

和田—若羌铁路大风沙区绿化林带配置的风洞模拟试验

丁雪宁

(新疆铁道勘察设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: [目的] 探究和田—若羌铁路大风沙区铁路科学的防沙林带宽度、间距及体系配置模式,为沙区铁路防护林带配置和建设提供理论依据。[方法] 以梭梭和沙拐枣为林木模型,开展防沙林带配置的风洞试验研究。[结果] 防护林带宽度为5行,防护林带间距为6H(H为植物模型高度)时,第2条林带气流减弱效果明显,第3条阻沙林带之后区域,气流衰减显著,且不会随着风速的增大而增加,具有较好的防护效益,3条林带达到较好的防护作用。风速越大,林带背风侧防护区的范围越短。[结论] 为保证体系在较大风速作用下有较好的防护作用,林带体系应选择5条防护林配置体系模式。

关键词: 铁路防沙; 风洞试验; 阻沙林带; 林带配置

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0257-08

中图分类号: X169

文献参数: 丁雪宁.和田—若羌铁路大风沙区绿化林带配置的风洞模拟试验[J].水土保持通报,2024,44(4):257-264.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.027; Ding Xuening. Wind tunnel simulation experiments on configuration of railway green belts in intensely blown sand areas of Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(4):257-264.

Wind Tunnel Simulation Experiments on Configuration of Railway Green Belts in Intensely Blown Sand Areas of Hetian-Ruoqiang Railway

Ding Xuening

(Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, XinJiang 830011, China)

Abstract: [Objective] The width, spacing, and system configuration mode of scientifically designed sand-control forest belts along the Hetian-Ruoqiang railway in areas prone to strong winds and sandstorms were analysed, in order to provide theoretical foundations for the configuration and construction of protective forest belts along the railway in sandy regions. [Methods] The configuration of a sand protection forest belt was studied using wind tunnel experiments and *Haloxyylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* as forest tree models. [Results] When the protective forest belt spanned five rows and the gap between each belt was six times the height, a noticeable decrease in airflow was observed behind the second belt, with substantial attenuation continuing into the region behind the third sand-control forest belt. Notably, this attenuation remained consistent regardless of wind speed, highlighting its effective protective nature. Utilisation of these three forest belts resulted in enhanced protection. The protective area on the leeward side of the forest belt decreased as the wind speed increased. [Conclusion] The forest belt system employed the configuration modes of five protective forests to enhance the protective effect of the system against high wind speeds.

Keywords: railway sand control; wind tunnel experiment; sand-blocking forest belt; forest belt configuration

和田—若羌铁路(简称和若铁路)位于塔克拉玛干沙漠边缘^[1],这里风沙活动强烈,风沙灾害严重,在铁路部分路段采用了植物林带进行防风固沙。

作为最根本、最有效的方法^[1-2],林带成为防沙措施的一个重要组成部分,被广泛设置于铁路迎风侧,拦截过境风沙流。经过长期试验,包兰线沙坡头段近

收稿日期:2024-04-15

修回日期:2024-05-20

资助项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目“和若铁路防沙综合技术研究”(N2022G068);中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司科技研发计划项目“植物防沙体系配置防护效益评价与模式优化试验研究”(WLMQ-KGHZGS-HRTLGG-2020-0031)

第一作者:丁雪宁(1989—),女(汉族),新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人,本科,高级工程师,主要从事铁路勘察设计与风沙防治方面的研究。
Email:19239401265@163.com.

70 年^[3]来取得了较好的生态效益,保证了铁路的安全运营^[4-5]。然而,植物防护宽度^[6-10]一直以来没有定量分析,一般根据地区经验确定,防护宽度越宽,成本越高,防护效益越好^[11-15]。经济有效的林带配置模式^[16-20],减少铁路建设和运营成本具有重大意义。

为合理布置和若铁路铁路沿线的风沙防护林带,本文通过风洞实验对防沙林带的宽度、间距及体系配置模式进行研究。整个实验时间为 2022 年 5 月,实验结果指明了针对和若铁路风沙防护林带的优化配置模式,为工程建设提供了有力的指导资料。

1 植物风洞模型建立

按照相似理论,要做到自然界的的风沙现象与室内模型试验完全相似是几乎不可能的^[21-22],一般只进行近似模拟。本文试验采用直流式风洞(横截面尺寸为 1.35 m×1.45 m)。在风洞中模拟风沙运动很难做到完全相似,本实验考虑了几何相似和运动相似,风洞入口处采用对数风速廓线,并采用 Nemoto 相似准则^[22]:

$$\frac{u_m}{u_a} = \left(\frac{L_m}{L_a}\right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: u_m , u_a 分别为研究模型和实际模型的风速(m/s); L_m , L_a 分别为研究模型和实际模型的几何尺寸。本试验选择模型树的缩尺比例为 1:50,沙源选择沙漠原沙,平均沙粒粒径为 260 μm 。

为避免边壁效应,本文考虑了两个方面的内容,一是满足湍流效应^[23]要求,二是满足风洞试验阻塞比要求。

根据前人^[24]对沙栅后湍流效果研究,当沙栅长度和高度的比超过 11.5 时,侧壁效应产生的涡流区会大大减小。林带布置的风洞试验与沙栅的试验高度类似,本试验的梭梭和沙拐枣林布置的宽度和高度比为 20,满足此要求,因此可以忽略侧边造成的湍流效应影响。

为避免出现侧壁效应。本文采用最大阻塞比来表征^[25]。最大堵塞比 BR_1 为:

$$BR_1 = \frac{A_{\text{fence}}}{A} < 0.1 \quad (2)$$

式中: A_{fence} 为林带的迎风面积; A 为风洞横截面积。本试验中布林带试验的最大阻塞比是 0.036,满足上述要求。因此本试验可以认为侧壁效应有较小的影响。

