

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.006.

郭欣宇, 杨光, 陆乃静, 等. 造林密度对科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨防护林林下植被的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1):199-206.

Guo Xinyu, Yang Guang, Lu Naijing, et al. Influence of *Populus Simonii* Planted Forest Density on Understory in Naiman Banner of the Horqin Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):199-206.

# 造林密度对科尔沁沙地奈曼沙区 小叶杨防护林林下植被的影响

郭欣宇<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 陆乃静<sup>1</sup>, 李庆原<sup>2</sup>, 秦忠<sup>2</sup>, 宁岩岩<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水文水资源中心呼和浩特水文水资源分中心, 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古自治区通辽市奈曼旗新镇国有机械林场, 内蒙古 通辽 028312)

**摘要:** [目的] 探明科尔沁沙地南缘的奈曼旗沙区小叶杨(*Populus simonii*)防护林造林密度对林下植被的影响, 提出适宜植被群落多样性恢复与稳定性发展的造林密度。[方法] 以自然恢复状态下, 林龄相近的3种典型造林密度类型(867~1 022株/hm<sup>2</sup>, 1 444~1 667株/hm<sup>2</sup>, 2 177~2 322株/hm<sup>2</sup>)的小叶杨防护林为研究对象, 开展每木检尺、物种组成与多样性、植被群落结构等调查, 对野外采集数据进行统计分析。[结果] 造林可以显著提高植被恢复与演替速度, 造林密度的大小对林下植被多样性与群落稳定有显著影响, 随着造林密度的减小, 林下草本生物量、物种组成丰富度、物种多样性指数增大, 植物恢复程度、群落稳定性上升; 造林密度与林下物种多样性指数、物种数量、林下植被盖度、林下草本生物量等植被特征指标均呈现极显著负相关关系( $p < 0.01$ )。[结论] 当小叶杨防护林造林密度为867~1 022株/hm<sup>2</sup>时, 群落与未经开垦的草地样地的群落相似性最高, 植被群落演替逐渐向地带性植被发展, 与其他造林密度相比更有利于研究区物种多样性与群落恢复发展。

**关键词:** 科尔沁沙地; 造林密度; 人工防护林; 林下植被; 物种多样性

中图分类号: S775, Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0199-08

## Influence of *Populus Simonii* Planted Forest Density on Understory in Naiman Banner of the Horqin Sandy Land

Guo Xinyu<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Lu Naijing<sup>1</sup>, Li Qingyuan<sup>2</sup>, Qin Zhong<sup>2</sup>, Ning Yanyan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State

Forestry and Grassland Administration, College of Desert Science and Engineering, Inner

Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Hydrology and Water

Resources Center Hohhot Hydrology and Water Resources Sub-Center, Hohhot 010010, China; 3. Inner Mongolia

Tongliao City Naiman Banner State Owned Machinery Forest Farm, Tongliao, Inner Mongolia 028312, China)

**Abstract:** [Objective] In order to explore the influence of afforestation density of *Populus simonii* shelterforest in the Naiman Banner Sand area of the southern margin of the Horqin Sandy Land on the vegetation under the forest, the afforestation density suitable for the restoration and stable development of vegetation community diversity was proposed. [Methods] The shelter forest of *Populus poplar* with similar forest age (867~1 022 plants/hm<sup>2</sup>, 1 444~1 667 plants/hm<sup>2</sup>, 2 177~2 322 plants/hm<sup>2</sup>) was taken as the research objects. The survey of each wood ruler, species composition and diversity, vegetation community structure was carried out, and the collected data in the field were statistically analyzed. [Results] Afforestation can signifi-

收稿日期: 2022-10-27

修回日期: 2022-12-04

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题“沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范”(2019ZD003-2)

第一作者: 郭欣宇(1996—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 在读硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: gxy96913@126.com

通信作者: 杨光(1974—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 教授, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: yg331@126.com

http://stbcj.paperonice.org

cantly improve the rate of vegetation recovery and succession. The size of afforestation density has a significant impact on understory vegetation diversity and community stability. With the decrease of afforestation density, understory herbaceous biomass, species composition richness, species diversity index increase, plant recovery degree and community stability increase. There is a significant negative correlation between afforestation density and vegetation characteristics such as species diversity index, species number, understory vegetation cover, and understory herbaceous biomass ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] The plantation with density of 867~1 022 plants/hm<sup>2</sup> has the highest community similarity with the uncultivated grassland site. The vegetation community gradually succeeds towards zonal climax vegetation.

