

基于数学期望的风向和风速对农田林网防风效能的影响

张 帅^{1, 2}, 丁国栋^{1, 2*}, 高广磊^{1, 2}, 赵媛媛^{1, 2}, 包岩峰³, 于明含^{1, 2}

(1. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083;

2. 北京林业大学水土保持学院宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083;

3. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: 为研究农田防护林网在全年的时间尺度上对不同方向有害风的综合防护效益, 在野外实地观测不同风向(与主林带夹角分别为 90° 、 67.5° 、 45° 、 22.5° 、 0°)和风速(5.2、7.3 m/s)条件下林网内防风效能, 根据各风向有害风发生频率计算数学期望值, 利用克里金(Kriging)插值法进行模拟, 并用地统计学的方法分析防护林网的空间自相关性。结果表明: 防护林对不同风向的风均有较强的防护作用, 随着风向与主林带夹角的减小, 风速均值呈现出增大的趋势, 分别降低了69.5%、66.2%、60.4%、59.8%、50.1%; 不同风速条件下防风效能均能达到50%以上, 低风速时平均有效防护面积为90.1%, 高风速时为44%; 不同风速条件下林网内空间变异系数分别与指数模型和高斯模型相拟合, 林带内风速块金值较低, 变程较大, 具有强烈的空间自相关性和样本区间的合理性。综上所述, 防护林网对不同风向的有害风均有较好的防护效果, 研究区主害风向与防护林营造方向偏差较大, 研究其防护效益应综合不同风向的防风效能。

关键词: 防护林; 风速流场; 防风效能; 数学期望

中图分类号: S727.24 **文献标志码:** A

土壤风蚀是指在以风力为主要外营力的作用下导致地表物质分散的物理过程, 是造成环境恶化和土地生产力下降的主要原因之一^[1-2]。农田防护林作为生态建设的重要工程措施, 能有效改善生产生活环境和局地小气候, 防止地表风蚀, 减轻风沙危害, 为生态安全提供保

收稿日期: 2017-12-11

录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31270749、31600581), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015ZCQ-SB-02)

*通信作者: dch1999@263.net

障^[3-4]。我国在很早之前就开始了防护林的营建，并在防护林建设等方面做了大量工作^[5-6]。目前防护林体系发展完善，空间格局多样，可针对不同的保护对象设置相应的林网配置模式^[7]。防护林的防护作用首先表现在防风效能上^[8-10]，由于风速的降低引起其他气象要素的改变，进而调节微气候环境^[11-13]。现有研究通过野外观测及风洞模拟的方法对影响农田防护林防风效能的各因素做了大量实验^[14-17]，并借助数学模型在细碎化、景观结构方面进行评价，分析了林带宽度、高度、结构类型、疏透度等对防护林防风效能的影响^[18-21]。但现有研究大多建立在主害风向与主林带垂直的前提下，而在实践中发现，由于地形的限制，防护林的营造常会出现与主害风向不垂直的情况，且部分地区气候变化较大，主害风向会出现较大差异，因此，仅分析垂直主林带风向的防风效能并不能反应真实状况。针对这一问题，本研究通过数学期望的方法，将不同风向的林网内风速及防风效能综合分析，揭示农田防护林网对旷野风速运动变化所产生的作用和影响，为农田防护林的规划提供依据。

1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北缘中国林业科学研究院沙漠林业实验中心(以下简称沙林中心)第三实验场，行政区划属于磴口县。研究区处于温带干旱区，东临黄河，为黄河冲积平原，属温带大陆性气候。多年平均降水量为 144.5 mm，降雨量分配不均，集中分布在 6—9 月，占全年降雨量的 78%；多年平均蒸发量为 2397.6 mm，年平均湿润系数为 0.094；年平均日照总时为 3209.5 h，年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 3100~3400 $^{\circ}\text{C}$ ，无霜期为 140~160 d；年平均风速为 3~3.7 m/s，年大风日数为 20~40 d。

研究区雨热同期，且具有引黄灌溉的条件。植被类型丰富，试验地为独立防护林网，主要造林树种为新疆杨 (*Populus alba* L. var. *pyramidalis* Bunge) 和沙柳 (*Salix cheilophila*)，树龄为 24 a，长势良好。主林带间距 140 m，副林带间距 300 m，无明显缺口，基本情况详见表 1。

