

雅布赖山风沙口白刺灌丛沙堆形态与防风效能

李晓阳^{1,2}, 蒙仲举^{1,2}, 李浩年^{1,2}, 孟芮冰¹, 邬瑞鑫¹, 安花¹, 杨毅¹, 邵杰¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 研究白刺灌丛沙堆形态与防风效能的耦合关系, 揭示白刺灌丛不同演化阶段对形态和气流场的影响, 明确灌丛结构对防风阻沙效能的影响机制, 为荒漠绿洲过渡带生态恢复提供理论依据和数据参考。[方法] 以雅布赖山风沙口荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆为对象, 利用野外实测测定灌丛形态, 数值模拟分析在 3 个演化阶段(发育阶段、稳定阶段、衰退阶段)和 3 种植被盖度(20%、50% 及 80%)条件下垂直和水平面的风速分布。[结果] ①白刺灌丛沙堆形态以蝌蚪状椭圆形为主, 各形态参数均呈现正相关, 随着灌丛沙堆的演化和植被盖度的提高, 相关系数也随之增大, 发育阶段的各形态参数均最小; ②不同演化阶段的白刺灌丛沙堆在水平距离 $x=1\sim 5L$ (L 为灌丛长轴), 高度 $z=0\sim 0.8H$ (H 为灌丛高度)范围内显著降低, 防风效能较大(40%~95%), 形成背风坡减速区; 在各演化阶段中, 稳定阶段的防风效果最好, 达到 50%~95%。③在 3 种植被盖度条件下, 白刺灌丛沙堆植被盖度为 80% 时防风效能最高, 可达 95%。[结论] 雅布赖山风沙口是风蚀治理的重点区域, 可通过优化灌丛形态结构和提高植被盖度等方式削弱其风蚀作用。

关键词: 白刺; 灌丛沙堆; 形态特征; 防风效能; 雅布赖山风沙口

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0098-10

中图分类号: S719

文献参数: 李晓阳, 蒙仲举, 李浩年, 等. 雅布赖山风沙口白刺灌丛沙堆形态与防风效能[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 98-107. Li Xiaoyang, Meng Zhongju, Li Haonian, et al. Morphological characteristics and windbreak efficiency of *Nitraria tangutorum* nebkhas in Yabulai Mountain aeolian pass [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 98-107.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.023

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.023

Morphological characteristics and windbreak efficiency of *Nitraria tangutorum* nebkhas in Yabulai Mountain aeolian pass

Li Xiaoyang^{1,2}, Meng Zhongju^{1,2}, Li Haonian^{1,2}, Meng Ruibing¹, Wu Ruixin¹, An Hua¹, Yang Yi¹, Shao Jie¹

(1. College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The coupling relationship between the morphological characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkhas and their windbreak efficiency was investigated in order to reveal the effects of different evolutionary stages on nebkhas morphology and airflow fields, and to clarify the mechanisms by which shrub structure affects windbreak and sand-stabilization efficiency, furthermore to provide a theoretical basis and data support for the ecological restoration of the desert-oasis ecotone. [Methods] This study focused on *N. tangutorum* nebkhas in the desert-oasis ecotone of the Yabulai Mountain aeolian pass. Field measurements were used to determine the morphology of the nebkhas, and numerical simulations were conducted to analyze wind speed distributions in the vertical and horizontal planes under three evolutionary stages (development, stabilization, and degradation) and three vegetation cover levels (20%, 50%, and 80%). [Results] ① The morphology of the *N. tangutorum* nebkhas was primarily tadpole-like elliptical. All morphological parameters showed positive correlations. The

收稿日期: 2025-07-10

修回日期: 2025-08-08

采用日期: 2025-08-11

资助项目: 内蒙古自治区“揭榜挂帅”科技计划项目“雅布赖山风沙口综合治理和沙漠边缘防风固沙林草带建设技术示范”(2024JBGS0009); 蒙科聚创新驱动平台奖励资金项目“雅布赖山风沙口上风向高大密集流动沙丘治理技术”(NDMKJ2503); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务“荒漠生态系统保护与修复创新团队”(BR22-13-03)

第一作者: 李晓阳(2002—), 男(汉族), 湖北省宜昌市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 19107125857@163.com。

通信作者: 蒙仲举(1980—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: mengzhongju@126.com。

correlation coefficients increased as the nebkhas evolved and vegetation cover increased. All morphological parameters were the smallest in the development stage. ② For nebkhas at different evolutionary stages, wind speed decreased significantly within the horizontal distance range of $x=1-5L$ (L represents the shrub canopy major axis) and the vertical height range of $z=0-0.8H$ (H represents the shrub height), forming a deceleration zone on the leeward slope with high windbreak efficiency (40%—95%). Among all evolutionary stages, the stabilization stage exhibited the optimal windbreak performance (with windbreak efficiency of 50%—95%). ③ Under the three vegetation cover conditions, the windbreak efficiency reached the highest level of up to 95% when vegetation cover reached 80%. [Conclusion] The Yabulai Mountain Aeolian Pass is a key area for wind erosion control. Wind erosion can be mitigated by optimizing the morphological structure of the nebkhas and increasing vegetation cover.

Keywords: *Nitraria tangutorum*; nebkhas; morphological characteristics; windbreak efficiency; Yabulai Mountain aeolian pass

灌丛沙堆是在植被与风沙颗粒的相互作用下演化出具有稳定形态的生物地貌复合体^[1],常见于干旱、半干旱以及半湿润地区^[2],灌丛沙堆能为农田绿洲筑起风沙屏障^[3],可有效促进土壤改良与生态增益^[4],协同推进防沙固沙和农业生产的发展^[5]。灌丛沙堆的植被冠层不断截留风中沙粒^[6],使沙堆高度、底面积与体积快速增长^[7],随着沙粒堆积速率逐步减缓,堆体轮廓由尖锥形逐渐过渡为圆润的半椭球体。魏亚娟等^[8]通过对不同类型的沙地灌丛沙堆的形态特征进行科学测定发现,固定沙地的灌丛沙堆固沙效能最高,灌丛生长越好,防风能力越强。已有研究表明,随着灌丛沙堆植被覆盖度和沙堆体积的增加,对气流的拦截作用明显增强。有研究将灌丛沙堆划分为发育阶段、稳定阶段、衰退阶段^[9],不同阶段灌丛沙堆规模和防风固沙效应存在显著差异。谭凤翥等^[10]通过对怪柳沙堆进行风洞模拟,根据风速流场、坡前减速区和坡后风速削弱区的面积、垂直高度风速来判断各工况下的灌丛防风效能。裴志永等^[11]对比不同平茬方法下的沙柳灌丛气流结构和防风效率得出,防风效能受冠层疏透度和灌丛高度的影响较大。此外,各演化阶段灌丛生长发育主要受氮、磷养分的制约^[12],养分含量影响灌丛盖度、高度和疏透度,其中灌丛盖度与防风效能显著相关^[13]。之前的研究多侧重不同演化阶段灌丛沙堆的形态结构^[14]、粒度特征、地表蚀积规律和养分积累特征^[15],揭示了干旱半干旱区灌丛沙堆的形态特征、发育演化阶段和分布格局等规律。但从风速流场结构角度分析不同演化阶段和植被盖度变化的防风效能研究仍然不足,有待进一步深入。

