

DOI: 10.20103/j.stxb.202409152241

王湘莲, 张友焱, 韩政伟, 雷春英, 程金花, 朱美菲. 不同密度与配置梭梭林防风效果的风洞模拟试验. 生态学报, 2025, 45(11): - .

Wang X L, Zhang Y Y, Han Z W, Lei C Y, Cheng J H, Zhu M F. Wind tunnel simulation test of wind protection effect of *Haloxylon ammodendron* forests with different density and configuration. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): - .

不同密度与配置梭梭林防风效果的风洞模拟试验

王湘莲¹, 张友焱^{2,*}, 韩政伟³, 雷春英³, 程金花¹, 朱美菲¹

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

3 新疆林科院造林治沙研究所, 新疆精河荒漠生态系统国家定位观测研究站, 乌鲁木齐 830063

摘要: 梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 是我国干旱区防护林营造的关键树种, 为了探究梭梭林合理的密度和配置方式以提升林带的防风效果, 通过风洞模拟试验, 在 10 m/s 风速条件下, 对 3 种密度和 4 种配置共计 12 种梭梭林带模型的风速流场和防风效果进行了研究, 旨在为优化干旱区防护林的结构和配置提供科学依据。结果表明: (1) 密度相同时, 均匀分布的林带 (A_3 、 B_3 、 C_3) 风速减速区的面积最大, 减速幅度更明显; 配置方式相同时, 密度的提升并未导致风速减速区面积呈严格的比例变化, 不同配置方式下适用的密度水平存在着差异, 但差异不显著; 林分密度的增加促进了更大范围风速减速区。(2) 中低密度条件下选择一行一带或者二行一带的配置方式防风效果较好, 高密度条件下, 二行一带或者均匀分布显著提升了防风效应。林带的风速变化差异主要体现在冠部, 在冠下, 林分密度越大, 平均风速越小, 其中, 高密度二行一带的林带 (C_2) 的冠下平均风速最小 (2.30 m/s)。(3) 在 30 cm、15 cm 和 3 cm 高度, 林带的防风效能整体均表现为 $C>B>A$, 且高密度二行一带的林带 (C_2) 防风效应最好。本研究不仅成功筛选出梭梭林种植的合理密度与配置模式, 而且为防风固沙林的建设及其优化配置策略的制定提供了坚实的科学依据。

关键词: 林分密度; 配置方式; 梭梭林; 防风效应; 风洞模拟试验

Wind tunnel simulation test of wind protection effect of *Haloxylon ammodendron* forests with different density and configuration

WANG Xianglian¹, ZHANG Youyan^{2,*}, HAN Zhengwei³, LEI Chunying³, CHENG Jinhua¹, ZHU Meifei¹

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China

3 Institute of Afforestation and Sand Control, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Xinjiang Jinghe Desert Ecosystem Research Station, Urumqi 830063, China

Abstract: *Haloxylon ammodendron* is a critical species for the establishment of protection forests in the arid regions of China. To explore the optimal density and configuration of *Haloxylon ammodendron* forests that would enhance their wind protection effectiveness, wind tunnel simulations were conducted under controlled conditions. The study examined the wind velocity and flow characteristics across three different stand densities and four distinct configurations, resulting in a total of 12 different forest models. The experiments were carried out under a wind speed of 10 m/s, with the goal of providing a solid scientific basis for the optimal design and arrangement of protection forests in arid zones. The findings of the study can be summarized as follows: (1) When stand density was held constant, the area of wind speed deceleration zones was largest in uniformly distributed stands (A_3 , B_3 , C_3), and the degree of wind deceleration was more pronounced in these areas.

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2022YFF1302504)

收稿日期: 2024-09-15; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: youyan_zhang@126.com

Additionally, when the configurations were kept the same, increasing stand density did not result in a strictly proportional change in the size of the wind speed deceleration zones. Although there were variations in the densities that were most suitable for different configurations, these differences were not statistically significant. Furthermore, increasing stand density resulted in a larger range of wind speed deceleration zones. (2) Under conditions of low to medium tree density, configurations involving one row and one band, or two rows and one band, provided better wind protection. In high-density conditions, configurations of two rows and one band, or a uniform distribution of trees, significantly improved the wind protection effectiveness. The variations in wind speed within the forest belts were most noticeable at the canopy level. Beneath the canopy, it was found that higher stand densities led to a lower average wind speed. Specifically, the forest belt with a configuration of two rows and one band at high density (C_2) exhibited the lowest mean wind speed, recorded at 2.30 m/s. (3) At heights of 30 cm, 15 cm, and 3 cm above the ground, the wind protection efficiency of the forest belts ranked as follows: $C > B > A$. Among all the configurations tested, the forest belt with high density, consisting of two rows and one band (C_2), provided the most effective wind protection. In conclusion, this study successfully identified the optimal stand density and configuration for planting *Haloxylon ammodendron* forests. These results not only contribute to the scientific understanding of wind protection mechanisms but also provide a valuable foundation for the development of windbreaks and sand-fixing forests in arid regions. Furthermore, the findings support the formulation of strategies aimed at optimizing the structure and arrangement of protection forests, offering practical guidelines for the sustainable management of arid zone ecosystems.

Key Words: stand density; configuration; *Haloxylon ammodendron* forests; windbreak effect; wind tunnel simulation test

防护林构成了干旱及半干旱区植被生态系统中不可或缺的一环^[1],通过调控气流路径与流场结构,有效实现风速的减缓与流沙的固定,进而充分发挥其防护效能^[2-3],在改善绿洲生态环境、有效遏制风沙灾害、积极保护生物多样性以及维持区域生态平衡等方面展现出了不可忽视的重要作用^[4-5]。近年来,防护林受到水资源短缺、土壤质量变差和人为因素等多重影响退化现象严重^[6]。梭梭(*Haloxylon ammodendron*),归类于沙生大型灌木或小乔木范畴,该树种具有耐干旱、耐盐碱和耐风沙等显著的环境适应性,构成了我国北方荒漠绿洲区域防护林体系建设的关键物种,是防护林建设不可或缺的资源^[7]。长期以来,地下水位的下降与过度放牧等人为活动以及干旱、风沙等自然因素对荒漠植被造成了严重的破坏,致使大片人工梭梭林出现衰退乃至死亡的现象。此外,不合理的种植密度以及不科学的配置方式也让梭梭林的防护效益减弱,这一系列问题急需解决。