风洞边界层厚度为 65 cm,模型树的高度(6 cm)与边界层厚度的比值为 0.092,可认为风洞模拟试验基本上只产生一个很小的影响^[25-26]。新疆和若铁路位于强风沙地区,梭梭和沙拐枣等植物常见于风沙防护体系中,因此试验以梭梭和沙拐枣为林带树种模

型。一般植被种植密度是需要考虑环境的生态承载力的^[27],但由于人工干预(如施肥和浇灌),经实际调研,和若铁路沿线的梭梭防沙林的生长高度约为 2~3 m,平均冠幅为 2 m×2 m。沙拐枣相对梭梭而言株高相对较小,平均株高也接近 3 m,平均冠幅为 2.2 m×2.3 m。按照几何相似准则^[22],将梭梭、沙拐枣按照 1:50 的比例缩小(高度按照 3 m 计算,冠幅间距按 1 m 计算),采用橡胶树模型,制成 6 cm 高的梭梭、沙拐枣模型(图 1),将模型呈条带状,栽植于 PVC 板上,放置于距风洞前缘 1 m 处。模型株距、行间距为 2 cm。为确定阻固沙林带的最佳配置模式,设置不同的林带宽度、不同林带间距和阻固林带配置模式。



a 梭梭

b 沙拐枣

图 1 梭梭和沙拐枣植物模型

Fig.1 Models of *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum*

2 林带宽度试验

阻沙林带布置时,不仅要考虑植被绿化美观性,更主要的是要考虑防护林带对铁路的防风防沙功能,因此林带布置一般沿铁路线采用条带式布置。首先是为了阻滞垂直于铁路方向的外围流沙进入铁路系统,包括路基和道砟,进而对铁路通行安全造成影响;其次条带式布置的优势在于,各条带之间的风速锐减严重,条带之间的空留带可以滞留存储大量的垂直于铁路方向的外来流沙,从而达到阻沙和固沙的双重目的。

为了确定最佳阻沙林带条数,将梭梭、沙拐枣按照:1 行(沙拐枣)+1 行(梭梭),1 行(沙拐枣)+3 行(梭梭),2 行(沙拐枣)+3 行(梭梭),2 行(沙拐枣)+5 行(梭梭),2 行(沙拐枣)+7 行(梭梭),2 行(沙拐枣)+9 行(梭梭),2 行(沙拐枣)+14 行(梭梭)布设。梭梭、沙拐枣株间距均为 2 cm,行间距 2 cm。布设模式以 2 行(沙拐枣)+14 行(梭梭)为例,试验设置如图 2 所示。每种组合模式分别在 10,12 和 14 m/s 这 3 种风速条件下进行。风速廓线用比托管测定,测定高度依次为 1,2,3,5,7,10,15,30 和 50 cm。

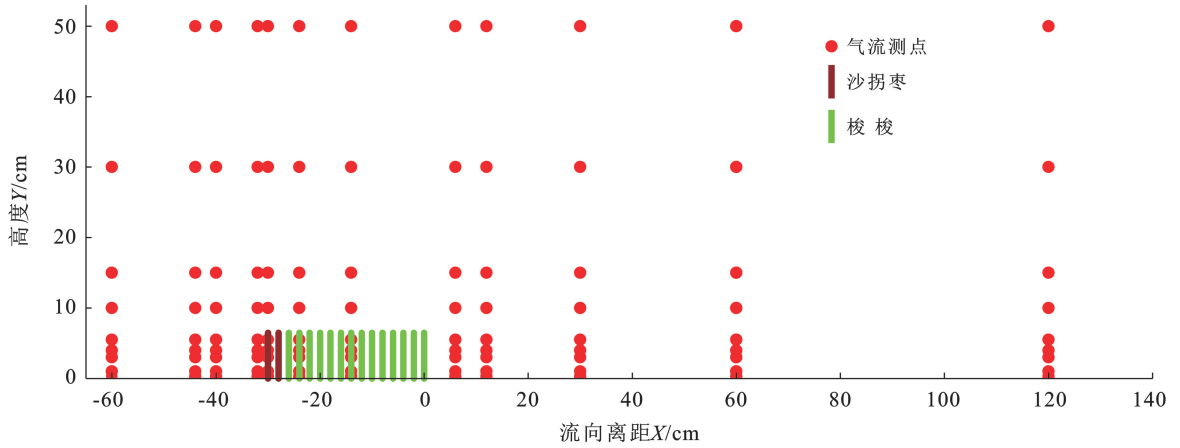


图 2 阻沙林带布置实验气流测点分布(2行沙拐枣+14行梭梭为例)

Fig.2 Arrangement of sand control forest belts and distribution of experimental airflow measurement points (for example, there are two rows of *Haloxylon ammodendron* and 14 rows of *Calligonum mongolicum*)

10 m/s 风速条件下,不同防护林宽度的气流分布图如图 3 所示。由图 3 可知,气流靠近防护林体系,近地表风速降低,林带前出现了气流减速区。经防护林等值线压缩气流抬升,在防护林顶部出现局部

加速区。当气流越过防护林($x = 0$ cm),受背风侧低压区的影响,流线扩张,风速减弱,气流分离,在防护林背风侧出现了气流减速区。随着防护林背风侧距离增大,气流最终恢复到初始状态。

