

胡广录,何娜娜,张叶叶,等.固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)对风沙流场影响的数值模拟[J].中国沙漠,2026,46(3):304-317.

固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)对风沙流场影响的数值模拟

胡广录^{ab},何娜娜^a,张叶叶^a,陈坤^a,靳涛阳^a,王佳琦^a,田凯夫^a

(兰州交通大学 a.环境与市政工程学院, b.寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心,甘肃 730070)

摘要:植物固沙是干旱、半干旱地区防治风沙灾害的重要措施,梭梭(*Haloxylon ammodendron*)作为干旱区典型的抗旱、耐盐碱、抗风蚀的荒漠植物,防风固沙效果显著,在黑河中游荒漠-绿洲过渡带被广泛栽植。本文通过Fluent计算平台对梭梭植物附近的风沙流场进行三维数值模拟,分析梭梭周围风速特征和积沙特征,并利用野外试验数据进行验证。结果表明:(1)不同风速条件下,梭梭周围风沙流场均可形成4个分区,但各区流场结构尺度和扰动强度均存在显著差异。入口风速为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,梭梭背风面存在3个涡流区,静风区范围可延伸至 $3H$ (H 为株高),气流动能恢复较慢;而在 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,背风面仅有较弱的2个涡流区,静风区范围缩减至 $1.2H$,动能恢复更快。(2)梭梭防风效果与其冠幅呈正相关关系,冠幅越宽,防风效果越好。梭梭不同位置处的防风效率总体表现为背风面>迎风面>侧风面,背风面风速降低 $50\%\sim 90\%$;迎风面风速降低 $30\%\sim 60\%$;而侧面风速降幅仅为 $10\%\sim 30\%$ 。(3)不同风速条件下,梭梭的阻沙能力显著不同。当入口风速为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,沙粒沉积在 $-0.75H\sim 1H$;而当风速增至 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,沙粒沉积在 $0\sim 1H$ 。(4)增加植株排数与优化行间距可提升梭梭植物的阻沙能力,其中梭梭行间距为 5 m 时整体阻沙效果最优。该研究结果可为黑河中游荒漠-绿洲过渡带土壤风蚀防治提供参考。

关键词:梭梭(*Haloxylon ammodendron*);防风固沙;数值模拟;风沙流场;沙粒体积分数

文章编号:1000-694X(2026)03-304-14

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00247

中图分类号:S157.2

文献标志码:A

0 引言

土壤风蚀指地表土壤颗粒在风力作用下的运移过程,是干旱、半干旱区土地退化的主要原因^[1-3]。植被可通过增加地表覆盖、削减风力和阻滞风沙,达到防风固沙目的^[4-6]。在中国西北干旱区的沙漠边缘,尤其是在荒漠-绿洲过渡带区域,广泛分布着天然灌木、半灌木及草本等植被类型。尽管这些植被的群落结构相对简单、覆盖度较低,但其在防风固沙方面具有显著生态功能,能够有效减缓风沙流动强度,对维持荒漠-绿洲生态系统的稳定发挥着重要作用^[7]。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是典型的荒漠植物,具有耐寒、耐旱、抗盐碱、抗风沙特征,也是中国西北荒漠地区防风固沙和改善生态环境的先锋树种,被誉为“沙漠卫士”“沙漠植被之

王”^[8-9]。因此,探究梭梭周围风沙流场变化及分布特征,对于进一步摸清植物如何通过改变风沙运动规律进而达到防风固沙的目的具有重要意义。

在荒漠-绿洲过渡带区域的风沙防治过程中,增加植被覆盖是最广泛、最长久、最环保的措施^[10]。人们通过野外实测和风洞实验方法对植被不同配置模式的防风固沙效应^[11]、灌丛沙堆形成^[12]、沉积物粒度特征^[13]以及空气动力学特征^[14]等方面进行了研究。随着数值模拟的逐渐兴起,计算流体力学作为研究气流与固体相互作用的重要方法,在风沙流场模拟与植物防风固沙研究中得到了广泛应用。贾光普等^[15]采用Fluent数值模拟方法,在不同障排数量、沙障高度及入口风速条件下,就高立式尼龙网沙障周边区域的风速流场与积沙分布特征进行

收稿日期:2025-07-12; 改回日期:2025-10-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41867074);甘肃省张掖市甘州区水资源费项目(甘区水务发[2024]237号);甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目(甘水建管发[2025]24号)

作者简介:胡广录(1966—),男,甘肃靖远人,博士,教授,研究方向为生态水文及生态修复。E-mail: hgl0814@163.com

了二维模拟研究,系统探讨了障排数量变化对风沙运动过程的影响规律;闫晴等^[16]利用Fluent软件对3类典型沙生灌丛周围的流场特征进行了二维数值模拟,分析了不同植株形态对风沙流的影响;金子皓等^[17]基于双向流-固耦合技术,利用Fluent建立了风场与刺槐的三维计算模型,探讨了刺槐林不同林带结构的防风效应。可见通过数值模拟探究风沙运动规律已成为研究热点,但目前众多学者多侧重于拦沙堤、沙障等的数值模拟,将Fluent数值模拟引入植物防风固沙的研究较少,且在相关研究中学者多注重操作简单、易于实现的二维模型,采用三维模型进行数值模拟的研究甚少,特别是针对黑河中游荒漠-绿洲过渡带固沙植物风沙流场的有关数值模拟研究更少,近5年内关于该区域植物防风固沙的研究不超过5篇,针对典型固沙植物梭梭的近地表三维风沙流场模拟研究尚未见报道。基于上述研究的空白,本文通过Fluent数值模拟,结合野外实验验证,重点解决以下3个核心科学问题:(1)梭梭三维形态数值模拟与野外实测结果的一致性;(2)不同风速条件下梭梭周围流场变化情况;(3)不同行间距及排数的梭梭对阻沙效应的影响。通过上述研究,旨在为黑河中游荒漠-绿洲过渡带植物防沙治沙措施的实施提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

野外试验在黑河中游的甘肃省张掖市临泽县北部的荒漠-绿洲过渡带进行,地理位置 $39^{\circ}21'53''$ — $39^{\circ}22'01''$ N、 $100^{\circ}09'12''$ — $100^{\circ}09'14''$ E。属温带大陆性荒漠气候,多年平均降水量118.4 mm,多年平均蒸发量1830.4 mm,多年平均气温 7.7°C ,极端最高气温为 39.1°C ,极端最低气温为 -27.3°C ,风向以西北风为主,风沙活动多在3—5月,多年平均风速 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,多年平均沙尘暴日数为7 d。研究区内自然植被以多年生荒漠植物为主,呈斑块状分布,植物种类稀少,多为旱生或超旱生植物,代表性固沙植物有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等^[18]。本文选取梭梭作为研究对象,模拟所需植物基本参数均采取野外调查获得,调查于2024年6月灌丛植物生长季进行,在过渡带区域内

设置一块 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的样地,在样地内选取多株林龄相近的梭梭灌木,调查记录每棵植物的冠幅、株高、枝下高度等参数,再计算各个参数的平均值作为建立模型的参考依据。在样地内沿对角线设置9个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的样方,通过计算样方内植物投影面积与样方面积的比值得到植被盖度(表1)。

表1 植物参数
Table 1 Statistical table of plant parameters

	最大值	最小值	平均值
冠幅/m	1.8	1.4	1.6
株高/m	2.0	1.5	1.8
枝下高度/m	0.13	0.08	0.10
盖度/%	25	20	22

1.2 数值建模方法

1.2.1 几何建模和网格划分

由于现实环境中的自然风场变化复杂,现阶段难以完全还原真实的风沙地貌环境^[19],因此,本文在不影响模拟结果的情况下对所建立模型进行了一定程度的简化。首先对现实中的三维耦合物理场进行数值计算方法上的简化,仅考虑风沙耦合及沙粒碰撞的作用;其次,为了减小计算量,本文将沙粒简化为统一大小的碰撞单元,把碰撞看作是非变形的瞬态过程。通过多次模拟和运行,确定模拟计算区域长26 m、宽8 m、高5 m,初始沙床厚度为0.1 m;将植物简化为多孔介质模型,植物高度1.8 m,冠幅1.6 m,枝下高度0.1 m,放置在入口 $3H$ (H 为株高)处(图1)。

本文将梭梭冠层视为均匀的多孔介质,但实际的梭梭冠层枝叶通常为随机分布,冠层的孔隙也不均匀,因此模拟结果与现实场景具有一定的差异性。但学术界已多次使用此类简化方法进行数值模拟计算,模拟结果也具有一定的可靠性^[20-22]。本文植物模型数据基于临泽县北部的荒漠-绿洲过渡带样地调查获得,模拟结果仅与特定区域样地内的调查结果进行对比,因此,将梭梭简化为多孔介质模型进行数值模拟具有一定的可行性。

