

DOI: 10.20103/j.stxb.202501070045

温馨,张妍妍,张志杰,王雪宜,梁昊,苏孟白,韩安霞,程小琴.七老图山人工林林分结构与土壤因子对林下草本物种多样性的影响.生态学报, 2025, 45(17): - .

Wen X, Zhang Y Y, Zhang Z J, Wang X Y, Liang H, Su M B, Han A X, Cheng X Q. Effects of stand structure and soil factors on understory herb diversity in Qilaotu Mountain plantation. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

七老图山人工林林分结构与土壤因子对林下草本物种多样性的影响

温 馨^{1,2}, 张妍妍^{1,2}, 张志杰³, 王雪宜^{1,2}, 梁 昊^{1,2}, 苏孟白^{1,2}, 韩安霞^{1,2}, 程小琴^{1,2,*}

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

2 内蒙古七老图山森林生态系统国家定位观测研究站, 赤峰 024000

3 内蒙古自治区呼和浩特市气象局, 呼和浩特 010020

摘要:随着人工林面积的逐渐增加,林下物种多样性在涵养水源、保持水土、提高森林生态系统稳定性等方面发挥重要作用。为探究影响林下物种多样性的关键因子,以七老图山华北落叶松人工林、油松人工林、樟子松人工林与华北落叶松与白桦人工混交林为研究对象,采用单因素方差分析、Pearson 相关性分析、逐步回归分析和变差分解等方法,筛选出影响物种多样性的关键因子及其环境因子对物种多样性的解释率。结果发现:(1)4 种典型人工林林下物种多样性丰富,共计:43 科 56 属 68 种,人工林下多以菊科、蔷薇科、毛茛科、禾本科、十字花科为主;(2)4 种林分类型中华北落叶松与白桦人工混交林林下物种多样性最高,为 32 科 45 属 47 种,并且物种多样性指数与其他三种林分类型存在明显差异。(3)通过 Pearson 相关性分析、逐步回归分析发现林分结构中胸径是影响物种多样性关键因子,林分密度、郁闭度、树高是影响物种多样性主要因子(4)进一步通过变差分解结果显示,林分结构的解释率最高,对 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数解释率分别为 49.1%、44.6%、50.3%、20.5%。因此,欲提高人工林下物种多样性,应当适当调整人工林上层林木的胸径,以此优化林分密度、郁闭度,改善林分结构,从而提高林下物种多样性。

关键词:林分结构;物种多样性;变差分解;环境因子

Effects of stand structure and soil factors on understory herb diversity in Qilaotu Mountain plantation

WEN Xin^{1,2}, ZHANG Yanyan^{1,2}, ZHANG Zhijie³, WANG Xueyi^{1,2}, LIANG Hao^{1,2}, SU Mengbai^{1,2}, HAN Anxia^{1,2}, CHENG Xiaoqin^{1,2,*}

1 School of Ecology and Conservation of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Qilaolu National Forest Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Chifeng 024000, China

3 Hohhot Meteorological Service in Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China

Abstract: As the area of plantation forests steadily expands, the diversity of understory species plays a significant and irreplaceable role in multiple aspects, such as water conservation, soil and water retention, and the enhancement of the stability of forest ecosystems. Maintaining and promoting understory species diversity are crucial for the healthy development and sustainable operation of forest ecosystems. In order to explore the key factors influencing the understory species diversity, this study took the *Larix principis-rupprechtii* plantation forest, *Pinus tabulaeformis* plantation forest, *Pinus sylvestris* plantation forest, and *L. principis-rupprechtii* × *Betula platyphylla* mixed plantation in the Qilaotu Mountains as the

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD220040304)

收稿日期:2025-01-07; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxq_200074@163.com

