

行带式柠条固沙林防风效果

杨文斌^{1,2}, 丁国栋³, 王晶莹², 姚建成², 董 智⁴, 杨红艳⁴

(1. 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室/中国防治荒漠化研究与发展中心, 北京 100091;

2. 内蒙古林业科学研究院, 呼和浩特 010010; 3. 北京林业大学, 北京 100001; 4. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 010010)

摘要:传统观点研究认为:植被覆盖度低于 40%, 沙地处于半固定半流动状态。但在实践观察中发现:在低密度(或覆盖度)时, 灌丛的水平分布格局对固定流沙和阻止风沙流的作用差异显著。以低覆盖度(20%~25%)的柠条固沙林为研究对象, 采用多点式自记风速仪(CB-228), 在 2~4 月份的盛风季节, 测定了行带式配置和随机分布的柠条固沙林以及完整的行带式配置和其中一带出现缺口的行带式固沙林内不同部位、不同高度的风速。统计分析风速测定结果发现:(1)当覆盖度在 20%~25%时, 行带式配置的柠条固沙林内的防风效果比同覆盖度随机分布的在 20cm 高处高 48.4%;50cm 高处高 30.7%;200cm 高处高 27.4%, 且风速越大, 行带式配置降低风速的效果越显著, 当 200cm 高风速达到 6~7m/s 时, 行带式的平均防风效果比同覆盖度随机分布的高 48.2%;反映出在低覆盖度时, 灌丛的水平分布格局成为制约固沙林防风效果的重要因素, 行带式配置具有显著的防风效果;(2)在灌丛与灌丛之间形成的类似“狭管”流场的局部, 有提升风速的作用, 导致其林内观测的风速有约 41.3%的观测结果超过旷野对照风速, 行带式配置的柠条固沙林内没有一个观测结果超过对照风速;这个结果反映出随机分布的柠条固沙林内流场结构复杂、变化多样, 也成为低覆盖度时, 沙地处于半固定、半流动状态, 疏林内同时存在风蚀和积沙和缺口处风速升高的重要因素;(3)行带式配置林内地表粗糙度比随机配置的高 5.4~114.4 倍, 说明行带式配置具有显著的防止风蚀、固定流沙的作用;(4)行带式林内出现断带缺口处, 其缺口处的风速降低有明显的累加现象;风速抬升现象在一定程度受到制约。这些结果为发展低覆盖度行带式配置的固沙林提供重要的科学依据。

关键词:柠条固沙林;低覆盖度;行带式配置;防风效果

文章编号:1000-0933(2006)12-4106-07 中图分类号:S157.1 文献标识码:A

Windbreak effects of belt scheme *Caragana korshinskii* kom plantation for sand fixation

YANG Wen-Bin^{1,2}, DING Guo-Dong³, WANG Jing-Ying², YAO Jian-Cheng², DONG Zhi⁴, YANG Hong-Yan⁴ (1. Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory for Forest Tree Breeding of the State Forestry Administration of China, and The National Research and Development Center for Combating Desertification of China, Beijing 100009, China; 2. Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Huhhot 010010, China; 3. Beijing Forestry University, Beijing 100001, China; 4. Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010010, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4106~4112.

Abstract: Conventional research thinks that when vegetation cover is less than 40%, sandland would be in a state of semi-mobile or semi-fixed. However, in practice it has been found that at low vegetation coverage, the horizontal distribution pattern of shrubs can have marked effects on fixation of shifting sands. In this study we investigated the windbreak effects of a *Caragana korshinskii* kom plantation with 20%~25% cover established for the purpose of sand-fixation. Wind velocity was measured at different

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30360089, 30471422);国家重点基础研究资助项目(G2000048705, 2005BA517A04)

收稿日期:2005-09-16; **修订日期:**2006-05-23

作者简介:杨文斌(1959~), 男, 内蒙古毕克齐人, 博士, 研究员, 主要从事生态学与沙漠化防治研究。E-mail: nmlkyywb @163.com

致谢:该文得到中国林科院卢琦研究员, 吴波研究员, 内蒙古农业大学胡春元教授的指导, 在此一并致谢!

