

# 植株高大的目标作物对防护林防风效应影响的风洞模拟试验

郑 波<sup>1</sup>, 刘 彤<sup>1\*</sup>, 孙钦明<sup>1</sup>, 朱乐奎<sup>1</sup>, 刘尊驰<sup>1</sup>, 张礼春<sup>1</sup>, 欧阳异能<sup>2</sup>

(1. 石河子大学生命科学学院, 石河子 832003; 2. 石河子大学理学院, 石河子 832003)

**摘 要:** 防护林对降低风害, 促进农作物稳产高产具有重要作用, 但目前防护林配置研究仅注意到防护林本身, 忽视了果树等植株高大作物对风速的影响。该文选取 1 种果树 (枣树), 3 种疏透度林带 (30.12%、25.01% 和 20.92%), 在 3 种风速下 (8、10、和 14 m/s) 进行风洞模拟, 研究种植枣树等植株高大目标作物时, 防护林风场特征及防风效应。结果表明: 不同风速和林带疏透度下, 枣树对林带前后流场均具有显著影响, 特别是林带后近地面风速削减程度较大。1) 随风速增大, 无枣树林带防风效应减小, 有枣树林带变化较小, 但增量增大, 在 8、10、和 14 m/s 风速下分别增大 16.40%、23.65% 和 29.05%; 2) 疏透度为 30.12% 时, 有枣树林带综合防风效应最佳。随疏透度减小, 无枣树林带防风效应增大, 有枣树林带变化较小, 但增量减小, 在 3 种疏透度下分别增加 22.72%、15.22% 和 1.28%。因此总结认为在集约化和精准农业要求下, 进行枣树等植株高大作物防护林带配置时, 应考虑目标作物的防风效应, 如此可减少防护林面积, 显著提高目标作物的经济效益。

**关键词:** 作物; 风洞; 速度; 枣树; 防风效应; 疏透度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.017

中图分类号: S424

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0120-07

郑 波, 刘 彤, 孙钦明, 朱乐奎, 刘尊驰, 张礼春, 欧阳异能. 植株高大的目标作物对防护林防风效应影响的风洞模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 120—126. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.017  
<http://www.tcsae.org>

Zheng Bo, Liu Tong, Sun Qinming, Zhu Lekui, Liu Zunchi, Zhang Lichun, Ouyang Yineng. Wind tunnel simulation for contribution of tall target jujube to protective effect of shelterbelt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 120—126. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.017 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

农田防护林可确保农作物稳产高产, 维护农田生态系统稳定, 改善田间小气候<sup>[1-3]</sup>。目前新疆农田防护林多是以棉花等植株较矮的作物为防护对象, 主要考虑林带结构、高度、宽度、与风向夹角和空间配置等林带因素<sup>[4-9]</sup>, 对类似枣树等植株高大的目标作物与防护协同产生防护效果等方面考虑较少。随着中国精准农业的发展, 如果综合目标作物与防护林的防风效应, 优化防护林配置, 减少林带占地, 增加农田面积, 提高作物经济效益意义重大, 尤其对于枣树等种植效益较高的作物。

目标作物虽然是农田防护林的保护对象但是其生长高矮和种植面积所产生的水平粗糙度和蒸腾作用均对风速变化产生潜在影响。刘小平和董治宝<sup>[10]</sup>在直立植被粗糙度和阻力分解的风洞研究中发现, 植被覆盖相比无植被的光滑地表粗糙度增加了 2~6 701 倍, 且粗糙度随植被高度和密度增加而增加, 能够有效降低风速, 抑制风

蚀。卫林等<sup>[11]</sup>、丁国栋等<sup>[12]</sup>也在植被粗糙度空气动力学方面做了研究, 得到在植被冠层内外均会不同程度消耗风能, 削减风速。另外, 孙怀卫等<sup>[13]</sup>通过计算流体动力学模拟大棚内气流场特征, 得到风速与作物蒸腾关系, 反映植物蒸腾也对风速具有一定的削减作用。但目前将作物潜在防风效能与农田防护林协同配置的研究较少。

实际生产中, 像红枣、杏、核桃和苹果等果树类植株高大, 有叶期时冠层茂密, 对风速阻碍作用明显, 且防护林保护果树类植株高大作物等情况非常普遍<sup>[14]</sup>。而在新疆地区, 枣树种植面积达到 46.67 万  $\text{hm}^2$ <sup>[15]</sup>, 且南疆为主要分布区, 减少防护林占地, 增加枣树种植面积的效益明显。因此, 本文基于风洞试验, 在不同风速下探讨枣树对不同林带结构防护林防风效应的影响, 从而为防护林进一步合理配置提供一定科学依据。

