

文章编号:1000-694X(2012)03-647-08

不同结构单排林带防风效应的风洞模拟

唐玉龙¹, 安志山², 张克存², 谭立海²

(1. 兰州铁道设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究所/沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 风速大小、林带疏透度及高度都会对林带周围气流产生影响,使气流在林带两侧发生分离或积聚,从而形成不同的防护功能区。为探求林带结构对防风效应的影响机理,选取 10 组高度和疏透度不同的林带模型,对其防风效应进行了风洞模拟实验,通过绘制加速率等值线图及其变化趋势线、防风效应图,并计算不同结构单排林带的有效防护距离,进而揭示风速、林带疏透度和高度对林带上风向和下风向风速、防风效应和有效防护距离的影响规律。

关键词: 疏透度; 林带模型; 防风效应; 有效防护距离

中图分类号: X169 文献标识码: A

森林具有改善局部小气候、涵养水源、保持水土、防风固沙、改善生态环境、提供动植物生存环境等多种生态功能^[1-2]。俄国、美国、奥地利和日本是较早营造人工防护林并进行研究的国家,中国在 20 世纪 50 年代开始进行相当规模的防护林实践,并且开展防护林的各种研究和试验工作,如:“三北”防护林体系、绿化太行山工程、沿海防护林体系以及沙漠公路防护林工程等。迄今,中国防护林研究日渐成熟^[3]。关文彬等^[4]在大量野外调查基础上,用数码相机拍摄林带结构,经过图像处理,得出林带在有叶期和无叶期疏透度的数学表达式。王元等^[5]选用不同疏透度的工业金属筛网,在风洞中模拟紧密型、疏透性和透风性 3 种典型防护林带的流场结构,得出疏透性防护林带防护效果最佳。董慧龙等^[6]在风洞中测量了不同覆盖度防护林带水平和垂直的风速变化,并按影响大小划分为 4 个变化层。孙宏义等^[7]通过对比分析民勤绿洲内外小麦产量数据,得出有防护林的小麦单产量比无防护林小麦产量高 4.7%。Zhang 等^[8]将防护对象纳入到林带防护效应大小的计算模型中,将防护效应计算模型进一步

修正和补充。Zhao 等^[9]通过测量河西走廊不同防护体系下的输沙率、风速等数据,分析得出由秸秆草方格、植被固沙带和农田防护林共同组成的防护体系防风效应达 70%,并阻挡 96% 的流沙。但目前对不同结构单排林带的防风效应尚未研究,笔者在前人研究基础上,通过风洞模拟实验,探讨林带结构对防风效应的影响规律,为中国的防护林带建设提供科学依据。

1 实验设备、材料和方法

实验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室的室内环境风洞中完成。该闭口直流式风洞全长 37.78 m,其中实验段长 16.23 m,实验段横断面积为 0.6 m×1.0 m,风速 1~40 m·s⁻¹连续可调。为准确计算林带疏透度,参考王元等^[5]用金属筛网替代林带模型进行研究的方法,选取 10 种不同疏透度的物理网格替代实物林带进行实验研究,且每种林带模型有 2 cm、5 cm 和 10 cm 3 种高度,并参考空洞条件下的流场,林带疏透度见表 1。

表 1 不同林带疏透度

Table 1 The porosity of shelter belts studied

林带	1#	2#	3#	4#	5#
疏透度/%	75.29	73.93	68.85	68.63	63.27
林带	6#	7#	8#	9#	10#
疏透度/%	59.63	58.75	55.91	35.92	0

收稿日期:2011-10-29; 改回日期:2011-12-11

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAC54B01-1)和中国科学院“西部之光”项目(29Y128841)以及铁一院科研项目(院科 08-20)共同资助

作者简介:唐玉龙(1971—),甘肃武威人,高级工程师,主要从事道路与铁道工程的勘察设计与研究。Email: tangyuzhi9999@126.com

本次实验风洞指示风速设定为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速廓线采用皮托管测定^[10-11], 测定高度分别为 0.3 cm、0.6 cm、1.2 cm、2.4 cm、4 cm、8 cm、12 cm、16 cm、20 cm 和 25 cm。在实验过程中, 林带上风向和下风向观测点分布见表 2, 其中 H 代表林带的高度, 负值代表林带上风向。