**Keywords:** Horqin Sandy Land; afforestation density; plantation protection forest; understory vegetation; species diversity

小叶杨(*Populus simonii*)是我国三北地区防风固沙、水土保持、人工造林的常用树种<sup>[1]</sup>,为有效改善科尔沁沙地的土地荒漠化与水土流失问题,从20世纪70年代开始,杨树大面积应用于科尔沁沙地的人工防护林建设中<sup>[2-3]</sup>,在内蒙古通辽市范围内营造的杨树人工林在全国人工林建设中具有重要地位,其面积达到全国杨树人工林面积的十分之一,然而,由于造林过程中没有做到因地制宜、适地适树,不合理的造林密度使科尔沁沙地的杨树防护林形成了诸多生长状况差、林下植被结构单一的“小老树林”,严重影响了当地杨树防护林的生态恢复与可持续发展<sup>[4]</sup>。

在立地条件、造林时间、造林密度等影响林木生长的重要因素中,造林密度的可调控程度最高<sup>[5]</sup>。林分密度的大小影响着阳光、降雨等林下生态资源的分配,进而影响林下幼苗的生长发育,导致林下植被群落恢复呈现明显差异<sup>[6]</sup>。林下植物多样性能够表征森林生态群落功能的稳定性和复杂性,是各物种对林内环境的竞争协调、动态适应的体现<sup>[7-8]</sup>。目前,诸多学者研究结果均表明林分密度的改变对林下植被恢复有显著影响,适宜的造林密度可以有效提高林下植被多样性,改善群落稳定性<sup>[9-12]</sup>,人工造林是自然条件恶劣的干旱、半干旱地区恢复生态环境的重要途径之一,但对于干旱、半干旱地区造林密度与林下植被恢复关系的研究并不多见,因此,本文以科尔沁沙地南缘的通辽市奈曼旗沙区为研究区,选取当地具有代表性的小叶杨防护林造林密度,对不同造林密度林下植被群落变化进行研究,提出适宜研究区林下植被群落恢复与发展的造林密度结构,对科尔沁沙地奈曼沙区防护林的经营管理具有重要的理论和实践意义。

## 1 研究区概况

本文试验的研究区位于科尔沁沙地南缘的内蒙古通辽市奈曼旗(120°19′40″—121°35′40″E, 42°14′40″—43°32′20″N),其气候类型属北温带大陆性季风干旱气

候,春季风向以西南风为主,夏季多为东南风,其年平均风速为3.6~4.1 m/s,年平均气温6.0~6.5℃,平均降水量366 mm<sup>[2-3]</sup>;地形特征在总体上呈现西南高,东北低,其南部低山丘陵黄土区主要是由第四纪残积物、坡洪冲积物以及风积物组成,中部沙区和北部冲积平原区主要是由冲积物、风积物和湖积物组成;研究区土壤类型主要包括非地带性的风沙土和地带性的栗钙土等,由于气候干旱,土地沙漠化严重,风沙土为分布面积最大的土壤类型<sup>[13]</sup>;主要的植被类型包括:小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、黄柳(*Salix gordejewii*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodeudron*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等<sup>[14-15]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查

于2021年7—8月在科尔沁沙地南缘的内蒙古通辽市奈曼旗开展野外调查,试验以造林立地条件相同、林龄相近、造林密度不同的小叶杨防护林为研究对象;选取研究区造林应用最广泛的典型造林密度类型3个,各密度类型设置样地3块,选择研究区地带性植被草地与造林区附近未开垦、未造林旷野各1个作为对照样地,所有防护林样地林下均为自然恢复状态,研究区样地基本信息见表1;在各密度类型造林区内设置30 m×30 m的样地,通过每木检尺的方法调查样地乔木的树高、胸径、郁闭度等;样地内设置1 m×1 m的林下草本样方各5个,记录样方内植物种类、高度、盖度、频度等,尽量保证样方能够覆盖样地所有植物种,林下植被生物量采用样方收获法测定,即将1 m×1 m的草本样方内全部植被的地上及地下部分挖出,带回实验室称量地上及地下部分鲜重,烘干至恒重后测定其干重以推算其生物量,每个样地重复取样5次。

表 1 研究区样地基本信息

Table 1 Basic information on sample sites in the study area

样地 编号	密度 类型	造林密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均 树高/m	平均 胸径/cm	林龄/a	郁闭度/%	植被 覆盖度/%
小叶杨 1	I	867	13.65±0.85	20.2±1.39	20	0.68	36.2±2.53
小叶杨 2		944			22	0.71	
小叶杨 3		1022			24	0.67	
小叶杨 4		1444			23	0.78	
小叶杨 5	II	1555	10.22±0.58	16.35±1.22	22	0.75	28.8±1.42
小叶杨 6		1667			23	0.72	
小叶杨 7		2177			23	0.85	
小叶杨 8	III	2222	9.63±0.8	12.85±0.87	23	0.86	24.7±4.28
小叶杨 9		2322			24	0.89	
草地对照	—	—	—	—	—	—	66.47±3.34
旷野对照	—	—	—	—	—	—	19.8±1.68

