

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230134

毛乌素沙地杨树人工林林下植物群落特征

胡尔查^{1,2,3}, 王晓江¹, 王 铮^{1,2}, 李梓豪^{1,2}, 洪光宇^{1,2}, 李卓凡^{1,2},
杨海峰^{1,2}, 高孝威^{1,2*}, 赵学军¹

(1. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古大青山森林生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古农业大学林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: [目的] 研究人工林林下植物群落特征及其与林分因子的关系, 对沙地植被恢复成效的评价和人工林管理具有重要意义。[方法] 本研究以毛乌素沙地杨树人工林群落为研究对象, 调查研究林下植物群落特征, 并重点探讨了林分郁闭度、密度等林分因子对林下植被的影响。[结果] 研究区杨树人工林林下共发现植物 32 种, 隶属于 12 科 28 属, 其中豆科、禾本科、菊科植物最多, 占总植物种的 62.51%; 林下草本植物生活型以多年生草本植物为主, 占总物种的 78.13%, 植物水分生态类型以旱生、中旱生植物为主, 占总物种数的 75.00%, 其次为旱中生和中生植物; 林下草本层 Margalef 丰富度指数变化范围为 1.20~3.17, Simpson 优势度指数变化范围为 0.48~0.88, Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 0.95~2.34, Pielou 均匀度指数变化范围为 0.16~0.48, 林龄 32 年生时林下物种多样性最高; 结构方程模型结果显示林分郁闭度和密度与林下灌木层盖度之间存在负效应关系, 人工林郁闭度较高时, 林下无灌木层形成。林分郁闭度的增加有利于草本层的发育, 而林分密度与草本层盖度、地上生物量、物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数之间存在负效应关系, 灌木层对草本层的影响与乔木层相似。[结论] 毛乌素沙地杨树人工林林下草本植物多样性较高, 灌木种类较少, 其大小受郁闭度和密度等林分因子的影响较明显。适当调控林分密度和结构, 将有利于毛乌素沙地杨树人工林林下物种多样性的维持和近自然改造。

关键词: 杨树人工林; 林分因子; 林下植被; 物种多样性; 毛乌素沙地

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)05-0189-09

荒漠化作为干旱半干旱地区最严重的生态和社会问题, 影响着约 20% 的世界人口^[1-2]。为了扭转生态退化和荒漠化, 改善生态环境, 我国先后实施了三北防护林体系建设工程、京津风沙源治理工程、退耕还林工程等一系列生态工程^[3-4], 工程区森林覆盖率和人工林面积逐年增加^[5], 有效遏制了荒漠化的发展, 促进了局地生境恢复^[2]。杨树 (*Populus L.*) 由于生长速度快、生产力高、适应性强而被广泛用于我国北方地区林业生态工程^[6], 在防风固沙、保持水土、涵养水源等方面发挥着至

关重要作用^[7]。杨树人工林多以纯林为主, 林分结构单一, 随着杨树人工林进入成过熟林阶段, 林分普遍存在生态功能低下, 生产力下降等问题^[8]。因此, 研究杨树人工林林下植物群落特征及其与林分因子的关系, 不仅有助于评估毛乌素沙地杨树人工林生态功能, 还能够为沙地杨树人工林的合理经营提供依据。

林下植被作为人工林生态系统的重要组成部分, 在维持人工林生态系统结构和功能方面起着重要作用^[9-10]。物种多样性作为衡量群落结构和功能

收稿日期: 2023-03-30 修回日期: 2023-07-19

基金项目: 中央财政林业和草原科技推广示范项目(内林草改函[2023]18号); 内蒙古重点研发和成果转化计划项目(2022YFHH0106); 内蒙古自治区科技重大专项项目(zdxx2018060, 2019ZD007)

作者简介: 胡尔查, 在读博士, 副研究员。研究方向: 森林生态学。电话: 18247303199 E-mail: 371338101@qq.com

* 通讯作者: 高孝威, 硕士, 助理研究员。研究方向: 森林生态学。电话: 15024942869 E-mail: 309957729@qq.com

复杂性的重要指标,可反映植物群落演替方向和稳定程度^[11]。林分因子对林下植物群落产生显著影响,而林下植被通过其一系列的生理生化活动调控地上和地下物质循环和能量流动^[12-13]。光照条件是影响林下植物物种组成和生长的主要因素之一^[14],林冠层通过改变林下透光率影响林下植物物种组成和多样性。林分郁闭后,林下植物的生长受到限制,生物多样性明显下降^[15]。林分密度也是影响林下植物多样性的重要因子,相关研究表明,中等密度林下植物丰富度和多样性指数均最高^[16],但也有研究发现,林下植物多样性随林分密度增加呈降低趋势^[13],其结果的差异可能与研究区域气候条件、环境因子、人为干扰等紧密相关^[16]。此外,树种组成、林龄、树高等林分因子的差异也会导致林下植物群落特征的变化^[17-18]。