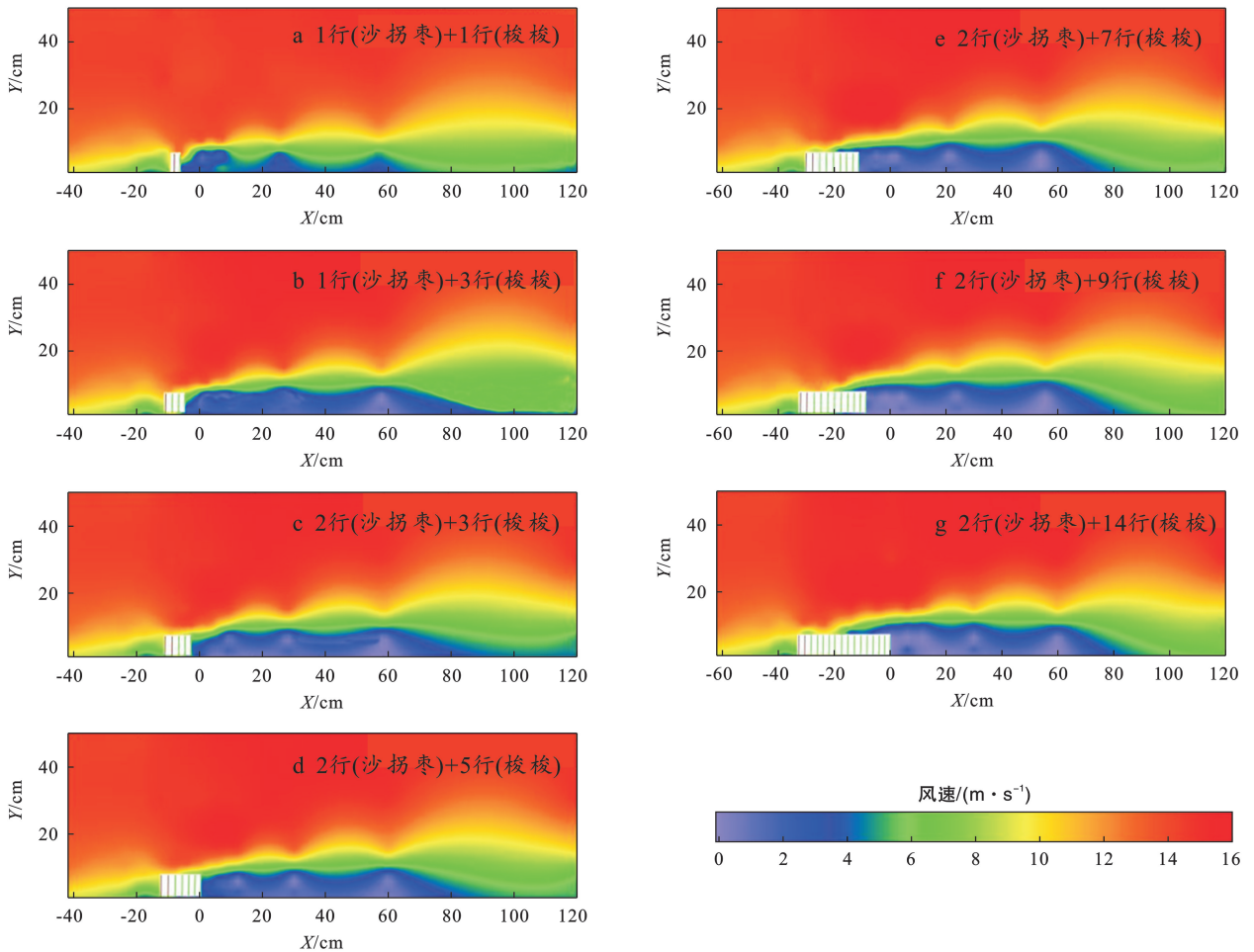


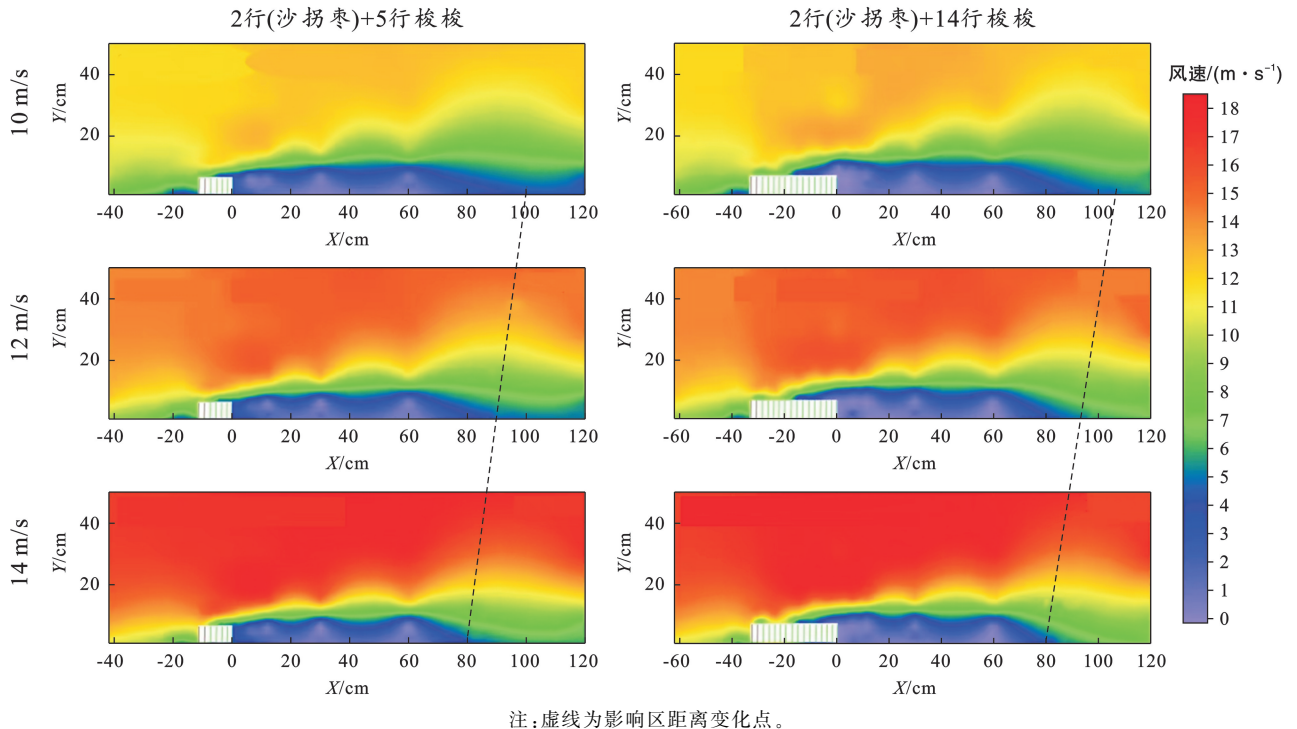
图 3 10 m/s 风速条件下不同防护林宽度的气流分布

Fig.3 Airflow distribution for different shelterbelt widths under 10 m/s wind speed

