

塔克拉玛干西南缘风沙前沿防护林对条田的防护作用

喀哈尔·扎依木¹, 买尔旦·阿不都·卡德², 杨公新², 蔡凯旭²

(1.新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.新疆农业大学 林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 研究不同疏透度防护林对塔克拉玛干沙漠绿洲边缘条田的防风效能, 为当地网格条田可持续发展提供理论指导。[方法] 选取塔克拉玛干南缘县城——新疆叶城县恰其库木管理区域郊防护林为研究对象, 通过野外实地观测, 对比研究不同疏透度防护林对塔克拉玛干沙漠绿洲边缘条田的防风效能。[结果] ①叶城县恰其库木区防护林内条田里离防护林 10—15 m 范围是防风效果最佳区域, 可种植防风能力较差农作物。②3 种结构防护林总体而言, 防护林 1.5 m 高处防风效能最佳, 2 m 处防风效能最低。本研究区条田内, 种植生长期总株高小于 1.5 m 以下的农作物, 可有效避免风害导致的损失。③疏透结构林带固沙效率最佳, 通风结构次之, 紧密结构林带固沙效率最差, 其固沙效率排列顺序为: 58.39% > 57.99% > 36.29%。[结论] 要发挥防护林的固沙作用, 林带疏透度应控制在疏透结构为宜, 可以使其达到较好的防风效果。疏透结构防护林周围的条田内可种植抗沙能力较弱农作物。

关键词: 条田防护林; 防风固沙效益; 塔克拉玛干沙漠; 土壤风蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0019-06

中图分类号: S727.23, S157.2

文献参数: 喀哈尔·扎依木, 买尔旦·阿不都·卡德, 杨公新, 等. 塔克拉玛干西南缘风沙前沿防护林对条田的防护作用[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 19-24. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.003; Kahaer · Zhayimu, Maierdang · Abudu · Kadeer, Yang Gongxin, et al. Protective effect of shelterbelt on strip fields in southwest margin of Taklimakan Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 19-24.

Protective Effect of Shelterbelt on Strip Fields in Southwest Margin of Taklimakan Desert

Kahaer · Zhayimu¹, Maierdang · Abudu · Kadeer², Yang Gongxin², Cai Kaixu²

(1. College of Geographical and Remote Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objectives] The windbreak efficiency of shelterbelts with different permeability on strip fields at the edge of the oasis in the Taklamakan Desert was analyzed in order to provide theoretical guidance for sustainable development of local grid strip fields. [Methods] The peri-urban shelter forest in the Qiaqikumu area of Yecheng County, Xinjiang Wei Autonomous Region on the southern edge of the Taklamakan Desert was selected as the research location. Field observations were made to quantify the windbreak effect for shelterbelts with different structures on the edge of the Taklamakan Desert oasis. [Results] ① The strip field within 10—15 m of the leeward side of the shelterbelts in the Qiaqikumu area of Yecheng County experienced the best windbreak effect. Crops with poor ability to withstand wind damage can be planted in this strip field. ② In general, the windbreak effect provided by shelterbelts was highest for plants with a height of 1.5 m and lowest for plants with a height of 2 m. Therefore, planting crops with a plant height of less than 1.5 m in the shelterbelts can effectively minimize losses caused by wind damage in this study area. ③ The sand fixation efficiency of the open-structure shelterbelt was the greatest, followed by the ventilated-structure shelterbelt. The sand fixation efficiency of the compact-structure shelterbelt was the worst. The order of sand fixation efficiency for the three kinds of structural shelterbelts followed the order of 58.39% > 57.99% > 36.29%, respectively. [Conclusion] In order to increase the sand-fixation efficiency of shelterbelts,

收稿日期: 2022-09-13

修回日期: 2022-10-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“绿洲城市路侧树种不同器官对降尘和土壤重金属的富集及转运机理研究”(31971713); 国家博士后资助项目“吐鲁番城郊工业区人工防护林对土壤重金属及防风蚀机理研究”(2020T130554)

第一作者: 喀哈尔·扎依木(1987—), 男(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区沙雅县人, 硕士, 实验师, 主要从事国土空间规划、人文地理、荒漠化防治研究。Email: kahar602@163.com。

open-structure shelterbelts should be recommended. This shelterbelt type can achieve the best windbreak effect. Strip fields around open-structure shelterbelts can be planted with crops having weak sand resistance.

