

前高后低型防风固沙林防风效应及其对风向的响应

马彦军¹, 李雪琳¹, 马瑞¹, 张莹花², 魏林源², 张统帅¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省治沙研究所 荒漠化与风沙灾害防治重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 研究由梭梭和柠条组成的前高后低型复合林带的防风效应及其对风向的响应, 为荒漠绿洲、沙漠公路、沙漠铁路等防护区人工防风固沙林的营建提供理论依据。[方法] 以具有不同个体特征的梭梭和柠条为原型制作仿真植物, 配置成前高后低型林带, 记作 AmBn 型, 其中, “A”代表仿真植物梭梭, “m”代表其株行距为 15 cm×40 cm, “B”代表仿真植物柠条, “n”代表其株行距为 8.5 cm×25 cm。将其在反方向风作用时记为 BnAm 型。通过风洞模拟试验, 在 7, 10, 15 m/s 试验风速下, 对两种类型林带主要影响区的风速变化、气流加速率和防风效能进行分析。[结果] ①气流到达林带前速度整体降低, 到达林带后分化为上(30 cm 以上)、中(5—20 cm)、下(3 cm 以下)3 个特征层, 下部气流层在 AmBn 型和 BnAm 型林带后的风速恢复点分别位于 23 和 12.5 H 处。②AmBn 型林带风影区的范围大于 BnAm 型林带; 两种林带在 A、B 植物区的冠层高度处各形成一个风影核心区, 形成双核模式。③在 7, 10, 15 m/s 试验风速下, AmBn 型林带考察区的平均防护效能分别为 34.44%, 34.98% 和 32.51%。BnAm 型林带考察区的平均防风效能分别为 22.62%, 19.70% 和 19.41%。④垂直方向上, 林带对约 1.5 H 高度范围以下的气流起减速作用, 对此范围以上的气流起加速作用; 水平方向上, AmBn 型林带的防风效能带前、带中、带后均优于 BnAm 型林带。[结论] 林带的防风效能与两种树种沿风向出现的先后顺序有关, 从防护效能和防护距离考虑, 建议在防护区外围营建 AmBn 型林带。

关键词: 防护林带; 流场结构; 防风效能; 风向; 风洞试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0028-06

中图分类号: S727.2

文献参数: 马彦军, 李雪琳, 马瑞, 等. 前高后低型防风固沙林防风效应及其对风向的响应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 28-33. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.005. Ma Yanjun, Li Xuelin, Ma Rui, et al. Windproof efficiency of shelterbelt in high-low pattern and its response to wind directions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 28-33.

Windproof Efficiency of Shelterbelt in High-low Pattern and Its Response to Wind Directions

MA Yanjun¹, LI Xuelin¹, MA Rui¹, ZHANG Yinghua², WEI Linyuan², ZHANG Tongshuai¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand

Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] To study the windproof efficiency of shelterbelt composed by *Haloxylon ammodendron* and *Caragana korshinskii* and its response to wind directions in order to provide theoretical basis for shelterbelt construction on the periphery of desert oasis, desert road and desert railway. [Methods] Prototypes of *H. ammodendron* and *C. korshinskii* with different individual characteristics were used to make simulation plants, and then constructed into high-low shelterbelt, which was recorded as AmBn pattern. Here, the capital letter “A” represented the simulated plant *H. ammodendron*, “m” represented that the planting space was 15 cm×40 cm, the capital letter “B” represented the simulated plant *C. korshinskii*, and “n” represented that the planting space was 8.5 cm×25 cm. When the wind direction was opposite, the shelterbelt was

收稿日期: 2018-03-29

修回日期: 2018-04-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于土壤水分承载力的防风固沙林密度配置格局及防护效应”(31460221); 甘肃省高等学校科学研究项目“基于风洞试验的防风固沙林密度非均匀配置模型构建”(2016A-027)

第一作者: 马彦军(1975—), 男(回族), 甘肃省平凉市人, 博士, 副教授, 研究方向为荒漠生态及植物种质资源研究。E-mail: mazhjie@126.com。