林带对风沙的防护效益主要体现在林带背风侧气流的衰减情况。从图 3 可知,不同宽度防护林背风侧气流减速区的水平影响范围较为接近,均在 $x=80$ cm 左右;但是随着林带行数从 2 行增加到 14 行,林带背风侧气流减速区的面积增加,说明林带行数越多,气流衰减面积越大,效果越好。由于水资源的限制及节约工程建设成本,大面积的防护林建设不切实际,需要最佳林宽度来指导工程建设。林带为 2,4 行时,气流在林带背风侧($x=0\sim 5$ cm, $y=6\sim 10$ cm 区域)气流减速不明显;林带为 5 行时,在林带背风侧($x=0\sim 5$ cm, $y=6\sim 10$ cm 区域)气流减速,防风效果显著;当林带大于 6 行时,林带后排顶部出现了气流减

速现象,背风侧后排林木未起到防护作用,可见防护林为 5 行时为最佳防护林宽度。以林带为 7 行(2 行沙拐枣+5 行梭梭),16 行(2 行沙拐枣+14 行梭梭)为例(图 4),对比不同风速条件下,林带气流变化特征。随着风速从 10 m/s 增加到 14 m/s,林带背风侧减速区的水平影响范围从 100 cm 变化至 80 cm。可见随着风速的增加,林带背风侧气流衰减范围逐渐变短。

通过上述试验,林带为 5 行时,为最佳防护林宽度,超过 5 行会出现防护叠加效应,低于 5 行时少部分气流穿越林带达不到工程防沙目的。风速越大,防护林背风侧防护区的范围越短。



注:虚线为影响区距离变化点。

图 4 不同风速条件下防护林气流分布特征

Fig.4 Characteristics of airflow distribution in protection forests under different wind speeds

3 林带间距试验

根据林带宽度试验结果,选择最佳阻沙林带。为确定阻沙林带间距,将阻沙林带按间距 $3H$, $6H$, $9H$, $12H$ (H 为植物模型高度) 布设。布设模式以防护林带宽度(5 行),不同阻沙林带间距分别在 10, 12 和 14 m/s 这 3 种指示风速下进行。

根据设定的 4 种不同林带间距试验结果(图 5),随着林带间距的增加,林带间气流减速区的范围逐渐增大。当林带间距为 $3H$ 和 $6H$ 时,第 2 条林带顶部出现了减速区,出现风速衰减叠加;当林带间距为 $9H$ 时,在第二条林带顶部出现减速;当林带间距为 $12H$ 时,在第二条林带顶部气流逐渐增加,林带背风侧

水平距离在 $x=55\sim 65$ cm 处,气流逐渐开始增加,表明林带间距为 $12H$ 防护效益逐渐减弱。

由图 5 可知,林带间距小于 $9H$ 时,风速衰减效果明显,当防护林带间距大于 $12H$ 时,林带背风侧一定区域气流开始恢复;当防护林带间距为 $3H$, $6H$ 时,在第 2 条林带顶部出现了气流减速,说明第 2 条林带前沿部分减风作用叠加。结合工程建设中的经济成本,和若铁路工程建设中建议选择 $9H$ 的林带间距。

4 林带体系的配置

确定防护林带行数、防护林间距之后,如何配置林带体系才能达到较好的效果,使风沙全部拦截。初

步拟定 2 个阻沙林带+1 个固沙林带;3 个阻沙林带+1 个固沙林带;5 个阻沙林带+1 个固沙林带的 3 种模式。在风洞模拟中,只需要探究最多配置模式时,气流衰减情况,通过气流衰减速率的变化,确定阻固沙林带最佳配置模式。试验过程中气流测点布设,以 5 个阻沙林带+1 个固沙林带为例,试验布设如图

6 所示。从图 6 可以看出,10,12 和 14 m/s 这 3 种风速条件下,第 3 条林带背风侧气流发生了衰减现象,表明从第 3 条阻沙带开始,背风侧之后出现小部分风速衰减重叠。理论上 3 阻 1 固的林带布设模式达到了风沙防护的效果,但考虑风沙防护林的使用年限,建议 5 阻 1 固布设模式。