杨树人工林是毛乌素沙地重要的防护林类型之一,但由于缺乏抚育管理,毛乌素沙地杨树人工林长期处于自然恢复状态,林下植被群落特征及林分因子如何影响林下植被尚不清楚。本研究以毛乌素沙地杨树人工林为对象,调查林下物种多样性、地上生物量分布特征及林分因子的基础上,进一步分析林分因子对林下灌、草层的影响,拟解决两个问题:(1)毛乌素沙地杨树人工林林下植被组成和物种多样性水平如何?(2)林下灌、草层物种多样性和地上生物量如何响应林分因子变化,以期为毛乌素沙地植被恢复和重建,以及人工林合理经营、人工林近自然改造提供理论依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于内蒙古自治区、陕西省和宁夏回族自治区交接区域(106°11'~110°54'E, 36°49'~40°12'N),沙地总面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,大部分位于内蒙古自治区鄂尔多斯市和陕西省榆林市境内。海拔950~1 600 m,自西北向东南逐渐降低。研究区地势较平坦,固定、半固定、半流动、流动沙丘以及丘间低地相间分布。土壤类型以风沙土为主,在滩地、低洼地、河漫滩及丘间低地分布有盐碱土、草甸土和沼泽土等。毛乌素沙地属于典型的温带大陆性半干旱季风性气候,年平均气温6.0~9.0℃,≥10℃年有效积温2 700~3 000℃,无霜期130~160 d,年平均风速 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年降水量250~400 mm。该区植被以非地带性沙生植被、湿地植被和人工林为主,沙丘主要植物群落类

型为油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)群落,人工林主要树种有旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)、小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv.)、北沙柳(*Salix psammophila* C. Wang & C. Y. Yang)、杨柴(*Hedysarum mongdicum* Turczaninow ex Kitagawa)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)和沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)等;丘间低地群落优势种以芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud)、寸草苔(*Carex duriuscula* C.A.Mey.)、碱茅(*Puccinellia distans* (Jacq.) Parl.)、芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) M. Nobis, P. D. Gudkova & A. Nowak)、马蔺(*Iris lactea* Pall.)等为主。

2 研究方法

2.1 样地设置与群落调查

于2022年8月,在毛乌素沙地具有代表性的杨树人工林随机设置12个样地(样地生境条件基本一致),对乔木、灌木、草本进行分层调查(表1)。每个样地各设置3个30 m × 30 m的乔木和灌木样方(由于林下灌木较少,灌木样方大小与乔木样方相同),并按对角线法,在每个乔木样方内设置3个1 m × 1 m的草本样方,共计设置36个乔木样方、36个灌木样方和108个草本样方。乔木样方采用每木检尺法进行调查,测定树高、胸径、冠幅、枝下高等;灌木样方记录所有灌木树高、地径、冠幅、株数等指标,并剪取标准株带回实验室烘干测算生物量;草本样方分种调查高度、盖度、株数、频度等,并剪取样方内所有物种的地上部分,称取鲜质量后带回实验室烘干获得生物量。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 林下草本植物多样性计算 采用重要值、Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀性指数等表征林下草本植物组成和多样性^[19],具体计算公式如下:

重要值=(相对盖度+相对密度+相对频度)/3

Margalef丰富度指数: $R = (S - 1) / \ln N$

Shannon-Wiener多样性指数: $H = - \sum_{i=1}^{n=S} P_i \ln P_i$

Simpson优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^{n=S} P_i^2$

表 1 杨树人工林样地基本情况
Table 1 General situation of sample plot

样地序号 Plot number	生境描述 Habitat description	林龄 Age/a	平均胸径 Average diameter/cm	平均树高 Average height/cm	密度/ (株·hm ⁻²) Density	郁闭度 Canopy density
Y1	地势较平坦, 沙土, 林下无灌木层	17	21.3 ± 2.3	915.5 ± 235.7	222	0.24
Y2	低缓沙丘, 沙土, 林下灌木层盖度较大	17	15.1 ± 4.8	758.0 ± 146.0	278	0.32
Y3	地势平坦, 沙土, 林下植被少	17	16.4 ± 4.0	633.2 ± 160.8	722	0.69
Y4	缓坡, 覆沙地, 沙土, 林下植被稀疏	32	29.0 ± 5.7	673.6 ± 322.8	122	0.29
Y5	地势较平坦, 沙土, 杨树群团状分布, 林下灌草种类较多, 但盖度较低	32	12.3 ± 6.6	601.2 ± 265.7	422	0.26
Y6	平缓沙丘, 沙土, 杨树株行距已不明显, 林下形成灌草层	32	21.5 ± 5.6	840.3 ± 176.3	322	0.45
Y7	平缓沙丘, 沙土, 杨树自疏后斑块状分布, 林下形成灌草层	32	28.1 ± 8.9	1127.7 ± 331.5	289	0.45
Y8	平缓沙丘, 沙土, 林下植被较少	32	14.7 ± 7.6	679.4 ± 157.4	289	0.25
Y9	低缓沙丘, 沙土, 林下植被少	32	30.6 ± 13.4	665.0 ± 63.6	200	0.28
Y10	地势较平坦, 沙土, 林下植被少	32	9.8 ± 8.6	590.9 ± 171.8	122	0.19
Y11	地势较平坦, 沙土, 林下植被少	42	15.6 ± 6.9	725.7 ± 216.8	775	0.56
Y12	固定沙丘, 沙丘较高, 沙土, 林下有灌木层, 草本植物较少	42	6.4 ± 4.8	457.0 ± 162.9	320	0.13

Pielou 均匀度指数: $J = (-\sum_{i=1}^{n=S} P_i \ln P_i) / \ln S$

式中: S 为物种总数, N 为调查样方内所有植物个体总数; P_i 为 S 个物种群落中第 i 个物种的个体数占所有物种总个体数的比例。

2.2.2 林分因子对林下灌、草层多样性和生物量的影响 采用结构方程模型 (structural equation modeling, SEM) [20], 分析林分因子对林下灌、草层结构的影响机制。

采用 Microsoft Excel 2016、Origin2021、Amos 21、spss24.0 等软件进行数据整理、统计分析和绘图。

3 结果与分析

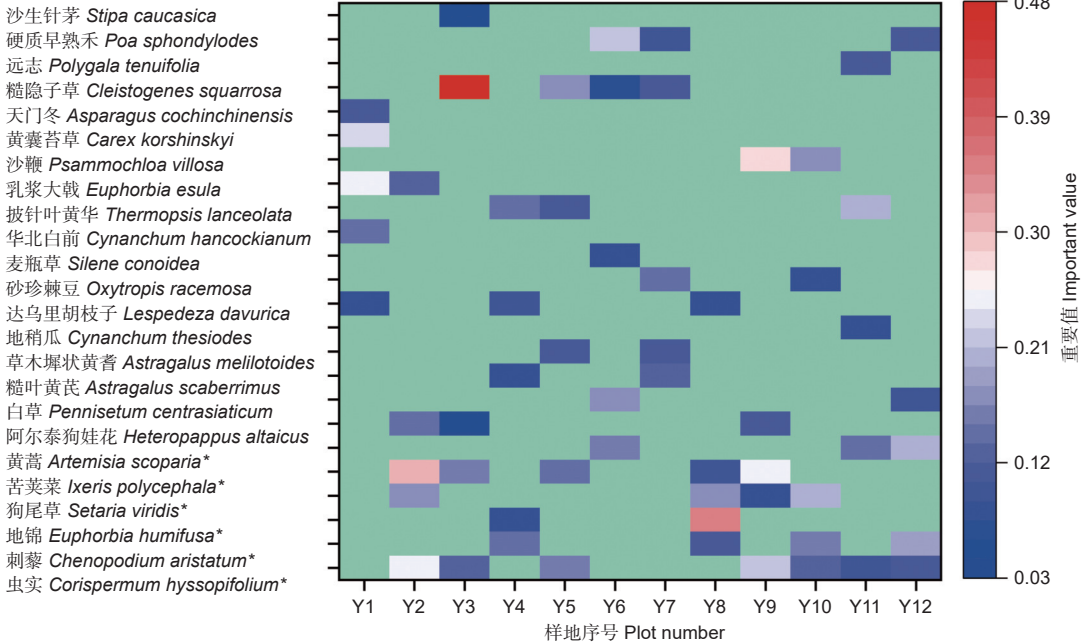
3.1 林下物种组成

本研究调查的杨树人工林林下植物共有 32 种, 隶属于 12 科 28 属。其中, 豆科、禾本科和菊科植物种类较多, 分别为 7、7 和 6 种, 占总草本植物种的 21.88%、21.88% 和 18.75%。经过多年恢复, 林下多年生草本植物种类明显增加, 林下植物群落向近自然植被演替, 调查样地中, 多年生植物和一年生植物分别占总植物种的 78.13% 和 21.87%。从水分生态型看 [21], 林下草本植物以