网格划分使用建模软件Ansys Icem CFD的Meshing模块,由于植物模型整体呈不规则形,本文网格划分类型采用混合形式,计算域网格数量为 9×10^5 个,平均正交质量为0.875,网格质量基本良好,满足计算要求。

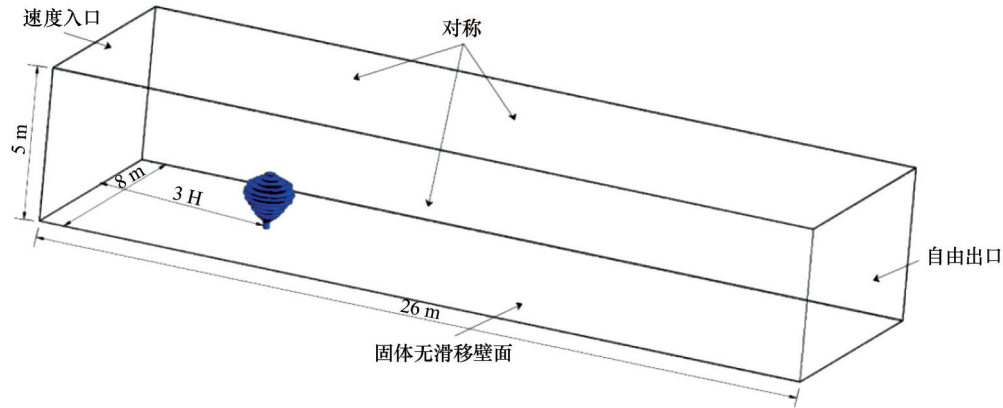


图1 几何模型简化图

Fig.1 Simplified diagram of the geometric model

1.2.2 参数设置及边界条件

参数设置。研究区沙粒粒径0.075~0.25 mm^[23], 本文选择粒径为0.1 mm的均匀沙粒作为模拟颗粒, 密度设置为2 650 kg·m⁻³; 初始沙粒体积分数为0.02, 沙床初始堆积率取值0.625; 重力加速度为-9.81 m·s⁻²^[24]。

边界条件。本文定义模型入口为速度入口, 出口边界为自由出口, 顶面和侧面边界为对称, 以保证上壁面附近的气流流动状态和相邻的侧壁面保持一致; 植物模型和底面边界为固体无滑移壁面 (wall), 根据与本文研究区域生态环境接近的相关研究, 粗糙度取值为沙粒粒径的1/30^[25], 单一粒径沙粒的粗糙度常数一般默认为0.5, 碰撞恢复系数取值0.92^[26]。

入口边界速度采用风速廓线方程:

$$U = \frac{U_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

式中: U 为距地面高度 z 处的风速, m·s⁻¹, U_* 为摩擦速度, m·s⁻¹; z_0 为粗糙度, m; k 为冯卡门常数, 测定值在0.35~0.43, 一般取值0.4。

本文求解模型选择欧拉双流体模型, 求解器选用压力基处理; 时间步长取0.01s; 算法采用 Phase Coupled Simple。

1.2.3 控制方程

标准 k - ε 模型。风沙运动是包含空气和沙粒的两相流流动, 本文在进行风沙运动模拟时, 采用标准 k - ε 模型作为计算的湍流模型^[27], 其中湍动能 (k) 和湍动能耗散率 (ε) 的具体运输方程如下:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (2)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \mu_t}{\partial \mu_j} \right) \quad (5)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; ρ 为流体密度; μ 为动力黏度; μ_t 为湍流黏度; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能; u_i, u_j 分别为 x, y 方向上的速度分量; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍动能、湍动能耗散率所对应的普朗特常数; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 为经验系数; C_μ 为经验常数; S_k 和 S_ε 分别为湍流动能项和湍动能耗散项; 根据前人经验^[28], 取经验值 $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ 。

欧拉双流体模型。本文利用欧拉双流体模型, 把风场中运动的沙粒也看作连续的流体, 与空气充分混合^[29]。

基本控制方程:

$$\alpha_g + \alpha_s = 1 \quad (6)$$

气体相控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \tau_g +$$

$$\alpha_g \rho_g g + K_{sg} (\vec{v}_s - \vec{v}_g) \quad (8)$$

颗粒相控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \tau_s + \alpha_s \rho_s g + K_{gs} (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (10)$$

式中: α_g 和 α_s 分别代表空气相和沙粒相的体积分数; ρ_g 和 ρ_s 分别为空气相和沙粒相的密度; τ_g 和 τ_s 分别为空气相和沙粒相的黏性应力张量; \vec{v}_g 和 \vec{v}_s 分别代表空气相和沙粒相的速度; $K_{sg}=K_{gs}$ 是空气相与沙粒相的动量交换系数; p 是空气相和沙粒相共享的压力, p_s 为固体压力相,其表达式如下:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_0 \theta_s \quad (11)$$

式中: g_0 是沙粒间碰撞概率分布函数; e_{ss} 表示沙粒相间碰撞恢复系数; θ_s 是沙粒相的温度。

1.3 野外试验设计

为验证本文数值模拟结果的合理性及可靠性,本研究在临泽县北部的荒漠-绿洲过渡带开展野外试验,观测时间为研究区风季(2025年3—4月),观测植物周围5 m内无其他植物或障碍物。

野外风速测定采用RA620分体自计式风速风向仪(图2),分别在植物迎风面1H、2H(H为株高)处、背风面1H、2H、3H处以及侧面1H、2H处设置观测点,每个观测点上设置3个风速观测高度,分别为0.5 m、1.0 m和1.5 m。数据记录间隔时间为5s,然后根据测定结果计算并取其平均值。

野外输沙率测定采用HY.JSY-B组合阶梯式集沙仪,集沙仪共分10层,层高3cm,观测时将底部集沙孔与地面平齐,设置9个观测点,同风速观测点一致。当风速超过起沙风速时(经测量确定研究区最小临界起沙风速为 $4.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [30]),打开集沙孔测定积沙量,观测时间为30 min,收集结束后,分层对集沙仪中的集沙量进行称重,然后计算输沙率。

输沙率 Q :

$$Q = \frac{m}{S \times t} \quad (6)$$

式中: Q 为输沙率($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$); m 为集沙仪各层沙样质量(g); S 为进沙口的横截面积(cm^2); t 为观测的时间(min)。

2 结果与分析

2.1 流场模型合理性验证

2.1.1 风速模拟验证

为验证本文风速模拟的合理性,将模拟值与实测值进行对比。以 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 入口风速为例,分析梭梭在不同高度处的风速变化。实测值和模拟值的最大相对误差为10.16%(表2),误差主要来源于仪器

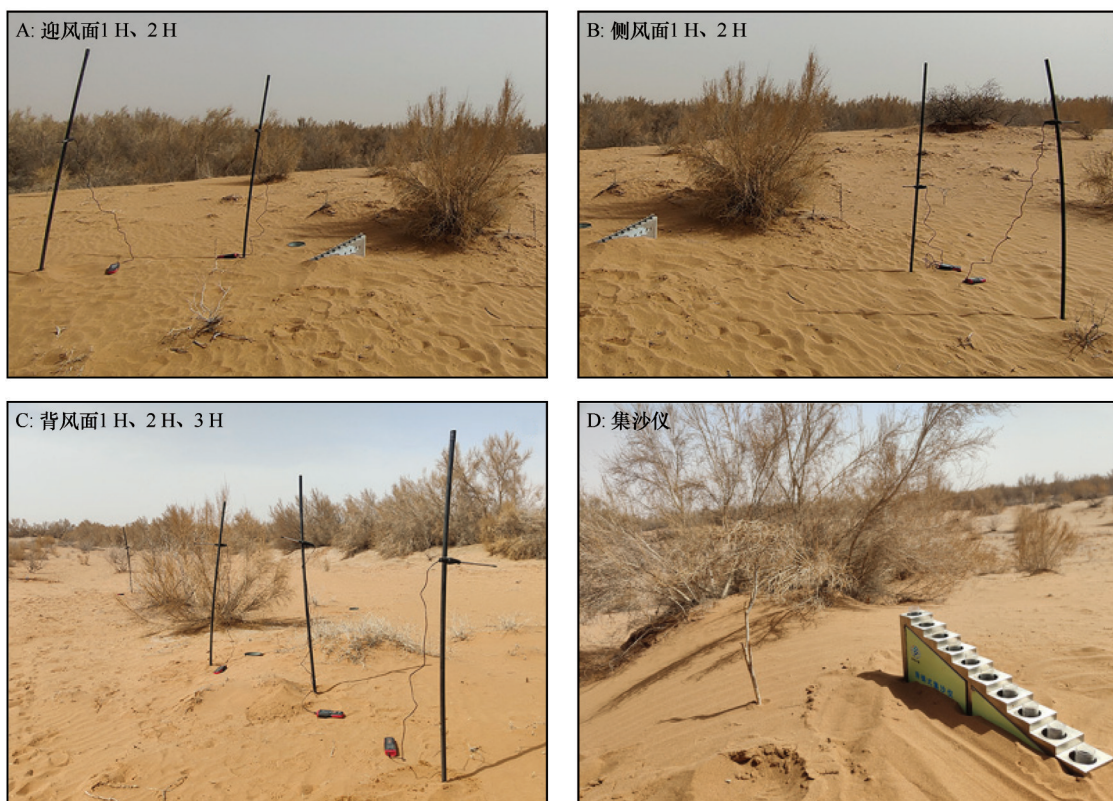


图2 野外试验现场照片(H为株高)