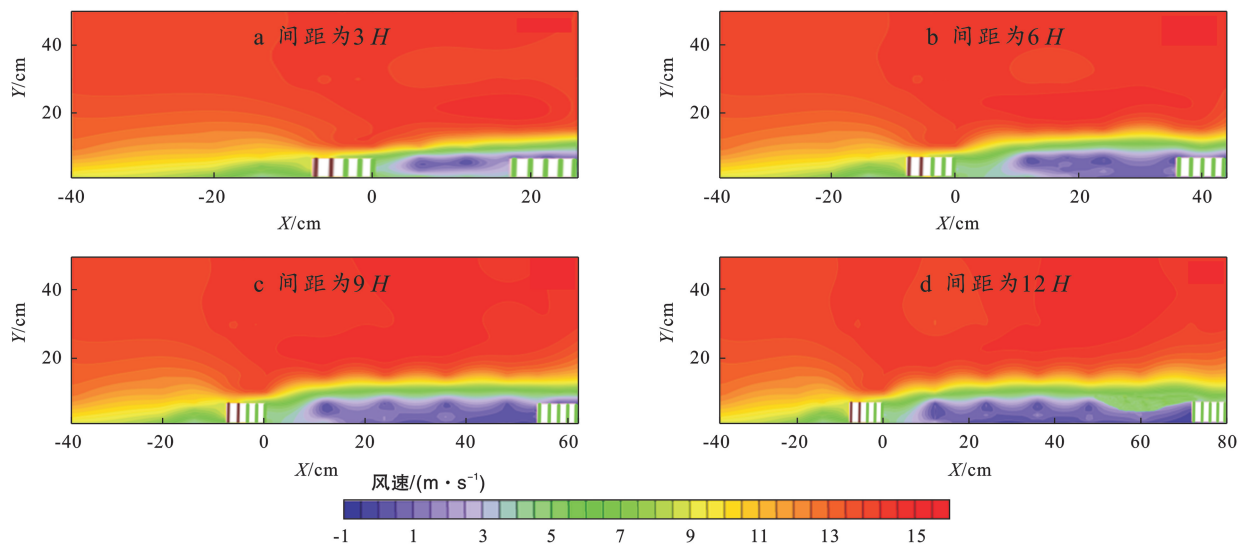


图 5 不同防护林带间距下气流分布特征

Fig.5 Characteristics of airflow distribution under different spacing of shelterbelts

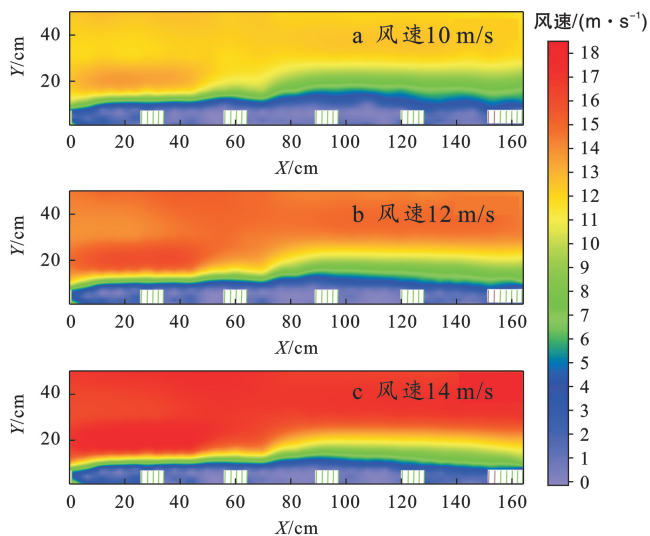


图 6 5 个阻沙+1 个固沙防护林配置模式气流分布特征
Fig.6 Experimental deployment of five sand-control forest belts and one sand-fixing forest belt

5 林带体系配置效益评价

5.1 试验装置

为了验证林带配置防护效益,将梭梭、沙拐枣按照 1:50 的比例缩小,进行积沙试验制作梭梭、沙拐枣树模,模型株高 6 cm,株距与行距为 2 cm,栽植于 PCV 板上。制作成 5 个阻沙林带+1 个固沙林带的配置模式,在模型上风向约 0.5 m 处,均匀布设长

2.5 m,宽 0.7 m,厚 0.05 m 的流沙面,试验分别设定在 6 和 8 m/s 两种风速,分别吹蚀 60 和 15 min。风洞内试验设置及过程如图 7 所示。



图 7 林带体系试验模拟

Fig.7 Experimental simulation of forest belt systems

5.2 防护体系内积沙特征

通过模拟试验,制作了最佳组合模式防护林体系,进行积沙试验。图 8 为风速 6 m/s 条件下吹蚀 60 min 后的积沙形态特征,在吹蚀时间 $t=2\sim 4$ min 时,最先在第 2 道阻沙林前部进行积沙,部分风沙流穿越第 2 道阻沙体,在第 2 道阻沙林背风侧进行积沙。随着时间的推移 $t=8\sim 20$ min,第 2 道阻沙体迎风侧积沙量逐渐增加,积沙体的高度也逐渐增加。 $t=38\sim 60$ min 时,随着第 1 道阻沙体前积沙量的增加,第 1 道阻沙林