雅布赖山风沙口通道划分基于长期的野外实地观测结果。该通道位于腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠的交汇地带,区域内沙源类型多样、补给充足,常年盛行偏西-西北风,风力强劲且持续时间长,风沙输运作用显著,具备典型的强风蚀环境特征。由于

雅布赖山的阻隔与地形导向效应,该通道成为区域风沙输移的集中区域,形成明显的高输沙强度带,为开展风沙动力过程与防风固沙效能研究提供了天然试验场所和极具代表性的研究对象。

白刺灌丛作为该区域广泛分布的一种优势灌木,具有良好的阻沙固沙能力^[16]。基于此,本研究首次将野外实测与数值模拟相结合,定量分析雅布赖山风沙口白刺灌丛沙堆的形态特征,及其在不同演化阶段中不同植被盖度的防风效能,揭示灌丛沙堆风速流场和防风效能。可为雅布赖山风沙口等极端风沙区制定高效的固沙治沙策略提供参考,以期荒漠—绿洲过渡带的防风固沙提供科学依据和理论支持,维护绿洲边缘区域的生态安全。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅布赖山风沙口位于内蒙古自治区阿拉善右旗雅布赖镇曼德拉苏木,地理坐标 39.9°—40.6°N, 103.5°—105.0°E,东接甘肃省民勤县,西连巴丹吉林镇,北靠巴丹吉林沙漠,南邻腾格里沙漠,地处阿拉善高原与河西走廊过渡带,属典型的荒漠—半荒漠生态区。年均气温约 7℃,年降水量 50~150 mm,且主要集中在 7—9 月。该区水资源短缺,蒸发量是降水量的 20 倍以上。以灰棕漠土、风沙土为主,有机质含量低,盐渍化现象较普遍。主要植物有梭梭 (*Haloxyylon ammodendron*)、白刺 (*Nitraria tangutorum*)、沙蒿 (*Artemisia desertorum*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*) 等,覆盖度普遍低于 30%。白刺灌丛沙堆与梭梭灌丛沙堆存在交错分布,但数量上以白刺灌丛沙堆为主。

1.2 样地设置

2024 年 10 月和 2025 年 4 月,在研究区内布设一个总体样方,对样方内灌丛的形态进行全面调查,随

机选取9个小样方,对白刺灌丛沙堆的330个样本进行实地调查与形态参数统计分析,结合研究区内白刺灌丛高度、沙堆高度、体积数据,参考形态参数的聚类特征与分布阈值,分别界定各演化阶段的典型区间,实现分组划分,保证阶段划分的科学性和代表性。发育阶段的沙堆高度小于10 cm,灌丛高度小于15 cm,沙堆面积小于1 300 cm²,沙堆体积小于15 000 cm³;稳定阶段的沙堆高度为约10~23 cm,灌丛高度为15~25 cm,沙堆面积为1 300~3 400 cm²,沙堆体积为15 000~46 000 cm³;衰退阶段的沙堆高度大于23 cm,灌丛高度大于25 cm,内部有枯死现象,沙堆面积大于3 400 cm²,沙堆体积大于46 000 cm³。各阶段典型特征参数见表1。沿着主风向测量灌丛长轴(L)、灌丛短轴(W)、灌丛高度(H)、沙堆长轴(L_s)、沙堆短轴(W_s)、沙堆高度(H_s)并估测植被盖度(C);并通过公式计算沙堆水平尺度(L_c)、沙堆底面积(S_s)、沙堆体积(V_s)、植被覆盖面积(S_z)。利用变异系数计算白刺灌丛沙堆各形态参数的变异度。3个发育阶段的白刺灌丛沙堆在研究区内各自相对集中,观测样方布设时选择不受其他类型灌丛沙堆干扰的区域,以保证数据的代表性与可比性。

灌丛沙堆盖度采用目测结合标准参考图法进行调查测定,在每个样区内,以灌丛沙堆外围为界,划定调查小区,通过目测估算灌丛枝叶在调查区内的水平投影面积占总样区面积的比例,并结合1 m×1 m方格网辅助判读,与标准盖度图进行对照校准。每个样点均由2名调查员独立估算后取平均值,作为最终盖度测定结果。

1.3 风速测定

试验中,在 $x=-L, 0, L, 2L, 3L, 4L, 5L, 6L$, $y=-0.5W_s, 0, 0.5W_s$, $z=0.3H, 0.6H, 0.9H, 1.2H, 1.6H$ 位置处布置风速测点。选用Young 05103型三杯式风速传感器(量程0.1~30 m/s,精度±0.3 m/s),采用HOBO UX120~006 M数据记录仪和HOBO ware Mobile软件,利用9套风速传感器及数据记录仪,实现灌丛沙堆周边多点风速的同步测量。以1 Hz采样频率连续采集30 s的风速数据,记录仪自动计算该时间段内的平均风速。每个测点重复测量3次,取平均值作为最终风速。

1.4 指标计算

$$L_c = \frac{1}{2}(L_s + W_s) \quad (1)$$

式中: L_c 为沙堆水平尺度(cm); L_s 为沙堆长轴(cm); W_s 为沙堆短轴(cm)。

$$S_s = \frac{1}{2}(L_s \cdot W_s) \quad (2)$$

式中: S_s 为沙堆底面积。

$$V_s = \frac{1}{6}(W_s \cdot L_s \cdot H_s) \quad (3)$$

式中: V_s 为沙堆体积; H_s 为沙堆高度。

$$S_z = \frac{1}{2}(L \cdot W) \quad (4)$$

式中: S_z 为植被覆盖面积; W 为灌丛短轴。

$$F = \frac{V_0 - V_i}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: F 为白刺灌丛沙堆的防风效能(%); V_0, V_i 分别代表同一高度的裸地对照组和灌丛沙堆影响下的风速(m/s)。 F 值高于60%,表明防风效能较好, F 值小于60%,表明防风效能较差^[17]。

1.5 数据处理

利用Excel 2021, Origin 2025, Pearson相关分析进行数据处理与分析,利用SPSS 27软件对数据进行数理统计方差分析,应用Surfer进行气流场和防风效能图的绘制。

2 结果与分析

2.1 各演化阶段白刺灌丛沙堆形态变化与相关关系

2.1.1 灌丛沙堆形态变化

雅布赖山风沙口通道中部的白刺灌丛沙堆形态多为椭球体,沙堆与风向平行发育而非均匀发育,沙堆迎风坡受风蚀作用,坡前短而陡,背风坡受风积作用缓而长,沙堆形似蝌蚪。由表1可知,白刺灌丛沙堆各形态参数均随演化阶段推进而增大,均在衰退阶段达到最大。灌丛长轴为31.3~171.2 cm,在衰退阶段达157.2 cm;衰退阶段灌丛高度为18.7~45.4 cm(均值为36 cm),短轴为45.6~166.2 cm(均值为99 cm);白刺灌丛沙堆各形态参数均为:衰退阶段>稳定阶段>发育阶段,灌丛长轴、灌丛短轴和沙堆短轴在衰退阶段和稳定阶段显著高于发育阶段。