注:数据为平均值±标准差,下同。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 重要值计算 通过对不同密度小叶杨防护林林下植被的调查结果,计算其相对高度、相对多度、相对频度等,通过重要值分析防护林林下植被优势度,表征发育过程中种群在防护林中的分布格局和功能地位<sup>[16]</sup>。

重要值(IV):

$$IV = (RHI + RDE + RFE) / 3 \tag{1}$$

式中:RHI 为相对高度;RDE 为相对密度;RFE 为相对频度。

2.2.2 多样性指数计算 根据前人对物种多样性的研究成果<sup>[17-20]</sup>,选用 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数来研究不同密度小叶杨防护林的群落物种多样性变化。

Simpson 多样性指数(D):

$$D = 1 - \sum_{j=1}^S P_j^2 \tag{2}$$

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H):

$$H = - \sum_{j=1}^S P_j \ln(P_j) \tag{3}$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$J = H / \ln(S) \tag{4}$$

Margalef 丰富度指数(d):

$$d = (S - 1) \ln(N) \tag{5}$$

式中:N 为样方内的总个体数;P<sub>j</sub>为第 j 种的个体数量占总个体数量的比;S 为群落中的总种数。

2.2.3 群落相似性系数计算 在生态学中群落相似性与相异性是非常重要的概念,它能够在一定程度上表征植物防护林间的多样性问题<sup>[21]</sup>。

Sorensen 指数:

$$C_s = 2j / (a + b) \tag{6}$$

式中:j 为两个固沙林或样地共有种数;a 和 b 分别是样地 A 和 B 中的物种数。

2.2.4 统计与分析 使用 Excel 进行数据处理与绘图,使用 SPSS 26.0 软件进行 ANOVA 单因素方差分析检验,通过 Pearson 相关性分析,分析小叶杨防护林造林密度与带间植被特征之间的相关性。

3 结果与分析

3.1 植物群落科属组成与生活型特征

本研究所调查的 11 块样地内的 75 个草本样方中,共发现植物 17 种,分属于 8 科 14 属。如图 1 所示,其中,菊科植物 5 种,隶属于 2 个属,占所出现植物种的 29.41%;禾本科植物 3 种,隶属 3 个属,占所出现植物种的 17.65%;藜科植物 3 种,隶属于 3 个属,占所出现植物种的 17.65%;豆科植物 2 种,隶属 2 属,占所出现植物种的 11.76%;该 4 科合计 10 属 13 种,占全部种数的 76.47%;其余植物均为 1 科 1 属 1 种,说明该 4 科草本植物在奈曼旗小叶杨防护林下所起的作用最大,占据优势地位,对研究区的自然环境具有较好的适应能力。

研究区不同造林密度小叶杨防护林林下植被组成分科特征与生活型结构见表 2,草地的科属组成最丰富,共有 8 科 14 属,旷野的科属组成最为单一,仅有 4 科 4 属,随着防护林造林密度的减小,植物科属组成的丰富程度逐渐增大,植物种类数量、一年生与多年生草本数量随之增加;造林后的防护林样地植物科属丰富程度、植被种类均优于未造林的旷野样地,其中密度类型 I 的防护林样地在多年生植被恢复上优于地带性植被的草地,其他均低于草地,说明造林可以有效提高研究区植被多样性,合理的造林密度更有利于林下植被向地带性植被恢复。

