

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.035

王茂林,宋玲,刘杰,等.双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的优化配置及防沙效益[J].水土保持学报,2024,38(1):368-377.

WANG Maolin, SONG Ling, LIU Jie, et al. Optimized configuration and sand control benefits of double-row high vertical nylon mesh sand barrier and grass lattice sand barrier[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):368-377.

双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的 优化配置及防沙效益

王茂林¹, 宋玲¹, 刘杰^{1,2}, 王云飞³, 井文云³

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832003;2.新疆交通规划勘察设计研究院有限公司,乌鲁木齐 830000;

3.中交三公路第三公路工程有限公司,武汉 430056)

摘要: [目的] 针对双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障联合应用,开展风洞试验研究,以优化联合沙障中尼龙网阻沙障孔隙度配置及探究各孔隙度下联合沙障的防沙效益。[方法] 基于风洞模拟试验数据,开展不同孔隙度(40%,45%,55%)联合沙障,在不同风速下的风速流场、空气动力学粗糙度、摩阻风速、输沙率随高度和阻沙率方面的变化特征研究。[结果] (1)相同风速下尼龙网阻沙障孔隙度40%时,联合沙障弱风区面积最大;(2)随着尼龙网阻沙障孔隙度的增大,空气动力学粗糙度和摩阻风速减小,相同风速和相同位置时,40%孔隙度下联合沙障空气动力学粗糙度和摩阻风速值最大;(3)风速增加地表输沙率也增加,联合沙障内部与背风侧输沙率随高度增加呈指数型递减,输沙主要集中在0~12 cm高度内;(4)风速大小与沙障阻沙率呈现负相关变化;阻沙率与孔隙度之间也呈负相关关系,孔隙度为40%的联合沙障具有较高阻沙率;双排高立式尼龙网阻沙措施与草方格固沙措施联合之间还存在阻沙率叠加。[结论] 40%孔隙度的双排高立式尼龙网和草方格的阻固联合可以实现较优的配置与防沙效益。

关键词: 流场结构; 孔隙度; 空气动力学粗糙度; 摩阻风速; 输沙率; 阻沙率

中图分类号: X169

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0368-10

Optimized Configuration and Sand Control Benefits of Double-row High Vertical Nylon Mesh Sand Barrier and Grass Lattice Sand Barrier

WANG Maolin¹, SONG Ling¹, LIU Jie^{1,2}, WANG Yunfei³, JING Wenyun³

(1.College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2. Xinjiang Transportation Planning, Survey and Design Institute Co. Ltd., Urumqi 830000, China;

3. The Third Engineering Co.Ltd. of CCCC Third Highway Engineering Bureau, Wuhan 430056, China)

Abstract: [Objective] For the joint application of double-row high vertical nylon mesh sand barriers and grass checkerboard sand barriers, wind tunnel experimental studies were conducted to optimize the configuration of nylon mesh sand barriers porosity in the joint sand barriers and investigate the sand control benefits of the joint sand barriers under each porosity. [Methods] Based on the wind tunnel simulation experimental data, we carried out the characterization of the changes in the wind velocity flow field, aerodynamic roughness, friction wind velocity, sand transport rate with height, and sand blocking rate of the joint sand barriers with different porosities (40%, 45%, and 55%) at different wind speeds. [Results] (1) The area of wind shadow zone of the joint sand barrier was the largest at 40% porosity of nylon mesh sand barrier under the same wind speed. (2) As the porosity of the nylon mesh sand barrier increases, the aerodynamic roughness and friction wind speed decreased, and the values of aerodynamic roughness and friction wind speed of the joint sand barrier at 40% porosity were the largest at the same wind speed and the same location. (3) The sand

收稿日期:2023-08-09

修回日期:2023-09-29

录用日期:2023-10-08

网络首发日期(www.cnki.net):2023-12-19

资助项目:交通运输部科技项目(2022-ZD-007);新疆交通运输厅科技项目(KY2020050701);国家自然科学基金项目(51669031)

第一作者:王茂林(1998—),男,在读硕士研究生,主要从事风沙物理研究。E-mail:15283902571@163.com

通信作者:宋玲(1971—),女,博士,教授,主要从事寒区工程冻胀破坏机理及防治研究。E-mail:xjsdsl0514@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

transport rate on the surface increased with the increase of wind speed. Inside and on the leeward side of the joint sand barriers, the sand transport rate decreased exponentially with the increase of height, and the sand transport was mainly concentrated at the height of 0~12 cm. (4) Wind speed and sand barrier rate showed a negative correlation; sand barrier rate and porosity also showed a negative correlation, the porosity of 40% of the joint sand barriers had a better sand barrier rate; double rows of high vertical nylon mesh sand barriers and grass checkerboard sand fixation measures combined with the sand barrier rate superposition also existed. [Conclusion] Therefore, the combination of double-row vertical nylon mesh with 40% porosity and grass checkerboards can realize better configuration and sand control benefits.

Keywords: flow field structure; porosity; aerodynamic roughness; frictional wind speed; sand transport rate; sand blocking rate

Received: 2023-08-09

Revised: 2023-09-29

Accepted: 2023-10-08

Online(www.cnki.net): 2023-12-19

风沙流在我国西北地区广泛存在,干旱气候条件下,当风吹过沙质地面时,由于气流冲击力作用,将地表松散沙粒吹动,随之使沙粒搬运前进形成风沙流。风沙流经常以风蚀、沙埋形式危害铁路、公路等沙地工程^[1]。风沙流输沙量主要受风速、地表组成物质等因素影响。自然界中风客观存在且难以控制,但为减小风沙危害可以通过改变地表特征,从而减弱近地表风的侵蚀力或增加地表抗风蚀能力,以使风沙流得到抑制^[2-3]。多年沙漠化治理与防治措施表明,机械沙障防护措施作为沙害严重区主要防沙手段,不仅能够控制风沙流,还对沙害地区植被恢复具有积极作用。机械沙障防护措施具有价格低廉、施工速度快、见效快的优点^[4-5]。机械沙障防沙治沙工程中,形成了四大工程措施:固沙措施、阻沙措施、输沙措施与导沙措施^[6]。阻固联合机械沙障防护措施被常用于沙漠地区风沙流的防治,研究阻固联合机械沙障的配置及防沙效益对于保护沙漠地区工程设施具有重要意义。

阻沙措施增大了风沙流运动阻力,从而阻滞拦截过境风沙流,促使沙粒减速沉积^[7-8]。阻沙措施的空气动力学性能取决于其几何设计,主要包括孔隙度、高度、相对风向及孔隙结构特征^[9]。孔隙度是决定阻沙措施阻沙效率的重要参数^[10],已有研究^[11-13]表明,阻沙栅栏孔隙度为 20%~40%时,能够较好地降低风沙流的风速与对缓解风吹沙粒有很好的庇护作用。传统草方格沙障、沙柳沙障、黏土沙障、砾石沙障等固沙措施,都是通过隔绝气流与松散沙层的接触,或增大地表粗糙度来抑制地表风蚀和控制风沙流的^[14]。如低立式格状机械沙障在防风防沙时,是由于在格状沙障格内气流的涡旋作用,明显降低底层风速,进而减弱输沙强度,使流沙表面得以稳定^[15];而格状沙障中凹曲面的形成发展,以及沉积物粒度变化,则是取决于格带之间的贴地层流场分布及格带对风沙流中固体物质的截留^[16]。以上分析可见,前人通过野外试验、风洞模拟或数值模拟手段,对机械沙障的阻沙