林带结构受林分密度^[8-9]、配置方式^[10-11]、孔隙度^[12-13]、林带宽度^[3]、林带高度^[14]等因素的影响,不同结构的防风固沙林的防风效应存在显著差异,其中,林分密度和配置方式是影响防护林防风效应的关键因子^[15],因此,筛选出合适的密度和配置方式对于今后防护林的建设具有重要意义。林带密度是衡量林带空间结构优劣的直接指标^[4],相同行数的林带密度越大,其防护范围越大^[16],灌木防护林的密度增加被视为优化防护效能的有效策略。然而,有研究指出,在干旱及半干旱沙区的特定生态环境中,过高的林木密度可能适得其反,通过加剧蒸腾作用,导致沙地土壤水分过度消耗,进而威胁植被的生存状态,甚至引发植被衰退与死亡,最终对防护效果产生不利影响^[17-18]。林带的配置方式对灌木防风固沙林防护效能的影响也很重要^[19],对于同一密度的林分,不同的配置方式产生的生态效益、经济效益、生物学意义均有所不同^[20]。有研究提出采用“小株距、大行距”的品字形配置方式,有利于形成网状流道,增加气流能量的消耗,从而可以进一步提高灌木防护林的防风效应^[7]。此外,灌木林的密度与配置模式共同决定了其防护作用的差异性。有研究表明^[20],高密度均匀分布的灌木林,虽能提供较强的物理屏障,但可能因生态单一性而降低生态系统的韧性和恢复力。低密度集群分布的灌木林,虽有利于物种共存和生态多样性,但在面对极端环境事件时,防护效果可能不足。而适度密度下的带状或混合配置模式,则能在保持较高生态防护效能的同时,促进生态系统的稳定性和可持续性。

目前,针对灌木防护林的风洞研究主要聚焦于“行状”与“群状”配置的单一模式,或是某个林分结构因子对其防风效能的单一影响,这些研究大多围绕农田防护林以及杨树、柠条等树种展开^[21-23],相比之下,关于梭梭林防风效应的研究,特别是将林分密度与配置方式相结合,深入探讨二者在垂直方向上对梭梭林不同高度防风效果综合影响的研究尚显不足^[7,24]。鉴于此,本研究针对梭梭防护林,基于野外梭梭林的实际调查结果,通过风洞模拟试验,深入探究了梭梭林在密度与配置方式变化时的流场结构特征、风速分布变化以及防风效能的动态响应机制,旨在通过系统的实验分析,为防风固沙林的建设与优化配置提供科学的技术指导与坚实的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设备

本试验于 2024 年 7 月在北京交通运输部公路科学研究院的风洞内进行。该风洞为直流式,风洞总长度为 35.3 m,实验段长 12 m,实验段截面为 1.5 m×1.0 m,风速测定范围 3.0—40 m/s。根据试验时温度和气压,用数字式微压差计调节风速。利用皮托管测定风压并通过微差压传感器转换为风速,由计算机记录。

1.2 试验材料

根据野外调查,梭梭成林后株高平均 200 cm,冠幅平均 140 cm×140 cm,枝下高 30 cm。本研究选用仿真植物模型作为试验材料,模型的主干及主要枝条采用塑料包裹的铁丝制成,而细枝与叶片则运用高仿真塑料材质制成^[20]。模型与梭梭植株原型的尺寸比例按 1:10 设计,设置模型梭梭的高度为 20 cm、冠幅为 14 cm×14 cm、树干枝下高 3 cm,林带模型的阻塞面积被严格控制在试验段横截面积的 5% 以内,从而确保了风洞试验满足了几何相似的必要条件(图 1)。



图 1 野外梭梭及梭梭模型

Fig.1 Wild *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon ammodendron* model

1.3 林带设计

本试验按照实际样地的低中高 3 种密度 475 株/hm²、1050 株/hm²和 1750 株/hm²,编号为 A,B,C(表 1)。计算单株面积,按盖度 11.76%、20.91%和 34.63%来配置风洞实验的样本株数,分别为 15 株、32 株和 53 株,林带布设在 80 cm×100 cm 试验板上,将植物模型的主干底端通过胶带粘贴在木板上,林带按照一行一带、两行一带、均匀分布和随机分布 4 种不同配置模式布设^[25](图 2)。

1.4 风速测定

本研究选择 10 m/s 这一普遍采用的研究风速作为风洞试验的基准风速,在此风速条件下,沿着风洞试验场地的中心轴线,选择林带前-3H 至林带后 10H 范围内共 13 个位置作为测点,分别测定了 10 个高度(0.8、1.9、3、4.1、5.2、7、10、15、30、50 cm)的风速(图 3)。H 为梭梭模型植物的株高(H=20 cm),负号代表林带的上风向,正号代表林带的下风向。风速测定过程中控制皮托管移动到不同测点,每点停留 2 min 记录风速,每次间隔 2 s 记录一次数据,每个测点测定不少于 100 个瞬时风速,对所得数据取平均值,以无林带情况下测定的风速为对照。

表 1 不同密度配置的林带模型特征参数

Table 1 Characteristic parameters of forest belt models with different density configurations

密度 Stand density/(株/hm ²)	林带 Forest belt	配置方式 Configuration	株距 Plant spacing/cm	行距 Row spacing/cm
A	A ₁	一行一带	10	50
	A ₂	二行一带	10	10
	A ₃	均匀分布	26.7	20
	A ₄	随机分布	—	—
B	B ₁	一行一带	10	20
	B ₂	二行一带	10	10
	B ₃	均匀分布	20	10
	B ₄	随机分布	—	—
C	C ₁	一行一带	8.9	10
	C ₂	二行一带	8.9	10
	C ₃	均匀分布	13.3	10
	C ₄	随机分布	—	—

A:实际密度为 475 株/hm²;B:实际密度为 1050 株/hm²;C:实际密度为 1750 株/hm²;林带 B₂带间距为 30 cm,林带 C₂带间距为 20 cm

1.5 数据处理

1.5.1 相对风速计算

相对风速是衡量林带对风速产生加速或减速效应的关键指标^[26]。在风洞中分别测量无林带和有林带条件下各测点的风速,对实验测得的风速进行标准化处理,处理后的风速为相对风速,记作 U/U_0 。 $U/U_0>1$ 的区域为风速加速区, $U/U_0<1$ 的区域为风速减速区。其计算公式为

$$I=\frac{U}{U_0}$$
 (1)

式中, I 指相对风速; U 指有林带时测定的风速; U_0 指无林带时测定的风速。

1.5.2 防风效能计算

防风效能是表现不同密度和配置的梭梭林防风效益的重要指标,在本实验内指同一测点有林带时比无林带时的风速减弱大小的百分比^[7]。其计算公式为

$$\phi=\frac{U_0-U}{U_0}\times100\%$$
 (2)

式中, ϕ 指防风效能, ϕ 为正表明风速降低, ϕ 为负表明风速增大。

利用 Surfer 27.1 软件绘制相对风速等值线图,利用 Origin 2021 软件绘制林带风速变化图和防风效能变化图,进一步了解各林带的风速分布特征。

2 结果与分析

2.1 流场结构

图 4 为林带相对风速 U/U_0 的等值线图,表 2 详细列出了图 4 中相对风速各取值范围所对应的面积占比。研究结果显示,在 3 种不同密度配置的林带中,均观察到了显著的风速变化特征。具体而言,在林带前、冠下及冠上约 30 cm 以上的部分区域,形成了风速加速区(M 区, $U/U_0>1$),在冠部及林带后形成了风速减速区(N 区, $U/U_0<1$);高密度林带(C)的林带后防护区的防护面积大于中低密度(A 、 B),12 种林带模型的有效防护距离均大于 $10H$ (图 4)。低密度 4 种配置的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 $A_3>A_1>A_4>A_2$,中密度 4 种配置的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 $B_3>B_4>B_1>B_2$,高密度 4 种配置的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 $C_3>C_4>C_2>C_1$,即同种密度条件下,配置方式为均匀分布(A_3 、 B_3 、 C_3)的林带风速减速区的