Keywords: strip field shelter forest; windbreak and sand fixation benefit; Taklamakan Desert; soil wind erosion

中国西北地区频繁发生的沙尘暴、盐渍化、干旱等自然灾害对农业生产、经济发展、生态环境和人民生活造成了重大的危害^[1]。特别是在荒漠分布较广的南疆地区,风沙危害极为严重。目前新疆维吾尔自治区荒漠化严重,在很大的程度上影响人类活动。防护林作为人工森林生态系统,可以有效地减少自然灾害的发生,特别是对于干旱半干旱地区风蚀造成的土壤养分流失、多风沙和气候干燥等自然灾害的防治具有显著效果。防护林具有减少土壤风蚀、降温增湿、降低林后风速以及改良土壤等功能,能够有效提高农业稳产增产^[2]。此外,人工防护林还可改善农田生态环境,并进一步提高农牧民的生活水平^[3]。建设防护林是为了改善和修复被破坏的生态系统,维持其正常的系统结构和生态功能。简言之,防护林的建设与人类发展息息相关,在生态保护、社会发展方面具有重大意义。

土壤或成土母质在外力作用下被破坏剥蚀、搬运和沉积的过程称之为土壤风蚀^[4]。土壤风蚀的表现形式较为复杂,受到土壤性质、气候因素以及生物的影响^[5]。一般而言,当风速大于 4~5 m/s 时就产生土壤风蚀^[6-7]。本文的研究区,新疆南疆塔克拉玛干沙漠西南缘的叶城县,包含的 2.84×10^6 hm² 面积中,绿洲面积只有 7.00×10^4 多 hm²,生态环境极其脆弱。一般春、冬两季频发的沙尘暴对各族群众的生产、生活和身体健康造成不利的影 响,同时在一定程度上制约了叶城县域经济持续健康发展。叶城县恰其库木管理区城郊防护林位于喀喇昆仑山北麓,东北面与塔克拉玛干沙漠接壤,是叶城县主要生态屏障之一,对叶城县生态环境的保护有着至关重要的作用,因此加强该地区防护林的防护效益显得尤为重要^[8-9]。有关防护林近年来不少学者进行了大量研究,总结出防护林主要用来防御外界恶劣环境,具有防风效益、热力效益、土壤改良效益等多种生态效益^[10-12],是改善生态环境的重要保障^[13]。总而言之,有关喀什地区叶城县生态防护林的防护效益相关研究鲜有报道。

本文选取喀什市叶城县恰其库木管理区城郊防护林为研究对象,对比研究不同疏透度防护林对绿洲边缘条田的防风效能,以此明确不同样防护林条田内防风效果,指出防护林条田内最适种植区域,给当地农业可持续发展提出理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于喀什市,塔里木盆地西缘,与塔克拉玛干沙漠接壤的叶城县恰其库木管理区境内的城郊防护林。研究区白杨林于 2016 年 3 月定植,均为乡土树种,林带成活率达 98%,分 33 个网格条田,其中林带面积 146.11 hm²,树木株行距为 2 m×1.5 m,每 1 hm² 平均 3 331.3 颗,林带树种为毛白杨(*Populus tomentosa*),共计 325 万株。水源采用地下水。供水系统采用地下水配套滴管工程供水。

1.2 研究材料与方法

(1) 试验样地的确定。2020 年 7—8 月及 2021 年 4—7 月,通过对研究区实地考察和勘察,依据自然地势和地形样貌特点,选择地势平坦开阔且与主害风方向垂直的典型 3 个不同结构防护林林带,林龄为 7 a 生,林带宽为 50 m。根据样地内的活立木进行每木检尺,调查树高、胸径、枝下高等树木生长指标,确定典型的标准样地后对各样地迎背风面风速、输沙量和风蚀量进行同步测定。

在标准样地选择 3 个 50 m×50 m 小样方用测高仪、胸径尺、钢卷尺等仪器测定每木检尺,采用手持式气象站同步观测风速风向,风蚀量采用地埋陷阶式集沙桶来观测,风沙流(输沙量)观测利用 QN-JSY 集沙仪,粒径分布观测采用 Topsizer 激光粒度分布仪。根据林带疏透度大小,通常将防护林林带分为紧密结构、疏透结构、通风结构 3 种。同一年种植,株行距,水肥,管理措施基本一致的生态林长势、防护效益、林下植被、土壤状况有显著差异。