措施与固沙措施研究都卓有成效。然而,现有研究多集中在单一防沙措施对气流速度场与对风沙流结构的影响上,关于阻固联合的机械防沙措施研究还较少。

因此,本文拟在不同指示风速下,选择不同孔隙度双排高立式尼龙网沙障为阻沙措施与草方格为固沙措施相联合的机械沙障为研究对象,通过风洞模拟试验分析其风速流场、空气动力学粗糙度、摩阻风速、输沙率随高度和阻沙率变化特征,探讨在不同孔隙度双排高立式尼龙网阻沙障下阻固联合机械措施对风沙运动的影响,提出影响联合机械沙障防沙效益的最优阻沙障孔隙度配置,从而为优化双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障联合的配置及防沙效益提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设备

风洞试验在甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地的风沙环境风洞中完成,风洞为直流闭口下吹式。风洞全长 38.9 m,由动力段、整流段、试验段(包括可调试验段)和扩散段组成;试验段长 16 m,截面 1.2 m×1.2 m;试验段边界层最大厚度为 0.5 m,风速测定范围 4~35 m/s 连续可调,测量精度±0.3%~±0.5%(图 1)。

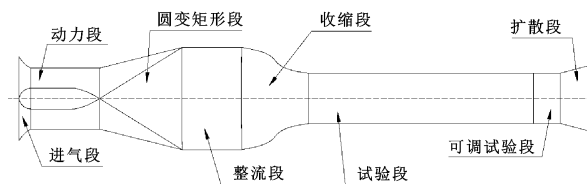


图 1 试验风洞

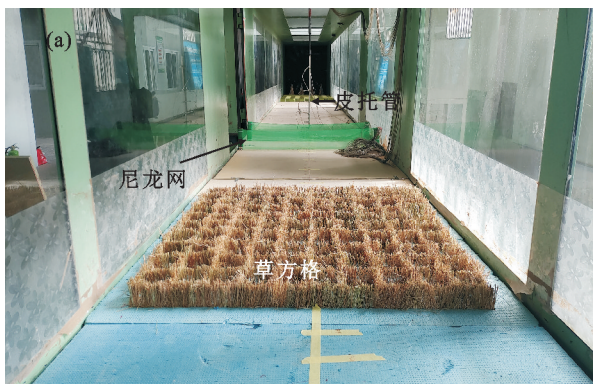
Fig. 1 Experimental wind tunnel

1.2 模型设计

双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的优化配置及防沙效益风洞模拟试验,需满足几何相似条件,模型设计上应参考实例工程的大小及形态,缩放

比例为 1:10。阻沙障模型选用 40%, 45%, 55% 3 种孔隙度(孔隙度是根据投影法估算求得)尼龙网制成,模型高度为 H ($1H=10\text{ cm}$)。柔性较好的芒草为材料制作草方格固沙障,草方格模型固定在长宽均为 1 m 的泡沫板上,单个草方格 10 cm(长)×10 cm(宽)×2~3 cm(高)。模拟流动雷诺数大于临界雷诺数($3\times 10^5\sim 1\times 10^7$),就可达到与雷诺数无关的自模拟化状态,能够使模拟流场与实物流场分布相似。此时平均风速剖面、湍流度、表面摩擦阻力、边界层特征参数与雷诺数大小无关^[17-18]。因此,可采用雷诺数值来判断风洞气动特征的相似性,确定试验设计是否符合要求。本模拟试验平均温度为 15℃,平均气压为 840 hPa,雷诺数(Re)计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$



式中: Re 为雷诺数; ρ 为空气密度(测量得值为 1.015 kg/m^3); v 为试验风速(m/s); d 为对象特征长度(测量得值为 1.2 m); μ 为空气动力黏滞系数(查表可得为 $1.799\ 96\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$)^[19]。由此算出 6, 10, 14 m/s 试验风速下,雷诺数值分别为 4.06×10^5 , 6.77×10^5 , 9.47×10^5 。经比较不同试验风速下雷诺数都大于临界雷诺数,说明本试验近地面气流为湍流。

本试验不涉及沙粒粒度特征对防沙措施的响应,因此沙粒的差异不会对试验精度和风沙运动规律产生影响。

1.3 试验方法

双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的优化配置及防沙效益中风洞试验分为流场试验和风沙输送试验,试验场景见图 2。



注:(a)为使用皮托管测量风速;(b)为使用集沙仪测量输沙率。

图 2 试验场景

Fig. 2 Experimental scenario

1.3.1 气流流场测定 净风 6, 10, 14 m/s 风速环境下对双排高立式尼龙网阻沙障(孔隙度分别为 40%, 45%, 55%)联合草方格固沙障进行流场试验。袁鑫鑫等^[20]以 40%孔隙度双排尼龙阻沙网研究尼龙网间距对防风效应的影响发现,当两网间隔为障高 5 倍时防风效应最优,并且以 12 m/s 风速为例得出有效防护距离为 15 倍障高。为了直观描述模型相对防护距离,并与野外原型建立尺度转换,沿风向来流方向上测点位置用尼龙网阻沙障高度 H 的倍数表示。将两

网高立式尼龙网阻沙障和草方格固沙障之间的间隔比设为 $5H:15H$;尼龙网阻沙障 1 置于 0 点位置,尼龙网阻沙障 2 位于 $5H$ 处;草方格固沙障模型起点位于 $20H$ 处,终点位于 $30H$ 处。尼龙网阻沙障 1 迎风侧测点位置标记为负值,背风侧测点位置标记为正值。为最大程度减小风洞壁的边际效应影响,垂直面则选择沿风洞中轴的断面,每个测点位置风速采集梯度由低到高分别为 1, 3, 5, 8, 13, 20, 30, 40, 60 cm,气流速度场测点分布见图 3。

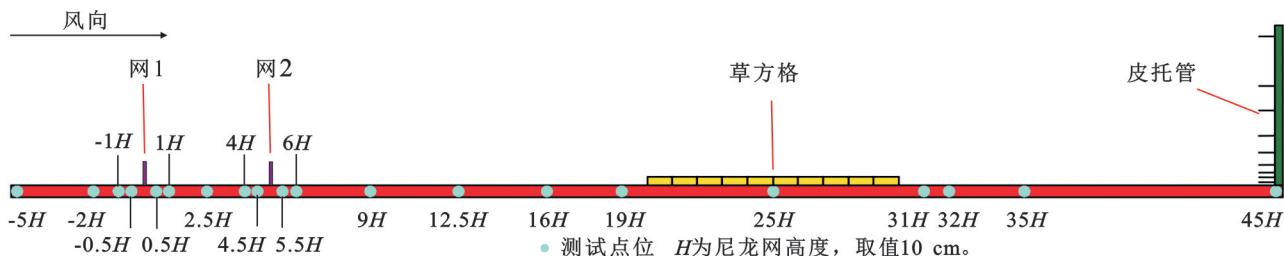


图 3 气流速度场测点分布

Fig. 3 Distribution of air velocity field measurement points

1.3.2 风沙流观测 风沙流观测见图 4。将沙子铺在风洞试验段的入口处,尺寸为 200 cm(长)×120 cm(宽)×10 cm(高)。同样选择 6, 10, 14 m/s 3 个

