

吉林水田防护林防风效能及其影响因子分析

杨雨春,赵珊珊,包广道,王 君,张忠辉*

(吉林省林业科学研究院,吉林 长春 130033)

摘 要:对吉林省西部水田防护林 10 条典型林带的结构因子和防风效能进行调查,分析了林带结构因子与防风效能有效防护距离的相关关系。结果表明,林带结构不同,导致林带的防风效能差异显著,并且依据防风效能将水田防护林分为 3 类:I(3、4、6、8)、II(2、7)、III(1、5、9、10),有叶期防风效能($E_{\text{有叶期}}$)和无叶期防风效能($E_{\text{无叶期}}$)较好的林带分别为第 3、4、6、8 条林带。林带的有效防护距离是 60~160 m。第 3、4、6、8 条林带结构的防风效能较好。防风效能与林带结构因子分析表明,枝下高、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 、 $\beta_{\text{无叶期}}$ 与 $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 呈显著正相关,胸径与防风效能呈负相关,而且其枝下高、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 、 $\beta_{\text{无叶期}}$ 适宜值范围分别为 4~7 m、0.31~0.39 和 0.63~0.75 之间,胸径的适宜范围为<32 cm。

关键词:水田防护林;防风效能;相关分析

中图分类号:S727.2 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2015)01-0132-05

Effectiveness of Windbreak Forest in Paddy Fields and Influencing Factors in West Jilin Province

YANG Yu-chun, ZHAO Shan-shan, BAO Guang-dao, WANG Jun, ZHANG Zhong-hui*

(Forestry Academy of Jilin Province, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract:Structure factors and windbreak effectiveness of ten typical paddy field shelterbelt structures in west Jilin Province were investigated. Correlations between the structure factors and effective distance of windbreak were analyzed. Windbreak effects at leaf stage ($E_{\text{leaf stage}}$) and windbreak effect at non-leaf stage ($E_{\text{non-leaf stage}}$) were determined. Due to the differences in structure, differences of windbreak effect of different paddy field shelterbelts were significant. The shelterbelts were divided into three categories: I (3, 4, 6, 8), II (2, 7), and III (1, 5, 9, 10). The shelterbelts with the number 3, 4, 6, and 8 demonstrated high effectiveness of windbreak. The effective distance of shelterbelt was 60—160 m. In addition, correlation analysis showed that branch height, porosity at leaf stage ($\beta_{\text{leaf stage}}$) and non-leaf stage ($\beta_{\text{non-leaf stage}}$) had positive correlation with $E_{\text{leaf stage}}$ and $E_{\text{non-leaf stage}}$, while diameter at breast high (DBH) had a negative correlation with them, and its branch height, $\beta_{\text{leaf stage}}$ and $\beta_{\text{non-leaf stage}}$ appropriate values were 4—7 m, 0.31—0.39 and 0.63—0.75, respectively, suitable range of DBH was<32 cm.

Key words:paddy field shelterbelt; windbreak effect; correlation analysis

防风效能是农田防护林的基本功能^[1],其作用机制是使得一部分气流通过林带,降低其动能,另一部分气流上升,在林带上方通过,并且因而降低了林带背风面的气流动能^[2-5]。林带的防风效能与林带的疏透度、树高、林带宽度等林带结构因子相关^[4]。

同时,由于防护林的树种、林分结构与林带结构不同^[3,6],进而导致其防风效能存在一定的差异^[7],研究表明,沿海、灌区、干旱地区和牧场等防护林的防风效能的影响因子各不相同^[3,8-10],而且不同树种的混交模式对其防风效能的影响较大。必须针对不同

收稿日期:2014-04-23 修回日期:2014-07-04
基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项(201104040);吉林省自然基金项目(20090254;201205065)。
作者简介:杨雨春,男,副研究员,研究方向:防护林经营。E-mail: yang-yu-chun@163.com
* 通信作者:张忠辉,男,研究员,研究方向:森林生态学。E-mail: zzhgysz@163.com