## 1 试验设备、材料与方法

### 1.1 试验设备

本试验在中国科学院新疆生态与地理研究所可移动式环境风洞中完成。该风洞全长 16.2 m, 由进气段、动力段、扩散段、稳定段、收缩段、试验段和出口扩散段共 7 部分组成。试验段长度为 8 m, 截面为矩形, 宽 1.3 m, 高 1.0 m, 宽高比 1.3, 轴心风速 1~25 m/s 连续可调。风洞气流稳定性系数小于 1%, 横向不均匀度小于 2.5%, 紊流度在 1% 左右, 底板边界层和侧壁边界层分别为 15 和 10  $\text{cm}$ <sup>[16]</sup>。

收稿日期: 2016-01-31 修订日期: 2016-05-17

基金项目: 国家科技支撑项目(2014BAC14B02)

作者简介: 郑 波, 男, 四川巴中人, 主要从事农业生态方向研究。石河子石河子大学生命科学学院, 832003。Email: 403314256@qq.com

\*通信作者: 刘 彤, 男, 山东海阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事绿洲生态学研究。石河子 石河子大学生命科学学院, 832003。

Email: betula@126.com

1.2 试验设计

根据南疆野外调查可知，枣树发芽晚于防护林，生长发育和产量形成主要在 4—9 月的有叶期产生，且阻风作用也最大，因此本次试验模拟主要考虑枣树有叶期情况。南疆防护林基干林多为 4、6 和 8 行林，因此本文选取 3 种不同疏透度的林带模型，以无枣树模型时作为对

照进行风洞模拟。为使模型结果更接近实际，模型设计遵循相似性理论原则，并按照实地调查的树高和疏透程度，使用柔软的塑料树定做林带和枣树模型。林带模型高度为 7.0 cm，枣树模型高度为 1.5 cm，林带和枣树模型都是按照相同比例缩小，模型与实物的比例为 1：143。详细模型参数见表 1。

表 1 模型参数  
Table 1 Model parameter

模型 Model	高度 Height/cm	枝下高 Height under branch/cm	冠幅 Crown breadth/cm	株行距 Row and plant spacing/cm	行数 Rows	疏透度 Porosity/%
林带 1# Shelterbelt 1#	7.0	1.0	2.8×2.3	4×3	4	30.12
林带 2# Shelterbelt 2#	7.0	1.0	2.8×2.3	4×3	6	25.01
林带 3# Shelterbelt 3#	7.0	1.0	2.8×2.3	4×3	8	20.92
枣树 Jujube	1.5	0.2	2.5×2.0	2×3	--	--

试验设定了 3 种初始风速，分别为 8、10 和 14 m/s，并且采用的皮托管测定风速，其垂直高度测点为 1、2、3、5、7、10、15、30 和 50 cm。另外，试验过程中的水平测点分布在林带前-10H、-4H、-1H，林带后 1H、2H、5H、10H、15H、20H，其中 H=7 cm 为林带平均高度，沿顺风方向，负值代表林带前，正值为顺风林带后，下同。

2 计算方法

2.1 疏透度计算

采用图像数字化的二维疏透度计算方法，即通过数码相机拍照后的林带模型照片中树木枝叶与透光孔隙形成的灰度差异，经 Photoshop 软件图像处理统计出透光孔隙面积像素数占总像素的百分比，分别计算林干和林冠疏透度，最后通过加权平均得到最终林带疏透度。公式如下<sup>[17-18]</sup>

$$\beta = \frac{(\beta_1 \cdot h_1 + \beta_2 \cdot h_2)}{H} \tag{1}$$

式中  $\beta_1$  为林干疏透度，%； $\beta_2$  为林冠疏透度，%； $h_1$  为林干高度，cm； $h_2$  为林冠高度，cm； $H$  为林带高度( $h_1+h_2$ )，cm。

2.2 防风效应

防护林的防风效益主要通过风速削减的程度来度量，即防护林前后的风速差与林前初始风速的比值。由于本文主要考虑目标作物高度的防风效应，即选取测点高度为 1 和 2 cm 高度（2 cm 相当于实际 2.86 m）防风效应的平均值作为最终防风效应的衡量指标。公式如下<sup>[19-21]</sup>

$$E_x = \frac{1}{2} \times \left( \frac{u_0 - u_{x(1\text{cm})}}{u_0} + \frac{u_0 - u_{x(2\text{cm})}}{u_0} \right) \tag{2}$$

