515、0.525 和 0.52。高度对防风效能影响较大, 由 1 cm 增加到 3 cm 时平均防风效能分别为 0.48、0.53 和 0.55。从防风效能来看, 孔隙度为 0.5 高度为 2、3 cm 的沙障效果较好, 平均防风效能分别为 0.60 和 0.62, 其中高度为 3 cm 边长为 10 cm 的配置模式效果最佳。

3 结论与讨论

沙障高度越高, 防风效果越好, 沙障边长越大, 防风效能越差, 这一结论与韩致文等^[25]对软质地 HDPE 网的研究较为一致。王睿等^[26]在其研究中得出 1 m × 1 m 规格软质地 HDPE 网沙障防风效能为 0.56, 本研究中相应规格的沙障防风效能为 0.62, 效果优于前者, 且前者材料的孔隙度为 0.35, 本研究中材料孔隙度为 0.5, 更节省材料。另外笔者在实践中发现, 其他配置模式的 HDPE 材料沙障网格, 硬质地材料防风效果均要优于软质地材料, 且在实际应用中, 软质地材料在受力时发生弹性形变, 更容易产生塑性变形, 导致材料老化, 防护能力下降, 缩短其使用年限。与传统常见沙障相比, HDPE 塑料网沙障有布设成本低、便于施工和无污染的特点^[11], 此外还具有防护年限长、不易老化的优势, 因此适合在风沙地

区进行推广。

空间相关性分析表明不同配置模式的沙障风速均有拟合度较高的模型相匹配, 且具有较强的空间自相关性。硬质地 HDPE 网沙障可以有效降低近地表风速, 减轻风蚀, 其防风效果与高度呈正相关关系, 与边长和孔隙度呈负相关关系, 高度和孔隙度对沙障防风效能的影响较大。在本研究选用的材料中, 边长 1 m、高度 30 cm、孔隙度 0.5 的沙障配置模式沙障防护效果最好。此外, 硬质地 HDPE 材料性质稳定, 防护效果较好, 有较大的应用价值和推广前景。

参 考 文 献

- [1] 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.
Wang W B, Dang X H, Zhang J S, et al. The wind-breaking efficiency of low vertical sand barriers with different materials in northern edge of the Hobq Desert[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 65-71.
- [2] 康向光, 李生字, 马学喜, 等. 两条尼龙阻沙网不同组合间距的积沙量对比分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 347-353.
Kang X G, Li S Y, Ma X X, et al. Sand masses blocked by double nylon mesh sand barriers with different intervals[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 347-353.
- [3] 王安宁, 蔺鑫, 穆枫, 等. 冀北木兰围场沙荒坡地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(1): 98-107.
Wang A N, Lin X, Mu F, et al. Water holding capacity of litter at different slope positions of sand slope in *Salix gordejewii* sand barrier of Mulan Paddock of northern Hebei Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(1): 98-107.
- [4] 刘虎俊, 王继和, 李毅, 等. 塑料网方格沙障对新月形沙丘迎风坡的风沙流影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 26-29.
Liu H J, Wang J H, Li Y, et al. Effects of plastic checkerboard sand-barrier on wind-sand flux of leeward of crescentic dune[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 26-29.
- [5] 薛智德, 刘世海, 许兆义, 等. 青藏铁路措那湖沿岸防风固沙工程效益[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 61-65.
Xue Z D, Liu S H, Xu Z Y, et al. Efficiency of wind erosion control measures along Cuona Lake on Qinghai-Tibet Railway, western China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 61-65.
- [6] 贾丽娜, 丁国栋, 吴斌, 等. 几种不同材料类型带状沙障防风阻沙效益对比研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 41-44.
Jia L N, Ding G D, Wu B, et al. Effect of different material types of sand barrier on wind prevention and sand resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 41-44.
- [7] 马瑞, 刘虎俊, 马彦军, 等. 沙源供给条件对机械沙障固沙作用的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 105-108.
Ma R, Liu H J, Ma Y J, et al. Influences of sand fountain on sand-