白刺灌丛高度为11.3~45.4 cm,各演化阶段变异系数分别为0.1,0.2,0.1,表明灌丛高度在各演化阶段波动较小,表现出较高的稳定性;衰退阶段的沙堆体积最大,为46 023.0~204 621.0 cm³,且沙堆底面积和植被覆盖面积均显著高于稳定阶段和发育阶段;3个演化阶段植被覆盖面积的变异系数最大,在0.5~0.6之间,说明沙堆底面积的波动较大,其次是沙堆体积,变异系数为0.3~0.6,而植被覆盖面积的变异系数为0.3~0.5。

2.1.2 灌丛沙堆形态特征参数之间的关系

白刺灌丛沙堆的各形态参数之间均呈现正相关

关系,不同演化阶段灌丛参数与沙堆参数间相关性存在差异,并且相关系数随着灌丛沙堆演化阶段和盖度的提高而增大。由图 1 可知,在各演化阶段中, L_s 和 W_s 与 L_c, S_s, V_s 的相关系数在 0.952~0.982 之间。 L_s 与 W_s 的相关性表现为:稳定阶段>衰退阶段>发

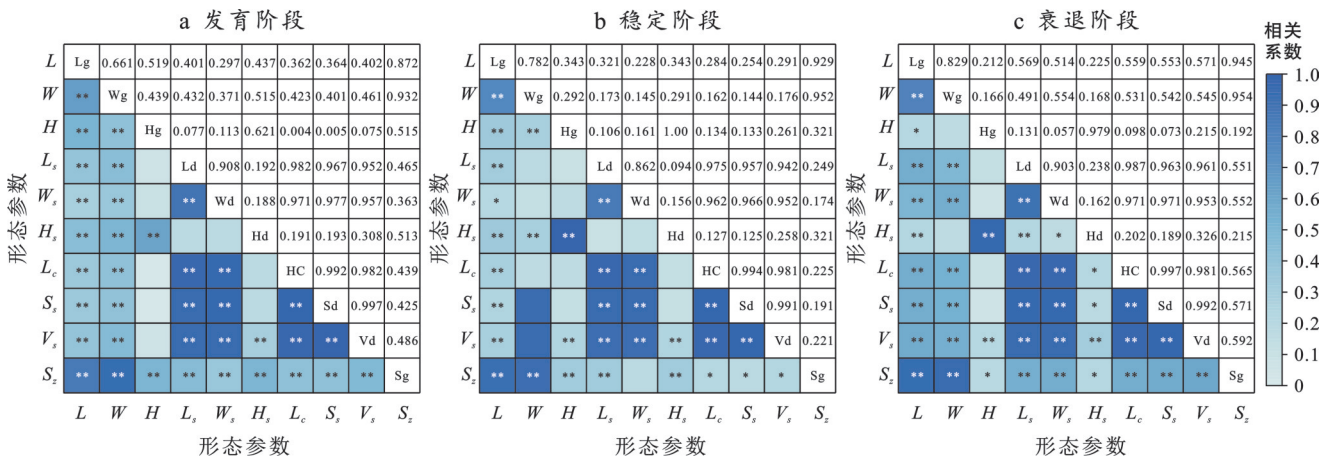
育阶段。 L_s 与 W_s 的相关系数在稳定阶段时为 0.862,表明沙堆长轴与短轴同步增长;可能由于衰退阶段,长轴继续增长而短轴趋于减少,导致两者相关性减弱。 S_s 与 V_s 的相关系数均为 0.99,表明沙堆底面积越大,堆积形成的沙堆体积也就越大。

表 1 白刺灌丛沙堆形态参数

Table 1 Morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas

形态参数	发育阶段				稳定阶段				衰退阶段			
	最大值	最小值	平均值±标准误	变异系数	最大值	最小值	平均值±标准误	变异系数	最大值	最小值	平均值±标准误	变异系数
L/cm	134.7	31.1	67.9±19.7	0.3	151.2	47.6	108.5±23.5	0.2	171.2	45.5	157.2±23.2	0.2
W/cm	122.3	22.4	62.1±16.5	0.3	142.8	35.4	78.6±19.3	0.1	166.2	45.6	99.0±19.9	0.2
H/cm	15.0	11.3	13.2±1.0	0.1	25.4	18.7	22.0±1.5	0.2	45.4	18.7	36.0±1.5	0.1
L_s/cm	92.9	30.1	52.4±16.3	0.3	132.9	35.0	75.7±15.3	0.2	135.8	40.2	119.2±15.4	0.1
W_s/cm	75.2	19.8	47.8±14.3	0.3	84.5	27.7	54.3±12.9	0.1	126.4	37.8	84.0±12.9	0.1
H_s/cm	10.0	7.4	8.2±2.1	0.2	22.6	10.2	16.0±1.9	0.2	45.5	23.5	25.8±1.9	0.1
L_c/cm	92.7	27.6	60.0±17.7	0.3	130.8	41.5	87.2±20.7	0.6	138.4	43.7	88.1±21.0	0.2
S_s/cm^2	1 242.2	374.8	914.4±1 074.3	0.6	3 344.7	1 341.0	2 957.9±1 811.0	0.5	9 491.8	3 449.2	4 047.9±1 888.0	0.5
V_s/cm^3	14 519.1	1 570.1	8 486.0±4 915.0	0.6	45 784.3	15 898.0	29 171±13 669.2	0.3	204 621.0	46 023.0	79 801.1±14 314.1	0.5
S_2/cm^2	3 385.0	320.8	1 473.1±754.6	0.5	4 860.2	988.4	2 934.6±817.7	0.4	16 009.8	1 056.1	3 946.6±844.1	0.2

注: L 为灌丛长轴; W 为灌丛短轴; H 为灌丛高度; L_s 为沙堆长轴; W_s 为沙堆短轴; H_s 为沙堆高度; L_c 为沙堆水平尺度; S_s 为沙堆底面积; V_s 为沙堆体积; S_2 为植被覆盖面积。下同。



注:*表示显著性水平为 $p \leq 0.05$; **表示显著性水平为 $p \leq 0.01$ 。下同。

图 1 白刺灌丛沙堆形态参数相关性

Fig.1 Correlation of morphological parameters of *N. tangutorum* nebkhas

沙堆形态与灌丛生长发育十分密切,基于图 2 所示的回归分析可知,灌丛与沙堆的长轴、短轴发育趋势基本一致,各阶段长短轴回归 R^2 均在 0.554 1~0.624 1 之间,并随时间推移略有提高,灌丛的面积与沙堆体积的 R^2 分别为 0.635 8, 0.712 3, 0.504 9, 在稳定阶段 R^2 最高。

2.2 白刺灌丛沙堆防风效能

2.2.1 灌丛沙堆对垂直风速的影响

图 3 表明,风速随高度(z)和下风向距离(x)的增

加总体呈上升趋势,植被盖度提高会降低各高度的风速,各灌丛沙堆表现出相似的风速变化规律。在稳定阶段, $z=0.9 H$ 时, $x=L(C=80\%)$ 与 $x=6 L(C=80\%)$ 的风速相差 4.1 m/s;当 $z=0.3 \sim 0.9 H$ 时,风速增加较为缓慢,在稳定阶段, $x=L(C=80\%)$ 时,风速仅增加了 0.2 m/s;当 $z=0.9 \sim 1.2 H$ 时,风速差异显著,在发育阶段, $x=L(C=80\%)$ 时,风速增加了 8.1 m/s;当 $z > 1.2 H$ 时,垂直高度的风速逐渐趋于稳定,风速为 7~9 m/s,风速与盖度呈现出负相关关系。