前的积沙体和第 2 道前的积沙体合拢,床面最终处于稳定状态。说明低风速条件下,第 1 和 2 道阻沙体为

最主要的防护体,大量沉积物在第 2 道防沙体系内堆积,随着时间的推移,积沙体处于稳定状态。

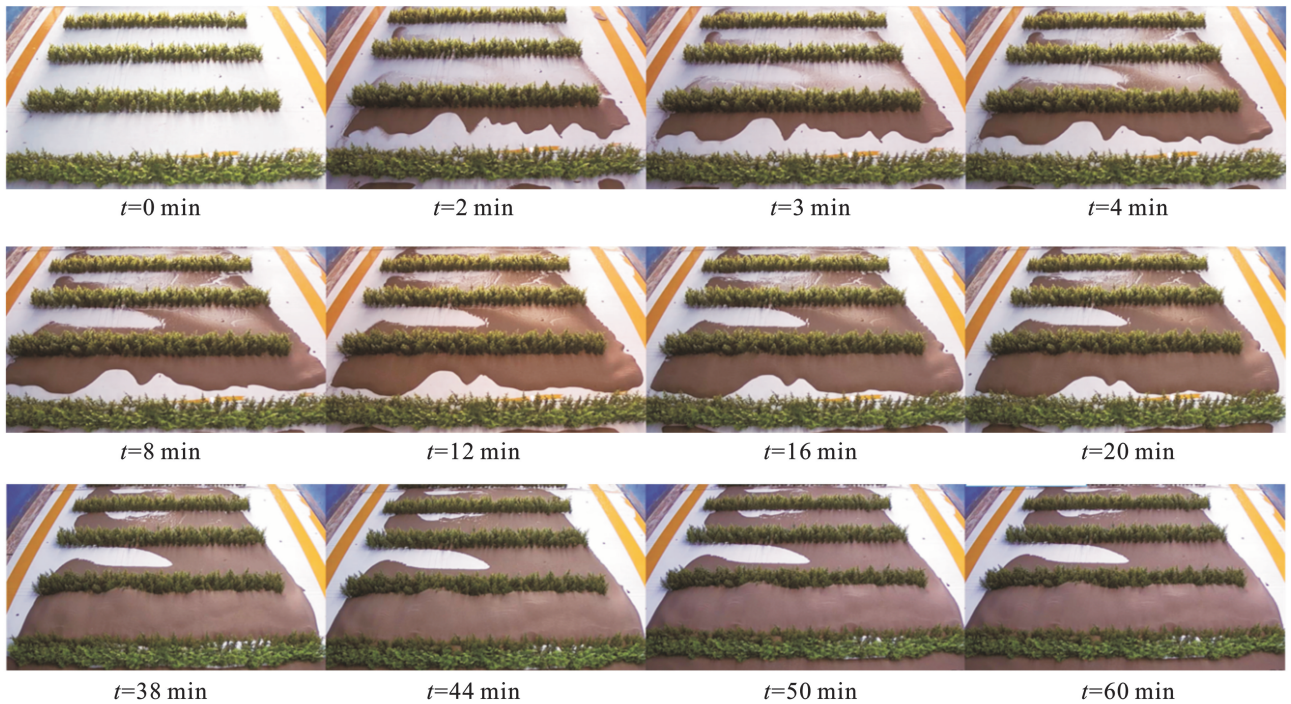


图 8 6 m/s 风速条件下不同吹蚀时间最佳组合配置防护林阻沙特征

Fig.8 Characteristics of optimal combination of protection forest configurations to block sand with different deflation times under wind speed (6 m/s) conditions

风速 8 m/s 条件下吹蚀 15 min 后防护林的积沙形态特征(图 9)。t=3 min 时,第 1 道防护林后侧积沙,积沙量压埋第二道防护林体系;t=8~15 min 时,积沙体的形态基本处于稳定状态,大量的沙物质堆积在第 1 道和第 2 道防护体系内,第三、四、五林带内,积沙量很少,主要受风沙饱和度影响。在大风速条件下,风沙流受防护林的影响,第 1 和 2 道内风速降低,大量沙物质沉积在 1 和 2 带内,在第二条带后风速逐渐恢复至初始状态,当风速达到起沙风速时,发生非积搬运,导致在 3,4,5 林带内很少有沙粒沉积,只有少部分沙粒沉积在 3,4,5 林带背风侧风影区。



图 9 8 m/s 风速条件下配置防护林阻沙特征

Fig.9 Characteristics of sand blockage by configuration of shelterbelts under wind speed (8 m/s) conditions

5.3 林带内堆积量对比分析

为验证最佳防护体系的阻沙能力,将吹蚀后防护林内各阻沙带内的积沙量进行了称重,积沙率在第 1 和 2 道内最大,在 0.12~0.17 kg/min(图 10a),在第 2 道防护林之后,积沙率迅速降低,其值接近 0;同时,计算第 1 道前和 12 道间积沙量的体积百分比,积沙量较大,分别达到 38%和 48%(图 10b)。说明第 1 和 2 道防护林主要拦截了大量的风沙流,结果和防护林流场的结果较为接近,可相互验证试验结果的可靠性、准确性。

对比 8 和 6 m/s 风速条件下,防护林内积沙量的变化。第 1 道前和 12 道道间积沙,小风速条件下(6 m/s)积沙率大于高风速的积沙率(图 10a)。在第 2 道积沙体之后,大风速条件下的积沙率略大于小风速的积沙率。说明大风速条件下,风力携带能力更强,大部分沙物质在后林带间沉积。不同阻沙带内防护林内积沙率的变化特征(图 10c),第 1 道阻沙林至最后一道固沙林,积沙率逐渐降低。同时,在前 3 道阻沙林带内,大风速下(8m/s)林内阻沙量大于小风速(6m/s),在第四道阻沙林之后,大风速条件下林内积沙率小于小风速,说明,大风速条件下防护林也起到较好的防护效果,大部分沙粒被拦截在第 3 道阻沙带之前。

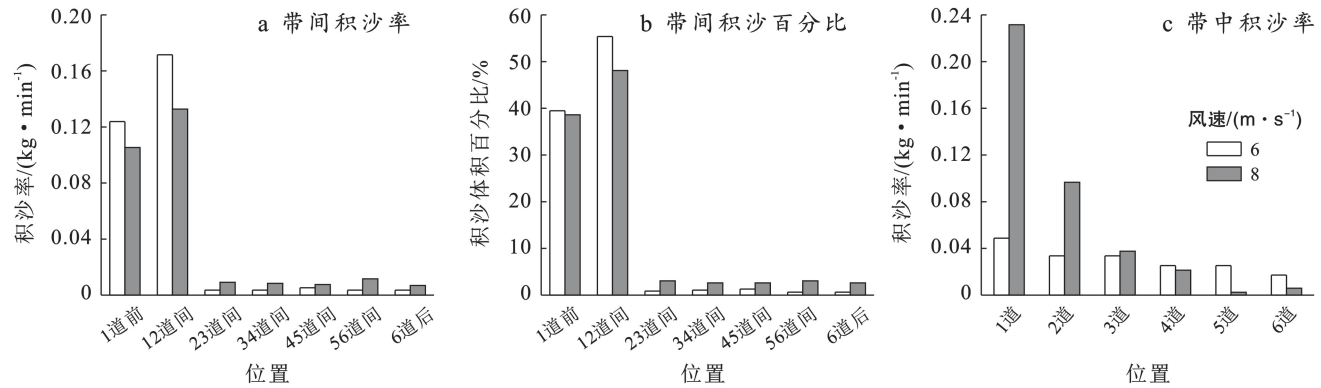


图10 防护林积沙量的变化特征

Fig.10 Characteristics of sand accumulation near protective forest belts

6 结论

(1) 绿化林带为5行时,风速减弱效果明显。超过5行会出现减风效果重叠,低于5行时,少部分气流可穿越,达不到工程防沙的目的。风速越大,防护林背风侧防护区的范围将越短。

