

不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效应与带间植被组成

闫 敏, 左合君, 杨 阳, 刘宇胜, 郭婧宇, 王 强, 李钢铁

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院 内蒙古风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 呼和浩特 010011)

摘 要:通过对四子王旗不同带间距(4 m, 6 m, 8 m)柠条锦鸡儿防护林风速流场与带间植被的测定,研究了其防风效果与带间植被组成情况。结果表明:(1)在不同对照风速条件下,不同带间距柠条锦鸡儿防护林均对风速具有减弱作用,并且在带间出现了风影区与加速区。(2)在距地面 0~2 m 高度处,林带防风效果为 4 m>6 m>8 m, 8 m 宽林带对低风速(6~8 m/s)可以进行有效防护,对高风速(10 m/s)也可以控制在起沙风速以下,且风速经过 4 条林带的阻挡后减弱效果明显。(3) 8 m 宽林带间出现了以百里香、狗尾草以及蒿属为主的草本群落,与地带性草本群落(羊草+冷蒿)较为接近,恢复效果明显。确定的带宽与林带数量可为今后柠条锦鸡儿防风阻沙林建设以及多树种带状混交配置模式的确定提供重要科学依据。

关键词:柠条锦鸡儿; 行带式防护林; 防风效应; 带间植被; 自然修复

中图分类号:S727.23

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0139-07

Different Distance *Caragana korshinskii* Protection Forest for Wind Reducing Effect and Inter-Type Vegetation

YAN Min, ZUO Hejun, YANG Yang, LIU Yusheng, GUO Jingyu, WANG Qiang, LI Gangtie

(Key Laboratory of Wind Blown Sand Physics and Sand Control Engineering of Inner Mongolia Inner Mongolia, College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China)

Abstract: We measured different spacing shelter forest wind velocity flow field and inter-type vegetation of *Caragana korshinskii* in Siziwang Banner, and studied the wind reducing effect and the form of inter-type vegetation. The results show that: (1) *Caragana korshinskii* shelter forest has the reduction impact on wind speed, as well appeared the wind shadow area and accelerating area all in different contrast of wind speeds; (2) the wind protection effects decreased in the order: 4 m>6 m>8 m in the height of 0 to 2 meters from the ground, and 8 meters wide belt-type not only has an effect on low wind speed (6~8 m/s), but also can control the high wind speed (10 m/s) by four belt blocks; (3) *Thymus mongolicus*, *Setaria viridis* and *Artemisia* herb community appear in 8 meters wide forest, which is close to the zonality herb community (*Leymus chinensis* and *Artemisia frigida*) and shows that its recovery effect is obvious. This study ensures that the bandwidth and the amount of forest can provide survive for the future construction of wind resistance forest belt mixed multiple tree species and provide important scientific basis for the confirmation of the configuration mode.

Keywords: *Caragana korshinskii*; belt-type protection forest; wind reducing effect; inter-type vegetation; natural recovery

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)作为我国重要的防风阻沙灌木树种,被广泛应用于干旱、半干旱区造林以及人工植被恢复重建中^[1]。但在人工造林过程中,为寻求防风阻沙效果明显,大多采用高覆盖度造林,尽管沙地通过人工植被建设治理效果短期内较为明显,但过大规模的人工植被建设会使沙地水分

条件逐步恶化,影响人工植被的稳定发展^[2]。相关研究认为:植被覆盖度低于 40%,不能完全固定流沙和阻止风沙流的形成^[3-5]。但近年研究发现:在低覆盖度造林时,植物体的存在对固定流沙和阻止风沙流的作用差异很大^[6]。有研究表明营造低盖度(15%~25%)防护林既能够起到很好的防风固沙作用,又能

够显著减少生态用水;同时对于带间植被恢复也有明显作用^[7-9]。在大量的实践研究中发现,由于水分条件的制约,在干旱、半干旱地区,营造接近自然分布密度的稀疏防风固沙林最为合理,其结构为行带式水平配置结构^[10]。行带式格局是一种特殊的集群分布,能显著提高低盖度防护林的防风效果^[11]。相关研究通过野外试验与室内风洞模拟确定了行带式防护林的合理带间距,并提出在营造灌木防护林时应适当增大带间距^[12-14]。在确定了营造低覆盖度行带式防风阻沙林后,部分学者进一步对带间植被恢复情况做了研究,认为较宽带间距更有利于植被恢复,物种多样性增加,植被接近于地带性植被^[15-16]。

如何利用防风效果与带间植被修复效应找出适宜控制、促进植被恢复的林带栽植密度与配置格局显得至关重要。内蒙古四子王旗属典型的农牧交错带,该区域不合理的土地利用导致生态环境恶化、土地沙漠化^[17],加之对该区域低盖度行带式防护林模式鲜有研究。因此,对于内蒙古四子王旗采用低盖度行带式防护林以确保沙地治理和治理后的生态环境持续稳定高效的发展具有重要价值。

