

# 林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响

陈笑, 李远航, 左亚凡, 林莎, 初鼎晋, 贺康宁\*

(北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 林下草本植物是森林生态系统的重要组成部分, 对维持森林群落演替和发展具有重要的生态功能。该研究以青海省互助北山林场青海云杉纯林(I)、红桦纯林(II)、青杨纯林(III)、阔叶混交林(IV)和针阔叶混交林(V) 5种典型林分为研究对象, 采用典型取样法在各林分选择4个20 m×20 m的样地, 对样地内所有树木进行每木检尺, 每个样地设置5个1 m×1 m的草本小样方, 调查记录林下草本植物, 并分层钻取5个小样方的土样进行分析; 采用灰色关联法分析林下草本多样性与林分特征、土壤养分特征之间的关系, 以明确影响林下草本物种多样性的主导因子, 为该区人工林地的改造与经营提供理论依据。结果表明: (1) 5种林分林下共发现草本植物86种, 分属30科74属, 其中林分V的植物科、属、种数量均最多(25科42属49种), 林分I均最少(17科26属27种); 林分I、III、IV中草本层均以野草莓的重要值最大(分别为44.42%、20.29%、23.05%), 林分II、V分别以山尖子、野草莓、黑麦草为优势种, 其重要值分别为20.97%、13.95%、13.68%和8.34%、16.83%、27.82%。(2) 5种林分的林下草本物种丰富度(S)、Shannon-Wiener多样性指数(D)、Simpson多样性指数(H)均差异显著( $P < 0.05$ ), 而Pielou均匀度指数(J)差异不显著, 但S、D、H、J均表现为阔叶纯林(II和III)、混交林(IV和V)高于针叶纯林(I)。(3) 不同林分间的林分密度(SD)、平均胸径(DBH)、平均树高(H)、平均冠幅(CW)均无显著差异, 但平均胸径、平均树高、平均冠幅在整体上表现为针阔混交林>阔叶混交林>阔叶纯林>针叶纯林。(4) 土壤碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、有机质(SOC)含量及酸碱度(pH)均表现为混交林和阔叶纯林高于针叶纯林, 且土壤AN、AP、AK、SOC含量均随土层深度增加而降低, 土壤pH值随土层深度增加而增加。(5) 研究认为, 森林生态系统中林下草本物种多样性对林分特征和土壤养分特征均有显著响应, 林分平均胸径是影响草本多样性最主要的林分因子, 碱解氮是最主要的土壤养分特征。因此, 在未来林分改造中, 积极改善人工林建设模式, 优化林分特征, 提升土壤肥力, 以提高林下草本植物的多样性, 维持林分的稳定和可持续发展。

**关键词:** 人工林; 草本物种多样性; 土壤养分; 林分特征; 灰色关联度

**中图分类号:** Q948.1; S718.5

**文献标志码:** A

## Effects of Stand Characteristics and Soil Nutrient Characteristics on Herbaceous Diversity

CHEN Xiao, LI Yuanhang, ZUO Yafan, LIN Sha, CHU Dingjin, HE Kangning\*

(School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Understory herbaceous plants are an important part of forest ecosystems and have important ecological functions for maintaining the succession and development of forest communities. In this study, *Picea crassifolia* forest (I), *Betula albosinensis* forest (II), *Populus cathayana* forest (III), Broad-leaved

收稿日期: 2021-11-03; 修改稿收到日期: 2022-07-15

基金项目: 青海省科技厅重点研发与转化计划(2020-SF-144-1)

作者简介: 陈笑(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: 13593300601@163.com

\* 通信作者: 贺康宁, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

mixed forest (Ⅳ) and Coniferous and broad-leaved mixed forest (Ⅴ), these five different stand types of plantations in Huzhu Beishan Forest Farm, which located in the east of Qinghai Province, were selected as the research object. Typical sampling method was used to select four 20 m by 20 m plots in each stand, and each tree in the plot was examined. Five 1 m by 1 m herbaceous quadrats were set in each plot. Understory herbaceous plants were investigated and recorded, and soil samples of five small quadrats were collected and analyzed. Grey correlation method was used to analyze the relationship between understory herbaceous diversity and stand characteristics, soil nutrient characteristics, in order to clarify the dominant factors affecting understory herbaceous species diversity, and provide scientific basis for local plantation management. The results showed that: (1) there existed 86 herb species belonging to 74 genera of 30 families. Among them, the number of families, genera and species in type Ⅴ was the largest (49 species, 42 genera, 25 families), and that in type Ⅰ was the least (27 species, 26 genera, 17 families). In type Ⅰ, Ⅲ and Ⅳ, the important values of *Fragaria vesca* in herb layer were the highest (44.42%, 20.29% and 23.05%, respectively). In stand Ⅱ and Ⅴ, the dominant species were *Parasenecio hastatus*, *Fragaria vesca*, and *Lolium perenne*, and their important values were 20.97%, 13.95%, 13.68% and 8.34%, 16.83% and 27.82%, respectively. (2) The species richness ( $S$ ), Shannon-Wiener diversity index ( $D$ ) and Simpson diversity index ( $H$ ) of the five stands were significantly different ( $P < 0.05$ ), but the Pielou evenness index ( $J$ ) was not significantly different. These indexes were lower in conifer pure forest (Ⅰ) than those in the broad-leaved pure forests (Ⅱ and Ⅲ) and mixed forests (Ⅳ and Ⅴ). (3) There were no significant differences in stand density (SD), average diameter at breast height (DBH), average tree height (H) and average crown width (CW) among different stand types, but these stand factors in different forest types decreased in order: coniferous and broad-leaved mixed forest > broad-leaved mixed forest > broad-leaved pure forests > conifer pure forest. (4) The contents of soil alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), soil organic matter (SOC) and potential of hydrogen (pH) were higher in the mixed forests and broad-leaved pure forests than those in conifer pure forest. With the increase of soil depth, the contents of AN, AP, AK, SOC decreased and pH increased. (5) The species diversity of understory herbaceous plants in the forest ecosystem responded significantly to the stand factors and soil nutrient characteristics, and DBH was the most important stand factor affecting the herb diversity, alkali-hydrolyzed nitrogen is the most important soil nutrient characteristic. Therefore, in the future forest reconstruction, we should improve the artificial forest construction mode, optimize the stand factors and enhance the soil fertility, so as to improve the diversity of the herbaceous plant and maintain the stability and sustainable development of the forest ecosystem.