防护林配置模式进行系统观测。然而,由于前人研究所采用的风速仪不能实现多点数据的同时观测和数据采集,而且,有关水田防护林防风效能方面的研究较少。因此,采用多点式自记测风仪(GB-228),对吉林省西部水田不同疏透度(β)、树高、胸径、冠幅等结构因子的防护林带的防风效应(E)进行研究,旨在探讨水田防护林的林带结构因子对防风效能的影响及主要因子的适宜值范围。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究对象为前郭县境内 20 世纪 90 年代营造的水田防护林,以 3~6 行为主,主林带林木平均胸径在 23.8~40.2 cm 之间,树高在 13.4~23.2 m 之间,枝下高在 1.7~7.2 m 之间。主林带带间距包括 300 m 和 500 m 2 种,副带距 500 m。主要树种杨树以‘白城小黑杨(*Populus psedosimonii* × *nigra* cv ‘Baicheng’)'和‘白林 3 号杨(*P.* × “*Bailin-3*”)’(白城市林科院选育的优良抗逆性树种),柳树是旱快柳(*Salix matsudara* var. *anshanensis*)和黑皮柳(*Salix limprichtii*)。林带林木保存率在 62%~81%之间(表 1)。试验地地势平坦,土层较厚。

1.2 数据调查

在试验区内选择 10 种模式的水田防护林林带作为研究对象(表 1),而且该 10 种模式的林带能够

分别找到相应的 3 个重复模式(即:每种模式能够重复 3 次)。于 2012 年 6 月 15 日—7 月 15 日和 2012 年 10 月 25—11 月 25 日分别测定上述 10 种模式林带的有叶期和无叶期的迎风面和背风面的风速。试验采用多点式自记测风仪(GB-228)测定垂直距离为 2 m 处的风速,每 20 min 记录风速值 1 次。观测点布设在林带的中垂线上,分别在林带内(0 m)和选取迎风面 20、40、60、80 m 和背风面距林带位置为 20、40、60、80、100、120、140、160、180 m 处架设仪器,同时,测定无水田防护林带的旷野对照点处风速。防风效应 $E(\%)$ 和相对风速 $E'(\%)$ 的计算公式^[10]。

$$E=\frac{E_0-E_1}{E_0}$$

(1)

$$E'=\frac{E_1}{E_0}$$

(2)

式中: E_1 为距离林带 2 m 处的平时风速, E_0 为观测高度为 2 m 处旷野对照点的平均风速。

采用常规调查采集造林树种、造林模式、树高、胸径、冠幅、枝下高、行数、株行距、带长、带间距等数据,有叶期疏透度($\beta_{\text{有叶期}}$)和无叶期疏透度($\beta_{\text{无叶期}}$)调查采用数字图像处理方法得到^[11](表 1)。

1.3 数据分析

表格处理采用 Excel2007 完成,系统聚类分析和相关分析由 SPSS19.0 完成,其他采用 Origin8.0 完成。

表 1 林带结构因子调查
Table 1 Survey of shelterbelt structure

编号	树种	造林模式	树高 /m	胸径 /cm	灌幅 /m ²	枝下高 /m	株行距 /m	行数	带长 /m	带间距 /m	保存率 /%	β	
												$\beta_{\text{有叶期}}$	$\beta_{\text{无叶期}}$
1	小黑杨	纯林	19.1±1.11	35.5±1.85	5.4×3.7	6.7	1×1	4	500	500	72	0.278 9	0.539 8
2	白林 3	纯林	17.9±1.78	24.8±2.38	4.7×3.9	7.2	2×2	4	500	500	65	0.460 8	0.824 8
3	白林 3	纯林	17.5±1.18	33.6±3.60	7.5×6.2	7.4	2×2	6	500	500	68	0.384 9	0.643 7
4	小黑杨、黑皮柳混交	带状	15.6±3.20	26.0±4.39	6.4×4.5	4.9	1×1	4	500	300	76	0.314 2	0.634 4
5	黑皮柳	纯林	13.4±1.17	28.9±4.22	5.9×5.1	1.7	1×2	4	500	300	66	0.214 5	0.515 2
6	小黑杨	纯林	16.1±0.68	27.6±1.16	7.0×4.6	7.5	2×1	4	500	300	62	0.375 6	0.717 1
7	旱快柳	纯林	13.4±1.48	28.2±2.48	5.3×3.7	2.8	1×2	3	500	300	68	0.224 8	0.573 4
8	小黑杨	纯林	17.3±1.65	23.8±2.92	4.5×3.2	5.3	1×1	3	500	300	64	0.364 3	0.751 2
9	小黑杨	纯林	21.2±1.73	25.8±4.16	5.4×3.1	6.2	1×1	2	300	300	77	0.412 4	0.835 6
10	小黑杨	纯林	23.2±0.98	40.2±4.91	5.4×4.1	6.8	1×1	6	300	300	81	0.224 6	0.586 4

