

前密后疏结构林带防风效应的风洞试验

李亚琦¹, 刘虎俊^{1,2*}, 刘开琳², 万翔², 刘淑娟², 李学敏²

(1. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要:通过2种非均匀结构林带对风速效应比较,探索低覆盖度的防护林结构模式,为干旱区防风固沙林建植提供参考。在风洞内布设覆盖度25%和30%的前密后疏结构的仿真防护林带,测定在6 m/s和10 m/s风速的林带水平与垂直方向风速,分析风场变化模式。结果表明,覆盖度30%林带与25%的防风效能差异不显著($P>0.05$),相同覆盖度林前与林后的风速降低率差异显著($P<0.05$)。覆盖度25%的防护林带对6 m/s风速降低率 >10 m/s的分别有88.32%和80.52%的观测点的风速降低;有2个较为明显的减速区,林带前2倍树高,第1个林带的第1行与第2行之间区域,即距第1行之后 $1\sim 2H$ 范围的风速降低最大。相同风速下,覆盖度25%的风速减速区较30%的面积大。覆盖度25%的林带降低风速率最大为83.38%,是覆盖度30%的风速降低率的1.11倍,25%覆盖度的前密后疏林带降低风速明显。适宜林带结构可提高低覆盖防护林效能。

关键词:林带结构;仿真防护林;疏密结构;风速;防护效能;风洞实验

中图分类号:S157.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0126-06

Wind Tunnel Experiment on Windbreak Efficiency of the Forest Belts with the Structures of Dense in Front Thin in Rear

LI Ya-qi¹, LIU Hu-jun^{1,2*}, LIU Kai-lin², WAN Xiang², LIU Shu-juan², LI Xue-min²

(1. Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to explore the optimal structural modes of the forest belts with low plant coverage for windbreak and sand fixation, and to provide references for the construction of the belts, the windbreak efficiencies of two kinds of the shelterbelts with heterogeneous structures were measured. The simulated shelterbelts (25% and 30% in coverage) with the structures of dense in front and thin in rear were set up in a wind tunnel. The horizontal and vertical wind speed changes at 6 and 10 m/s were measured to analyze the windbreak efficiency. There was no significant difference between the shelterbelts with the coverage of 25% and 30% ($P>0.05$), but the wind speed variation rate of the 25% coverage was higher than that of the 30% coverage. The wind speed reduction rate of 6 m/s was greater than that of 10 m/s, and the wind speed of observation points decreased by 88.32% and 80.52%, respectively. There existed two obvious deceleration zones; the first one was located in front of the shelterbelt with the distance of two times of the tree height, and the second was one between the first and second row of the shelterbelt, that was $20\sim 40$ cm ($1\sim 2H$) after the first row, and the wind speed decreased the most. Under the same wind speed, the deceleration area of 25% coverage was larger than that of 30%. Suitable arrangement of forest belt can promote the windbreak efficacy for the belt with overage rate.

Key words: forest belt structure; simulation shelterbelt; dense and thin structure; velocity; protection efficiency

收稿日期: 2022-01-08 修回日期: 2022-04-06

基金项目: 甘肃省林草局项目: “低覆盖度非均匀配置防风固沙林防护效益的风洞实验研究”(ky19-03); 甘肃省科技计划项目“河西走廊绿洲生态防护体系健康评价及精准修复技术与示范”(21ZD4FA010)共同资助。

第一作者: 李亚琦。研究方向: 水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1668258130@qq.com