Fig.2 Photographs of the field test site (H is the height of plant)

表2 不同高度梭梭周围水平风速实测值与模拟值对比

Table 2 Comparison of measured and simulated horizontal wind speeds around Haloxylon ammodendron at different heights

高度/m	项目	迎风面		侧风面		背风面			R^2
		1H	2H	1H	2H	1H	2H	3H	
0.5	实测值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.39	5.44	5.76	5.81	1.16	1.55	2.03	0.9993
	模拟值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.63	5.78	6.10	6.02	1.27	1.70	2.24	
	相对误差/%	4.41	6.25	5.86	3.56	10.16	9.76	10.04	
1.0	实测值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.09	5.38	5.40	5.30	1.65	1.87	2.43	0.9923
	模拟值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.29	5.42	5.77	5.60	1.811	2.03	2.29	
	相对误差/%	3.93	0.79	6.73	5.80	9.65	8.98	5.73	
1.5	实测值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.53	5.74	5.96	5.91	2.20	2.87	4.93	0.9972
	模拟值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.83	5.95	6.24	6.23	2.45	3.13	5.40	
	相对误差/%	5.49	3.77	4.78	5.44	11.71	9.23	9.58	

精度以及现场风向的随机性变化,最小相对误差为0.79%。通过对实测值与模拟值进行线性回归分析, R^2 均大于0.99,表明数值模拟所采用的模型参数及边界条件设计具有较高的可靠性,进一步验证了本文模拟结果的合理性。

2.1.2 风沙两相流验证

已有研究表明,风沙运动过程中沙粒体积分数与输沙率的分布趋势具有较强的一致性^[20]。本文以野外实测的梭梭植株迎风面1H及背风面1H、2H处的输沙率为对照,通过数值模拟方法获取相应位置沙粒体积分数随高度变化的分布特征,并进行对比分析(图3、4)。实测输沙率与模拟获得的沙粒体积分数均呈现出随高度增加而逐渐减小的趋势,这符合沙粒迁移规律及风沙流结构特征。验证结果表明,本文所构建的风沙两相流数值模型在模拟精度与可靠性方面具有良好表现,可为后续相关研究提供可靠技术支撑。

2.2 梭梭的防风效果

2.2.1 梭梭周围风速流场及压力分布特征

为探究不同风速条件下梭梭周围风速流场的变化,本文选取入口风速分别为6、9、12 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速廓线进行模拟(图5,以梭梭为横轴原点,负号表示迎风面,正号表示背风面,下同)。在不同的风速条件下,梭梭对气流的扰动在结构形态上表现出较好的一致性,均在植物上方形成了加速区,迎风面形成了遇阻减速区,同时背风面形成了静风区及恢复区。然而,风速变化在流场结构尺度与扰动强度

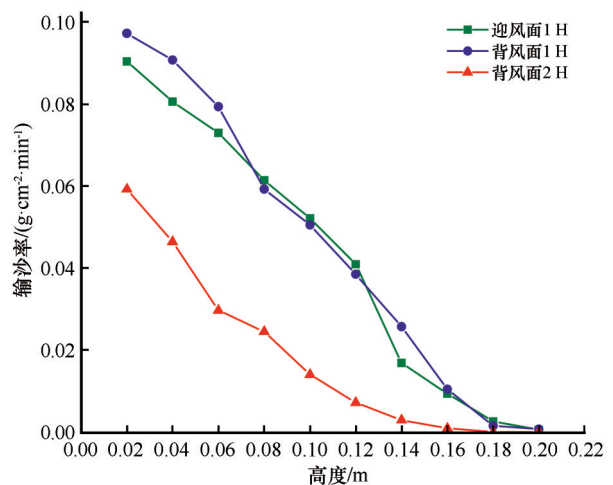


图3 输沙率随高度变化(野外试验)

Fig.3 Variation of sand transport rate with altitude

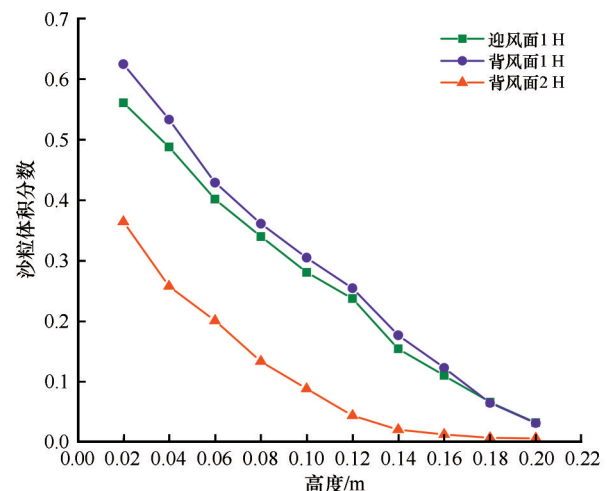


图4 沙粒体积分数随高度变化(数值模拟)

Fig.4 Sand volume fraction variation with height (numerical simulation)

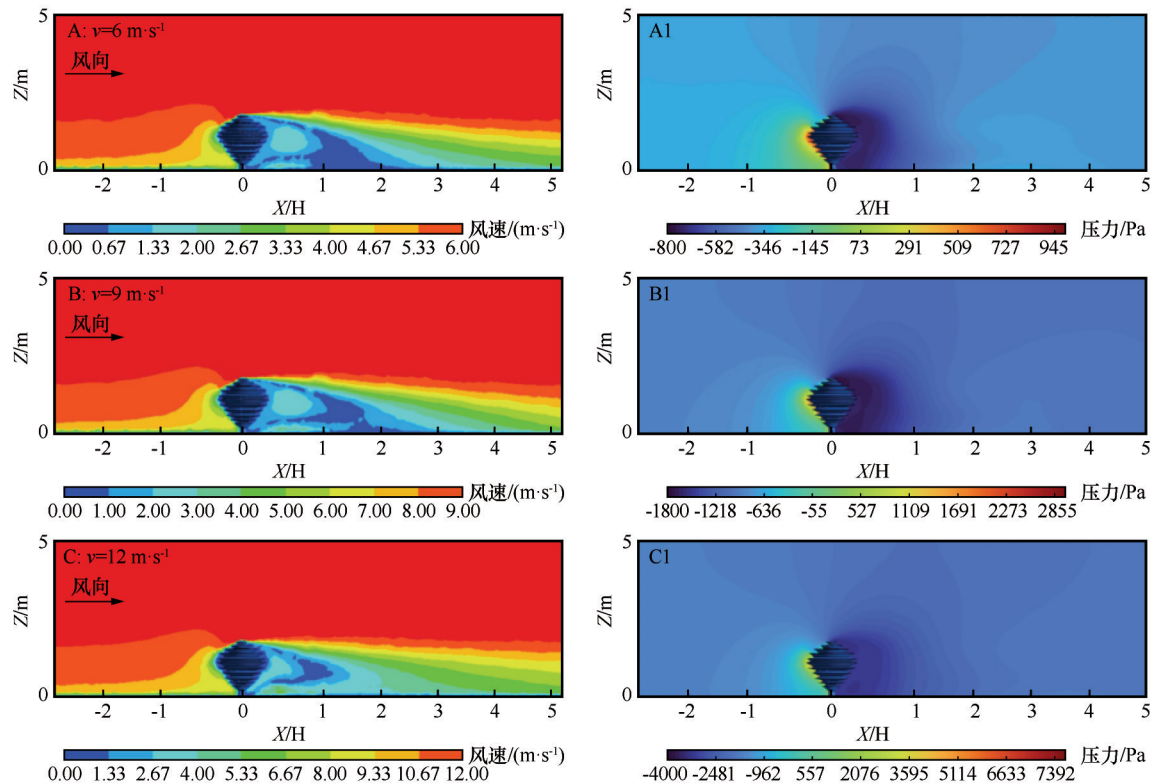


图5 植物周围风速流场和压力分布(X-Z剖面)