指示风速,进行风沙流观测试验。在模型迎风侧($-5H$ 无模型)、模型内部($16H$)、模型背风侧($35H$)处测定输沙率。输沙率采用自制的连续等高集沙仪测

定;集沙仪由 10 个直径为 2 cm 的 PVC 管制成,从地面到 20 cm 高垂直分布。集沙仪收集沙量有限,不同指示风速下吹刮时间有所不同。随着指示风速增大,

吹刮时间逐渐减小;6,10,14 m/s 指示风速下吹刮时间分别为 5,2,1 min。吹刮结束后,用 0.01 g 高精度天平称量不同高度的集沙量。

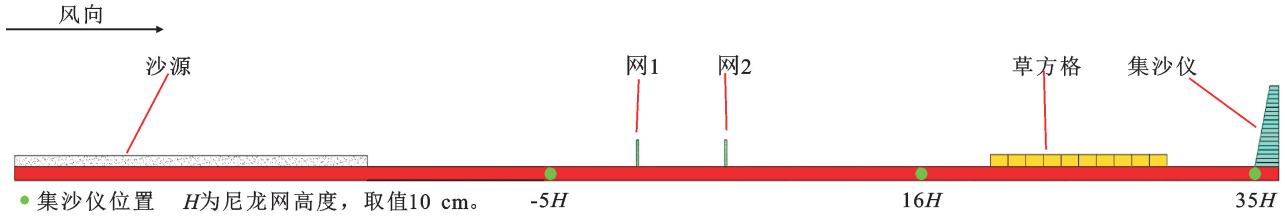


图 4 风沙流观测点

Fig. 4 Wind and sand flow observation points

1.4 数据分析

1.4.1 空气动力学粗糙度与摩阻风速 风洞内部气流不存在温度梯度,呈中性层结,在对照条件下部分位置风速廓线满足对数分布规律^[21],公式为:

$$u_z = \left(\frac{u_*}{k}\right) \ln \left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

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。

在众多空气动力学粗糙度计算方法中,对数廓线方程的最小二乘逼近实测风速廓线法应用最为广泛^[22],它具有利用多个高度风速数据推算 z_0 的优点,可以提高精确性。将公式(2)进行简单变形,设 $u_*/k = a$,带入原式得:

$$u_x = a \ln \left(\frac{z_x}{z_0}\right) = a \ln z_x - a \ln z_0 \quad (3)$$

再设 $a \ln u_0 = -b$,最终原公式变形为:

$$u_x = a \ln z_x + b \quad (4)$$

在公式(4)中,令 $u_z = 0$ 可求出 z_0 为:

$$z_0 = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (5)$$

将高度 z_1 与 z_2 处风速 u_1 、 u_2 分别代入公式(2)和公式(4)可得:

$$u_1 - u_2 = \left(\frac{u_*}{k}\right) (\ln z_1 - \ln z_2) \quad (6)$$

$$u_1 - u_2 = a (\ln z_1 - \ln z_2) \quad (7)$$

由公式(6)=公式(7)可得摩阻风速为:

$$u_* = ka \quad (8)$$

1.4.2 输沙率与阻沙率 输沙率代表一定风速及沙源条件下地表输沙能力,计算公式为:

$$Q = \frac{M}{S \Delta t} \quad (9)$$

式中: Q 为输沙率[g/(cm²·min)]; M 为集沙重量(g); Δt 为集沙时间(min); S 为集沙仪入口面积(cm²)。

机械防沙措施最主要的目的就是拦截风沙流运动,沙粒通过沙障时,部分沙粒被阻截,被阻截沙粒占总输沙率的百分比称之为阻沙率^[23]。计算公式为:

$$K = \frac{Q_0 - Q_h}{Q_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中: K 为防沙措施的阻沙率; Q_0 为同一风速下同高度层无沙障模型输沙率[g/(cm²·min)]; Q_h 为沙障影响后同高度层剩余输沙率[g/(cm²·min)]。

2 结果与分析

2.1 纵截面气流速度场特征

图 5 由上至下分别为 6 m/s 指示风速下联合沙障 3 种孔隙度(孔隙度为 40%,45%,55%)下的纵截面水平气流速度场。观测场内气流出出现分区现象,当气流接近高立式尼龙网阻沙障 1 时,在沙障高度之下范围内各等值线风速明显上移,而在沙障高度之上范围内风速线下移,这说明气流在尼龙网阻沙障 1 顶部有增加的趋势。随着气流流过高立式尼龙网阻沙障 1 后在沙障高下风速等值线有下降趋势,在此高度内形成弱风区。但不同孔隙度下弱风区有所不同,在尼龙网阻沙障 1 后弱风区面积随孔隙度的增加明显减小,这可能是由于高立式尼龙网阻沙障孔隙度不同,则对气流的阻碍不同,导致在此范围内形成的弱风区不尽相同。气流继续向前流动,流至草方格固沙障处风速等值线将会上升,这可能是由于草方格的阻挡造成的。不同孔隙度联合沙障的上方,还形成了风速大于来流指示风速 6 m/s 不同面积的较高风速区,此风速区面积呈现出随联合沙障孔隙度变大而增大的趋势,这也进一步说明尼龙网孔隙度 40% 下联合沙障具有较优的削减气流作用。

由图 6 和图 7 可知,在 10 m/s 与 14 m/s 风速下 3 种孔隙度尼龙网联合沙障气流速度场同 6 m/s 风场下的气流速度场相似。在尼龙网阻沙障 1 前,高度低于沙障时均形成风速等值线抬升区,在尼龙网阻沙障 1 后形成减速弱风区,并在联合沙障的上方都形成了风速大于来流指示风速的区域。随着风速的变大,3 种孔隙度尼龙网联合沙障风速等值线密度均有所变大,且随着风速的变大模型上方大于指示风速的高风速区面积有所增加,相对的在联合沙障近床面弱风区面积有所变小,此结果则证明随着风速增加,联合沙障对风速削减作用降低的结论。