通讯作者: 马瑞(1977—), 女(回族), 甘肃省兰州市人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠生态研究。E-mail: mr031103@126.com。

recorded as BnAm pattern. By the wind tunnel simulation experiments, the airflow field, wind speed acceleration rates and the windproof efficiency were analyzed with the controlled wind speed of 7, 10, 15 m/s. [Results] ① When the airflow reached to the front of the shelterbelt, the wind speed decreased overall. According to the variation intensity of wind speed, the air flow could be divided into 3 layers: the upper layer (above the 30 cm), the middle layer (5—20 cm), and the lower layer (below 3 cm). The speed recover point behind the shelterbelt in AmBn pattern and BnAm pattern was 23 H and 12.5 H, respectively. ② The wind shadow range of AmBn pattern was greater than that of BnAm pattern. The wind shadow core areas were formed at the canopy height of both “A” plant and “B” plant, namely, a dicaryon pattern was formed. ③ Under the controlling wind speed of 7, 10, 15 m/s, the average windproof efficiency of shelterbelt AmBn was 34.44%, 34.98% and 32.51%, respectively. The average windproof efficiency of shelterbelt BnAm was 22.62%, 19.70%, 19.41%, respectively. ④ In vertical direction, the forest belt played a role in slowing down the airflow below the height range of about 1.5 H, which accelerated the airflow above this range. In the horizontal direction, the windbreak efficiency of the AmBn type forest belt was better than that of the BnAm type forest belt before, within and after the belt. [Conclusion] The windproof efficiency of shelterbelts is related to the occurrence order of the plants along the wind direction. In view of the protection efficiency and protection distance, the shelterbelt in AmBn pattern is suggested to be constructed.

Keywords: shelterbelt; flow field structure; windproof efficiency; wind direction; wind tunnel test

防风固沙林的主要功能是降低风速,防止就地起沙和阻截外来风沙流。从造林树种的选择和配置来看,中国干旱沙区在立地条件较差的区域仍以单一树种组成的纯林为主,部分保护区和保护路段营建有两种或两种以上树种组成的复合林带。在空间配置上,复合林带有株间配置、行间配置和带状配置等 3 种模式,其中,以株间配置和行间配置较为常见。杨婷婷^[1]、乌拉^[2]对新疆杨(*Populus bolleana*) + 青杨(*Populus cathayana*) + 沙枣(*Laeagnus angustifolia*)、二白杨(*Populus gansuensis*) + 杜梨(*Pyrus betuli folia*)模式的林带的防风效能从疏透度的角度进行了研究,所得防风效能为 11.7%~35%;彭帅^[3]、付亚星等^[4]对榆树(*Ulmus pumila*) + 柠条(*Caragana korshinskii*)、杨树(*Populus*) + 榆树、杨树/榆树 + 灌木模式的林带的防风效能从空间分布上进行了研究,所得最大防风效能点在带后约 3 H 处。郑锬^[5]对木麻黄(*Casuarina equisetifolia*) + 湿地松(*Pinus elliottii*)模式的海岸防护林的防风效能从混交比例的角度进行了研究,所得防风效能为 49.3%~52.1%,各混交比例下的最大风速降幅均出现在带内到带后 1 H 的范围内。

目前对带状配置型防风固沙林防风效能的研究还未见报道。本研究拟以带状配置型复合林带为研

究对象,通过风洞模拟试验,对林带主要影响区的风速变化、气流加速率、防风效能及防护范围等进行分析,探索两种不同特征的树种经带状配置后形成的复合林带的防风效应及其对风向的响应,以期为荒漠绿洲、沙漠公路、沙漠铁路等防护区人工防风固沙林的营建提供理论依据。

1 研究方法

1.1 试验设备

风洞模拟试验在甘肃省治沙研究所风沙环境风洞实验室进行,该风洞由中国航空空气动力研究院于 2013 年设计建造,可用于各种沙害防治措施的模拟试验研究。风洞气流为直流下吹式,可调风速范围 4~35 m/s。洞体总长为 38.9 m,由进气段、动力段、整流段、收缩段、试验段、可调试验段和扩散段组成。其中试验段长 16 m,截面为 1.2 m×1.2 m,可调试验段长 2.5 m,截面 1.2 m×1.3 m。

1.2 试验材料及林带设计

依据梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、柠条的空间构型特征及几何相似准则,依比例定制仿真植物模型 A,分别记作仿真植物 A(梭梭)和仿真植物 B(柠条),模型相关参数见表 1。

表 1 研究用仿真植物模型参数

植物代码	株高/cm	冠幅/cm	冠厚/cm	冠下高/cm	分枝角度/(°)	分枝枝长/cm	总分枝率/%	分枝分维数	透风系数
A	22	15×15	14	8	30°~50°	9.5~20	1.10	0.64	0.40
B	16	7×7	13	3	20°~35°	9~14	0.89	0.39	0.30

