

乌兰布和沙漠东北缘人工梭梭林防风效能分析

李鹏¹, 高永¹, 赵青², 韩彦隆¹, 丁延龙¹, 党晓宏¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 测定乌兰布和沙漠东北缘不同林龄各坡位的风速, 揭示梭梭林防风效能随林龄的变化规律以及与梭梭空间构型的关系。[方法] 以乌兰布和沙漠东北缘种植 3, 5 和 8 a 的人工梭梭林为研究对象, 通过测定林内及 CK 不同坡位距地表 10, 20, 50, 100, 200 cm 高度处风速, 对比不同年限梭梭林的防风效能。[结果] 随着林龄的增加, 梭梭林对近地表风速减弱作用增强; 同一坡位下, 3 a 梭梭林防风效能主要作用在 0—100 cm 高度内, 防风效能为 48.19%, 100—200 cm 高度内风速迅速恢复。5, 8 a 梭梭林对 0—200 cm 高度范围均有很好的防护作用, 防风效能分别为 69.72%, 71.93%, 二者间减弱效果差异不明显。相关分析显示梭梭林空间构型与防风效能显著相关, 梭梭盖度、高度、冠幅与防风效能的相关性分别达到 0.935, 0.930, 0.942。[结论] 3 a 梭梭林迎风坡底、背风坡的防风效能优于迎风坡中、迎风坡顶, 5, 8 a 梭梭林与之相反。

关键词: 防风效能; 地表粗糙度; 风速廓线; 人工梭梭林; 乌兰布和沙漠

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0034-06

中图分类号: S727.23

文献参数: 李鹏, 高永, 赵青, 等. 乌兰布和沙漠东北缘人工梭梭林防风效能分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 34-39. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.006; Li Peng, Gao Yong, Zhao Qing, et al. Windbreak effectiveness of *Haloxylon ammodendron* on northeast edge of Ulan Buh desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 34-39. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.006

Windbreak Effectiveness of *Haloxylon Ammodendron* on Northeast Edge of Ulan Buh Desert

LI Peng¹, GAO Yong¹, ZHAO Qing², HAN Yanlong¹, DING Yanlong¹, DANG Xiaohong¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] Wind speeds at different slope positions of *Haloxylon Ammodendron* forest were investigated on the northeast edge of Ulan Buh desert, in order to reveal the variation of windbreak effectiveness of *Haloxylon ammodendron* with plantation age and spatial pattern. [Methods] Forests of *H. ammodendron* at 3 a, 5 a and 8 a plantation ages were selected as research objects. The wind speeds at 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm, 200 cm heights above ground were measured respectively in the bottom, middle and top of windward slope and bottom of leeward slope for windbreak effectiveness analyzing. [Results] The wind speed near ground surface declined with the increase of plantation ages. Windbreak effectiveness of 3 years' shrub was mainly found in 0—100 cm height, the averaged value was 48.19%. At 100—200 cm height, wind speed rebounded to the CK value quickly. Good windbreak effect were found both in 5 years and 8 years forests at height 0—200 cm, and their windbreak efficiency were 69.72% and 71.93% respectively. Correlation analysis showed that there existed a significant correlation between plantation pattern and windbreak effect. The correlation coefficients between windbreak effect and forest coverage, height and crown width were 0.935, 0.930, 0.942 respectively. [Conclusion] Windbreak effects in the bottom of windward

收稿日期: 2017-03-03

修回日期: 2017-03-10

资助项目: 内蒙古自然科学基金重大专项“高大密集流动沙丘上营建植被与沙丘活动的互馈机制”(2014ZD03)

第一作者: 李鹏(1992—), 男(蒙古族), 陕西省榆林市定边县人, 硕士研究生, 主要研究方向为荒漠化防治。E-mail: 910361824@qq.com。

通讯作者: 高永(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市达茂旗人, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 13948815709@163.com。

slope and leeward slope were better than those in the middle and top of windward slope of 3 years forest. It was contrary for the forests having 5 years and 8 years plantation ages.