旱生植物为主, 旱生、中旱生、旱中生、中生植物分别占总植物种的 37.50%、37.50%、15.63% 和 9.38%。杨树人工林林下天然灌木、半灌木种类较少, 在所有样地中, 共出现小叶锦鸡儿、杨柴和油蒿等 3 种灌木。

3.2 林下草本植物重要值

由图 1 (以每个样地重要值排序前 5 的植物所做的热图) 可知, 样地 Y1、Y3、Y4、Y5、Y6、Y7、Y11、Y12 草本层以糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng.)、硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes* Trin.)、披针叶黄华 (*Thermopsis lanceolata* R. Br.)、砂珍棘豆 (*Oxytropis racemosa* Turcz.) 等多年生草本为优势种, 优势植物重要值相对较高。样地 Y2、Y8、Y9 和 Y10 草本层以虫实 (*Corispermum hyssopifolium* L.)、苦苣菜 (*Ixeris polycephala* Cass. ex DC.)、地锦 (*Euphorbia humifusa* (Siebold & Zucc.) Planch.)、狗尾草 (*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.) 等一年生草本为优势植物, 一年生植物重要值相对较高。在所有样地中, 沙地先锋植物虫实以优势植物出现的频率最高, 其次为苦苣菜、狗尾草和糙隐子草。



Notes: Annuals are represented by the symbol "*", others are perennial herbs

图 1 林下优势植物重要值热图

Fig. 1 Important value of dominant plants

3.3 林下草本植物多样性

在 12 个样地中, 林下草本层 Margalef 丰富度指数变化范围为 1.20~3.17, Simpson 优势度指数变化范围为 0.48~0.88, Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 0.95~2.34, Pielou 均匀度指数变化范围为 0.16~0.48 (图 2)。

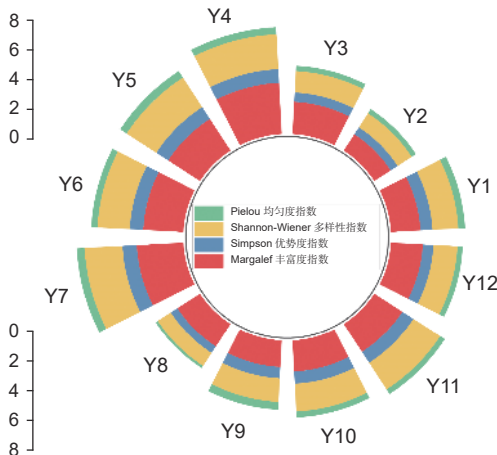


图 2 林下草本植物多样性指数

Fig. 2 Diversity index of herbaceous plants

从图 3 可以看出, 不同林龄杨树人工林草本层 Shannon-Wiener 多样性指数 H 、Simpson 优势度指数 D 、Margalef 丰富度指数以及 Pielou 均

匀度指数 J 均表现出相似的变化规律, 即随林龄的增大呈先增后减的规律, 但各林龄之间差异不显著 ($P>0.05$)。Shannon-Wiener 多样性指数 H 、Simpson 优势度指数 D 、Margalef 丰富度指数大小顺序为: 32 a 林龄>42 a 林龄>17 a 林龄, Pielou 均匀度指数 J 大小顺序为: 32 a 林龄>17 a 林龄>42 a 林龄。在毛乌素沙地, 杨树人工林植被被恢复年限达到 30~40 a 时, 林下草本植物多样性达到最大值, 随着林龄的进一步增加, 林分开始衰退, 林下植物多样性有所降低。

3.4 林下灌、草层地上生物量

从表 2 可以得出, 不同样地林下灌、草层盖度和地上生物量差异较大, 灌木层盖度 Y9 最大, 为 72.50%, 地上生物量 Y7 最大, 为 668.04 $g \cdot m^{-2}$, 而 Y1、Y3、Y11 林下均无灌木层; 草本层盖度和地上生物量均 Y4 最大, 分别为 40.00%、23.47 $g \cdot m^{-2}$, Y2 草本层盖度和地上生物量均较低, 分别为 3.00% 和 0.11 $g \cdot m^{-2}$ 。调查还发现, 杨树人工林林下灌木层恢复较好的情况下, 其地上生物量远高于草本层 (图 4)。