(2) 林带间距小于 $12H$ 时,林带防护效果明显,林带间距大于 $12H$ 时,气流逐渐恢复,背风侧后效果逐渐丧失;林带间距为 $3H$, $6H$ 时,在第二条林带顶部出现了气流减速,效益重叠。工程建设中选择 $9H$ 的防护林带间距。

(3) 通过流场和积沙试验相互验证,在林带体系建设中建议选择5阻1固林配置体系防护效益显著,第三条阻沙林带之后区域,气流衰减显著,且不会随着指示风速的增加而增加。

(4) 林带的配置与当地水资源有很大关系,水资源丰富时,林带越宽越好,满种效果最好。根据风速大小不同设置2个带至5个林带均能达到防沙效果,并且生态效益明显。

(5) 防护林带设置不仅需考虑减风问题,工程实施的性价比也需要考虑。对于水资源极度缺乏,采用5行林木组成的阻沙林带能够达到防沙效果,一般前沿阻沙带被沙埋是常态,水供应充足可以继续生长,形成阻沙屏障,因此前沿阻沙带宜窄不宜宽。

本试验是一个风洞尺度的试验,试验过程中采用的沙子是原型规模,模型树等都采用 $1/50$ 缩比。野外实际应用预计可能会出现比例效应造成误差。虽然这种情况与野外真实情况存在一定差异,但这不妨碍定性层面对植物林带合理配置的认识。

参考文献 (References)

[1] Huang Ning, Song Yanhong, Xu Lihang, et al. The method for quantitative assessment of sand-drift rate a-

long the southeastern fringe of the Taklimakan Desert [J]. Journal of Environmental Accounting and Management, 2024,12(01):27-45.

[2] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.

Wu Zheng. Aeolian Geomorphology and Desertification Control Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[3] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.

Zhang Kecun, Qu Jianjun, Yu Yanping, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control of railways in China [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6):573-583.

[4] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站60年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.

Li Xinrong, Zhou Haiyan, Wang Xinping, et al. Ecological restoration and recovery in arid desert regions of China: A review for 60-year research progresses of Shapotou desert research and experiment station, Chinese Academy of Sciences [J]. Journal of Desert Research, 2016,36(2):247-264.

[5] 蔡东旭,李生字,雷加强,等.新月形沙丘对湖积平原风蚀荒漠化的影响[J].干旱区研究,2018,35(6):1496-1504.

Cai Dongxu, Li Shengyu, Lei Jiaqiang, et al. Effect of barchan dune on surface wind erosion over lacustrine plain [J]. Arid Zone Research, 2018,35(6):1496-1504.

[6] 唐玉龙,安志山,张克存,等.不同结构单排林带防风效应的风洞模拟[J].中国沙漠,2012,32(3):647-654.

Tang Yulong, An Zhishan, Zhang Kecun, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of single-row shelter belts of different structure [J]. Journal of Desert Research, 2012,32(3):647-654.

[7] 俞学曾,区柏森,沈晓东.防护林防沙效应风洞模拟实验[J].气动实验与测量控制,1991,5(4):46-52.