Keywords: windbreak efficiency; surface roughness; wind speed profile; artificial *Haloxylon ammodendron* forest; Ulan Buh desert

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)作为中国西北干旱荒漠区重要的防风固沙植物种,具有抗旱性强,耐风蚀沙埋,耐贫瘠等特点^[1-2],以梭梭属为优势种的荒漠植被在维护区域生态平衡和促进国民经济发展中扮演着重要角色,对防风固沙、保护生态系统具有重要意义^[3-4]。近年来,很多学者对梭梭林的防风固沙效益、生态改良效益等方面进行了诸多研究,主要集中于林带的防风固沙效益、临界密度、林带前后的风速变化等方面^[5-7]。梭梭会极大程度地改变近地表风速廓线的变化特征,并整体抬高零风速平面的位移高度,影响不同高度层的风速变化^[8]。随着风沙动力学研究成果的应用,如何完善梭梭林防护体系,达到区域防护林的高效和稳定成为了当前研究的热点问题^[9-10]。

梭梭在西北沙漠地区沙漠治理方面得到了广泛应用^[11],但是针对在沙丘上直接营建梭梭后沙丘整体风速变化、风速在垂直方向的变化情况、防风效能等方面研究较少。本文拟通过对乌兰布和沙漠东北缘不同林龄各坡位的风速进行测定,以不同林龄、不同坡位的梭梭林的防风效能、地表粗糙度及风速廓线为指标,揭示梭梭林防风效能随林龄的变化规律以及与梭梭空间构型的关系。旨在为干旱荒漠区防治风蚀、生态修复、科学合理保护梭梭荒漠植被及合理发展沙产业提供科学的依据。

1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠水利部牧区水利科学研究所二十里柳子观测站内(40°14'12"N, 106°50'25"E),地处乌兰布和沙漠与河套平原的结合部,该区属中温带大陆性季风气候,夏季炎热,干旱少雨,光热充足,全年大部分时间受西风环流控制,风沙频繁,地表风蚀强烈,年均风速 2.8 m/s,春季风速最大,平均在 4.8 m/s 以上。研究区内植被主要为梭梭、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、芦苇[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]等^[12]。

本文所选取的 4 座沙丘形态相似,沙丘坡度在 18°~22°,沙丘高度在 8~10 m,包括裸沙丘(No. 1)、3 a(2012 年)人工梭梭林沙丘(No. 2)、5 a(2010 年)人工梭梭林沙丘(No. 3)和 8 a(2007 年)人工梭梭林

沙丘(No. 4)。不同林龄人工梭梭林种植规格均为 2 m×2 m,种植梭梭前均为流动沙丘。3,5,8 a 梭梭林的盖度分别为 36%,50%,58%,植被的冠幅平均值分别为 107,180,202 cm,株高平均值分别为 139.3,237.6,277.3 cm。

2 材料与方法

于 2015 年 4 月 25 日,在所选样地内调查梭梭高度、冠幅、盖度,并使用 HOBO 小型移动气象站对所选样地进行风速观测,在不同沙丘样地迎风坡顶部、迎风坡坡中、迎风坡坡底以及背风坡 4 个坡位架设 HOBO 小型移动气象站,研究不同年限梭梭林及对对照区的防风效能、地表粗糙度及风速廓线特征,分析影响梭梭林防护效益的主要因子。

2.1 风速的测定

于 2015 年 4 月 25 日上午 8:00—11:00,对 3,5,8 a 及对对照沙丘上迎风坡坡底、迎风坡坡中、迎风坡顶部以及背风坡 4 个坡位架设 HOBO 小型移动气象站,风杯安置 5 个高度,分别为距地表 10,30,50,100 和 200 cm,对 3,5,8 a 及对对照沙丘的风速风向进行同步测定(图 1)。每个坡位测定时间为 20 min,采样间隔 2 s。

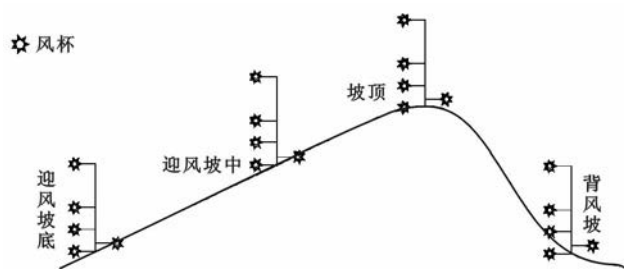


图 1 沙丘横断面上仪器架设情况示意图

2.2 防风效能的计算

防风效能的计算公式为:

$$E_h = (U_{h_0} - U_h) / U_h \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_h ——高度 h 处的防风效能(%); U_{h_0} ——对应沙丘高度 h_0 处的平均风速(m/s); U_h ——梭梭林内高度 h 处的平均风速(m/s)。