3.5 林分因子对林下灌、草层多样性和地上生物量的影响

建立杨树人工林群落特征结构方程模型, 分析

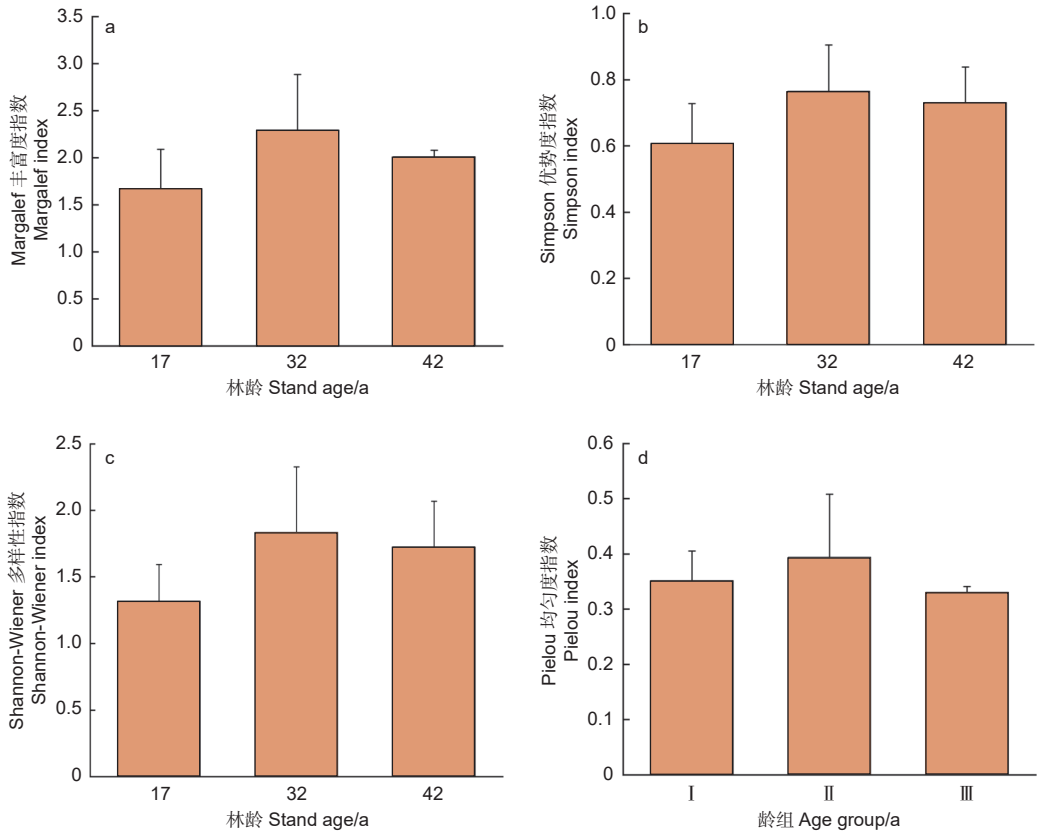


图 3 不同林龄杨树人工林林下物种多样性指数

Fig. 3 Understory species diversity index of poplar plantation in different age groups

表 2 林下灌、草层盖度和地上生物量

Table 2 Coverage and aboveground biomass of shrub and grass layer under forest

样地序号 Plot number	灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer	
	盖度 Coverage/%	地上生物量 Aboveground biomass/ (g·m ⁻²)	盖度 Coverage/%	地上生物量 Aboveground biomass/ (g·m ⁻²)
Y1	0.00	0.00	5.00	2.77
Y2	57.14	557.52	3.00	0.11
Y3	0.00	0.00	6.67	1.12
Y4	44.45	163.00	40.00	23.47
Y5	9.77	72.45	19.00	9.70
Y6	57.98	340.18	31.67	10.75
Y7	54.75	668.04	25.33	12.38
Y8	5.59	25.83	24.00	4.21
Y9	72.50	424.56	10.00	11.54
Y10	23.31	278.50	19.33	8.85
Y11	0.00	0.00	31.00	13.30
Y12	66.39	331.12	20.33	9.46

林分郁闭度和密度对林下灌、草层的影响 (图 5)。路径分析发现, 乔木层郁闭度、林分密度与林下灌木层盖度存在负效应关系, 通径系数分别为

-0.21 和 -0.26。林分郁闭度与林下草本层盖度、地上生物量、物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数之间均存在正效应关系, 林分密度则相反,

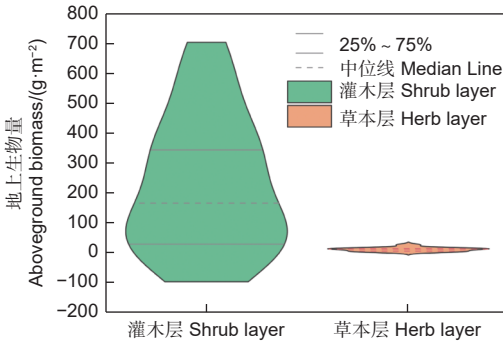


图 4 林下灌、草层地上生物量分布

Fig. 4 Aboveground biomass distribution of shrub and grass layer

表现为负效应关系，但两者对林下草本层的影响均未达到显著水平 ($P>0.05$)。灌木层盖度与草本层盖度、地上生物量和物种丰富度存在正效应关系，而灌木层地上生物量与草本层各指标之间存在负效应关系，其中，灌木层地上生物量与草本层地上生物量之间的通径系数最大，为 -0.42 ，但均未达到显著水平。