沿风向,将 2 种仿真植物配置成 AmBn 型林带, A 表示林带的前 3 行为仿真植物梭梭, m 表示其株距为 15 cm, 行距为 40 cm, B 表示林带的后 3 行为仿真植物柠条, n 表示其株距为 8.5 cm, 行距为 25 cm, 两种植物承接区的行距取均值, 即 32.5 cm, 试验测定时, 风向垂直于林带由 A 植物区吹向 B 植物区。将 AmBn 型林带中 A, B 植物出现顺序调换, 即风由 B 植物区吹向 A 植物区, 此时, 林带记为 BnAm 型林带。上述林带中, 行与行水平向交错 1/2 株距, 形成品字形格局。

1.3 风速观测

测点沿风洞中轴线布设, 将林带前的测点标记为负值, 林带第 1 行之后的测点标记为正值。依据预试验, 将风速测定区范围确定为带前 60 cm 至带后 690 cm。每个测点测定 1, 3, 5, 8, 13, 20, 30, 40, 60 cm 共 9 个高度的风速值。本研究中试验风速, 即风洞进口指示风速分别为 7, 10, 15 m/s, 以各试验风速下无植物配置时测定的风速为对照(CK)。

1.4 数据处理与图形绘制

1.4.1 气流加速率计算 气流加速率可以直接反映林带对气流的加速情况, 计算公式如下:

$$a_{kij} = v_{kij} / v_{kj} \quad (1)$$

式中: k ——试验风速 (m/s); i ——风速测定点; j ——风速垂直测量高度 (cm); a_{kij} ——气流加速率; v_{kij} ——坐标 (i, j) 点在 k 风速下的测量值 (m/s); v_{kj} ——在 k 风速下的对照风速值 (m/s)。当 $a_{kij} > 1$ 时, 表示林带对气流有加速的作用, 风速增加; $a_{kij} < 1$ 时, 表示林带对气流有减速的作用, 风速降低; $a_{kij} = 1$ 时, 表示林带对气流没有影响, 风速保持不变。

1.4.2 防风效能计算 防风效能是体现防护林带防护能力的一项重要指标, 计算公式如下:

$$E_{kij} = (v_{kj} - v_{kij}) / v_{kj} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_{kij} ——林带后 i 距离处、高度 j 处的防风效能, 用于反映风速被削弱的程度; v_{kj}, v_{kij} ——与气流加速率公式所述一致。

1.4.3 图形绘制 基础数据处理及风速变化图、防风效能图的绘制在 Excel 软件中完成, 气流加速率等值线图的绘制在 Surfer 8.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 风速轴向变化特征

如图 1 所示, 各试验风速下, 当风洞内无植物时,

测定风速均随高度的增加而增加, 布设林带后, 各高度风速均发生明显变化, 气流到达林带前速度整体降低, 到达 AmBn 型林带的第一行或 BnAm 型林带的第 4 行时流速出现明显分化, 依据风速变化特征, 可将气流层划分为上 (30 cm 以上)、中 (5—20 cm)、下 (3 cm 以下) 3 层。上部气流层受林带的影响相对较小, 气流受林带抬升, 速度升高, 带后速度降低并出现次级分化, 即距冠层较近的 30 cm 高度处的风速在 A 植物区后出现显著降低, 尤其在 AmBn 型林带上方表现更为明显, 而 40, 60 cm 高度处的风速变化则较为缓慢; 中部气流层位于复合林带的冠层高度, 气流到达林带区时, 受枝叶的阻滞、切割作用, 能量损耗, 速度出现大幅度波动式降低; 下部气流层受床面和林带的共同影响, 在到达林带背风区之前风速持续波动降低, 在林带后一定距离处开始恢复, 当 A 植物处于上风向时, 恢复点在带后的 510 cm, 约 23 H 处 ($H = 22$ cm), 而当 B 植物处于上风向时, 恢复点在带后 275 cm, 约 12.5 H 处。

2.2 气流加速率变化特征

由气流加速率等值线(图 2)可知风速加速区 ($a_{kij} > 1$) 和减速区 ($a_{kij} < 1$) 的分布范围, 可以看出, 当气流到达 AmBn 型林带后均在 400 mm 高度, 即 1.82 倍梭梭树高以上形成风速加速区, 且随着试验风速增大到 10, 15 m/s 时, 风速加速区的起始形成点向下风向位移, 从而使前沿风速减速区的影响范围扩大。而对于 BnAm 型林带, 风速加速区在带前 -60 cm 处 (2.73 H) 就已形成。此外, 两种林带除了在林带上方形成加速区外, 在相邻植株间的狭管效应下, 近地层气流到达林带内也均出现了小范围的加速情况。