2.3 地表粗糙度的计算

以距地表 10 和 200 cm 处测得的多组重复风速数据进行平均,计算粗糙度。地表粗糙度的计算公式为:

$$\lg Z_0 = \frac{\lg u_2 - A \lg u_1}{1-A} \quad (2)$$

式中: Z_0 ——地表平均粗糙度(cm); u_1 ——高度 Z_1 处风速(m/s); u_2 ——高度 Z_2 处风速(m/s); 其中 $A = u_1/u_2$, $Z_1 = 10$ cm, $Z_2 = 200$ cm

2.4 风速廓线的分析

多年的试验研究证明,近地表自然风速在垂直方向上的分布特征——风速廓线符合对数规律或幂指数规律。用普朗特—冯·卡门对数分布律描述风速廓线方程为^[13-14]:

$$u = \frac{u^*}{K} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (3)$$

式中: u ——高度 Z 处的平均风速(m/s); Z ——风速廓线上某点距地面垂直高度(m); u^* ——摩阻流速/摩擦速度(m/s); Z_0 ——空气动力学粗糙度(m); K ——冯卡门常数,数值为 0.4。

2.5 数据统计和分析

植被调查数据和风速数据使用 Microsoft Office Excel 2016 进行统计,并计算防风效能及地表粗糙度,使用 SAS 8.0 对防风效能、地表粗糙度数据进行

方差分析,并对植被数据和防风效能数据进行相关分析,使用 Origin 9.0 作图。

3 结果与分析

3.1 梭梭林防风效能分析

3.1.1 相同坡位不同林龄防风效能 由图 2 可以看出,梭梭林内各坡位均显示出随林龄的增长,梭梭林防风效能逐渐提高,3,5,8 a 梭梭林防风效能分别达到了 41.20%,69.72%,71.93%。5 a 梭梭林比 3 a 梭梭林防风效能提升了 69.22%,8 a 梭梭林比 5 a 梭梭林防风效能提升了 3.23%,5 a 以上梭梭林整体防风效能基本不变。随空间高度的增加,梭梭林各坡位防风效能均逐渐降低,3 a 梭梭林在距地表 100 cm 高度范围内,防风效能逐渐降低,100 cm 高度以上,防风效能降低幅度变大,防风作用主要集中在 0—100 cm 高度内,防风效能为 48.19%。5 和 8 a 梭梭林防风效能规律基本相似,在距地表 100 cm 高度范围内,防风效能随高度的增加而逐渐降低,在 100 cm 高度以上,防风效能基本不变或有所增强,并无继续下降趋势。