* 通信作者: 刘虎俊, 博士, 研究员。研究方向: 荒漠化防治。E-mail: hujunliu66@163.com

ciency; wind tunnel experiment

我国干旱区面积约占陆地面积的32.8%,受水资源限制,这里大部分地区植被稀疏^[1]。例如民勤地区的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林覆盖度只有12%~18%,达不到植物防风固沙覆盖度^[2-3]。进行低覆盖度植被对风速影响的定量研究不仅具有重要的理论意义,而且对于人工造林模式探讨及其作用确定具有十分重要的现实意义。植被覆盖度是评价防护林特征的重要指标之一^[4-5],而有效防护面积则是评价防护林效益和确定林带建设最主要的数量指标,有效防护范围包括水平距离和垂直方向^[6]。有效防护范围的大小与许多因子有关,但最主要的是和林带的疏透度和高度有关^[7]。而林带疏透度主要受林带结构影响^[8-9]。如果设计合理,低覆盖度防护林也能达到防风固沙效能^[10],适宜结构还可提高防护林的防护效益^[11]。树种及林带的株行距及其带宽又影响林带结构,前期研究表明林带组成行数达到一定值后增加行数影响风速差异不显著^[12]。植被覆盖度相同情况下,结构决定防护林的效益高低^[13-14],研究表明相同密度不同树形的稀疏植被对输沙率影响不同^[15]。近年来,低覆盖度(<30%)防护林研究关注较多,通过调整低覆盖度防护林的结构,可以提高其防风固沙效益^[16]。伴随观测仪器和仿真材料植物的出现及应用,仿真模拟研究已然成为研究防护林中不可或缺的方法^[17-19],对防护林结构与效能等进行了风洞模拟试验^[20,21],可为防护林精准建设,及其效能等评价提供了一定参考。防护林结构不仅包括树种配置^[22],进行株间混交搭配^[23],也可以通过改变相同树种行带结构提高防护效能^[9]。同树种不同结构低覆盖防护林防护效能比较研究不仅可为干旱区防护林理论研究提供参考,也可为干旱区植被建设提供借鉴。本文通过风洞模拟实验数据,对相同树种不同结构的低覆盖度防护林降低风速的效应进行了实验研究,评价不同结构

的仿真防护林带的防风效能,以期防风固沙林设计提供依据。

1 材料与方法

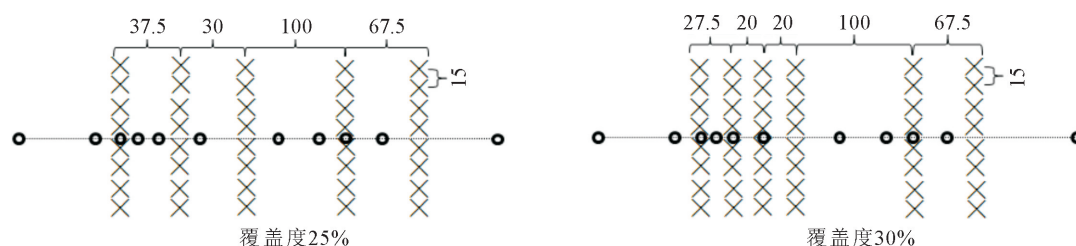
1.1 仿真灌木

选取无叶型仿真植物(类似梭梭),植株高 $H=20$ cm,冠幅 $C=15$ cm \times 15 cm,树冠投影面积 $A=177$ cm²,冠下高3 cm,分枝角度 $30^\circ\sim 40^\circ$,枝长9.5~20 cm,疏透度45%~50%。

1.2 试验布置

本试验在甘肃省治沙研究所风沙环境风洞实验室中进行,该风洞为直流下吹式,洞体总长为38.9 m,可调风速范围为4~35 m/s。其中风洞试验段长为16 m,截面为1.2 m \times 1.2 m。本试验面积为1.2 m \times 2.4 m。为获得稳定气流并且防止因床面厚度而产生的前沿附面层分离现象,在林带前铺设空白床面,并在空白床面的前端铺设流线型气流抬升板。