表 1 试验农田林网概况

Tab. 1 General situation of farmland shelter network

林带	树种配置	株行距/m	树高/m	枝下高/m	冠幅/m	胸径/m	走向
主林带 a	新疆杨	1×1.5	24	3.0	3.1×3.8	27.5	南北
主林带 b	新疆杨	1×1.5	22.5	1.9	2.7×4.0	20.5	南北
副林带 a	新疆杨	1×2	23.3	2.8	3.0×2.2	24.3	东西
副林带 b	新疆杨	1×2	25.5	4.3	4.2×2.4	26	东西

注：根据主害风向 (NW-WNW)，林网西侧、东侧林带分别定义为主林带 a 和主林带 b，北侧和南侧林带分别定义为副林带 a 和副林带 b。

2 观测点布设与观测方法

2.1 测点布设

防护林网内的观测点布设情况如图 1 所示，设定林网中心为原点，副林带方向以一倍平均树高为间距向两侧布设测点，共布设五列；主林带方向以二倍平均树高为间距向两侧布设测点，共布设五行。林网内总计观测点为 25 个。

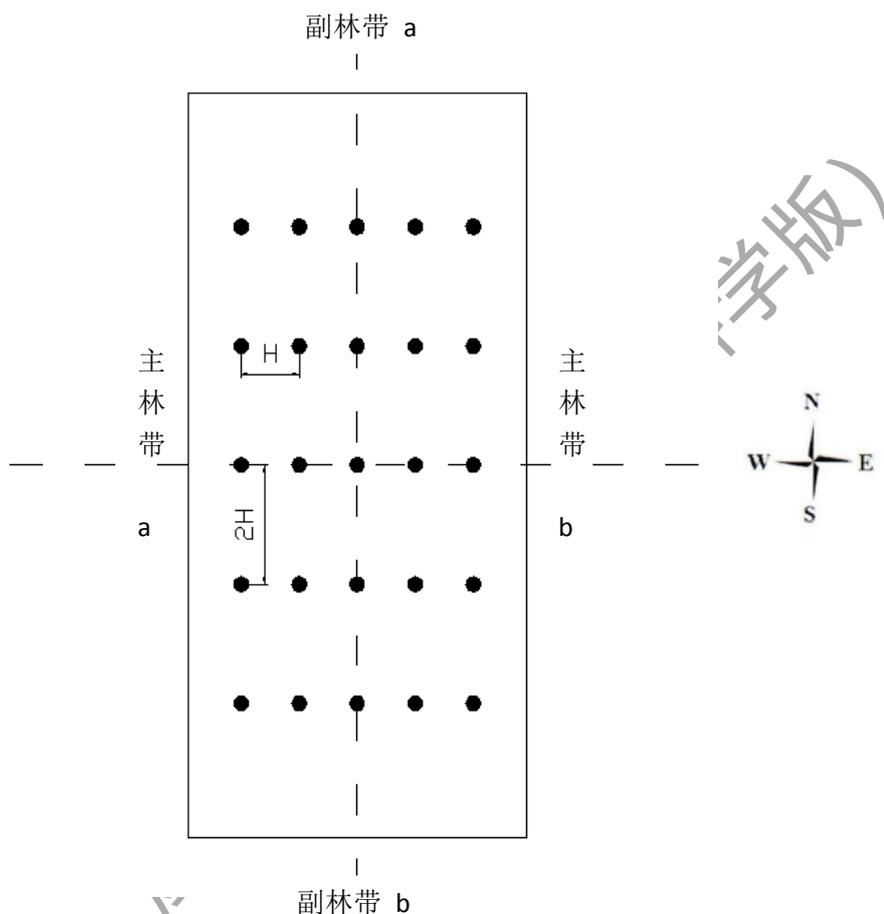


图 1 防护林网内观测点示意图

Fig.1 A schematic diagram of the observation point in the protective forest network

2.2 风速测定

在防护林内按照图 1 所示测点布设 HOBO 小型便携气象站外接三杯风速仪 (S-WSA-M003)，数据测定间隔设置为 1 s，观测高度为距地面 2 m^[19]，同时以沙林中心沙地地面气象站实时风速风向自动仪观测数据作为旷野风速对照。

2.3 气象资料

检索内蒙古磴口区站 2005—2015 年间的气象资料，按照图 2 所示对风向进行分区，统

计不同风向出现的频数，并计算其频率，作为计算防护林防风效能数学期望值的依据，所用数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>)。