(2) 疏透度的测定。本次试验观测选取具有当地典型结构类型的林带用目测法判断林带类型后树木成熟期对防护林带(网)开展林带结构的观测,再用照相法拍摄林带纵断面像片,首先用数码相机在水平方向垂直于林带段 20—30 m 处手动摄取林带段的纵切面图,相机距地面高度为 1.65 m。因为观测林带是纯种林带只在其迎风面或背风面进行拍摄。在室内将照片进行图片灰度处理,同时确定林冠和林带疏透度。可以用林带纵断面透光空隙面积 S_1 与林带纵断面面积 S 之比 β 来表示^[14]。林带结构划分参考胡跃高等^[3]的划分标准。

$$\beta = \frac{S_1}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: β 为林带疏透度; S_1 为林带纵断面透光空隙面

积; S 为林带纵断面面积。

(3) 防风效能及固沙效率的计算。防风效能的计算公式为:

$$E_h = (U_h - U_{h_0}) / U_h \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_h 为高度 2 m 处的防风效能(%); U_h 为空地 2 m 高处平均风速(m/s); U_{h_0} 为林带背风面对应高度的平均风速(m/s)^[15]。

固沙效率的计算公式为:

$$E = \frac{U_l - U_{h_0}}{U_h} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_i 为背风面 i 处的固沙效率(%); U_0 为对照点单位面积集沙量(g/cm^2); U_l 为林带背风 l 处单位面积集沙量(g/cm^2)。