低覆盖度防护林结构以行带结构较好^[10],而民勤地区流动沙地固定的植被盖度必须达到30%以上^[2]。因此,本模拟试验的防护林结构设置为带状结构,选择同种仿真植物组成的行带结构仿真防护林,覆盖度为25.0%和30.0%。参试仿真林为前密后疏型带状结构,带间距为株高的5倍,即 $5H=100$ cm,带内的株距和行距根据覆盖度确定(图1)。其中覆盖度25.0%仿真林的结构为上风向3行1带,行间距30 cm,株间距15 cm;后一带行间距60 cm,株间距15 cm,两带间距100 cm。覆盖度30.0%仿真林的结构为上风向4行1带,行间距20 cm,株间距15 cm;后一带行间距60 cm,株间距15 cm,两带间距100 cm。这样2种结构仿真植物所占试验面积为120 cm \times 235 cm,形成前密后疏型带状结构仿真防护林(图1)。



注:×表示仿真植物,○为风速观测点。单位为cm

图1 风洞模拟试验的仿真防护林结构与观测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shelterbelt configuration and observation point in wind tunnel simulation experiment configuration

1.3 风速观测与防风效能计算

1.3.1 测点布设与风速观测 民勤地区的起沙风

速为5~6 m/s^[2,9],大风的危害性更大^[12],且林带防护距离也会随之缩短^[6-7]。参照前人研究成

果^[6-7,13],确定本试验风速为 6 m/s 和 10 m/s。水平方向观测的总距离为 320 cm,垂直方向观测的高度为 30 cm,分 1、3、5、8、13、20、30 cm 7 个点。用皮托管测定仿真防护林带前、林带内部和林带后的风速值。水平方向测点均分布在中轴线上,以仿真林第 1 行为参照行,分别设置测点位于林带:第 1 行前 $-5H$ (-100 cm)、第 1 行前 $-1H$ (-20 cm)、第 1 行的仿真植物之间 $0H$ (0 cm)、第 1 行后 $+0.5H$ (10 cm)、第 1 行后 $+1H$ (20 cm)、第 1 行后 $2H$ (40 cm)、第 1 行后 $+5H$ (100 cm)、位于第 2 带第 1 行前 $1H$ (距第 1 带的第 1 行 140 cm)、位于第 2 带第 1 行中间 $0H$ (距第 1 带的第 1 行 160 cm)、位于第 2 带第 2 行中间(距第 1 带的第 1 行 190 cm)、位于林带最后一行后 $5H$ (第 2 带后 100 cm,距第 1 带的第 1 行 320 cm)。在空洞的仿真林带内,沿中轴线设置 11 个测点,观测林带内外和高度的风速作为对照。

1.3.2 防风效能计算 防风效能用所计算风速变化率(E_{kij})表示,以此比较说明防护林带对风速的影响即防风效能,计算公式如下:

$$E_{kij} = \frac{V_{zk}/V_{zij}}{V_{zk}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_{kij} 为相对防风效能,%; V_{zk} 为高度 Z 的对照风速(包括风速 6 m/s 和 10 m/s); V_{zij} 为林内或林带前后的观测风速,m/s。

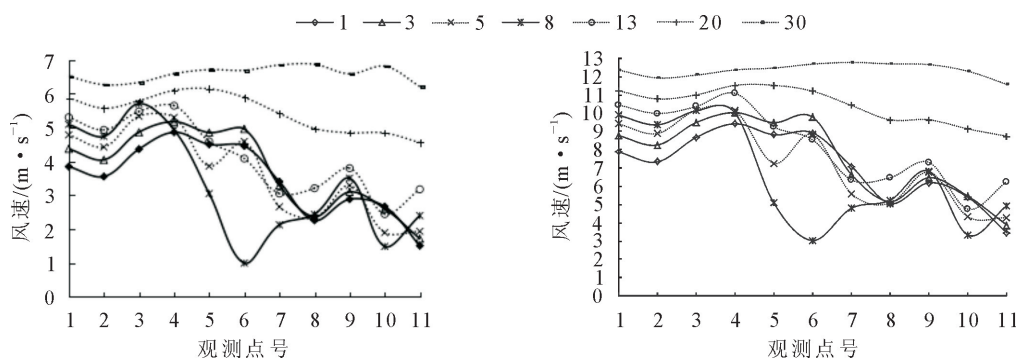


图 2 覆盖度 25% 的防护林带的风速(左图 6 m/s、右图 10 m/s)水平变化

Fig. 2 The horizontal variation of wind speed (left figure 6 m/s and right figure 10 m/s) in the shelterbelt with 25% coverage