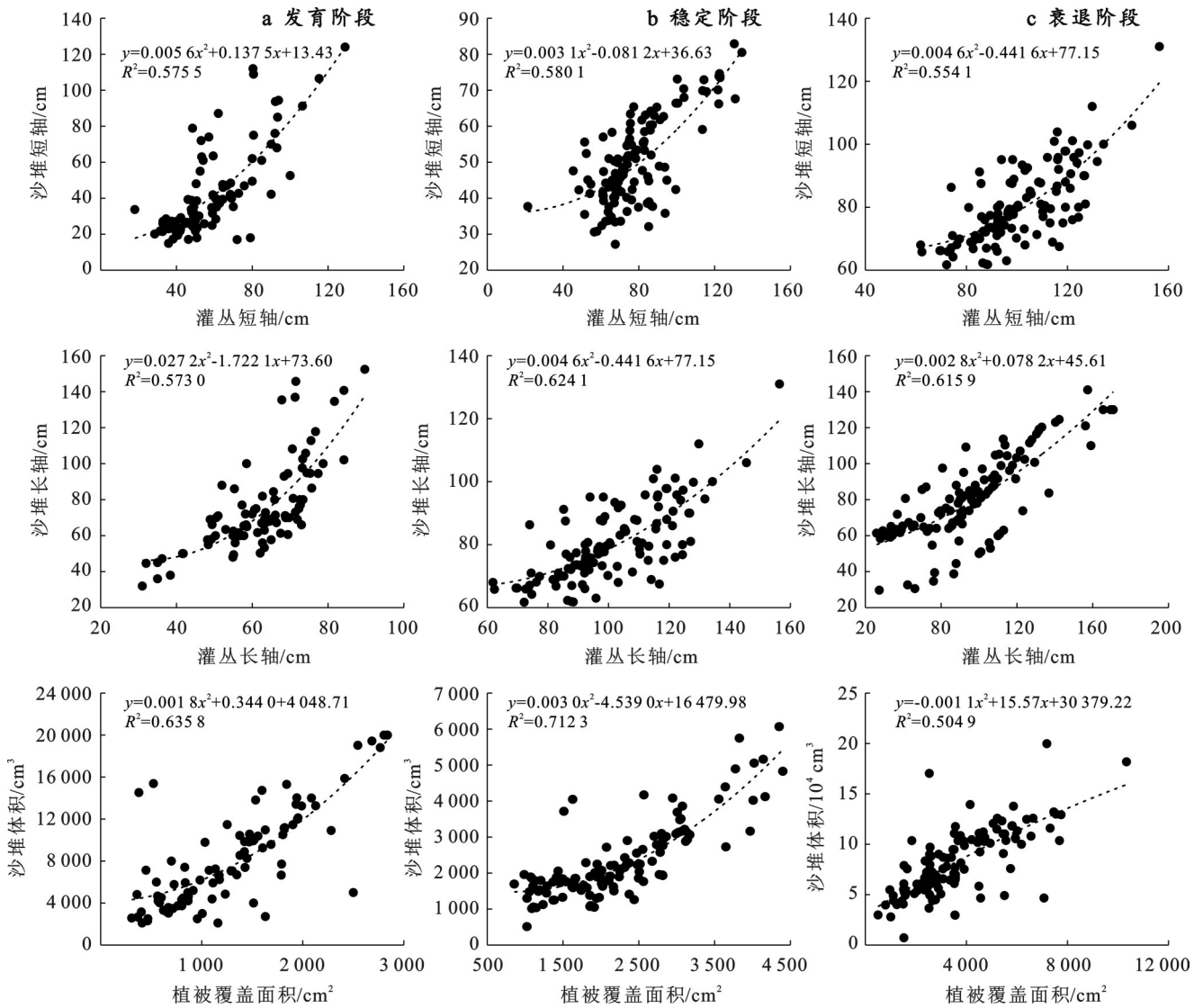


图 2 白刺灌丛沙堆形态参数回归关系

Fig.2 Regression relationships of morphological parameters of *N. tangutorum nebkhas*

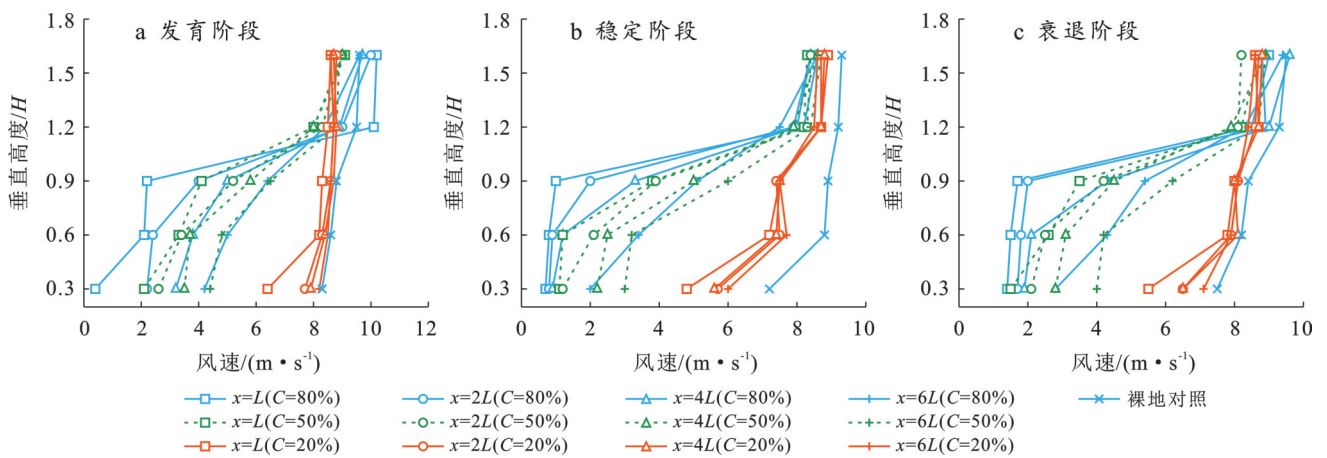


图 3 白刺灌丛沙堆 $y=0$ 剖面风速随高度变化

Fig.3 Variation of wind speed with height at $y=0$ profile of *N. tangutorum nebkhas*

风速大小依次为：灌丛沙堆($C=20\%$)>灌丛沙堆($C=50\%$)>灌丛沙堆($C=80\%$)；裸地对照组的风速随高度的增加而增加但变化差异较小，风速为 5.6~8.2 m/s；灌丛沙堆的各发育阶段与风速强弱表现为，

发育阶段>衰退阶段>稳定阶段。在发育阶段,最大风速出现在 $z=1.2H, x=L(C=80\%)$ 处,为 10.1 m/s ,最小风速出现在 $z=0.3H, x=L(C=80\%)$ 处,为 0.4 m/s ;在稳定阶段,最大风速出现在 $z=1.6H$,裸地对照处,为 8.6 m/s ,最小风速出现在 $z=0.3H, x=L(C=80\%)$ 处,为 0.8 m/s ;在衰退阶段,最大风速出现在 $z=1.6H, x=4L(C=80\%)$,为 8.7 m/s ,最小风速出现在 $z=0.3H, x=L(C=80\%)$ 处,为 1.6 m/s 。