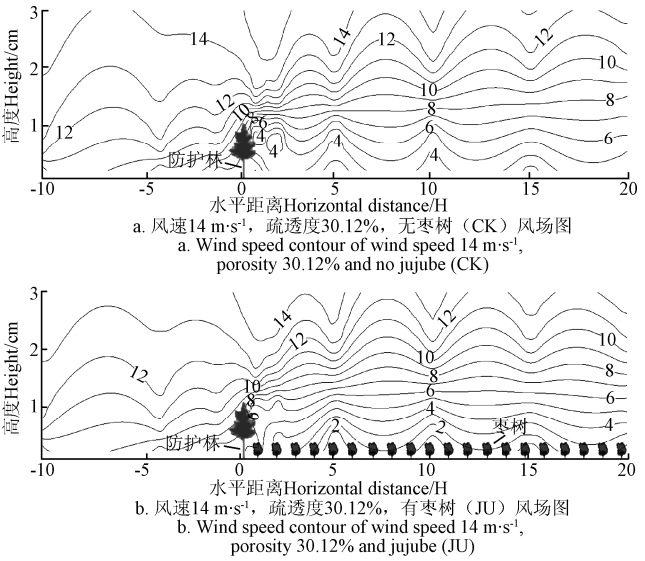
式中  $E_x$  为林后  $x$  水平距离处的防风效应，%； $u_0$  为初始风速，m/s； $u_{x(1\text{或}2\text{cm})}$  为林后  $x$  水平距离高度 1 或 2 cm 处的测点风速，m/s。

另外，由于林带后水平测点分布不均，因此林带后平均防风效应通过加权法得到，其中 1H 和 2H 距离测点较密，权值均为 0.1；另外，5H、10H、15H 和 20H 等距离测点均匀分布，则权值均为 0.2。

3 结果与分析

3.1 枣树对林带周围风场的影响

由图 1 可知，枣树对林带前后的风场变化有显著影响。在林带-10H 位置有枣树时 10 m/s 气流开始有明显爬升，而无枣树时在-7H 左右 10 m/s 气流才开始有爬升趋势，同等风速气流，枣树的存在使气流提前 3H 距离被抬升。



注：林带平均高度 H=7 cm，下同。  
Note: Average height of shelterbelt was 7 cm, the same as below.

图 1 无枣树和有枣树的风场 (m·s<sup>-1</sup>) 等值线图  
Fig.1 Wind speed contour (m·s<sup>-1</sup>) of no jujube and jujube

当大部分气流被抬升后，近地面风速大幅度削减，在到达林带时已从初始风速 14 m/s 削减至 7 m/s 左右，削减了 50%。气流遇林带受阻后，绝大部分从林带上空越过，很少气流穿过林带。以至于林带后近地面风速大幅度削减，特别是有枣树影响下削减更明显，在 0.5H 高度，无枣树风速减至 4m/s 时，有枣树减至 2 m/s，是无枣树的 2 倍。在 0.5~1.0H 高度范围，无枣树风速在 5~7 m/s，有枣树在 3~5 m/s，比无枣树多削减 2 m/s，且沿顺风方向的水平变化相对平缓。在 1.5H 高度，风速分别为，

9.0(CK)和 7.5 m/s(JU); 在 2.5H 高度, 有无枣树风速均在 12~14 m/s 之间, 差异较小。另外, 林带高度以上风速沿顺风方向的水平有明显增大趋势, 枣树对风速的影响随高度增加而减小。在林带 5H 距离之后, 风速整体开始逐渐增大, 直至恢复到初始风速, 其中在枣树影响下风速恢复较缓慢。

因此, 枣树对林带风场的影响主要位于近地面和林带冠层高度, 对林带以上高度影响较小, 在 2.5H 高度时, 有枣树林带与无枣树林带风速变化已无明显差异。

### 3.2 不同风速下枣树林带风场及防风效应

考虑到南疆典型风害区多为 4 行林, 故选取试验中 4 行的林带 1# (疏透度为 30.12%), 在 3 组初始风速下, 作物高度 (1 和 2 cm) 和林带高度 (7 cm) 的风速变化进行详细分析比较, 进而总结出风速对无枣树和有枣树林带风场及防风效应的影响和差异。

#### 3.2.1 风场特征

从图 2a、b、c 可以看出, 在相同林带疏透度不同风

速下, 各林带的风速变化存在一定相似性, 但有枣树林带比无枣树林带风速削减程度更大。由于林带的防风作用大于作物, 且在同一林带疏透度下, 林带防风作用相同, 所以从林前-1H 处为止, 有枣树与无枣树风速差异较小, 仅初始风速 14 m/s 时差异稍大, 有枣树风速比无枣树小 1~2 m/s 左右。当经过林带到达 5H 处时, 风速基本已削减到最小, 且有枣树风速比无枣树更小。在 8 m/s 风速下, 有枣树比无枣树风速小 0.6 m/s 左右, 差异较小; 10 m/s 风速下, 差异稍大, 比无枣树风速分别小: 1.06(1 cm)、2.74(2 cm)和 1.01(7 cm) m/s; 14 m/s 风速下, 有枣树比无枣树风速削减量最大, 分别为: 3.93(1 cm)、4.56(2 cm)和 2.15(7 cm)m/s。在 5H 之后, 风速逐渐开始恢复, 有增大趋势, 但有枣树风速恢复较晚。由于初始风速 8 m/s 时风速较小, 所以在 10H 后有枣树风速变化较小, 风速恢复拐点不明显。但在 10 和 14 m/s 风速中拐点明显, 有枣树作物高度风速恢复拐点均为, 5H(CK)和 15H(JU), 有枣树风速恢复拐点比无枣树晚 10H 距离。