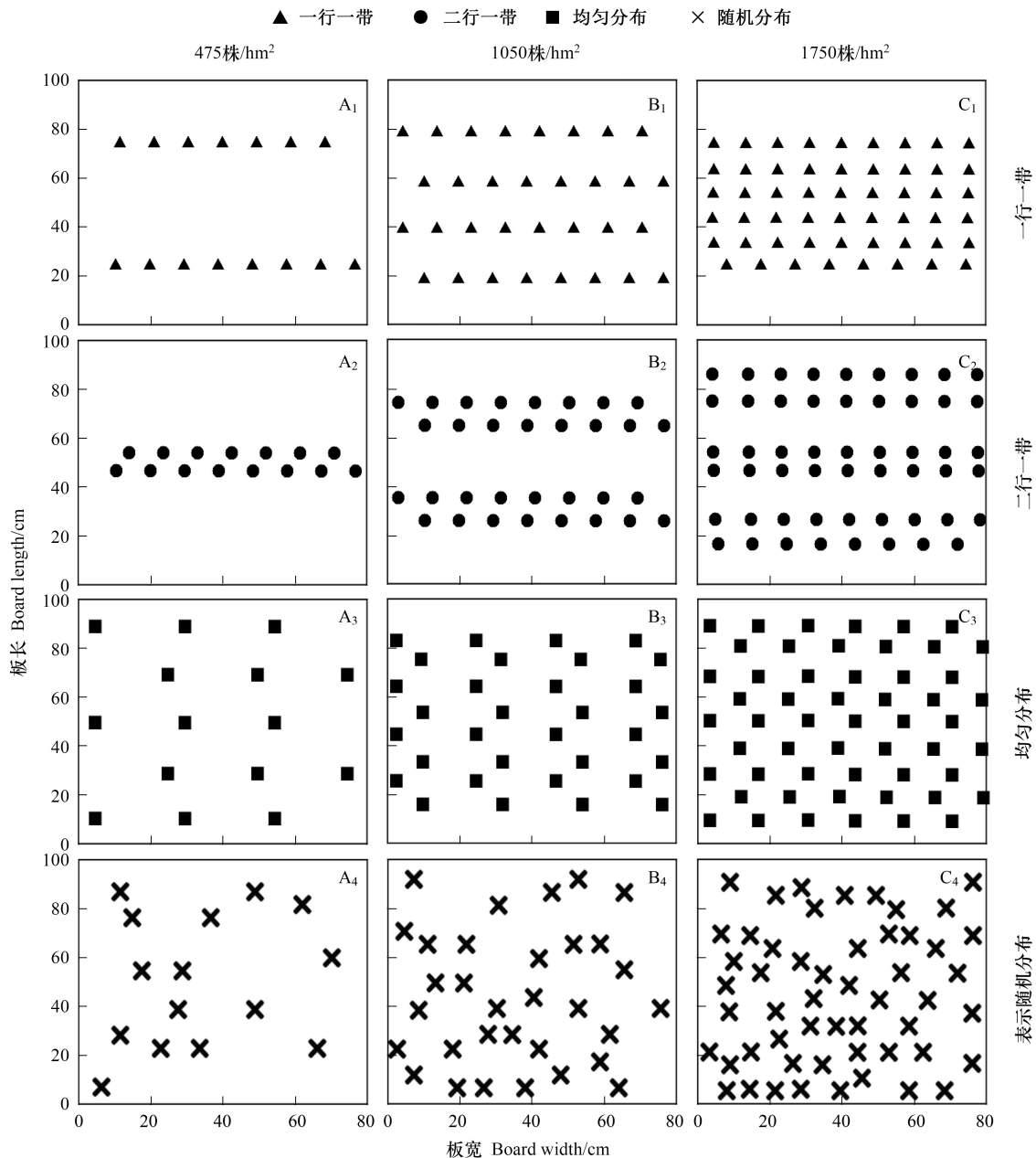


图2 不同密度梭梭4种不同配置模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of four different configuration patterns for different densities of *Haloxylon ammodendron*

A₁: 密度为 475 株/hm²配置方式为一行一带的林带; A₂: 密度为 475 株/hm²配置方式为二行一带的林带; A₃: 密度为 475 株/hm²配置方式为均匀分布的林带; A₄: 密度为 475 株/hm²配置方式为随机分布的林带; B₁: 密度为 1050 株/hm²配置方式为一行一带的林带; B₂: 密度为 1050 株/hm²配置方式为二行一带的林带; B₃: 密度为 1050 株/hm²配置方式为均匀分布的林带; B₄: 密度为 1050 株/hm²配置方式为随机分布的林带; C₁: 密度为 1750 株/hm²配置方式为一行一带的林带; C₂: 密度为 1750 株/hm²配置方式为二行一带的林带; C₃: 密度为 1750 株/hm²配置方式为均匀分布的林带; C₄: 密度为 1750 株/hm²配置方式为随机分布的林带; 林带 B₂带间距为 30 cm, 林带 C₂带间距为 20 cm

面积最大。配置方式为一行一带的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 A₁>B₁>C₁, 即一行一带的配置方式在低密度下风速减速区面积最大, 配置方式为二行一带的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 C₂>B₂>A₂, 即二行一带的配置方式在高密度下风速减速区面积最大, 配置方式为均匀分布的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 A₃>B₃>C₃, 即均匀分布的配置方式在低密度下风速减速区面积最大, 配置方式为随

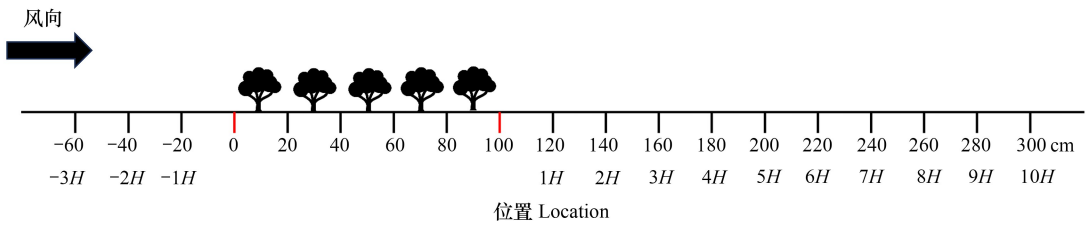


图3 林带风速测定范围及测点布设示意图

Fig.3 Schematic diagram of measuring range and measuring points in forest belt wind speed