**Key words:** plantation; herbaceous plant diversity; soil nutrient; stand characteristics; grey correlation

林下草本植物作为森林生态系统的重要组成部分,对维持森林群落物质循环<sup>[1]</sup>、防止水土流失<sup>[2]</sup>、改善林下小气候<sup>[3]</sup>、促进生态系统的演替和发展<sup>[4]</sup>等发挥着重要的生态功能,且这些生态功能均与草本植物的结构与多样性密切相关。有研究<sup>[5-8]</sup>表明,林分密度、平均胸径、平均树高、平均冠幅等林分因子和碱解氮、速效磷、速效钾、有机质及 pH 值等土壤养分含量直接决定了阳光、空气、水分、温度等植被发育所必需的条件,从而对林下草本层的生长发育产生显著影响。

影响林下草本多样性的因子众多,对于正确识别林下草本物种多样性的驱动因素已成为森林生态学研究的一个热点问题<sup>[9-10]</sup>。田奥等<sup>[11]</sup>发现地形因子中,仅有海拔对白刺花群落物种丰富度的影响显著;龙爱国等<sup>[12]</sup>发现坡位是影响马尾松林下草本

植物多样性的主要生态因子;郭佳佳等<sup>[13]</sup>发现海拔高度是影响太行山南段生境内连翘群落结构和规模化种植的重要环境因子。这些研究大多集中在海拔、坡位、坡度等地形因子对林下植被的影响,而针对林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的研究却很少,因此研究林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响具有重要的意义。

互助北山林场内现存的大量人工林,大多起源于 20 世纪 70~80 年代,这期间的造林以用材林的技术规程为主,林分结构单一,导致林下草本植物多样性较低,群落的稳定性较低,林分难以自然更新和持续发挥其生态效益,同时也不利于区域生态环境的改善。基于此,本研究以该区域 5 种典型人工林为研究对象,采用灰色关联法分析林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响,以期维持或改

善当地林下草本物种多样性,并对该区人工林地的改造与经营提供理论参考。其主要目标为:(1)分析不同人工林林下草本物种组成及多样性;(2)阐明不同人工林林分特征及土壤养分特征;(3)探讨影响林下草本物种多样性的主要因子。

## 1 研究区概况

互助北山林场位于青海省海东市互助县东北部,总面积 11.27 万  $\text{hm}^2$ ,地处  $102^\circ 6' \sim 102^\circ 43' \text{E}$ ,  $36^\circ 42' \sim 37^\circ 60' \text{N}$ ,海拔 2 100~4 308 m。该区属冷温和寒温半湿润牧林业气候区,年平均气温  $5.8^\circ \text{C}$ ,无霜期 114 d,年平均降水量约为 477.4 mm,雨量主要集中在 5~9 月。土壤类型主要为栗钙土、灰褐土和黑毡土<sup>[14]</sup>,土壤深度约为 10~60 cm,腐殖质深度约为 0~8 cm。因该区外围植被曾遭到破坏,20 世纪 80 年代进行了大规模的人工造林,主要的造林乔木树种为青海云杉(*Picea crassifolia*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)、青杨(*Populus cathayana*)等。2004 年被青海省区

化界定为国家生态公益林,经 20 年的封育管理,林场外围形成了以不同树种组成的常绿针叶林、落叶阔叶林、针阔叶混交林为主的林分。林区内资源丰富,分布的植物群系多达 30 余个,主要乔木树种有祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)等;灌木树种有杜鹃(*Rhododendron simsii*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*P. glabra*)等;主要草本植物有龙胆(*Gentiana scabra*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、野草莓(*Fragaria vesca*)、山尖子(*Parasenecio hastatus*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查

试验于 2020 年和 2021 年的 5 月及 7 月在青海省互助县北山林场进行,采取典型取样法在该地选取青海云杉纯林(I)、红桦纯林(II)、青杨纯林(III)、阔叶混交林(IV)、针阔混交林(V)各 4 个  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的样地,一共 20 块样地(表 1)。为消除边

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of plots

林分类型 Stand type	树种组成 Species composition	林龄 Stand age/a	郁闭度 Canopy density	海拔 Altitude /m	坡度 Slope/ $^\circ$	坡向 Aspect	坡位 Slope position
I	云杉 <i>Picea crassifolia</i>	36	0.70	2 487.75	0.70	半阴坡 Semi-shady slope	下坡 Down
	云杉 <i>Picea crassifolia</i>	35	0.68	2 770.00	0.68	半阴坡 Semi-shady slope	下坡 Down
	云杉 <i>Picea crassifolia</i>	37	0.73	2 418.65	0.73	半阴坡 Semi-shady slope	下坡 Down
	云杉 <i>Picea crassifolia</i>	34	0.68	2 647.00	0.68	阳坡 Sunny slope	下坡 Down
II	红桦 <i>Betula albosinensis</i>	34	0.69	2 604.04	0.69	半阳坡 Semi-sunny slope	中坡 Middle
	红桦 <i>Betula albosinensis</i>	35	0.67	2 711.14	0.67	阳坡 Semi-sunny slope	上坡 Upper
	红桦 <i>Betula albosinensis</i>	38	0.72	2 640.00	0.72	半阳坡 Semi-sunny slope	下坡 Down
	红桦 <i>Betula albosinensis</i>	35	0.67	2 603.00	0.67	半阴坡 Semi-shady slope	下坡 Down
III	青杨 <i>Populus cathayana</i>	34	0.72	2 589.46	0.72	半阳坡 Semi-sunny slope	下坡 Down
	青杨 <i>Populus cathayana</i>	33	0.73	2 468.66	0.73	半阳坡 Semi-sunny slope	中坡 Middle
	青杨 <i>Populus cathayana</i>	36	0.73	2 595.00	0.73	半阳坡 Semi-sunny slope	中坡 Middle
	青杨 <i>Populus cathayana</i>	35	0.66	2 610.00	0.66	半阴坡 Semi-shady slope	下坡 Down
IV	红桦:白桦(7:3) <i>B. albosinensis</i> : <i>B. platyphylla</i> (7:3)	35	0.69	2 644.00	0.69	阴坡 Shady slope	中坡 Middle
	红桦:青杨(8:2) <i>B. albosinensis</i> : <i>P. cathayana</i> (8:2)	36	0.70	2 586.62	0.70	半阴坡 Semi-shady slope	中坡 Middle
	青杨:红桦(8:2) <i>P. cathayana</i> : <i>B. albosinensis</i> (8:2)	35	0.67	2 612.00	0.67	阴坡 Shady slope	下坡 Down
	青杨:红桦(5:5) <i>P. cathayana</i> : <i>B. albosinensis</i> (5:5)	38	0.67	2 575.71	0.67	阴坡 Shady slope	下坡 Down
V	云杉:白桦(6:4) <i>P. crassifolia</i> : <i>B. platyphylla</i> (6:4)	35	0.71	2 654.63	0.71	半阴坡 Semi-shady slope	中坡 Middle
	云杉:红桦(7:3) <i>P. crassifolia</i> : <i>B. albosinensis</i> (7:3)	34	0.73	2 516.64	0.73	半阴坡 Semi-shady slope	下坡 Down
	云杉:白桦(7:3) <i>P. crassifolia</i> : <i>B. platyphylla</i> (7:3)	37	0.70	2 492.00	0.70	阴坡 Shady slope	上坡 Upper
	云杉:红桦(6:4) <i>P. crassifolia</i> : <i>B. albosinensis</i> (6:4)	36	0.72	2 593.00	0.72	阴坡 Shady slope	下坡 Down