4 讨论

在植被恢复演替过程中，由于优先效应、扩散限制和物种相互作用，群落组成也随之发生变化^[22]。人工林林下植被的恢复一方面受到所处环境条件的影响，另一方面取决于林分结构及其变化^[23]。本研究发现，毛乌素沙地杨树人工林林下草本层以多年生植物为主，植物组成以豆科、禾本科、菊科植物为主，与已有同一地区相关研究结果基本一致^[24-25]，林下逐渐形成了近自然植被，但林下植物群落特征与林分因子密切相关。在人工林生态系统中，林下物种组成是生物和非生物因子综合

作用结果^[26]，其中，冠层结构可以通过改变林下光照条件和土壤水分而调控林下物种组成和分布，被认为是影响林下植被最重要因子之一^[27-29]，在本研究中，毛乌素沙地杨树人工林由于受气候干旱和缺乏抚育管理，其平均郁闭度较低（表 1），大部分样地林内光照相对充足，以喜阳旱生植物为优势种，如糙隐子草、阿尔泰狗娃花、硬质早熟禾、砂珍珠豆等植物重要值均较高。同时，林下伴有较多的虫实、刺藜、苦苣菜、狗尾草等沙地先锋植物和偏中生一、二年生植物，毛乌素沙地特殊的气候、土壤和林分结构下，林下植物组成表现出与天然植被（如油蒿群落）基本一致的规律^[24,30-31]。

林下物种多样性对维持人工林生态系的稳定性和功能具有重要的作用，是评价植被恢复成效的主要指标之一^[32]。已有研究表明，影响林下植物多样性的根本原因是上层乔木与林下植被对光照、水分、养分等林内资源竞争的结果^[33]。本研究中，随着林龄的增加，林内环境和群落结构发生变化，林下物种多样性在不同样地之间差异较大。林龄 32 a 时，林下草本植物多样性达到最大值，林龄达到 42 a 时，林分衰退明显，林下植物多样性有所降低，林下物种多样性降低的主要原因可能与杨树人工林密度和冠层结构的变化有关，林分进入过熟林阶段，树木死亡率增加，林分密度和郁闭度下降，一些耐阴植物由于适应不了环境变化而消退。

郁闭度和密度被普遍认为是影响林下植物物种组成和多样性的主要林分因子^[29,31]。林下草本植被不仅受乔木层的影响，而且同时受到林下灌木层的影响，结构方程模型路径分析结果表明，毛乌素沙地杨树人工林郁闭度和密度与林下灌木层盖度之间存在负效应关系，人工林郁闭度较高时，林下无灌

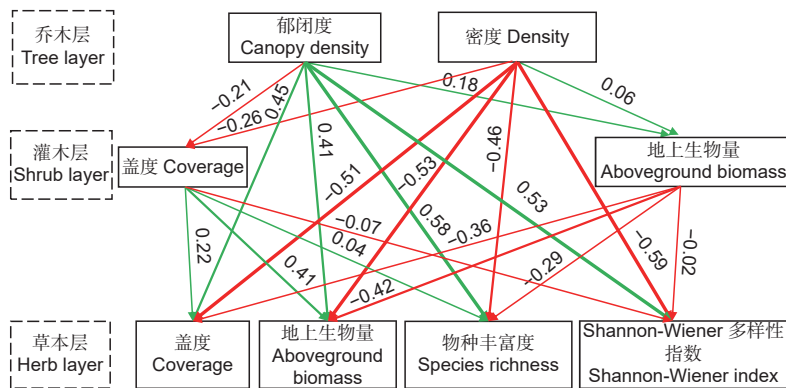


图 5 杨树人工林不同层片群落特征路径关系

Fig. 5 The characteristic path relationship of different layer community in poplar plantation