图 4 反映了不同植被盖度和演化阶段白刺灌丛沙堆垂直剖面防风效能的变化。可以看出,当 $x=-L\sim 0, z=0\sim 1.5H$ 时,防风效能均较差,为 $-10\%\sim 10\%$; $x=-L\sim 0$ 处出现 -10% 的“负效能”,意味着风速略有增加,即迎风坡前出现了轻微

增速区。灌丛沙堆防风效能的最大值均出现在沙堆背风坡最近处的底部。

防风效能随 x 和 z 的增加而降低,在 $z<0.5H$ 时,各灌丛沙堆的防风效能均较高,为 $40\%\sim 95\%$,当 $z>1.3H$ 时,防风效能小于 20% ,在发育阶段 $C=50\%$, $z=0.1H$ 时, $x=L$ 处防风效能为 85% , $x=6L$ 处,防风效能仅为 5% 。灌丛沙堆在同一发育阶段下,防风效能随植被盖度的增加,防风区域和效果均增加,在稳定阶段 $c=80\%, x=L\sim 6L, z=0\sim 0.8H$ 处,为 $50\%\sim 95\%$,在发育阶段 $C=20\%, x=L\sim 2L, z=0\sim 0.5H$ 处,防风效能仅为 $40\%\sim 50\%$ 。在同一植被盖度情况下,防风效能表现为:稳定阶段>衰退阶段>发育阶段。

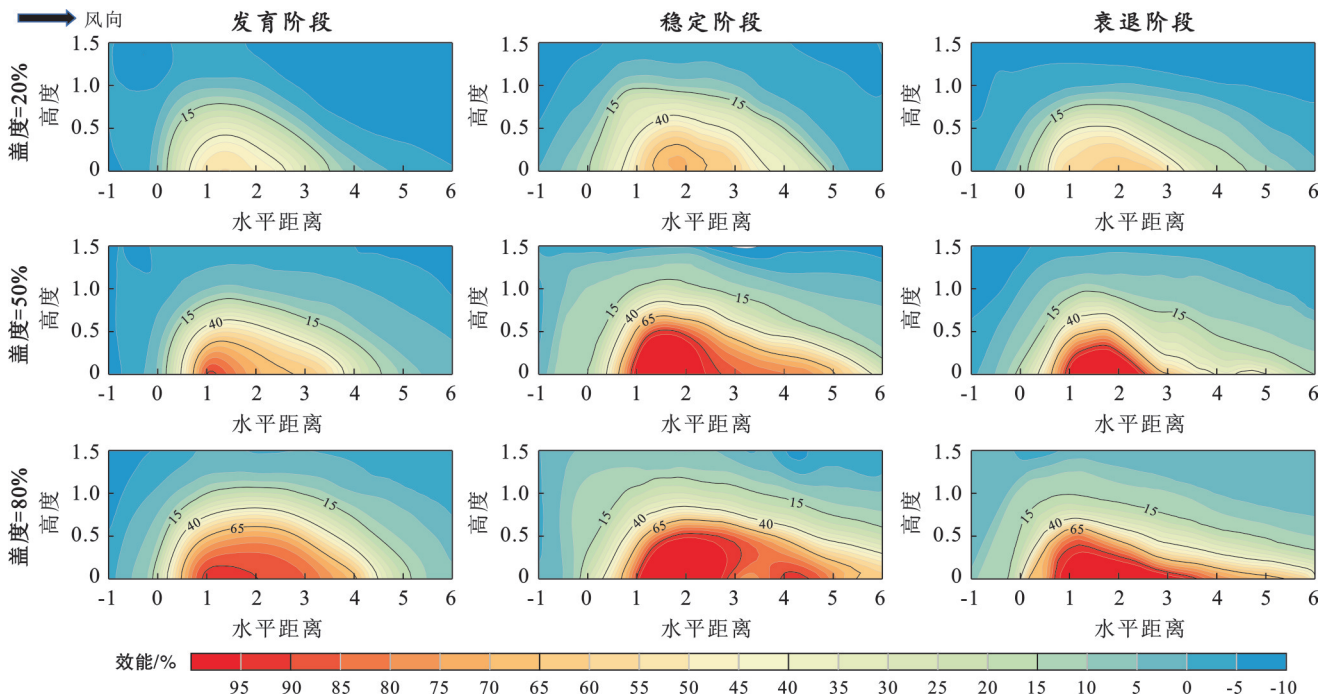


图 4 不同盖度白刺灌丛沙堆 $y=0$ 剖面防风效能

Fig.4 Windbreak efficiency at $y=0$ profile of *N. tangutorum* nebkhas with different coverages

2.2.2 灌丛沙堆对水平风速的影响

图 5 为不同植被盖度和演化阶段下白刺灌丛沙堆水平剖面风速随距离的变化。通过分析灌丛沙堆附近的风速可知,在灌丛沙堆迎风坡风速较高,灌丛沙堆背风坡的风速与高度呈显著正相关,与盖度(C)呈显著负相关,灌丛沙堆均表现出相同的风速变化。当 $x=-L\sim 0$ 时,各个高度的风速均 $>6.0\text{ m/s}$,在衰退阶段, $z=1.6H(C=50\%)$ 处的风速达 11.2 m/s ;灌丛沙堆正上方的风速均高于 $x=-1L$ 的风速,衰退阶段, $x=0, z=1.6H(C=80\%)$ 时,风速达到 12.0 m/s ;背风坡风速均小于迎风坡,当 $z<H$ 时,稳定阶段, $z=0.3H(C=80\%), x=L$ 处的风速仅为 0.4 m/s , $x=6L$ 处为 2.5 m/s ,随 x 增加风速逐渐增大。当 $z=1.2H\sim$

$1.6H$,背风坡风速随 x 增加有轻微下降趋势,在衰退阶段, $z=1.6H(C=50\%)$ 时, $x=6L$ 较 $x=0$ 下降了 2.4 m/s ;同一工况下,高度 z 与风速呈显著正相关, $z=0.3H\sim 0.6H$ 的风速显著低于 $z=1.2H\sim 1.6H$,在稳定阶段 $C=80\%$ 时, $z=0.3H$ 比 $z=1.6H$ 的风速小 11.0 m/s 。灌丛沙堆植被盖度与迎风坡风速表现为:稳定阶段>衰退阶段>发育阶段,背风坡风速表现为发育阶段>衰退阶段>稳定阶段。

图 6 为不同植被盖度和演化阶段的白刺灌丛沙堆 $z=0.4H$ 时水平截面风速变化情况,可以看出,沙堆两侧气流加速明显,增速随植被盖度和演化阶段提高而增大;背风区形成低速区,稳定阶段高盖度情况下该低速区范围更广(防护距离 $>6L$)。灌丛沙堆