注: I. 青海云杉纯林; II. 红桦纯林; III. 青杨纯林; IV. 阔叶混交林; V. 针阔叶混交林。下同

Note. I. *Picea crassifolia* forest; II. *Betula albosinensis* forest; III. *Populus cathayana* forest; IV. Broad-leaved mixed forest; V. Coniferous and broad-leaved mixed forest. The same as below

缘效应,设置宽为 4 m 的缓冲区。记录样地所在的坡向、海拔、植被类型等,并对样地内所有树木进行每木检尺,利用测高仪、胸径尺、钢卷尺等测量树高、胸径及冠幅等。采用 WinScanopy 2010a For Canopy Analysis 冠层分析仪获取冠层照片,并利用 XLScanopy 软件对图像进行分析处理,获得林分郁闭度。

每个样地设置 5 个 1 m×1 m 的草本小样方,小样方位于样地四角及样地中心,调查并记录草本植物的名称、数量、高度和盖度。在每个地块中,使用土钻法按 0~20、20~40、40~60 cm 分层钻取 5 个小样方的土样,同层土壤混匀为 1 个混合土样,带回实验室,去除石块、根系等杂物,自然风干,测定土壤碱解氮(靛酚蓝比色法)、速效磷(0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法)、速效钾(1 mol/L NH<sub>4</sub>Ac 浸提-火焰光度法)、有机质(重铬酸钾容量法-消煮法)、pH 值[电位法(水:土=2.5:1)]<sup>[15]</sup>。

## 2.2 物种多样性计算

由于林下灌木层较小,故只对各林分的草本层进行物种多样性分析。草本植物的物种及科属拉丁学名以中国在线植物志(<http://www.iplant.cn/frps>)为准,本研究采用物种重要值(IV)来表征物种的重要性,采用物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 多样性指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)来分析草本的物种多样性水平。其计算公式如下:

$$IV = (RA + RH + RC) / 3$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

$$H = - \sum P_i \cdot \ln P_i$$

$$J = - \sum P_i \ln P_i / \ln S$$

其中,RA 代表相对多度,RH 代表相对高度,RC 代表相对盖度, $P_i$  代表第  $i$  种个体数量与研究对象内各物种个体总数的比值,S 代表研究区的物种数。

## 2.3 林分因子计算

本研究采用林分密度(SD)、平均胸径(DBH)、平均树高(H)及平均冠幅(CW)作为林分特征进行分析。林分密度是指单位面积林地上林木的数量,反映了林木对其占有空间的利用程度。林分平均胸径是反映林木粗度的基本指标,是林分平均断面所对应的直径。平均树高是反映林木高度平均水平的测度指标,是在树高-胸径曲线上,与林分平均直径相对应的树高。林分平均冠幅是对林木光合作用面积大小的直接反映<sup>[16]</sup>。

## 2.4 灰色关联分析法

灰色关联分析法作为一种多因素统计方法,能根据研究对象之间信息发展态势的相似或相异程度(即“灰色关联度”)来揭示研究对象系统内部信息之间的关联程度<sup>[17]</sup>。本研究将草本物种多样性及林分特征、土壤养分特征视为一个灰色系统,分析林分特征及土壤养分特征对草本物种多样性的影响。以草本多样性的物种丰富度指数、物种多样性指数、均匀度指数分别作为参考数列  $X_0$ ,将林分因子、土壤养分因子作为被比较数列  $X_i, i=1, 2, 3, \dots, n$ ,且  $X_0 = [X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(n)]$ ,  $X_i = [X_i(1), X_i(2), X_i(3), \dots, X_i(n)]$ ,以分析林分因子、土壤养分因子与林下草本物种多样性的关联程度。其关联系数公式如下:

$$\epsilon_i(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta i(k) + \rho \Delta \max}$$

式中, $\epsilon_i(k)$  为  $X_0$  与  $X_i$  在  $k$  点的关联系数,若  $\epsilon_i(k)$  越大,则说明该指标与参考数列指标越靠近,对参考数列指标的影响越大;反之,影响越小。 $\Delta i(k)$  为参考数列  $X_0$  与比较数列  $X_i$  在第  $k$  点的绝对差值; $\Delta \min$  和  $\Delta \max$  分别表示所有比较序列各个时刻最小和最大的绝对差值, $\rho$  为分辨系数,取值  $[0, 1]$ ,通常情况下取  $\rho = 0.5$ <sup>[18]</sup>。为了计算方便,通常将各因子重要性同等看待,来计算等权关联度  $r_i$ ,其计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum \epsilon_i(k)$$

## 2.5 数据分析与处理

利用 Excel 2010 软件进行初始数据处理、作图。利用 SPSS 软件,用单因素方差分析和差异显著性检验(Duncan 法)来检验不同林分类型间的林下草本多样性指数、林分特征及土壤养分含量(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)之间的差异性;用 pearson 分析不同林分类型林分密度与林木生长之间的相关关系。利用 matlab 软件,用灰色关联分析法检验分析林下草本多样性指数与林分特征、土壤养分含量之间的关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 林下草本层物种组成与物种重要值

在本次研究中,5 种林分林下草本植物共发现 86 种,分属 30 科 74 属(表 2)。其中,青海云杉纯林(I)林下草本植物共 17 科 26 属 27 种,红桦纯林(II)林下草本植物共 19 科 28 属 32 种,青杨纯林(III)林下草

本植物共 21 科 38 属 43 种,阔叶混交林(Ⅳ)林下草本植物共 17 科 25 属 30 种,针阔混交林(Ⅴ)林下草本植物共 25 科 42 属 49 种。Ⅴ的植物科、属和物种数量均最多,Ⅰ最少。Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ的物种数分别约为Ⅰ的 1.19、1.59、1.11、1.81 倍。由表 3 可知,Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ中草本层均以野草莓的重要值最大,其重要值分别为 44.42%、20.29%、23.05%,Ⅱ、Ⅴ中分别以山尖子、野草莓、黑麦草为优势种,其重要值分别为 20.97%、13.95%、13.68%和 8.34%、16.83%、27.82%。

### 3.2 林下草本层物种多样性

由表 4 可知,林下草本的物种丰富度、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均表现出Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ大于Ⅰ的规律,其中Ⅰ在林下草本的物种丰富度、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数与Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ存在显著差异( $P < 0.05$ ),Pielou 均匀度指数未存在显著差异。在 5 种林分类型中,Ⅰ中物种丰富度、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数的变异程度均最大,变异指数在 39.15%~48.05%之间。

### 3.3 不同林分类型林分特征分析

如表 5 所示,不同林分类型间林分密度、平均胸径、平均树高、平均冠幅均无显著差异,其值分别为 648.61~851.91、14.42~17.65、10.59~14.78 和 2.92~3.88,且平均胸径、平均树高、平均冠幅均表现为  $V > IV > II、III > I$ 。其中林分密度变异程度较大,变异系数在 25%以上,平均冠幅变异指数较小,均在 20%以下。