2 结果与分析

2.1 不同林带结构的防风效能差异性分析

林带结构是林带的外部形态和内部结构的总体^[12-13],而且由于林带的结构不同,其防风效能影响存在一定的差异^[3,14],从图 1 可以看出,在不同林带结构,其防风效能有一定差异,而且同一林带从有叶期向无叶期过渡时,其有叶期防风效能($E_{\text{有叶期}}$)<无

叶期防风效能($E_{\text{无叶期}}$),这主要是由于树叶的存在,导致风在通过林带时,形成以迎风面上升和背风面下降为主的气流运动趋势,而在相应无叶期,风通过林带时,其水平运动趋势要强于有叶期^[7,12],使得林带有叶期的有效防护距离比无叶期低^[14],并最终导致林带内的 $E_{\text{有叶期}} < E_{\text{无叶期}}$ 。
对 $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 为性状进行聚类分析(图 2)。结果表明,10 条林带明显分为 3 类:Ⅰ(4、6、8)、Ⅱ

(3)、Ⅲ(1、5、9、10、2、7)。对照图 1 和表 1 可知, $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 较大的林带序号分别为第 4、6、8 条林带, $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 值分别在 0.38~0.42 和 0.40~0.45 之间, 而且其 $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$ 值范围分别在 0.31~0.39 和 0.63~0.75 之间。研究表明, 东北农田防护林有叶期疏透度在 0.25~0.35 时, 防护林的防风效果较好^[15-16], 而曹新孙和康立新的研究则认为当疏透度值在 0.25~0.40 和 0.25~0.30 之间的防护效益最大^[12-13]。而第 3 条林带的疏透度 $\beta_{\text{有叶期}}=0.384\ 9$, 属于适宜疏透度范围。结合本试验结果, 第 3、4、6、8 条林带的防风效能较好, 第 2、7 条林带次之, 第 1、5、9、10 条林带最差。因此将聚类分析结果调整为 I(3、4、6、8), II(2、7), III(1、5、9、10)。此外调查的水田防护林 $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$ 适宜范围是 0.31~0.39 和 0.63~0.75。

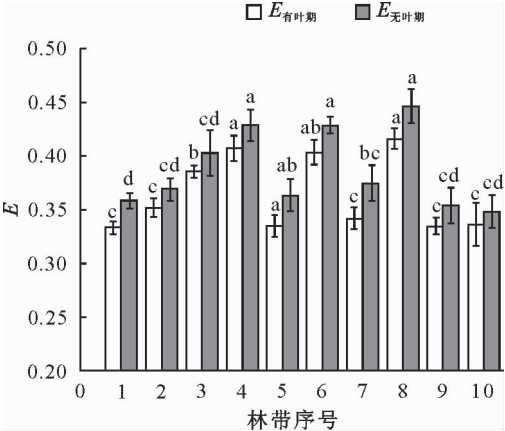


图 1 不同水田防护林林带的 $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 差异
Fig. 1 $E_{\text{leaf stage}}$ and $E_{\text{non-leaf stage}}$ difference of paddy field shelterbelt