Yu Xueze, Ou Baisen, Shen Xiaodong. Wind tunnel

- simulation of sheltering effect of shelterbelts on sand [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 1991, 5(4):46-52.
- [8] 谭凤翥,王雪芹,王海峰,等.柽柳灌丛沙堆三维流场随背景植被变化的风洞实验[J].*中国沙漠*, 2018, 38(1):48-57.
Tan Fengzhu, Wang Xueqin, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns around *Tamarix ramosissima* nebkhas under the change of background vegetation coverage [J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(1):48-57.
- [9] 包岩峰,王学全,姚斌,等.小网窄带防护林叠加防风效果风洞实验[J].*中国沙漠*, 2020, 40(2):185-194.
Bao Yanfeng, Wang Xuequan, Yao Bin, et al. Wind-break effect of superimposed narrow belt and small net shelterbelts base on wind velocity flow field [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2):185-194.
- [10] 汪万福,王涛,张伟民,等.敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系设计研究[J].*干旱区地理*, 2005, 28(5):614-620.
Wang Wanfu, Wang Tao, Zhang Weimin, et al. Study on the design of a comprehensive sand drift control system at mogao grottoes, Dunhuang [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(5):614-620.
- [11] 俞祥祥,李生字,王海峰,等.沙漠公路防护林不同林带位置的风沙流结构[J].*干旱区研究*, 2017, 34(3):707-715.
Yu Xiangxiang, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Aeolian-sand flow structure at different locations along desert highway shelterbelt [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3):707-715.
- [12] 汪万福,王涛,李最雄,等.敦煌莫高窟崖顶灌木林带防风固沙效应[J].*生态学报*, 2004, 24(11):2492-2500.
Wang Wanfu, Wang Tao, Li Zuixiong, et al. The effects of blown sand on the shrub belt over the top of the Mogao Grottoes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11):2492-2500.
- [13] 孙武,李庆祥,黄启明,等.中小比例尺风洞模拟理论的研究与应用综述[J].*中国沙漠*, 2013, 33(6):1654-1660.
Sun Wu, Li Qingxiang, Huang Qiming, et al. Review of wind-tunnel simulations at small scale and meso scale [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6):1654-1660.
- [14] 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.
Yang Wenbin, Dong Huilong, Lu Qi, et al. Pattern of low-covered sand-fixing woodland and its windbreak effect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17):5000-5008.
- [15] 胡孟春,赵爱国,李农.沙坡头铁路防护体系阻沙效益风洞实验研究[J].*中国沙漠*, 2002, 22(6):598-601.
Hu Mengchun, Zhao Aiguo, Li Nong. Sand-trapping efficiency of railway protective system in Shapotou tested by wind tunnel [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(6):598-601.
- [16] 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实验[J].*中国沙漠*, 2009, 29(6):1021-1028.
Liang Hairong, Wang Jingying, Lu Qi, et al. Wind-break effects and wind velocity flow field of low density arbor with two spatial distribution patterns in wind tunnel [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(6):1021-1028.
- [17] 梁海荣,王晶莹,董慧龙,等.低覆盖度下两种行带式固沙林内风速流场和防风效果[J].*生态学报*, 2010, 30(3):568-578.
Liang Hairong, Wang Jingying, Dong Huilong, et al. Wind velocity field and windbreak effects in two types of low density and belt-scheme sand-break forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3):568-578.
- [18] 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):1291-1295.
Yang Wenbin, Guo Jianying, Hu Xiaolong, et al. Vegetation restoration process and sand-reversal effect of low coverage sand-fixing forest belts [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5):1291-1295.
- [19] 包岩峰,郝玉光,赵英铭,等.基于风速流场分析的乌兰布和沙漠绿洲防护林防风效果研究[J].*北京林业大学学报*, 2020, 42(8):122-131.
Bao Yanfeng, Hao Yuguang, Zhao Yingming, et al. Windbreak effects of shelterbelts in oases of the Ulan Buh Desert based on the analysis of wind speed field [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(8):122-131.
- [20] 高函,吴斌,张宇清,等.行带式配置柠条林防风效益风洞试验研究[J].*水土保持学报*, 2010, 24(4):44-47.
Gao Han, Wu Bin, Zhang Yuqing, et al. Wind tunnel test of wind speed reduction of *Caragana korshinskii* coppice [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4):44-47.
- [21] 贺大良.风沙现象的相似问题[J].*中国沙漠*, 1987, 7(1):21-26.
He Daliang. Similarity of the phenomena of blownsands [J]. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(1):21-26.

- Yang Tong, Guo Xudong, Yue Depeng, et al. Information extraction and driving factor assessment of farmland abandonment based on joint change detection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):201-208.
- [30] 幸瑞桑,周启刚,李辉,等.基于地形梯度的三峡库区万州区土地利用时空变化分析[J].水土保持研究,2019, 26(2):297-304.
- Xing Ruishen, Zhou Qigang, Li Hui, et al. Analysis on spatiotemporal variations of land use change in Wanzhou district of Three Gorges Reservoir based on the terrain gradient [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2):297-304.
- [31] 汪勇政,徐雅利,余浩然.基于PLUS-InVEST模型的安徽省碳储量时空变化预测[J].水土保持通报,2023, 43(3):277-289.
- Wang Yongzheng, Xu Yali, Yu Haoran. Prediction of spatial and temporal changes of carbon stocks in Anhui Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3):277-289.
- [32] 韦中晖,靳海亮,顾晓鹤,等.基于多时相协同变化检测的耕地撂荒遥感监测[J].遥感技术与应用,2022, 37(3):539-549.
- Wei Zhonghui, Jin Hailiang, Gu Xiaohe, et al. Remote sensing monitoring of cultivated land abandonment based on multi-temporal collaborative change detection [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(3):539-549.
- [33] 谢花林,施佳颖,冷克诚.家庭生命周期视角下农户耕地撂荒行为差异及其影响因素:以江西省丘陵山区为例[J].资源科学,2023, 45(11):2170-2182.
- Xie Hualin, Shi Jiaying, Leng Kecheng. Differences in farmland abandonment behavior among farming households and influencing factors from the perspective of family life cycle: A case study of the hilly and mountainous areas in Jiangxi Province [J]. Resources Science, 2023, 45(11):2170-2182.
- [34] 杨瑞雪,彭海英.国内外耕地撂荒研究综述[J].农业农村部管理干部学院学报,2023, 14(3):59-65.
- Yang Ruixue, Peng Haiying. A review of research on abandonment of cultivated land at home and abroad [J]. Journal of Administration and Management Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, 2023, 14(3):59-65.
- ~~~~~
- (上接第264页)
- [22] 王元,张鸿雁.大气表面层与风沙现象相似参数的研究[J].中国沙漠,1994, 14(1):10-16.
- Wang Yuan, Zhang Hongyan. The study on similitarity parameters of the atmospheric surface layer and phenomena of drift sand [J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(1):10-16.
- [23] 文科军,张荷观,李宗明.林带透风系数与湍流度关系的风洞试验研究[J].八一农学院学报,1992, 15(2):58-63.
- Wen Kejun, Zhang Heguan, Li Zongming. Study on the relationship between ventilation coefficient of shelterbelt and turbulence scale [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 1992, 15(2):58-63.
- [24] Li Bailiang, Sherman D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review [J]. Aeolian Research, 2015, 17:33-48.
- [25] Eichmanns C, Schüttrumpf H. A nature-based solution for coastal protection: Wind tunnel investigations on the influence of sand-trapping fences on sediment accretion [J]. Frontiers in Built Environment, 2022, 8: 878197.
- [26] Dong Zhibao, Luo Wanyin, Qian Guangqiang, et al. A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 146(1/2):82-93.
- [27] 王晓,毕银丽,王义,等.沙棘林密度和丛枝菌根真菌接种对林下植物和土壤性状的影响[J].林业科学,2023, 59(10):138-149.
- Wang Xiao, Bi Yinli, Wang Yi, et al. Effects of planting density of *Hippophae rhamnoides* and inoculation of AMF on understory vegetation growth and soil improvement [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(10): 138-149.