2.2 垂直方向风速变化

在垂直方向,观测高度 13 cm 之下的风速降低率差异不显著($P > 0.05$),大于树高各点的风速降低率与树高之下的差异显著($P < 0.05$),风速降低区域位于树高以上。覆盖度 25% 和 30% 的风速降低趋势相似,2 种防护林的风速变化较大的高度均为 8 cm(图 2、图 3)。

覆盖度 25% 仿真林的所有观测点在 20 cm 以下的风速都降低至对照风速 6 m/s 以下,而风速为 10 m/s 时,则是 13 cm 以下的风速都降低至对照风速 10 m/s 以下,但是不同高度风速降低率差异不显

著($P > 0.05$)。覆盖度 30% 仿真林的所有观测点在 20 cm 以下的风速都降低至对照风速 6 m/s 以下,而风速为 10 m/s 时,则是 13 cm 以下的风速都降低至对照风速 10 m/s 以下,不同高度风速降低率差异不显著($P > 0.05$)。仿真树高 20 cm 以下 89.62% 观测点的风速降至 5 m/s 以下;高度 8 cm 范围的所有观测点的 6 m/s 风速都降低至起沙风速(5 m/s)以下,10 m/s 风速的第 2 带林中和林后降低至 5 m/s 以下。无论是覆盖度 25% 还是 30%,风速 6 m/s 和 10 m/s 的垂直方向风速率最大的是高度 8 cm(变异系数 42.22%)。其次为高度 5、1 cm 和 13 cm 的

2 结果与分析

在相同风速下,覆盖度 30% 的林带前后风速降低率 $> 25\%$ 的,林前与林后风速差异显著($P < 0.05$),2 种覆盖度林带的总体风速降低率差异不显著($P > 0.05$)。

2.1 林带内外的风速增减

在水平方向,风速降低率较大区域有 2 个区段:林前(观测点 1 和 2)、第 1 带林内(图 2)。风速降低率最大区域出现在林带第 2 行之后(第 1 行后 $2H$)的范围,在风速 6 m/s 时,覆盖度 25% 的风降低率最大为 83.38%,覆盖度 30% 仿真林风速降低率最大为 75.02%,仿真树高(20 cm)以下有 88.32% 观测点的风速降至 5 m/s 以下(图 2、图 3)。在风速 10 m/s 时,覆盖度 25% 的仿真林带降低风速率最大为 69.58%,仿真树高(20 cm)以下 80.52% 观测点的风速降至 10 m/s 以下。覆盖度 30% 仿真林风速降低率最大为 65.59%,仿真树高(20 cm)以下也是 80.52% 观测点的风速降至 10 m/s 以下。无论是覆盖度 25% 还是 30%,水平方向 10 m/s 风速变率(平均变异系数 28.13%)小于 6 m/s(平均变异系数 32.77%)。

风速率较大(图2、图3)。

2.3 2种覆盖度的林带内风场特征

风速降低率最大区域出现在林带第1行之后20 cm(10H)的范围。无论是风速6 m/s还是10 m/s,都有2个较为明显的减速区:林带前2倍树高,第1个林带第1行与第2行之间,即距第1行之后20~40 cm(1~2H)范围(图3~图5)。风速变率最大高度为8 cm处,6 m/s和10 m/s平均降低风速42.37%和34.09%。(图4、图5)。

覆盖度25%,风速6 m/s和10 m/s的较大减速区面积在林带内第1行后20~40 cm,高度3~8

cm,其次在林前40 cm之外也形成相对减速区。而10 m/s风速减速区较复杂,面积小于6 m/s的(图5、图6)。当风速6 m/s时,覆盖度30%林带也形成了2个较为明显的减速区:一是在林前-20~100 cm(-1H~5H),6 m/s的风速降低率较大的面积大于10 m/s的。风速6 m/s时,覆盖度30%林带的林前40~100 cm(-1H~5H倍树高)处风速降低最大。相同风速,覆盖度25%的风速减速区较30%的面积较大。在林前覆盖度30%的风速减速区较25%的复杂,且较大减速区距林带更远。