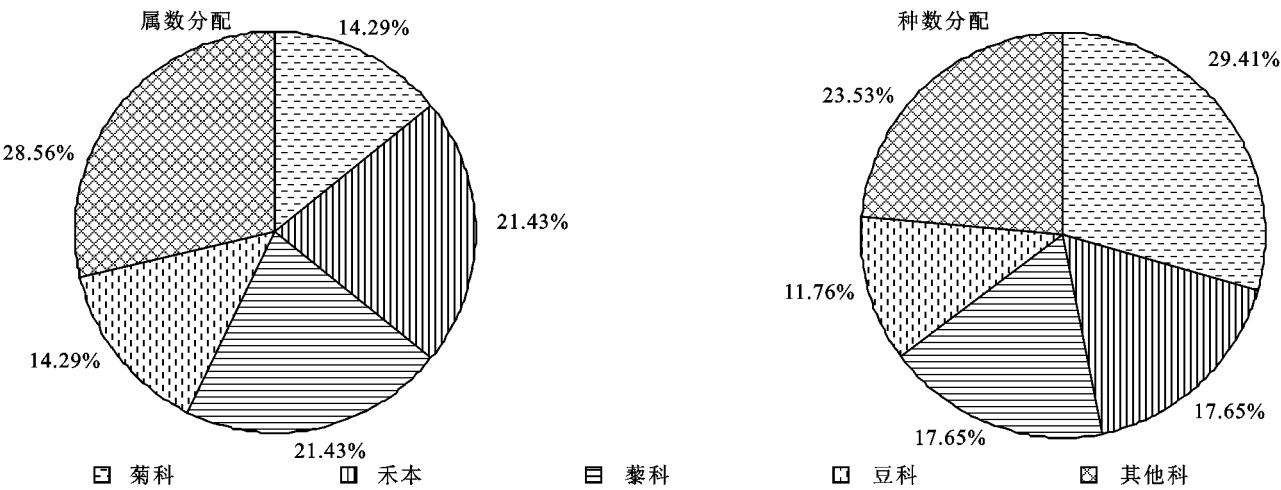


Fig. 1 Proportional distribution of herbaceous families in the sample site

表 2 不同样地植物组成分科特征及生活型结构

Table 2 Plant composition subfamily characteristics and life type structure for different sites							
密度类型	科数/个	属数/个	种数/个	一、二年生植被数/个	百分比/%	多年生植被数/个	百分比/%
I	7	12	13	7	53.85	6	46.15
II	6	10	10	7	70	3	30
III	5	7	7	5	71.43	2	28.57
草地	8	14	17	10	58.82	7	41.18
旷野	4	4	4	4	100	0	0

3.2 植物群落物种组成与重要值

不同造林密度小叶杨防护林林下物种组成与重要值见表 3,不同样地的植物种类数量表现为草地对照>密度类型I>密度类型II>密度类型III>旷野对照,其中造林密度类型III的优势种为狗尾草、地锦,均为一年生植被,造林密度类型II的优势种除狗尾草等一年生植被外

仅有一种多年生植被赖草,说明这两种类型的造林密度林下植被物种组成相对简单,群落稳定性不高;造林密度类型I中优势种不仅有一年生植被狗尾草,还有多年生植被赖草、甘草与达乌里胡枝子,综上所述,造林密度类型I的小叶杨防护林在物种组成、植被恢复程度、群落稳定性上都明显优于其他两种类型的小叶杨防护林。

表 3 不同样地物种组成及重要值

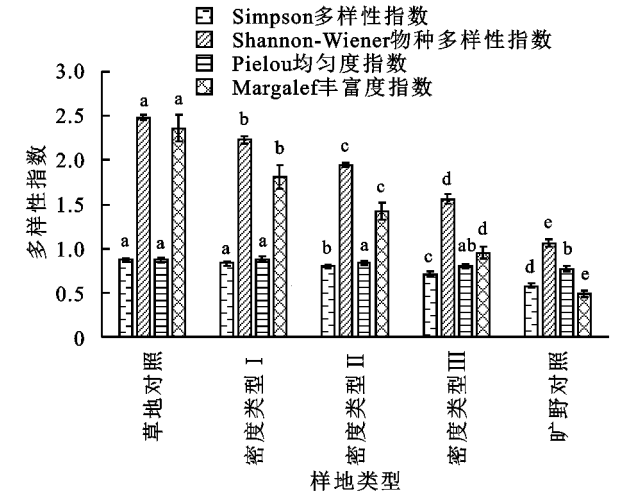
Table 3 Species composition and importance values for different sites

密度类型植物种类	I	II	III	草地对照	旷野对照
地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i>	5.6	4.48	13.68	6.79	13.43
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	10.93	—	—	6.16	—
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	3.26	11.47	—	3.56	—
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	30.34	37.82	48.74	27.59	60.51
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	5.67	3.98	8.1	4.79	19.48
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	4	9.81	10.81	2.49	6.59
山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>	5.46	3.8	6	4.75	—
地稍瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	3.5	—	—	3.68	—
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	9.96	6.08	7.45	9.88	—
野亚麻 <i>Linum stelleroides</i>	1.49	—	—	1.87	—
地肤 <i>Kochia scoparia</i>	5.52	7.96	5.22	5.4	—
差巴嘎蒿 <i>Artemisia halodendron</i>	3.28	—	—	1.8	—
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	10.99	12.04	—	6.77	—
蒺藜 <i>Tribulus terrester</i>	—	2.57	—	2.18	—
碱蒿 <i>Artemisia anethifolia</i>	—	—	—	4.21	—
芦苇 <i>Phragmites australia</i>	—	—	—	6.16	—
大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	—	—	—	1.93	—