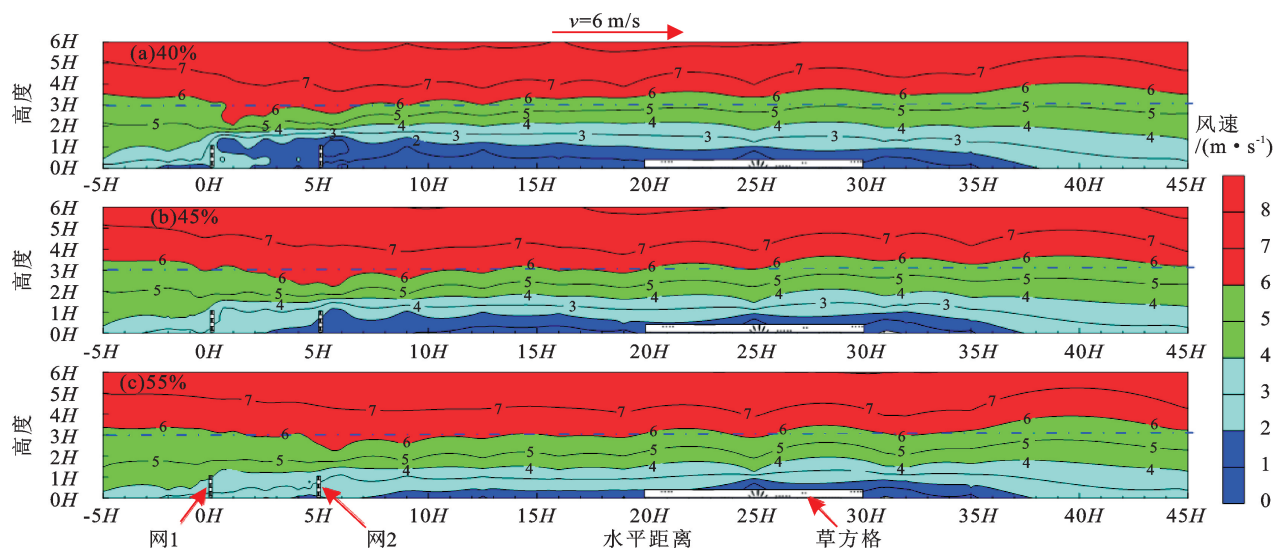


图 5 6 m/s 风速下纵截面气流速度场

Fig. 5 Velocity field of longitudinal cross-section airflow at a wind speed of 6 m/s

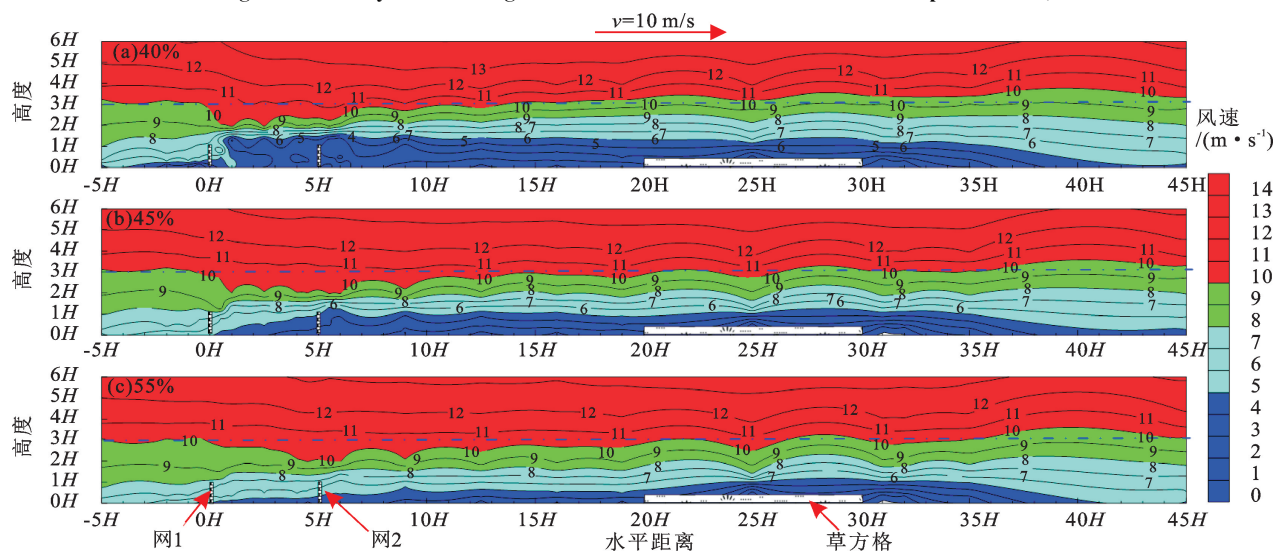


图 6 10 m/s 风速下纵截面气流速度场

Fig. 6 Velocity field of longitudinal cross-section airflow at a wind speed of 10 m/s

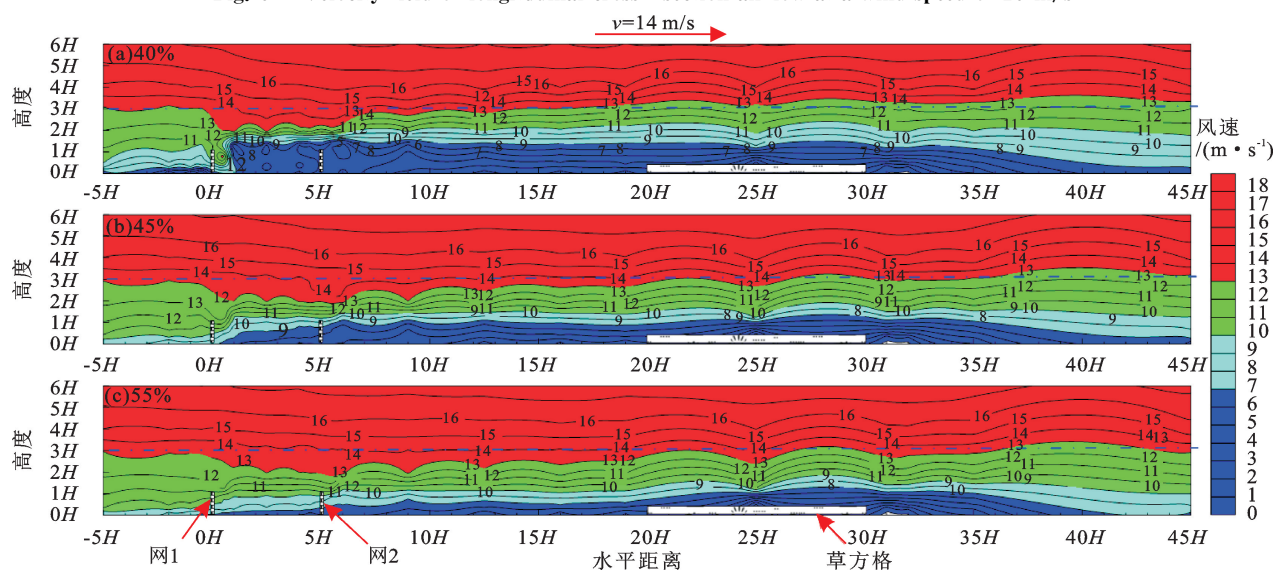


图 7 14 m/s 风速下纵截面气流速度场

Fig. 7 Velocity field of longitudinal cross-section airflow at a wind speed of 14 m/s