H :模型高度=20 cm;黑色小树代表林带所处的位置;林带布设范围为0—100 cm;负号代表林带的上风向;正号代表林带的下风向

机分布的林带风速减速区的面积从大到小的排序为 $B_4 > C_4 > A_4$ ，即随机分布的配置方式在中密度下风速减速区面积最大。因此,当配置方式相同时密度升高风速减速区面积并没有跟随密度呈比例变化,不同配置方式下适用的密度水平存在着差异,但差异不显著。由图4表2可以看出,高密度均匀分布的 C_3 林带减速幅度最为明显,其相对风速在弱风区 ($U/U_0 < 0.7$) 和极减速区 ($U/U_0 < 0.4$) 的面积占比 (66.59%和 38.05%) 最大。而低密度随机分布的 A_4 林带在相对风速在弱风区 ($U/U_0 < 0.7$) 和极减速区 ($U/U_0 < 0.4$) 的面积占比 (50.15%和 7.01%) 最小,降低风速的幅度最不明显 (表2)。

表2 林带相对风速 U/U_0 的面积占比

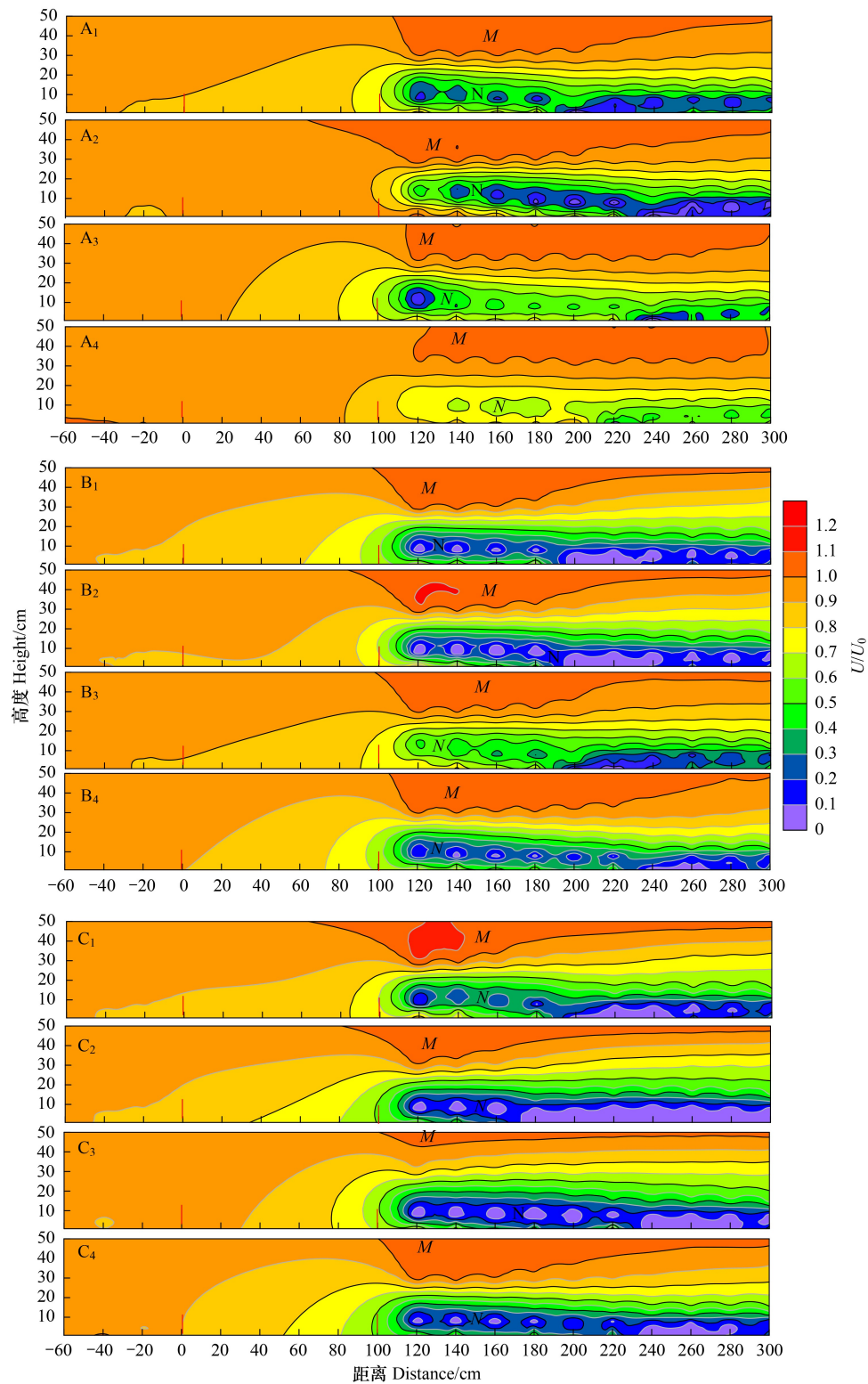
Table 2 Area proportion of U/U_0 relative wind speed in forest belt

U/U_0	风区 Wind area	A_1	A_2	A_3	A_4	B_1	B_2	B_3	B_4	C_1	C_2	C_3	C_4
		%											
<1	风速减速区	94.88	90.46	98.10	93.29	92.28	90.49	95.57	94.43	87.88	93.03	95.13	93.98
<0.7	弱风区	63.67	62.15	65.76	50.15	64.59	63.35	65.77	66.10	61.52	65.12	66.59	65.76
<0.4	极减速区	32.46	33.85	33.41	7.01	36.91	36.20	35.96	37.77	35.15	37.21	38.05	37.53

U/U_0 : 相对风速

2.2 风速变化

当气流遭遇林带时,其流动模式发生显著变化:一部分气流因受阻而向上偏转并越过林带顶部,而另一部分则渗透进入林带内部。进入林带内部的气流又可细化为两大流向,一是通过林冠层间的空隙受阻穿行,二是经由林冠下方的树干间隙通过。研究通过计算各测点冠上 (50、30 cm),冠部 (15、10、7 cm),以及冠下 (5.2、4.1、3、1.9、0.8 cm) 的平均风速值,分析冠上、冠部、冠下 3 个不同高度层的风速变化特征^[23]。由图5可知:林带前, $-3H$ 到 $-1H$ 所有林带在冠上、冠部和冠下的风速变化趋势基本一致。林带后,各林带的冠上风速变化趋势相似,从 $1H$ 开始逐渐减小,减速幅度不是很明显,到 $10H$ 风速基本稳定在 8—9 m/s 左右。在冠部,当风穿过林带到达 $1H$ 处时,所有林带的风速都比林带前的风速急剧减小,与其他林带相比, A_4 林带在 $1H$ 处的风速最大 (7.38 m/s), B_2 林带在 $1H$ 处的风速最小 (0.87 m/s), A_4 林带的风速变化十分稳定,维持在 6—7 m/s 左右, A_1 、 C_1 林带在 $5H$ 处风速最大 (5.45 m/s、4.01 m/s), A_3 、 B_4 、 C_4 林带在 $7H$ 处风速最大 (6.62 m/s、4.80 m/s、3.54 m/s), A_2 、 B_3 林带在 $1H$ 处风速最大 (5.54 m/s、5.32 m/s), B_1 、 B_2 、 C_2 、 C_3 林带在 $10H$ 处风速最大 (3.34 m/s、3.18 m/s、2.65 m/s、2.92 m/s)。因此,可以将林带后冠部风速变化分为以下 4 种情况:①风经过林带后风速小幅度减小后一直保持相对稳定的趋势 (A_4)。②风经过林带后急剧减小到最低 ($1H$) 然后逐渐增加到一个风速最高点 ($5H$ 、 $7H$) 再降低后保持稳定的趋势 (A_1 、 A_3 、 B_4 、 C_1 、 C_4)。③风经过林带后由风速最大值 ($1H$) 开始减小到最低 ($4H$) 然后逐渐增加到一个最高点 ($5H$ 、 $7H$) 再降低后保持稳定的趋势 (A_2 、 B_3)。④风经过林带后急剧减小到最低 (H) 然后一直缓慢增加到最大 ($10H$) 的趋势 (B_1 、 B_2 、 C_2 、 C_3)。所有情况下,高密度林带的风速最大值总是小于中密度和低密度林带。在冠下,当风穿过林带后,所有林带的风速变化趋势相似,都呈现先减小后增加然后保持稳定的趋势,但是林带后风速出现最低点的位置略有不同,都出现在 $5H$ —