由表 6 各林分因子之间的相关分析可知,林分密度与平均胸径表现为极显著负相关关系(相关系数为  $-0.685$ ),与平均胸径、平均冠幅均表现为显著负相关(相关系数分别为  $-0.514$ 、 $-0.463$ )。平均树高与平均胸径、平均冠幅均存在极显著正相关关系(相关系数分别为 0.716、0.615)。

### 3.4 不同林分类型土壤养分特征

研究区内不同林分类型 0~60 cm 土层深度碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、有机质(SOC)、酸碱度(pH)含量特征如表 7 所示:5 种林分类型 0~60 cm AK 之间的变异系数最大,在 22.06%~31.24%之间;pH 值变异系数最小,在 2%

表 2 林下草本植物科内种的组成

Table 2 The composition of species in families of herbaceous plant

种数 Species number	科数 Family number	科名(属数/种数) Family name (Genus number/Species number)
≥7	1	菊科(19/23) Asteraceae
5~6	3	蓼科(2/5)、伞形科(5/5)、毛茛科(5/6) Polygonaceae, Umbelliferae, Ranunculaceae
3~4	4	唇形科(4/4)、蔷薇科(3/4)、茜草科(2/4)、柳叶菜科(2/3) Lamiaceae, Rosaceae, Rubiaceae, Onagraceae
2	10	小檗科(2/2)、紫草科(2/2)、禾本科(2/2)、景天科(2/2)、兰科(2/2)、龙胆科(2/2)、牻牛儿苗科(2/2)、十字花科(2/2)、玄参科(2/2)、荨麻科(2/2)、Berberidaceae, Boraginaceae, Gramineae, Crassulaceae, Orchidaceae, Gentianaceae, Geraniaceae, Brassicaceae, Scrophulariaceae, Urticaceae
1	12	车前科(1/1)、豆科(1/1)、堇菜科(1/1)、冷蕨科(1/1)、木贼科(1/1)、母草科(1/1)、忍冬科(1/1)、莎草科(1/1)、旋花科(1/1)、通泉草科(1/1)、罂粟科(1/1)、芸香科(1/1) Plantaginaceae, Fabaceae, Violaceae, Cystopteridaceae, Equisetaceae, Linderniaceae, Caprifoliaceae, Cyperaceae, Convolvulaceae, Mazaceae, Papaveraceae, Rutaceae

表 3 不同林分林下草本主要物种及其重要值

Table 3 The Main species and important values of herbage under different stands

林分类型 Stand type	主要物种(重要值) Main species (import values)	重要值之和 Sum of import values/%
Ⅰ	野草莓(0.4442)+珠芽蓼(0.1334)+黑麦草(0.0813)+黑马先蒿(0.0495) <i>Fragaria vesca</i> + <i>Polygonum viviparum</i> + <i>Lolium perenne</i> + <i>Pedicularis nigra</i>	70.84
Ⅱ	山尖子(0.2097)+野草莓(0.1395)+黑麦草(0.1368)+乌头(0.0770) <i>Parasenecio hastatus</i> + <i>Fragaria vesca</i> + <i>Lolium perenne</i> + <i>Aconitum carmichaelii</i>	56.31
Ⅲ	野草莓(0.2029)+黑麦草(0.1093)+马蹄金(0.0680)+毛茛(0.0946) <i>Fragaria vesca</i> + <i>Lolium perenne</i> + <i>Dichondra micrantha</i> + <i>Ranunculus japonicas</i>	47.49
Ⅳ	野草莓(0.2305)+黑麦草(0.1830)+乌头(0.1167)+山尖子(0.1094) <i>Fragaria vesca</i> + <i>Lolium perenne</i> + <i>Aconitum carmichaelii</i> + <i>Parasenecio hastatus</i>	63.96
Ⅴ	黑麦草(0.2782)+野草莓(0.1683)+山尖子(0.0834)+马蹄金(0.0662) <i>Lolium perenne</i> + <i>Fragaria vesca</i> + <i>Parasenecio hastatus</i> + <i>Dichondra micrantha</i>	59.62

表 4 不同林分类型草本物种多样性基本特征统计量

Table 4 Basic statistics for indicators of herbaceous species diversity in different stand types

物种多样性指标 Species diversity index	林分类型 Stand type	平均值±标准误差 Mean ± SE	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 CV/%
物种丰富度 Species richness	I	4.18±0.87b	2.80	6.70	41.50
	II	6.60±0.36ab	5.60	7.20	10.78
	III	6.45±0.42ab	5.00	7.80	13.03
	IV	6.70±0.17ab	6.20	7.00	5.17
	V	8.98±1.59a	5.33	12.60	35.39
Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	I	0.40±0.08b	0.21	0.55	39.15
	II	0.65±0.05a	0.50	0.71	15.46
	III	0.66±0.03a	0.58	0.74	10.02
	IV	0.61±0.04a	0.54	0.68	12.60
	V	0.69±0.04a	0.57	0.76	12.24
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	I	0.55±0.13b	0.27	0.89	48.05
	II	0.69±0.05a	0.53	0.75	15.35
	III	0.62±0.04a	0.54	0.73	13.20
	IV	0.67±0.04a	0.60	0.74	11.33
	V	0.64±0.04a	0.56	0.73	11.46
Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index	I	0.82±0.18a	0.42	1.18	45.02
	II	1.28±0.09a	1.04	1.47	14.15
	III	1.42±0.07a	1.24	1.60	10.41
	IV	1.26±0.08a	1.11	1.44	13.46
	V	1.35±0.13a	1.08	1.68	19.61

注:不同小写字母表示不同林分类型间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different stand types ( $P<0.05$ )

左右,pH 值范围为 7.85~7.98;AN、AP、AK 变异系数在 20%左右,属中等变异。在 0~60 cm 土层,pH、AK 在不同林分不存在显著差异,IV、V 与 I、II、III 在 AN、SOC 存在显著差异( $P<0.05$ ),速效磷含量表现为 II、III、IV、V 与 I 存在显著差异( $P<0.05$ ),土壤 AN、AP、AK、SOC 含量及 pH 值均表现为 IV、V>II、III>I。

如图 1 所示,在不同的土层中,5 种不同林分的 AN、AK 表现为显著差异( $P<0.05$ )。0~20 cm 层,AN、AP、AK、SOC 含量均最高,且随土层深度的增加而降低;但 pH 值的变化规律与之相反,其随土层深度的增加而逐渐增加,40~60 cm 间 pH 值达最大。同一土层,林分不同,土壤养分特征不同。同一土层间,不同林分间的 pH 值无显著差异。0~20 cm 层,II、III、IV、V 与 I 的 AN、AP、AK、SOC 均表现为显著差异( $P<0.05$ );20~40 cm 层,II、III、IV、V 与 I 的 AN、AP、SOC 存在显著差异( $P<0.05$ ),AK 不存在显著差异;40~60 cm 层,AN、