表 2 测量点距离分布表

Table 2 Distribution of measuring points around shelter belts

高度 /cm	距离	
	上风向	下风向
2	8 H 、10 H 、15 H	0.5 H 、1.5 H 、3 H 、4 H 、6 H 、7 H 、9 H
5	3 H 、5 H 、7 H	0.5 H 、1.5 H 、3 H 、4 H 、6 H 、7 H 、9 H
10	1.5 H 、2 H 、5 H 、10 H	0.5 H 、1.5 H 、3 H 、4 H 、6 H 、7 H 、9 H 、14 H 、20 H

2 计算方法

2.1 加速率计算

首先, 对不同风速下空洞流场 10 个高度的数据进行整理分析, 求出 3 组指示风速下相同高度的风速平均值 (v_{kj})。按照公式 1 求出不同风速、不同疏透度和不同高度林带的各测点加速率 (a_{kij})。

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

式中: k 为实验风洞指示风速, 分别为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; i 为林带上、下风向测点距离, 用林带高度的倍数表示, 单位 H ; j 为皮托管测点高度, 单位 cm; v_{kij} 为坐标 (i, j) 点在 $k \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速环境的风速值, 单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $a_{kij} > 1$, 表示林带对气流有加速作用, 风速增加; $a_{kij} < 1$, 表示林带对气流有减速作用, 风速降低; $a_{kij} = 1$, 表明林带对气流没有影响, 风速保持不变^[12]。

2.2 防风效应和有效防护距离计算

目前, 对林带防风效应和有效防护距离的研究很多, 但尚未得出统一定义^[9, 13-16]。防风效应定义为参考位置在无林带和林带影响下的风速之差除以无林带时对应风速, 用百分数表示 (b_{kij} , 公式 2)。林带有效防护距离定义为林带下风向恢复到同等高度

旷野风速的 50% 时与林带之间的距离^[17-19], 用林带高度表示, 单位为 H 。

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

式中: b_{kij} 为坐标 (i, j) 点在 $k \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速环境的加速率。 b_{kij} 越大, 林带防风效应越大, 林带防风效果越好。

3 实验结果与分析

3.1 风速对林带防风效应的影响

选取林带 9[#] ($H=10 \text{ cm}$) 在 3 组实验风速下的加速率等值线图及变化趋势线进行分析比较, 进而得出风速对林带防风效应的影响规律 (图 1)。

3.1.1 加速率变化趋势

从图 1 可以得出, 不同风速下加速率等值线图存在相似性。在林带上风向和下风向近地表处, 不同风速下均形成减速区, 且下风向减速区明显闭合; 在林带顶部下风向处, $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下形成减速区, $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下则形成加速区域 ($a_{kij} > 1$), 风速越大, 加速区面积越大。在林带上风向, 同一高度加速率水平梯度变化较小, 而下风向同一高度加速率水平梯度变化较大。其中, 下风向距地表高 0.3~8 cm 处加速率水平梯度先减小后增加, 并在 2~9 H 之间取得极小值; 但距地表高 12~25 cm 处加速率水平梯度先增加后减小, 极大值也出现在 2~9 H 之间。

综上所述, 可按照加速率大小将林带影响区分为 3 个区: 一为林带上风向的弱减速区, 范围约 -10~0 H , 特点为风速水平梯度递减较弱, 且风速越大, 弱减速区范围越小; 二为林带下风向近地表处的强减速区, 范围约 0~20 H , 特点为风速水平梯度递减较强, 且随风速的增加范围变小; 三是林带顶部下风向的过渡区, 高度约 1~2.5 H , 水平范围约 0~20 H , 特点为受林带结构和风速的影响变化明显, 表现为加速区或者减速区, 如 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下形成减速区, $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下则形成加速区域, 即风速较小时为减速区域, 超过一定风速, 则变为加速区域。