3.3 植物群落物种多样性变化

各样地植被多样性变化如图 2 所示,不同样地间的植被多样性变化总体呈现出草地对照>密度类型 I>密度类型 II>密度类型 III>旷野对照的规律,从显著性分析的结果可以看出,Simpson 多样性指数在草地与密度类型 I 样地中无显著性差异,Shannon-Wiener 物种多样性指数在各样地之间均有显著性差异,Pielou 均匀度指数在草地、密度类型 I、密度类型 II 之间无显著性差异,密度类型 III 与密度类型 II、旷野对照样地之间无显著性差异,Margalef 丰富度指数在各样地之间均有显著性差异;在 3 种造林密度类型中,密度类型 I 的多样性是最接近地带性植被的样地,且远高于旷野对照样地,随着造林密度的减小,林下植被多样性丰富度逐渐增大,向地带性植被接近,在以上 3 种造林密度类型中,密度类型 I 相对更适宜林下植被多样性的恢复。



注:图中相同小写字母表示同一指数不同样地间差异不显著( $p<0.05$ )。

图 2 不同样物种多样性变化

Fig. 2 Variation in diversity of different species

3.4 植被群落生物量

各样地草本植物生物量变化见图 3,各样地间地上生物量、地下生物量、总生物量的变化规律一致表现为草地对照>密度类型 I>密度类型 II>密度类型 III>旷野对照;通过显著性分析的结果可以看出,地上生物量、地下生物量、总生物量在各样地之间均有显著差异;密度类型 I, II, III 的总生物量分别是旷野对照样地的 2.4 倍、1.83 倍、1.52 倍,这说明经过植树造林后的土地,其植被群落的地上、地下生物量均比造林前有显著增加,且随着造林密度的减小,林下草本的生物量逐渐增加。

3.5 群落相似性与相异性系数

防护林的时空结构在一定程度上可以通过防护林群落相似性指数来反映,由表 4 可知,造林密度类

型 I, II, III 与草地对照的相似性系数分别为 86.67, 74.07, 58.33, 与旷野对照的相似性系数分别为 47.06, 57.14, 72.73;随着造林密度的减小,防护林样地与草地对照的相似性逐渐增加,与旷野对照的相似性逐渐减小,这说明造林密度对林下的群落物种组成有着明显的影响,造林密度类型 I 的防护林在植被恢复过程中发生了演替,且朝着地带性植被的演替方向发展;密度类型 III 的优势种替代速率较慢,林下植被恢复效果一般,环境异质性相对较小。

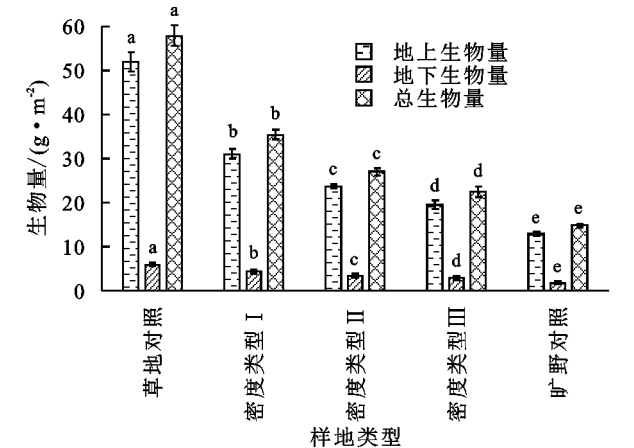


图 3 不同样地草本植物生物量

Fig. 3 Herbaceous biomass in different locations

表 4 不同样地植物群落相似性与相异性系数

Table 4 Similarity and dissimilarity coefficients of different silvicultural densities %

样地类型	I	II	III	旷野对照	草地
I	1	78.26	70.00	47.06	86.67
II	21.74	1	82.35	57.14	74.07
III	30.00	17.65	1	72.73	58.33
旷野对照	52.94	42.86	27.27	1	38.10
草地	13.33	25.93	41.67	61.90	1