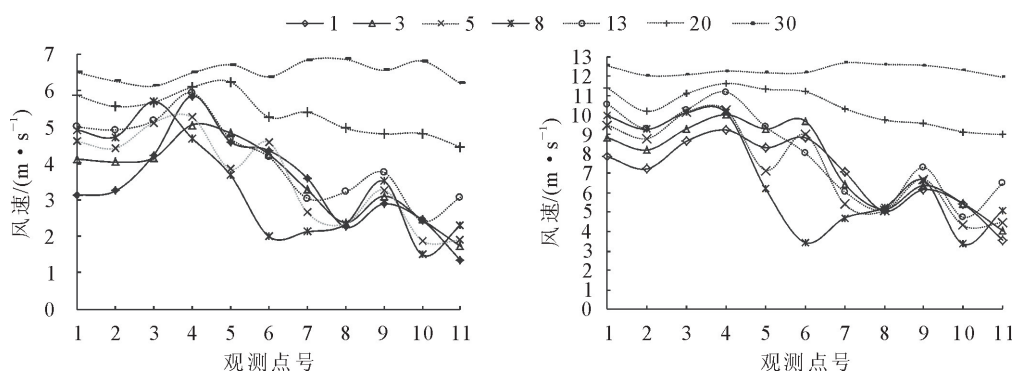


图3 覆盖度30%的防护林带的风速(左图6 m/s和右图10 m/s)水平变化

Fig. 3 The horizontal variation of wind speed (left figure 6 m/s and right figure 10 m/s) in shelterbelt with 30% coverage

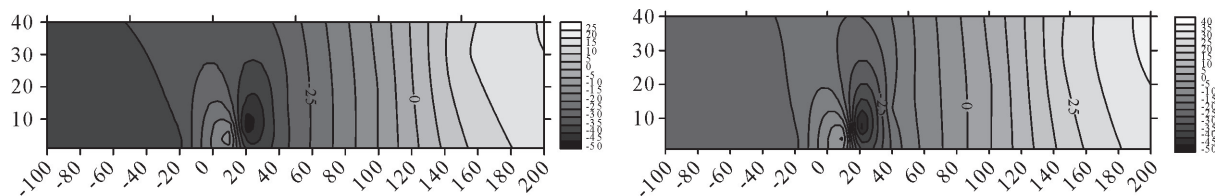


图4 覆盖度25%(风速6 m/s左图和风速10 m/s右图)仿真林的风速降低率空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of wind speed reduction rate of simulated forest with 25% coverage
(left: wind speed 6 m/s; right: 10 m/s)

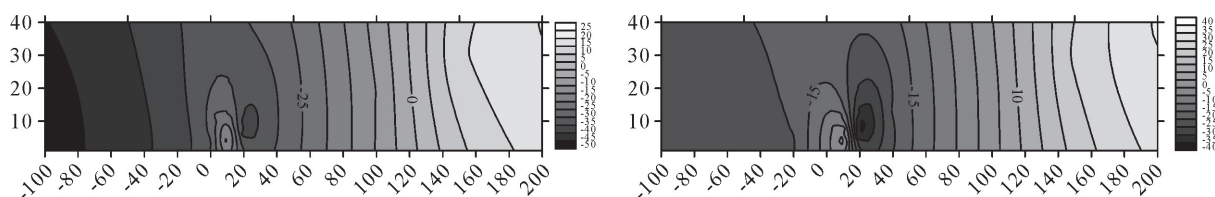


图5 覆盖度30%(风速6 m/s左图和风速10 m/s右图)仿真林的风速降低率空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of wind speed reduction rate of simulated forest with 30% coverage
(left: wind speed 6 m/s; right: 10 m/s)