3.1.2 防风效应和有效防护距离

在实际应用中, 防护林带按营造的目的和作用可分为沙漠边缘的防沙林带和绿洲内部的护田林带, 护田防护林内部农作物等防护对象高度一般低

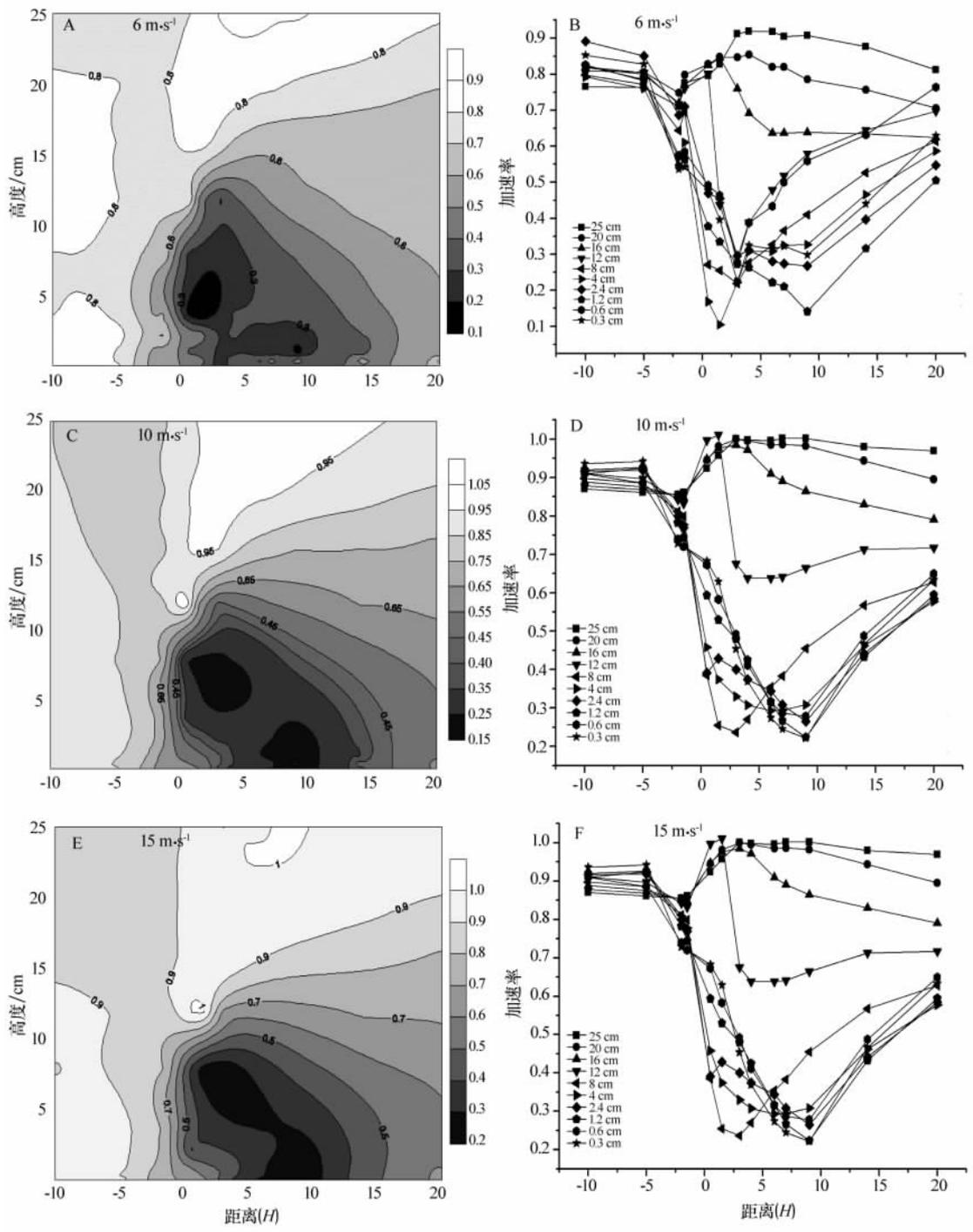


图 1 不同风速下加速度等值线图及变化趋势线

Fig. 1 The isolines and variation trend curves of accelerating rate of shelter belts at different wind speeds

于 2 m, 因此, 防风效应对点选择在 1.2 cm 高度处^[20-22] (按模型大小比例放大, 实际高度为 2 m 左右)。图 2 中, 在不同风速下, 林带防风效应水平梯度变化较大。在 -10 ~ -5 H 区间内, 林带防风效应较小; -5 ~ 9 H 区间, 林带防风效应逐渐增大, 9 H 处达最大值。其中, 6 m · s⁻¹ 风速下防风效应增加 60%, 10 m · s⁻¹ 风速下防风效应增加 70%, 15

m · s⁻¹ 风速下防风效应增加 60%; 9 ~ 20 H 区间防风效应逐渐减小。在测量范围内, 6 m · s⁻¹ 各点防风效应平均值为 54.6%, 10 m · s⁻¹ 风速下为 47.5%, 15 m · s⁻¹ 风速下为 41.2%。可见, 6 m · s⁻¹ 林带防风效应最大, 10 m · s⁻¹ 次之, 15 m · s⁻¹ 最小。由林带有效防护距离定义可知, 在上述 3 组实验风速下, 林带有效防护距离分别为 20 H、