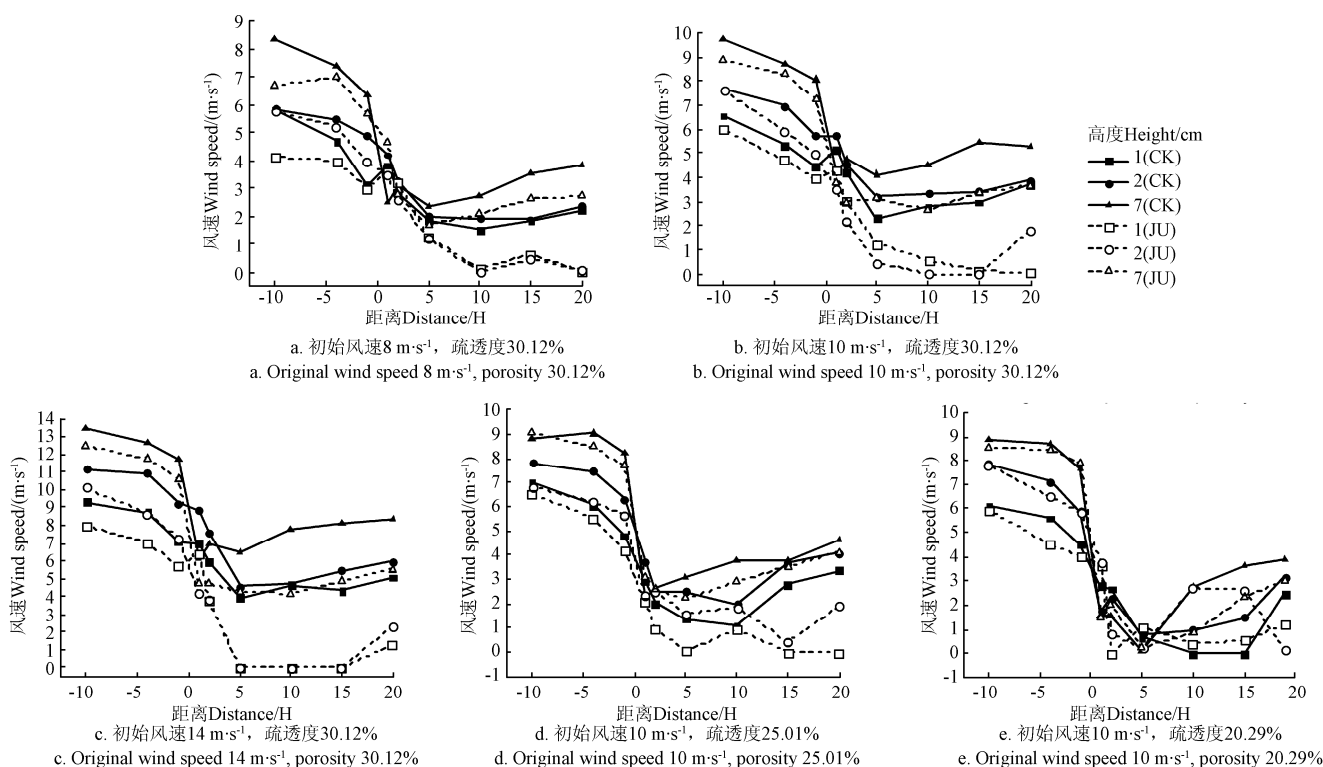


图 2 不同风速及不同疏透度有枣树和无枣树林带风速变化

Fig.2 Wind speed change of no jujube and jujube shelterbelt in different wind speed and porosity

#### 3.2.2 防风效应

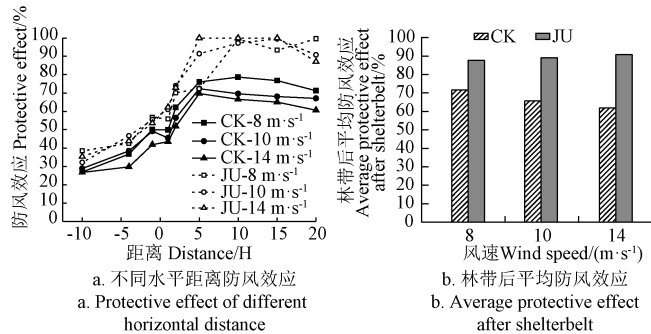
在实际应用中, 农田防护林营造以保护田间作物为主要目的, 而农作物高度一般低于 3 m, 因此选取风洞试验中 1 和 2 cm 高度的平均防风效应作为对比指标。