四子王旗周边种植了大量柠条锦鸡儿防护林,但部分由于密度过大等问题导致其带间植被存在一定程度退化。因此,对四子王旗柠条锦鸡儿防护林带间植被进行有效保护或人工促进,对该区自然生态环境和社会经济发展都具有重要影响。本文以四子王旗不同带间距行带式柠条锦鸡儿防护林及其带间植被为研究对象,通过对柠条锦鸡儿防护林防风效果以及带间植被修复效应的分析,找出适宜当地的柠条锦鸡儿防护林林分密度以及配置模式。为今后营造柠条锦鸡儿防风阻沙林提供理论依据,同时也为促进带间天然植被修复,合理规划与配置行带式造林密度以及最大限度提高生态恢复效益提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古四子王旗,地理坐标为:41°26′08″—41°55′25″N,111°38′25″—111°40′59″E,海拔为 1 300~1 590 m。气候类型属中温带大陆性季风气候,年平均气温 4.4℃,年平均降水量为 310 mm,降雨多集中在 6—8 月份,年均潜在蒸发量为 2 300 mm。年平均风速为 4~5 m/s,全年大风日数在 50 d 以上^[18]。地带性植被包括荒漠草原和典型草原,建群种为针茅。主要植物种有克氏针茅(*Step krylovii*)、羊草(*Leymus chinensi*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)、益母草(*Leonurus japonicus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的布设 选择地势平坦开阔的行带式柠条锦鸡儿防护林作为试验样地,其中包括带宽 4 m, 6 m, 8 m 样地 3 块,旷野对照样地 1 块(尽量保证试验样地与对照样地立地条件相似),每块样地设置 3 个试验重复;并将柠条锦鸡儿防护林及其带间植被作为本文的研究对象。具体情况见表 1,调查内容包括林龄、树高、冠幅、株距、带间距等。

表 1 柠条锦鸡儿防护林基本特征

| 样地 | 年份 | 株距/m | 带间距/m | 平均树高/m | 冠幅/m |
|-----------------|------|------|-------|--------|------|
| 样地 1 | 1994 | 1.00 | 4.00 | 1.75 | 1.62 |
| 样地 2 | 1995 | 1.50 | 6.00 | 1.70 | 1.76 |
| 样地 3 | 1995 | 1.00 | 8.00 | 1.91 | 2.09 |
| CK ₁ | — | — | — | — | — |

注:CK₁ 表示无柠条锦鸡儿防护林。

1.2.2 风速测定

(1) 风速流场测定。柠条锦鸡儿防护林林带风速测定示意图见图 1,试验时间为 2016 年 4 月,利用 HOBO 风速仪测定旷野风速与林带间风速。旷野风速观测点位与第一林带的距离为 7 H(H 为树高),林带前 1 H 处布设一观测点位,带间风速观测点位布设于林带中间。每个观测点位测定 20, 50, 100, 200 cm 共 4 个高度的风速,测量时间为 10 min,时间间隔为 2 s。

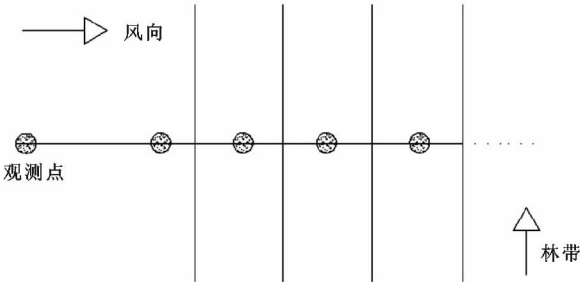


图 1 观测点布设示意图

(2) 防风效果的计算^[19]。

$$E_{XZ} = \frac{V_{OZ} - V_{XZ}}{V_{OZ}} \quad (1)$$

式中: E_{XZ} 为相对风速(防风效果),即林内 X 处、高度为 Z 处的风速占旷野对照风速的百分比; V_{OZ} 为同一高度旷野的平均风速; V_{XZ} 为林内 X 处、高度为 Z 处的平均风速。

1.2.3 带间植被调查

(1) 调查内容。采用样方法对带间植被进行调查,采样时间为 2016 年 8 月。每 1 样地平行于林带走向在林带中间布设 1 条平行样线,延样线方向每隔 2 m 设置 1 个 50 cm×50 cm 样方梯度进行调查,共 5 个梯度,在每个梯度设置 3 个重复,共 15 个。整个试验区共调查样

本数 60 个,测量指标主要有植物种类、数量、高度、冠幅、盖度以及密度等。

(2) 重要值的计算。

重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3

(2)

2 结果与分析

2.1 不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效应分析

2.1.1 风速流场特征 由不同带间距柠条锦鸡儿防护林风速流场图(图 2—4)可以看出,在不同旷野风速下风速流场变化趋势基本一致,随着林带数的增加,风速流场线逐渐抬升,但带内的风速变化开始紊乱。在柠条锦鸡儿林前,流场线均有小幅度的抬升,表明林带对于林前的风速具有减弱的作用,但减弱作用不明显;在经过林带后,不同带间距柠条锦鸡儿防护林都形成了风影区和加速区组合的复杂流场结构。在不同旷野风速条件下风速流场线均剧烈抬升,均在林后 1 H 处抬升至最高,此时风速降到最低,表明柠条锦鸡儿林在林后 1 H 处的风速防控能力最强;风穿过第 2 条林带后,流场线持续抬升,风速降低,低风速时近地表 0.2 m 处风速基本被有效地控制在 4 m/s 以下,高风速时风速仍然