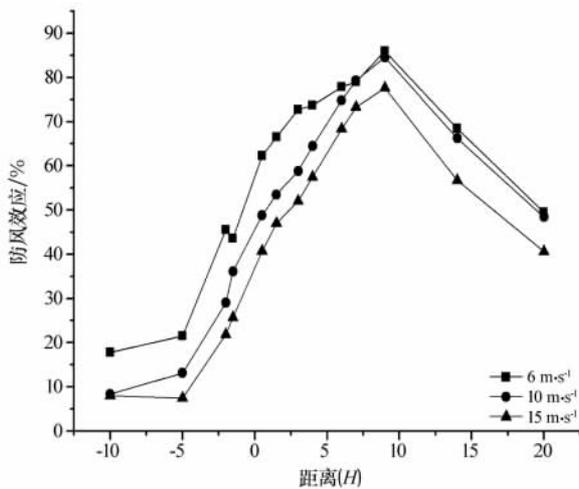


图2 不同风速下的防风效应图

Fig. 2 The windbreak effects of shelter belts at different wind speeds

18 H 和 15 H 。综上所述,风速对林带防风效应和林带有效防护距离均有影响,随着风速的增大,林带防风效应减小,有效防护距离变短。

3.2 疏透度对林带防风效应的影响

林带疏透度与林带流场结构有着较为密切的联系,且一直是国内外林带结构研究的热点,并取得了较大的进展^[16]。选取林带模型高 5 cm、进口风速 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下 5 组林带的加速率等值线图及其变化趋势线进行分析比较,探求疏透度对风速和林带防风效应的影响规律(图 3)。

3.2.1 防风效应和有效防护距离

由图 3 可知,林带疏透度不同,其防风效应水平

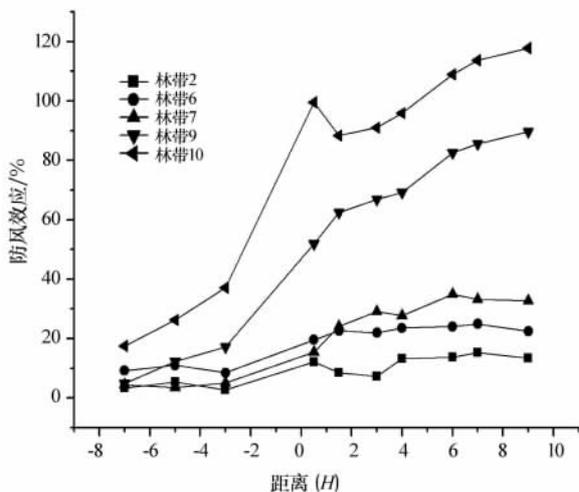


图3 不同林带疏透度的防风效应图

Fig. 3 The windbreak effects of shelter belts with different porosity

梯度变化较大。 $-7 \sim -3 H$ 区间,除林带 10[#] 的防风效应增加 19.6% 外,其余增加幅度较小; $-3 \sim 0.5 H$ 区间,五者同时出现较大幅度增加。其中,林带 9[#] 和林带 10[#] 的增加幅度分别为 34.8% 和 62.4%,林带 2[#]、6[#] 和 7[#] 防风效应增加幅度分别为 9.3%、11.1% 和 10.4%,小于前两者的增加幅度。 $0.5 \sim 9 H$,林带防风效应相对稳定。在测量范围内,5 种疏透度林带防风效应平均值分别为: 9.48%、18.78%、21%、54.23% 和 79.62%。可知,林带疏透度越小,林带平均防风效应越大。

由林带有效防护距离定义可知,林带 9[#] 的有效防护距离由 0.5 H 开始,延伸到 9 H 以外;林带 10[#] 的有效防护距离则延伸到 5 H 附近,随后气流发生紊乱,产生回流,易造成土壤侵蚀,进而对农作物和林带造成危害。综上分析,随着林带疏透度的降低,林带的防风效应和有效防风距离增加,但疏透度为 35% 左右林带的综合防风效应最好。

3.2.2 加速率变化趋势

由图 4 可知,随着林带疏透度的减小,弱减速区变化较小,过渡区和强减速区变化明显。不同疏透度林带影响下的过渡区在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下全为加速区,且范围变化较大。林带疏透度为 68.85%,过渡区范围最小,为 $0 \sim 8 H$;林带疏透度为 75.29%,过渡区范围最大,为 $-6 \sim 8 H$ 。在强减速区内,林带疏透度越小,风速衰减越快,最小加速率值越小。当林带不透风(疏透度为 0)时,强减速区加速率出现负值,可知林带后方的风速由正变负,出现反向气流。由此可知,如果单从风速降低程度考虑,林带疏透度越小,风速降低越快,林带防风效果越好,但不透风林带后方产生的反向气流易对土壤造成侵蚀,故在实际中应用较少。