由图 3a 可得, 在相同林带疏透度不同风速下, 防风效应沿顺风方向的水平变化较大, 且枣树对林带防风效应具有明显提升作用, 特别是对林带后防风效应提升幅度很大。在-10~-1H 距离内, 防风效应呈增大趋势, 但相对较小, 均低于 60%。在经过林带阻挡后, 防风效应迅

速增大, 无枣树时在 5H 处达最大, 并且在 14 m/s 风速下最大防风效应达 70%左右, 之后防风效应呈减小趋势; 而有枣树林带在 2~20 H 内防风效应波动较小, 始终维持在 85%~95%之间, 并在 5~15H 间多次达极大, 之后在 15H 处开始有减小的趋势, 但最终在 20H 距离时仍能达到 85%以上的防风效应。

由图 3b 可得, 在 1H~20H 可测范围内, 8 m/s 各点防风效应平均值为 71.73%(CK)和 88.14%(JU), 10 m/s 风速下为 65.62%(CK)和 89.26%(JU), 14 m/s 风速

下为 61.89% (CK) 和 90.94% (JU)。在 3 种风速下, 枣树对林带防风效应的增加幅度分别为 16.40%、23.65% 和 29.05%。



注: CK 为无枣树防护林, JU 为有枣树林带。  
Note: CK and JU are shelterbelt without jujube and with jujube.

图 3 不同风速下疏透度为 30.12% 林带防风效应

Fig.3 Protective effect of porosity 30.12% shelterbelt in different wind speed

### 3.3 不同疏透度下枣树林带风场及防风效应

这里选取初始风速为 10 m/s, 在 3 组林带疏透度下, 作物高度 (1 和 2 cm) 和林带高度 (7 cm) 内的风速变化进行详细分析比较, 进而总结出风速对无枣树和有枣树林带风场及防风效应的影响和差异。

#### 3.3.1 风场特征

由图 2 b、d、e 可知, 在相同风速不同林带疏透度下, 各林带的风速变化存在一定相似性, 但有枣树带比无枣树林带风速削减程度更大。在林带至  $-1H$  处, 有无枣树风速变化差异较小, 30.12% 和 25.01% 疏透度下有枣树风速比无枣树小 0.6~0.7 m/s, 仅 20.92% 疏透度时两者风速差异稍大, 分别为 0.47(1 cm)、0.05(2 cm) 和  $-0.22(7 \text{ cm})$  m/s, 该处负值可能是由于距离林带较近受湍流影响, 使有枣树风速大于无枣树风速。在林带后, 随疏透度减小, 风速削减程度越大, 有枣树比无枣树风速削减量减少。在疏透度为 30.12%、25.01% 和 20.92% 下, 有枣树作物高度风速达最小均到达 0 m/s, 无枣树最小风速分别为: 2.0、1.1 和 0 m/s。风速达最小后开始恢复, 3 种疏透度的恢复拐点分别为:  $5H$  (CK) 和  $15H$  (JU)、 $10H$  (CK) 和  $15H$  (JU)、 $10H$  (CK) 和  $5H$  (JU)。在前 2 种疏透度中, 有枣树比无枣树风速恢复较晚, 仅在疏透度为 20.92% 时有枣树比无枣树风速较早开始恢复。可以发现, 随疏透度减小, 有枣树风速恢复拐点会比无枣树提前。

#### 3.3.2 防风效应

由图 4a 可知, 林带疏透度的不同, 沿顺风方向的水平防风效应变化较大。在  $-10H \sim -1H$  区间, 各林带防风效应呈缓慢增长趋势, 仅有枣树 30.12% 林带的防风效应增加了 23.5% 以外, 其他增加幅度很小, 且最大防风效应均低于 50%。在经过林带后, 防风效应随着风速变化有一定波动, 但在  $-1H \sim 5H$  区间, 各林带防风效应均大幅度增加。其中, 随疏透度减小有枣树林带防风效应增加幅度分别为 35.6%、41.0% 和 42.8%, 无枣树的增加幅度

分别为 30.8%、36.1% 和 44.0%。在  $5H \sim 20H$  区间, 各林带防风效应相对稳定。

由图 4b 可知, 在  $1H \sim 20H$  距离内, 疏透度为 30.12% 林带的平均防风效应为 66.54% (CK) 和 89.26% (JU); 疏透度为 25.01% 林带的为 73.47% (CK) 和 88.69% (JU); 疏透度为 20.92% 林带的为 85.57% (CK) 和 86.86% (JU)。在 3 种疏透度下, 枣树对林带防风效应的增加幅度分别为 22.72%、15.22% 和 1.28%。