较高;当风穿过第 3 条林带后,流场线渐近于平稳,表明林带对风速的影响趋于稳定,但在林后都出现弱风区,低风速时近地表 0.2 m 处风速基本被控制在 2 m/s 以下,高风速时近地表 0.2 m 处风速也被控制在 4 m/s 以下。在高度大于 1 m 处,风速在经过第一林带后有一个明显的风速加强区,这是由于柠条锦鸡儿前来流遭遇柠条锦鸡儿的阻挡,使之在柠条锦鸡儿上方抬升,流线从植株顶部绕过后下落,并在此形成了风速加强区。在高度 0.2~0.5 m 处,受柠条锦鸡儿影响较大,风速降低效果明显。

6 m(图 3),8 m(图 4)宽带间距柠条锦鸡儿防护林风速流场变化特征与 4 m 宽带间距防护林具有相似性,即在柠条锦鸡儿顶部也存在一个风速加强区,近地面处风速减弱较快。8 m 宽带间距在旷野风速为 6.55,8.05,10.07 m/s 下,第 4 带后近地表风速最低为 1.76,1.95,3.87 m/s,均在起沙风速以下。通过比较 4 m 宽带间距接近地表处风速降低最大,防护效果最明显,但同时可以看出 8 m 宽带间距柠条锦鸡儿防护林在 0.2~0.5 m 高度处风速降低也较为明显。由此可以表明 8 m 宽带间距柠条锦鸡儿林对较低的风速能进行有效防护,对较高的风速也能控制在起沙风速以下。