2.2 空气动力学粗糙度与摩阻风速特征

以高度对数值为横轴,平均风速为纵轴,可对阻固联合沙障迎风侧(−5*H*)、内部(16*H*)及背风侧(35*H*)3 处典型位置进行风速廓线拟合。由表 1 可知,在这 3 个位置,风速廓线的拟合系数均高于 0.8,说明在选取位置上,风速廓线在垂直高度方向上呈现出对数分布规律。由表 1 可知,阻固联合沙障的迎风侧、内部与背风侧在相同孔隙度,不同风速下空气动力学粗糙度与摩阻风速呈现出相同的变化规律。如风速作为唯一变量情况下,在阻固联合沙障内部阻沙障孔隙度为 40%时,6 m/s 风速下空气动力学粗糙度是 10,14 m/s 的 1.31,1.51 倍,而摩阻风速则分别是 0.62,0.49 倍。这说明随着风速增大,阻固联合沙障对气流的阻碍程度在变弱,致使空气动力学粗糙度在减小,而摩阻风速增大。位置与风速为定值时孔隙度

的变化也对空气动力学粗糙度与摩阻风速产生影响。当在阻固联合沙障背风侧且风速为 10 m/s 时,40%孔隙度的空气动力学粗糙度相对于 45%和 55%的情况分别增大 0.03,0.38 倍,摩阻风速则分别增大 0.02,0.05 倍。空气动力学粗糙度和摩阻风速都随双排高立式尼龙网阻沙障孔隙度的减小而增加,阻固联合沙障迎风侧、内部相同风速下也呈现类似趋势。这说明因为阻固联合沙障孔隙度的减小,气流受到沙障防护带的削减程度将增大,从而使粗糙度与摩阻风速增加。水平方向不同位置,空气动力学粗糙度和摩阻风速也有一定波动变化。例如,在孔隙度为 40%且风速为 14 m/s 时,阻固联合沙障内部的空气动力学粗糙度和摩阻风速相比于迎风侧和背风侧达到最大值。这表明随着距离增加,空气动力学粗糙度和摩阻风速会先增大后减小。

表 1 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

位置	孔隙度/%	风速/(m·s ^{−1})	拟合方程	<i>z</i> ₀ /cm	<i>u</i> _* /(m·s ^{−1})	<i>R</i> ²
对照	无模型	6	<i>u_z</i> = 0.984 6 ln <i>z</i> + 2.793 1	0.058 6	0.393 8	0.932 4
		10	<i>u_z</i> = 1.581 1 ln <i>z</i> + 5.228 4	0.036 6	0.632 4	0.941 8
		14	<i>u_z</i> = 2.035 0 ln <i>z</i> + 7.140 3	0.029 9	0.814 0	0.937 3
−5 <i>H</i>	40	6	<i>u_z</i> = 1.082 9 ln <i>z</i> + 2.220 8	0.128 6	0.433 2	0.923 4
		10	<i>u_z</i> = 1.726 7 ln <i>z</i> + 4.508 5	0.073 5	0.690 7	0.922 1
		14	<i>u_z</i> = 2.202 7 ln <i>z</i> + 6.286 5	0.057 6	0.881 1	0.926 7
	45	6	<i>u_z</i> = 0.942 8 ln <i>z</i> + 2.728 4	0.055 4	0.377 1	0.891 3
		10	<i>u_z</i> = 1.497 9 ln <i>z</i> + 5.286 5	0.029 3	0.599 2	0.886 8
		14	<i>u_z</i> = 1.944 5 ln <i>z</i> + 7.245 2	0.024 1	0.777 8	0.891 3
	55	6	<i>u_z</i> = 0.935 3 ln <i>z</i> + 2.853 1	0.047 3	0.374 1	0.891 4
		10	<i>u_z</i> = 1.445 9 ln <i>z</i> + 5.532 4	0.021 8	0.578 4	0.898 9
		14	<i>u_z</i> = 1.847 5 ln <i>z</i> + 7.583 1	0.016 5	0.739 0	0.881 3
	40	6	<i>u_z</i> = 2.007 0 ln <i>z</i> − 1.529 9	2.143 2	0.802 8	0.832 9
		10	<i>u_z</i> = 3.260 1 ln <i>z</i> − 1.615 0	1.641 1	1.304 0	0.858 4
		14	<i>u_z</i> = 4.146 8 ln <i>z</i> − 1.383 2	1.395 9	1.658 7	0.870 3
16 <i>H</i>	45	6	<i>u_z</i> = 1.991 5 ln <i>z</i> − 1.133 4	1.766 7	0.796 6	0.894 0
		10	<i>u_z</i> = 2.990 7 ln <i>z</i> − 0.269 2	1.094 2	1.196 3	0.895 8
		14	<i>u_z</i> = 3.797 2 ln <i>z</i> + 0.487 4	0.879 5	1.518 9	0.910 7
	55	6	<i>u_z</i> = 1.682 8 ln <i>z</i> + 0.175 9	0.900 7	0.673 0	0.927 7
		10	<i>u_z</i> = 2.577 7 ln <i>z</i> + 1.530 5	0.552 3	1.031 1	0.930 1
		14	<i>u_z</i> = 3.286 4 ln <i>z</i> + 2.735 6	0.435 0	1.314 6	0.931 4
	40	6	<i>u_z</i> = 1.744 2 ln <i>z</i> − 0.521 2	1.348 3	0.727 7	0.865 9
		10	<i>u_z</i> = 2.802 4 ln <i>z</i> − 0.145 5	1.053 3	1.211 0	0.857 9
		14	<i>u_z</i> = 3.610 0 ln <i>z</i> − 0.279 5	1.080 5	1.444 0	0.859 5
	45	6	<i>u_z</i> = 1.778 4 ln <i>z</i> − 0.418 8	1.265 5	0.711 4	0.882 4
		10	<i>u_z</i> = 2.961 1 ln <i>z</i> − 0.080 6	1.027 6	1.184 4	0.885 3
		14	<i>u_z</i> = 3.707 6 ln <i>z</i> + 0.322 2	0.916 8	1.489 3	0.883 9
35 <i>H</i>	55	6	<i>u_z</i> = 1.806 0 ln <i>z</i> − 0.462 9	1.292 2	0.692 4	0.893 6
		10	<i>u_z</i> = 2.876 9 ln <i>z</i> + 0.071 1	0.975 6	1.150 8	0.895 2
		14	<i>u_z</i> = 3.723 3 ln <i>z</i> + 0.431 9	0.890 5	1.480 3	0.896 2

注:*z*₀为空气动力学粗糙度;*u*_{*}为摩阻风速;*R*²为风速廓线拟合方程的拟合系数。

2.3 输沙率随高度变化特征

根据风洞现象显示,当风速为 6 m/s 时,地表附近沙粒呈现缓慢蠕动,这致使集沙仪难以有效收集到沙子。因此,将只对中高风速 10,14 m/s 的情况进行比较分析,研究不同孔隙度双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障联合时在垂直方向的输沙率随高度变化特征。阻固联合沙障内部和背风侧输沙率随高度变化特征见图 8。对输沙率在垂直方向的拟合分