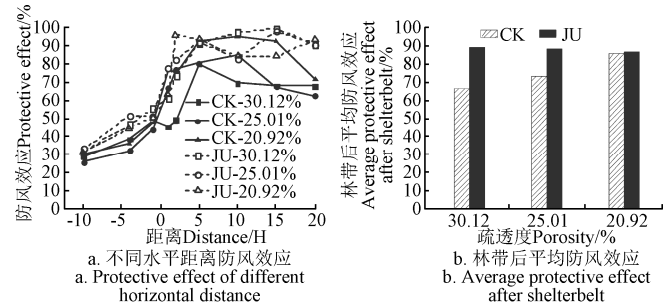


图 4  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速下不同疏透度林带防风效应

Fig.4 Protective effect of different porosity shelterbelt in  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wind speed

## 4 讨论

本研究表明, 在 8、10 和 14 m/s 风速下, 随风速增大, 无枣树防风效应减小, 分别为: 71.73%、65.62% 和 61.89%。唐玉龙等<sup>[19]</sup>在不同结构单排林带防风效应的风洞模拟研究中也表明单排林带防风效应会随风速增大而减小。随风速增大, 有枣树林带防风效应变化较小, 分别为: 88.14%、89.26% 和 90.94%。卫林等<sup>[11]</sup>在探讨防护林有效防护距离时也考虑到每种作物具有一定抗风范围, 在该范围内风速对作物影响较小。因此风速的增大, 并不影响有枣树防护林的防风效应。但有枣树林带防风效应增量会随风速增大而增大, 分别为: 16.40%、23.65% 和 29.05%。即枣树的阻风作用显著, 且随风速的增大, 枣树发挥的防风效能越大。

本研究表明, 随疏透度减小, 无枣树林带防风效应增大。在 30.12%、25.01% 和 20.92% 林带疏透度下, 分别增大 66.54%、73.47% 和 85.57%; 而有枣树林带变化较小, 分别为: 89.26%、88.69% 和 86.86%; 但增量减小, 分别为 22.72%、15.22% 和 1.28%。高涵等<sup>[22]</sup>在灌木柠条防风效应风洞模拟研究中表明 1 m 高的灌木柠条具有良好的防风作用, 则矮化乔木枣树作物也应具备相似的防风效能, 和林带协同防风, 有效提高综合防风效应。当疏透度减小时, 枣树作物通过生长高度和种植面积所产生的水平粗糙度与林带协同防风, 弥补了疏透度较大时林带损失的防风效能, 因此有枣树林带防风效应受影响较小。但林带疏透度的减小增加了林带的防风作用, 枣树的贡献减小。

新疆防护林在 20 世纪 50 年代中期前苏联植棉专家提托夫以“宽林带、大网格”配置模式规划营建, 但由于过宽的林带和林带间距导致防风效果不能达到防护要求。从 60 年代初期开始, 至今使用“窄林带、小网格”

模式,一般窄林带为 2、4、6 或 8 行林,主林带间距  $10H \sim 20H$ ,副林带间距  $30H \sim 50H$ <sup>[23-25]</sup>,但根据目标作物植株大小定量研究主林带间距极少。本研究发现,在考虑枣树等植株高大目标作物条件下,防风效应在  $20H$  距离时仍保持 85%以上,虽然该结果也属于“窄林带、小网格”建设模式,但我们提出了这种建设模式理论依据和具体计算方法,使林带间距设置更科学合理。

以南疆枣树农田防护林为例,主林带间距为  $10H$ ,每 500 m 农田间有 3 条 2 行林带,行距为 1.8 m。由本文结果可知,4 行林带 1#(疏透度为 30.12%) 在 14 m/s 风速下,  $20H$  距离有枣树林带风速为 2 m/s,远低于枣树受风害阈值风速 6.9 m/s<sup>[26]</sup>。则在 500 m×1000 m 农田中,考虑林带间距为  $20H$  时,即可减少 3 条林带,增加枣树种植面积 0.54% ( $2700 \text{ m}^2$ ),以每亩 2 万元经济效益,南疆 700 万亩枣树每年可增加经济效益 7.56 亿元。因此,充分考虑枣树作物对防护林防风效应的影响,合理配置防护林,可减少防护林占地,增加作物种植面积,提高经济效益。

## 5 结 论

本文通过控制风速和林带疏透度因素进行风洞模拟,进而比较有无枣树作物情况下林带周围风场及防风效应的差异,总结出作物对林带的影响,主要得到以下结论:

1) 在风速和林带疏透度下,枣树对林带前后流场具有显著影响,特别是林带后近地面风速削减程度较大。另外,当存在枣树作物时,林带防风效应均随之增加,且幅度较大。因此,作物(特别是果树类作物)对林带防风效应的影响已不可忽视,在今后防护林配置中需要充分考虑到作物因素。

2) 风速为 8、10 和 14 m/s 时,相同林带疏透度下,随着风速增加,无枣树林带防风效应减小,有枣树林带变化较小,但增量有增大趋势,分别为 16.40%、23.65% 和 29.05%。所以,当存在作物时,在一定风速范围内林带防风效应不会随着风速增大而减小。