Fig.5 wind velocity components and pressure distribution around plants(X-Z profile)

上表现出显著差异。入口风速为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,梭梭背风面静风区范围可延伸至 $3H$ 左右,表明低风速条件下尾流区(包含静风区及恢复区范围)涡流运动扰动范围较大、动能恢复较慢;而在 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,静风区范围明显缩小,其影响长度缩减至 $1.2H$ 以内,说明高速气流在背风面动能恢复更迅速,尾流区更紧凑。此外,随着风速逐渐升高,梭梭顶部的加速区范围扩大,风速极值升高,说明来流强度对顶部流速的提升具有明显驱动作用。

结合压力分布图可知,在梭梭迎风面均存在明显的高压区,其正压峰值随入口风速的增加显著增强。入口风速为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,迎风面最大静压约为 945 Pa ,而在 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时已跃升至 7392 Pa ,表明随着气流动能的增强,在迎风面形成了更剧烈的动压堆积。背风面区域则普遍存在压力骤降形成的低压区,该区域是气流分离与回流涡旋形成的主要场所。最大负压值从 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的 -800 Pa 增大至 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的 -4000 Pa ,涡流及气流分离效应增强。

综上所述,在不同入口风速下,尽管梭梭周围流场结构分区总体保持一致,均形成4个分区,但随着入口风速增大,流场中正负压梯度加剧,气流扰动强度提升,尾流区更加集中紧凑。

2.2.2 梭梭周围水平风速分布特征

为了进一步探究梭梭周围水平方向的速度分布,在 $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速条件下,提取 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 1.8 m 高度的水平风速分布(图6)。可以明显看出,随着垂直高度的变化,梭梭对来流风速的干扰强度和范围呈现出显著的分层效应,水平流场中的风速变化具有明显的非均匀性。

在 1.0 m 高度层,即梭梭冠幅最大区域,枝叶分布密集,风速衰减最为明显。迎风面形成较宽的减速区,风速降至 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下;背风面则形成延伸约 $2H$ 的静风区,平均风速低于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明该高度层对气流具有最强的阻滞作用,是植物防风效应最为显著的区域。在 1.5 m 高度处,尽管仍处于最大冠幅区上部,气流扰动相较于 1.0 m 层已明显减弱,静风区长度缩短至约 $0.8H$,平均风速维持在 $2.0\sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明该高度层的防风效应仍存在,但对气流的削减能力弱于最大冠幅区。进一步升高至 1.8 m 高度层,该区域基本位于冠幅顶端,对风速的扰动最小,静风区长度仅约为 $0.1 H$,气流在短距离内迅速恢复至来流风速,表明植株顶部对风速的削弱作用较为有限。在最大冠幅下部(0.5 m)与近地面(0.2 m)两个高度层,风速分布也表现出显著差

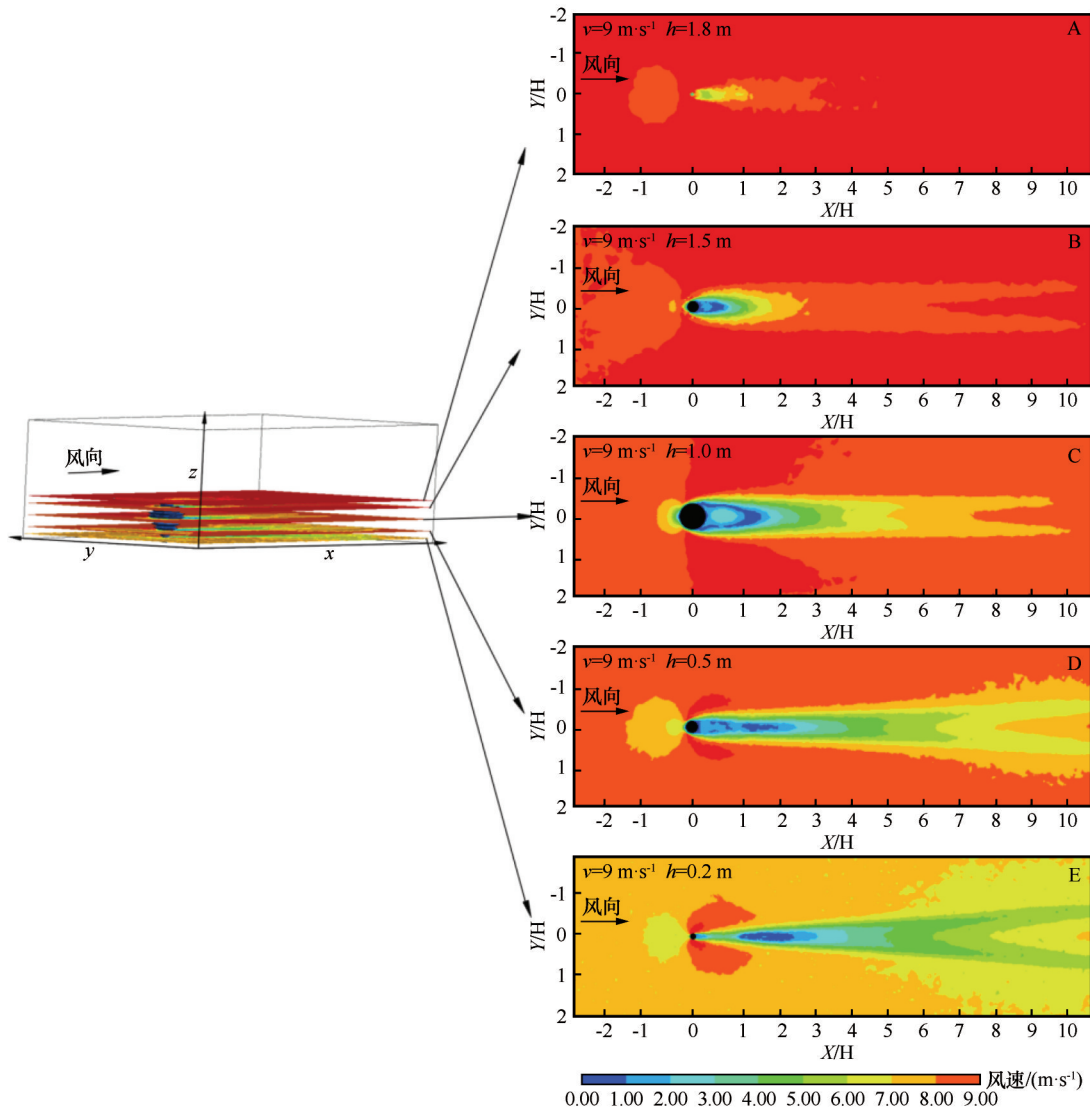


图6 梭梭周围不同高度的风速分布特征(X-Y剖面)

Fig.6 Characteristics of wind speed distribution at different heights around *Haloxylon ammodendron* (X-Y profile)

异。0.5 m高度层仍处于枝叶分布较为集中区域,迎风面存在明显的减速区,背风面静风区延伸至约2.0H,平均风速降至1.0~2.0 m·s⁻¹,说明该层对风速亦有较强的削弱能力。相比之下,0.2 m高度层主要为梭梭枝干分布区域,孔隙度高,对气流阻滞作用有限,该层背风面扰动范围较小,仅约1.2H,气流主要从植物两侧绕流后汇合并迅速恢复至来流风速。

除0.2 m高度层外,其余高度层在梭梭两侧均形成明显的风速加速区,其中1.0 m与0.5 m高度层最为显著。这一现象表明,当气流受到冠幅阻挡后,绕流效应显著增强,使得两侧风速出现加速。侧向加速区的强度与冠幅形态密切相关:在0.2~1.0 m高度,冠幅逐渐增大,侧向加速区范围亦随之扩大;而在1.0~1.8 m,冠幅逐渐减小,导致绕流强度