3 讨论

低覆盖度防护林适宜结构提高防风效能:覆盖度25%的风降低率最大为83.38%,覆盖度30%仿真林风速降低率最大为75.02%,覆盖度25%和30%前密后疏带状结构的防护林的风速降低率差异不显著($P > 0.05$)。但是,相同覆盖度林前与林后的风速降低率差异显著($P < 0.05$),改变防护林结构可提高低覆盖度防护林效能。无论是覆盖度25%

还是30%,水平方向10 m/s风速变率(平均变异系数28.13%)小于6 m/s(平均变异系数32.77%)。防护林的有效防护距离与其高度和疏透度等因子有关,野外观测的最大防护距离可达树高的10~15倍,比较均匀的农田防护林带的有效防护距离较长^[5]。风洞试验防护距离则较短^[9-10],这与本试验的结果相似,风速降低范围最大达林带高的5倍。本试验观测了覆盖度25%和30%仿真防护为前密后疏带状结构,它们的防护效能差异不显著,这与部

分野外不均匀防风固沙林试验^[11]和风洞模拟试验结果^[15]不同,致此结果的主要原因是所用材料及防护林结构不同。

前密后疏带状结构的防护林的垂直方向的树冠高度以下的风速明显降低,林带高度范围的风速明显低于冠层之上($P < 0.05$)。在垂直方向,风速降低的高度小于1.5倍树高(30 cm),大于树高处风速不降反升,这与野外试验结果有一定差异^[23-24],而与风洞试验结果一致^[25-26]。覆盖度25%和30%防护林的风速变化较大的高度均为8 cm,这个高度大约是林冠层过渡区,是仿真防护林疏透度突变区域。风速6 m/s降低较大区域的高度大于10 m/s的,覆盖度25%的防护林的风速降低较大高度小于覆盖度30%的仿真防护林。风速明显降低区在13 cm(0.75H树高)范围。野外试验中,防护林风速明显降低的高度可达14倍树高以内^[14]。而在本试验中,防护林树高1倍以上风速增加,这与部分风洞试验结果相近^[6-7,15],也得到另一试验的证实^[25]。防护林降低风速水平受防护林树种^[27],也就是受树高、冠层高度及其结构影响,也与观测环境有关。作为有限空间的风洞试验结果在垂直方向试验结果受到空间限制的影响。

将低覆盖度防护林组成带状配置,可提高了防风效能,是一种相对较优防护林结构。在风速6 m/s和10 m/s条件下,覆盖度25%和30%的仿真防护林都有2个较为明显的减速区:林带前2倍树高,第1个林带第1行与第2行之间,即距第1行之后20~40 cm(1~2H)范围。相同风速,覆盖度25%的风速减速区较30%的面积较大。在林前覆盖度30%的风速减速区较25%的复杂,且较大减速区距林带更远。防护林结构与配置是其发挥防风效能的重要因素,国内外防护林带大多都是均匀结构配置^[1-2]。而不同结构的林带的防风固沙效益具有一定差异。相较于1行和3行配置的防护林,6行配置的防护林组成的林带相对防护效能较大^[6-7]。虽然,本试验2种覆盖度的非均匀结构的防风效能差异不显著($P > 0.05$)。但是,二者降低风速的区域面积不同,这主要2种覆盖度仿真防护林的上风向林带行间距变化,改变了林带的总体结构,形成了疏透度有异的仿真防护林。非均匀结构可以增加防护林带的防风固沙效能^[11],本试验结果也说明前密后疏型行带式配置防护林带有增强防护效能作用。