- fixation of mechanical sand barriers[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 105–108.
- [8] Yan C G, Wan Q, Xu Y, et al. Experimental study of barrier effect on moisture movement and mechanical behaviors of loess soil[J]. Engineering Geology, 2018, 240(5): 1–9.
- [9] 庞营军, 屈建军, 谢胜波, 等. 高立式格状沙障防风效益[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 11–14.
- Pang Y J, Qu J J, Xie S B, et al. Windproof efficiency of upright checkerboard sand-barriers[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 11–14.
- [10] 丁泊元, 丁国栋, 李炯书, 等. 沙袋沙障对沙地公路路域生态系统的影响[J]. 四川农业大学学报, 2013, 31(2): 145–150.
- Ding B Y, Ding G D, Li J S, et al. Effect of sandbag barrier on the ecosystem in highway in sandyland[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2013, 31(2): 145–150.
- [11] 屈建军, 井哲帆, 张克存, 等. HDPE 蜂巢式固沙障研制与防沙效应实验研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 599–604.
- Qu J J, Jing Z F, Zhang K C, et al. Experimental study on sand-binding effect of HDPE comb-like sand barriers[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(4): 599–604.
- [12] 董智, 李红丽, 汪季, 等. 土工格栅沙障防风积沙效应风洞模拟实验[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 35–39.
- Dong Z, Li H L, Wang J, et al. Wind tunnel test on effect of controlling wind and deposited sand of geogrid sand-barrier[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 35–39.
- [13] 孙涛, 刘虎俊, 朱国庆, 等. 3 种机械沙障防风固沙功能的时效性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 12–16.
- Sun T, Liu H J, Zhu G Q, et al. Timeliness of reducing wind and stabilizing sand functions of three mechanical sand barriers in arid region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 12–16.
- [14] 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.
- Meng Z J, Ren X M, Gao Y. Effect of semi-buried *Salix psammophila* checkerboard on wind-preventing and sand-resisting[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(3): 178–180.
- [15] 王丽英, 李红丽, 董智, 等. 沙柳沙障对沙丘沙粒度组成与特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 53–59.
- Wang L Y, Li H L, Dong Z, et al. Effects of *Salix psammophila* checkerboard sand barrier on dune sand grain size composition and characteristics[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 53–59.
- [16] 孙浩, 刘晋浩, 黄青青, 等. 多边形草沙障防风效果研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(10): 90–94.
- Sun H, Liu J H, Huang Q Q, et al. Research on the windproof efficiency of polygonal straw sand barrier[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(10): 90–94.
- [17] 张登山, 吴汪洋, 田丽慧, 等. 青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 627–634.
- Zhang D S, Wu W Y, Tian L H, et al. Effects of erosion and deposition and dimensions selection of straw-checkerboard barriers in the desert of Qinghai Lake[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(5): 627–634.
- [18] 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.
- 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, 37(3): 118–125.
- [19] 丁延龙, 高永, 汪季, 等. 生物基可降解聚乳酸 (PLA) 沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 262–269.
- Ding Y L, Gao Y, Wang J, et al. Effects of biodegradable polylactic acid sand barriers on surface sediment grain-size characteristics at sand dunes[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 262–269.
- [20] 黎小娟, 李宁, 周智彬, 等. 尼龙网方格沙障的风沙流颗粒分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 128–134.
- Li X J, Li N, Zhou Z B, et al. Characteristic of sand flux structure and sand particle size distribution based on nylon net checkerboard barrier[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 128–134.
- [21] 黎小娟, 周智彬, 李宁, 等. 尼龙网方格沙障风沙流携沙粒度的空间分异特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 76–84.
- Li X J, Zhou Z B, Li N, et al. Spatial distribution of grain size in aeolian flow in nylon net checkerboard barrier[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 76–84.
- [22] 屈建军, 喻文波, 秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应试验[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1185–1193.
- Qu J J, Yu W B, Qin X B. Wind-protecting efficiency of HDPE functional sand-fixing barriers[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1185–1193.
- [23] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Wu Z. Sand geomorphology and sand control engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [24] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Liu X W. Experimental sand physics and sand engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [25] 韩致文, 郭彩赞, 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): 1–9.
- Han Z W, Guo C Y, Zhong S, et al. The sand-prevention effects of HDPE net and plant fiber net sand barriers in the Hobq Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 1–9.
- [26] 王睿, 周立华, 陈勇, 等. 库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 330–336.
- Wang R, Zhou L H, Chen Y, et al. Wind-blown sand control effect of sand barriers used in the Hobq Desert[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 330–336.

(责任编辑 范娟
责任编辑 杨晓晖)