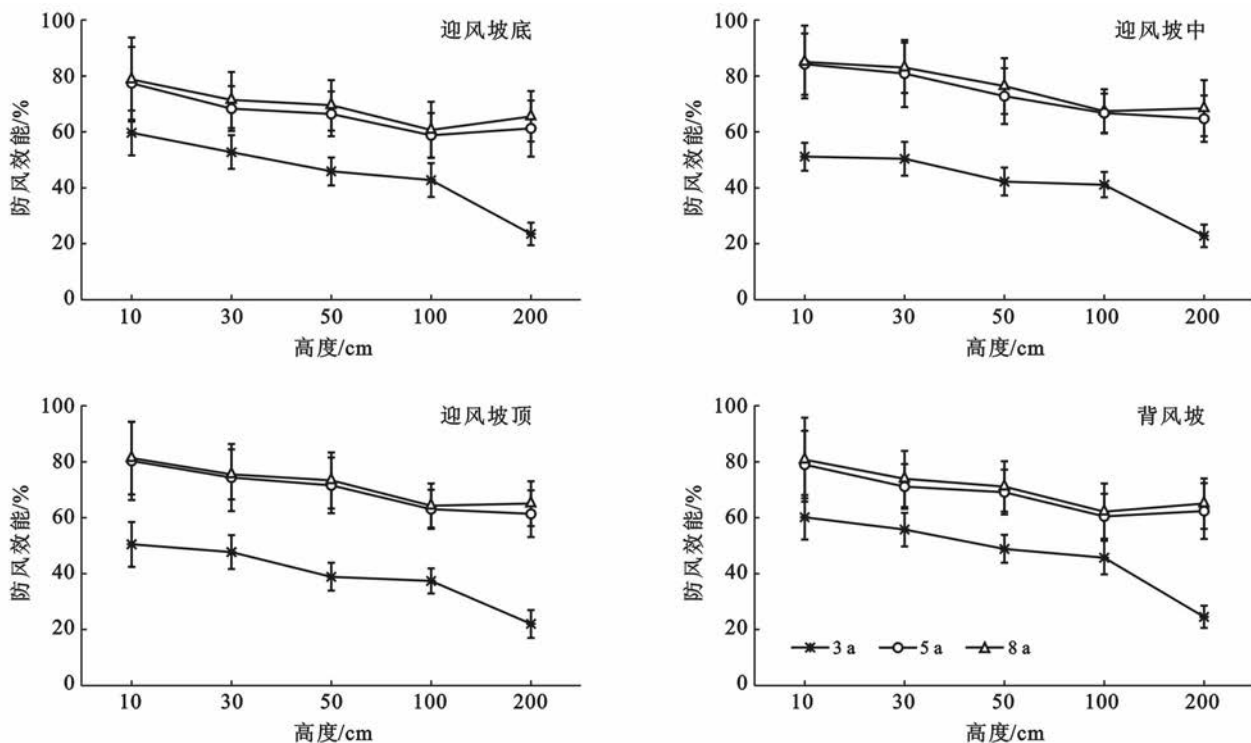


图 2 相同坡位不同林龄防风效能对比

3.1.2 相同林龄不同坡位防风效能 由图 3 可以看出,相同年限各坡位的梭梭林防风效能不同。其中 3 a 梭梭林防风效能:背风坡(47.01%)>迎风坡底(44.92%)>迎风坡中(41.54%)>迎风坡顶

(39.31%),5 a 梭梭林防风效能:迎风坡中(73.86%)>迎风坡顶(70.14%)>背风坡(68.43%)>迎风坡底(66.43%),8 a 梭梭林防风效能:迎风坡中(76.03%)>迎风坡顶(71.90%)>背风坡(70.61%)

> 迎风坡底 (69.17%), 3 a 梭梭林对迎风坡底、背风坡防护效果优于迎风坡中、迎风坡顶, 5, 8 a 梭梭林与之相反; 5, 8 a 迎风坡中部和顶部防风效能明显增强, 高于迎风坡底部和背风坡。

3 a 梭梭林防风效能最大部位出现在背风坡 10 cm 高度处, 5 和 8 a 梭梭林防风效能最大值出现在

迎风坡中部 10 cm 高度处。3 种年限的梭梭林防风效能最大值出现在 8 a 梭梭林迎风坡中部 10 cm 高度处, 达到 84.96%, 最小值出现在 3 a 梭梭林迎风坡顶部 200 cm 高度处, 为 22.02%, 两者相差 3.86 倍, 8 a 梭梭林整体防风效能约为 3 a 梭梭林防风效能的 2 倍。