图4 林带相对风速 U/U_0 的等值线图Fig.4 Contour map of relative wind speed U/U_0 in forest belt

M : 风速加速区; N : 风速减速区; U : 有林带时测定的风速; U_0 : 无林带时测定的风速; $U/U_0 > 1$: 风速加速区; $U/U_0 < 1$: 风速减速区; $U/U_0 < 0.7$: 弱风区; $U/U_0 < 0.4$: 极减速区; 2 条红线表示林带所处位置

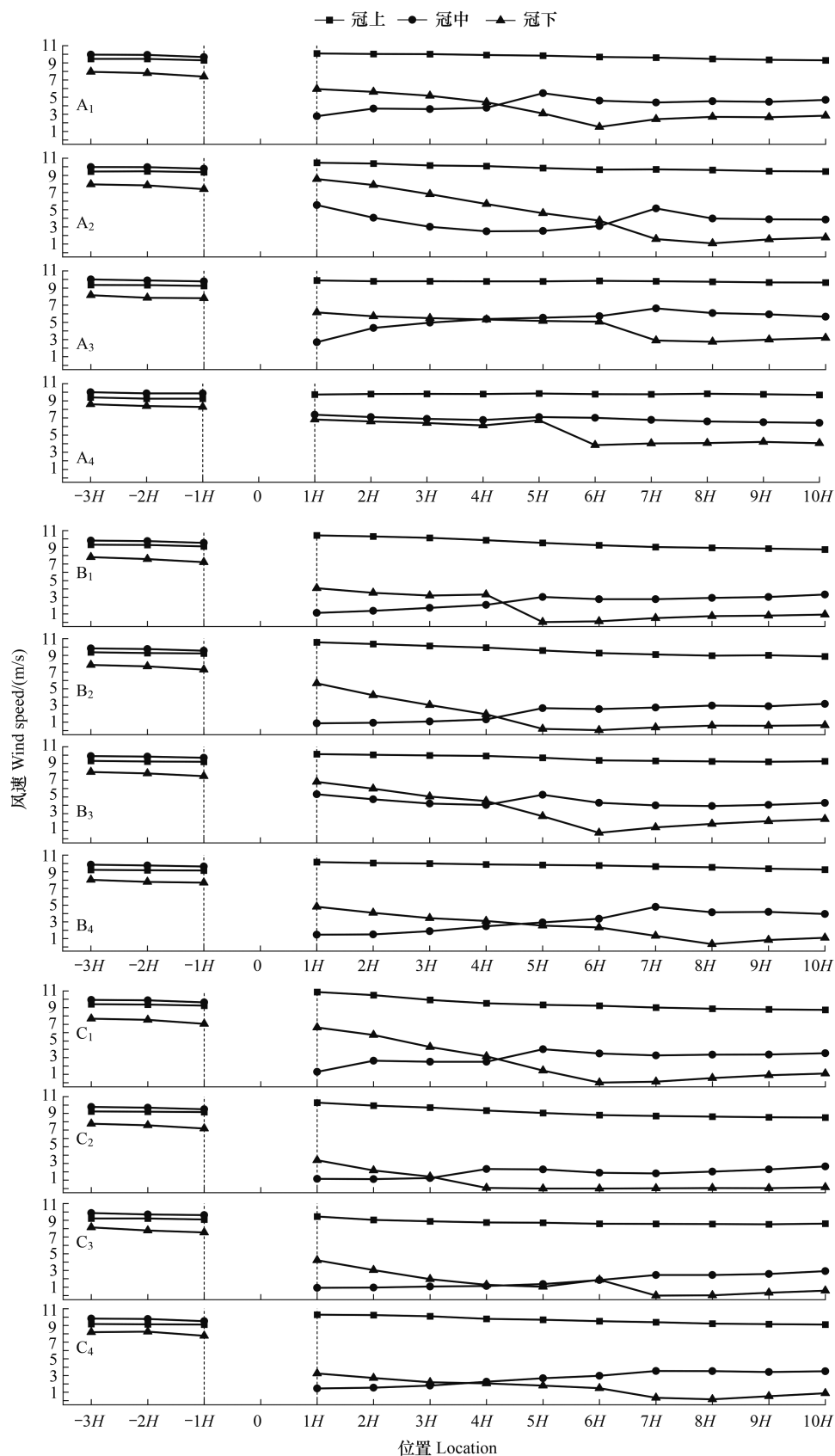


图5 3个不同高度的平均风速变化

Fig.5 Average wind speed variation at three different heights

两条虚线表示林带的分布区

8H 这个范围之内,并可以明显看出高密度林带的冠下风速远小于中低密度。因此,林带的风速变化差异主要体现在冠部,且高密度林带的风速降幅更为明显。由表 3 可知:所有林带的冠上平均风速差别不大,稳定在 8—9 m/s 左右。在冠部,当密度相同时,与其他配置方式相比,低密度条件平均风速由小到大的排序为 $A_2 < A_1 < A_3 < A_4$,中密度条件平均风速由小到大的排序为 $B_2 < B_1 < B_4 < B_3$,高密度条件平均风速由小到大的排序为 $C_3 < C_2 < C_4 < C_1$,即低密度和中密度条件下二行一带的配置方式林带风速更小,而高密度条件下均匀分布的配置方式林带风速更小。当配置方式相同时,一行一带的林带平均风速由小到大的排序为 $B_1 < C_1 < A_1$,二行一带的林带平均风速由小到大的排序为 $C_2 < B_2 < A_2$,均匀分布的林带平均风速由小到大的排序为 $C_3 < B_3 < A_3$,随机分布的林带平均风速由小到大的排序为 $C_4 < B_4 < A_4$,即选择一行一带的配置方式时造林密度为中密度时林带风速更小,而二行一带、均匀分布和随机分布的配置方式选择高密度的造林密度效果会更好。总而言之,低密度条件选择二行一带的配置方式较好,中密度条件选择一行一带或者二行一带的配置方式较好,高密度条件下,在考虑水分条件允许下,造林时选择均匀分布或者二行一带效果会更好。在冠下,林分密度越大,平均风速越小,林带风速由小到大的排序为 $C < B < A$,其中, C_2 林带的冠下平均风速最小(2.30 m/s),这说明二行一带配置的高密度林带效果较好。