4 结论

覆盖度25%和30%前密后疏带状结构的防护林的风速降低率差异不显著($P > 0.05$)。但是,相

同覆盖度林前与林后的风速降低率差异显著($P < 0.05$),改变防护林结构可提高低覆盖度防护林效能。覆盖度25%的风降低率最大为83.38%,覆盖度30%仿真林风速降低率最大为75.02%。前密后疏带状结构的防护林的垂直方向的树冠高度以下的风速明显降低,林带高度范围的风速明显低于冠层之上($P < 0.05$),大于树高处风速不降反升。在垂直方向,风速降低的高度 < 1.5 倍树高(30 cm)。在风速6 m/s和10 m/s条件下,覆盖度25%和30%的仿真防护林都有2个较为明显的减速区:林带前2倍树高,第1个林带第1行与第2行之间,即距第1行之后20~40 cm(1~2H)范围。相同风速,覆盖度25%的风速减速区较30%的面积较大。低覆盖度防护林组成前密后疏的带状配置,是一种可提高了防风效能的防护林结构。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 91-153.
- [2] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2006: 137-169.
- [3] 李爱德, 赵明, 王耀琳, 等. 民勤地区不同梭梭林地水分平衡研究[M]//王继和. 甘肃治沙理论与实践. 兰州: 兰州大学出版社, 1999: 50-55.
- [4] 慕青松, 陈晓辉. 临界侵蚀风速与植被盖度之间的关系[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 534-538.
- [5] 黄富祥, 王明星, 王跃思. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 627-633.
HUANG F X, WANG M X, WANG Y S. Recent progress on the research of vegetation protection in soil erosion by wind[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 26(5): 627-633. (in Chinese)
- [6] 万猛, 潘存德, 李富海, 等. 克拉玛依农田防护林带的有效防护距离与面积研究[J]. 林业资源管理, 2009(6): 32-34.
- [7] 蒋丽娟. 国内外防护林研究综述[J]. 湖南林业科技, 2000, 27(3): 21-28.
- [8] 李雪琳. 仿真树带宽、季相对流场结构影响的风洞模拟试验[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [9] 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实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 936-944.
LI X L, MA Y J, MA R, et al. Wind flow field and windproof efficiency of shelterbelt in different width[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 936-944. (in Chinese)
- [10] 杨文斌, 卢琦, 吴波. 低覆盖度不同水平格局的灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 8-112.
- [11] RUI M A, JIHE WANG, JIANJUN Q U, et al. Effectiveness of shelterbelt with a non-uniform density distribution[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 767-771.
- [12] 冯瑞. 沙区农田保护性措施防蚀机理的风洞模拟实验研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2007.
- [13] 张鹏春. 影响农田防护林防护效益的几项主要因子的探讨