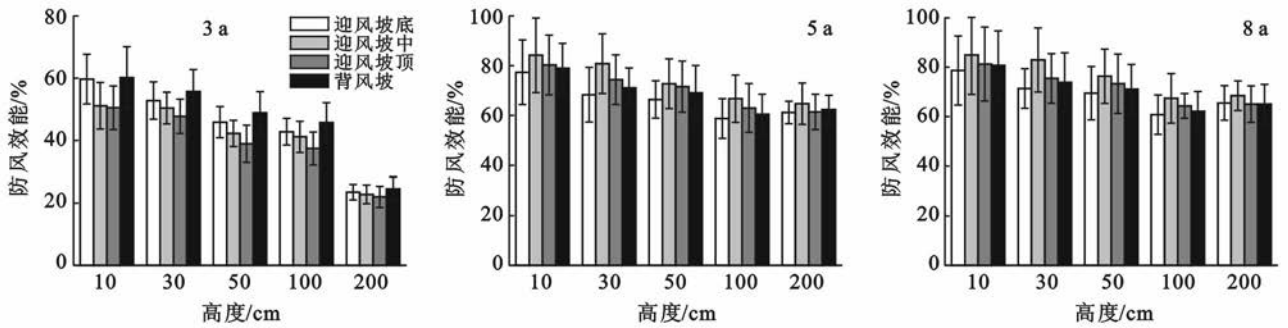


图 3 相同林龄不同坡位防风效能对比

3.1.3 梭梭林防风效能与植被因素相关性 由表 1 可以看出, 梭梭的盖度, 株高, 冠幅与防风效能均极显著相关, 梭梭林的盖度、株高、冠幅与防风效能的相关系数分别为 0.935, 0.930, 0.942。说明植被高度、冠幅、盖度的增加可以提高梭梭林防风效能, 梭梭植株的高度、冠幅、盖度是影响梭梭林防风效益的根本原因。

表 1 梭梭林防风效能与植被相关性

指标	盖度	株高	冠幅
防风效能	0.935**	0.930**	0.942**

注: ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$)。

3.2 梭梭林对地表粗糙度的影响

地表粗糙度是重要的空气动力学参数, 用来描述

不同下垫面对近地面层气流的不同阻碍作用, 它是衡量沙区防沙治沙效益的最重要指标之一^[15]。本试验以距地表 10 和 200 cm 高度处的平均风速值对不同林龄的不同坡位沙丘地表粗糙度进行计算, 并以裸沙丘为对照进行对比分析。

从表 2 中可以看出, 营建梭梭林后沙丘地表粗糙度较裸沙丘有较明显的增大, 且随着营建植被时间的增加地表粗糙度随之增大, 3 a 梭梭林地表粗糙度平均值为 1.42 cm, 生长 5 a 梭梭林地表粗糙度平均值为 3.00 cm, 8 a 梭梭林地表粗糙度平均值为 3.22 cm, 地表粗糙度最大值出现在生长 8 a 梭梭林迎风坡中, 为 4.03 cm, 是对照沙丘的 5.17 倍。经方差分析 ($p < 0.05$), 3 种不同年限梭梭林地表粗糙度均显著高于对照裸沙丘地表粗糙度, 5, 8 a 梭梭林地表粗糙度显著高于 3 a 地表粗糙度。

表 2 3 种不同年限梭梭林地表粗糙度比较

样地类型	迎风坡顶	迎风坡中	迎风坡底	背风坡
裸沙丘	0.71 ± 0.11 ^{Ca}	0.78 ± 0.07 ^{Ca}	0.68 ± 0.14 ^{Ca}	0.78 ± 0.09 ^{Ca}
3 a 梭梭林	1.21 ± 0.12 ^{Bb}	1.28 ± 0.21 ^{Bb}	1.39 ± 0.18 ^{Ba}	1.54 ± 0.26 ^{Ba}
5 a 梭梭林	2.83 ± 0.45 ^{Ab}	3.77 ± 0.52 ^{Aa}	2.42 ± 0.31 ^{Ac}	2.97 ± 0.37 ^{Ab}
8 a 梭梭林	3.03 ± 0.31 ^{Ab}	4.03 ± 0.67 ^{Aa}	2.59 ± 0.42 ^{Ac}	3.23 ± 0.38 ^{Ab}

注: 同列大写字母不同表示同一坡位的不同林龄梭梭林粗糙度差异显著 ($p < 0.05$); 同行小写字母不同表示同一林龄梭梭林粗糙度在不同坡位差异显著 ($p < 0.05$)。

相同坡位地表粗糙度呈现为: 8 a 梭梭林 > 5 a 梭梭林 > 3 a 梭梭林, 5 a 以上梭梭林地表粗糙度增加幅度降低。相同年限梭梭林不同坡位地表粗糙度差异明显, 生长 3 a 梭梭林地表粗糙度呈现出背风坡 > 迎风坡底 > 迎风坡中 > 迎风坡顶, 5 及 8 a 梭梭林地表