析发现,阻固联合沙障内部和背风侧输沙率随高度的变化都呈现出显著指数函数 $Q=a-b \times c^h$ 。式中:Q 为输沙率 $[g/(cm^2 \cdot min)]$;a、b、c 为常量系数;h 为高度(cm)关系,决定系数 R^2 都大于 0.800。在不同孔隙度条件下,联合沙障内部和背风侧输沙率随高度变化规律基本不受指示风速的影响;然而,随着指示风速的增加,每层平均输沙率显著增加,这表明指示风速的变化仅在输沙变化的尺度上有所反映。

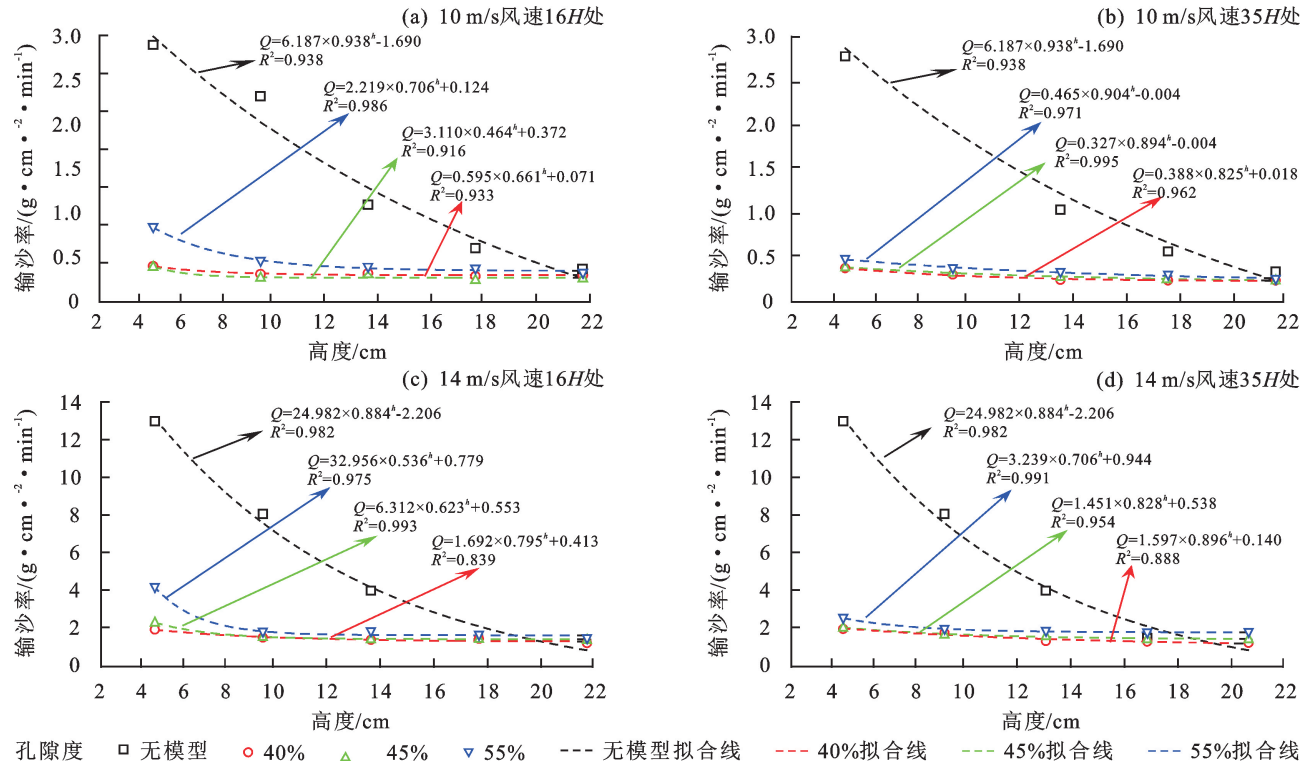


图 8 输沙率随高度变化特征
Fig. 8 Characteristics of sand transport rate with height

随着高度增加,每层的输沙率在逐渐减小。由表 2 可知,风速在 10,14 m/s 下时接近地表 0~12 cm 高度范围内为主要输沙率高度。以 14 m/s 风速为例,当风沙流通过双排高立式尼龙网阻沙障后到达阻固联合沙障内部时,不同孔隙度(40%,45%,55%)条件下在 0~12 cm 高度范围内所收集到的输沙率分别占总输沙率的 73%,72%,80%。而在阻固联合沙障背风侧,由于草方格固沙障对风力的抬升作用,使得

风沙流经过草方格固沙障作用后,40%,45%,55%孔隙度双排高立式尼龙网联合草方格沙障在 0~12 cm 高度范围内的输沙率分别占总输沙率的 75%,70%,73%。

而在没有使用沙障情况下,0~12 cm 高度范围内输沙率占总输沙率的 96%,比使用沙障时输沙率都更高,说明沙障的使用减少近地表 0~12 cm 高度范围内的输沙率。

表 2 0~12 cm 高度范围输沙率

Table 2 Sand transport rate in the 0~12 cm height range							
孔隙度/ %	指示风速/ (m · s ⁻¹)	Q_{16H} / (g · cm ⁻² · min ⁻¹)	$Q_{16H(0 \sim 12 \text{ cm})}$ / (g · cm ⁻² · min ⁻¹)	$Q_{16H(0 \sim 12 \text{ cm})}$ / $Q_{16H} / \%$	Q_{35H} / (g · cm ⁻² · min ⁻¹)	$Q_{35H(0 \sim 12 \text{ cm})}$ / (g · cm ⁻² · min ⁻¹)	$Q_{35H(0 \sim 12 \text{ cm})}$ / $Q_{35H} / \%$
40	10	0.44	0.37	0.83	0.30	0.26	0.86
	14	3.50	2.57	0.73	2.95	2.20	0.75
45	10	0.55	0.43	0.78	0.43	0.35	0.81
	14	4.25	3.08	0.72	3.58	2.50	0.70
55	10	1.36	1.10	0.81	0.80	0.64	0.81
	14	7.05	5.56	0.80	5.11	3.72	0.73

2.4 阻沙率特征

在相同风速下,当阻固联合沙障遇到风沙流时,双排高立式尼龙网阻沙障将首先阻挡一部分沙子,而未被阻挡的沙子则会穿过沙障的孔隙,然后被后侧草方格阻挡。由表 3 可知,在风速为 10 m/s 时,阻固联合沙障在内部和背风侧位置阻沙率都表现为 40%孔隙度>45%孔隙度>55%孔隙度,这意味着在孔隙度作为自变量的情况下,不论在沙障内部还是背风侧,40%孔隙度的联合沙障具有最佳防沙效益,45%孔隙度次之,而 55%孔隙度的防沙效益最差;当风速为 14 m/s 时,阻固联合沙障阻沙率也呈现类似变化规律。阻固联合沙障背风侧和内部阻沙率也存在差异,风速为 10 m/s 时,阻固联合沙障背风侧阻沙率 40%孔隙