本研究定义风速被消弱 50% 以上, 即 $a_{kij} < 0.5$ 的区域为风影区; 风速被消弱 80% 以上, 即 $a_{kij} < 0.2$ 的区域为风影核心区。则由图 2 可知, 当株高 22 cm 的 A 植物处于上风向时, 其风影区的范围明显大于株高 16 cm 的 B 植物处于上风向时, 尤其是在水平范围上。风影核心区是受林带影响, 风速降低幅度最大的区域, 从风影核心区的数量和高度上看, 两种配置模式下均在 A, B 植株区各出现一个风影核心区, 形成双核模式, 每个核的高度与 A, B 植物冠层的分布高度一致, 而这一分布格局可能是影响风速减速区分布范围及强度的关键因素。显然, AmBn 型林带风速减速区的范围更广, 风速降低幅度更大。

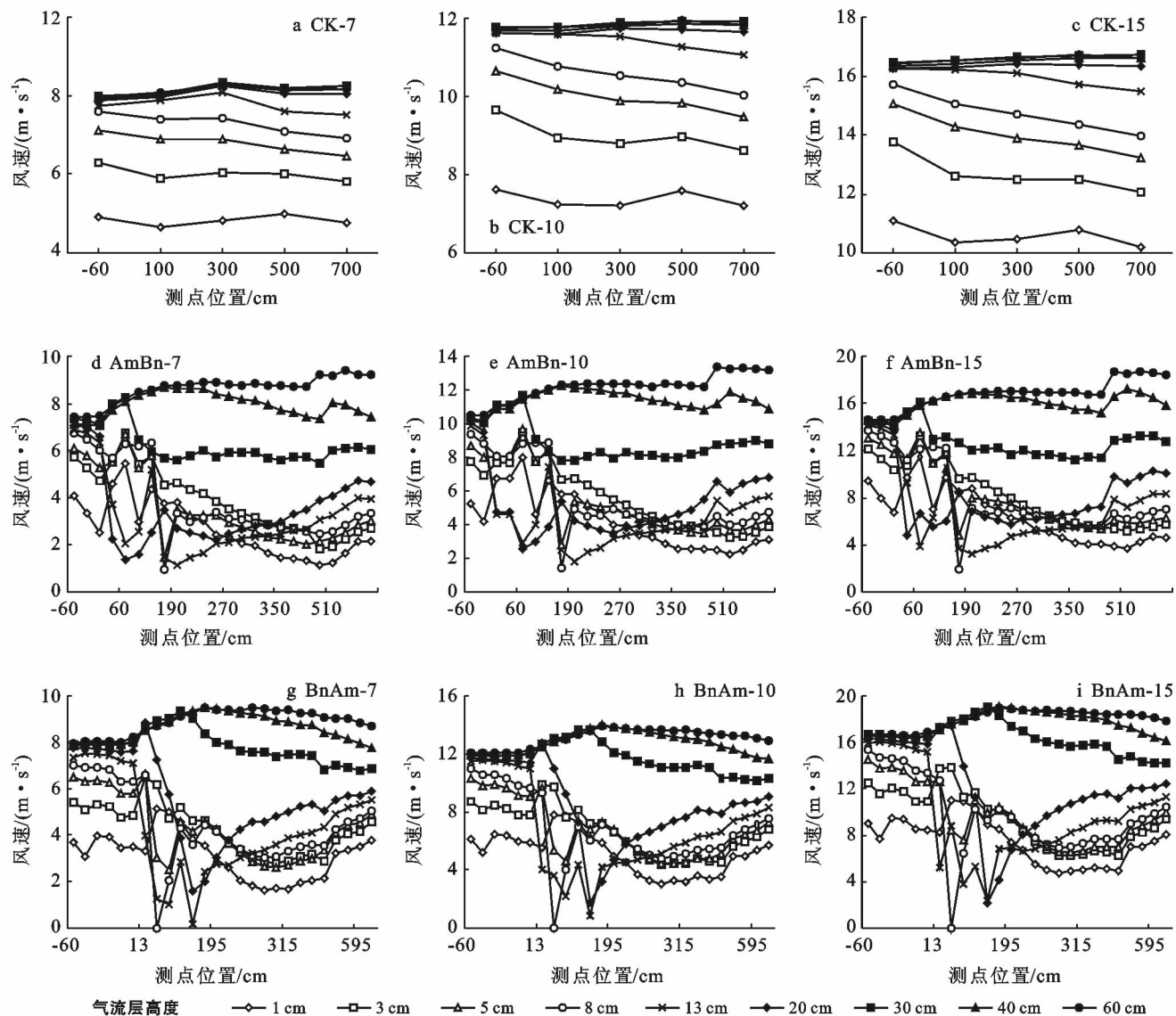


图 1 各试验风速下不同高度层风速轴向变化特征

2.3 防风效能变化特征

2.3.1 平均防风效能 防风效能是防风固沙林防护效益最主要的评价指标之一。在 7, 10, 15 m/s 试验风速下, AmBn 型林带考察区的平均防护效能分别为 34.44%, 34.98% 和 32.51%; BnAm 型林带考察区的平均防风效能分别为 22.62%, 19.70% 和 19.41%, 低于 AmBn 型林带 11.82, 15.28, 13.10 个百分点。因此, 就防护效能的均值来看, AmBn 型林带明显优于 BnAm 型林带。