research objects. These forest types are representative plantation forests in this region, and research on them can provide valuable insights into the understory species diversity in similar forest ecosystems. This study employed a series of scientific research methods, including one-way analysis of variance, Pearson correlation analysis, stepwise regression analysis, and variation partitioning analysis. The results of the study were as follows: (1) The understory species diversity of the four typical plantation forests was abundant. In total, 68 species were recorded, which were classified into 56 genera across 43 families. Among these, the dominant families in the understory of the plantation forests were mainly Asteraceae, Rosaceae, Ranunculaceae, Poaceae, and Brassicaceae. These families were common in the understory of plantation forests and play important roles in maintaining the balance and functionality of the forest ecosystem. (2) Among the four forest stand types, *L. principis - rupprechtii* × *B. platyphylla* mixed plantation exhibited the highest level of understory species diversity, encompassing 47 species from 45 genera belonging to 32 families. Moreover, there were significant differences in the species diversity index when compared to the other three forest stand types. This indicates that the mixed plantation forest provided a more favorable environment for the growth and coexistence of various species. (3) Through Pearson correlation analysis and stepwise regression analysis, it was found that within the forest stand structure, the diameter at breast height (DBH) was the key factor influencing species diversity. In addition, forest stand density, canopy density, and tree height were identified as the main factors affecting species diversity. These factors interact with each other and jointly influence the understory species diversity. (4) Further analysis through variation partitioning revealed that the forest stand structure had the highest explanatory rate. Specifically, it accounted for 49.1%, 44.6%, 50.3%, and 20.5% of the Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index, Pielou evenness index, and Margalef richness index, respectively. This shows that the forest stand structure plays a dominant role in determining the understory species diversity. In conclusion, if we aim to increase the understory species diversity of plantation forests, it is necessary to appropriately adjust the DBH of the upper trees in the plantation forests. By doing so, we can optimize the forest stand density and canopy density, improve the forest stand structure, and ultimately enhance the understory species diversity. This study provides a theoretical basis and practical guidance for the management and protection of plantation forests and the promotion of forest ecosystem health.

Key Words: stand structure; species diversity; variation decomposition; environmental factors

物种多样性是生态学领域的重要问题,林下物种多样性在改善土壤理化性质、防止水土流失、增强生态系统稳定性等方面发挥重要作用^[1-3]。物种多样性是森林生态系统复杂和稳定的关键评价指标,众多研究发现物种多样性能够提高人工林稳定性与草本植物生产力^[4-6]。这主要是因为物种多样性的提高能够增大功能群的丰富度,造成功能群之间的生态补偿作用加强,从而提高生态系统的稳定性^[7]。当前的研究发现林下物种多样性会受到林分结构、气候因子、立地条件等环境因子的影响,在小尺度的研究中林分结构所引起林下环境中水、热、光、土壤养分的变化是物种多样性变化的关键因素^[1]。对于林分结构,邓婷婷^[8]认为林分密度是影响森林群落林下物种多样性的主要因子。胡文杰^[9]认为可以通过调整上层林分的胸径来提高林下的物种多样性。张林^[10]认为适当优化林分郁闭度,能够提高林下物种多样性综合指数水平。因此,合理的林分结构能够提高林下物种多样性。

土壤作为有机物分解与元素循环的主要场所,土壤生物作用过程量化是各类土壤理化性质指标,通常也是植物生存繁殖的限制因子^[9]。作为植物群落营养的主要来源,土壤自身的理化性质资源的可利用性,影响着植物的生理生态特征,同时也影响着种群动态与物种组成^[11-12]。在以往的研究中发现,土壤对物种多样性的影响因素是不同的。Xu^[13]发现土壤 pH 和有效磷是影响林木多样性的主要原因,谭一波^[14]发现土壤中的含水率、pH、全磷、全钾影响了桂西南蚬木林下植被物种多样性,王媚臻^[15]发现土壤中的氮、钾、有机质影响了林下物种多样性。较好的土壤环境能够协调水、养分与空气的关系,是影响林木与生态系统健康发展的基础。

人工林是森林资源的重要组成部分,为人类提供了大量的生态产品与服务^[16]。自 20 世纪 50 年代,我国主要通过天然林采伐迹地上种植单一的树种来满足木材产品的需求^[17-18]。与天然林相比,我国人工林自然植被水土保持性差,养分短缺,生态条件薄弱,物种较为单一^[5]。同乔木层相比,人工林中超过 80% 的物种来自草本层^[19],林下植被作为生态系统的重要植物群落,在促进人工林向更加韧性的林分结构进行演替发挥了重要作用^[20]。在前人的研究中,关于林下物种多样性的研究多集中在林下物种分布情况^[3,21],及其土壤因子^[4]与林分结构^[11,22]对物种多样性的影响等方面的研究,而关于小尺度的研究中影响物种多样性相关因素在生态系统功能驱动机制中的作用权重,却鲜有报道。七老图山位于河北与内蒙古交界处,植被类型复杂,人工林经营主要以近自然经营为主,林业经营的主要目标是通过提升森林生态效益与社会效益,推动森林健康发展。本研究以七老图山典型人工林林下植被为研究对象,探究其林下植被的分布情况,分析影响林下植被物种多样性的关键因素及其相关因素权重,旨在为七老图山人工林的植被保护与生态环境经营提供有效依据,实现森林可持续发展。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于内蒙古赤峰市喀喇沁旗旺业甸林场(118°09'E—118°30'E,41°21'N—41°39'N),地处燕山山脉北麓七老图山脉,海拔 800—1890m,年降水量为 400—600mm,年降水量多集中在 7—8 月份,年平均温度 4.2℃,无霜期 117d,属暖温带半干旱气候。土壤类型主要为棕壤,还有暗棕壤、褐土、草甸土等。林区经营面积约 2.8×10⁴hm²,区内主要乔木树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、樟子松(*Pinus sylvestris*),草本优势种包括蛇莓(*Duchesnea indica*)、白屈菜(*Chelidonium majus*)、细叶苔草(*Carex rigescens*)、鹅观草(*Elymus kamoji*)等。