研究区气象站监测的风速和风向数据,利用 Excel, SPSS 及 Origin 2018 等软件进行处理。

2 结果与分析

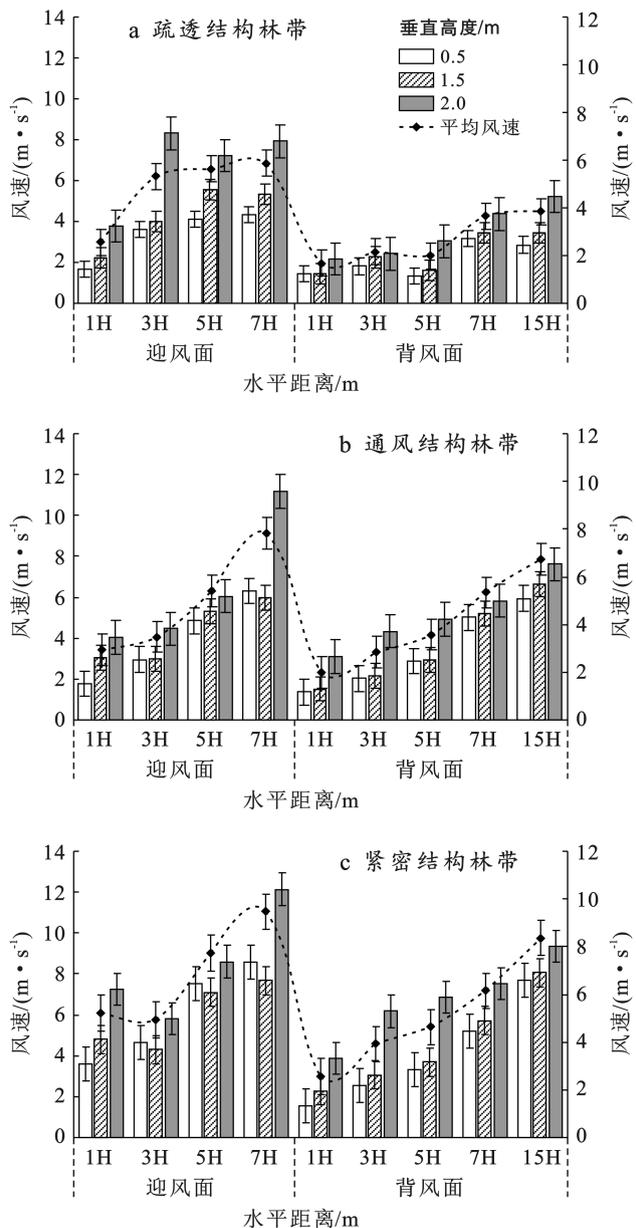
2.1 防护林带迎背风面条田内风速变化

强风遇到林带后受林带阻碍气流作用的影响,林带前后风速有不同程度的降低。不同结构林带对风速的降低程度有所不同^[16]。研究区 3 种不同结构林带均在一定程度上起到阻碍气流的作用,但不同结构林带防风作用的大小和范围亦有差别(图 1)。疏松结构林带(图 1a)背风面 1—5 H(H 代表树高)即约 5—25 m 处形成一个静风区,过 7 H 即 35 m 之后风速逐渐增加,低风速区域较大,背风面有效防风达 15 H,即 75 m。通风结构林带(图 1b)也有一定程度降低风速,但是通风结构林带降低风速幅度较小,背风缘附近风速降低不明显。最低风速同样出现在 1—5 H,即 10—50 m 处范围,防护距离比疏松结构差别不大,但是削减效率比疏松结构林带要低。紧密结构林带(图 1c)最低风速出现在 1 H 处,即 12 m,但风速恢复也很快,其有效防护水平距离比较短,到 15 H,即 180 m 距离风速逐渐接近旷野风速。

2.2 条田林带防风效能分析

2.2.1 条田林带防风效能水平变化 随着林带水平距离的增加,林带防风效能逐渐降低。由表 1 可知,疏松结构林带,在背风面水平距离 1 H, 5 m 处防风效能最好,达 85.00%。在 15 H, 75 m 处防风效能最低,为 65.91%。

通风结构林带水平距离下平均防风效能为 63.77%, 1 H、即 10 m 处条田内防风效能最高,紧密结构林带水平距离下,平均防风效能为 54.70%, 1 H, 即 12 m 处条田内防风效能最佳, 15 H 处, 即 180 m 处条田内即防风效能最差。



注:图中 H 代表树高,不同的防护林结构里边 H 值不同,在疏松结构林带中 1H=5 m,在通风结构林带中 1H=8 m,在紧密结构林带中 1H=12 m。下同。

图 1 塔克拉玛干沙漠绿洲边缘风速分布特征

Fig.1 Characteristics of wind speed distribution on edge of Taklamakan Desert oasis

2.2.2 条田林带防风效能垂直变化 当气流经过林带时,气流在树干、枝叶的阻碍下被分散成不同大小,不同方向的湍流,致使动能减少,风速降低。由表 2 可知,3 种结构林带背风面 1.5 m 高处平均防风效能最佳,疏松结构 > 通风结构 > 紧密结构, 80.60% > 70.79% > 63.51%。2 m 高处平均防风效能相对较低分别为 73.55% > 60.17% > 51.28%。3 种林带结构垂直梯度下防风效能较好的林带结构为疏松结构,达 77.65%,通风结构为 66.55%,紧密结构为 58.16%。

表 1 塔克拉玛干沙漠绿洲南缘林带背风面水平距离下防风效能
Table 1 Windproof efficiency at horizontal distance from leeward side of forest belt on edge of Taklamakan Desert oasis

类型	编号	疏透度/ %	不同垂直高度防风效率/%			
			0.5 m	1.5 m	2 m	均值
疏透结构	1	17.07	86.73	84.61	58.37	76.57
	2	18.53	77.92	78.92	62.03	72.96
	3	17.87	71.74	78.28	60.10	70.04
	均值	17.83	78.80	80.60	60.17	73.19
通风结构	1	32.86	69.69	73.65	47.50	63.61
	2	32.04	65.74	68.54	59.45	64.58
	3	33.5	61.67	70.19	46.89	59.58
	均值	32.8	65.70	70.79	51.28	62.59
紧密结构	1	12.89	61.27	66.34	79.10	68.90
	2	11.26	61.23	61.53	70.02	64.26
	3	11.6	56.53	62.66	71.54	63.58
	均值	11.92	59.68	63.51	73.55	65.58

表 2 塔克拉玛干沙漠绿洲南缘林带背风面垂直高度下防风效能

Table 2 Windproof efficiency at vertical height from leeward side of forest belt on edge of Taklamakan Desert oasis

类型	编号	疏透度/ %	不同垂直高度防风效能/%			
			0.5 m	1.5 m	2 m	均值
疏透结构	1	17.07	86.73	84.61	79.10	83.48
	2	18.53	77.92	78.92	70.02	75.62
	3	17.87	71.74	78.28	71.54	73.85
	均值	17.83	78.80	80.60	73.55	77.65
通风结构	1	32.86	69.69	73.65	58.37	67.24
	2	32.04	65.74	68.54	62.03	65.44
	3	33.5	61.67	70.19	60.10	63.99
	均值	32.8	65.70	70.79	60.17	65.55
紧密结构	1	12.89	61.27	66.34	47.50	58.37
	2	11.26	61.23	61.53	59.45	60.74
	3	11.6	56.53	62.66	46.89	55.36
	均值	11.92	59.68	63.51	51.28	58.16