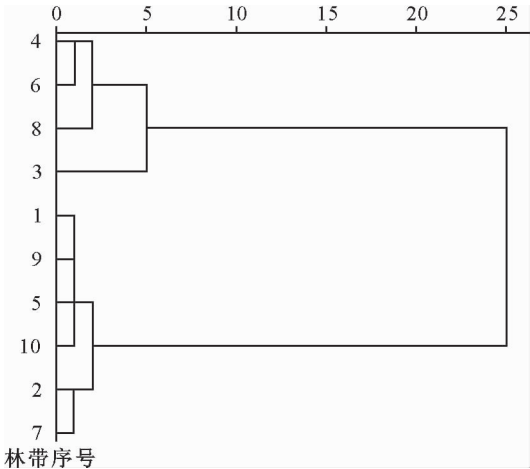


图 2 不同林带防风效能树状分析

Fig. 2 Cluster analysis dendrogram of windbreak effect

2.2 不同林带不同测点的有效防护距离

有效防护距离是防护林的评价指标之一, 它是以林带降低风速至无害值的范围为依据^[15]。有效防护

距离越大, 其防护效果越好, 而且研究表明, 风速降低 20%~30% 时, 其风害已减弱至有害值以下^[12, 17-18]。在图 3 中, 不同测点的相对风速是有叶期和无叶期相对风速的平均值。在 -80 m 处, 只有第 8 条林带的风速降低到 80% 以下, 在 -60 m 处, 除第 1 条林带外, 其他林带的相对风速均在 80% 以下。而在背风面的 180 m 处, 除第 6 条林带在其附近, 其他均高于 80%, 而在 160 m 处, 第 3、4、6、8 条林带的相对风速均低于 80%。因此, 第 3、4、6、8 条林带的有效防护距离较大, 其作用范围是 -60~160 m。这也证明了 2.1 部分的研究结果, 即: 第 3、4、6、8 条林带的防风效能较好, 而且调查的水田防护林 $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$ 适宜范围是 0.31~0.39 和 0.63~0.75。

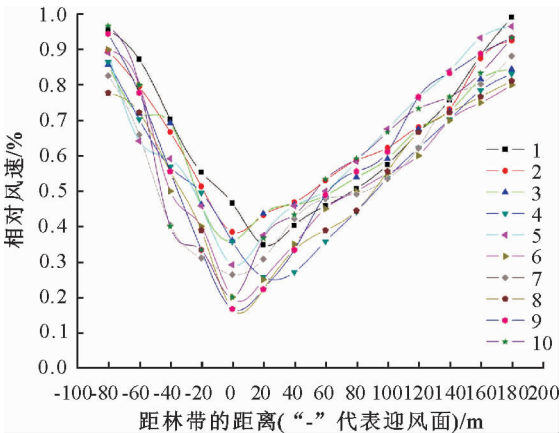


图 3 不同林带迎风面和背风面的相对风速
Fig. 3 Relative wind velocities in the vicinity of different shelterbelt

2.3 林带结构因子对防风效能的影响

林带结构因子对防护林的防风效能具有一定的影响^[19]。为了探讨其相互关系, 将 10 种结构林带的 11 项因子(树高、胸径、冠幅、枝下高、株行距、行数、带长、带间距、保存率、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$)进行了相关分析(表 2)。由表 2 可知, 枝下高、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 、 $\beta_{\text{无叶期}}$ 与 $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 呈显著正相关, 而胸径与之呈负相关。枝下高是防护林林带结构的重要参数, 在前人研究中发现, 当枝下高过低则与防风效能呈负相关, 反之, 则与其呈正相关^[19], 这基本与本项研究相一致。然而, 朱廷曜认为当枝下高不宜过大, 林带的枝下高一般为林带平均高的 1/4~1/3^[20]。

同时, 相关研究表明, 带长与防风效能呈正相关^[21], 这与本研究结果相同。有关直接研究胸径与防风效能相关关系的较少, 但是从朱廷曜的研究可以看出, 胸径的增加使得地上生物量加大, 进而降低了林带的防风效能^[20]。

为确定胸径、枝下高、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$ 对 $E_{\text{有叶期}}$ 的影响效应, 以及上述因子的适宜范围, 进行了响应曲

表 2 水田防护林林带结构和防护效能的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of windbreak effect with paddy field shelterbelt sructures