粗糙度呈现为迎风坡中 > 背风坡 > 迎风坡顶 > 迎风坡底。其中, 3 a 梭梭林背风坡地表粗糙度比迎风坡顶地表粗糙度高 25%, 5 a 梭梭林迎风坡中地表粗糙度比迎风坡底高 56%, 8 a 梭梭林迎风坡中地表粗糙度比迎风坡底高 55%。

3.3 梭梭林对风速廓线的影响

从图 4 中可以看出,在植被对垂直方向上的气流的改变作用下,风速廓线变化规律已经被改变,5、8 a 梭梭林和裸沙丘各坡位风速廓线均呈现“J”型变化特征,3 a 梭梭林各坡位风速廓线总体上呈现出“S”型变

化特征;3 a 梭梭林在 0—100 cm 高度范围内风速稳步上升,100—200 cm 高度范围内风速增幅变大,并有加速恢复到相同高度对照风速的趋势,5 和 8 a 梭梭林在 0—100 cm 高度范围内风速稳定增加,在 100—200 cm 范围内风速不变、甚至减小。

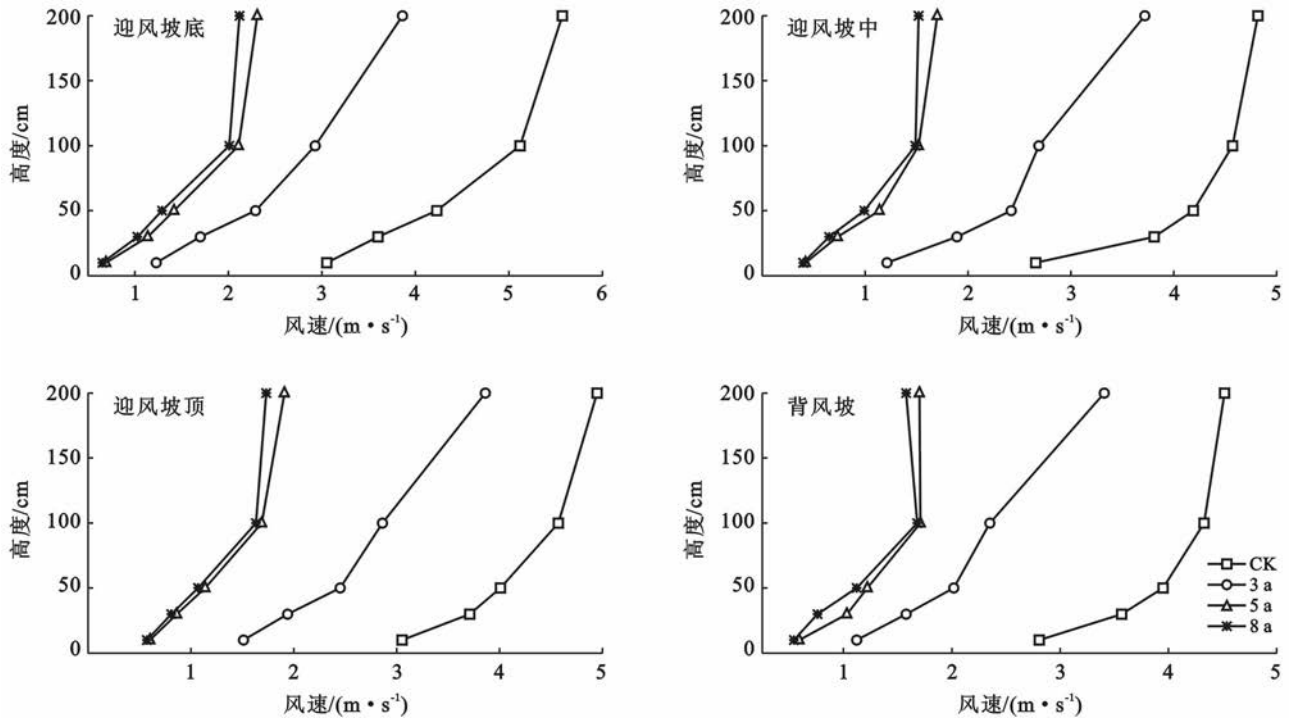


图 4 3 种不同年限梭梭林与对照的风速廓线对比

4 讨论与结论

4.1 讨论

梭梭林防风固沙机制主要通过增加地表粗糙度和改变风速廓线来实现。植被对气流具有抬升作用,气流在植被上空逐渐聚集能量,风速恢复速度快于同高度流动沙丘,并有在上层逐步赶超流动沙丘的风速的趋势^[16-17]。这与本文中 3 a 梭梭林风速廓线变化规律相一致,风速在 0—100 cm 高度范围内风速稳步上升,100—200 cm 高度范围内风速增加幅度增大,并有逐步赶上对照沙丘风速的趋势。梭梭植株的高度、冠幅是影响梭梭林风沙防护效益最为主要的因子,植株高度决定了梭梭减小风速的高度范围,冠幅影响梭梭林的密度和整体风况环境,林下紊流会增多,而强度会减弱,防护效益会增强。随着梭梭的生长又会进一步的增加梭梭林垂直高度上的防护能力^[18-19],本文通过对 5 及 8 a 的梭梭林进行研究发现,5 和 8 a 梭梭林在 0—100 cm 高度范围内风速呈现出稳定增加的趋势,在 100—200 cm 范围内风速不变、甚至有减小的趋势,梭梭的高度和冠幅改变了风速在

垂直高度上的变化趋势。