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30360089 and 30471422) and the National Key Basic Research Project (No. G2000048705, 2005BA517A04)

Received date: 2005-09-16; **Accepted date:** 2006-05-23

Biography: YANG Wen-Bin, Ph. D., Professor, mainly engaged in ecology and prevention of desertification. E-mail: nmlkyywb @163.com

Acknowledgements: We thank Professors Lu Qi and Wu Bo of Chinese Academy of Forestry, and Professor Hu Chun Yuan of Inner Mongolia Agricultural University, for their helpful comments on an early draft of this manuscript

locations and heights on sites of the intact or gapped belt scheme plantation and randomly distributed plantation by using multiple sensor automatic anemoscope (GB-228) during windy season (February to April). Statistical analysis indicated that when cover was at 20 %—25 %, the belt scheme *C. korshinskili* plantation was 48.4 %, 30.7 %, and 27.4 % more effective for wind breaking than the randomly distributed plantation at 20 cm, 50 cm, and 200 cm above the ground surface. The effectiveness of wind breaking increased with wind velocity in the belt scheme. When the wind velocity at 200 cm reached 6—7 m/s, the mean windbreak effect of the belt scheme was on average 48.2 % more than the randomly distributed plantation scheme at the same vegetation coverage. This shows that when vegetation cover is sparse, the horizontal distribution pattern of shrubs becomes an important factor for restricting windbreak effect, and that the belt scheme is the most effective plantation in the windbreak effect. The “narrow pipe” flow from gaps between shrubs can have an effect on increasing wind velocity, which results in 41.3 % of observations displaying wind velocity greater than that measured in the open. Within the belt scheme *C. korshinskili* plantation, none of the observations was greater than observations made in the open ground. The flow field structure of the randomly distributed *C. korshinskili* plantation was complex and changeable, and was an important factor for the occurrence of wind erosion and sand accumulation in the thin stands and increased wind velocity in the gaps of stands low in coverage in the semi-mobile or semi-fixed sand dunes. Soil surface roughness was found to be about 5.4—114.4 times greater in the belt scheme than in the randomly distributed plantation, indicating that the belt scheme had marked effect on preventing wind erosion and fixing drift sand. When there were gaps in the belt scheme plantation, the reduced wind velocity apparently displayed accumulation phenomena and increased wind velocity was limited to a certain extent in gaps. This study provided scientific basis for developing low cover and belt scheme shrub plantations for sand-fixation.

Key words: *Caragana korshinskili* kom; sand-fixing plantation; low cover; belt scheme; windbreak effect

柠条 (*Caragana korshinskili* kom) 是我国重要的固沙灌木造林种,被广泛用于干旱、半干旱区人工沙地植被的重建中。但是,出于尽快固定流沙的目的,1949 年以来人工营造的固沙林密度(或覆盖度)远大于相同气候立地条件下自然植被的密度(或覆盖度)^[1~3],虽然能尽快起到防风固沙的目的,但是因水分收支失衡,衰败死亡现象比较严重^[4~7],致使防护期缩短,生态、经济效益降低。传统研究认为:植被覆盖度低于 40 %,不能完全固定流沙和阻止风沙流的形成^[8~10],但是,近年研究发现:在低密度(或覆盖度)时,植物体的水平分布格局对固定流沙和阻止风沙流的作用差异很大^[11~13]。本文以覆盖度在 20 %~25 %的柠条灌木固沙林为对象,研究了行带式和随机两种水平配置结构以及行带式配置中完全无缺口的和第一带、第二带、第三带分别有 2.5~3.5 m 缺口的固沙林的防风效果,力求为营建低覆盖度的行带式灌木固沙林提供依据。

1 研究区自然概况

内蒙古和林格尔县位于 E 111°26'~112°18' 和 N 39°58'~40°41'。海拔 1020~1200 m,该区年平均气温 5.6℃,年平均降水量为 417.5 mm。年均蒸发量 1800~2500 mm。风季在 3~5 月份,年均风速 2.9 m/s,风速大于 17 m/s(大于或等于 8 级)一般 30~40 d。

内蒙古乌审旗位于 E 37°27.5'~39°22.5' N 和 107°20'~111°30' E。总海拔 1200~1350 m,该区年均气温 6.0~8.5℃,年平均降水量 421.2 mm。年均蒸发量 1800~2500 mm。风季在 3~5 月份,年均风速 3.3 m/s,风速大于 17 m/s(大于或等于 8 级)年大风扬沙日数 40~50 d。