指标	树高	胸径	灌幅	枝下高	株行距	行数	带长	带间距	保存率	$\beta_{\text{有叶期}}$	$\beta_{\text{无叶期}}$
$E_{\text{有叶期}}$	-0.142	-0.499 *	0.244	0.368 *	0.055	-0.082	0.158	-0.051	0.268	0.586 *	
$E_{\text{无叶期}}$	-0.116	-0.498 *	0.201	0.350 *	0.038	-0.109	0.296	-0.155	0.237		0.479 *

面分析(图 4)。从图 4 可以看出,胸径的适宜范围为<32 cm(图 4A);同时,其枝下高的适宜范围是 4~7 m(图 4B);此外, $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$ 的适宜值范围分别为 0.31~0.39 和 0.63~0.75 之间(图 4C)。

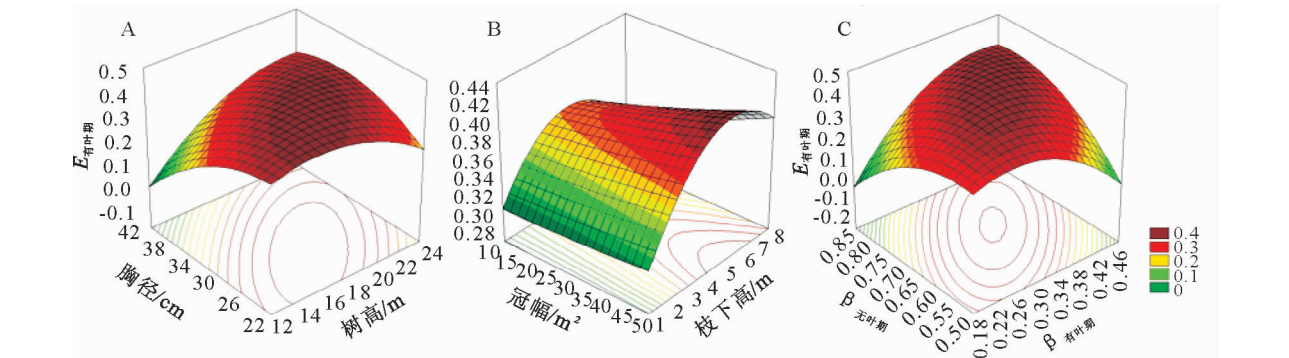


图 4 树高(A)、枝下高(B)、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 和 $\beta_{\text{无叶期}}$ (C)与 $E_{\text{有叶期}}$ 的关系

Fig. 4 Relationship between branch height, $\beta_{\text{leaf stage}}$ and $\beta_{\text{non-leaf stage}}$, DBH and $E_{\text{leaf stage}}$

3 结论与讨论

3.1 不同林带结构的防风效能差异

防护效能就是改变了林带背风面气流动能的空间分布^[4-5],调节光照、温度和湿度的时空分布,改善小区域环境并提高作物产量^[22-23]。因此,防风效能是防护林的重要评价指标。本研究内容表明,由于林带结构的不同,导致林带的防风效能差异显著,而且依据防风效能可将吉林省西部水田防护林分为 3 类:Ⅰ(3、4、6、8)、Ⅱ(2、7)、Ⅲ(1、5、9、10)。对照图 1 和表 1 可知, $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 较大的是第 3、4、6、8 条林带, $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 值分别在 0.38~0.42 和 0.40~0.45 之间。此外,通过有效防护距离调查可知,第 3、4、6、8 条林带的有效防护距离较大,其作用范围是-60~160 m。

3.2 林带结构因子与防风效能的关系

相关研究表明,林带结构因子如疏透度、林带高度、林带宽度与防风效能存在一定的相关性^[21,24],但其他学者的研究则认为树高^[25]、胸径和冠幅^[19]等林带结构因子与防风效能存在相关性,这种差异可能与调查防护林的地理位置、树种、配置结构和树龄等综合因素不同有关。本研究表明,枝下高、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 、 $\beta_{\text{无叶期}}$ 与 $E_{\text{有叶期}}$ 和 $E_{\text{无叶期}}$ 呈显著正相关,而且其枝下高、 $\beta_{\text{有叶期}}$ 、 $\beta_{\text{无叶期}}$ 适宜值范围分别为 4~7 m、0.30~0.40 和 0.63~0.75 之间,胸径的适宜范围为<32 cm。因此,按照本研究的结论并结合表 1 可以看出,吉林省西部水田防护林的老龄化(胸径过大)问