减弱,风速逐渐恢复至来流水平。

2.2.3 梭梭周围风速廓线变化特征

各风速条件下,迎风面靠近植物0.2H范围内的风速廓线呈“S”型分布(图7),表明该区域内存在逆向气流并形成局部涡流区。随着与植物距离的增加,风速逐渐恢复,并呈明显的指数增长趋势,风速恢复较快,植物防风效果逐渐减弱。迎风面风速降幅在0~0.5H内最显著,可达60%。背风面风速值在1H范围内明显降低,在背风面2H、3H及5H位置处逐渐恢复,但始终低于迎风面相应高度的风速值。背风面的有效防护范围主要在0.5H~3H,风速降幅可达90%。风速在0.2H处显著下降;随着远离植物方向,风速迅速恢复,并呈现陡峭的指数增长趋势,相较于迎风面变化更为剧烈。侧面风速

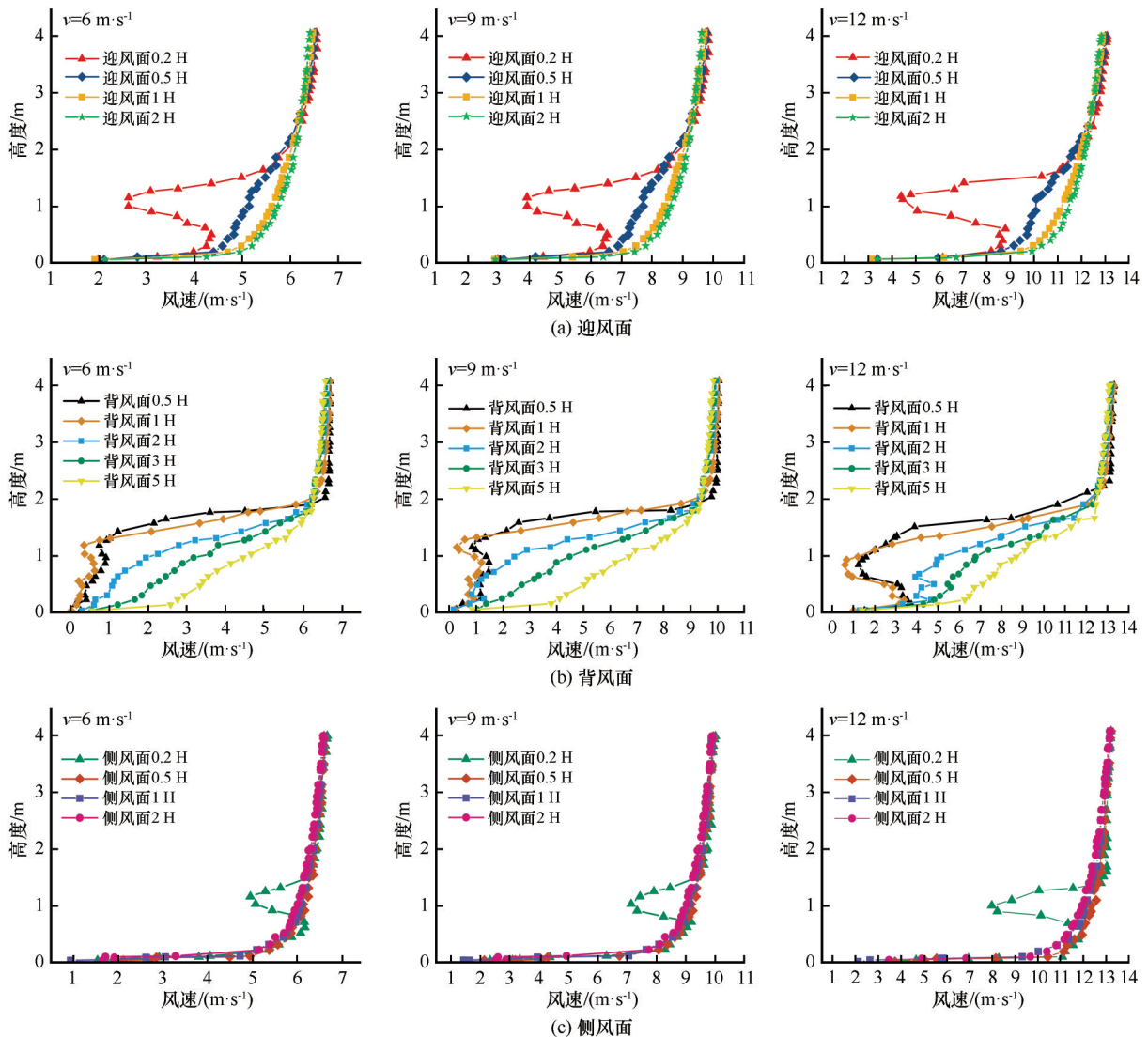


图7 植物周围风速廓线变化

Fig.7 Changes in wind speed contours around plants

降幅在0~0.2H最显著,可达30%。综上所述,梭梭不同位置处的防风效果总体表现为背风面>迎风面>侧风面。

3种风速条件下,同一方位处的风速廓线总体变化趋势基本一致,然而,随着入口风速的增加,风速廓线的变化幅度显著加剧,说明在强风条件下,植物的防风能力受到一定限制。此外,不同风速条件下风速剖面的拐点均集中在1.0~1.2 m垂直高度,表明梭梭在此高度区间的防风作用最为显著,是其垂向最优防护高度区。

2.3 梭梭周围积沙特征

为探究梭梭在不同风速条件下的阻沙效果,选取入口风速为6 m·s⁻¹、9 m·s⁻¹、12 m·s⁻¹,模拟得到

$t=1\text{ s}$ 、 $t=10\text{ s}$ 的积沙云图(图8)。图中不同颜色代表沙粒体积分数的大小,红色区域对应体积分数最高,表明沙粒在该区域已基本沉积;其他颜色代表沙粒以不同的形式(蠕移、跃移或悬移)进行运动。随风沙运动时间延长,积沙量逐渐增加,并在一定时间范围内趋于稳定,表现出风速控制下的动态平衡特征。当入口风速为6 m·s⁻¹时,沙粒先在迎风面0.75H和植物根部沉积,随着时间推移,沙粒最终沉积在-0.75H~1H,沙粒体积分数为0.43~0.61;当入口风速增大至9 m·s⁻¹时,沙粒最先沉积位置在迎风面0.6H和植物根部,最后稳定在-0.1H~1H,沙粒体积分数为0.35~0.61;当入口风速再增至12 m·s⁻¹时,沙粒先沉积在迎风面0.5H和植物根部,最后沉积在0~1H,沙粒体积分数为0.24~0.61。

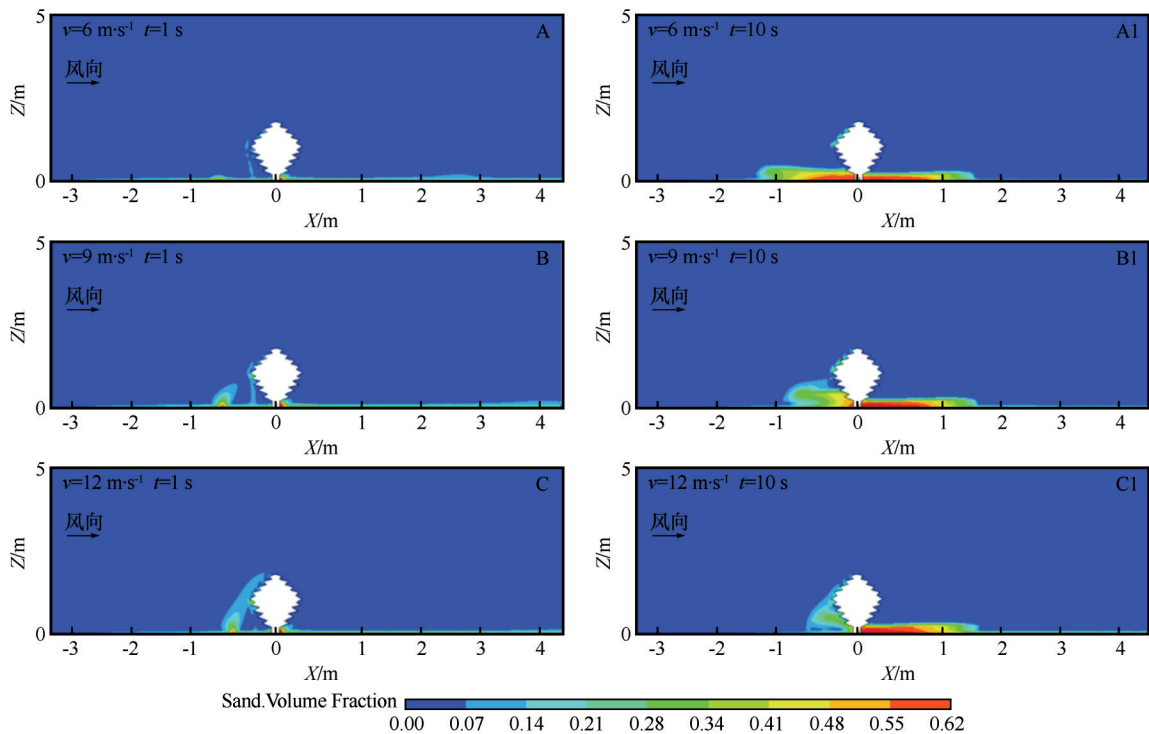


图8 梭梭周围积沙云图(X-Z剖面)