2 研究方法

2.1 样地的选取

在两个研究区分别选择地势平坦开阔的柠条固沙林作为观测样地,尽量确保两块样地及对照(CK)条件相似。其中,位于和林格尔县行带式样地(BF)的柠条林配置株行距为 1 m×15 m,带的走向与主害风方向夹角在 80~90°间,平均株高 2.0~2.3 m;覆盖度在 23 %~24 %;下垫面为固定沙地,有少量草本植物(样地内已清除),位于乌审旗的随机分布样地(RF)的柠条林平均株高 1.9~2.2 m,覆盖度在 21 %~25 %,下垫面为半固定沙地,有少量草本植物(样地内已清除),对照为开阔平坦的草地,草高约 10~15 cm。

行带式样地在西北边缘(迎风方向)选择了 3 条完整的有代表性的柠条林带和第一、二和三行分别有缺口的行带作为观测对象,行带的组合为:第一带间宽 15m、第二带间宽 10m、第三带间宽 15m、第四带间宽 15m。

2.2 风速的测定

采用多点式自记风速仪(CB-228)分别测定了两种配置类型林内和对照在 200cm、50cm 或 20cm 高处的风速;同时测定了行带缺口处的风速。在行带式样地内,从林带边缘开始,每 2.5m 布一个测点;在随机分布样地内的观测点随机分布在林内的空地中,在 1600m² 的样地内,一次测定布设 20 个观测点,每 2 秒自动记录一个值。

采用下式计算风速防风效果^[16]:

$$E_{xz} = u_{xz} / u_{\alpha} \quad (1)$$

式中, E_{xz} 为防风效果即林内 x 处、高度为 z 处的风速占旷野对照风速的百分数, u_{α} 为同一高度旷野的平均风速, u_{xz} 为林内 x 处、高度为 z 处的平均风速。

采用下式计算固沙林内地表粗糙度(Z_0)^[14]:

$$\log Z_0 = (u_1 \log Z_2 - u_2 \log Z_1) / (u_1 - u_2) \quad (2)$$

观测时间为 2 月 20 日~4 月 30 日。

3 结果分析

3.1 行带式与随机分布的柠条固沙林的防风效果

测定结果表明:林内 3 个高度总平均风速,行带式配置的林内仅为对照的 55.5%;而随机分布的林内是对照的 90.6%,平均防风效果比同密度行带式配置的低 35.1%。

从林内不同高度的防风效果(表 1)来看:行带式柠条林以 20cm 高处降低风速最显著,比对照平均低 61.2%,防风效果比随机分布高 48.4%;50cm 高处次之,比对照平均低 42.7%,防风效果比随机分布的高 30.7%;200cm 高处比较低,比对照平均低 29.6%,防风效果比随机分布高 27.4%。随机分布的柠条林的防风效果同样以 20cm 高处平均降低风速最显著,比对照低 12.8%,且,与 50cm 高处(12%)和 200cm 高处(3.2%)降低风速的差异不大,而且还出现多次 50cm 高度处降低风速高于 20cm 高度处的现象;进而使得行带式柠条林在不同高度的防风效果均显著。

进一步分析发现:随着风速的增加,无论是行带式固沙林,还是随机分布的固沙林,降低风速的效果均随风速的增大而增加(见图 1)。而风速越大,行带式配置降低风速的效果越显著,其中,当对照 200cm 高度处风速在 3~4m/s 时,行带式固沙林降低风速的效果比随机分布的高 36.5%;4~5m/s 时,高 44.2%;5~6m/s 时,高 45.5%;6~7m/s 时,高 55.5%;图 1 中的曲线还反映出行带式柠条固沙林内风速流场相对稳定,而随机分布的柠条固沙林的变化复杂。

3.2 行带式与随机分布的柠条固沙林与对照风速的差异概率

在分析柠条固沙林内的风速测试资料时,出现了随机分布的柠条固沙林内的风速大于旷野对照风速的现象,因此,把林内风速与对照的百分比分成大于 100%,100%~50%和小于 50%3 个区间,统计不同风速区段在林内各观测点风速与对照风速的百分比分布在不同区间的概率,结果见表 2 中。

表 1 低覆盖度(20%~25%)不同配置的柠条固沙林的防风效果(%)

Table 1 Windbreak effect on different scheme Caragana korshinskii kom sand-fixation forest (cover is 20~25 percent)