2.3.2 防风效能垂直变化特征 以 7 m/s 试验风速为例。从防风效能的垂直分布(图 3)来看, 2 种防风固沙林的防风效能主要体现在 A 植物的植株高度($H = 22$ cm)以下, 最大值在 A 植物的冠层中心高度处, 分别为 58.76% (AmBn 型) 和 49.04% (BnAm 型), 最小值在距床面 3 cm 的高度处, 分别为 35.25%

(AmBn 型) 和 30.25% (BnAm 型)。在树高以上, 防风效能大幅度降低, 并在 30~40 cm 高度以上为负值, 这说明林带对气流产生减速作用的垂直高度区域主要是在 1.5 倍树高范围内, 而对此范围以上的气流起加速作用。

2.3.3 防风效能水平变化特征 带前、带后防护效能及带后防护距离关系到防风固沙林在建植区以外的防护效果。从 7 m/s 试验风速下防风效能的水平变化(图 4)来看, 2 种类型林带 0—60 cm 高度的平均防护效能, 在总趋势上均为先增后减, 相比之下, AmBn 型林带在带前、带后的平均防风效能均优于 BnAm 型林带。在带后, AmBn 型林带和 BnAm 型林带平均防风效能的最大值分别出现在 450 cm (20.5 H) 和 280 cm (12.7 H) 处, 此距离点之后防风效能开始降低, 从降低趋势来看, AmBn 型林带具有较大的防护距离。