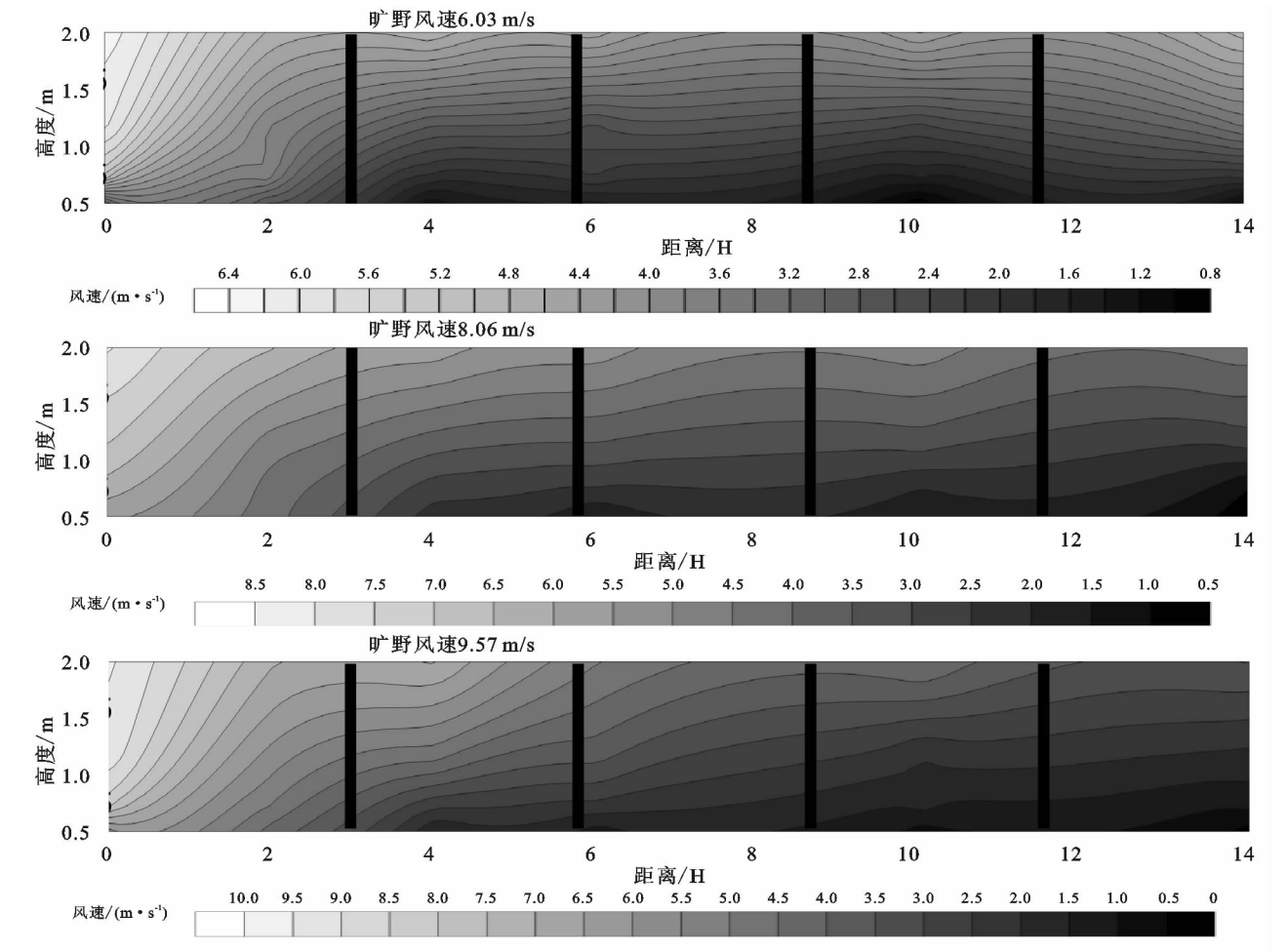


图 2 4 m 带间距柠条锦鸡儿防护林风速流场

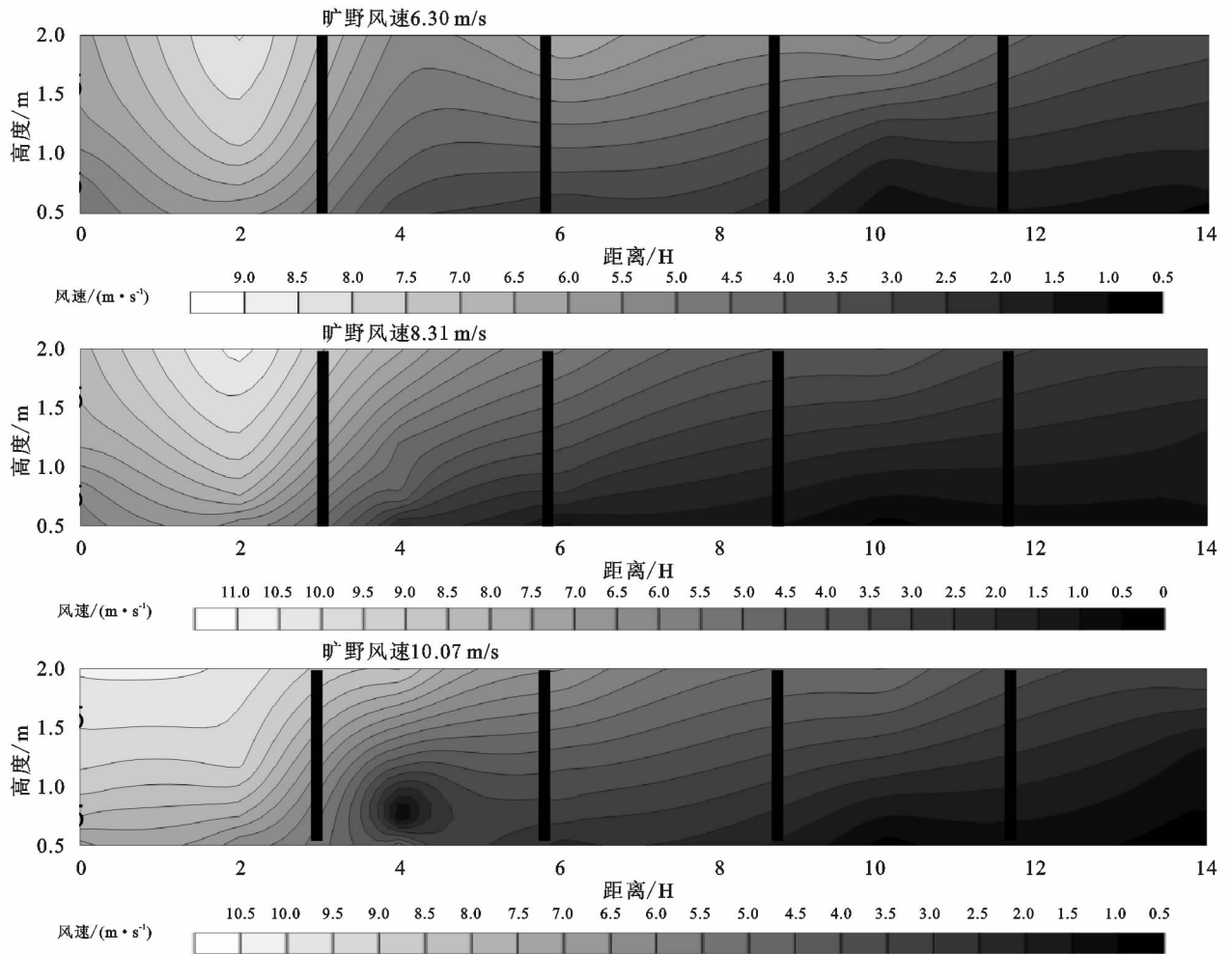


图 3 6 m 带间距柠条锦鸡儿防护林风速流场

2.1.2 防风效果 不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效能见表 2,通过对不同旷野风速下不同带间距柠条锦鸡儿林在 0.2,0.5,1,2 m 各高度的防风效能计算后取平均值,结果表明不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效能随着林带数的增加,防风效能呈先增长后趋于平稳的趋势。林前 1 H 的防风效能均较低,4 m 带距、6 m 带距与 8 m 带距的防风效能分别为 6.43%,3.37%和 5.98%,随着带间距的增大,防风效能随之增加。经过 4 条林带的防护,4 m 宽林带防风效能达 55.47%,6 m 林带防风效能达 51.38%,8 m 林带防风效能达 48.06%,各林带防风效能逐渐趋于稳定,但其防护效果均显著。由此可以表明:多条林带的组合防风效果具有累加作用。有研究表明 15 m 宽带间距柠条锦鸡儿林在经过 4 带的防护后,其防风效能仅为 30%,说明当带间距过大时,林带的防风效果将降低^[20]。由此可以表明,8 m 宽林带可以起到很好的防护作用,在今后营造灌木防护林时应适当拉大带间距。