1.2 样地设置与植被调查

2023 年 7 月在旺业甸林场,选取具有代表性的华北落叶松人工林(I)、油松人工林(II)、樟子松人工林(III)、华北落叶松与白桦人工混交林(IV)为研究对象,其中华北落叶松人工林 6 块样地,樟子松、油松、华北落叶松与白桦人工混交林各 3 块样方,样地规格为 20m×30m,共计 15 块样地(为消除边缘效应,所有样地距离道边 100m,各样地间隔至少 30m)。记录每个乔木样地的 X 和 Y 坐标、树高、胸径、冠幅、林分密度、坡度、海拔。在每个样地内,随机选取 10 块 1m×1m 的草本样方,共计 150 个样方。记录草本植物的名称、株数、高度与盖度。统计整理后样地基本概况见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 林分结构

将样地的胸径、树高,郁闭度、林分密度作为林分结构指标。郁闭度利用样线法测量,即对角线总长与冠幅总长之比为郁闭度。

1.3.2 土壤理化性质

利用五点取样法,每个样地取 0—20cm 混合土样,带回实验室进行化学指标的测定,环刀法测量土壤容重、土壤含水率。酸度计测量土壤 pH,重铬酸钾外加热法测量土壤有机碳,连续流动分析仪(AA3, SEAL Analytical GmbH, Germany)测量土壤全氮、土壤全磷。

1.3.3 林下物种多样性指数

Shannon-Wiener 指数是基于种个体出现的不确定来衡量物种多样性的高低,不确定性越高,多样性也就越高。Simpson 指数反映的是优势种在群落中的地位和作用,强调优势种的均匀度,Pielou 均匀度指数是用来衡量群落中各个种的相对密度的多样性指数^[23]。

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 3$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H) : H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

表 1 样地基本概况表

Table 1 Basic survey of the sample site

林分类型 Forest type	样地 Sample plot	树高 Height/m	胸径 DBH/cm	坡度 Slope gradient/(°)	海拔 Elevation/m	林分密度 Stand densit/(株/hm ²)
I	1	20.091	21.28	20.3	1196.1	1017
	2	19.425	19.92	20.5	1202.64	917
	3	19.936	21.31	19	1218.97	733
	4	18.602	15.47	18.5	1241.29	917
	5	16.991	14.97	23.5	1239.56	1100
	6	16.599	14.71	23	1251.98	1133
II	1	11.83	14.42	25	1169.7	1000
	2	17.46	18.46	22.8	1170.4	883
	3	14.66	15.8	25	1177.1	1267
III	1	14.46	15.65	20	1295.72	1817
	2	15.56	15.1	20	1296.3	1817
	3	16.91	18.58	14	1304.09	1333
IV	1	15.451	15.45	22.5	1208.95	1500
	2	15.579	15.58	19.8	1209.61	1650
	3	17.887	17.89	20.3	1210.68	1383

DBH:胸径 Diameter at breast height; I:华北落叶松人工林 *Larix principis-rupprechtii* plantation; II:油松人工林 *Pinus tabulaeformis* plantation; III:樟子松人工林 *Pinus sylvestris* plantation; IV:华北落叶松与白桦人工混交林 *Larix principis-rupprechtii*×*Betula platyphylla* mixed plantation

$$\text{Simpson 多样性指数}(D): D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(J): J = \frac{H}{\ln S}$$

$$\text{Margalef 丰富度指数}(M): M = \frac{S-1}{\ln N}$$

式中, P_i 表示样方内第 i 个物种的重要值占全部物种重要值的比重。 H 表示 Shannon-Wiener 指数, D 表示 Simpson 多样性指数, J 表示 Pielou 均匀度指数, S 表示物种数量, M 表示 Margalef 丰富度指数。

1.3.4 数据分析

首先 Excel 对数据进行统计分析,利用 R 语言软件的“vegan”包计算物种多样性指数。在 SPSS Statistics 27.0 软件中对不同林分类型下物种多样性指数进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯检验, Pearson 相关性分析物种多样性指数与林分结构、土壤因子的相关性,多元逐步回归分析影响物种多样性变化的关键因子,最后在 R4.4.2 进行变差分解,解析林分结构与土壤因子贡献度。