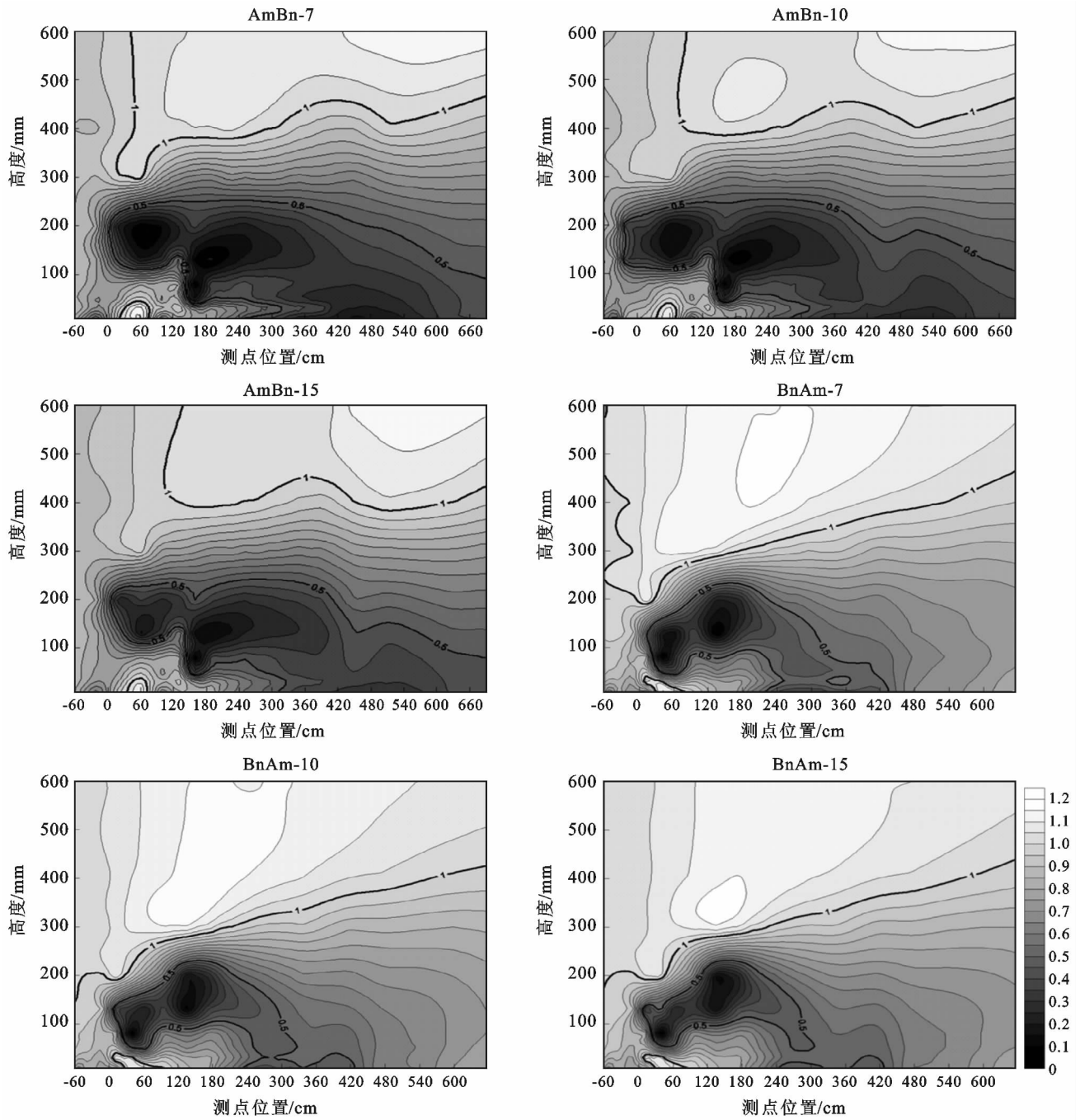


图 2 各试验风速下气流加速率等值线分布

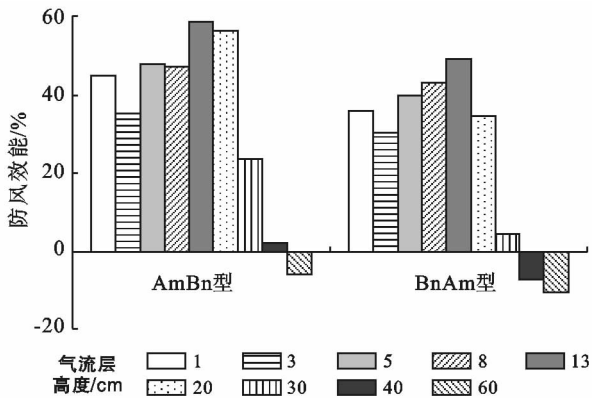


图 3 7 m/s 风速下防风效能垂直变化

此外,由于植株空间构型引起不同高度层气流能量消耗元的差异,使防风效能水平变化特征也存在高度差异。其中,13 cm 为 A 植物的冠层中心高度,同时也处在 B 植物冠层所处的高度层内,其防风效能在林带背风侧单调降低;而受枝干和床面粗糙度双重影响的近地层 1 cm 处的防风效能在林带内均出现负值,其负值区即对应于近地层风速加速区($a_{kij} > 1$) (见图 2),林带后该高度处的防风效能出现先增后减的趋势,BnAm 型林带递减幅度大于 AmBn 型林带。