的迎风坡前的风速显著高于背风坡,该区域(-1, -0.5L, -0.5~0.5D)风速较背风坡提高了70.0%;且灌丛附近的迎风坡(x=-0.5L~0)对风速有减缓作用,该处风速小于上风向风速(x<-0.5L),当气流通过灌丛沙堆两侧时,风速明显提升,甚至高于x=-L处的风速,两侧气流加速的大小和范围与植被盖度和演化阶段成正比。在发育阶段C=20%,沙堆

两侧风速为10.0 m/s;在稳定阶段C=80%的风速为12.5 m/s。

气流通过灌丛沙堆以后,风速再次减小,灌丛沙堆的防风效能与植被盖度显著相关,处于稳定阶段高植被覆盖度的风速最小,该区域(0~6L, -0.2~0.2D)的风速小于2.0 m/s,防护距离超过x=6L,防风效果最显著。

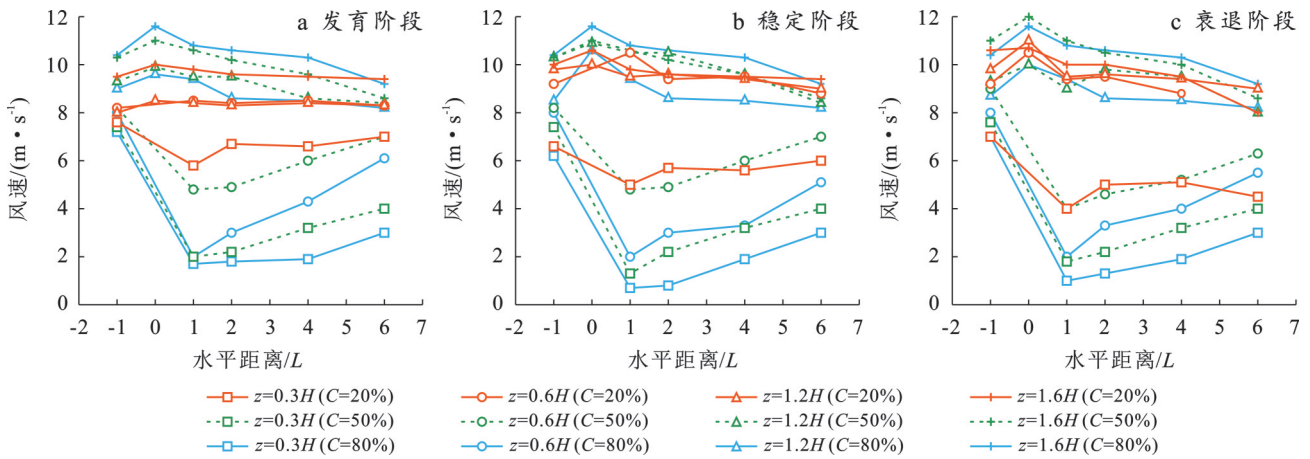


图5 白刺灌丛沙堆y=0剖面风速随水平距离的变化

Fig.5 Variation of wind speed with horizontal distance at y=0 profile of *N. tangutorum nebkhas*

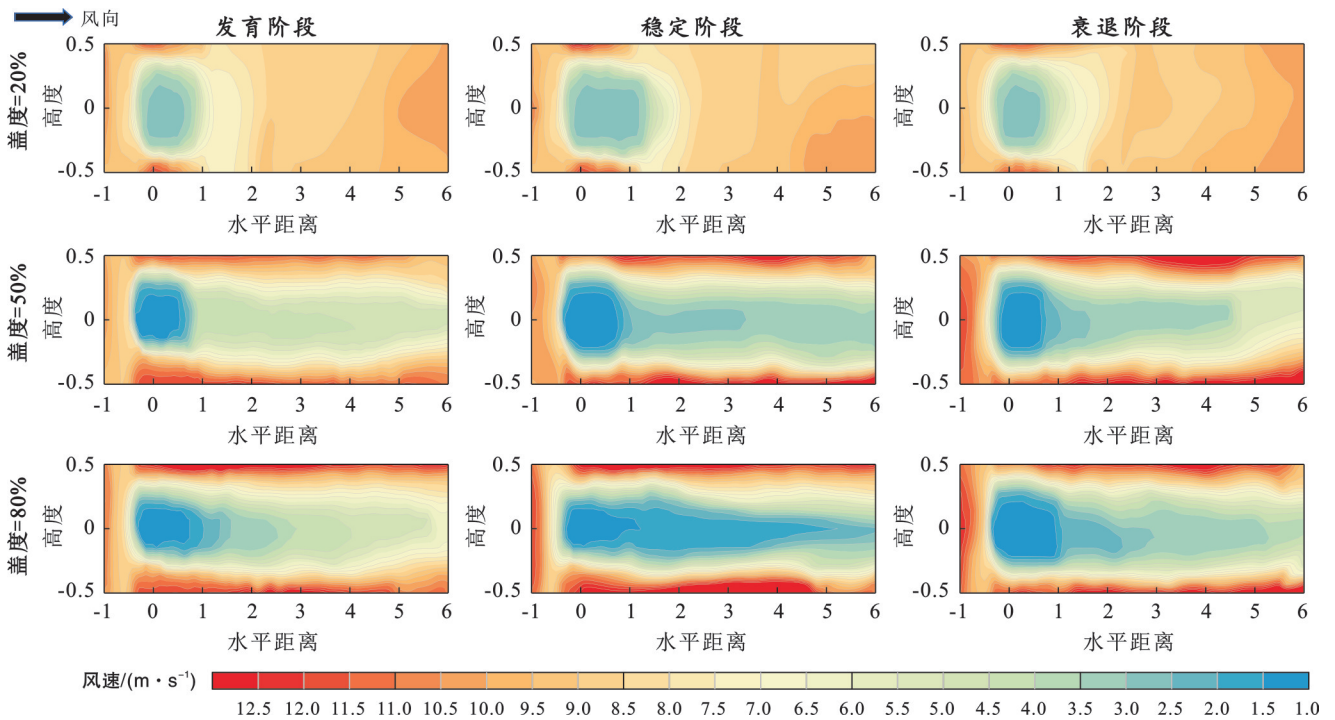


图6 不同盖度白刺灌丛沙堆z=0.4H剖面风速

Fig.6 Wind speed profile at z=0.4H of *N. tangutorum nebkhas* with different coverages

3 讨论

3.1 白刺灌丛沙堆形态特征

灌丛沙堆的形态参数为风沙灾害防治提供了量化基准,是制定植被恢复策略和区域生态恢复效果

评估的重要依据^[17]。灌丛沙堆的形态与植被类型、演化阶段、风况和沙源供给的强度密切相关。灌丛的发育情况被认为是沙堆形态演化的关键因素之一,不同演化阶段灌丛沙堆的形态特征具有显著差异。