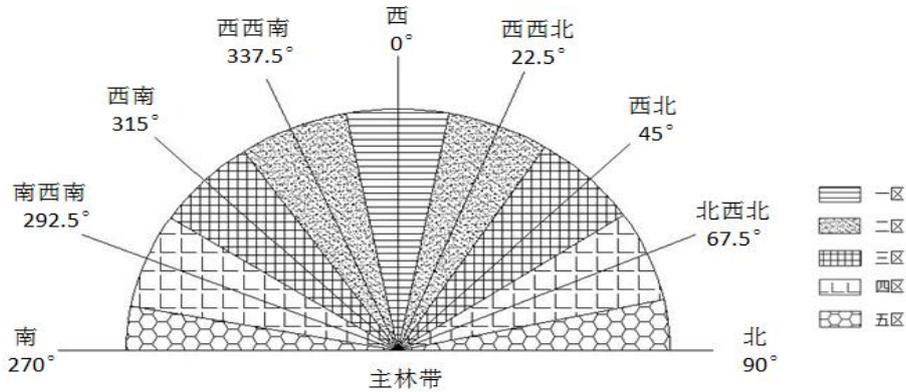


图 2 风向分区示意图

Fig.2 A schematic diagram of the wind direction partition

2.4 防风效能

采用下式计算防风效能：

$$e_{xz} = \frac{u_{0z} - u_{xz}}{u_{0z}} \times 100\%$$

式中： e_{xz} —防风效能，即主林带背风一侧距林带为 x ，高度为 z 处的平均风速与旷野相同高度处降低风速的百分比，用以表示风速削减的程度； u_{0z} —旷野测量高度为 z 处的对照风速； u_{xz} —防护林网内主林带背风侧距林带为 x ，测量高度为 z 处的平均风速。

2.5 数学期望

采用下式计算数学期望：

$$E_{XZ} = \sum_{i=1}^n e_{xzi} p_i$$

式中： E_{XZ} —防风效能数学期望值，即防护林网内主林带背风一侧距林带为 x ，测量高度为 z ，在风向为 i 的条件下防风效能和 i 风向出现频率的乘积和； e_{xzi} —防护林网内主林带背风一侧距林带为 x ，测量高度为 z ，风向为 i 时的防风效能； p_i —风向为 i 时出现的频率。

2.6 数据处理方法

利用传统统计学方法分析，基于样本观测值统计均值、标准差、极值、变异系数等，计算样本频数分布，并选取平均风速值，在 surfer 13.0 中利用克里金 (Kriging) 插值法绘制等值线图，分析林网内风速分布状况。

3 结果与分析

3.1 风向对林网内平均风速的影响

通过对防护林网内风速的统计分析如表 2 所示,发现风向对防护林网内风速影响较明显,随着风向与主林带夹角的减小,风速均值呈现出增大的趋势。不同风速下各风向的最大值均小于旷野对照风速,表明防护林网发挥了防风消能的作用,一至五风区平均风速比旷野分别降低了 69.5%, 66.2%, 60.4%, 59.8%, 50.1%。单一变量分析结果显示,风向为五区时防护林网内风速差异较小,其他风区风速差异显著 ($p<0.05$),这是由于当风向与主林带夹角较大时,气流能更为顺畅的通过林带间隙,更容易形成狭管效应及涡流,导致林网内气流变化复杂,风速数值波动明显,造成样本间差异过大

表 2 防护林网内风速统计特征

Tab.2 The characteristics of wind speed statistics in the protection forest network

旷野对照风速/ (m·s ⁻¹)	风向 分区	最大值/ (m·s ⁻¹)	最小值/ (m·s ⁻¹)	均值±标准差 / (m·s ⁻¹)	变异系数/%
5.2	一区	1.52	0.25	1.29±0.42a	32.7
	二区	2.05	0.97	1.44±0.39b	27.2
	三区	2.53	1.14	1.94±0.44b	22.8
	四区	2.77	1.14	1.73±0.49c	28.1
	五区	3.03	1.57	2.45±0.42d	17.2
7.3	一区	2.77	1.66	2.64±0.35a	13.1
	二区	3.53	2.16	2.91±0.51b	17.6
	三区	4.19	1.9	3.06±0.71b	23.3
	四区	4.53	2.66	3.44±0.61bc	17.7
	五区	4.67	3.01	3.73±0.51c	13.6