3.3 高度对防风效应的影响

林带高度是林带结构的重要指标之一,对风速有着重要影响。在以上分析中,林带 9[#] (35.92%) 的防风效果较好。因此,选取林带 9[#] 作为研究林带,林带模型高度分别为 2 cm、5 cm 和 10 cm,实验指示风速选择 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5)。

3.3.1 加速率变化趋势

由图 5 可知,林带高度对弱减速区、强减速区和过渡区均有影响。随着林带高度的增加,弱减速区内各测点加速率均值分别为 0.88、0.88 和 0.83,变化幅度较小,可知林带高度对弱减速区影响较弱。而在林带放置处,强减速区的垂直高度在上述林带

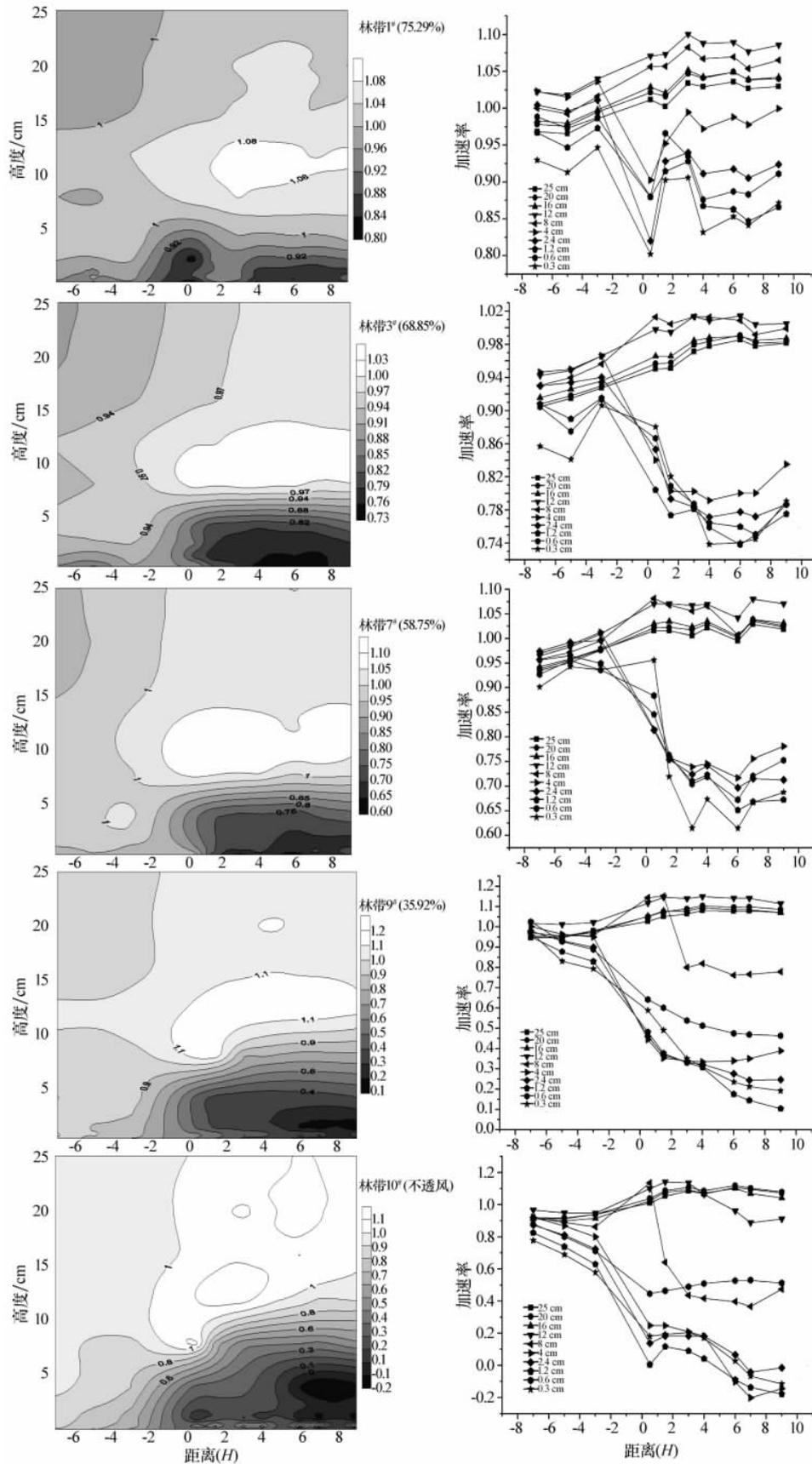


图 4 不同林带疏透度的加速率等值线图及其变化趋势线

Fig. 4 The isolines and variation trend curves of accelerating rate of shelter belts with different porosity at wind velocity of $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