2 结果与分析

2.1 林下草本群落结构特征

本次研究共发现草本植物 68 种,隶属于 43 科 56 属。其中华北落叶松人工林 27 科 36 属 36 种,油松人工林 21 科 27 属 27 种,樟子松人工林 21 科 31 属 32 种,华北落叶松与白桦人工混交林 32 科 45 属 47 种,四种人工林林下多以菊科、蔷薇科、毛茛科、禾本科、十字花科为主。表 2 为四种不同林分类型下重要值排名前 5 的主要物种。华北落叶松人工林主要优势种是蛇莓 (*Duchesnea indica*)、白屈菜 (*Chelidonium majus*)、细叶苔草 (*Carex rigescens*)、鹅观草 (*Elymus kamoji*) 和唐松草 (*Thalictrum L.*),其重要值依次为 30.55%、14.59%、8.87%、2.79%、3.42%。油松人工林主要优势种是蛇莓、细叶苔草、鹅观草、白屈菜和唐松草,其重要值分别为 36.77%、14.80%、12.45%、6.94%、2.87%。樟子松人工林主要优势种是蛇莓、细叶苔草、鹅观草、老鹳草 (*Geranium wilfordii Maxim*) 和小玉竹 (*Polygonatum odoratum*),重要值分别为 51.92%、10.56%、6.44%、5.27%、

3.37%。华北落叶松与白桦人工混交林的主要优势种为细叶苔草、白屈菜、蔓孩儿参(*Pseudostellaria davidii*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)和龙牙草(*Agrimonia pilosa Ledeb*),其重要值分别为 29.83%、11.57%、10.19%、6.00%、3.78%。

表 2 不同林分类型下草本物种组成重要值前 5 名

Table 2 Top 5 important values of herbaceous species composition under different forest types

林分类型 Forest type	林下主要物种组成及其重要值/% Composition and important value of main species in understory	重要值之和/% Sum of important values
I	蛇莓(30.55)、白屈菜(14.59)、细叶苔草(8.87)、鹅观草(2.79)、唐松草(3.42) <i>Duchesnea indica</i> (30.55)、 <i>Chelidonium majus</i> (14.59)、 <i>Carex rigescens</i> (8.87)、 <i>Elymus kamoji</i> (2.79)、 <i>Thalictrum L</i> (3.42)	60.22
II	蛇莓(36.77)、细叶苔草(14.80)、鹅观草(12.45)、白屈菜(6.94)、唐松草(2.87) <i>Duchesnea indica</i> (36.77)、 <i>Carex rigescens</i> (14.80)、 <i>Chelidonium majus</i> (12.45)、 <i>Chelidonium majus</i> (6.94)、 <i>Thalictrum L</i> (2.87)	73.83
III	蛇莓(51.92)、细叶苔草(10.56)、鹅观草(6.44)、老鹳草(5.27)、小玉竹(3.37) <i>Duchesnea indica</i> (51.92)、 <i>Carex rigescens</i> (10.56)、 <i>Elymus kamoji</i> (6.44)、 <i>Geranium wilfordii Maxim</i> (5.27)、 <i>Polygonatum odoratum</i> (3.37)	77.56
IV	细叶苔草(29.83)、白屈菜(11.57)、蔓孩儿参(10.19)、舞鹤草(6.00)、龙牙草(3.78) <i>Carex rigescens</i> (29.83)、 <i>Chelidonium majus</i> (11.57)、 <i>Pseudostellaria davidii</i> (10.19)、 <i>Maianthemum bifolium</i> (6.00)、 <i>Agrimonia pilosa Ledeb</i> (3.78)	61.37

由表 3 可知,华北落叶松与白桦人工混交林 4 种物种多样性指数最高,分别为 2.300、0.823、0.690、4.770,樟子松人工林 4 种物种多样性指数最低分别为 0.833、0.320、0.293、2.440,二者呈现显著差异性($P<0.05$)。华北落叶松人工林与油松人工林的 4 种物种多样性指数无显著差异($P<0.05$)。

表 3 不同林分类型下物种多样性

Table 3 Species diversity under different forest types

林分类型 Forest type	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index
I	1.582±0.260ab	0.608±0.089ab	0.516±0.068ab	3.525±0.481ab
II	1.340±0.325ab	0.510±0.131ab	0.483±0.104ab	2.660±0.307b
III	0.833±0.339b	0.320±0.142b	0.293±0.101b	2.440±0.656b
IV	2.300±0.196a	0.823±0.029a	0.690±0.0321a	4.770±0.754a

不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.2 林分结构与土壤因子变量特征

林分结构与土壤因子如表 4。林分结构因子中,林分的平均密度、郁闭度、平均树高、平均胸径分别为 1231 株/hm²、0.59、16.76m、16.48cm。土壤因子中的平均土壤容重、土壤含水率、土壤 pH、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷分别为:2.08g/cm³、22.59%、5.50、15.60g/kg、1.72g/kg、0.49g/kg。