表 3 林带不同高度层平均风速

Table 3 Average wind speed at different heights in forest belts

林带 Forest belt	平均风速 Average wind speed/(m/s)			林带 Forest belt	平均风速 Average wind speed/(m/s)		
	冠上 Above crown	冠部 Crown part	冠下 Under crown		冠上 Above crown	冠部 Crown part	冠下 Under crown
A_1	9.65	5.49	4.58	B_3	9.53	5.65	4.35
A_2	9.79	5.18	5.11	B_4	9.62	4.61	3.65
A_3	9.67	6.36	5.28	C_1	9.45	4.57	3.55
A_4	9.67	7.56	6.01	C_2	9.16	3.68	2.30
B_1	9.44	4.10	3.07	C_3	8.86	3.61	2.91
B_2	9.52	3.88	3.08	C_4	9.53	4.29	3.05

2.3 防风效能

根据上述风速变化的观测结果,林带内不同冠层对风速产生的影响呈现出明显的差异性。基于此,本研究选取了 30、15、3 cm 这 3 个代表性高度,计算并绘制了防风效能沿风向的变化趋势图(图 6),进一步分析林带防风效应在空间分布上的异质性特征。在 30 cm 高度处,林带的防风效能无论在带前还是带后均不超过 30%,林带后的防风效能从 1H 处一直增大后保持稳定,整体表现为 $C > B > A$, C_2 林带整体表现出最大的防风效能。在 15 cm 高度处,林带后的防风效能最大(1H)开始减小,经过 5H 后保持防风效能稳定在 40%—60%之间, A_4 林带整体的防风效能一直维持 25%—30% 左右,当风流经 5H 后,在配置方式相同的条件下,除了一行一带配置的林带防风效能表现为 B_1 略高于 C_1 ,其余林带的防风效能整体均表现为 $C > B > A$,同样 C_2 林带整体表现出最大的防风效能。在 3 cm 高度处,林带后的防风效能从 1H 处逐渐增大达到一个最高点后一直保持相对稳定, A_1 、 B_3 林带的防风效能从 1H 开始增加到 6H 达到最大(83.38%、97.74%)然后小幅度降低最终保持稳定,高密度和中密度林带(C、B)的防风效能最终稳定在 80%—100%,而低密度林带(A)的防风效能最终稳定在 60%—80%。近地层防风效应对地表侵蚀与沉积过程以及微地貌的形成具有重要影响,是防护林研究的重点^[23]。对林带在株高 15 cm 以下的防风效能求平均值(表 4),林带前和林带后的防风效能均为“正值”,这一结果表明,在林带的影响下,无论是林带前还是林带后,近地层的风速相较于无林带区域均有所减缓。林带前的平均防风效能不超过 10%,林带后的平均防风效能远大于林带前,因此,防风效能的变化主要体现在林带后,当密度相同时,与其他配置方式相比,低密度条件下的平均防风效能由大到小的排序为 $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$,中密度条件下的平均防风效能由大到小的排序为 $B_2 > B_1 > B_4 > B_3$,高密度条件下的平均防风效能由大到小的排序为 $C_2 > C_3 > C_4 > C_1$,即低密度条件下一行一带的配置方式林带的平均防风效能更好,而中密度和高密度条件下

二行一带的配置方式林带的平均防风效能更好。当配置方式相同时,一行一带的林带平均防风效能由大到小的排序为 $B_1 > C_1 > A_1$, 二行一带的林带平均防风效能由大到小的排序为 $C_2 > B_2 > A_2$, 均匀分布的林带平均防风效能由大到小的排序为 $C_3 > B_3 > A_3$, 随机分布的林带平均防风效能由大到小的排序为 $C_4 > B_4 > A_4$, 即选择一行一带的配置方式时造林密度为中密度时林带的平均防风效能更好, 而二行一带、均匀分布和随机分布的配置方式选择高密度的造林密度效果会更好。综合来看, 低密度条件适合选择一行一带的配置方式, 中密度条件适合选择一行一带或者二行一带的配置方式, 高密度条件适合选择二行一带或者均匀分布的配置方式。