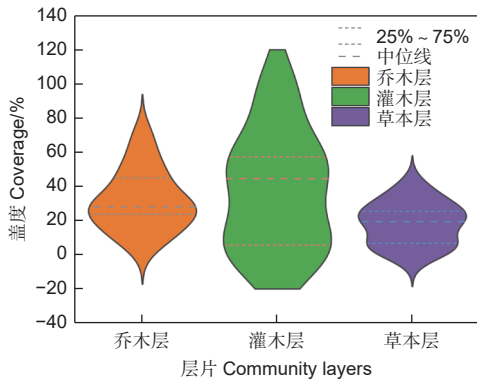


图6 群落不同层片盖度

Fig. 6 Different layer coverage of community

木层(样地Y3、Y11),林分郁闭度对林下灌木层的发育具有重要影响,这是由于随着郁闭度和密度的增加,林下光照受到影响,不利于沙地阳性灌木的生长,类似结果在其他相关研究中也得以证实^[31,34]。本研究发现杨树人工林郁闭度的增加有利于林下草本层的发育,这可能郁闭度的增加能够有效改善林内微环境,减少土壤水分蒸发,从而增加草本植物多样性和生物量。林分密度也一定程度上影响林下植被,林分密度过大,乔木个体与林下灌木和草本植物的直接竞争使得林下灌、草层植物减少。灌木层盖度对草本层的影响与乔木层相似,灌木层盖度的增加有利于草本植物的定居和繁殖,而灌木层地上生物量对草本层产生负效应,这可能是由于灌木层地上生物量越高,其个体数也相对多,与草本植物的竞争更加激烈,从而影响了草本植物的生长。本研究还发现,群落不同层片结构之间存在盖度“互补性”机制(图6),即乔木层盖度最大时灌木层盖度有所减小,草本层盖度增加。从图6可以看出,不同层片盖度相互影响,使不同层片充分利用光照,提高群落生产力,这也从另一个方面阐释了林冠层对林下植被的影响机制。综上,毛乌素沙地人工造林应采取乔灌结合,同时控制乔木造林密度,如小面积群团状造林,有利于形成乔灌互补的复层防风固沙林。

5 结论

本研究发现毛乌素沙地杨树人工林林下共发现草本植物32种、灌木3种,隶属于12科28属,其中豆科、禾本科、菊科植物最多。灌木层种类少,但与草本相比其生物量较高。草本层以早生多年生植物为主,伴有沙地先锋植物和偏中生一、二

年生植物,林龄32a时物种多样性指数最高。林分郁闭度和密度与林下灌木层盖度之间存在负效应关系,郁闭度较高时,林下无灌木层形成。林分郁闭度的增加有利于草本层的发育,而林分密度与草本层存在负效应关系,灌木层对草本层的影响与乔木层相似。

参考文献:

- [1] Millennium ecosystem assessment. ecosystems and human well-being: desertification synthesis[R]. Washington D. C: World Resource Institute, 2005: 18-20.
- [2] LIU N, ZHOU L H, CHEN Y, *et al.* Identification and evaluation of desertification reversal in China: indicators and methods review[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(3): 190-200.
- [3] XU J, YIN R, LI Z, *et al.* China's ecological rehabilitation: Unprecedented efforts, dramatic impacts, and requisite policies[J]. Ecological Economics, 2006, 57(4): 595-607.
- [4] LI Y, CAO Z, LONG H, *et al.* Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 697-715.
- [5] 魏晓华, 郑吉, 刘国华, 等. 人工林碳汇潜力的新概念及应用[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 3881-3885.
- [6] 康满春, 蔡永茂, 王小平, 等. 表层阻为和环境因素对杨树(*Populus sp.*)人工林蒸散发的控制[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5508-5518.
- [7] WANG X M, ZHANG C X, HASI E, *et al.* Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China?[J]. Journal of Arid Environments, 2021, 74(1): 13-22.
- [8] 苗博, 孟平, 张劲松, 等. 基于稳定同位素和热扩散技术的张北杨树水分关系差异[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2111-2118.
- [9] RAWLIK M, KASPROWICZ M, JAGODZIŃSKI A M. Differentiation of herb layer vascular flora in reclaimed areas depends on the species composition of forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 409: 541-551.
- [10] 吴彦, 刘庆, 何海, 等. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [11] TILMAN D, WEDIN D, KNOPS J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 379: 718-720.
- [12] GILLIAM F S, NOTES A. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems[J]. Bioscience, 2007, 57(10): 845-858.