Fig.8 Cumulus cloud map around *Haloxylon ammodendron* (X-Z profile)

在不同风速条件下沙粒沉积呈现出不同的趋势。风速越小,植物对沙粒的阻滞能力越强,随着风速增大,植物的阻沙效果也逐渐减弱。为增强植物阻沙能力,防沙实践中可以选择增加植物数量的方式来实现,选取入口风速为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,模拟得到行间距分别为3、5、8 m的双排梭梭以及行间距为3、5 m的三排梭梭周围积沙云图(x-z剖面, $y=0$;x-y剖面, $z=0.08\text{ m}$)。可以发现,随着梭梭排数的增加与行间距的变化,梭梭对风沙流的扰动特性及其阻沙效能均呈现显著差异(图9,10)。

双排梭梭配置中,当行间距为3 m时,沙粒主要在第一排梭梭背风面、第二排根部及背风面沉积,沙粒体积分数局部达到0.6,但整体沉积范围较窄,第二排背风区的积沙延伸范围约为 1.5 m ($0.83H$)。当行间距增大到5 m后,沙粒在两排之间获得更充分的运移与分布空间,最终沉积在第一排植物背风面以及第二排植物根区、背风面,呈现出明显的积沙带,最大沉积范围达 4.5 m ($2.5H$)。而在8 m行间距下,尽管第一排仍能拦截部分沙粒,但由于第一排与第二排之间间距增大,植物对流场的扰动明显减弱,第一排和第二排梭梭植物的协同作用减弱。

对于三排梭梭配置,在行间距为3 m时,由于植株排列紧凑,第一、二排植物对入流风速产生显著

耗散作用,尽管整体流场发展受限,但在第三排背风区域仍形成了风速极小、扰动最弱的“沉积洼地”,从而促进了沙粒的沉降富集,沙粒体积分数达到全域最高值约0.62。然而,由于植被过于密集,整体沉积区域主要集中于第二排及第三排背风区,积沙量表现出“前少后多”的非均衡分布特征。相较之下,5 m行间距的三排配置,在空间布局上更为合理,第一、二、三排之间均形成明显的气流减速与逐级沉积区,各排植物背风侧均有沙粒有效沉降,横向延展清晰,沉积带稳定。该配置下植被对风沙流的分级扰动与梯度耗散协同增强,使得整体阻沙效果最优。

综上,行间距为5 m时,梭梭在双排与三排配置中均表现出最优的阻沙性能,不仅沉积区域连续且均匀,而且沙粒体积分数高、空间分布合理,能够在保障植被通风效能的同时,最大限度发挥多层次协同阻沙的作用。

3 讨论

风力是驱动沙粒迁移的主要动力,风沙运动本质上是贴近地表的气流对沙粒进行搬运的过程。因此,消减近地表风速是有效防治风蚀的关键手段^[31]。在自然环境中,植被通过增加地表粗糙度,

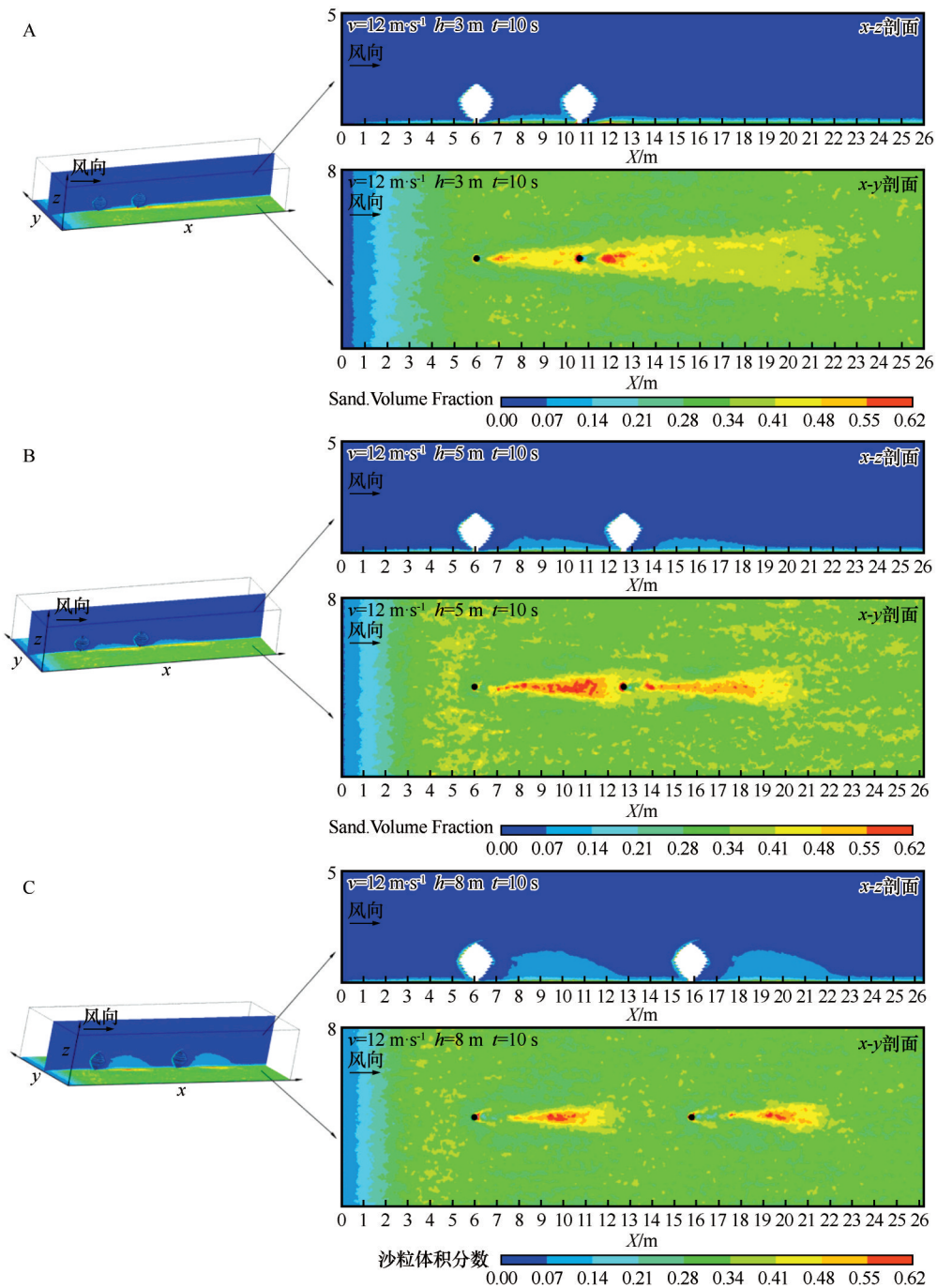


图9 双排梭梭周围积沙云图(h 为行间距)

Fig.9 Cumulus cloud map around double-rowed *Haloxylon ammodendron* (h is the line spacing)

能够有效干扰和削弱近地面风沙流的强度,从而发挥防风固沙的重要生态功能^[32-33]。从流体动力学角度分析,当风沙流遇到障碍时,会发生明显的绕流效应。植物在风沙流中充当障碍物,气流被迫绕过植物体上方和两侧,形成局部的流线偏转,进而在植物迎风面区域产生高压区,在背风面形成低压区^[34]。这一压力梯度的变化导致气流在植物周围重新分布,并在背风面形成涡旋。涡旋的存在不仅

促使风速迅速衰减,还增强了气流的扰动和摩擦耗能,从而抑制了沙粒的起动与迁移能力^[35]。

本文利用Fluent软件对梭梭近地表风沙运动进行数值模拟,发现当风沙流经过植物时,在迎风面受到阻滞作用从而形成遇阻减速区,该区域内风速动能较低导致部分沙粒沉积,主要集中在植物根部;到达植物处时,来流受到阻碍被迫从植物上方和两侧绕流通过,绕过植物后周围再无阻碍物,从