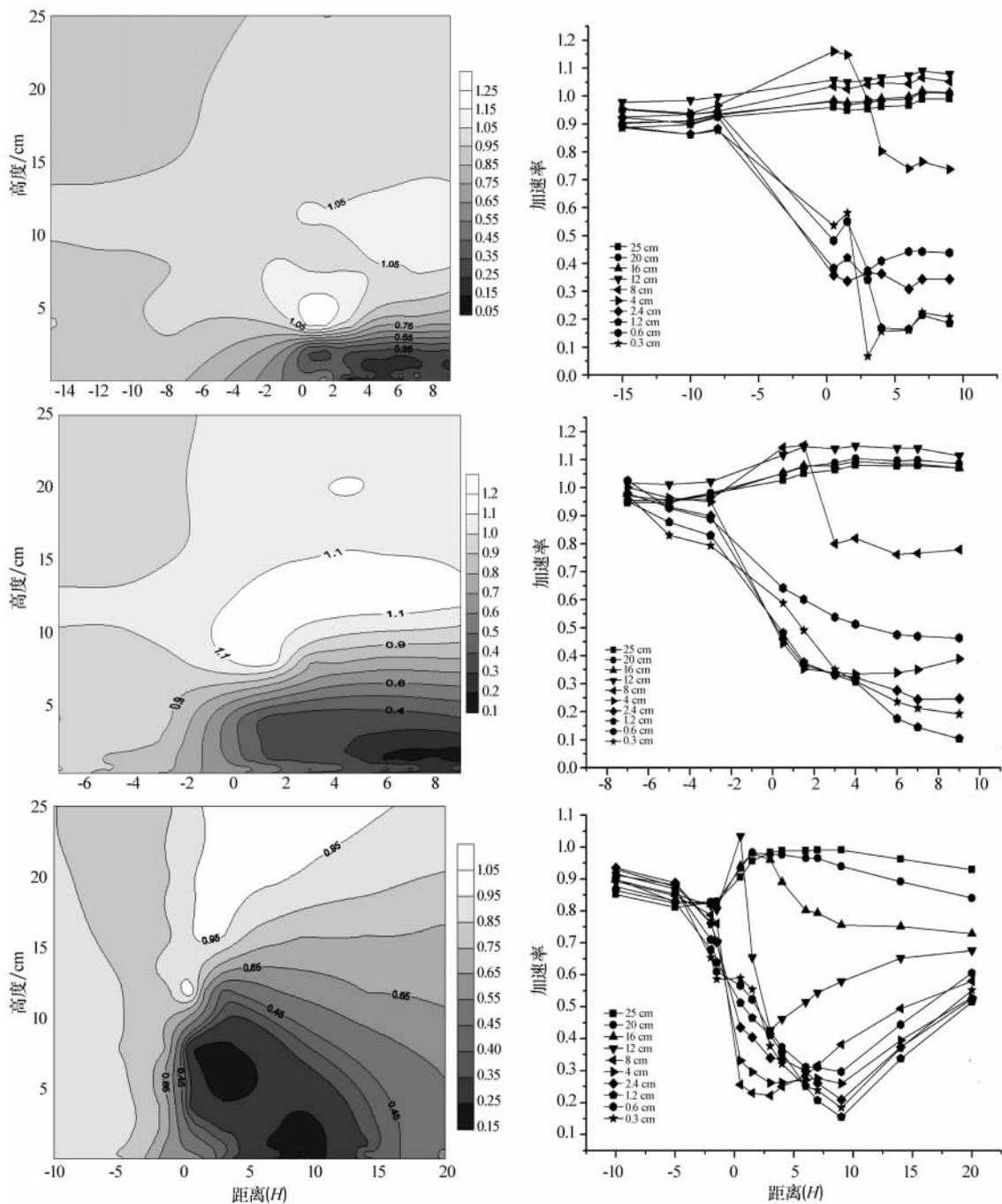


图 5 不同林带高度的加速率等值线图及其变化趋势线

Fig. 5 The isolines and variation trend curves of accelerating rate of shelter belts with different height at wind velocity of $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