AP、SOC 在不同林分中无显著差异,仅 AK 在 II、III、IV、V 与 I 中存在显著差异( $P<0.05$ )。

### 3.5 不同林分林下草本物种多样性与其林分特征和土壤养分的关联度

从图 2 可知,在 5 种林分类型下,林下草本物种多样性指数与其林分特征和土壤养分之间的灰色关联度为 0.5063~0.9572,关联程度均较大,且 S、D、J、H 的变化曲线较一致。

在 5 种林分中,与林下草本物种多样性关联度最大的林分因子均为 DBH,土壤养分特征与林下草本物种多样性的关联性存在差异,但总体来看,对林下草本物种多样性影响最大的因子为 0~20 cm AN。其中,I 中 0~20 cm AN 与 S 的关联程度最大,0~20 cm AK 与 D、H、J 的关联程度最大;II 中,与林下草本物种多样性关联性最强的因子分别为 0~20 cm SOC、AP、AN;III 中,对林下草本物种多样性影响最大的土壤养分因子为 0~20 cm AP、AN、AK、SOC;IV 中,0~20 cm SOC、AP 是限制林

表 5 林分基本特征统计量

Table 5 Basic statistics for indicators of stand characteristics

林分特征指标 Stand characteristic index	林分类型 Stand type	平均值±标准误差 Mean ± SE	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 CV/%
林分密度(SD) Stand density/(株 hm <sup>-2</sup> )	I	851.91±116.07a	486.11	1 012.50	29.67
	II	651.04±59.51a	555.56	815.97	28.28
	III	648.61±83.30a	329.86	875.69	26.61
	IV	659.72±97.43a	468.75	868.06	29.54
	V	755.21±108.16a	364.58	979.86	27.32
平均胸径(DBH) Average DBH/cm	I	14.42±4.84a	5.75	23.90	31.42
	II	16.82±1.91a	14.34	20.05	7.05
	III	15.50±3.19a	9.60	23.82	22.16
	IV	17.25±3.31a	12.25	27.22	17.21
	V	17.65±3.27a	10.29	23.70	18.55
平均树高(H) Average tree height/m	I	10.59±2.83a	7.73	13.63	26.72
	II	11.68±0.61a	10.43	12.87	5.26
	III	11.76±1.01a	7.10	12.03	10.38
	IV	14.13±1.88a	10.60	19.19	13.32
	V	14.78±1.50a	12.01	17.40	10.17
平均冠幅(CW) Average crown width/m	I	2.92±0.03a	2.73	3.07	19.84
	II	3.41±0.50a	2.12	4.87	11.73
	III	3.15±0.07a	3.01	3.32	6.98
	IV	3.58±0.19a	3.16	3.93	10.64
	V	3.88±0.25a	3.28	4.32	12.63

表 6 各林分因子之间的相关分析

Table 6 Correlation analysis of stand characteristics

林分特征指标 Stand characteristic index	林分密度 Stand density/(株 hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	平均冠幅 Average crown width/m
林分密度 Stand density/(株 · hm <sup>-2</sup> )	1	-0.685**	-0.514*	-0.463*
平均胸径 Average DBH/cm	-0.685**	1	0.716**	0.615**
平均树高 Average tree height/m	-0.514*	0.716**	1	0.658**
平均冠幅 Average crown width/m	-0.463*	0.615**	0.658**	1

注: \*\*. 极显著相关( $P < 0.01$ ); \*. 显著相关( $P < 0.05$ )

Note: \*\*. Extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ); \*. Significant correlation ( $P < 0.05$ )

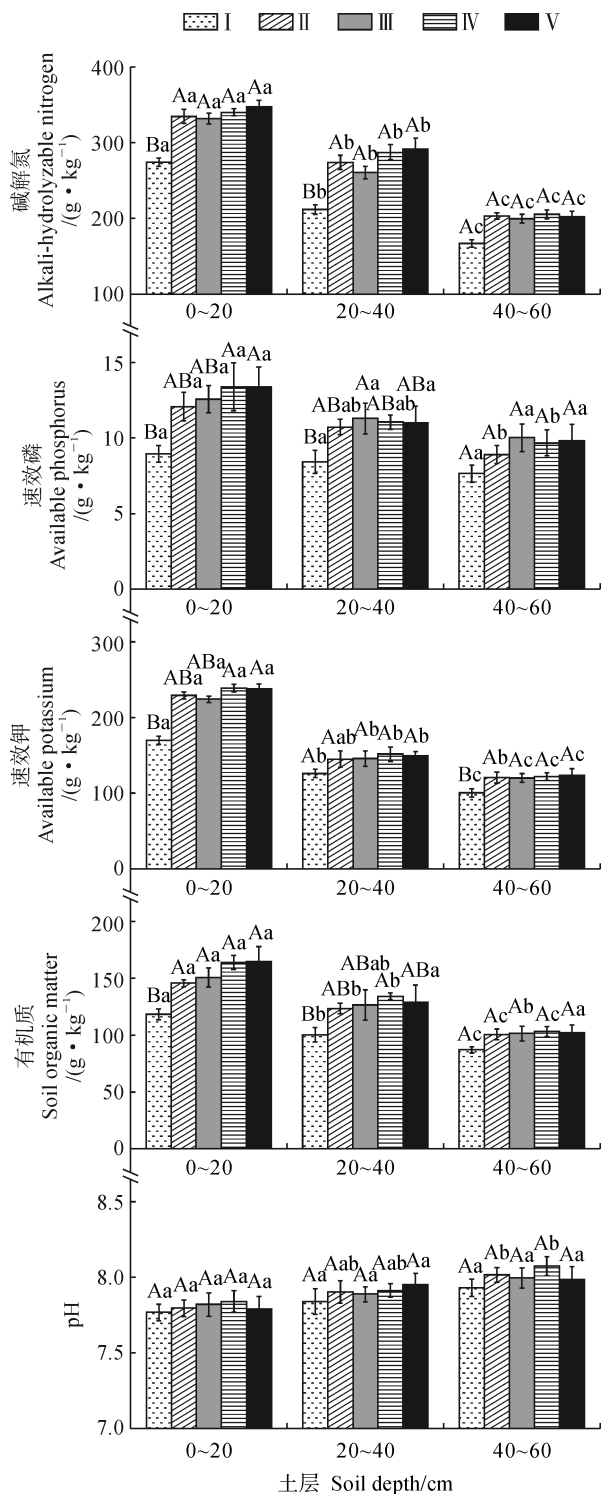
表 7 不同林分类型 0~60 cm 土壤养分含量

Table 7 The nutrient contents of 0—60 cm soil in different stand types

土壤养分 Soil nutrient content	I		II		III		IV		V	
	均值 Mean /(g · kg <sup>-1</sup> )	CV/%	均值 Mean /(g · kg <sup>-1</sup> )	CV/%	均值 Mean /(g · kg <sup>-1</sup> )	CV/%	均值 Mean /(g · kg <sup>-1</sup> )	CV/%	均值 Mean /(g · kg <sup>-1</sup> )	CV/%
碱解氮(AN) Alkali-hydrolyzed nitrogen	217.58b	21.68	267.50ab	21.46	264.00ab	22.02	277.67a	21.29	284.42a	24.15
速效磷(AP) Available phosphorus	8.34b	15.26	10.57ab	17.69	11.03ab	17.89	11.38ab	22.19	12.74a	25.34
速效钾(AK) Available potassium	132.17a	23.98	164.92a	30.82	163.33a	29.44	170.67a	31.24	176.92a	22.06
有机质(SOC) Soil organic matter	101.90b	14.28	123.23ab	16.79	126.29ab	26.75	133.77a	20.34	135.73a	29.62
酸碱度(pH) Potential of hydrogen	7.85a	1.74	7.92a	1.83	7.90a	1.78	7.94a	1.89	7.98a	2.15