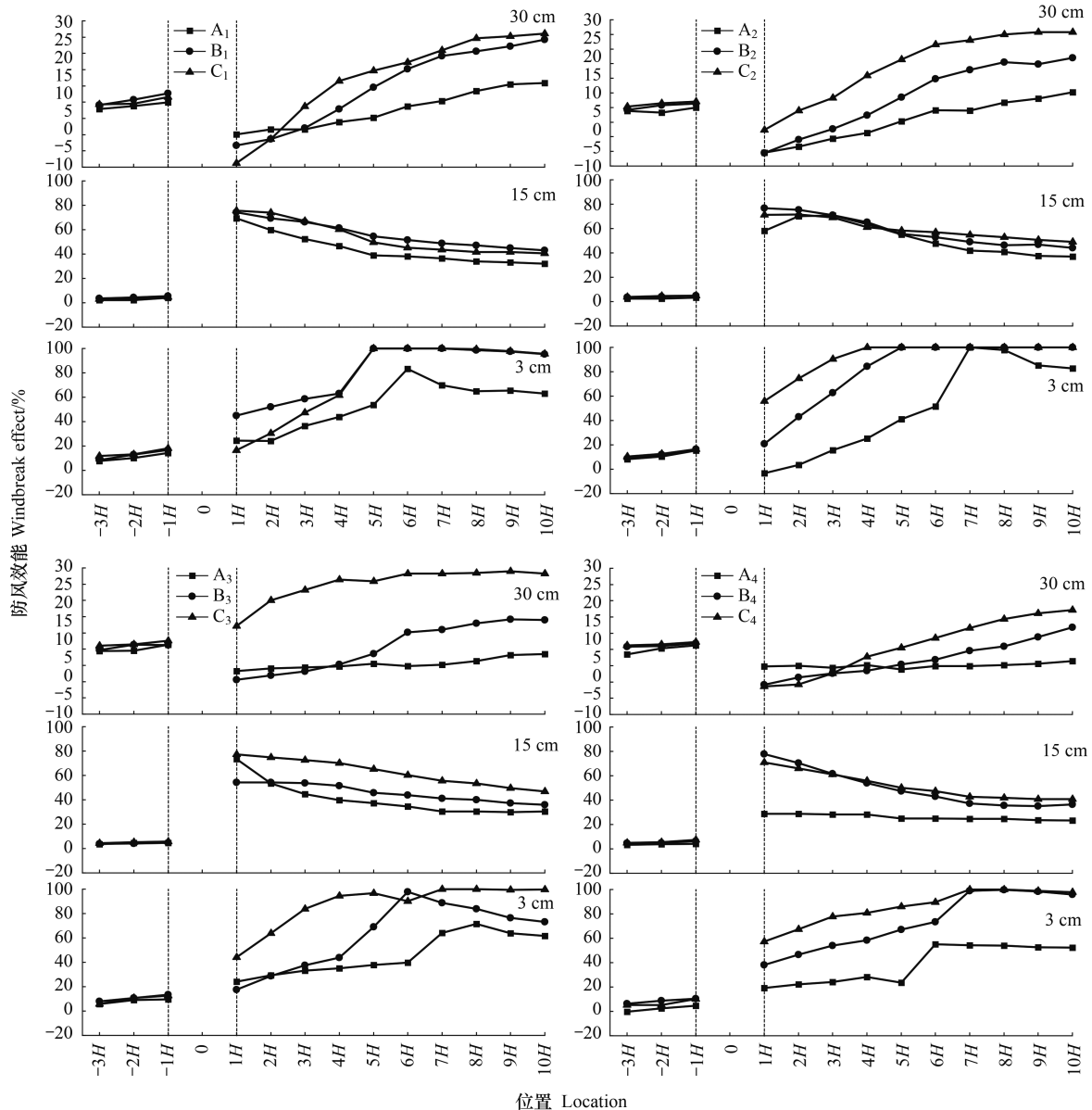


图 6 3 个高度林带防风效能的变化特征

Fig.6 Variation characteristics of wind protection effectiveness of forest belts at three heights

3 讨论

3.1 林分密度对防风效能的影响

林分密度作为林带结构特征的决定性因子^[20], 在由单一树种构成的纯林带中, 其重要性尤为凸显, 这主

要归因于植株个体在几何形态及空间排列上的高度一致性^[27]。先前的研究已经证实,在配置方式一定时,随着林带密度的增加,其对风速的削弱效应显著增强,进而提升了林带后的防风效益^[28-29],但过高的密度可能会导致林带内部通风不良,反而降低防风效果。本研究结果表明,在配置相同的情况下,风速减速区面积并未随林分密度的增加呈比例变化,不同配置方式下的最优密度水平存在差异,这表明风速递减率与林分密度之间的关系并非简单的线性正相关,而是呈现出更为复杂的非线性特征。进一步深入分析发现,当林分密度处于较高水平时,密度的微小变动对防风效能产生的影响,相较于低密度状态下的相同变动,要更为显著^[20]。此外,本研究还发现林带的风速变化差异主要体现在冠部,且高密度林带的风速降幅更为明显,这与牛丹妮等^[7,24]研究结果相似。因此,在实际应用中,需要根据具体的生态环境和防风需求,选择适宜的林带密度,以达到最佳的防风效果。

表 4 林带周围近地层(15 cm 以下)平均防风效能

Table 4 Average wind protection effectiveness of the near-ground layer (below 15 cm) around the forest belt

林带 Forest belt	平均防风效能 Average wind efficiency/%		林带 Forest belt	平均防风效能 Average wind efficiency/%	
	林带前 Front of the forest belt	林带后 Back of the forest belt		林带前 Front of the forest belt	林带后 Back of the forest belt
A ₁	8.25	58.69	A ₃	6.30	48.38
B ₁	10.10	78.82	B ₃	8.04	60.18
C ₁	10.52	72.15	C ₃	7.76	83.21
A ₂	7.91	55.00	A ₄	2.65	36.74
B ₂	9.47	79.85	B ₄	7.63	71.81
C ₂	10.46	88.17	C ₄	6.00	79.54

3.2 林带配置对防风效能的影响

林带的配置方式作为另一项关键变量,已被证实对气流路径及防风效能具有显著影响^[20]。等密度的林带由于林带配置方式的不同,使得林带的气流分布存在差异,从而导致林带防风效能也会出现差异。本研究进一步发现,在高密度造林条件下,考虑水分因素时,造林时选择均匀分布能够显著提升防风效果。林带作为自然界的防护屏障,其影响气流的主要机制涵盖两个方面:一是通过改变气流路径来引导气流流动,二是通过消耗气流能量来减弱其动力。这两种机制相互协同,共同决定了气流在穿越林带时的加速或减速状态^[20];此外,在高密度均匀分布的林带中,相邻植株形成了一种“网状”流道结构。这一结构通过增强林内气流的紊动性,有效促进了气流能量的耗散;同时,它还能有效防止破土面的形成和通风道的出现,从而进一步提升了防风效果^[30]。

相比之下,在中低密度造林条件下,采用一行一带或二行一带的配置方式则表现出更优的防风性能。当气流穿越这些配置方式的林带时,其动能受到显著削弱。这一现象归因于林带内部植被间的协同防护效应,它有效降低了风蚀强度,促使流沙与细微颗粒物在植被周边沉积。此外,由于中低密度条件下单位面积植被密度相对较低,这有利于保障单位面积上的水分与养分供应,为防风固沙林的稳定、持续及健康生长提供了坚实的基础^[31]。值得一提的是,本研究发现随机分布在三种密度下的防风效果都远远不如其他配置方式,这一结果暗示,相较于自然状态下随机分布的天然梭梭林,人工种植的梭梭林通过采用特定的配置方式,展现出了更强的防风效应。这表明,通过人为设计的林带配置模式,能够有效提升林带的防护性能,从而强调了合理配置对于增强林带防风效能的重要性。

在干旱及半干旱地区,防风固沙林的建设是遏制土地沙漠化的核心手段,而维持水分平衡则是保障防护林持续健康发育的关键要素。仅从造林密度或配置方式单一维度考虑,难以筛选出最优的防风固沙林体系。通过合理设计造林密度与空间配置,可以最大化利用有限的水资源,确保林木正常生长,减少林木间的水分竞争,从而有效防治土壤风蚀^[32]。

尽管本研究已对林带后的防风效能进行了量化分析,但在确定有效防护距离的精确量化方面仍存在不

足。基于详实的风速观测数据与防风效能的精确计算,本研究系统性地归纳了梭梭林在不同条件下的防风特性,为防风固沙林的设计与构建提供了有益的参考。在此基础上,未来的研究应进一步探索有效防护距离的量化方法,深化对梭梭林防风机制的理解,并优化其在生态恢复与风沙治理中的实际应用策略,以期更科学地指导防风固沙林的建设与优化,为干旱及半干旱地区的生态安全提供坚实保障^[33]。

4 结论

通过风洞模拟试验,对林分密度和配置方式发生变化时的 12 种林带的流场结构、风速变化以及防风效能进行了研究,得到以下主要结论:

(1) 密度条件相同时,均匀分布的林带(A_3 、 B_3 、 C_3) 风速减速区的面积最大,减速幅度更明显。中低密度条件下选择一行一带或者二行一带的配置方式防风效果较好,高密度条件下,二行一带或者均匀分布显著提升了防风效应。高密度均匀分布的 C_3 林带减速幅度最为明显,而低密度随机分布的 A_4 林带降低风速的幅度最不明显,在选择随机分布配置时,要避免较低的林分密度。