本研究发现,发育阶段白刺灌丛沙堆高度仅为8.2 cm,显著低于稳定阶段和衰退阶段。李悦^[18]也在研究中得到了相似的结论,由于发育阶段灌丛枝条密度较低,易使气流通过枝干间隙,加速下方区域的风速,使沙粒难以有效沉降和聚集,直接削弱灌丛沙堆的截留沉积功能。分析表明,白刺灌丛高度(H)与沙堆高度(H_s)之间在不同演化阶段表现出显著正相关(相关系数分别为0.62, 1.00, 0.97),且整体上表现出垂直增长速率高于水平方向。表明植被的垂直扩展效应在沙堆生长过程中占据主导地位,植被冠层对风沙流的截留效能更集中于垂直方向的增长,水平扩展次之^[19]。在稳定阶段,灌丛生长迅速,灌丛枝干分枝密集,植被盖度和高度增加,扩展了植被对风沙流的拦截范围,能够有效拦截近地面沙粒和枯落物,形成封闭沙堆,提高沙堆的养分积累,促进地表结皮的发育,利于削弱风蚀,灌丛沙堆高度、底面积、体积显著增加,促使沙堆不断成熟;本研究显示,白刺灌丛沙堆在衰退阶段的形态最大,植被覆盖面积为1 056~16 009.8 cm²,沙堆体积为6 233~204 621 cm³。这与以往关于灌丛沙堆在稳定阶段的沙堆形态最大的研究结果不一致。例如,有研究表明,在稳定阶段后期灌丛沙堆产生退化,各形态参数也随之减小^[20]。这可能归因于衰退阶段由于沙丘高度的增加,并随着结皮现象的加剧,水分难以入渗,白刺灌丛难以获取足够的水分,沙堆中部的白刺死亡,并且受沙丘顶部气流涡旋的影响,灌丛沙堆的侵蚀自顶部往四周展开。沙堆高度随时间的推移而逐渐降低,待灌丛全部死亡,枯死的根系和植株与沙堆分离之后,灌丛沙堆会逐渐消亡。对比分析衰退阶段形态特征未减小的原因,由于灌丛沙堆衰退到活化消亡是一个漫长且复杂的过程,受时间、植被退化、水文条件等诸多因素影响,由于该地的白刺灌丛沙堆处于稳定阶段向衰退阶段的过渡,各形态参数很难在短时间内显著减少。有研究表明,白刺灌丛在稳定生长阶段的最适降水阈值约为120 mm^[21],而雅布赖地区2022—2024年的降水量均低于该值(分别为68, 84, 77 mm),但该地区白刺依旧保持良好生长状态。这可能归因于雅布赖地区良好的地下水保护措施,尤其是巴丹吉林自然保护区的地下水位长期保持在较高的水平(约2.2 m)。较高的地下水位不仅为灌丛根系持续提供稳定的水分供应,通过地下水保持根际土壤的水气动态平衡,改善土壤团粒结构和微生物代谢活性。这种良好的根际生态水文环境显著提高了植被对营养物质的有效吸收,在干旱气候条件下

是植物稳定生长的关键因素。

3.2 白刺灌丛沙堆防风效能

灌丛沙堆作为典型的生物地貌复合体,其防风效能的空间差异反映了植被与沙丘共同演化过程中,灌丛结构与风沙动力过程的高度耦合^[22]。灌丛沙堆的演化阶段、植被冠层结构和植被盖度对风速流场影响较大,形成既不同于裸沙堆的气流场,也不同于单一灌木的气流场,这是由于灌丛沙堆改变了局部地表的粗糙度和气流通过路径,从而改变了风速大小。

沙堆防风效能在垂直方向上表现出显著梯度,下部冠层分枝密集且孔隙度较低,能够有效削减风沙流,使气流在灌丛沙堆下部显著减速^[23]。随着高度增加,冠层结构逐渐变得稀疏,分枝角度增大,孔隙度升高,高层气流因所受阻力减小而快速通过冠层,导致风速在高于冠层的区域迅速恢复至旷野风速。本试验中,在灌丛沙堆顶部形成上方加速区,在发育阶段($z=1.2 H$, $C=80\%$)处风速为10 m/s,高于同一工况下裸地(对照组)的风速(8.9 m/s),气流通过沙堆上方时产生紊流使风速增加,印证了该观点。在水平尺度上,灌丛沙堆迎风坡下部风速受正面气压影响产生反射涡旋,风速降低,这与孙涛等^[24]对荒漠—绿洲过渡带白刺灌丛坡前风速的研究结论一致。灌丛沙堆的防风效能随离沙堆中心距离增大而逐渐降低,在背风坡近距离表现为高防风效能,詹科杰^[25]认为由于灌丛沙堆背风坡的缓坡形态与局部风蚀积累,使背风坡在动力学上形成了低动能区,当水平距离进一步增加,植被冠层阻挡效果弱化,风速恢复到初始状态,防风效能快速衰减。本研究中,白刺灌丛沙堆多呈典型的蝌蚪状椭圆形态,结合现场观测和风沙动力学相关研究成果推断,主要受主导风向驱动,风沙流在迎风侧和两翼形成稳定沉积区,使沙堆前端结构相对宽厚;而在沙堆背风侧区域,由于冠层结构对风沙流的非均匀阻挡效应,风速显著降低并产生涡旋,促使沙粒在下风向延伸堆积,逐渐形成“蝌蚪尾”样结构^[26]。因此,白刺灌丛沙堆的非对称形态及其与冠层空间结构的耦合作用,进一步提高了局地尺度防风固沙效能。

本研究样本数量和观测区域范围有限,数据主要来源于2025年春季研究区内的有限样方,尚不能完全反映更大尺度白刺灌丛沙堆形态与防风效能的空间与时序变化。后续研究将进一步扩大样本量,增加不同季节和不同区域的数据采集,以提升研究结论的代表性和适用性。

4 结论

(1) 白刺灌丛沙堆形态以蝌蚪状椭圆形为主,形态参数之间均呈正相关,随着灌丛沙堆的演化和植被盖度的提高,相关系数也随之增大,表现为:衰退阶段>稳定阶段>发育阶段。发育阶段和稳定阶段,植被盖度对沙堆的体积影响最大;灌丛高度与长轴、短轴的相关性较小。

(2) 气流经过灌丛沙堆时,风速在灌丛两侧、迎风坡前处和上方增大,在下风向水平距离 $x=L\sim 5L$,高度 $z=0\sim 0.8H$ 范围内呈现显著降低,防风效能较大,形成背风坡减速区;在 $z>1.6H$ 时,风速恢复至旷野风速。各演化阶段和植被盖度均表现出相同的风速变化规律。

(3) 演化阶段和植被盖度会影响灌丛附近的气流场和防风效能。稳定阶段的防风效果较好(防风效能为50%~95%),而处于发育阶段的防风能力相对较弱(防风效能为40%~50%)。植被盖度与防风效能呈显著正相关,在稳定阶段,当植被盖度为80%时,防风效能最大可达95%。该地可通过优化灌丛形态结构和提高灌丛植被覆盖度等方式削弱其风蚀作用,减缓荒漠化进程。

参考文献(References)