注:不同小写字母表示在 0~60 cm 土层不同林分类型间差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different stand types in the 0—60 cm soil layer ( $P < 0.05$ )

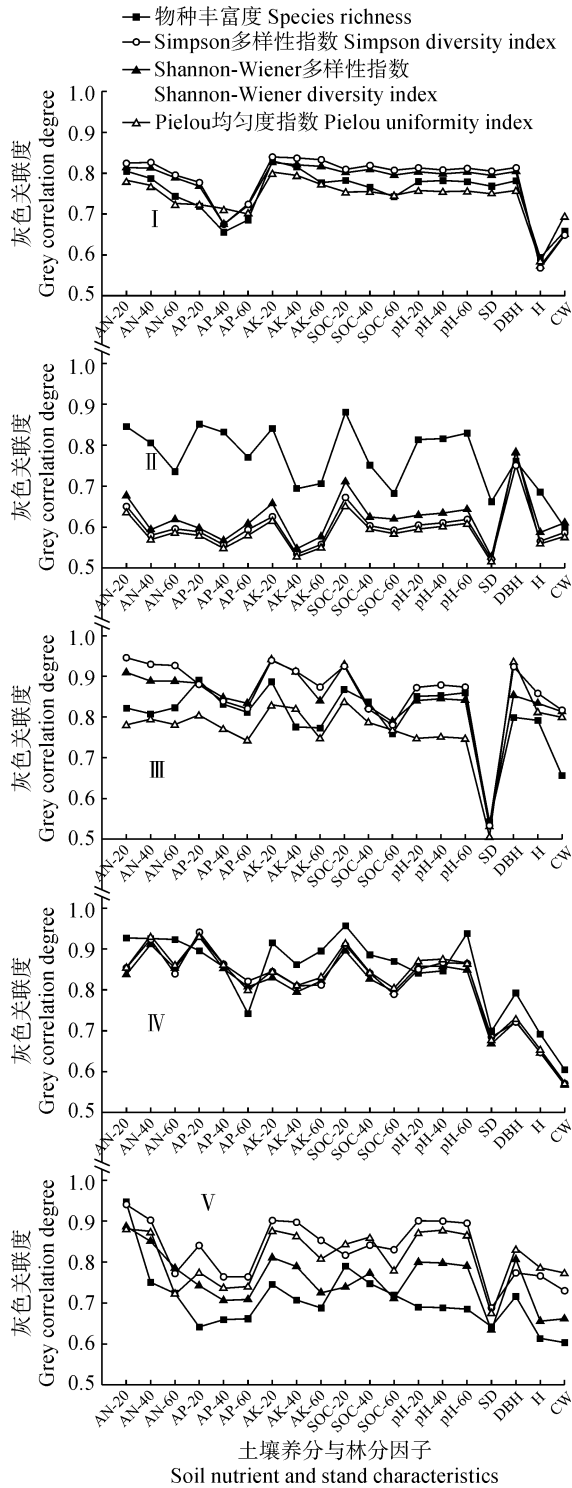


不同大写字母表示同土层不同林分类型间差异显著,小写字母表示同林分类型不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 1 不同林分类型不同土层养分含量

Different capital letters indicate significant difference between different stand types in the same soil layer, and normal letters indicate significant difference among different soil layers of the same stand type ( $P < 0.05$ )

Fig. 1 Nutrient contents in different soils of different stand types



AN, AP, AK, SOC, pH 详见表 7; 20、40、60 分别指 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层深度; SD、DBH、H、CW 详见表 5

图 2 不同林分类型下林下草本物种多样性与土壤养分、林分特征之间的灰色关联度

Details on AN, AP, AK, SOC, pH are shown in Table 7, and 20, 40 and 60 refer to the depth of 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm respectively. Details on SD, DBH, H, CW are shown in Table 5

Fig. 2 Grey correlation degree between herbaceous species diversity and soil nutrient and stand characteristics in different stand types



下草本植物生长的主要养分特征;影响V中林下草本植物多样性的土壤养分因子为0~20 cm AN。

## 4 讨论

### 4.1 不同林分类型林下草本植物物种组成与多样性差异分析

本研究中5种不同配置的样地均以野草莓、黑麦草为优势种,但不同林分类型中,林下各物种重要值有差异。I中珠芽蓼等蓼科植物占优势,可能是由于针叶林林地密度较大,冠层盖度相对较高,阳光不易直射到林下地表,水分蒸发缓慢,地表潮湿,适宜其生长;II中,林分密度相对较小,林下空隙较大,土壤碱解氮含量较高,适宜山尖子等大型草本植物生长<sup>[19]</sup>。而黑麦草和野草莓因其自身的生物学特性,成为主要优势种。具体表现为,黑麦草喜阴、繁殖力高、分蘖力强;野草莓则是因为其具有细长的匍匐茎,当与潮湿的土壤接触时,可在匍匐茎节点上生根形成分株,不断繁殖生长<sup>[20]</sup>。在5种不同林分中,针阔叶混交林中物种数量与物种科、属均最多,云杉纯林最少。这与张瀚丹等<sup>[21]</sup>所发现的结果不太一致,张瀚丹等在对湖北九华山林场3种不同树种配置的杉木人工林研究时,发现纯林样地的植物科、属略高于混交林样地,这可能是因为针阔叶混交林同时具备了阔叶林和针叶林的林分特征,树种类型更加多样,冠层结构更为复杂,增加了生境的异质性<sup>[22]</sup>;其次,针阔叶混交林可通过增加林地凋落物来提高林地土壤的养分返还,以此改良土壤肥力<sup>[23]</sup>,为更多林下草本植物的生长创造了条件。