注:表中右上角为相似性系数,表左下角为相异性系数。

3.6 造林密度与林下植被特征之间的相关性

对小叶杨防护林样地林下植被特征与造林密度进行 Pearson 相关分析结果见表 5,防护林造林密度与林下物种多样性指数、物种数量、林下植被盖度、生物量均呈现极显著负相关关系( $p<0.01$ ),其中 Pielou 均匀度指数与造林密度相关系数为-0.816,地下生物量为-0.879,其他植被特征指数与造林密度的相关系数均达到-0.9 以上;物种数量与各多样性指数、林下植被盖度、生物量呈极显著正相关关系( $p<0.01$ );林下植被盖度与各多样性指数、物种数量、生物量呈极显著正相关关系( $p<0.01$ );林下草本总生物量与各多样性指数、物种数量、林下植被盖度、地上、地下生物量呈极显著正相关关系( $p<0.01$ )。

表 5 造林密度与林下植被特征的相关关系

Table 5 Correlation between silvicultural density and understorey vegetation characteristics

林下植被 特征	Simpson 多样性指数	Shannon-Wiener 物种多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数	物种数 量/个	林下植被 盖度/%	地上生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	地下生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	总生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )
造林密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	-0.926**	-0.973**	-0.816**	-0.943**	-0.987**	-0.968**	-0.954**	-0.879**	-0.948**
物种数量/个	0.941**	0.990**	0.849**	0.961**	1	0.960**	0.972**	0.914**	0.969**
林下植被盖度/%	0.899**	0.950**	0.853**	0.919**	0.960**	1	0.970**	0.894**	0.965**
总生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	0.899**	0.965**	0.879**	0.936**	0.969**	0.965**	0.999**	0.970**	1

注:\*\*表示在 0.01 水平上相关性显著(双尾),\*表示在 0.05 水平上相关性显著(双尾)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

在人工林的经营管理过程中,营造合理的造林密度是提高其可持续发展能力的重要环节,在一定程度上降低林分密度,能够改善森林的林分结构与林木生长状况<sup>[22]</sup>;内蒙古林科院的闫德仁对包括奈曼旗在内的科尔沁沙地杨树防护林进行系统调查研究,发现杨树人工林普遍种植密度过大,当地自然水位与降水早已超出其承载范围,导致科尔沁沙地杨树防护林出现加速衰退的现象<sup>[4]</sup>,这说明密度较大的杨树种植方式并不适宜于干旱的科尔沁沙地,不合理的种植密度限制了当地的林地生产水平;中国林科院的杨文斌提出的低覆盖度造林模式在科尔沁沙地的敖汉旗沙区取得了显著成效,其研究认为在干旱区降低造林密度不仅能使土壤水分得到合理有效的利用,使固沙林的防风效果增强,还能显著提高林下植被多样性,促进土壤发育与恢复<sup>[23-24]</sup>。姜丽娜等在敖汉旗沙区研究发现加宽造林带间距,能够有效提升杨树固沙林带间土壤与植被的恢复效果<sup>[25]</sup>,敖汉旗沙区与奈曼旗沙区在地理位置上邻近,二者同处科尔沁沙地南缘,造林带间距的宽窄差异从一定程度上来讲也是造林密度的差异,这种造林密度与林下植被恢复之间规律与本文的研究结果一致。

土壤作为植物生长生存的基础,各项特性对植物个体、植物群落的结构与功能都发挥着无法替代的重要作用,林下植被与土壤质量和养分循环有着密切关系,林下的植被组成及多样性直接或间接导致土壤理化性质、微生物数量的变化。任何类型的人工林林下植被生长发育、恢复发展都是既漫长又复杂的过程,本文的研究结果可以看出,降低林分密度更有利于林下植被多样性的恢复,这主要是由于林分密度的减小缓解了研究区干旱、半干旱条件下本就激烈的土壤水分与养分竞争,郁闭度的降低让林下低矮的草本植物

获得了更多的阳光、降雨等生态资源,光照不仅促进了草本植物的光合作用,也提升了土壤温度,创造了更好的植被生长发育条件,当林下植被丰富度上升、生物量增大,地表枯落物含量随之增加,枯落物的覆盖提高了土壤保水保肥的能力,群落物种养分回归分解后又进一步影响林下土壤特性,提升土壤的质量,促进了土壤养分循环,从而在林下植被与土壤之间达到一个良性的交互作用。

在我国许多干旱、半干旱地区营造的乔木、灌木防护林、人工林、固沙林,经过漫长的自然演替过程,都逐渐形成了覆盖度较低的植被群落<sup>[26]</sup>,从本文相关性分析的结果可以看出,林下植被特征的各项指标与造林密度呈极显著负相关关系( $p<0.01$ ),说明随着林分密度的增大,林下植被多样性指数、植被覆盖度等植被特征均减小,因此,造林密度过高并不适宜研究区小叶杨防护林群落稳定发展,对造林密度过高的防护林,应当予以适当的间伐、择伐等抚育措施。