- [1] 刘任涛,方进,赵文智.面向“三北”的新时代生态学学科发展的若干思考[J].中国沙漠,2024,44(5):155-162.
Liu Rentao, Fang Jin, Zhao Wenzhi. Some considerations on ecology subject system at new times facing “Three-North” ecological project construction [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(5):155-162.
- [2] 蔡依靠,王锋,潘绪斌,等.中国荒漠化潜在发生区域150年变迁:过去、现在和未来[J].科学通报,2024,69(31):4637-4650.
Cai Yifei, Wang Feng, Pan Xubin, et al. 150-year shift of potential geographical distribution of desertification in China: Past, present and future [J]. Chinese Science Bulletin, 2024,69(31):4637-4650.
- [3] 李长龙,王燕,高志海,等.2000—2020年中国荒漠化潜在发生范围区林草植被时空变化特征[J].地理学报,2022,77(11):2803-2816.
Li Changlong, Wang Yan, Gao Zhihai, et al. Spatial and temporal characteristics of forest and grass cover in the potential range of desertification in China from 2000 to 2020 [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(11):2803-2816.
- [4] 董正虎,马瑞,王安林,等.甘肃省民勤县荒漠绿洲过渡带典型灌丛植物的滞尘量效应[J].水土保持通报,2024,44(3):36-45.
Dong Zhenghu, Ma Rui, Wang Anlin, et al. Dust retention effects of typical shrub plants in desert oasis transition zone in Minqin County of Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):36-45.
- [5] 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.
Hu Guanglu, Chen Haizhi, Ma Jin, et al. Windbreak and sand-fixation effects of typical shrub plants in the desert-oasis transitional zone in the middle reaches of the Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(5):31-40.
- [6] Miri A, Dragovich D, Dong Zhibao. Wind flow and sediment flux profiles for vegetated surfaces in a wind tunnel and field-scale windbreak [J]. Catena, 2021,196:104836.
- [7] 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.
Yan Qing, Li Juyan, Yin Zhongdong, et al. Numerical simulation of the influence of typical shrub types on wind-sand flow field [J]. Arid Zone Research, 2023,40(5):785-797.
- [8] 魏亚娟,郭靖,党晓宏,等.吉兰泰荒漠绿洲过渡带不同生境下白刺灌丛沙堆形态特征与影响机制[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(5):172-180.
Wei Yajuan, Guo Jing, Dang Xiaohong, et al. Morphological characteristics and influencing mechanisms of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different sandy land types in desert oasis ecotone of Jilantai [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023,47(5):172-180.
- [9] 闫宇,郭强,党晓宏,等.西鄂尔多斯地区四合木与红砂灌丛的阻沙能力对比研究[J].水土保持通报,2024,44(2):137-145.
Yan Yu, Guo Qiang, Dang Xiaohong, et al. Comparative study on sand-blocking ability of *Tetraena mongolica* and *Reaumuria soongorica* shrubs in west Ordos area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):137-145.
- [10] 谭凤翥,王雪芹,王海峰,等.柽柳灌丛沙堆三维流场随背景植被变化的风洞实验[J].中国沙漠,2018,38(1):48-57.
Tan Fengzhu, Wang Xueqin, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns around *Tamarix ramosissima* nebkhas under the change of background vegetation coverage [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(1):48-57.
- [11] 裴志永,段广东,郝少荣,等.基于防风效益的毛乌素沙地沙柳灌丛平茬方法优选[J].农业工程学报,2019,35(4):153-161.

- Pei Zhiyong, Duan Guangdong, Hao Shaorong, et al. Optimization of stumping method based on wind control benefit for *Salix psammophila* shrub in Mu Us sandy land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4):153-161.
- [12] 张琪,党晓宏,崔向新,等. 吉兰泰盐湖周边柽柳灌丛聚沙聚肥效应的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(4):155-161.
- Zhang Qi, Dang Xiaohong, Cui Xiangxin, et al. Sand and fertilizer accumulation effect of *Tamarix chinensis* shrub around Jilantai Salt Lake [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(4):155-161.
- [13] 张宏雪,张克存,安志山,等. 敦煌—格尔木铁路沿线荒漠灌丛风动力环境与沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5):49-58.
- Zhang Hongxue, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Wind dynamic environment and sediment grain size characteristics of shrub desert along Dunhuang—Golmud Railway [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5):49-58.
- [14] 张勇,毛东雷,曹永香,等. 策勒绿洲-沙漠过渡带不同类型沉积物粒度及可蚀性分析[J]. 泥沙研究, 2023, 48(3):58-65.
- Zhang Yong, Mao Donglei, Cao Yongxiang, et al. Analysis of grain size and erodibility of different types of sediments in Cele oasis-desert transition zone [J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(3):58-65.
- [15] White B R. Laboratory simulation of aeolian sand transport and physical modeling of flow around dunes [J]. Annals of Arid Zone, 1996, 35:187-214.
- [16] 肖雨婷,张国明,洪畅,等. 巴丹吉林沙漠西缘不同地表沙尘水平通量[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2):104-113.
- Xiao Yuting, Zhang Guoming, Hong Chang, et al. Sand-dust horizontal flux of different surfaces in the western margin of Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2):104-113.
- [17] Latif Bhutto S, Miri A, Zhang Yi, et al. Experimental study on the effect of four single shrubs on aeolian erosion in a wind tunnel [J]. Catena, 2022, 212:106097.
- [18] 李悦. 共和盆地藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*)灌丛沙堆形态和沉积物粒度特征[J/OL]. 中国沙漠, 2026:1-13. (2025-06-18) [2025-07-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGSS20250617001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Li Yue. Morphology and sediment grain size of *Caragana tibetica* nebkhas in the Gonghe Basin [J/OL]. Journal of Desert Research, 2026:1-13. (2025-06-18) [2025-07-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGSS20250617001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [19] Wang Xunming, Zhang Caixia, Zhang Jiawu, et al. Nebkha formation: Implications for reconstructing environmental changes over the past several centuries in the Ala Shan Plateau, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 297(3/4):697-706.
- [20] Burylo M, Rey F, Bochet E, et al. Plant functional traits and species ability for sediment retention during concentrated flow erosion [J]. Plant and Soil, 2012, 353(1):135-144.
- [21] Zhuo Chunxiang, Tong Xin, Hao Baoer, et al. Feasibility analysis using a porous media model to simulate the wind protection effect of windbreak forests [J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(1):207-220.
- [22] Pan Xia, Wang Zhenyi, Gao Yong, et al. Windbreak and airflow performance of different synthetic shrub designs based on wind tunnel experiments [J]. PLoS One, 2020, 15(12):e0244213.
- [23] 张正德,潘凯佳,张焱,等. 中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2):130-138.
- Zhang Zhengcai, Pan Kaijia, Zhang Yan, et al. Sand transport characteristics above Gobi surface during a dust storm in northern China [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2):130-138.
- [24] 孙涛,贾志清,刘虎俊,等. 民勤荒漠绿洲过渡带不同发育阶段白刺灌丛沙堆点格局特征[J]. 林业科学, 2020, 56(7):12-21.
- Sun Tao, Jia Zhiqing, Liu Hujun, et al. Spatial pattern of points distribution of sandpiles of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different developmental stages in desert-oasis ecotone of Minqin [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(7):12-21.
- [25] 詹科杰. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆表面风沙输运特征与沙堆形成发育的关系研究[D]. 甘肃兰州: 兰州大学, 2016.
- Zhan Kejie. Researching of the coherence relationship between surface wind-sand flow characteristic and shaping of *Nitraria tangutorum* nebkhas [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2016.
- [26] 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.
- Zhi Dan, Wang Jingxue, Xiao Huijie, et al. Wind tunnel simulation on the windbreak effect of *Nitraria tangutorum* nebkhas in Ulan Buh desert-oasis ecotone of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3):147-155.