题比较突出,而且其枝下高偏低,表明应加强防护林的修枝打叉等抚育工作。

综上,第 3、4、6、8 条林带结构是水田防护林的最优模式,即:造林树种为白林 3、白城小黑杨和黑皮柳,造林模式纯林或混交,当株行距为 1 m×2 m 或 1 m×1 m 时,其行数为 3~4 行,当株行距为 2 m×2 m 时,其行数应增加至 6 行,带长 500 m。

参考文献:

[1] 高素华,宋兆民,高桥英纪.林带的防风效能及数字模拟[J].林业科学,1991,27(5):550-554.
GAO S H, SONG Z M, HIDENORI T. Wind protection effects and figure simulation of forest zone[J]. Scientia Silvae Siniae, 1991, 27(5):550-554. (in Chinese)
[2] 宋兆民,孟平,张翼.林带的透风度与林网的防风效应[J].林业科学,1987,23(4):398-405.
SONG Z M, MENG P, ZHANG Y. The permeability of shelterbelt and the effects of shelter lattice[J]. Scientia Silvae Siniae, 1987, 23(4):398-405. (in Chinese)
[3] 李永平,冯永忠,杨改河.北方旱区农田防护林防风效应研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(6):92-98.
LI Y P, FENG Y Z, YANG G H. Study on windbreak effect of farmland shelterbelts in dry farmlands of north China[J]. Journal of Northwest A& F University: Natural Science Edition, 2009, 37(6):92-98. (in Chinese)
[4] 任中兴,房用,杨吉华,等.黄泛沙地小网格农田防护林网防风固沙和增产效益的研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2009,40(3):398-404.
REN Z X, FENG Y, YANG J H, et al. Study on the reducing wind speed, stablizing sand and yield-growing effects of small network farm-shelter forest in sandy area of the Yellow River

[J]. Journal of Shandong Agricultural University; Natural Science Edition, 2009, 40(3):398-404. (in Chinese)

[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 M H, LIU T, ZHAO X J, *et al.* Study on the collaborative windbreak effect and iptimization configuration model of shelterbelt and natural vegetation in an oasis-desert ecotone in juggar basin[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1224-1232. (in Chinese)

[6] 范志平,曾德慧,冀晓燕,等.农田防护林生态系统经营管理研究[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(4):81-84.

FANG Z P, ZENG D H, JI X Y, *et al.* Advances in management of farmland shelterbelt ecosystems[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(4):81-84. (in Chinese)

[7] 李锋瑞,张华,赵丽娅,等.科尔沁沙地人工杨树(*Populus simonii*)林生态防风效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 62-66.

LI F R, ZHANG H, ZHAO L Y, *et al.* Ecological effect of artificially established poplar forest against wind in Horqin sandy land of Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2):62-66. (in Chinese)

[8] 张锦春,廖空太,满多清,等.民勤绿洲农田防护林结构配置多样性研究[J]. 西北林学院学报,2008,23(3):53-56.

ZHANG J C, LIAO K T, MAN D Q, *et al.* Research on diversity structure installation of farmland shelterbelts in Minqin Oasis[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(3):53-56. (in Chinese)

[9] 马国飞.河套灌区两种杨树农田防护林防护效应的对比研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.

[10] 沈青叶.上海市崇明岛农田防护林优化模式研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.

[11] 关文彬,李春平,李世峰,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 W B, LI C P, LI S F, *et al.* Improvement and application of digitized mesure on shelterbelt porosity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(6), 651-657. (in Chinese)

[12] 曹新孙.农田防护林学[M]. 北京: 中国林业出版社,1983.

[13] 康立新,张纪林.护田林带树种配置评价与优化模式选择[J]. 南京林业大学学报, 1991, 15(1), 46-53.