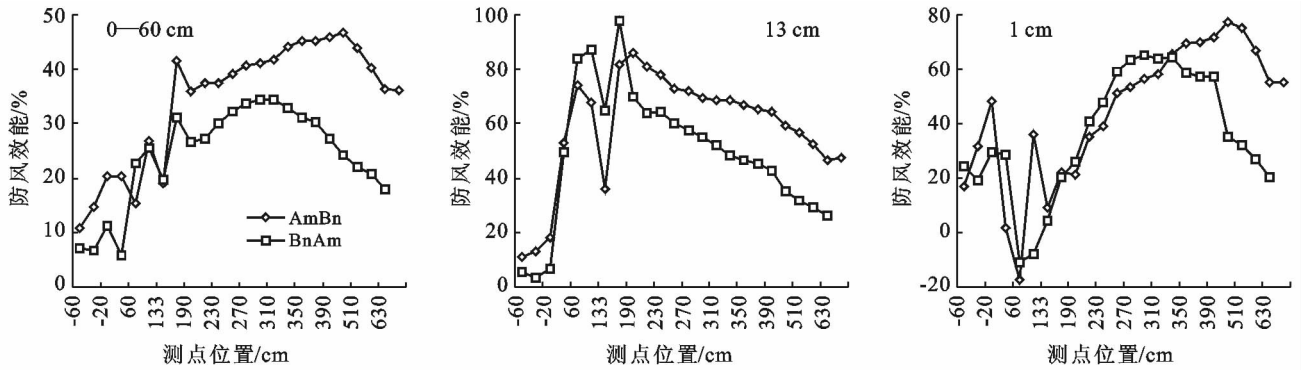


图 4 7 m/s 试验风速下不同高度防风效能水平变化

3 讨论

防护林学最核心的问题是防护林的密度、配置格局及防护效应。大量研究表明,防护林的防护效应与树种的个体特征^[6-7],分布格局^[8-11]、带宽^[12-14]以及林分密度^[13,15-16]等多种因素有关。一般来说,由同一树种组成的林带由于植株个体的几何形状和空间构型相近,因此,密度是影响整个防护林参数,如孔隙率、体积密度以及空间流场的关键因子,而对于由两种及两种以上树种组成的防护林来说,由于不同树种的高度、冠幅、空间构型、枝叶量等个体特征的不同,使得林带结构更为复杂,此时,除了密度,植株的空间配置模式也必将成为影响林带防风效应的关键因素。

本研究根据不同树种对风速影响的差异性,将具有不同个体特征的 A,B 植物沿风向配置成前高后低的 AmBn 型和前低后高的 BnAm 型林带,其风速测定结果表明 AmBn 型林带无论在风速降幅上,还是在防护范围上均明显优于 BnAm 型林带,这说明影响该类型林带防风效能的因素除了上述因子外,还与该组合模式下气流到达不同树种的先后顺序有关。显然,当 A 植物处于上风向时,复合林带表现出更为显著的防风效果。从气流能量消耗的角度来看,这一影响主要是由于具有不同个体特征,尤其是高度不同的 A,B 植物对不同高度层气流能量的消耗强度不同所致。因此,当相反风向作用时,初始气流的能量消耗模式发生了根本变化,并体现在风速、气流加速度以及防风效能的空间变化上,正如 Heisler 等^[17]和 Zhou 等^[6]所指出的,林带结构越复杂,越难在流场和结构间建立关系。

4 结论

(1) 气流到达林带前速度整体降低,到达林带后分化上(30 cm 以上)、中(5—20 cm)、下(3 cm 以下)3 层。下部气流层在 AmBn 型和 BnAm 型林带后的风

速恢复点分别位于 23 H 处和 12.5 H 处。

(2) AmBn 型林带风影区的范围明显大于 BnAm 型林带;两种林带在 A,B 植物区的上方各出现一个风影核心区($a_{ij} < 0.2$),形成双核模式,核的高度与 A,B 植物冠层的分布高度一致。

(3) 在 7,10,15 m/s 试验风速下,AmBn 型林带和 BnAm 型林带考察区的平均防护效能分别为 34.44%, 34.98%, 32.51% 和 22.62%, 19.70%, 19.41%;垂直方向上,林带对气流产生减速作用的区域主要是树高 1.5 倍的范围内,而对此范围以上的气流起加速作用;水平方向上,AmBn 型林带的防风效能带前、带中、带后均优于 BnAm 型林带。

(4) 在具有明显主导风/盛行风作用的防护区,建议按照 AmBn 型林带配置模式将梭梭等高度较高、冠幅较大的树种配置于上风向,而将体型较小的柠条等植物配置于靠近防护对象一侧的下风向。

[参 考 文 献]

[1] 杨婷婷. 乌兰布和沙漠绿洲风蚀防护体系效益评价及模式探讨[D]. 北京:北京林业大学,2006.
 [2] 乌拉. 乌兰布和沙漠绿洲风蚀防护体系防护效果的研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2007.
 [3] 彭帅. 河北坝上农田防护林带结构配置及防护效益研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2015.
 [4] 付亚星,王乐,彭帅,等. 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[J]. 水土保持研究,2014,21(3):279-283.
 [5] 郑锴. 沙质海岸木麻黄防护林的结构配置与防护效能研究[D]. 福州:福建农林大学,2008.
 [6] Zhou X H, Brandle J R., Takle E S. et al. Estimation of the three-dimensional aerodynamic structure of a green ash shelterbelt[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111:93-108.
 [7] Perera M D A E S. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981,8(1):93-104.