风速(m/s) Wide speed	样地 Sample ground	高度 Height (cm)			平均 Mean
		200	50	20	
3~4	CK	100	100	100	100
	RF	103.3	99.7	97.8	100.3
	BF	82.6	67.7	44.3	64.9
4~5	CK	100	100	100	100
	RF	102.4	95	86.5	94.6
	BF	75.1	62.2	42.3	59.9
5~6	CK	100	100	100	100
	RF	94.6	88.3	83.5	88.8
	BF	69.3	57	38	54.8
6~7	CK	100	100	100	100
	RF	93.7	82.5	89.5	88.6
	BF	65.1	49.7	34.3	49.7
>7	CK	100	100	100	100
	RF	90.1	73.8	78.9	80.9
	BF	59.9	48.8	34.9	48.2

CK 对照 Control; RF 随机配置 Random; BF 行列式配置 Belt pattern

结果表明:同样在 20 % ~ 25 % 的低覆盖度时,行带式配置的柠条固沙林内的平均风速均比旷野对照风速低,没有一次观测结果超过旷野对照风速,因此,在 200cm、50cm 和 20cm 3 个高度,进入大于 100 %,100 % ~ 50 % 和小于 50 % 3 个区间的平均概率分别为 0、64.5 % 和 35.5 %;而随机分布的柠条固沙林进入大于 100 %,100 % ~ 50 % 和小于 50 % 3 个区间的平均概率分别为 41.3 %、54.6 % 和 4.1 %,这说明有约 41.3 % 的观测结果超过旷野对照风速,而能够降低 50 % 以上风速的概率比行带式配置低约 31.1 %,反映出随机分布的林分总体降低风速的效果显著下降。

对林内 3 个高处分别统计的结果来看:在 200cm 高度处,行带式配置的柠条林内风速降低的百分比稳定在

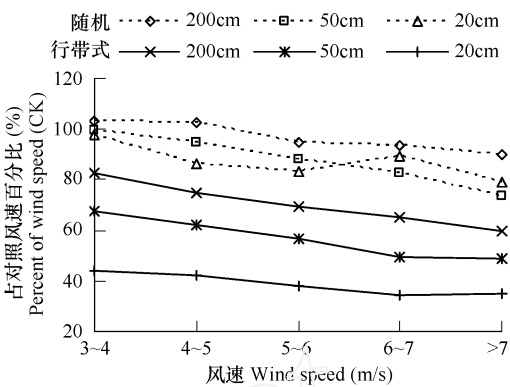


图 1 不同配置柠条固沙林风力结构的变化

Fig. 1 Changes of wind agency structure for different scheme Caragana korshinskii kom sand-fixation forest

表 2 不同配置柠条固沙林内风速与对照风速的差异概率(%)

Table 2 Differences probability of wind speed within different scheme Caragana korshinskii kom sand-fixation forest and control site						
风速 (m/s)	占对照的比率区间	配置	高度 Height (cm)			平均
Wind speed	Percent part of control site (%)	Scheme	200	50	20	Mean
3 ~ 4	> 100	BF	0	0	0	0
		RF	62.5	62.5	50	58.3
	100 ~ 50	BF	100	87.5	50	79.2
		RF	37.5	37.5	25	33.3
	< 50	BF	0	12.5	50	20.8
		RF	0	0	25	8.4
4 ~ 5	> 100	BF	0	0	0	0
		RF	87.5	62.5	62.5	70.8
	100 ~ 50	BF	100	75	37.5	70.8
		RF	12.5	37.5	37.5	29.2
	< 50	BF	0	25	62.5	29.2
		RF	0	0	0	0
5 ~ 6	> 100	BF	0	0	0	0
		RF	25	12.5	37.5	25
	100 ~ 50	BF	100	75	25	66.7
		RF	75	87.5	37.5	66.7
	< 50	BF	0	25	75	33.3
		RF	0	0	25	8.3
6 ~ 7	> 100	BF	0	0	0	0
		RF	37.5	25	62.5	41.4
	100 ~ 50	BF	100	50	25	58.3
		RF	62.5	75	25	54.5
	< 50	BF	0	50	75	41.7
		RF	0	0	12.5	4.1
> 7	> 100	BF	0	0	0	0
		RF	0	0	37.5	12.5
	100 ~ 50	BF	100	25	25	50
		RF	100	100	62.6	87.5
	< 50	BF	0	75	75	50
		RF	0	0	0	0
平均 Mean	> 100	BF	0	0	0	0
		RF	42.5	32.5	50	41.3
	100 ~ 50	BF	100	62.5	32.5	65
		RF	57.5	67.5	37.5	54.6
	< 50	BF	0	37.5	67.5	35
		RF	0	0	12.5	4.1