- [13] 朱媛君, 杨晓晖, 时忠杰, 等. 林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37 (10): 2869-2879.
- [14] 李 萌, 陈永康, 徐浩成, 等. 不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响[J]. 生态学报, 2020, 40 (14): 4985-4993.
- [15] 于立忠, 于水强, 史建伟, 等. 不同类型人工阔叶红松林高等植物物种多样性[J]. 生态学杂志, 2005, 24 (11): 1253-1257.
- [16] 李民义, 张建军, 郭宝妮, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J]. 生态学杂志, 2013, 32 (5): 1083-1090.
- [17] 赵丽娅, 高丹丹, 熊炳桥, 等. 科尔沁沙地恢复演替进程中群落物种多样性与地上生物量的关系[J]. 生态学报, 2017, 37 (12): 4108-4117.
- [18] 张涵丹, 康希睿, 邵文豪, 等. 不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J]. 生态学报, 2021, 41 (6): 2118-2128.
- [19] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2 (4): 231-239.
- [20] 周 新. 基于结构方程模型的中国碳排放影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [21] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [22] HELSEN K, HERMY M, HONNAY O. Trait but not species convergence during plant community assembly in restored semi-natural grasslands[J]. *Oikos*, 2012, 121(12): 2121-2130.
- [23] 王明明, 刘新平, 何玉惠, 等. 科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素[J]. 植物生态学报, 2019, 43 (8): 672-684.
- [24] 刘建康. 毛乌素沙地油蒿群落退化与封育恢复特征及机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [25] 王 妍, 吴 波, 卢 琦, 等. 毛乌素沙地油蒿群落的物种组成与数量分类[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28 (S2): 52-56.
- [26] 赵 芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林林下植被盖度与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (4): 1071-1076.
- [27] BARBIER S, GOSELIN F, BALANDIER P. Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved-A critical review for temperate and boreal forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(1): 1-15.
- [28] YU M, SUN O J. Effects of forest patch type and site on herb-layer vegetation in a temperate forest ecosystem[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 14-20.
- [29] WULF M. Herb layer response to broadleaf tree species with different leaf litter quality and canopy structure in temperate forests[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(3): 517-526.
- [30] 姜晓燕, 高圣杰, 蒋 燕, 等. 毛乌素沙地植被不同恢复阶段植物群落物种多样性、功能多样性和系统发育多样性[J]. 生物多样性, 2022, 30 (5): 18-28.
- [31] 郭弘婷, 纪小芳, 汪 成, 等. 我国人工林林下灌木层植物多样性空间变异及影响要素[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46 (4): 144-152.
- [32] 秦新生, 刘苑秋, 邢福武. 低丘人工林林下植被物种多样性初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11 (3): 223-228.
- [33] 王瑞华, 葛晓敏, 唐罗忠. 林下植被多样性、生物量及养分作用研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27 (1): 43-48.
- [34] 舒韦维, 卢立华, 李 华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2021, 41 (11): 4521-4530.

Characteristics of Understory Plant Community of Poplar Plantation in Mu Us Sandy Land

HU Er-cha^{1,2,3}, WANG Xiao-jiang¹, WANG Zheng^{1,2}, LI Zi-hao^{1,2}, HONG Guang-yu^{1,2}, LI Zhuo-fan^{1,2}, YANG Hai-feng^{1,2}, GAO Xiao-wei^{1,2}, ZHAO Xue-jun¹

(1. Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. Daqing Mountains Forest Ecosystem Research Station, Inner Mongolia, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To study the characteristics of understory plant communities of plantations and their relationship with stand factors, which is of great significance for evaluating the effectiveness of vegetation restoration in sandy areas and managing plantations. [Methods] In this study, based on the poplar plantation in Mu Us sandy land the understory plant community was investigated. The effects of stand factors such as canopy density and density on understory vegetation were studied. [Results] The results showed that a total of 32 species of herbaceous plants belonging to 28 genera of 12 families were found in the herbaceous layer under the poplar plantation in the study area. Among them, Leguminosae, Gramineae and Compositae plants were the most species, accounting for 62.51% of the total plant species. The life forms of understory herbaceous plants were mainly perennial herbaceous plants, accounting for 78.13% of the total species. The plant water ecotypes were mainly xerophytes and mesoxerophytes, accounting for 75.00% of the total species, followed by xeromesophytes and mesophytes. The Margalef richness index, Simpson dominance index, Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index of understory herb layer ranged from 1.20 to 3.17, 0.48 to 0.88, 0.95 to 2.34 and 0.16 to 0.48, respectively. The species diversity was the highest when the forest age was 32 years. The results of the structural equation model showed that canopy density and stand density were negatively correlated with the coverage of the understory shrub layer. When the plantation canopy density was high, no shrub layer was found under the forest. The increase of canopy density was beneficial to the development of herbaceous layer, and there was a negative effect relationship between stand density and herbaceous layer, which affects the growth of herbaceous plants under the forest. The effect of shrub layer on herbaceous layer was similar to that of tree layer. [Conclusion] The diversity of understory herbaceous plants in poplar plantations in Mu Us Sandy Land is high, and there are fewer shrub species. The size is obviously affected by stand factors such as canopy density and stand density. Appropriate regulation of stand density and structure will be conducive to the maintenance of understory species diversity and close-to-nature management of poplar plantations in Mu Us Sandy Land.

Keywords: poplar plantation; stand factors; understory vegetation; species diversity; Mu Us sandy land

(责任编辑: 张 研)