科尔沁沙地奈曼沙区土壤水分含量较少、土壤养分贫瘠,在林分生长的过程中,杨树本身根系吸水能力强,适宜的栽植密度对于杨树防护林群落来说至关重要。结合诸多学者研究,综合考虑奈曼沙区小叶杨防护林不同造林密度林下植被物种组成、植被多样性、生物量可知,当其造林密度达到 867~1 022 株/hm<sup>2</sup>时林下植被物种组成更丰富,物种多样性指数更高,植被群落演替效果更好,群落相对稳定。综上所述,867~1 022 株/hm<sup>2</sup>是奈曼沙区小叶杨防护林相对适宜的造林密度,与其他造林密度相比,更有利于带间植被恢复与森林的可持续经营发展。

4.2 结论

(1) 不同造林密度对林下植被多样性与群落稳定有显著影响,随着造林密度的减小,林下植被的生物量、物种组成丰富度增大,Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数增大,一年生与多年生草本数量增加,植

物恢复程度、群落稳定性上升。

(2) 造林可以显著提高植被恢复与演替速度,随着造林密度的减小,防护林样地与地带性植被的草地相似性逐渐增加,与未造林的旷野对照地相似性逐渐减小,小叶杨防护林造林密度为  $867 \sim 1\,022$  株/hm<sup>2</sup> 时,林下植被演替效果最好,群落相对稳定。

(3) 防护林造林密度与林下物种多样性指数、物种数量、林下植被盖度、林下草本生物量均呈现极显著负相关关系( $p < 0.01$ ),其中除 Pielou 均匀度指数与地下生物量外,其他相关系数均达到  $-0.9$  以上;物种数量、林下植被盖度、总生物量与除造林密度外的其他各指标之间均呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ )。

#### 参考文献:

- [1] Liang X, Xin Z, Shen H, et al. Deep soil water deficit causes *Populus simonii* Carr degradation in the three north shelterbelt region of China[J]. Journal of Hydrology, 2022,612:128201.
- [2] 杨爱国,付志祥,王玲莉,等.科尔沁沙地杨树水分利用策略[J].北京林业大学学报,2018,40(5):63-72.
- Yang A G, Fu Z X, Wang L L, et al. Strategies on water utilization of poplar in Horqin Sandy Land of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(5):63-72.
- [3] Wang Kai, Zhang Risheng, Song Lining, et al. Comparison of C:N:P stoichiometry in the plant-litter-soil system between poplar and elm plantations in the Horqin Sandy Land, China [J]. Frontiers in Plant Science, 2021,12:655517.
- [4] 闫德仁.科尔沁沙地杨树防护林衰退原因探讨[J].内蒙古林业科技,2016,42(1):49-51.
- Yan D R. Declining causes of poplar protective forest in Keerqin sandy land[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2016,42(1):49-51.
- [5] 车少辉,张建国.基于自稀疏理论的杉木人工林密度指标研究[J].植物研究,2012,32(3):343-347.
- Che S H, Zhang J G. Comparative study on stand density measures based on self-thinning theory for Chinese Fir Plantation[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(3):343-347.
- [6] Fredericksen T S, Agramont A R E. Regeneration patterns of Eastern white pine(*Pinus strobus* L.) in hardwood-dominated forests in Virginia, USA[J]. New Forests, 2013,44(1):51-61.
- [7] Rota E, Caruso T, Bargagli R. Community structure, diversity and spatial organization of enchytraeids in Mediterranean urban holm oak stands [J]. European Journal of Soil Biology, 2014,62:83-91.
- [8] 胡延辰,张晓林,韩晓义,等.蒙古栎次生林的生长更新与林下植被多样性对林分密度的响应[J].应用生态学报,2022,33(3):727-732.
- Hu Y C, Zhang X L, Han X Y, et al. Responses of stand growth, regeneration, and understory species diversity in *Quercus mongolica* secondary forest to stand density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(3):727-732.
- [9] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.
- Zhang Y Q, Li Z C, Hou L Y, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese Fir plantation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(1):239-250.
- [10] 李金金,张健,张阿娟,等.不同密度巨桉人工林林下植物多样性及根际土壤化感物质[J].应用生态学报,2020,31(7):2175-2184.
- [11] Li J J, Zhang J, Zhang A J, et al. Understory plant species diversity and allelochemicals in rhizosphere soils of *Eucalyptus grandis* plantations with different densities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(7):2175-2184.
- [12] 金锁,毕浩杰,刘佳,等.林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(1):10-17.
- Jin S, Bi H J, Liu J, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020,42(1):10-17.
- [13] 杨爱芳,韩有志,杨秀清,等.不同密度云杉林下草本植物多样性[J].浙江农林大学学报,2014,31(5):676-682.
- Yang A F, Han Y Z, Yang X Q, et al. Diversity of understory herbs in Picea forests with different stand densities [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2014,31(5):676-682.
- [14] 段翰晨,王涛,薛娴,等.科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局:以内蒙古自治区奈曼旗为例[J].地理学报,2012,67(7):917-928.
- Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification and landscape pattern in Horqin sandy land: A case study of naiman banner in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67