注: 不同小写字母表示在 $p=0.05$ 水平上差异显著。

统计不同风区防护林网内风速频数正态概率,结果如图 3 所示。可以看到:风向在一区时风速频数分布较均匀,不符合正态分布,没有明显的偏度;风向在二区时风速频数属于正态分布中短尾分布,区间数据具有正偏离态势;有害风在三区低风速、四区及五区高风速时

风速频数属于左偏态分布，区间数据具有正偏离态势；有害风在三区高风速及五区低风速时风速频数属于长尾分布，区间数据具有负偏态态势。不同风向的风速频数分布差异较大，没有明显的规律性，进一步说明风速频数的变异系数较大，样本数据差异不显著的现象。

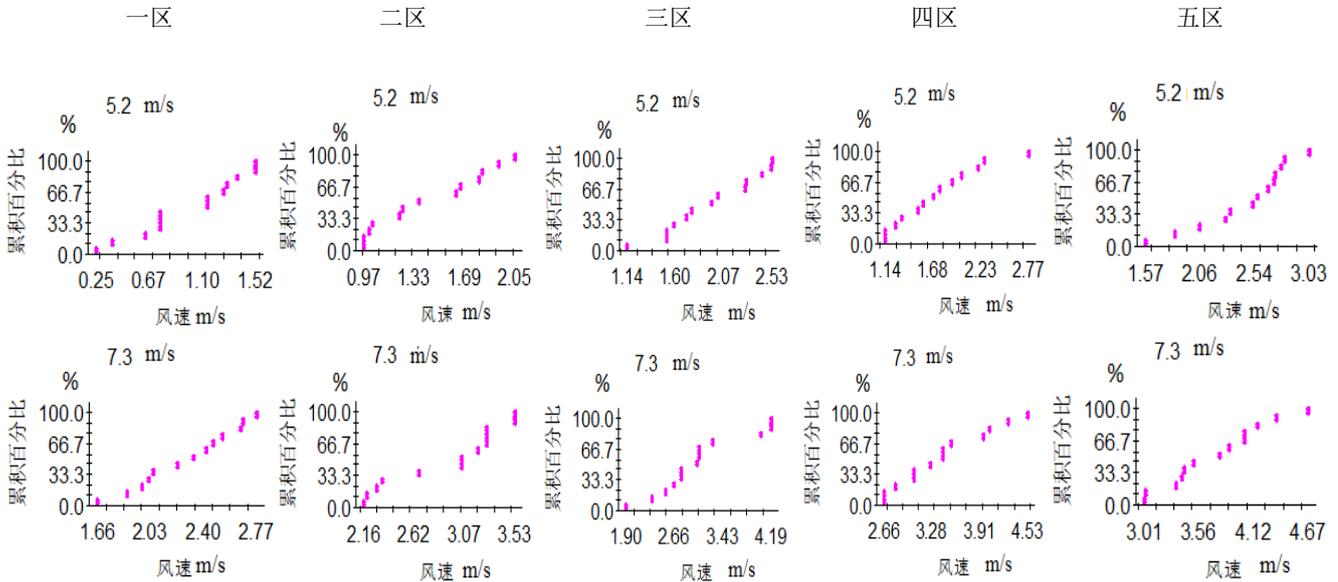


图3 防护林网内不同风区风速频数正态概率

Fig.3 Normal frequency probability of wind speed in different partition in protective forest net

3.2 不同风向频率

统计研究区 2005—2015 十年间的气象资料发现，风区一到五区出现的频率分别为 3.31%，55.25%，22.1%，11.05%，8.29%。主害风向与主林带角度较大的一区和二区出现的频率为 58.56%，表明研究区当地林带走向设置不合理，防护林不能充分发挥其作用，现有研究区防护林防风效能的研究并不能反应真实防护效果，从侧面也反映出本研究的合理性。

3.3 风向对林网内风速空间异质性的影响

利用地统计学的方法，分析不同风速下防护林网内风速的空间异质性，对其变异函数进行拟合，并计算其参数，结果如图 4 所示。当风速为 5.2 m/s 时，防护林带内平均风速数学期望值可以较好的拟合为指数函数；当风速上升为 7.3 m/s 时，选用高斯函数对防护林带内平均风速数学期望值具有更好的拟合度。