- 技与经济,2017,1(1):67-68.
- [7] 黄宁,王正师,李广.高寒山区降雪与风吹雪过程及其对积雪分布影响的研究进展[C]//上海:中国力学大会,2015.
- [8] Durand Y, Guyomarc'H G, Mérindol L, et al. Improvement of a numerical snow drift model and field validation [J]. Cold Regions Science & Technology, 2005,43(1/2):93-103.
- [9] 吴鹏,陈发明,刘健,等.基于 Fluent 防雪栅栏数值仿真研究[J].交通科技与经济,2016,18(6):57-60.
- [10] 包岩峰,丁国栋,赵媛媛,等.风吹雪灾害防护林格局及配置研究[J].东北农业大学学报,2012,43(11):109-115.
- [11] 薛万新.新疆风吹雪害养护防治典型工程应用[C]//成都:中国公路学会,2016.
- [12] 刘多特,李永乐,汪斌.风雪绕流数值模拟的积雪预测模型研究[J].工程力学,2016,33(8):122-131.
- [13] 周炬毅,刘长卿,顾明,等.拉格朗日方法在风雪运动模拟中的应用[J].工程力学,2015,32(1):36-42.
- [14] 代晓晴.跃移层风吹雪升华的数值模拟[D].兰州:兰州大学,2015.
- [15] 王中隆.中国风雪流及其防治研究[M].兰州:兰州大学出版社,2001.
- [16] Trokop A, Procter E S. A new methodology for planning snow drift fences in alpine terrain [J]. Cold Regions Science & Technology, 2016,132:33-43.
- [17] Schmidt R A. Measuring particle size and snowfall intensity in drifting snow[J]. Cold Regions Science & Technology, 1984,9(2):121-129.
- [18] 张威伟,张光辉.风吹雪的成形机理分析[J].中国水运:理论版,2006(3):67-68.
- [19] Tominaga Y, Okaze T, Mochida A. CFD modeling of snowdrift around a building: An overview of models and evaluation of a new approach[J]. Building & Environment, 2011,46(4):899-910.
- [20] 王中隆,张志忠.中国风吹雪区划[J].山地学报,1999,17(4):312-317.
- [21] 刘洪鹄,林燕.中国风雪流的变化趋势和时空分布规律[J].干旱区研究,2005,22(1):125-129.

(上接第 33 页)

- [8] 张莹花,康才周,刘世增,等.沙地云杉(*Picea mongolica*)农田防护林带不同配置模式的防风效果[J].中国沙漠,2017,37(5):859-866.
- [9] 杨红艳,戴晟懋,乐林,等.不同分布格局低覆盖度油蒿群丛防风效果[J].林业科学,2008,44(5):11-16.
- [10] 杨文斌,董慧龙,卢琦,等.低覆盖度固沙林的乔木分布格局与防风效果[J].生态学报,2011,31(17):5000-5008.
- [11] 梁海荣,王晶莹,卢琦,等.低覆盖度乔木两种分布格局内风速流场和防风效果风洞试验[J].中国沙漠,2009,29(6):1021-1028.
- [12] 李雪琳,马彦军,马瑞,等.不同带宽的防风固沙林流场结构及防风效能风洞试验[J].中国沙漠,2018,38(5):1-9.
- [13] Torita H, Satou H. Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007,145(3):186-194.
- [14] Wang Hao, Takle E S. On shelter efficiency of shelterbelts in oblique wind [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996,81(1):95-117.
- [15] 马瑞,王继和,刘虎俊,等.不同密度梭梭林对风速的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):249-252.
- [16] Ma Rui, Wang Jihe, Qu Jianjun, et al. Effectiveness of shelterbelt with a non-uniform density distribution [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010,98(12):767-771.
- [17] Heisler G M, Dewalle D R. Effects of windbreak structure on wind flow [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1988,22/23(88):41-69.