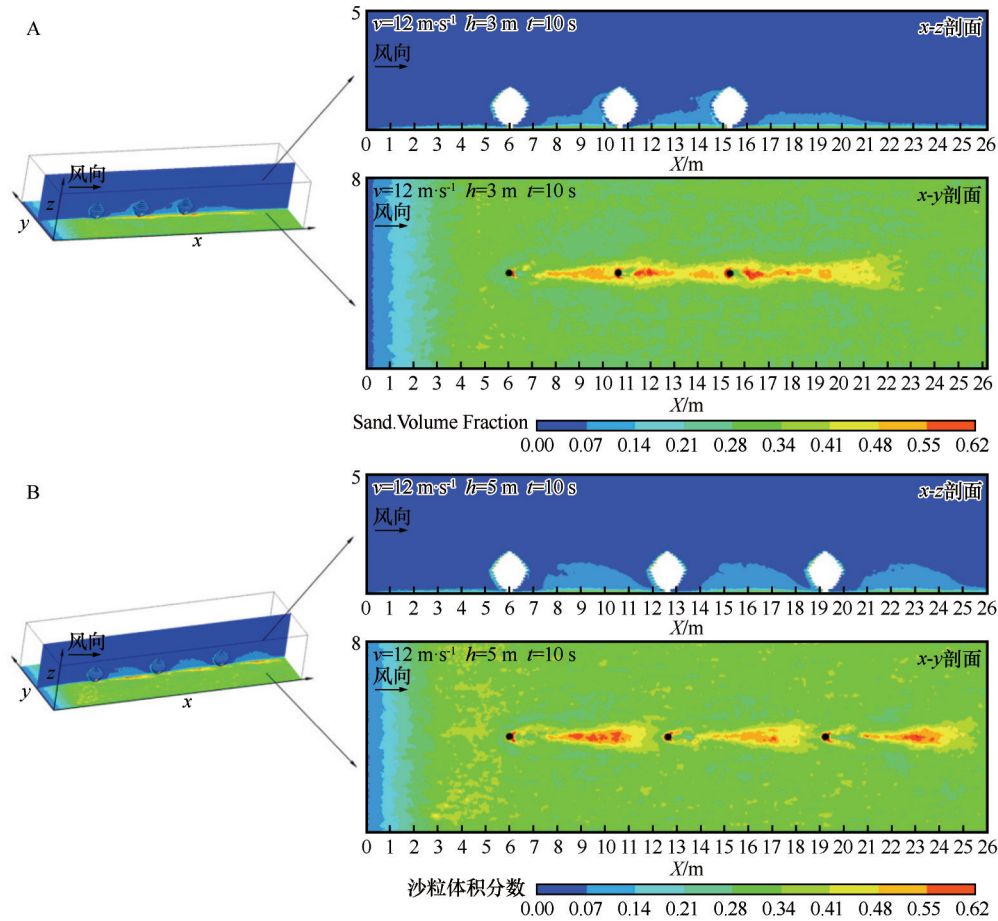


图10 三排梭梭周围积沙云图(h为行间距)

Fig.10 Cloud map of sand accumulation around three rows of *Haloxylon ammodendron*(h is the line spacing)

而导致上方区域和两侧区域风速得到显著增强,形成明显的加速区,该区域内气流携沙作高速运动,因此沙粒沉积效果并不显著;经过植物后气流再次发生分流,一部分气流沿前进方向继续运动,另一部分气流因涡流运动而产生回流,沙粒在重力作用下开始沉降,在该区域内风速迅速降低,形成静风区,同时也是植物阻沙的主要区域;随着风沙流沿植物背风面的距离逐渐增大,风速也逐渐恢复,形成恢复区,该区域内植物还有一定的防护作用,部分沙粒也会在此处沉积,但效果相较于静风区已显著减弱。本文研究结果与刘金苗等^[36]在探究干枯骆驼刺对风沙流场影响的数值模拟中得出的结论一致。然而该作者在模拟骆驼刺周围风沙流场变化过程中发现植株后 5.3 m (17.6H) 范围内, 0.3 m (植株高度) 以下的防风效率高于 40%, 这与实际严重不符,受二维模拟的局限性,没有考虑植物两侧的绕流反应,导致静风区显著延长,本文采用三维数值模拟,系统考虑风沙流在植物周围的变化,更加贴合实际。

尽管在不同风速条件下,风沙流在植物周围形成的气流分区相同,但风速的变化致使流场扰动强度呈现显著差异(图 11)。在低风速条件下,气流运动速度较慢,经过植物时绕流效果显著,在植物后方气流分流效果也较为显著,可以明显看出在梭梭背风面形成 3 个涡流区。涡流强度影响植物防风效

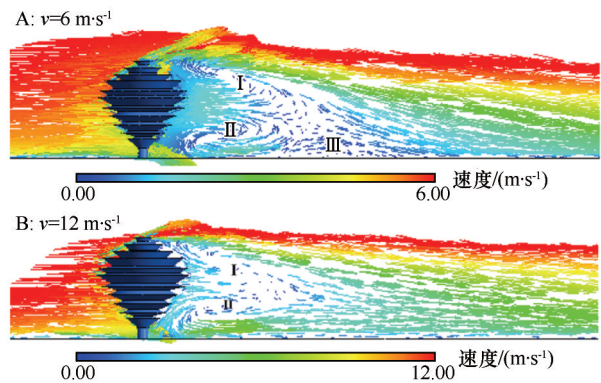


图 11 梭梭周围风速矢量云图

Fig.11 Vector cloud image of wind speed around *Haloxylon ammodendron*

果和沙粒沉降范围^[16]。因此,在低风速下植物背风面风速显著降低,静风区范围较大,沙粒拦阻效果较好。在高风速条件下,植物背风面仅有强度较弱的2个涡流区,静风区范围较小,阻沙效果较差,因此仅靠单株梭梭不能在高风速环境中达到最优的防风阻沙效果。研究表明通过优化植物配置可有效提高防风固沙能力^[37]。本文通过模拟双排、三排梭梭周围积沙情况,发现通过不同行间距以及不同排数的配置,确实可以增强植物阻沙能力,且综合分析后发现5 m行间距阻沙效果最优。贾丽娜^[38]对不同配置方式的3种人工灌木进行防风阻沙效果的连续观测,发现单行林带防护效果较差,两行及三行林带能够达到理想的防风效果,与本文模拟结果一致,但其观测位置只设置在迎风面1H、2H,背风面1H、3H、5H、7H以及侧面1H、2H,观测位置不连续,未布设观测点位处的防风阻沙情况无从得知,本文通过数值模拟可以得到植物周围的连续数据,探究植物不同位置处的防风阻沙效果,更能反映实际情况。

本研究对不同入口风速和不同数量的梭梭风沙流运动特征进行模拟,基本摸清了各种情况下梭梭植物对风沙运动特征的影响。从模拟结果上看,各项数据与野外观测结果基本一致,且拟合度较高,说明利用Fluent软件模拟梭梭周围风沙流场是可行的,但野外观测过程中仪器精度、现场风速风向随机变化等因素导致观测数据存在一定的误差,同时本文将梭梭冠层视为均匀的多孔介质,但实际的植物冠层枝叶通常为随机分布,冠层孔隙率分布也不均匀。因此,后期野外试验可采用精度更高的观测仪器进行实验,模拟试验也可将冠层的分区更加细化,使得三维植物模型更加贴合实际,进而实现模拟结果对植物防沙实践的指导更加合理、可行。

4 结论

本文对梭梭植株的结构形态进行简化,建立三维模型,运用数值模拟的方法对风沙流经过植物后的风速特征、压力分布特征和积沙特征展开研究,并通过野外试验进行验证。

不同风速条件下,梭梭周围流场均可形成遇阻减速区、加速区、静风区和恢复区,但各区的流场结构尺度和扰动强度存在显著差异:入口风速为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

时,梭梭背风面静风区范围可延伸至3H左右,气流动能恢复相对缓慢;而在 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,静风区范围缩减至1.2H以内,气流动能恢复更迅速。

梭梭的防风效果与其冠幅呈正相关关系,冠幅越宽,防风效果越好。在1.0 m高度层,迎风面和背风面的风速均明显减弱,且背风面静风区范围最大。

梭梭不同位置处的防风效果总体表现为背风面>迎风面>侧面。背风面风速降幅可达50%~90%,迎风面风速降幅为30%~60%,而侧面风速降幅仅为10%~30%。不同入口风速下,梭梭垂向最优防护高度均为1.0~1.2m。