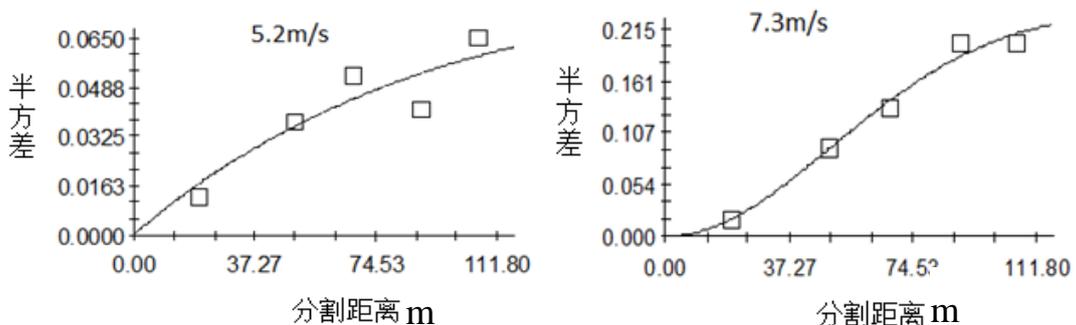


图 4 平均风速数学期望值半方差分析

Fig. 4 Semi-variance analysis of mean wind velocity mathematical expectation

从表 3 中可以看到，本研究的块金值较小，与基台值的比值远小于 25%，表明本研究样本具有较为强烈的空间自相关性，自相关程度均达到 99.9%；变异函数的变程分别为 92.9 和 70.8，均远大于测点间隔，表明样本取样连续性强，且取样间隔较为合理；两个变异函数模型的决定系数较高，残差较小，模型的选择较为合适。