2.2 不同带间距柠条锦鸡儿防护林带间植被恢复分析

2.2.1 带间植被种类及生活型 带状柠条锦鸡儿防

护林带间植被种类与生活型见表 3。种植柠条锦鸡儿防护林前后的退化草地植被种类存在一定差异,各林带植物种类共有 7 科 19 属 21 种。其中 8 m 宽柠条锦鸡儿防护林带间植被种类较为丰富,共有 15 种,主要有百里香、冷蒿、黄花蒿、独行菜与狗尾草等植被;6 m 宽柠条锦鸡儿防护林带间植物种类共有 10 种,以冷蒿、羊草、沙芦草与藜等植被为主,偶见种为细叶扁蓿豆、狗尾草;4 m 宽柠条锦鸡儿防护林带间植被种类共有 7 种,主要包括藜、沙蓬、沙芦草与蒲公英等植被。

柠条锦鸡儿防护林带间植被生活型共有 3 种,即半灌木、一年生草本、多年生草本,其中 4 m 宽带间植被有 4 种为多年生草本,3 种为一年生草本;6 m 宽带间植被有 7 种为多年生草本,3 种为一年生草本;8 m 宽带间植被有 1 种为半灌木,6 种为多年生草本,8 种为一年生草本。种植带状柠条锦鸡儿后物种生活型明显提高,随着带间距的增加,多年生草本数量增加,并在 8 m 带间距出现半灌木,且禾本科和菊科植物种类增加,这表明带间的优质牧草增加,带间植被趋于稳定,由此可见 8 m 带间距柠条锦鸡儿防护林更有利于植被恢复。