100 % ~ 50 % 之间,而随机分布的柠条固沙林内风速降低的百分比有约 42.5 % 观测结果超过旷野对照风速,有 57.5 % 在 100 % ~ 50 % 之间,两种配置的林分风速降低的百分比均没有低于 50 %;当高度降低到在 50cm 处时,两种配置的林分降低风速的效果均有增加,其中行带式配置的林分有 37.6 % 进入小于 50 % 区间,而随机分布的林分超过旷野对照风速的百分比(比 200cm 高度)降低了 10 %,仍没有一次降到小于 50 % 区间;而当高度降低到 20cm 处时,行带式配置的林分降低风速的效果显著增加,其中有 67.5 % 观测结果降到小于 50 % 区间,但是,随机分布的林分超过旷野对照风速百分比的概率增加到 50.1 %,同时,另有约 12.3 % 概率降到小于 50 % 区间,这反映出低覆盖度随机分布的疏林使林内风场复杂化,同时,降低了其的防风效果。

3.3 行带式与随机分布的柠条固沙林内地表粗糙度分析

计算的不同对照风速条件下,行带式与随机分布的柠条固沙林内地表粗糙度见表 3 中。

从表 3 可以看出:同样在 20 % ~ 25 % 的低覆盖度时,行带式配置的柠条固沙林内地表粗糙度高且稳定,平均在 8.01 ~ 14.82cm 变动,而随机分布的柠条固沙林内地表粗糙度低且变动范围大,平均在 0.07 ~ 2.74cm 变动,比行带式配置低 5.4 ~ 114.4 倍,其地表粗糙度低的部位接近流沙地的值。这是低覆盖度随机分布的疏林内出现局部风蚀,处于半固定—半流动状态的原因。

进一步分析发现:随着风速的增大,两种样地内地表粗糙度有微小降低,但不明显。

3.4 行带式内出现缺口对防风效果的影响

行带式配置的柠条固沙林没有出现缺口时和分别在第一带、第二带和第三带出现缺口时防风效果的变化见图 2 中。

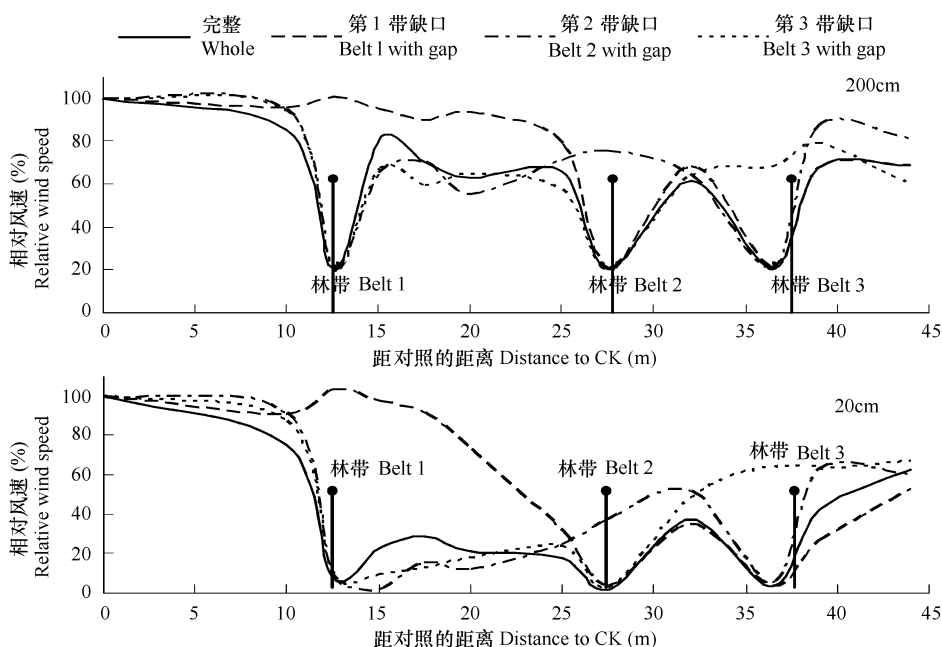


图 2 完整和出现缺口的行带式柠条固沙林的防风效果

Fig. 2 The windbreak effect on whole and gapped *Caragana korshinskii* kom sand-fixation forests