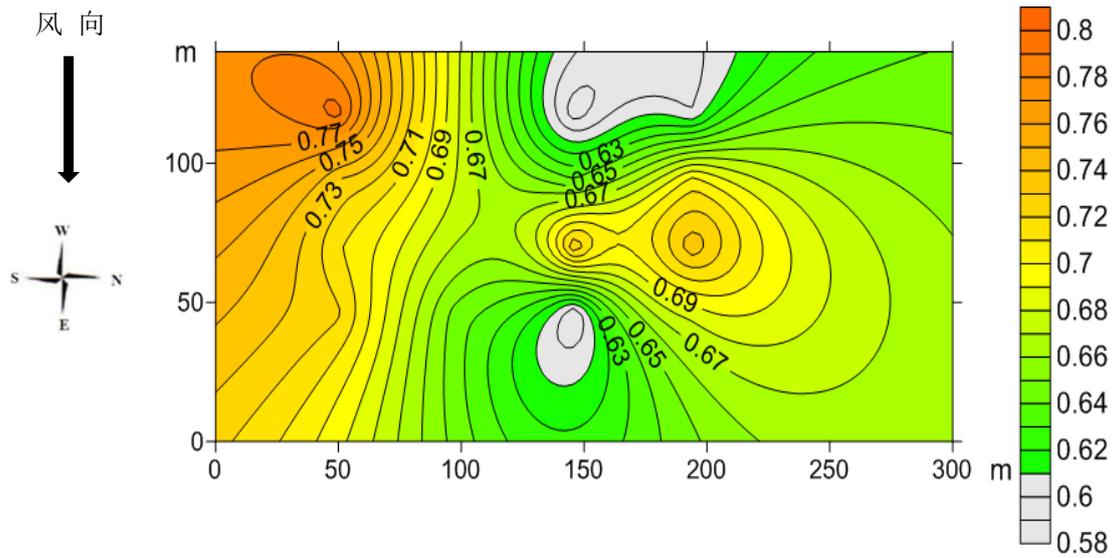
表 3 林网内风速变异函数参数

Tab. 3 The variation function of wind velocity in forest net

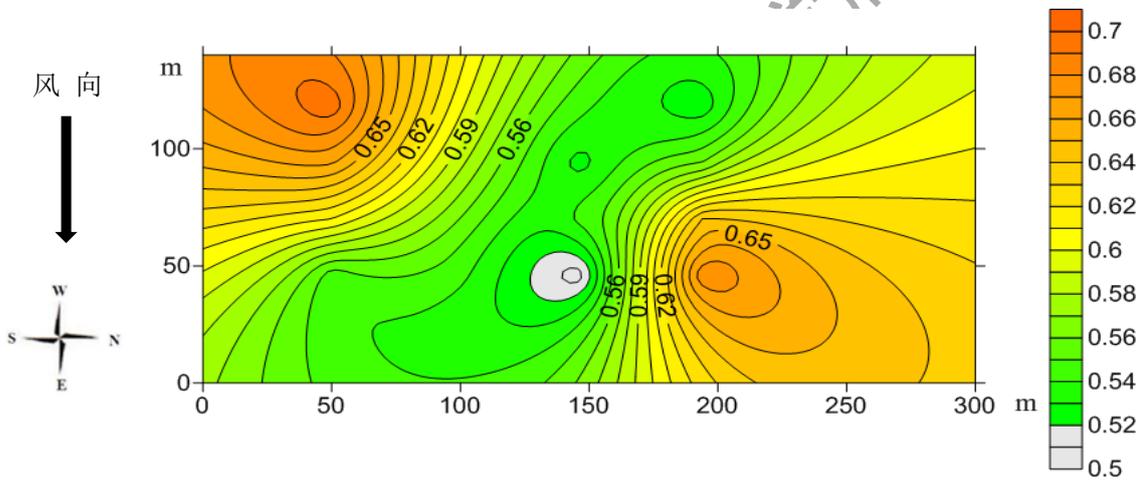
旷野风速/(m·s ⁻¹)	模型	C ₀	C+C ₀	结构比/%	A	R ²	RSS
5.2	指数	0.0001	0.0867	99.90	92.9	0.831	2.66E-04
7.3	高斯	0.0001	0.2342	99.90	70.8	0.985	3.52E-04

3.4 防风效能数学期望值分布

计算防风效能数学期望值，并利用克里金插值法模拟出防风效能图如图 5 所示，防护林在不同风速下均发挥较强的防护作用，最小值仍大于 0.5。不同风速下防风效能图结构特征相似，在林网中间区域防护效果较差，主林带和副林带交界的区域防护效果较好。当风速为 5.2 m/s 时，林带南侧 0~75 m 的区域内风速较小，形成明显的风影区，最高防护效能达到 0.79 林网内距副林带 100~200 m 范围内是低防风效能区，在此区域内等值线较为密集，表明风速变化较为剧烈，气流稳定性差，沿风向方向，风速先上升后下降，最低防风效能为 0.58；林带北侧 0~75 m 范围内等值线稀疏，气流较为稳定，且防风效能变化幅度较小，形成稳定风速区域。当风速为 7.3 m/s 时，防护林网内西南区域和东北区域形成明显的防风效能区，中间区域由西北向东南形成近似菱形低防风效能区，在此区域内等值线较为稀疏，表明该区域虽保持较高的风速，但气流较为稳定，此时最低防风效能为 0.5。在风速增大的过程中，防护林网内防风效能区面积增大，但整体防护效果降低，表明防护林在低风速时能发挥更强的防护效果。



(a) 风速为 5.2 m/s 时



(b) 风速为 7.3 m/s 时

图 5 不同风速条件下防护林网内防风效能

Fig.5 Simulation of windbreak efficiency in shelterbelts under different wind speeds

从防风效能图可以直观地展现林网内风速区域的划分和差异性,但不能定量分析不同风速下林网防护范围的大小,为此引入有效防护面积的概念,根据防风效能图中等值线的插值模拟,确定不同标准下林网内的有效防护面积,结果如表 4 所示。当风速为 5.2 m/s 时防护林防护作用较强,林网内均能达到 0.55 的防风效能,当风速增大至 7.2 m/s 时,有效防护比下降至 73.4%,有效防护面积随风速的增大而减小,这是由于风速增大时,风能以几何倍数增长,单一防护林网格不能完全吸收动能。当把防风效能标准提高到 0.6 时,低风速下林网内有效防护比下降了 3%,而高风速下林网内有效防护比急剧下降了 52.3%,此时低风速有效防护面积是高风速有效防护面积的 2.17 倍。当继续把防风效能的标准提高到 0.65 时,低

风速下林网内有效防护比下降了 23.7%，而高风速下林网内有效防护比下降了 30.8%，此时低风速下的有效防护面积为高风速的 5.27 倍。结果表明，防护林网能发挥较强的防护作用，但随着风速的增大，有效防护面积呈现减小的趋势。

表 4 不同风速下防护林网内有效防护面积

Tab.4 Effective protection area of protective forest net under different wind speed