产生上述现象的原因是:3 a 梭梭林在 0—100 cm 高度范围为风速急剧变化,当气流进入梭梭林区域后,底层气流受到植物枝叶以及地表枯落物的阻拦,使得气流内能量发生巨大变化,气流发生分流的现象,一部分气流继续在梭梭林底部,另一部分向上抬升,在 100 cm 以上高度风力汇集后能量增加,风速的增加幅度也明显增强,梭梭林阻挡气流的作用逐渐消失,气流的增加幅度明显比对照沙丘增加幅度明显,并有恢复到相同高度处对照风速的趋势。5 a 以上梭梭林植被的高度和冠幅较 3 a 有明显增加,梭梭林整体的防护效果较好,当气流进入梭梭林区域后,一部分风速向上抬升造成上部风速逐渐增大,导致在 0—100 cm 高度范围内风速呈现稳定增加趋势,由于 5 和 8 a 的梭梭林冠幅较大,冠幅大约为 3 a 梭梭林的一倍,防护的高度和范围比 3 a 的梭梭林有了显著提升,植物枝叶在 100—200 cm 高度范围内起到了拦截和降低风速持续增大的趋势,导致 100—200 cm 范围内风速不变、甚至有减小的趋势。

随着梭梭的逐年生长,梭梭林内自然植被恢复物

种也逐年增加,在一定程度上促进了沙丘防风固沙效果^[20],本研究中种植梭梭林沙丘风速明显低于流动沙丘风速,随着种植时间的增加,梭梭林防风能力较强的部位由沙丘的下部逐渐向沙丘中上部过渡。主要原因是:在3 a梭梭林内,当风沙流或者是纯净气流到达沙丘,从迎风坡底部向坡顶运动时,受到植被的阻碍作用后,近地表气流强度减小,从坡底向坡顶运动时,气流向上抬升,近地表气流虽然受到梭梭林的阻碍作用,由于梭梭林生长年限较短,还不具备完善的生态防护功能,所以风速依然在逐渐增大,到达沙丘顶部风速达到最大值,在背风坡处近地表气流同时受到植被阻碍作用和地形的落差影响,强度迅速减小,而较高处的气流强度变动较小,所以背风坡防风能力较好。5及8 a梭梭林的植被对防风效能的影响明显增强,由于沙丘下部(迎风坡底、背风坡)植被已经生长得较为高大,当风沙流沿迎风坡底部进入梭梭林后,梭梭阻挡了来自梭梭林外部的风沙流,降低了林内风速,导致迎风坡中上部(迎风坡中,迎风坡顶)防风效能增加幅度变大,梭梭林防风能力较强的部位由沙丘的下部逐渐向沙丘上部过渡。