2.2.3 条田林带削减风速效率 疏透结构林带在纵断面上通风空隙面积较为均匀, 害风经过此林带时, 气流分成两股, 一股气流从林墙中穿过, 基本保持原有的方向, 另一股气流从林上绕过, 静风区在背风缘产生, 随着距离林带的增加, 风速削减率逐渐下降。疏透结构林带在 3 个垂直高度处(0.5, 1.5, 2 m), 背风面水平距离 20 m 内风速削减效率均在 80% 以上, 背风面 20—75 m 风速削减效率逐渐降低。0.5 m 和 1.5 m 高处风速削减率也同时下降, 但是下降幅度不是很大, 林后形成较宽的弱风区域。

通风型林带的林冠层和林干层的通风空隙较大, 在害风经过林带时表现为 3 种形式, 越过林带, 穿过

冠层, 由林干层穿行而过。通风结构林带背风面 10—20 m 范围内, 处置高度 0.5 m 和 1.5 m 高度处平均防风效率达 80.83%, 形成弱风区。离通风林带水平距离 50—150 m 范围内防风效率逐渐降低至 41%。通风林带背风面 2 m 高度处防风效率明显低于 0.5 m 和 1.5 m 高度。紧密型林带由于枝叶从上到下都很茂密、搭配紧凑, 纵断面几乎没有透光空隙, 林带遭遇大风时, 气流大部分主要从林带上方越过, 林带背风缘有负压, 形成一个静风区或弱风区。风速削弱比较强烈, 在 1 H, 12 m 处达到峰值, 虽然紧密结构林带在 1 H, 12 m 处防风效果达到 79.00%, 但其风速恢复较快, 在林带背风缘 15 H, 180 m 处出现高风区。7 H, 84 m 处风速为对照风速的 55%, 风速波动较大且防护距离较短。当气流通过林带时, 一部分气流受到林带影响从林带上方经过, 与林下穿过的气流相遇形成涡流, 林带背后出现静风区, 最后风速逐渐恢复, 直到接近旷野风速, 甚至比旷野风速还要大。

2.3 林带固沙效率分析

防护林可阻碍近地表气流的作用, 降低风蚀, 同时使起沙风速增加从而降低了输沙量, 起到了固沙作用。疏透结构林带 1—7 H, 5—35 m 处固沙效率最好, 为 74.96%, 到 15 H, 75 m 处固沙效率降低, 此处表现土壤风蚀, 沙量比空旷沙地(CK)高出 7.9%; 通风结构林带 5 H(50 m), 7 H(70 m)处固沙效果高于 1 H(10 m), 3 H(30)处固沙效率, 15 H(150 m)处沙量比空旷沙地(CK)高出 13.06%; 紧密结构林带只有 1 H(12 m)处固沙效率最佳, 平均为 84.79%。3 种林带结构固沙效率中, 疏透结构林带固沙效率最佳, 通风结构次之, 紧密结构林带固沙效率最差, 其固沙效率排列顺序为: 58.39% > 57.99% > 36.29% (表 3)。

新疆杨防护林背风面不同水平距离与固沙效率密切相关。由线性相关分析可见, 林带固沙效率与水平距离呈显著负相关, 决定系数 R^2 分别为 0.92, 0.558, 0.83, 林带固沙效率从大到小排序为: 疏透结构 > 紧密结构 > 通风结构, 固沙效率随着水平距离的增加而减少。疏透结构林带背面有效防护距离从 1 H(5 m)到 7 H(35 m), 过 7 H(35 m)之后风速加快, 开始发生风蚀事件; 通风结构林带 1—3 H(10—30 m)处固沙效率不是很明显高, 但是 5—7 H(50—70 m)处固沙效率表现为最佳; 紧密结构林带 1 H(12 m)处固沙效率最好, 其余位置固沙效率随距离的变化而迅速降低。研究结果可知疏透结构林带有效防护距离最长, 紧密结构林带背风面风速恢复较快, 固沙距离最短, 林后作物受风沙危害的可能性较大。