高度下分别为 4 cm、7 cm 和 12 cm, 即强减速区随林带高度的增加明显增高。过渡区在 2 cm 林带和 5 cm 林带影响下表现为加速区, 10 cm 林带影响下则变为减速区。由此可知, 林带高度对强减速区和过渡区域影响较大, 对弱减速区影响较小。

3.3.2 防风效应和有效防护距离

图 6 中可知, 不同高度林带的防风效应随距离

变化趋势相似。从 $-10 \sim 9 H$, 不同高度林带防风效应逐渐增加, 至 $9 H$ 处取得极大值。在林带上风向, 上述 3 种高度林带平均防风效应为 24%、15% 和 17.9%; 林带下风向平均防风效应分别为 73.2%、72.6% 和 64.3%。可知, 无论上风向还是下风向, 2 cm 林带平均防风效应均略大。在测量范围内, 按照林带有效防护距离定义可知 3 种高度林

带的有效防护距离随林带高度变化较小。可知,林带的防风效应并非随林带高度的增加而增加,林带有效防护距离在可测量范围内也无明显不同。

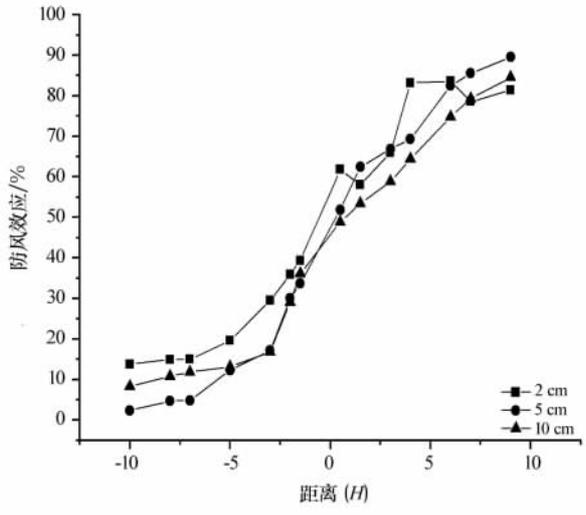


图6 不同高度林带的防风效应图

Fig. 6 The windbreak effects of shelter belts with different height

4 结论

通过以上分析,风速大小的不同、林带疏透度以及林带高度都会对林带周围气流产生影响。其主要结论有:随着风速的增加,防风效应减弱,有效防护距离减短。而随着林带疏透度的减小,林带防风效应变大,有效防护距离越长,但不透风林带下风向产生回流,易对林带和防护对象产生危害,在实际应用中,较少采用,最后可知疏透度为35.92%的林带综合防护效益最好。林带高度与林带防风效应并非成正比关系,在测量范围内,有效防护距离与林带高度相关性较小。因此,在防护林带的建设过程中,应该充分考虑本区域风况、降水、沙害情况、日照以及林带下风向的植物物种等条件,恰当选用林带树种,合理配置林带结构,使其充分发挥防护效应,产生较大的经济效益。

参考文献(References):

[1] 尹秋菊. 海南岛西部沿海防护林防风固沙效益研究[D]. 华南师范大学地理科学学院, 2005.
[2] 汪季, 高永, 刘艳萍, 等. 防护林降解近地表沙尘的风洞模拟研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 88-92.