度下比内部位置增加 2%,而 45%和 55%孔隙度下则分别增加 2%和 8%;在风速为 14 m/s 时,40%,45%,55%孔隙率下背风侧相较于内部阻沙率增加量分别为 2%,3%,7%。背风侧阻沙率高于内部位置的情况,表明双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障之间存在防沙效应的叠加。同一风速下,联合沙障背风侧 55%孔隙度阻沙率相较于内部显示出最大的阻沙率增量,而 40%孔隙度阻沙率增量最小;这说明 55%孔隙度下双排高立式尼龙网阻沙障的防沙效益最差,相对草方格固沙障则承受更多的防沙作用;相比之下,40%孔隙度双排高立式尼龙网阻沙障的防沙效益最好,草方格固沙障所承受的防沙作用相对较轻。

表 3 总输沙率和阻沙率
Table 3 Total sand transport rate and sand retention rate

位置	指示风速/(m·s ⁻¹)	指标	无沙障	40%	45%	55%
16H	10	总输沙率/(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	6.85	0.44	0.55	1.36
		阻沙率/%		0.94	0.92	0.80
	14	总输沙率/(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	24.91	3.50	4.25	7.05
		阻沙率/%		0.86	0.83	0.72
35H	10	总输沙率/(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	6.85	0.30	0.43	0.80
		阻沙率/%		0.96	0.94	0.88
	14	总输沙率/(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	24.91	2.95	3.58	5.11
		阻沙率/%		0.88	0.86	0.79

3 讨论

3.1 联合沙障的优化配置

受联合沙障前方双排高立式尼龙网沙障阻挡作用,导致风速在近地面气流会衰减。但是因为气流遇到阻沙障后,一部分气流被高立式尼龙网沙障阻挡,因文丘里效应的影响,气流遇阻抬升通过沙障模型,从而在沙障模型的上方形成一个相对较高的风速区^[24]。随着气流流到草方格,风速等值线上升,这是草方格对气流阻挡的叠加作用。相同风速下 40%孔隙度的联合沙障相较于 45%与 55%孔隙度具有最大减速区,这表明 3 种孔隙度中 40%孔隙度时联合沙障具有较好的配置。

地表上平均风速为零的某一高度被称为空气动力学粗糙度,其用来表征地表的空气动力学特性,可以直观地展现地表对风沙流与气流的阻碍程度,进而影响到绝对与相对输沙量。判定地表能否起沙则是通过摩阻风速来确定,在近地表气层中摩阻风速大小基本不随高度变化,其大小直接展示了地表所承受风的剪切应力(τ)的大小^[25-26]。当采用不同孔隙度双排高立式尼龙网阻沙障和草方格固沙障联合时,可以有效减小近地表风速,有效控制风沙流运动,从而实现防风 and 防沙^[21-22]。相同的风速条件下空气动力学参数直接受地表状况的影响,3 种不同孔隙度联合沙障的空气动力学粗糙度和摩阻风速随着尼龙网孔隙度的增加均减小,即孔隙度为 40%的双排高立式沙障

与草方格固沙障联合,在减弱风和增大联合沙障地面所承受风的剪切应力方面表现最出色;40%孔隙度联合方式能够最大程度地增加风沙流经过沙障后的沙粒机械能损失,因此在 3 种孔隙度中具有最优的配置。蒙仲举等^[27]在研究不同孔隙度规格的低立式纤维材料沙袋沙障对防风固沙效应的影响,35%孔隙度能够明显增大地表的空气动力学粗糙度,这个结果与本研究结果相近。

3.2 不同沙障配置作用下防沙效益

已有研究显示,在风沙流受到障碍物阻挡后,障碍物迎风侧和背风侧一定范围内沙颗粒发生沉降^[28]。通过分析不同孔隙度双排高立式尼龙网阻沙障和草方格固沙障联合时,内部和背风侧风沙流垂直输沙率特征发现,不论是在风速变化还是孔隙度变化条件下,垂直高度上输沙率与未设置防沙措施时基本相似。输沙率随垂直高度增加而逐渐减少,输沙主要集中在 0~12 cm 高度层,符合指数函数垂直分布规律。影响垂直高度输沙率特征的因素较多,主要受下垫面状况和风沙环境等影响,因此拟合函数存在一定差异,这与石涛等^[25]研究结果一致。

阻沙效率是指经过防沙措施后风沙气流携沙量减少率,常用于评估防沙效益。通过比较不同孔隙度与风速下的阻沙率发现:随着风速增大,联合沙障内部和背风侧阻沙率在逐渐减小;且在相同风速、位置下孔隙度为 40%时,阻沙率最高。这与张克存等^[29]

以风洞模拟不同孔隙度尼龙网对风沙流的减弱作用,得出最佳防沙效益出现在尼龙网孔隙度约为40%的研究结论一致;闫敏^[30]在研究中提到,在“前阻后固”叠加模式下,方格沙障与单行沙障的叠加可以显著增加防沙效益。本研究也得出了类似结论,双排高立式尼龙网阻沙障后方由于布设了草方格,在联合沙障背风侧其阻沙率相比于内部有所增加。

4 结论

(1)相同风速下联合沙障顶形成集流加速区、网后形成弱风区;40%孔隙度尼龙网下弱风区面积最大。相同孔隙度下随着风速的增大,流场分布格局变化不大,但风速等值线显著加密,联合沙障对风速的削弱作用逐渐减弱。

(2)孔隙度分别为40%,45%和55%的双排尼龙网与草方格阻固联合沙障,空气动力学粗糙度和摩阻风速(或沙障地表所承受的风剪切应力)与孔隙度呈反比关系。在风速恒定的情况下,40%孔隙度联合沙障具有最大的空气动力学粗糙度和摩阻风速,此时联合沙障具有较好的配置。

(3)在各种风速和孔隙度阻固联合条件下,联合沙障内部与背风侧,存在输沙率随高度增加呈指数型递减规律,输沙主要集中在0~12 cm高度范围内。

(4)联合沙障阻沙率强弱都与风速大小和孔隙度呈负相关,故孔隙度为40%的联合沙障具有较好防沙效益。双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障两者的联合所产生的防沙效益间还存在叠加效应。

因此在实际工作中,双排高立式尼龙网阻沙障和草方格固沙障联合布置推荐孔隙度40%。本次试验所涉及孔隙度种类不多,其对联合沙障防风防沙效果的系统综合研究尚待深入。

参考文献:

- [1] 黄勇.酒额铁路戈壁风沙流地区沙害成因及防治措施[J].铁道标准设计,2015,59(7):32-35.
HUANG Y. Analysis and prevention of sand disaster in Gobi wind-sand flow region along Jiuquan to Ejina banner railway[J].Railway Standard Design, 2015,59(7):32-35.
- [2] 石龙,蒋富强,韩峰.风沙两相流对铁路路堤响应规律的数值模拟研究[J].铁道学报,2014,36(5):82-87.
SHI L, JIANG F Q, HAN F. Numerical simulation of response law of wind-blown sand flow around the railway embankment[J].Journal of the China Railway Society,2014,36(5):82-87.
- [3] 张伟民,汪万福,张克存,等.不同沙源供给条件下砾石床面的风沙流结构与蚀积量变化风洞实验研究[J].中国沙漠,2009,29(6):1015-1020.
ZHANG W M, WANG W F, ZHANG K C, et al. Wind tunnel experiments on sand-laden wind structure and sand erosion-deposit budget over gravel bed under abundant and deficient sand supplies [J]. Journal of Desert Research, 2009,29(6):1015-1020.
- [4] 祁延录.南疆戈壁区机械防沙措施阻沙效益的风洞测试研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):892-900.
QI Y L. Protection benefits of mechanical sand control measures in Gobi district, southern Xinjiang[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18 (4): 892-900.
- [5] 王丽英,李红丽,董智,等.沙柳方格沙障对库布齐沙漠防风固沙效应的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):115-118,124.
WANG L Y, LI H L, DONG Z, et al. Effect of *Salix psammophila* checkerboard sand barrier on wind prevention and sand resistance in Kubuqi Desert[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (5): 115-118,124.
- [6] 张伟民,王涛,薛炯,等.敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系探讨[J].中国沙漠,2000,20(4):409-414.
ZHANG W M, WANG T, XUE X, et al. The discuss of comprehensively preventing blown-sand system in mogao grottoes, Dunhuang[J]. Journal of Desert Research,2000,20(4):409-414.
- [7] 李凯崇,刘贺业,孔令伟,等.HDPE网沙障布设角度对风沙流结构特征的影响[J].铁道工程学报,2019,36(1):26-30.
LI K C, LIU H Y, KONG L W, et al. Influence of HDPE net sand barrier layout angle on the structural characteristics of wind-blown sand [J]. Journal of Railway Engineering Society,2019,36(1):26-30.
- [8] 辛文栋.干旱地区高速铁路路基技术体系研究[J].铁道工程学报,2017,34(9):14-17,28.
XIN W D. Research on the technique system of high speed railway subgrade in arid region[J].Journal of Railway Engineering Society,2017,34(9):14-17,28.
- [9] LI B L, SHERMAN D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review[J].Aeolian Research, 2015,17:33-48.
- [10] DONG Z B, LUO W Y, QIAN G Q, et al. A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2007,146(1/2):82-93.
- [11] LEE S J, PARK K C, PARK C W. Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements[J].Atmospheric Environment,2002,36(9):1453-1463.
- [12] 罗万银,董治宝,钱广强,等.栅栏对颗粒起动风速影响的实验研究[J].中国沙漠,2007,27(2):201-205.
LUO W Y, DONG Z B, QIAN G Q, et al. Experimental investigation into effects of porous fence on particle threshold wind velocity[J].Journal of Desert Research,2007,27(2):201-205.
- [13] 张立群,许振海,董捷,等.防风抑尘网应用于沙漠铁路风沙防治的数值分析[J].铁道科学与工程学报,2017,

- 14(5):957-963.
- ZHANG L Q, XU Z H, DONG J, et al. Numerical analysis on simulating the application of porous fence in sand control of desert railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5):957-963.
- [14] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- SUN B P. Desertification control engineering[M]. Beijing: China Forestry Publishing Corporation, 2000.
- [15] 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.
- [16] 周娜, 张春来, 田金鹭, 等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J]. 地理研究, 2014, 33(11):2145-2156.
- ZHOU N, ZHANG C L, TIAN J L, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments[J]. Geographical Research, 2014, 33(11):2145-2156.
- [17] LIU H Y, HOU Z F, CHEN Z, et al. Effects of standing stubble on the interception of soil erosion particles[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(3):328-336.
- [18] 贺大良, 刘贤万. 风洞实验方法在沙漠学研究中的应用[J]. 地理研究, 1983, 2(4):99-107.
- HE D L, LIU X W. Experimental methods of wind tunnel in the study of deserts [J]. Geographical Research, 1983, 2(4):99-107.
- [19] 杨文斌, 杨红艳, 卢琦, 等. 低覆盖度灌木群丛的水平配置格局与固沙效果的风洞试验[J]. 生态学报, 2008, 28(7):2998-3007.
- YANG W B, YANG H Y, LU Q, et al. Wind tunnel experiment on sand-fixation effects of sparse shrub communities varying in spatial arrangement[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7):2998-3007.
- [20] 袁鑫鑫, 王海峰, 雷加强, 等. 不同间距双排尼龙阻沙网防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5):1238-1246.
- YUAN X X, WANG H F, LIE J Q, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of double-row nylon net fence with different interval [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5):1238-1246.
- [21] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992:229-268.
- ZHU Z Y, DING G D, YANG M Y. Wind and sand physics[M]. Beijing: China Forestry Publishing Corporation, 1992:229-268.
- [22] 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, 23(4):337-346.
- LIU X P, DONG Z B. Review of aerodynamic roughness length[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(4):337-346.
- [23] 席成, 左合君, 王海兵, 等. 高立式尼龙网沙障防风阻沙特征及其合理配置[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3):882-891.
- XI C, ZUO H J, WANG H B, et al. Wind-proof and sand-blocking characteristics of high vertical nylon mesh sand barrier and its rational allocation[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3):882-891.
- [24] 赵呈冉. 气固分离式沙障防沙性能研究[J]. 泥沙研究, 2023, 48(4):61-66.
- ZHAO C R. Study of sand-control performance of air-solid separating sand barriers[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(4):61-66.
- [25] 石涛, 蒙仲举, 崔向新, 等. 库布齐沙漠光伏电站内芦苇沙障的防风固沙效益[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5):166-171.
- SHI T, MENG Z J, CUI X X, et al. Wind-prevention and sand-fixing benefits of reed-sand barrier at photovoltaic plant in Hobq Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5):166-171.
- [26] 刘欣宇, 张春来, 张慧, 等. 草地近地表风速脉动及其与平均风速、摩阻风速的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5):60-63, 78.
- LIU X Y, ZHANG C L, ZHANG H, et al. Characteristics of wind velocity pulsation and its relation to average wind velocity and friction wind velocity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5):60-63, 78.
- [27] 蒙仲举, 任晓萌, 高永. 低立式纤维沙袋沙障防风固沙效应研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2):294-296, 301.
- MENG Z J, REN X M, GAO Y. Effect of the low-fiber sandbag sand-barrier on wind-breaking and sand-fixation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2):294-296, 301.
- [28] 闫敏, 左合君, 贾光普, 等. 不同防沙措施的风沙流及其携沙粒度垂直分异特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5):1513-1522.
- YAN M, ZUO H J, JIA G P, et al. Grain size vertical distribution in aeolian flow of sand control technical measures[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5):1513-1522.
- [29] 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, 11.
- ZHANG K C, ZU R P, FANG H Y. Simulation on abated effect of nylon net with different porosities on wind-blown sand in wind tunnel[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(4):4-6, 11.
- [30] 闫敏. 乌兰布和沙漠防沙技术措施复合作用机制及其优化配置[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- YAN M. Combined action mechanism of Ulan Buh Desert sand prevention technology measures and its optimal configuration [D]. Hohhot: Neimenggu Agricultural University, 2020.