- (7):917-928.
- [15] 罗维成,赵文智,孙程鹏,等.科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J].中国沙漠,2018,38(1):126-132.
- Luo W C, Zhao W Z, Sun C P, et al. Changes in species composition, diversity and soil water content of *pinus sylvestris* artificial sand-fixation forest along an afforestation successional gradient in Horqin[J]. Journal of Desert Research, 2018,38(1):126-132.
- [16] 董佳蕊,张桂英,刘媛媛.2017年奈曼旗干旱灾害分析[J].现代农业科技,2018(9):241-244.
- Dong J R, Zhang G Y, Liu Y Y. Analysis on drought disaster of naiman banner in 2017[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(9):241-244.
- [17] 闫敏,左合君,杨阳,等.不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效应与带间植被组成[J].水土保持研究,2018,25(4):139-145.
- Yan M, Zuo H J, Yang Y, et al. Different distance *Caragana korshinskii* protection forest for wind reducing effect and inter-type vegetation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(4):139-145.
- [18] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法: II.  $\beta$ 多样性的测度方法[J].生物多样性,1995(1):38-43.
- Ma K P, Liu C R, Liu Y M. Methods for measuring the diversity of biological communities II methods for measuring the diversity of  $\beta$ [J]. Biodiversity Science, 1995(1):38-43.
- [19] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法 I.  $\alpha$ 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994(4):231-239.
- Ma K P, Liu Y M. Methods for measuring the diversity of biological communities I methods for measuring the diversity of  $\alpha$ [J]. Biodiversity Science, 1994(4):231-239.
- [20] 白永飞,许志信,李德新.内蒙古高原针茅草原群落  $\alpha$ 多样性研究[J].生物多样性,2000(4):353-360.
- Bai Y F, Xu Z X, Li D X. Study on a diversity of four stipa communities in Inner Mongolia plateau[J]. Biodiversity Science, 2000(4):353-360.
- [21] 白永飞,邢雪荣,许志信,等.内蒙古高原针茅草原群落  $\beta$ 多样性研究[J].应用生态学报,2000,11(3):408-412.
- Bai Y F, Xing X R, Xu Z X, et al.  $\beta$ diversity of stipa communities in Inner Mongolia plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000,11(3):408-412.
- [22] 姜丽娜.低覆盖度行带式固沙林促进带间土壤、植被修复效应的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- Jiang L N. The promoting effect of soil and vegetation recovery between low coverage sand-fixing forest belts [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [23] 王云霓,高孝威,苏雅拉巴雅尔,等.林分密度和林龄对华北落叶松人工林生长特征的影响[J].内蒙古林业科技,2018,44(3):12-16.
- Wang Y N, Gao X W, Su Y L B Y E, et al. Effects of Different Densities and Ages on Growth of *Larix principis-rurechitii* Plantation in Daqing Mountains of Inner Mongolia[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2018,44(3):12-16.
- [24] 杨文斌,王涛,冯伟,等.低覆盖度治沙的理论与沙漠科技进步[J].中国沙漠,2017,37(1):1-6.
- Yang W B, Wang T, Feng W, et al. The theory and progress of sand control with low coverage[J]. Journal of Desert Research, 2017,37(1):1-6.
- [25] 杨文斌,郭建英,胡小龙,等.低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析[J].中国沙漠,2012,32(5):1291-1295.
- Yang W B, Guo J Y, Hu X L, et al. Vegetation restoration process and sand-reversal effect of low coverage sand-fixing forest belts[J]. Journal of Desert Research, 2012,32(5):1291-1295.
- [26] 姜丽娜,杨文斌,卢琦,等.低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J].生态学报,2013,33(10):3192-3204.
- Jiang L N, Yang W B, Lu Q, et al. The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(10):3192-3204.