表3 塔克拉玛干沙漠绿洲南缘不同结构林带固沙效率变化
Table 3 Changes in sand fixation effects of forest belts with different structures in study area on edge of Taklamakan desert oasis

类型	编号	疏透度/%	固沙效率/%					均值
			1 H	3 H	5 H	7 H	15 H	
疏透结构	1	17.07	87.25	88.16	83.70	76.36	15.62	70.22
	2	18.53	88.87	88.16	79.69	71.57	-18.23	62.01
	3	17.87	61.85	62.16	60.66	51.16	-21.16	42.94
	均值	17.83	79.32	79.49	74.69	66.36	-7.92	58.39
通风结构	1	32.86	65.97	67.22	88.47	87.27	9.72	63.73
	2	32.04	50.80	54.16	88.33	87.30	-27.38	50.64
	3	33.5	73.90	71.02	88.64	85.92	-21.52	59.59
	均值	32.8	63.56	64.13	88.48	86.83	-13.06	57.99
紧密结构	1	12.89	87.65	44.65	38.95	23.12	1.63	39.20
	2	11.26	83.34	54.54	45.36	17.79	7.59	41.73
	3	11.6	83.38	58.48	39.22	-10.68	-30.63	27.95
	均值	11.92	84.79	52.56	41.18	10.08	-7.13	36.29

3 讨论

防风固沙效应是防护林最基本的效应,防护林具有能够影响气流流动、改变气流流向、消耗气流动能、降低其流速、改变气流流动过程、影响区域小气候等特点,是林带防风的作用原理^[13,18]。气流运动分为水平运动和垂直运动,水平运动通常指大气的流动,如由高压向低压流动,风速的大小决定于气压梯度力。垂直运动一方面是动力涡动,就是风遇到障碍物时风速、风向上的差异形成的交流,另一方面是热力涡动,也就是温差大而形成的热量交换,高空干冷气流下沉、地表湿热气流上升^[18]。

水平方向降风方面,本研究所涉及的防护林均可以降低风速,这与国内学者的结论相同^[19-21]。不同结构新疆杨防护林背风面水平距离降风效益有一定的差异,紧密结构林带在1 H(12 m)处风速最低,1 H(12 m)后风速逐渐增大,15 H(180 m)处接近旷野风速,这与范志平等^[22]、向开馥^[23]、高海楼等^[24]研究结论一致。3种林带结构背风面均形成风速较弱的区域,疏透结构背风面弱风区在5—15 m范围,通风结构10—50 m范围内,紧密结构背风面弱风区在12—36 m范围。根据以上结论可总结出,叶城县恰其库各种疏透度防护林内条田里离防护林10—15 m范围是防风效果最佳区域,可种植防风能力较差农作物。垂直方向降风方面,3种防护林总体来说垂直高度降风效果如下:1.5 m>0.5 m>2 m,防护林1.5 m高处防风效能最佳,2 m处防风效能最低,本研究杜鹤强等^[25]、李鹏等^[26]得出的垂直方向防风效能的规律一致。本研究区条田内,种植生长期总株高小于

1.5 m以下的农作物,可有效避免风害导致的损失。

降低沙害的方面,疏透结构林带固沙效率明显高于通风结构与紧密结构,研究结果与王雄、李荔、马士龙研究结果一致,林带结构(疏透度)的好坏直接影响其防风效果,而各林分因子共同影响着林带疏透度^[27-28]。研究确定出了主要控制林带疏透度的林分结构因子,林带越高其防风效果越好,其主要原因是疏透结构林带上下稀疏,空隙分布均匀,致使气流被枝叶、树干等部分分割、阻挡、摩擦,风速降低显著,而通风结构林带因下部有通风空隙,使气流较畅通,动能消耗少,风速降低不明显,因此为了更好地改善区域小气候,发挥防护林的防风固沙作用,林带疏透度应控制在灌乔木混交疏透结构为宜,可以使其达到较好的防风效果。要发挥防护林的固沙作用,林带疏透度应控制在疏透结构为宜,可以使其达到较好的防风效果。疏透结构防护林周围的条田内可种植抗沙能力较弱农作物。