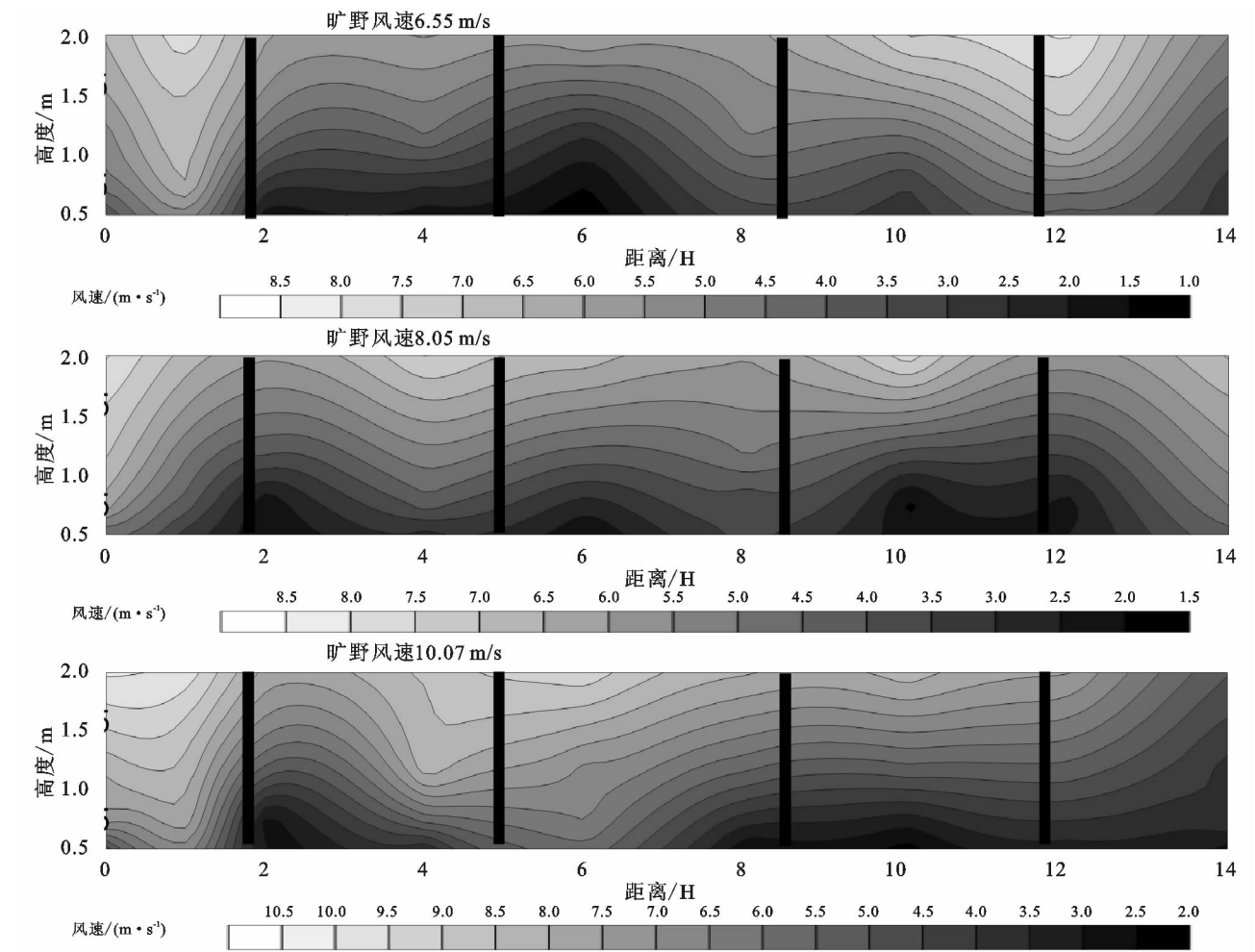


图 4 8 m 带间距柠条锦鸡儿防护林风速流场

| 表 2 | 不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效能 | | | | | % |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 带间距 | 林前 1 H | 第 1 带 | 第 2 带 | 第 3 带 | 第 4 带 | |
| CK ₁ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 4 m 带距 | 6.43 | 37.40 | 50.26 | 54.79 | 55.47 | |
| 6 m 带距 | 3.37 | 30.48 | 49.30 | 50.42 | 51.38 | |
| 8 m 带距 | 5.98 | 26.33 | 35.52 | 46.62 | 48.06 | |

2.2.2 带间植被组成及重要值 采用重要值作为种群优势度指标可以比较全面地反映植被不同的发育时期种群在群落中的功能地位和种群在群落中的分布格局^[21]。不同带间距带间群落类型与主要植被组成见表 4。4 m 宽带间植被以藜、沙蓬、沙芦草等为主,其中,藜的重要值最大,占有主导地位,但其与地带性植被差异较大;主要原因由于过窄的带间距导致土壤水分下降,大部分土壤水分及养分供给柠条锦鸡儿生长,带间草本得不到较好生长条件,使其逐步退化,而随着带间距的增加,带间植被所需水分与养分可以被更好地供给^[22]。因此,其植被恢复情况较好,主要植物种类与地带性植被相比较为接近。

沙芦草虽然只在 6 m 处存在,这可能与取样的选择有关。蒲公英重要值变化较为平缓,克氏针茅和冷蒿都是林带中间有,林下无。藜、独行菜、糙隐子草

和沙蓬重要值接近对照组(CK₁),部分较对照组(CK₁)高,这主要是由于对照组(CK₁)原有植被存在一定程度上的退化,而 8 m 宽行带式柠条锦鸡儿防护林对于植被的恢复具有较大作用。对照组(CK₁)中重要值较大的细叶扁蓿豆恢复效果较差,但是在植被恢复过程中也有原始植被缺少的物种得到了恢复,其中有早熟禾、沙芦草、冷蒿、百里香等,它们均是优良的牧草种质资源,对当地的畜牧业生产有极大的促进作用。8 m 宽带间距出现了百里香半灌木,禾本科与菊科植物种类也相应增加,这表明 8 m 宽带间植被趋于稳定,恢复情况较好。尽管与地带性植被(CK₂)还有所差异,但带间植被表现出明显的恢复迹象,羊草、冷蒿、狗尾草等荒漠草原常见种已成功定居。由此可以表明,适当增大林带间距有利于带间植被恢复。

3 讨论

在干旱、半干旱区,风是地表侵蚀的最主要外力,而能够保护地表免受风力侵蚀并对风力起到阻碍和扰动作用的主要是植被,营造防护林对于风的干扰作用较大,同时也对于植被的恢复具有重要作用。