3) 林带疏透度为 30.12%、25.01% 和 20.92% 时,相同风速下,随着疏透度减小,无枣树林带防风效应增大,有枣树林带变化较小,但增量有减小趋势,分别为 22.72%、15.22% 和 1.28%。所以,当林带疏透度减小时,作物对林带防风效应的贡献在减小,疏透度约为 20.92% 时作物对林带防风效应影响最小。另外,疏透度为 30.12% 时枣树对林带防风效应提升最大,同时平均防风效应与其他两者相比无明显差异,且考虑到过小疏透度林带会产生湍流危害作物,且会增加林带种植面积和成本,在实际应用中较少采用,最后得到疏透度为 30.12% 时林带和枣树搭配的综合防风效应最佳。

## 【参 考 文 献】

- [1] 朱教君. 防护林学研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 872—888.  
Zhu Jiaojun. A review of the present situation and future prospect of science of protective forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(9): 872—888. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱雅娟, 李虹, 赵淑伶, 等. 共和盆地不同类型防护林的改善小气候效应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 841—848.  
Zhu Yajuan, Li Hong, Zhao Shuling, et al. Improvement effect on microclimate in different types of shelterbelt in the Gonghe Basin of Tibet Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 841—848. (in Chinese with English abstract)
- [3] 邓荣鑫, 王文娟, 李颖, 等. 农田防护林对作物长势的影响分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊 1): 65—72.  
Deng Rongxin, Wang Wenjuan, Li Ying, et al. Analysis of shelterbelt effect on crop growth condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(Supp.1): 65—72. (in Chinese with English abstract)
- [4] Wu T, Yu M, Wang G, et al. Effects of stand structure on wind speed reduction in a metasequoia glyptostroboides shelterbelt[J]. Agroforestry Systems, 2013, 87(2): 251—257.
- [5] 徐满厚, 刘彤, 赵新俊, 等. 绿洲-荒漠交错带防护林与自然植被的协同防风效能及优化模式探讨[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1224—1232.  
Xu Manhou, Liu Tong, Zhao Xinjun, et al. Study on the collaborative windbreak effect and optimization configuration model of shelterbelt and natural vegetation in an Oasis-desert Ecotone in Junggar Basin[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1224—1232. (in Chinese with English abstract)
- [6] Bitog J P, Lee I, Hwang H, et al. A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag[J]. Forest Science and Technology, 2011, 7(1): 8—16.
- [7] Hong Se-Woon, Lee In-Bok, Seo Il-Hwan. Modelling and predicting wind velocity patterns for windbreak fence design[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142: 53—64.
- [8] 朱教君, 姜凤岐, 范志平, 等. 林带空间配置与布局优化研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1205—1212.  
Zhu Jiaojun, Jiang Fengqi, Fan Zhiping, et al. Optimization of spatial arrangements and patterns for shelterbelts or windbreaks[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1205—1212. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘文平, 宇振荣, 鄢文聚, 等. 土地整治过程中农田防护林的生态景观设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 241—248.  
Liu Wenping, Yu Zhenrong, Yan Wenju, et al. Ecological and landscape design of farmland shelterbelt in land consolidation[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 233—240. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 82—87.
- Liu Xiaoping, Dong Zhibao. Wind tunnel tests of the roughness and drag partition on vegetated surfaces[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 82—87. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
- [12] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [13] 孙怀卫, 杨金忠, 王修贵. 塑料大棚气流场模拟及作物蒸腾量计算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 245—250.
- Sun Huaiwei, Yang Jinzhong, Wang Xiugui. Numerical simulation of airflow pattern and calculation of crop transpiration in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 236—241. (in Chinese with English abstract)
- [14] 鲁天平, 刘永萍, 牙合提古丽, 等. 新疆林果基地防护林防护效应研究[J]. 南方农业学报, 2012, 43(4): 498—501.
- Lu Tianping, Liu Yongping, Yaheti Guli, et al. Protective effects of orchard shelterbelt in Xinjiang[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(4): 498—501. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李晓鸥, 余国新. 新疆红枣品牌发展现状及建设对策[J]. 北方园艺, 2014(8): 178—182.
- Li Xiaou, Yu Guoxin. Development status and construct countermeasure of jujube brand in Xinjiang[J]. Northern Horticulture, 2014(8): 178—182. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郑则浩, 雷加强, 李生宇, 等. 可移动式环境风洞气动特性测试与评价[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1551—1558.
- Zheng Zehao, Lei Jiaqiang, Li Shengyu, et al. Test and evaluation of wind flow characteristics of a portable wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1551—1558. (in Chinese with English abstract)
- [17] 关文彬, 李春平, 李世锋, 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.
- Guan Wenbin, Li Chunping, Li Shifeng, et al. Improvement and application of digitized measure on shelterbelt porosity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 651—657. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周杰. 一种林带疏透度的图像快速分析方法[P]: 中国专利, CN104361604A, 2015-02-18.
- [19] 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. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杜鹤强, 韩致文, 颜长珍, 等. 西北防护林防风效应研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 117—120.
- Du Heqiang, Han Zhiwen, Yan Changzhen, et al. Effects of wind prevention by the northwest Shelterbelt[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 117—120. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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): 100—102.
- Liu Jianxun, Lin Guoju, Shen Guilian, et al. Preliminary investigation into the windbreak effect of farm shelter-forest network In the Central section Area of Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(4): 100—102. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵新风, 徐海量, 叶茂, 等. 新疆绿洲防护林体系建设发展历程[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6): 104—109.
- Zhao Xinfeng, Xu Hailiang, Ye Mao, et al. Summary on the dynamic development of oasis shelterbelt system in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(6): 104—109. (in Chinese with English abstract)
- [24] 新疆林业科学研究所. 南疆的窄林带[J]. 陕西林业科技, 1973(7): 8, 29—33.
- [25] 李红山, 李杰军, 吴瑞, 等. 浅谈兵团农田防护林存在的问题及对策[J]. 甘肃林业科技, 2007(3): 79—81.
- [26] 朱乐奎, 刘彤, 郑波, 等. 基于防护保证率的农田防护林林带间距调控[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 185—190.
- Zhu Lekui, Liu Tong, Zheng Bo, et al. Farmland shelterbelt interval setting based on protection insurance rate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 185—190. (in Chinese with English abstract)