2.3 林分结构和土壤因子与物种多样性指数相关性

由表 5 可知,林分结构因子中,胸径与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数均呈现极显著负相关($P<0.01$)其他林分结构因子与物种多样性指数不相关。土壤含水率与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数呈显著正相关($P<0.05$)。土壤有机碳与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数均呈显著正相关($P<0.05$)。

2.4 物种多样性指数与林分结构和土壤因子多元回归分析

由表 6 可知,多元回归方程的拟合系数良好。影响 Shannon-Wiener 多样性指数的重要因子是胸径、林分密度、郁闭度。影响 Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数的重要因子是胸径与郁闭度。影响 Margalef 丰富度指数的重要因子是胸径与树高。总体来看,林分结构是影响草本物种多样性主要因子,其中胸径是影响草本物种多样性最为关键的因子。

表 4 四种林分类型林分结构因子和土壤因子变量特征

Table 4 Variable characteristics of stand structure factors and soil factors in the four types of stands

类型 Type	变量 Variable	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	取值范围 Value range
林分结构 Stand non-spatial structure	SD/(株/hm ²) CD H/m DBH/cm	1231 0.59 16.76 16.48	344.52 0.05 2.27 2.73	733.00—1817 0.51—0.67 11.83—20.10 12.52—21.31
土壤因子 Soil factors	SBD/(g/cm ³) SWC/% pH SOC/(g/kg) TN/(g/kg) TP/(g/kg)	2.08 22.59 5.50 15.60 1.72 0.49	0.21 7.62 0.25 2.53 0.65 0.12	1.63—2.34 13.31—33.86 4.81—5.85 12.00—20.89 0.94—2.82 0.34—0.68

SD:林分密度 Stand density; CD:郁闭度 Canopy density; H:树高 Height; DBH:胸径 Diameter at breast height; SBD:土壤容重 Soil bulk density; SWC:土壤含水率 Soil water content; pH:土壤酸碱度 Soil pH; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; TN:土壤全氮 Total nitrogen of soil; TP:土壤全磷 Total phosphorus of soil

表 5 林分结构和土壤因子与物种多样性指数相关性

Table 5 Relationship between stand structure and soil factors and species diversity index

变量 variable	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index
SD/(株/hm ²)	0.122	0.097	0.081	0.268
CD	-0.132	-0.172	-0.149	-0.15
H/m	-0.189	-0.152	-0.163	-0.143
DBH/cm	-0.807 **	-0.790 **	-0.784 **	-0.725 **
SBD/(g/cm ³)	-0.236	-0.245	-0.215	-0.2
SWC/%	0.518 *	0.520 *	0.49	0.525 *
pH	0.24	0.235	0.349	0.188
SOC/(g/kg)	0.571 *	0.588 *	0.556 *	0.389
TN/(g/kg)	0.339	0.338	0.426	0.146
TP/(g/kg)	-0.273	-0.252	-0.179	-0.409

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

表 6 物种多样性指数多元回归方程

Table 6 Multiple regression equation of species diversity index

物种多样性指数 Species diversity index	回归方程 Regression equation	R^2
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	$Y = 10.698 - 0.284DBH - 0.001SD - 5.384CD$	0.790
Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	$Y = 3.854 - 0.100DBH - 1.907CD$	0.785
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	$Y = 3.036 - 0.079DBH - 1.409CD$	0.805
Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	$Y = 5.739 - 0.520DBH + 0.371H$	0.605

通过进一步的变差分解(图 1),林分结构因子对 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数解释率最大,分别为 49.1%、44.6%、50.3%、20.5%。其次土壤因子与林分结构二者对 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数共同解释率分别为 26.7%、31.4%、24.9%、34.4%。