旷野风速/(m·s ⁻¹)	防风效能/%	总面积/(10 ³ m ²)	有效防护面积/(10 ³ m ²)	有效防护比/%
5.2	55	42	42	100
7.3			30.83	73.4
5.2	60	42	40.74	97
7.3			18.77	44.7
5.2	65	42	30.79	73.3
7.3			5.84	13.9

4 讨论

1) 在进行防风效能的模拟中，控制点的数量越多，模拟结果越准确。但在实践中，由于受到试验仪器及环境因素的影响，控制点的数量经常受到限制。控制点布设的合理性可运用变异函数来判断，变异函数是地质统计学中常用的手段和工具，用来研究区域化变量空间变化特征和强度，也被定义为区域化变量增量平方的数学期望。变程表示区域化变量从存在空间相关状态转到不存在空间相关状态的临界点，其值反映该变量的空间自相关范围的大小，即空间自相关尺度，一般认为变程大于样本间隔时，样本空间存在自相关性。在本研究中，不同风速条件下变程分别为 92.9 和 70.8，均大于测点间距，因此可认为测点布设合理，模拟效果准确。

2) 通过分析磴口气象资料我们可以看到，有害风向与主林带夹角较大的频率是 58.56%，与主林带夹角较小的有害风出现的频率为 41.44%，表明本研究区防护林的布置并未充分发挥其防护作用，主林带走向与二区、三区风向垂直会产生更好的防护效果。本研究的防风效能图的控制点数据是基于数学期望计算所得，是所有防风效能的综合，与范志平等^[3]的单个风速分布图结构有较大的差异；同时，风速变异函数模型选取与吕仁猛等^[8]的球状模型不同，但自相关程度高，变程合理，决定系数较大，仍具有强烈的空间相关性及样本取样的合理性。

3) 有害风向与主林带垂直时，除上风向林带的阻滞减速作用外，会在林网中心形成较大的涡流减速区，随后风速增大，核心涡流减速区风速数值明显低于林带后阻滞减速区；当有害风向为二区的角度时，林网的核心涡流减速区面积减小，且风速数值与林带后阻滞减速

区风速差异较小；当有害风向为三区时，林网内仅在上风向主林带与副林带相交的区域出现小面积的减速区，林网中心涡流减速区消失；当有害风向为四区时，林网内流场结构与三区相似，但风速恢复区的风速数值有了明显提高；当有害风向为五区时，上风向副林带后形成阻滞减速区，范围约占林带的 $1/4$ ，随后在林网内形成较大面积的加速区，整个林网内风速数值均有了较明显的提升。因此我们可以看到，风向与主林带夹角变小时，防护林防护作用的减小体现减速区域面积的减小和防风效能减弱导致风速数值的上升。

5 结论

不同风速条件下防护林网空间相关度均为 99.90%，表明风速均具有较强的空间自相关性，高、低风速可分别较好的拟合为高斯函数和指数函数，变程分别为 70.8 和 92.9，均高于最大取样间隔，插值模拟具有较强的可靠性，风速样本数据变异系数较大，离散程度较高，并不完全符合正态分布。防护林网对不同风向的风均有较强的防护作用，风向从一区到五区的平均防风效能分别达到 69.5%，66.2%，60.4%，59.8%和 50.1%，但随着风速的增大有效防护比呈现出降低的趋势，风速为 5.2 m/s 时平均有效防护面积为 90.1%，当风速增大到 7.3 m/s 时平均有效防护面积下降至 44%。本文基于风向数学期望的防风效能研究展现出林网对不同风向防护效果的差异，弥补了单一风向防风效能实践性和准确性较差的缺陷，能充分表明防护林网的综合防护效益，对防护林的建设具有一定的指导作用。

参考文献：

- [1] 王彦武, 欧阳雪芝, 罗玲,等. 民勤绿洲区固沙林土壤理化性质时空变异分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(2):85-89.
- [2] 方敏哲, 岳德鹏, 张启斌,等. 基于能值分析的磴口县土地生态经济系统可持续性研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4):178-185.
- [3] 范志平, 刘芳, 徐军,等. 农田防护林带组合方式对近地面风速作用特征的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(2):320-323.
- [4] 刘旭升, 李献文, 孙涛. 内蒙古磴口县林业生态建设工程综合效益评价[J]. 生态学报, 2017, 37(18):6196-6204.
- [5] 郭迎春, 周彦华. 风沙干旱区果园的防护林建设探讨[J]. 农业开发与装备, 2016(7):176-176.
- [6] 刘虎俊, 袁宏波, 郭春秀,等. 均匀配置的两种仿真灌木防风效应野外观测[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1):8-13.