## Wind tunnel simulation for contribution of tall target jujube to protective effect of shelterbelt

Zheng Bo<sup>1</sup>, Liu Tong<sup>1\*</sup>, Sun Qinming<sup>1</sup>, Zhu Lekui<sup>1</sup>, Liu Zunchi<sup>1</sup>, Zhang Lichun<sup>1</sup>, Ouyang Yineng<sup>2</sup>

(1. College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. College of Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Shelterbelt plays an important role in promoting a stable and high yield of crops by reducing wind speed. However, it is often ignored that plants such as tall fruiterers have an impact on wind speed during shelterbelt configuration. In this study, we examined 3 shelterbelt models which were the jujube tree models with a height of 1.5 cm and different degrees of porosity (30.12%, 25.01% and 20.92%) and a shelterbelt average height of 7 cm. These models were used for wind tunnel simulation under different wind speeds (8, 10 and 14 m/s) to evaluate the effects of tall fruiterers on the wind field and the protective effects of the shelterbelt. The results showed that jujube exerted a notable effect on the wind field and demonstrated the protective effect of shelterbelt, particularly by reducing wind speed in the ground layer in all the test conditions. The protective effect continued to increase with the increase in the number of jujubes. Therefore, we conclude that it is very important to pay attention to the type of crop (particularly tall fruiterers) when studying the configuration of the shelterbelt. Under the same porosity condition, with the increase of wind speed, the protective effect of the shelterbelt with no jujubes reduced; however, there was not much difference observed for the shelterbelt with jujubes. In addition, the increase amplitude of protective effect exerted by the jujube increased with the increase of wind speed; the protective effect increased by 16.01%, 23.65% and 29.05% in wind fields under 8, 10 and 14 m/s wind speed, respectively. Because every plant had a range of wind resistance, the protective effect of the jujube shelterbelt did not decrease with the increase of wind speed. Under the same wind speed, with the decreasing porosity of the shelterbelt, the protective effect of the shelterbelt with no jujube increased; however, there was not much difference observed for the shelterbelt with jujubes. The increase amplitude of protective effect exerted by the jujube decreased with the decrease of porosity; the protective effect increased by 22.72%, 15.22% and 1.28% with the porosity of 30.12%, 25.01% and 20.92%, respectively. Because jujube compensated for the decreasing porosity, the shelterbelt with jujube did not decrease in its protective effects with the decrease in porosity. But porosity decreasing made the protective effect of shelterbelt increase and that of jujube decrease, so the contribution of jujube was smaller and smaller. We found that a porosity of 30.12% was optimal for the shelterbelt with jujubes, which demonstrated the maximum protective effect at this degree of porosity. In addition, we found that a smaller degree of porosity may create turbulence, which harmed the plants, increased the areas of shelterbelt and decreased the areas for plants, and was used rarely in real life. For example, in South Xinjiang, if the shelterbelt spacing was increased from 10 to 20 times of the shelterbelt average height, it would increase the plant area by 0.54%. If the jujube produced an annual 20 thousand yuan per 667 m<sup>2</sup>, 756 million yuan per year would be obtained for 7 million 667 m<sup>2</sup> jujube in South Xinjiang. Therefore, if completely considering the protective effect of plants, it can decrease the shelterbelt areas and increase crop areas, and promote the economic effect of crops.

**Keywords:** crops; wind tunnels; velocity; jujube; protective effect; porosity