不同风速条件下,梭梭的阻沙能力显著不同:当入口风速为 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,沙粒最终沉积在-0.75H~1H范围内;而当风速增至 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,沙粒沉积在0~1H范围内。增加排数和调配行间距可有效提高梭梭的阻沙能力,行间距为5 m时梭梭整体阻沙效果最优。

参考文献:

- [1] Bhutto S L, Miri A, Zhang Y, et al. Experimental study on the effect of four single shrubs on aeolian erosion in a wind tunnel [J]. *Catena*, 2022, 212: 106097.
- [2] Han Y, Zhao W W, Ding J Y, et al. Soil erodibility for water and wind erosion and its relationship to vegetation and soil properties in China's drylands [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166639.
- [3] Zhou A, Zhao W, Han Y, et al. Effects and benefits of wind erosion prevention in China's dryland and surrounding countries [J]. *Catena*, 2025, 251: 108812.
- [4] 李映坤, 李锦荣, 董雷, 等. 乌兰布和沙漠周边典型植物群落防风阻沙效果 [J]. *中国沙漠*, 2022, 42(6): 65-73.
- [5] 周炎广, 武子丰, 胡日娜, 等. 毛乌素沙地新垦地土壤风蚀特征 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 138-147.
- [6] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 植被对风沙土风蚀作用的影响 [J]. *环境科学学报*, 1996(4): 437-443.
- [7] 陈海志. 黑河中游荒漠—绿洲过渡带斑块状灌丛植被生态环境效应 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [8] Fu G, Xu X, Qiu X, et al. Wind tunnel study of the effect of planting *Haloxylon ammodendron* on aeolian sediment transport [J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 208: 234-245.
- [9] 黄雅茹, 马迎宾, 郝需婷, 等. 不同留茬高度对固沙植物梭梭光合特性和水分利用效率的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2025, 53(1): 105-111.
- [10] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 29-36.
- [11] 张奕, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙

- 效益[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):87-96.
- [12] 智丹,王京学,肖辉杰,等.乌兰布和荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆防风效应风洞模拟[J].农业工程学报,2024,40(3):147-155.
- [13] 王萍,王燕.民勤荒漠-绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2012,28(11):138-145.
- [14] 李秀明,贾文茹,王翠.垄状微地形对近地表空气动力学特征的影响[J].干旱区资源与环境,2024,38(4):105-113.
- [15] 贾光普,左合君,王海兵,等.高立式尼龙网沙障周围风沙运动特性的数值模拟与试验[J].农业工程学报,2020,36(18):109-117.
- [16] 闫晴,李菊艳,尹忠东,等.典型株型沙生灌丛对风沙流场影响的数值模拟[J].干旱区研究,2023,40(5):785-797.
- [17] 金子皓,王京学,任一凡,等.不同林带结构的刺槐林防风效应[J].北京林业大学学报,2022,44(8):39-47.
- [18] 胡广录,陈海志,麻进,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带典型灌丛植物防风固沙效应[J].中国沙漠,2023,43(5):31-40.
- [19] 廖承贤.戈壁砾石床面风沙运动过程的模拟研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [20] 俞明聪.风沙流对准朔铁路垭响应规律及防风沙措施效果数值研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [21] Liu C, Zheng Z, Cheng H, et al. Airflow around single and multiple plants [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252:27-38.
- [22] Lima I A, Parteli E J R, Shao Y, et al. CFD simulation of the wind field over a terrain with sand fences: Critical spacing for the wind shear velocity [J]. *Aeolian Research*, 2020, 43:100574.
- [23] 胡广录,樊立娟,王德金,等.荒漠-绿洲过渡带斑块植被表层土壤颗粒的空间异质性[J].兰州交通大学学报,2013,32(6):159-164.
- [24] 王康龙,武建军,罗生虎.风沙运动的欧拉双流体模型参数研究[J].中国沙漠,2014,34(6):1461-1468.
- [25] Jiang H, Huang N, Zhu Y J. Analysis of wind-blown sand movement over transverse dunes [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:1-14.
- [26] Du W, Bao X, Xu J, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61 (14) : 4558-4570.
- [27] 刘政和.荒漠绿洲过渡带典型防风固沙植被生长特征及其防风固沙效能研究[D].兰州:兰州大学,2024.
- [28] 晏致涛,李杰,张璞,等.基于FLUENT的直流漏沙式风沙风洞研究[J].西南交通大学学报,2020,55(5):994-1000.
- [29] 张伟,杨淑敏.风速及碰撞系数对风沙流输沙率沿流向变化规律的影响[J].科学技术与工程,2016,16(30):142-147.
- [30] 胡广录,王德金,廖亚鑫,等.荒漠-绿洲过渡带斑块植被区起沙风对风蚀积沙量的影响[J].中国沙漠,2016,36(4):902-910.
- [31] Abbasi H, Gohardoust A, Mohammadpour F, et al. Erosive wind characteristics and aeolian sediment transport and dune formation in Makran Region of Baluchistan, Iran [J]. *Atmosphere*, 2025, 16(6):650-650.
- [32] Yan Y, Xu X, Xin X, et al. Effect of vegetation coverage on aeolian dust accumulation in a semiarid steppe of northern China [J]. *Catena*, 2011, 87(3):351-356.
- [33] 郑旭,张倪斌,孙桂丽,等.吐鲁番市高昌区不同固沙植物的防风固沙效益[J].东北林业大学学报,2024,52(7):44-50.
- [34] Raupach M, Woods N, Dorr G, et al. The entrapment of particles by windbreaks [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(20):3373-3383.
- [35] Cheng H, He W, Liu C, et al. Transition model for airflow fields from single plants to multiple plants [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 266-267:29-42.
- [36] 刘金苗,李菊艳,尹忠东,等.干枯骆驼刺对风沙流场影响的数值模拟研究[J].干旱区研究,2022,39(5):1514-1525.
- [37] Taylor A P, Shao Y P. Physics and modelling of wind erosion [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 101(1):127-128.
- [38] 贾丽娜.几种不同灌木矮林防风阻沙效能对比研究[D].北京:北京林业大学,2010.

Numerical simulation of the effect of sand-fixing plant *Haloxylon ammodendron* on the wind-sand flow field

Hu Guanglu^{ab}, He Nana^a, Zhang Yeye^a, Chen Kun^a, Jin Taoyang^a, Wang Jiaqi^a, Tian Kaifu^a

(a.School of Environmental and Municipal Engineering / b.MOE Engineering Research Center for Comprehensive Utilization of Water Resources in Cold and Arid Regions, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Plant sand fixation is one of the important measures to prevent and control sandstorms in arid and semi-arid areas. As a typical drought-resistant, saline-alkalinity-resistant and wind-erosion-resistant desert plant in arid zones, *Haloxylon modendron*, with its remarkable effect of wind and sand fixation, has been widely planted in the middle reaches of the Heihe River in the transition zone of deserts-oasis. In this paper, we numerically simulate the wind and sand flow field near *H. modendron* by Fluent computing platform, analyze the wind speed characteristics and sand accumulation characteristics around *H. modendron*, and use the field test data for verification. The results show that: (1) Under the conditions of different wind speeds, the wind-sand flow field around *H. modendron* can form four partitions, but there are significant differences in the structural scale and disturbance intensity of the flow field in each area. When the inlet wind speed was $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, there were three vortex zones on the leeward side of *H. modendron*, and the range of the static wind zone could be extended to $3H$ (H is the height of the plant), and the kinetic energy of the airflow recovered slowly; while at $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, there were only two weak vortex zones on the leeward side, and the range of the static wind zone was narrowed down to $1.2H$, and the kinetic energy recovered more quickly. (2) The windproof effect of *H. modendron* is positively correlated with its crown width, the wider the crown width, the better the windproof effect. The overall performance of windproof efficiency at different locations of *H. modendron* is that the leeward face > windward face > side wind face, and the reduction of wind speed on the leeward face can reach 50%-90%; the reduction of wind speed on the windward face is 30%-60%; and the reduction of wind speed on the side is only 10%-30%. (3) The sand-blocking ability of *H. modendron* was significantly different under different wind speed conditions. When the inlet wind speed was $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the sand particles were deposited at $-0.75H-1H$; while when the wind speed increased to $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the sand particles were deposited at $0-1H$. (4) Increasing the number of rows and optimizing the row spacing can improve the sand blocking ability of *H. modendron*, of which the overall sand blocking effect is optimal when the pike rows are spaced 5m apart.

Key words: *Haloxylon ammodendron*; windbreak and sand fixation; numerical simulation; sandstorm field; volume fraction