- [J]. 防护林科技, 1992(2): 14-20.
- [14] 朱廷曜, 关德新, 吴家兵, 等. 论林带防风效应结构参数及其应用[J]. 林业科学, 2004, 40(4): 9-15.
ZHU T J, GUAN D X, WU J B, *et al.* Structure parameters of wind protection of shelterbelts and their application[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(4): 9-15. (in Chinese)
- [15] 凌裕泉, 屈建军, 金炯. 稀疏天然植被对输沙量的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 12-18.
LING Y Q, QU J J, JIN J. Influence of sparse natural vegetation on sand-transporting quantity[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(1): 12-18. (in Chinese)
- [16] 饶良懿, 朱金兆. 防护林空间配置研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 102-106.
- [17] 王多泽, 袁宏波, 郭春秀, 等. 仿真固沙灌木林与塑料网方格沙障防风固沙效能比较[J]. 防护林科技, 2014(11): 6-10.
- [18] 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.
ZHANG Y H, KANG C Z, LIU S Z, *et al.* Windbreak effect of picea mongolica farmland shelterbelt with different configuration[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(5): 859-866. (in Chinese)
- [19] 胡凤荣, 王永木. 农田防护林垂直防护效益研究[J]. 内蒙古林业科技, 1997(4): 37-39.
- [20] 孙涛, 王继和, 满多清, 等. 仿真固沙灌木防风积沙效应的风洞模拟研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 49-55.
SUN T, WANG J H, MAN D Q, *et al.* Simulation effect of preventing wind and combating sand of simulated sand-fixing shrub in wind tunnel testing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 49-55. (in Chinese)
- [21] 钟卫, 刘涌江, 杨涛. 3种沙障防风固沙效益比较的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 6-13.
ZHONG W, LIU Y J, YANG T. Wind tunnel test study on effect contrast of wind-breaking and sand-fixing of three sand-barriers [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 6-13. (in Chinese)
- [22] 杨文斌, 赵爱国, 王晶莹, 等. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 108-112.
YANG W B, ZHAO A G, WANG J Y, *et al.* Allocation of artemisia halodendron association with low coverage and their sand-fixing and wind-preventing effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 108-112. (in Chinese)
- [23] 李亚琦, 马瑞, 刘虎俊, 等. 3种配置防护林防风效能的风洞模拟实验[J]. 防护林科技, 2020, 198(3): 1-4.
- [24] 李占君, 刘运伟, 王洪学, 等. 基于 Plackett-Burman 和 Box-Behnken 设计优化超声诱导防风种子发芽方法[J]. 森林工程, 2022, 38(1): 76-85.
- [25] 刘虎俊, 袁宏波, 王多泽, 等. 两种不同配置灌木林防风固沙效益[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 63-68.
LIU H J, YUAN H B, WANG D Z, *et al.* Benefits of windbreak and sand fixation from two kinds of shrubs[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3): 63-68. (in Chinese)
- [26] 吕仁猛, 丁国栋, 郝玉光, 等. 旷野风速对林网内风速分布及防风效能的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 105-110.
- [27] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 64-70.
WANG Y W, LUO L, ZHANG F, *et al.* Windbreak effect of sand-fixation forest on the edge of oasis in Minqin [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(4): 64-70. (in Chinese)

(上接第16页)

- [30] 张立恒, 李清雪, 王学全, 等. 高寒沙地中间锦鸡儿人工林根系分布及林下土壤特性研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 840-846.
ZHANG L H, LI Q X, WANG X Q, *et al.* Root distribution and soil properties under *Caragana intermedia* plantations in alpine sandy land[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 840-846. (in Chinese)
- [31] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(4): 611-619.
AN H, WEI L Y, LIU Y, *et al.* Distribution characters of fine root of artificial *Pinus tabulaeformis* and natural *Betula platyphylla* forests and their relation to soil nutrients in Hilly Loess Regions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007(4): 611-619. (in Chinese)
- [32] 孙楠, 张怡春, 赵眉芳. 长白落叶松人工林根系生物量及其垂直分布特征[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 17-24, 67.
- [33] 朱万才, 吴瑶, 李亚洲, 等. 不同保留密度对落叶松水曲柳混交林的影响[J]. 森林工程, 2021, 37(2): 50-56, 94.
- [34] 高国雄, 李得庆, 贾俊姝, 等. 退耕还林不同配置模式对土壤养分的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2007(5): 104-107.
GAO G X, LI D Q, JIA J S, *et al.* Research on soil fertility of different species arrangement models in converted farmland land[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007(5): 104-107. (in Chinese)
- [35] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的分层结构特征及土壤理化性质[J]. 林业科学, 2018, 54(10): 20-30.
FENG Y M, LI Y, CAO X W, *et al.* Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in Southern Gansu[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(10): 20-30. (in Chinese)
- [36] 王国梁, 周东. 黄土丘陵区退耕地先锋群落演替过程中细根特征的变化[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 356-364.
WANG G L, ZHOU D. Fine root characteristic changes of pioneer community with plant succession in abandoned croplands in the Loess Gully Region China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(2): 356-364. (in Chinese)
- [37] 闫小莉, 戴腾飞, 贾黎明, 等. 欧美 108 杨细根形态及垂直分布对水氮耦合措施的响应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 825-837.
YAN X L, DAI T F, JIA L M, *et al.* Responses of the fine root morphology and vertical distribution of *Populus × euramericana* 'Guariento' to the coupled effect of water and nitrogen [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(8): 825-837. (in Chinese)