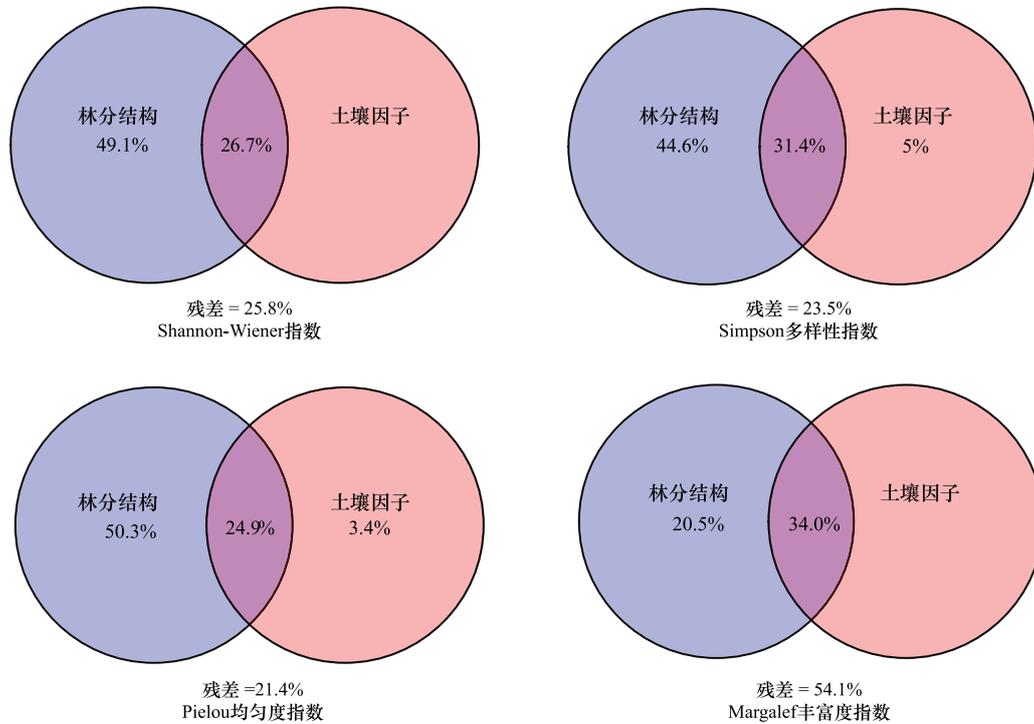


图1 物种多样性和林分结构与土壤因子变差分解图

Fig.1 Variation breakdown map of species diversity, stand structure and soil factors

3 讨论

3.1 不同林分类型下草本物种多样性

作为生态系统的重要组成部分,林下物种多样性的提高对森林生态系统的可持续管理意义重大^[24]。本研究中共发现草本植物 43 科 56 属 68 种,林下物种多样性丰富。在四种不同林分类型下,华北落叶松与白桦人工混交林科、属与种数最多,相较于华北落叶松人工林、樟子松人工林、油松人工林 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数与 Margalef 丰富度指数高,一方面混交林形成多层次的林分结构,为林下草本的生长提供了充足空间。另一方面混交林中具有发达的根系、浓密树冠,能够增加丰富的凋落物,改良土壤养分^[25-26],从而使得混交林在物种丰富度、物种均匀度上明显优于其他人工林。

3.2 林分结构和土壤因子对物种多样性的影响

3.2.1 林分结构对物种多样性的影响

在森林生态系统中,林下植被生物周转率高,在维持生物多样性与稳定性及其生产力可持续方面发挥重要作用^[26],林分结构是森林生长的重要方面,同时也是森林管理研究的主要因素,林下植物能够提高生态系统功能。提高森林生物量^[27]。因此明确影响人工林林下物种多样主要影响因素对于森林的管理经营具有重要意义。本研究通过 Pearson 相关性分析、逐步回归、变差分解发现影响林下物种多样性变化的主要是林分结构。林分结构因子中胸径是影响林下物种多样性的关键因子,树高、密度、郁闭度是影响林下物种多样性的主要因子。林分结构主要通过改变人工林中的冠层结构来影响林内小环境的空气流动与阳光强度,进而对林下物种多样性产生影响^[28]。Rago^[29]在对巴塔哥尼亚黄松人工林森林群落的研究中发现,在森林树冠下,太阳辐射大大减少,太阳辐射的可用性取决于树木的组成和林分结构。总辐射主要由直接辐射和漫射辐射组成。从太阳接收到的直接辐射不会改变其方向,而漫射辐射是多向的,因为它被大气散射。这两个组成部分对植物发育至关重要。林下植物对于漫散辐射的变化敏感。对于许多针叶林,林下层的太阳辐射会随着林分胸径的增加呈指数级减少。林分密度对物种多样性的影响主要通过控制乔木层的透光性及其林木之间

的竞争来影响林下物种分布与种类,林分密度过低,乔木的生长空间大,对于土壤等养分的利用多,林下植物可利用养分少,林下植物生长受抑制,林分密度过高,树高较小,乔木之间的种内竞争会加剧对养分的掠夺,浓密的树冠,较小的郁闭度,林木的遮蔽作用造成林下的植物生长受限^[30]。因此,欲提高林下植物物种多样性与生态系统稳定性,可以通过对林木进行适当的间伐,来控制林分胸径、郁闭度与林分密度来改善当地的人工林生态环境。