(2) 配置方式一致时,密度升高风速减速区面积没有随密度呈比例变化,不同配置方式下适用的密度水平存在着差异,但差异不显著。林分密度越大,形成的风速减速区(N 区) 越大。林带后株高 15 cm 以下的平均防风效能总体也表现为 $C>B>A$, 且 C_2 林带后的平均防风效能最大(88%)。

(3) 林带的风速变化差异主要体现在冠部,在冠下,林分密度越大,平均风速越小,其中, C_2 林带的冠下平均风速最小(2.30 m/s)。在 30 cm、15 cm 和 3 cm 高度,林带的防风效能整体均表现为 $C>B>A$, 且高密度二行一带的林带(C_2) 防风效应最好。

由此可见,密度条件相同时,选择二行一带或者均匀分布的配置模式较为理想,这种配置方式不仅能够提供有效的物理屏障,还能在一定程度上维持生态系统的多样性和稳定性。然而,配置方式一致时,林分密度并非越高越好,不同的配置模式适合的密度水平存在差异。林带的防护作用主要体现在树冠层,在综合考虑地的水分、土壤等环境因素后,选择高密度二行一带的林带配置,其防风效应最为显著,这些结论可应用到指导防护林的营建。当然在实际造林实践中,应根据不同的造林目的选择适宜的密度和配置方式,通过科学合理地调整防护林的密度和配置模式,优化林分结构,可以显著提高生态防护效能。

参考文献(References):

- [1] Durán Zuazo V H, Rodríguez Pleguezuelo C R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(1): 65-86.
- [2] 孙保平. 荒漠化防治工程学. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [3] 李雪琳, 马彦军, 马瑞, 张莹花, 唐卫东, 杨进杰. 不同带宽的防风固沙林流场结构及防风效能风洞实验. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 936-944.
- [4] 厉静文, 刘明虎, 郭浩, 包岩峰, 辛智鸣, 刘朋飞. 防风固沙林研究进展. *世界林业研究*, 2019, 32(5): 28-33.
- [5] 杨越, 吴才武, 武智勇, 杨依天, 韩永娇, 张月丛. 冀北坝上地区 3 种人工灌木林地防风蚀效果的比较. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 54-57, 63.
- [6] 朱美菲, 韩政伟, 雷春英, 王湘莲, 程金花, 张友森. 准噶尔盆地荒漠绿洲过渡带地下水埋深对人工梭梭林年龄结构及动态特征的影响. *生态学报*, 2024, 44(19): 8688-8698.
- [7] 牛丹妮, 马瑞, 刘虎俊, 张瑜忠. 不同种植点配置的梭梭林防风效应的风洞试验. *北京林业大学学报*, 2023, 45(7): 76-87.
- [8] Torita H, Satou H. Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(3/4): 186-194.
- [9] Ma R, Wang J H, Qu J J, Liu H J. Effectiveness of shelterbelt with a non-uniform density distribution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 767-771.
- [10] Zeng H C, Garcia-Gonzalo J, Peltola H, Kellomäki S. The effects of forest structure on the risk of wind damage at a landscape level in a boreal forest ecosystem. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(1): 111.
- [11] Ma R, Li J R, Ma Y J, Shan L S, Li X L, Wei L Y. A wind tunnel study of the airflow field and shelter efficiency of mixed windbreaks. *Aeolian*

- Research, 2019, 41: 100544.
- [12] Wu T G, Yu M K, Wang G, Wang Z X, Duan X, Dong Y, Cheng X R. Effects of stand structure on wind speed reduction in a *Metasequoia glyptostroboides* shelterbelt. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(2): 251-257.
- [13] Santiago J L, Martín F, Cuerva A, Bezdenjnykh N, Sanz-Andrés A. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(30): 6406-6420.
- [14] McClure S, Kim J J, Lee S J, Zhang W. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 163: 6-14.
- [15] Brandle J, Hodges L, Zhou X. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems*, 2004, 61/62(1/2/3): 65-78.
- [16] 马瑞, 王继和, 刘虎俊, 魏林源, 李瑞军, 孙涛. 不同密度梭梭林对风速的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 249-252.
- [17] Bitog J P, Lee I B, Hwang H S, Shin M H, Hong S W, Seo I H, Mostafa E, Pang Z. A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag. *Forest Science and Technology*, 2011, 7(1): 8-16.
- [18] 厉静文, 包岩峰, 郭浩, 刘明虎, 辛智鸣, 刘朋飞. 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林带防风效果的风洞试验. *中国沙漠*, 2020, 40(3): 77-84.
- [19] 高函, 吴斌, 张宇清, 丁国栋. 行带式配置柠条林防风效益风洞试验研究. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 44-47.
- [20] 牛丹妮. 林分密度和种植点配置对梭梭人工林防风效能的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [21] 曹鹏鹤. 栽植密度和种植点配置对苏北杨树人工林非结构性碳水化合物化合物的影响. 南京: 南京林业大学, 2021.
- [22] 杨文斌, 丁国栋, 王晶莹, 姚建成, 董智, 杨红艳. 行带式柠条固沙林防风效果. *生态学报*, 2006, 26(12): 4106-4112.
- [23] 赛克, 赵媛媛, 包岩峰, 刘辰明, 丁国栋, 高广磊. 干旱半干旱区落叶期农田防护林防风效果的风洞试验研究. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 157-165.
- [24] 牛丹妮, 韩蓉, 马瑞, 王振亭, 刘虎俊, 魏林源. 林分密度和种植点配置对梭梭人工林防风效应的影响. *干旱区研究*, 2023, 40(1): 143-151.
- [25] 徐高兴, 徐先英, 王立, 付贵全, 赵鹏, 丁爱强. 梭梭不同密度与配置固沙效果风洞模拟试验. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(9): 189-195.
- [26] Judd M J, Raupach M R, Finnigan J J. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: Velocity fields. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 80(1): 127-165.
- [27] 马彦军, 李雪琳, 马瑞, 张莹花, 魏林源, 张统帅. 前高后低型防风固沙林防风效应及其对风向的响应. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 28-33, 39.
- [28] 厉静文, Dosmanbetov D A, 郭浩, 辛智鸣, 刘朋飞, 刘明虎. 不同配置乔灌混交林防风效益的风洞试验. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 95-102.
- [29] 付亚星, 王乐, 彭帅, 王红营, 常春平. 河北坝上农田防护林防风效能及类型配置研究——以河北省康保县为例. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 279-283.
- [30] 翟明普, 沈国舫. 森林培育学. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [31] 王强强, 唐进年, 杨自辉, 张大彪, 郭树江, 张剑挥, 张莹花. 不同配置固沙林的防风阻沙效果. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 177-184.
- [32] 王彦武, 罗玲, 张峰, 陈天林. 民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究. *西北林学院学报*, 2018, 33(4): 64-70.
- [33] 唐玉龙, 安志山, 张克存, 谭立海. 不同结构单排行林带防风效应的风洞模拟. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 647-654.