[3] 蒋丽娟. 国内外防护林研究综述[J]. 湖南林业科技, 2000, 27(3): 21-26.
[4] 关文彬, 李春平, 李士锋, 等. 林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 651-657.
[5] 王元, 金文, 张鸿雁, 等. 不同类型防护林绕林流场的PIV测量[J]. 空气动力学报, 2004, 22(2): 135-140.
[6] 董慧龙, 杨文斌, 王林和, 等. 单一行带式乔木固沙林内风速流场和防风效果风洞试验[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 110-116.
[7] 孙宏义, 颜长珍, 韩致文, 等. 民勤农田防护林对作物增产的贡献率[J]. 甘肃林业科技, 2010, 35(2): 43-47.
[8] Zhang H, Brandle J R, Meyer G E. A model to evaluate wind-break protection efficiency[J]. Agroforestry Systems, 1995, 29: 191-200.
[9] Zhao W Z, Hu G L, Zhang Z H. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: A case study in the Hexi Corridor, northwest China[J]. Ecological Engineering, 2008, 33: 119-125.
[10] 张克存, 倪成君, 屈建军, 等. 风沙防治中覆网床面风沙流特性的风洞模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 110-115.
[11] 张克存, 焜瑞平, 方海燕. 不同孔隙度尼龙网对风沙流减弱作用的风洞模拟[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 4-6.
[12] 罗万银. 直立阻沙栅栏二次流特征的风洞模拟实验[D]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.
[13] 刘建勋, 蔺国菊, 申桂莲, 等. 河西走廊中部农田防护林防风效应初探[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 432-434.
[14] 程皓, 李霞, 侯平, 等. 塔里木河下游不同覆盖度灌木防风固沙功能野外观测研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(7): 1022-1026.
[15] 刘目兴, 刘连友, 王静爱, 等. 农田休闲期不同保护性耕作措施的防风效应研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 46-51.
[16] 汪万福, 李最雄, 刘贤万, 等. 敦煌莫高窟顶灌木林带防护效应研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 306-311.
[17] 卫林, 江爱良, 张翼. 论林带的有效防护距离[J]. 科学通报, 1985, (19): 1567-1570.
[18] 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): 39-43.
[19] 郝玉光, 包耀贤, 刘明虎, 等. 干旱沙区农田防护林营建模式与经营评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 199-203.
[20] 吴正等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
[21] 张彩霞, 王训明, 满多清, 等. 层次分析法在民勤绿洲农田防护林生态效益评价中的应用[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 602-607.
[22] 杜虎林, 王涛, 肖红浪, 等. 塔里木沙漠公路防护林带根灌节水试验研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 522-527.

Wind Tunnel Simulation of Windbreak Effect of Single-row Shelter Belts of Different Structure

TANG Yu-long¹, AN Zhi-shan², ZHANG Ke-cun², TAN Li-hai²

(1. Lanzhou Railway Design Institute Co. Ltd. Lanzhou 730000, China; 2. Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environment Research Station/Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Wind velocity, porosity and height of shelter belt exert a profound influence on airflow around the shelter belt, and the speed of airflow flowing through shelter belt will increase or decrease. The peripheral wind field around shelter belt could be divided into three parts according to wind rate change: slightly decelerating zone, significantly decelerating zone and transition zone. In wind tunnel experiment, we selected 10 groups of physical models with different porosity and height instead of realistic shelter belts; experimental data were automatically recorded. Based on the experimental data, isolines and variation trend curves of wind accelerating rate were obtained, with which the effective protective distance of shelter belt was calculated. The research has revealed the response law of accelerating rate, windbreak effect and effective protective distance to the wind speed, the porosity and the height of the shelter belts.

Keywords: porosity; forest model; windbreak effect; effective protective distance



2010 年中国科技期刊地球科学类 39 种核心期刊排序*

刊名	影响因子		总被引 频次	刊名	影响因子		总被引 频次
	数值	排序			数值	排序	
地震地质	2.220	1	1 154	地震工程与工程振动	0.760	21	1 623
地球物理学报	1.998	2	4 001	地震研究	0.606	22	418
第四纪研究	1.669	3	2 326	中国地震	0.588	23	503
中国沙漠	1.645	4	3 013	矿物岩石地球化学通报	0.538	24	520
大地构造与成矿学	1.551	5	786	自然灾害学报	0.563	25	1 437
地球科学	1.216	6	1 899	震灾防御技术	0.550	26	108
地球学报	1.215	7	1 432	地球与环境	0.541	27	608
地球科学进展	1.174	8	2 434	古生物学报	0.539	28	583
灾害学	1.106	9	777	微体古生物学报	0.524	29	308
古地理学报	1.064	10	734	古脊椎动物学报	0.477	30	342
干旱区研究	1.038	11	1 344	华南地震	0.477	30	202
地学前缘	1.031	12	2 747	物探与化探	0.463	32	790
地球化学	0.992	13	1 570	防灾减灾工程学报	0.395	33	353
地球物理学进展	0.983	14	2 076	地震地磁观测与研究	0.387	34	466
地震	0.971	15	571	世界地震工程	0.347	35	655
地球科学与环境学报	0.911	16	560	空间科学学报	0.309	36	287
地震学报	0.865	17	1 194	华北地震科学	0.279	37	152
地球信息科学学报	0.813	18	570	内陆地震	0.191	38	164
吉林大学学报(地球科学版)	0.801	19	1 264	Frontiers of Earth Science in China	0.085	39	17
西北地震学报	0.777	20	506	39 种期刊平均	0.839		1 038

* 数据来源:中国科学技术信息研究所 2011 年版《中国科技期刊》引证报告(核心版)。