3.2.2 土壤因子对物种多样性的影响

植物多样性是衡量群落物种均匀度与丰富度的指标,与植物生长环境之间存在密不可分的关系^[31],土壤是植物生长的载体,土壤环境的变化会影响植物的生长和分布^[32],反过来,植物的生长与分布对土壤结构产生制约,能够保持土壤充足的肥力与活性。而在本研究中,土壤因子中土壤含水率与土壤有机碳与物种多样性之间呈正相关性。变差分解发现土壤因子在一定程度上对物种多样性的占据一定的解释率。在土壤因子中,土壤水分并不会直接影响植物丰富度,但是会通过影响养分的可利用性、控制微生物的活动及其土壤中的pH来进一步影响物种的分布。土壤有机碳反映了土壤的肥力状况,土壤有机质与物种多样性之间的正相关性可能是由高物种多样性导致高土壤微生物和土壤聚集体,两者促进了土壤有机碳的封存^[33]。

在本研究中林分结构与土壤因子相比占据较高的解释率。林分结构的变化可以以多种方式直接或间接的影响土壤因子的变化。当森林群落中形成浓密的树冠,会通过改变森林环境影响土壤温度、理化性质及其土壤微生物群落的结构和功能,复杂的林分结构能够提供更多的生态位,改善生物和非生物环境之间的相互作用^[34]。研究显示,对林分进行适当的调整,能够改变林内的光照强度,促进植物对有效磷和速效钾的吸收,从而提高凋落物的分解速度,增加回归土壤养分含量,延长土壤肥力时效^[35]。

4 结论

本研究通过调查七老图山4种典型人工林,发现七老图山林下植被物种较为丰富。共发现43科56属68种,华北落叶松与白桦人工混交林林下物种多样性较为丰富。林分结构与土壤因子与林下物种多样性具有一定的相关性。林分结构中胸径、林分密度、树高、郁闭度是影响林下物种多样性的因子,其中胸径是影响物种多样性的关键因子。因此在未来的林分经营与改造中,可进行适当的间伐,调整人工林上层林木的胸径,优化林分密度,改善林分特征,以此提高林下物种多样性与土壤养分肥力,促进人工林林下更新来达到提高林下物种多样性的目的,为七老图山人工林的可持续经营提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Cui R R, Qi S, Wu B C, Zhang D, Zhang L, Zhou P, Ma N, Huang X. The influence of stand structure on understory herbaceous plants species diversity of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing, China. *Forests*, 2022, 13(11): 1921.
- [2] 李婷婷,唐永彬,周润惠,余飞燕,董洪君,王敏,郝建锋. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2021, 41(3): 1168-1177.
- [3] 张涵丹,康希睿,邵文豪,杨旭,张建锋,刘学全,陈光才. 不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征. *生态学报*, 2021, 41(6): 2118-2128.
- [4] 陆海飞,徐建民,李光友,马宁,粟国磊,张云东. 尾巨桉林不同生长发育阶段的土壤理化性质与林下植物多样性的动态变化趋势及其规律. *林业科学研究*, 2024, 37(1): 82-91.
- [5] Hou L Y, Zhang Y Q, Li Z C, Shao G D, Song L G, Sun Q W. Comparison of soil properties, understory vegetation species diversities and soil microbial diversities between Chinese fir plantation and close-to-natural forest. *Forests*, 2021, 12(5): 632.
- [6] Chen S S, Wu S J, Yang J. Forest management has a mixed effect on understory biomass, but understory species diversity and stand structure are key. *European Journal of Forest Research*, 2025; (prepublish): 1-11.
- [7] 袁梓裕,张路,廖李容,王杰,雷石龙,刘国彬,方怒放,张超. 黄土高原草地植物多样性与群落稳定性的关系及其驱动因素. *生态学报*, 2023, 43(1): 60-69.
- [8] 邓婷婷,魏岩,任思远,祝燕. 北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响. *生物多样性*, 2023, 31(7): 18-29.
- [9] 胡文杰,潘磊,雷静品,唐万鹏,庞宏东,崔鸿侠,王晓荣. 三峡库区马尾松(*Pinus massoniana*)林林分结构特征对灌木层物种多样性的