4 结论

(1) 3种结构防护林背风面均形成风速较弱的区域,疏透结构林带背风面弱风区在5—15 m范围,通风结构10—50 m范围内,紧密结构背风面弱风区在12—36 m范围。根据以上结论可总结出,叶城县恰其库各种疏透度防护林内条田里离防护林10—15 m范围是防风效果最佳区域,可种植防风能力较差农作物。

(2) 3种结构防护林总体来说垂直高度降风效果如下:1.5 m>0.5 m>2 m,防护林1.5 m高处防风效能最佳,2 m处防风效能最低,本研究区条田内,种植

生长期总株高小于 1.5 m 以下的农作物,可有效避免风害导致的损失。

(3) 疏透结构林带固沙效率明显高于通风结构与紧密结构,要发挥防护林的固沙作用,林带疏透度应控制在疏透结构为宜,可以使其达到较好的防风效果。疏透结构防护林周围的条田内可种植抗沙能力较弱农作物。

(4) 疏透结构林带固沙效率最佳,通风结构次之,紧密结构林带固沙效率最差,其固沙效率排列顺序为:58.39% > 57.99% > 36.29%。

[参 考 文 献]

- [1] 王向辉.西北地区环境变迁与农业可持续发展研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [2] 郑波.南疆基于果树为防护目标的农田防护林结构及林网优化[D].新疆 石河子:石河子大学,2017.
- [3] 胡跃高,保母武彦.认识荒漠化:内蒙古、宁夏、新疆荒漠化实况[M].北京:中国人民大学出版社,2014.
- [4] 吴晓光.内蒙古阴山北麓生态退耕对土壤风蚀的影响及效应研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [5] 郝好鑫.侵蚀环境下根系功能性状对土壤保持的影响及机制[D].湖北 武汉:华中农业大学,2020.
- [6] 王晓东.高速公路沿线土壤侵蚀规律及其防治措施研究:以宁夏银武高速公路同心至固原段为例[D].北京:北京林业大学,2007.
- [7] 郭茵,雷加强,范敬龙,等.近 20 a 蒙古国土壤风蚀变化特征及主要影响因素分析[J].干旱区研究,2022,39(4):1200-1211.
- [8] 徐黎丽.论西北少数民族地区生态环境与民族关系问题[J].西北民族研究,2004(4):115-126.
- [9] 马奔腾,程建军,雷加强,等.南疆塔中-38 团沙漠公路沿线风沙输移规律与防沙体系研究[J].干旱区研究,2022,39(5):1663-1672.
- [10] 王凯.城市绿色开放空间风环境设计和风造景策略研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [11] 吴依衍,马彬,姜艳.典型荒漠农田防护林对棉田土壤水盐动态的影响[J].新疆农业科学,2021,58(6):1012-1020.
- [12] 冯亚亚.荒漠盐湖区防护林体系土壤水盐分布及其对植物群落的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [13] 解云虎.荒漠-绿洲过渡带防护体系构建及其防风阻沙效益研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [14] 侯凯.沿海地区刺槐防护林风速流场及数值模拟研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [15] 高海艳,王亚昇.陕北风沙区铁路防风固沙林效益研究[J].陕西林业科技,2014(5):41-44.
- [16] 侯凯.沿海地区刺槐防护林风速流场及数值模拟研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [17] 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.
- [18] 刘红年,徐玉貌,张宁,等.大气科学概论[M].南京:南京大学出版社,2019.
- [19] 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.
- [20] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J].土壤通报,2005,36(5):748-752.
- [21] 买尔旦·阿不都卡德,阿丽亚·拜都热拉,孙桂丽,等.塔克拉玛干沙漠西南缘城郊防护林防护效益:以叶城县为例[J].东北林业大学学报,2022,50(10):55-60.
- [22] 范志平,曾德慧,刘大勇,等.单条林带防护作用区风速分布特征[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1):138-141.
- [23] 向开馥.东北西部内蒙古东部防护林研究(第一集)[M].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学出版社,1989.
- [24] 高海楼.河北坝上农田防护林防风效能及其空间分布研究:以康保县为例[D].河北 石家庄:河北师范大学,2012.
- [25] 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.
- [26] 李鹏,高永,赵青,等.乌兰布和沙漠东缘人工梭梭林防风效能分析[J].水土保持通报,2017,37(5):34-39.
- [27] 王雄.阿拉尔垦区农田防护林结构特征及其防护效益研究[D].新疆 阿拉尔:塔里木大学,2020.
- [28] 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.