- [7] 马欢, 岳德鹏, 于强,等. 生态脆弱区防护网络构建及分区研究——以磴口县为例[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4):193-202.
- [8] 马士龙, 李振军, 刘环,等. 疏透度对农田防护林阻风效能的影响研究[J]. 水利水电工程设计, 2013, 32(2):26-28.
- [9] 吕仁猛. 旷野风速对林网内风速分布及防风效能的影响[J]. 水土保持通报, 2014.34(2):105-110.
- [10] 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(5):34-39.
- [11] 杨兴虎, 范敬龙, 徐新文,等. 且末绿洲沙漠过渡带防护林工程小气候效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):183-187.
- [12] DHILLON G S, GILLESPIE A, PEAK D, et al. Spectroscopic investigation of soil organic matter composition for shelterbelt agroforestry systems[J]. Geoderma, 2017, 298:1-13.
- [13] SHEN Q, GAO G, FU B, et al. Responses of shelterbelt stand transpiration to drought and groundwater variations in an arid inland river basin of Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531:738-748.
- [14] 段娜, 孙学凯, 王琼,等. 乌兰布和沙漠不同结构防护林带的防风效能[J]. 科技导报, 2016, 34(18):125-129.
- [15] 邱梦如, 彭帅, 郭中领,等. 河北坝上农田防护林带结构配置--以康保地区为例[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8):145-148.
- [16] 付亚星, 王乐, 彭帅,等. 河北坝上农田防护林防风效能及类型配置研究——以河北省康保县为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):279-283.
- [17] 郑波, 刘彤, 朱乐奎,等. 多层林网与单林带防风效应差异的风洞模拟[J]. 石河子大学学报(自科版), 2017, 35(2).
- [18] ZHENG X, ZHU J, XING Z. Assessment of the effects of shelterbelts on crop yields at the regional scale in Northeast China[J]. Agricultural Systems, 2016, 143:49-60.
- [19] 史晓亮, 李颖, 赵凯,等. 农田防护林林网景观结构异质性动态评价[J]. 中国科学院大学学报, 2012, 29(1):54-61.
- [20] 张启斌, 岳德鹏, 于强,等. 磴口县景观格局 AES-LPI-CA 模型演化模拟[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):128-134.
- [21] JASKULSKA R, JASKULSKA J. Efficiency of old and young shelterbelts in reducing the contents of nutrients in Luvisols[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 240:269-275.

Influence of Wind Direction and Speed on Shelterbelt Windbreak Capacity Based on Mathematical Expectation

ZHANG Shuai^{1,2}, DING Guodong^{1,2*}, GAO Guanglei^{1,2}, ZHAO

Yuanyuan^{1,2}, BAO Yanfeng³, YU Minghan^{1,2}

(1. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Yanchi Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Institute of desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to study the comprehensive protective benefits of farmland shelterbelt networks against harmful winds in different directions throughout a year, different wind directions (the angles to the main forest belt were 90°, 67.5°, 45°, 22.5°, and 0°, respectively) and speed (5.2, 7.3 m/s) were observed in the field. The mathematical expectation values were calculated according to the occurrence frequency of harmful winds at each wind direction, simulated by Kriging interpolation, and the spatial autocorrelation of shelterbelt networks was analyzed using geostatistics. The results show that: 1) Shelterbelt had a strong protective effect under winds of different directions. With a decrease in the angle between the wind direction and the main forest belt, the mean wind speed showed an increasing trend, which decreased by 69.5%, 66.2%, 60.4%, 59.8% and 50.1%, respectively. 2) Wind-breaking efficiency under different speeds can reach more than 50%. The average effective protection area under low wind speed can reach 90.1%, while under high wind speed it is 44%. 3) The spatial variability coefficients of the shelterbelt under different wind speed conditions can be fitted with an exponential model and a Gaussian model. The shelterbelt nugget of the wind was lower, its range was larger, and it had a strong spatial autocorrelation and rationality of the sample interval.

Key words: shelterbelt; wind velocity flow field; windbreak effect; mathematical expectation