KANG L X, ZHANG J L. Evaluation of tree species depasitian in shelterbelt to protedt farmland anditg gelection of optimized model[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1991, 15(1), 46-53. (in Chinese)

[14] 王葆芳,赵英铭,王志刚,等.干旱区人工绿洲不同农田防护林模式防护效应及相关性[J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 707-712.

WANG B F, ZHAO Y M, WANG Z G, *et al.* Sheltering effects of farmland puotective forest and their relationships in artificial oasis of arid regin[J]. Forestry Research, 2008, 21(5):707-712. (in Chinese)

[15] 范志平,关文彬,曾德慧,等.东北地区农田防护林高效多功能经营的指标体系及标准研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5):701-705.

FANG Z P, GUAN Z B, ZENG D H, *et al.* Indices and criteria of highly effective and multi2functional management of windbreaks/ shelterbelts in northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5):701-705. (in Chinese)

[16] 张纪林,吕祥生.杨树护田林带疏透度模型及应用[J]. 生态学杂志,1993,12(5):56-60.

ZHANG J L, LU X S. Porosity model of poplar farmland shelterbelt and its application[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 12(5):701-705. (in Chinese)

[17] 姜凤岐,朱教君,周新华,等.林带的防护成熟与更新[J]. 应用生态学报,1994, 5(4):337-341.

JIANG F Q, ZHU X J, ZHOU X H, *et al.* Protective maturity (PM) and regeneration of shelterbelts[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(4):337-341. (in Chinese)

[18] 梁万君. 吉林省西部农田防护林生态学研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.

[19] 谭芳林,朱炜,林捷,等.沿海麻黄防护林基于林带防风效能定量评价研究[J]. 林业科学, 2003, 39(Supp. 1):27-31.

TAN F L, ZHU W, LIN J, *et al.* Quantitative evaluation on protection effect of *Casuarina equisetifolia* shelterbelt in coastal area, Fujian Province [J]. Scientia Silvae Siniae, 2003, 39(Supp. 1):27-31. (in Chinese)

[20] 朱廷曜,关德新,吴家兵,等.论林带防风效应结构参数及其应用[J]. 林业科学, 2004, 40(4):9-14.

ZHU T Y, GUAN D X, WU J B, *et al.* Structural parameters of wind protection of shelterbelts and their application [J]. Scientia Silvae Siniae, 2004, 40(4):9-14. (in Chinese)

[21] 朱廷曜,周广胜.农牧防护林网区域性防风效应及评价模型[J]. 林业科学, 1993, 29(6):509-514.

ZHU T Y, ZHOU G S. Regional wind protection effect and evaluation model of agriculture and animale husbandry wind-break networks[J]. Scientia Silvae Siniae, 1993, 29(6):509-514. (in Chinese)

[22] 郝玉光,卢平.乌兰布和沙区人工绿洲农田防护林小气候效益与作物产量关系的研究[J]. 林业科学研究, 1997, 10(1): 19-23.

HAO Y G, LU P. A study on the relationship of the shelter-forest microelimate effects on man-made oasis and crops production in Wulanbuhe Sandy Region[J]. Forestry Research, 1997, 10(1):19-23. (in Chinese)

[23] 向成华,费世民,汪万全,等.坡地防护林带小气候因子与作物产量的关系[J]. 四川林业科技, 1994, 15(4):16-23.

[24] 封斌,高保山,麻保林,等.陕北榆林风沙区农田防护林结构配置与效益研究[J]. 西北林学院学报,2005,20(1):118-124.

FENG B, GAO B S, MA B L, *et al.* Shelter structure and effect of farm land shelterbelt in sand-drift area in Yulin[J]. Journal of Northw est Forestry University, 2005, 20(1): 118-124. (in Chinese)

[25] 于春堂,杨晓辉,李朝生.沙漠-河岸过渡带不同天然植被群落类型防风效应评估[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1):118-119.

YU C T, YANG X H, LI C S. Effect evaluating of reducing wind velocity of different natural vegetation in desert- river-side ecotone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1):118-119. (in Chinese)