分析图 2 发现:如果每一行带均完整,在 200cm 高度,风速从旷野穿过第一带后,大约在 1H 处稍有升高,为对照的 81.2 %,其后缓慢降低,穿过第二带和第三带虽有波动,基本维持在对照的 70 % 以下,连续行带组合

基本上没有累计增加防风效果。在 20cm 高度,在第一带与第二带间风速平稳且降低显著,维持在对照的 30 %以下,而在第二带与第三带间和第三带与第四带间出现了风速的抬升现象,其中在第三带与第四带间的中央(约第三带后 3H 处)处抬升最高,约为对照的 62.6 %。

图 2 中同时给出了第一带、第二带和第三带分别出现 2.5 ~ 3.5m 缺口时行带式柠条固沙林内风速的变化状况;分析发现:无论是在 200cm 或 20cm 高度,迎风面第一带出现缺口,缺口处的风速会显著增高,且超过旷野对照风速(200cm 高度为对照风速的 100.6 %,20cm 高度为对照风速的 103 %);而分别在第二带或第三带出现缺口后,缺口处的风速分别为对照风速的 75 % (200cm) 和 37.1 % (20cm) 或 68.3 % (200cm) 和 65.3 % (20cm),虽有抬升,但不显著,说明连续的行带组合在中间出现缺口处具有累计增加防风效果的作用。

4 结论与讨论

(1) 在干旱、半干旱地区沙地,覆盖度在 10 % ~ 40 % 的乔灌木固沙林才能符合水量平衡^[4,5],但在 2 ~ 4 月份的风季,植物处于冬态,且在 10 % ~ 40 % 的覆盖度时防风效果差,处于半固定-半流动状态;而在低覆盖度时,人为改变灌丛的水平分布格局后(改变随机分布为规则分布,同时减小株距,拉大行距,形成行带式配置)形成行带式配置后,不但能提高水分利用率和生产力^[13],而且从上述的分析充分肯定,行带式配置的柠条固沙林的防风效果显著大于随机分布的柠条固沙林。可见,在低覆盖度时,灌丛水平分布格局成为影响防风效果的重要因素,行带式配置能显著提高低覆盖度固沙林的防风效果。

(2) 当覆盖度在 20 % ~ 25 % 时,随机分布的稀疏固沙林内的风速从大于对照风速(41.3 %)到小于对照的 50 % (4.1 %) 均有分布,地表粗糙度从 0.07cm 到 2.7 cm,变化幅度均超过行带式配置的柠条固沙林内和旷野对照样地,说明随机分布的固沙林对风速的阻碍和改变作用相对较差,在灌丛风影区则可显著降低风速,而在灌丛与灌丛之间形成的类似“狭管”流场的局部,有提升风速的作用,致使其流场结构复杂、变化多样,也成为低覆盖度时,沙地处于半固定、半流动状态,疏林内同时存在风蚀和积沙的重要因素^[15]。

(3) 行带式配置林内地表粗糙度比随机配置的高 5.4 ~ 114.4 倍,说明行带式配置具有显著的防止风蚀、固定流沙的作用。

(4) 行带式配置的柠条固沙林中,连续三带的完整行带组合未发现防风效果的累加现象^[16],而从迎风一侧开始,第二带、第三带分别出现 2.5 ~ 3.5m 的缺口后,其缺口处的风速降低有明显的累加现象;第三带与第四带之间中央出现风速抬升的现象,其原因有待于进一步研究。

References :