- 影响. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1332-1340.
- [10] 张林, 周飘, 齐实, 张岱, 伍冰晨, 崔冉冉. 侧柏人工林林分空间结构对林下草本多样性的差异性影响及其关联度. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1794-1801.
- [11] 苏天成, 向琳, 陈聪琳, 喻静, 张瀚文, 李婧, 王琴, 王芳, 郝建锋. 营林措施对成都绕城高速路域杨树人工林物种多样性和土壤理化性质的影响. 生态学杂志, 2023, 42(1): 58.
- [12] Wu H, Liu Y X, Zhang T T, Xu M X, Rao B Q. Impacts of soil properties on species diversity and structure in *Alternanthera philoxeroides*-invaded and native plant communities. *Plants*, 2024, 13(9): 1196.
- [13] Xu W M, Liu L, He T H, Cao M, Sha L Q, Hu Y H, Li Q M, Li J. Soil properties drive a negative correlation between species diversity and genetic diversity in a tropical seasonal rainforest. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 20652.
- [14] 谭一波, 申文辉, 付孜, 郑威, 欧芷阳, 谭长强, 彭玉华, 庞世龙, 何琴飞, 黄小荣, 何峰. 环境因子对桂西南蚬木林下植被物种多样性变异的解释. 生物多样性, 2019, 27(9): 970-983.
- [15] 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 刘佳, 刘宇航, 王宇, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. 生态学报, 2019, 39(3): 981-988.
- [16] 李茜, 王晖, 栾军伟, 高丙, 王一, 刘世荣. 树种多样性和土壤微生物多样性对人工林生产力的影响. 生态学报, 2023, 43(12): 4984-4994.
- [17] Han W Y, Chen L, Su X K, Liu D, Jin T T, Shi S L, Li T, Liu G H. Effects of soil physico-chemical properties on plant species diversity along an elevation gradient over alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 822268.
- [18] 尤业明, 徐佳玉, 蔡道雄, 刘世荣, 朱宏光, 温远光. 广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释. 生态学报, 2016, 36(1), 164-172.
- [19] Geng Q W, Arif M, Yin F, Chen Y Y, Gao J, Liu J C, Liu X L, He X R, Wu Y Y, Zheng J, Li C X. Characteristics of forest understory herbaceous vegetation and its influencing factors in biodiversity hotspots in China. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112634.
- [20] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [21] 卢子欣, 杨漫, 李彬, 胡俊杰, 于海彬. 喜马拉雅山脉种子植物海拔梯度分布格局及其影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(07): 1787-1796.
- [22] 牛一迪, 蔡体久. 大兴安岭北部次生林演替过程中物种多样性的变化及其影响因子. 植物生态学报, 2024, 48(3): 349-363.
- [23] 赵一阳, 德永军, 刘艳玉, 高广磊, 蓝登明. 七老图山种子植物区系研究. 干旱区资源与环境, 2018, 32(6): 143-148.
- [24] Pan P, Zhao F, Ning J K, Zhang L, Ouyang X Z, Zang H. Impact of understory vegetation on soil carbon and nitrogen dynamic in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0191952.
- [25] 张炜, 董文渊, 钟欢, 李吉, 柳治伦, 吴义远, 浦婵. 不同混交类型对笋竹生长及土壤养分空间差异的影响. 西部林业科学, 2020, 49(6): 70-75, 84.
- [26] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 委霞, 庞一凡. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(24): 9164-9173.
- [27] Liang W J, Wei X. Relationships between ecosystems above and below ground including forest structure, herb diversity and soil properties in the mountainous area of Northern China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01228.
- [28] 陈笑, 李远航, 左亚凡, 林莎, 初鼎晋, 贺康宁. 林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1396-1407.
- [29] Rago M M, Urretavizcaya M F, Defossé G E. Relationships among forest structure, solar radiation, and plant community in ponderosa pine plantations in the Patagonian steppe. *Forest Ecology and Management*, 2021, 502: 119749.
- [30] 胡亚伟, 施政乐, 刘畅, 徐勤涛, 张建军. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2072-2080.
- [31] 孙岩, 何明珠, 王立. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响. 生态学报, 2018, 38(7): 2425-2433.
- [32] 马建国, 朱怀德, 李玉满, 杨小倩, 姚梦凡, 杨振辉, 王晓波. 土壤水分影响青藏高原东部高寒草地植物群落特征及生态系统多功能性. 生态学杂志, 2024, 43(1): 1-7.
- [33] Spohn M, Bagchi S, Biederman L A, Borer E T, Bräthen K A, Bugalho M N, Caldeira M C, Catford J A, Collins S L, Eisenhauer N, Hagenah N, Haider S, Hautier Y, Knops J M H, Koerner S E, Laanisto L, Lekberg Y, Martina J P, Martinson H, McCulley R L, Peri P L, Macek P, Power S A, Risch A C, Roscher C, Seabloom E W, Stevens C, Veen G F, Virtanen R, Yahdjian L. The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6624.
- [34] Zhou G H, Long F Y, Zu L, Jarvie S, Peng Y, Zang L P, Chen D M, Zhang G Q, Sui M Z, He Y J, Liu Q F. Stand spatial structure and microbial diversity are key drivers of soil multifunctionality during secondary succession in degraded Karst forests. *Science of the Total Environment*, 2024, 937: 173504.
- [35] 舒韦维, 卢立华, 李华, 农友, 何日明, 陈海, 黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.