4.2 结论

(1) 梭梭林防风效能主要是由于植被具有抬升气流,改变地表粗糙度以及风速在垂直方向上的变化的能力,梭梭植株的高度、冠幅、盖度是影响梭梭林防风效益的根本原因,植被高度、冠幅、盖度的增加可以提高梭梭林的整体防风效能和防护高度。

(2) 随着梭梭生长年限的增加,梭梭林防风效能不断提升,8 a梭梭林的整体防风效能由3 a梭梭林的41.20%提升到了71.93%。3 a梭梭林对迎风坡底、背风坡防护效果优于迎风坡中、迎风坡顶,5,8 a梭梭林与之相反。

(3) 5,8 a梭梭林和裸沙丘各坡位风速廓线均呈现“J”型变化特征,3 a梭梭林各坡位风速廓线总体上呈现出“S”型变化特征;3 a梭梭林在0—100 cm高度范围内风速稳步上升,100—200 cm高度范围内风速增幅变大,并有加速恢复到相同高度处对照风速的趋势,5和8 a梭梭林在0—100 cm高度范围内风速稳定增加,在100—200 cm范围内风速不变、甚至减小。

[参 考 文 献]

[1] 刘有军,刘世增,纪永福,等. 民勤绿洲人工梭梭林群落结构及种群生态特征[J]. 干旱区研究,2014,31(1):94-99.

[2] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等. 青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J]. 干旱区地理,2014,37(4):777-785.

[3] 张强,曾剑,姚桐. 植被下垫面近地层大气动力状态与动力学粗糙度长度的相互作用及其参数化关系[J]. 科学通报,2012,57(8):647-655.

[4] 常兆丰,李易珺,张剑挥,等. 民勤荒漠区4种植物的防风固沙功能对比分析[J]. 草业科学,2012,29(3):358-363.

[5] 王涛,赵哈林. 中国沙漠科学的五十年[J]. 中国沙漠,2005,25(2):3-23.

[6] 郭泉水,郭志华,阎洪,等. 我国以梭梭属植物为优势的潜在荒漠植被分布[J]. 生态学报,2005,25(4):848-853,946.

[7] 贾志清,吉小敏,宁虎森,等. 人工梭梭林的生态功能评价[J]. 水土保持通报,2008,28(4):66-69.

[8] 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.

[9] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等. 青海湖沙地人工治理沙丘的风速廓线变化特征[J]. 水土保持研究,2013,20(6):162-167.

[10] 赵廷宁,丁国栋,王秀茹,等. 中国防治沙主要模式[J]. 水土保持研究,2002,9(3):118-123.

[11] 李广毅,周心澄,王忠林,等. 毛乌素沙地生态经济型防护林体系结构研究(技术总报告)[J]. 水土保持研究,1995,2(2):2-35.

[12] 贾志清,卢琦,郭保贵,等. 沙生植物:梭梭研究进展[J]. 林业科学研究,2004,17(1):125-132.

[13] 罗凤敏,辛智鸣,高君亮,等. 乌兰布和沙漠东北缘近地层风速和降尘量特征[J]. 农业工程学报,2016,32(24):147-154.

[14] 党晓宏,高永,虞毅,等. 新型生物可降解PLA沙障与传统草方格沙障防风效益[J]. 北京林业大学学报,2015,37(3):118-125.

[15] 王文彪,党晓宏,张吉树,等. 库布齐沙漠北缘不同作物秸秆平铺式沙障的防风效能[J]. 中国沙漠,2013,33(1):65-71.

[16] Raupach M R. Drag and drag partition on rough surfaces[J]. Boundary Layer Meteorology, 1992,60:375-395.

[17] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1993,17(1):50-68.

[18] 常兆丰,段小峰,韩福贵,等. 民勤荒漠区主要植物群落的稳定性及生态效应[J]. 西北植物学报,2014,34(12):2562-2568.

[19] 王春玲,郭泉水,谭德远,等. 准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究[J]. 应用生态学报,2005,16(7):1224-1229.

[20] 彭鸿嘉,傅伯杰,陈利顶,等. 甘肃民勤荒漠区植被演替特征及驱动力研究:以民勤为例[J]. 中国沙漠,2004,24(5):112-117.