研究发现针阔混交林林下草本物种多样性最高,这与王莉等<sup>[24]</sup>、张维伟等<sup>[25]</sup>、张瀚丹等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。一方面可能是不同树种的凋落物相互混合,影响凋落物的分解速率,进而改善林下的土壤条件<sup>[26]</sup>。另一方面则可能因为混交林中乔木树种在生态位上存在差异,且云杉树冠相对于白桦、青杨等阔叶树更窄,更有利于光照进入林地。此外,研究显示,青海云杉纯林下物种多样性最低,阔叶显著高于针叶林。这是因为针叶凋落物不易分解且偏酸性,导致土壤表层总氮含量降低<sup>[27]</sup>,而阔叶凋落物中N、P的释放速度较快且拥有较高的N、P含量及较低的木质素含量,这使得阔叶纯林内的生境条件大于针叶纯林<sup>[28]</sup>。

### 4.2 不同林分类型林分特征及土壤养分含量差异分析

本研究表明,5种不同林分的SD、H、DBH、CW

均无显著差异,但针阔混交林的H、DBH、CW均高于其他林分。SD与H、DBH、CW存在极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),即随着林分密度的增加,平均树高、平均胸径、平均冠幅表现出减小的趋势。郑颖等<sup>[29]</sup>对辽东山区不同密度落叶松人工幼龄林林木生长的研究,也表现出相同的规律。这主要是因为密度大的林分,林木之间对资源竞争更加激烈,抑制林木生长,相反,林分密度越小,林木个体更易获得自身所需资源,利于自身生长发育。

本研究表明,在0~20 cm间土壤AN、AP、AK、SOC含量均最高,且随土层深度的增加而降低,这表明土壤养分具有表聚效应,这与刘帅楠等<sup>[30]</sup>的结果一致。这是因为土壤中的C、N、P主要来源于凋落物<sup>[26]</sup>,凋落物的输入使得表层土壤的微生物生物量增加,有效改善了土壤的肥力状况<sup>[31]</sup>。研究发现,该区的土壤大多为碱性土,pH值为7.77~8.08,且随土层深度的增加而增加。这与何宇等<sup>[14]</sup>对于祁连山北山林区研究的土壤发生特性得出的结果一致。该研究区针叶纯林(I)土壤AN、AP、AK、SOC含量、pH值均明显低于阔叶纯林(II和III)、混交林(IV和V),说明单一树种的针叶纯林对于养分的累积功能较差。一方面是因为阔叶树种分解速率大于针叶凋落物分解速率。另一方面,针叶树的凋落物中含有大量的单宁、树脂和木质素等不易分解的物质<sup>[32]</sup>。

### 4.3 草本生物多样性驱动因子

本研究中林下草本物种多样性与林分特征及土壤养分均有较强的关联性,说明合理优化林分特征,有效提升土壤养分含量都有利于人工林下草本物种多样性的提高。其中,DBH是影响5种林分林下草本物种多样性的关键林分因子,这与梁文俊等<sup>[5]</sup>的研究结果一致。一方面,林分平均胸径与林分密度呈极显著负相关,林分密度通过影响林下植被生长,从而影响林下植物的多样性,且林分密度越小,林下植被多样性越丰富<sup>[33]</sup>;另一方面,林分平均胸径是指林分平均断面积对应的直径。随断面积的增加,漫射辐射呈线性下降,林下植物群落对此做出响应,物种丰富度下降<sup>[34]</sup>。而龙爱国等<sup>[12]</sup>在对马尾松林木生长与草本多样性之间的关系分析时,得出郁闭度是影响林下林下草本多样性最主要的生态因子,其他生态因子对其的影响较小。这可能是因为研究区林地的郁闭度均在0.7左右,林下草本植物得到的光照资源相同。

相比深层土壤,表层(0~20 cm)土壤对林下草

本物种多样性的影响更大,这可能是由于土壤养分的表聚性及草本根系较浅。土壤碱解氮含量是影响5种林分林下草本物种多样性的共同土壤养分因子,这与胡文浩等<sup>[35]</sup>、许丽等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。碱解氮是植物直接吸收利用的土壤营养,人工林地土壤中的碱解氮主要来源包括有机质凋落物的分解、植物的固氮效应及人为活动等。除此之外,家畜粪便的输入也是该区碱解氮含量增加的另一重要途径<sup>[37]</sup>。本研究显示土壤碱解氮含量是影响草本层植物多样性的重要潜在因子,这与草本直接利用碱解氮促进其生长有关,一些对水肥条件要求较高的草本植物也有可能更倾向于在碱解氮含量较高的生境分布<sup>[35]</sup>。但王慧等<sup>[10]</sup>对中国北方寒温带针叶林下层物种多样性进行分析时,得出土壤水分含量对草本植物多样性的相对影响最大;李梦佳等<sup>[38]</sup>对戴云山植物物种多样性的研究得出,土壤磷元素影响其海拔分布的主要环境因子,二者均与本研究结论不同,这是因为土壤水分主要受降雨影响,调查期间雨量充沛,可满足植物生长需要;且草本植物对磷元素需求量小<sup>[39-40]</sup>,导致速效磷含量对草本物种多样性的影响相对较小。

## 参考文献:

- [1] ZHANG J Y, QIN G Z, ZHAI Z, *et al.* Diverse understory vegetation alleviates nitrogen competition with crop trees in poplar plantations[J]. *Forests*, 2021, **12**(6): 705.
- [2] ECHIVERRI L F I, MACDONALD S E. A topographic moisture index explains understory vegetation response to retention harvesting[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **474**: 118-135.
- [3] STICKLEY S F, FRATERRIGO J M. Understory vegetation contributes to microclimatic buffering of near-surface temperatures in temperate deciduous forests[J]. *Landscape Ecology*, 2021, **36**(4): 1 197-1 213.
- [4] MCALPINE K, LAMOUREAUX S, TIMMINS S. Understorey vegetation provides clues to succession in woody weed stands[J]. *New Zealand Journal of Ecology*, 2021, **45**(1): 1-10.
- [5] 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[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, **24**: e01228.
- [6] ZHANG Y X, LIU T R, GUO J P, *et al.* Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **28**: e01628.

目前已有研究<sup>[5]</sup>表明,林分调控优化应同时从树木、草本植物和土壤3个方面考虑,而本研究结果进一步佐证了这一观点。因此,在实际林分改造过程中,应优先考虑将树种结构单一的针叶纯林改为针阔混交林,并在此基础上,通过保持树木下凋落物厚度和土壤微生物活性,不断改善土壤肥力,同时注意对于林分因子的调控,以提高林下草本植物的多样性,维持林分的稳定和可持续发展。

## 5 结 论

本研究得出,5种林分林下草本物种组成、物种多样性、林分特征、土壤养分含量具有差异,其中青海云杉纯林林下草本植物组成最简单、物种多样性水平最低、林分特征最差、土壤养分含量最低。此外,林下草本物种多样性对林分特征和土壤养分特征均有显著响应,林分平均胸径是影响草本多样性最主要的林分因子,碱解氮是最主要的土壤养分特征。因此,在未来林分改造中,应优先改造针叶纯林的建设模式,优化林分特征,提升土壤肥力,以提高林下草本植物的多样性,维持林分的稳定和可持续发展。