表 3 不同带间距植被科属种及生活型

| 科名 | 属名 | 种名 | 拉丁学名 | 生活型 | 带间距 | | | |
|------|------|--------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| | | | | | 4 m | 6 m | 8 m | CK ₁ |
| 禾本科 | 针茅属 | 克氏针茅 | <i>Step krylovii</i> | 多年生 | + | + | — | + |
| 唇形科 | 百里香属 | 百里香 | <i>Thymus mongolicus</i> | 半灌木 | — | — | + | — |
| 藜科 | 藜属 | 藜 | <i>Chenopodium album</i> | 一年生 | + | + | + | + |
| 菊科 | 蒿属 | 冷蒿 | <i>Artemisia frigida</i> | 多年生 | — | + | + | — |
| 菊科 | 蒿属 | 黄花蒿 | <i>Artemisia annua</i> | 一年生 | — | — | + | + |
| 十字花科 | 独行菜属 | 独行菜 | <i>Lepidium apetalum</i> | 一年生 | — | + | + | + |
| 禾本科 | 隐子草属 | 糙隐子草 | <i>Cleistogenes squarrosa</i> | 多年生 | — | — | + | + |
| 菊科 | 狗娃花属 | 阿尔泰狗娃花 | <i>Heteropappus altaicus</i> | 多年生 | + | + | + | — |
| 禾本科 | 早熟禾属 | 早熟禾 | <i>Poa annua</i> | 一年生 | — | — | + | — |
| 禾本科 | 赖草属 | 羊草 | <i>Leymus chinensis</i> | 多年生 | + | + | — | + |
| 豆科 | 扁蓿豆属 | 细叶扁蓿豆 | <i>Melissitus ruthenica</i> | 多年生 | — | + | + | + |
| 菊科 | 蓝刺头属 | 砂蓝刺头 | <i>Echinops gmelinii</i> | 一年生 | — | — | + | — |
| 禾本科 | 冰草属 | 沙芦草 | <i>Agropyron mongolicum</i> | 多年生 | — | + | — | — |
| 菊科 | 蒲公英属 | 蒲公英 | <i>Taraxacum mongolicum</i> | 多年生 | + | + | + | — |
| 禾本科 | 狗尾草属 | 狗尾草 | <i>Setaria viridis</i> | 一年生 | + | + | + | + |
| 菊科 | 苍耳属 | 苍耳 | <i>Xanthium sibiricum</i> | 一年生 | — | — | — | + |
| 藜科 | 沙蓬属 | 沙蓬 | <i>Agriophyllum squarrosum</i> | 一年生 | + | — | + | + |
| 唇形科 | 益母草属 | 益母草 | <i>Leonurus artemisia</i> | 一年生 | — | — | — | + |
| 菊科 | 蒿属 | 艾蒿 | <i>Ser. Abrotanum</i> | 多年生 | — | — | — | + |
| 毛茛科 | 唐松草属 | 翼果唐松草 | <i>Thalictrum aquilegi folium</i> | 多年生 | — | — | + | — |
| 藜科 | 雾冰藜属 | 雾冰藜 | <i>Bassia dasyphylla</i> | 一年生 | — | — | + | — |
| 合计 | | | | | 7 | 10 | 15 | 12 |

注：(1) CK₁ 表示无柠条锦鸡儿防护林样地；(2) +表示有该种植物；—表示无该种植物。

表 4 不同带间距群落类型、植物种类及重要值

| 群落类型 | 样地 | 主要植物组成(重要值) |
|--------|-----------------|--|
| 藜 | 样地 1 | 藜(30.43)、沙蓬(17.63)、蒲公英(17.31)、狗尾草(15.23) |
| 冷蒿+沙芦草 | 样地 2 | 冷蒿(29.31)、沙芦草(27.96)、羊草(12.98) |
| 百里香+冷蒿 | 样地 3 | 百里香(29.03)、冷蒿(13.07)、狗尾草(9.76)、黄花蒿(8.63) |
| 羊草+黄花蒿 | CK ₁ | 羊草(24.12)、黄花蒿(21.96)、狗尾草(18.06) |
| 羊草+冷蒿 | CK ₂ | 羊草、冷蒿、狗尾草、益母草、猪毛菜、阿尔泰狗娃花、风毛菊 |

注：CK₂^[24]表示地带性植被。

(1) 本文通过对柠条锦鸡儿防护林风速流场特征的分析,结果表明柠条锦鸡儿防护林的存在对风场起到了减弱与干扰作用,在林带后出现风影区,林带前会形成风速加速区,多带的组合增加了林带的防风效果,这与杨文斌等^[10]学者研究结果一致。本文找出了带间距 4 m 防风效果最好,但 8 m 宽带间距在经过 4 条林带的防护后,风速降低至起沙风速以下,防护效果较为明显。连续的行带式分布对风速的阻碍和降低表现出明显的累加作用,合理的带间距不但有利于防止土壤风蚀,而且有利于带间植被的恢复。四子王旗属典型农牧交错带,本文就该区域现有不同带间距柠条锦鸡儿防护林进行了观测,研究认为 8 m

宽带间距为现有防护林的最佳带间距,本文研究的结果更能真实地反映自然状态下柠条锦鸡儿单行多带式防护林的防风效果,结合部分学者在风洞试验以及人为设置的柠条锦鸡儿防护林的试验结果,认为今后在该区域营造柠条锦鸡儿防护林可适当拉大带间距。

(2) 行带式人工林的配置格局对带间植被盖度及物种数目有着重要影响,在相同的立地条件下,带间距离的宽窄决定了带间植被恢复的效果,宽带间距带间植被恢复效果优于窄带间距离。许德生^[23]、杨洪晓^[24]等对防风阻沙林做了相关研究,提出了低覆盖度造林理论后,无论带间植被修复多样性变化还是生物量变化,对于在干旱、半干旱区营造柠条锦鸡儿