- [1] Wu Z Y. Chinese Vegetation. Beijing: Science Press, 1980. 956 ~ 979.
- [2] Gao S W. Control Desertification and Silvics. Beijing: Chinese Forestry Press, 1984. 34 ~ 46.
- [3] Qiu M X. Vegetation in Chinese middle desert. Lanzhou: Gansu Civilization Press, 2000. 20 ~ 62.
- [4] Liu J Q, et al. Study of contabescence cause of man-made haloxylon. ammodendron sand-fixation forest. Chinese Desert, 1982, 2(2): 13 ~ 19.
- [5] Han D R, Yang W B, Yang M R, et al. The water dynamic relation and application of shrub or arbor in arid and semiarid sandy land. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1996. 19 ~ 26.
- [6] Lan D M, et al. "Small Old Tree" poplar and alteration mode in demonstrating area, Chifeng. Forestry Science and Technology, Inner Mongolia, 1998, (supplement): 25 ~ 30.
- [7] Yang R Z, et al. The elementary study of low productivity forest in China. Chinese Forestry, 1996, (3): P27 ~ 28.
- [8] Zhao X L. Study of plant sand-fixation problem in Shapotou. Study of control quicksand. Yinchuan: People Press of Ningxia, 1991. 47 ~ 55.
- [9] Zhu Z D, Liu S. Desertification process and harnessing in north, China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1981. 3 ~ 7.
- [10] Zhu Z D, Chen G T. Chinese Soil Desertification. Beijing: Science Press, 1994. 14 ~ 67.
- [11] Yang W B, et al. The preponderance and benefit analysis of "two-row-and-one-belt" poplar high productivity forest. Forestry Science and Technology, Inner Mongolia, 1997, (3): 5 ~ 9.
- [12] Yang W B, Ren J P. Control desertification mode of agriculture, forestry and stock compound rotating. Chinese Desert, 1998, 18(supplement 1): 113 ~ 115.
- [13] Yang W B, Wang J Y. The study of features of using water and optimizing scheme structure for man-made forest in arid and semiarid. Forestry Science,

2004, 40(5):3~9.

- [14] Zhu Z Y, Ding G D, Yang M Y. Sand and Wind Physics. Beijing:Chinese Forestry Press, 1991.
- [15] Yang W B, Zhao A G, Wang J Y, *et al.* The study of windbreak and sand-fixing effect about low cover level scheme structure *Artemisia halodendron* shrub. Chinese Desert, 2006, 26(1):108~112.
- [16] Zhu T Y, Guan D X, Zhou G S, *et al.* Ecology and Engineering of Farmland Protecting Forest. Beijing:Chinese Forestry Press, 2001.

参考文献:

- [1] 吴征镒. 中国植被. 北京:科学出版社,1980. 956~979.
- [2] 高尚武主编. 治沙造林学. 北京:中国林业出版社,1984. 34~46.
- [3] 丘明新. 我国沙漠中部地区植被. 兰州:甘肃文化出版社,2000. 20~62.
- [4] 刘家琼,等. 人工梭梭固沙林衰亡原因探讨. 中国沙漠,1982,2(2):13~19.
- [5] 韩德儒,杨文斌,杨茂仁,等. 干旱半干旱区沙地灌(乔)木种水分动态关系及其应用. 北京:中国科学技术出版社,1996. 19~26.
- [6] 兰登明,等. 赤峰示范区杨树“小老树”及其改造模式. 内蒙古林业科技,1998 增刊,25~30.
- [7] 杨瑞珍,等. 我国低产林的初步研究. 中国林业,1996,(3):27~29.
- [8] 赵兴梁. 沙坡头地区植物固沙问题的探讨. 流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社,1991. 47~55.
- [9] 朱震达,刘恕. 中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划. 北京:中国林业出版社,1981. 3~7.
- [10] 朱震达,陈广庭. 中国土地沙质荒漠化. 北京:科学出版社,1994. 14~67.
- [11] 杨文斌等. “两行一带式”杨树丰产林的优势及效益分析. 内蒙古林业科技,1997,(3):5~9.
- [12] 杨文斌,任居平. 农牧林复合轮作治沙模式和效益分析. 中国沙漠,1998. 18(增刊 1):113~115.
- [13] 杨文斌,王晶莹. 干旱半干旱区人工林水分利用特征与优化配置结构研究. 林业科学,2004,40(5):3~9.
- [14] 朱朝云,丁国栋,杨明远. 风沙物理学. 北京:中国林业出版社,1991.
- [15] 杨文斌,赵爱国,王晶莹,等. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究. 中国沙漠,2006,26(1):108~112.
- [16] 朱廷曜,关德新,周广胜,等. 农田防护林生态工程学. 北京:中国林业出版社,2001.