防护林,应建设宽林带低覆盖度的防风阻沙林。本文通过对不同带间距带间植被修复效应的分析,不可否认,较窄林带间出现了各种非地带性植被,即便在地带性地段,由于过窄的林带导致耗水量与遮荫面积过大,进而不利于植被恢复。但随着带宽的增大,植被恢复效果随之增加,宽林带更有利于植物种定居,增加物种多样性与生物量。在植被恢复过程中,原始植被缺少的物种得到了恢复,其中有蒲公英、沙芦草、冷蒿、百里香等,一些地带性植被也得到了恢复,使得自然植被更加接近于地带性植被。

综上所述,当带间距过窄时,其防风效果虽好,但增加了植被耗水量与遮荫面积,给植被自然恢复增加了难度。但是,如果没有柠条锦鸡儿防护林的保护,土壤风蚀不能得到很好地控制,植被自然修复过程也不能正常完成。因此,建立合理密度柠条锦鸡儿防护林是至关重要的。本文提出的营造柠条锦鸡儿防护林带间距8 m以上、并布设4带的研究结果对于农牧交错带防风固沙与植被恢复研究具有重要意义。

4 结论

(1) 自然状态下4 m宽柠条锦鸡儿防护林防风效果最好,8 m宽防护林风速也可降低至起沙风速以下;较宽带间距更有利于植被恢复,8 m宽带间出现了以百里香、狗尾草以及蒿属为主的草本群落,与地带性草本群落(羊草+冷蒿)接近,恢复效果明显。

(2) 综合考虑防风效益及带间植被恢复效果,8 m宽柠条锦鸡儿防护林防护效果最佳。今后在该区域营造单行多带式柠条锦鸡儿防护林时应将带宽设置在8 m以上,并布设4带。

参考文献:

- [1] 杨文斌,丁国栋,王晶莹,等.行带式柠条锦鸡儿固沙林防风效果[J].生态学报,2006,26(12):4107-4112.
- [2] 高函.低覆盖度带状人工柠条锦鸡儿防护林防风阻沙效应研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [3] 赵兴梁.沙坡头地区植物固沙问题的探讨[C]//流沙治理研究(二).银川:宁夏人民出版社,1991.
- [4] 朱震达,刘恕.中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划[M].北京:中国林业出版社,1981.
- [5] 朱震达,陈广庭.中国土地沙质荒漠化[M].北京:科学出版社,1994.
- [6] 杨文斌,任居平.农牧林复合轮作治沙模式和效益分析[J].中国沙漠,1998,18(S1):113-115.
- [7] 杨文斌,郭建英,胡小龙,等.低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析[J].中国沙漠,2012,32(5):1292-1295.
- [8] 董慧龙.低郁闭度乔木行带式固沙林防风效果研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [9] 姜丽娜,杨文斌,卢琦,等.低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J].生态学报,2013,33(5):3192-3204.
- [10] 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用研究[J].中国沙漠,2006,26(1):109-112.
- [11] 屈建军,张伟民,吴丹.金字塔型沙波纹的风洞试验研究[J].科学通报,1992,26(12):4106-4112.
- [12] 杨红艳,王晶莹,杨文斌.行带式柠条锦鸡儿防护林合理带间距的研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(7):211-214.
- [13] 杨文斌,卢琦,吴波,等.低覆盖度不同配置灌丛内风流结构与防风效果的风洞试验[J].中国沙漠,2007,27(5):792-796.
- [14] 高函,吴斌,张宇清,等.行带式配置柠条锦鸡儿防护林防风效益风洞试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):45-47.
- [15] 姜丽娜.低覆盖度行带式固沙林促进带间土壤、植被修复效应的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [16] 孟根其格,德永军,赵德旺,等.带状柠条锦鸡儿人工林对带间植被特征的影响[J].内蒙古农业大学学报,2009,30(3):39-41.
- [17] 张富,海春兴,郝润梅,等.农牧交错带牧区土地利用方式变化过程研究:以内蒙古自治区四子王旗为例[J].内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2008(1):111-115,119.
- [18] 刘娟娟.农牧交错带可持续发展研究:以内蒙古四子王旗为例[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2009.
- [19] 朱廷曜,关德新,周广胜,等.农田防护林生态工程学[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [20] 杨阳.库布其沙漠灌溉农田沙害防治体系效益分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [21] 曹成有,蒋德明,阿拉木萨,等. [J].应用生态学报,2000,11(3):349-354.
- [22] 李艳艳,卜建华,张伟英,等.不同柠条锦鸡儿带间距对植物群落及土壤水分影响的研究[J].现代农业科技,2008(23):20-21,25.
- [23] 许德生,赵翠平,德永军,等.不同带间距柠条锦鸡儿防护林林地土壤水分变化特征[J].内蒙古农业大学报,2008,29(4):55-57.
- [24] 杨洪晓,王学全,卢琦,等.行带式柠条锦鸡儿林在内蒙古四子王旗退耕还草工程中的应用[J].林业科学,2010,46(11):36-42.