- [7] 张柳桦,齐锦秋,柳苹玉,等. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. *西北植物学报*, 2018, **38**(1): 166-175.
- ZHANG L H, QI J Q, LIU P Y, *et al.* Effects of stand density on community structure and species diversity of *Eucalyptus robusta* plantation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(1): 166-175.
- [8] 陈小雪,李红丽,董 智,等. 不同火烧强度迹地下灌草层物种多样性及其与土壤因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2020, **40**(1): 130-140.
- CHEN X X, LI H L, DONG Z, *et al.* Relationship of shrubs and herbs species diversity under different fire intensities with soil factors[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(1): 130-140.
- [9] WU H F, GAO T, ZHANG W, *et al.* Understory vegetation composition and stand are mainly limited by soil moisture in black locust plantations of loess plateau[J]. *Forests*, 2021, **12**(2): 195.
- [10] WANG H, ZHANG M T, NAN H W. Abiotic and biotic drivers of species diversity in understory layers of cold temperate coniferous forests in North China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, **30**(6): 2 213-2 225.
- [11] 田 奥,李苇洁,王加国,等. 关岭县石漠化地区立地因子对白刺花群落特征的影响[J]. *西部林业科学*, 2021, **50**(3):

- 34-41.
- TIAN A, LI W J, WANG J G, *et al.* Influence of topographic factors on the community characteristics of *Sophora davidii* in rocky desertification area of Guanling County[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, **50**(3): 34-41.
- [12] 龙爱国, 颜衡祁. 马尾松林木生长、草本植物多样性及地形因子之间的关系[J]. *农学学报*, 2017, **7**(9): 21-25.
- LONG A G, YAN H Q. *Pinus massoniana*: The relationship between tree growth, herb bio-diversity and terrains [J]. *Journal of Agriculture*, 2017, **7**(9): 21-25.
- [13] 郭佳佳, 张雷廷, 车建芳, 等. 太行山南段连翘群落结构及其影响因子研究[J]. *生态学报*, 2021, **41**(21): 8 589-8 601.
- GUO J J, ZHANG L T, CHE J F, *et al.* Analysis of *Forsthia suspensa* community structure and influencing factors in the southern section of Taihang Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(21): 8 589-8 601.
- [14] 何宇. 祁连山北山林区的土壤发生特性和系统分类研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [15] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] 惠刚盈, 张连金, 胡艳波, 等. 林分拥挤度及其应用[J]. *北京林业大学学报*, 2016, **38**(10): 1-6.
- HUI G Y, ZHANG L J, HU Y B, *et al.* Stand crowding degree and its application[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, **38**(10): 1-6.
- [17] 周林虎, 王昊宇, 张秉来, 等. 硫酸盐渍土表观电导率与水分、盐分及粒径关系研究[J]. *干旱区研究*, 2021, **38**(4): 1 020-1 030.
- ZHOU L H, WANG H Y, ZHANG B L, *et al.* The relationship between EC<sub>a</sub> of sulfate saline soil and moisture content, salt content, and particle size[J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(4): 1 020-1 030.
- [18] 李秀红. 基于灰色关联度的多目标决策模型与应用[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2007, **42**(12): 33-36.
- LI X H. A model based on the grey relation grade for multi-objective decision-making and its application[J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2007, **42**(12): 33-36.
- [19] 周钧. 增氮减水对阔叶红松林草本植物生长策略的影响及机制[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
- [20] 陈劲松, 董鸣, 于丹. 青藏高原东缘匍匐茎草本野草莓的分株种群特征及其沿海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2003, **23**(3): 428-435.
- CHEN J S, DONG M, YU D. The characteristics of stoloniferous herb *Fragaria vesca* L. ramet population and their variation along an altitudinal gradient in the eastern edge of the Qing-Zang Plateau in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(3): 428-435.
- [21] 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): 2 118-2 128.
- ZHANG H D, KANG X R, SHAO W H, *et al.* Characteristics of herbaceous plant biodiversity in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different community structures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(6): 2 118-2 128.
- [22] 董卉卉, 邱林, 张建设, 等. 黄柏山4种典型人工林林下植物多样性研究[J]. *林业资源管理*, 2019, (4): 86-91.
- DONG H H, QIU L, ZHANG J S, *et al.* Study on the diversity of undergrowth plant in four typical plantations in Huangbaishan Mountain[J]. *Forest Resources Management*, 2019, (4): 86-91.
- [23] 张炜, 董文渊, 钟欢, 等. 不同混交类型对笋竹生长及土壤养分空间差异的影响[J]. *西部林业科学*, 2020, **49**(6): 70-75.
- ZHANG W, DONG W Y, ZHONG H, *et al.* Effects of different mixed types on the growth of *Qiongzhusua tumidinoda* and spatial differences of soil nutrients[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, **49**(6): 70-75.
- [24] 王莉, 林莎, 李远航, 等. 青海大通不同林地类型林下植被与土壤水分的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2019, **17**(5): 25-35.
- WANG L, LIN S, LI Y H, *et al.* Relationship between understory vegetation and soil moisture in different forest types in Datong, Qinghai Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(5): 25-35.
- [25] 张维伟, 薛文艳, 杨斌, 等. 桥山栎林群落结构特征与物种多样性相关关系分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(11): 3 991-4 001.
- ZHANG W W, XUE W Y, YANG B, *et al.* Differences in community characteristics, species diversity, and their coupling associations among three *Quercus acutissima* forests in Qiaoshan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(11): 3 991-4 001.
- [26] 周磊, 王树力. 阔叶树对红皮云杉人工林土壤营养状况的改善作用[J]. *北京林业大学学报*, 2020, **42**(3): 46-53.
- ZHOU L, WANG S L. Improvement of broadleaved tree species to soil nutrient conditions of *Picea koraiensis* plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(3): 46-53.
- [27] 陈静, 赵文强, 贺合亮, 等. 川西亚高山森林不同演替阶段植物凋落物添加对白桦幼苗生长的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, **27**(3): 686-693.
- CHEN J, ZHAO W Q, HE H L, *et al.* Effect of plant litter addition from different subalpine forest successional stages on *Betula platyphylla* seedling growth in western Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, **27**(3): 686-693.
- [28] 李勋, 张艳, 宋思梦, 等. 马尾松与乡土阔叶树种凋落叶分解氮磷释放的混合效应[J/OL]. *应用与环境生物学报*: 1-19 [2021-10-20]. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11015>.
- LI X, ZHANG Y, SONG S M, *et al.* Mixed leaf litter effects on nitrogen and phosphorus release of *Pinus massoni-*

- ana and native broad-leaved tree species [J/OL]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology;1-19[2021-10-20]. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11015>.
- [29] 郑 颖, 冯 健, 于世河, 等. 辽东山区不同密度落叶松人工幼龄林林木生长和土壤养分特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, **42**(1): 94-103.
- ZHENG Y, FENG J, YU S H, *et al.* Study on the forest growth and soil nutrient characteristics of *Larix* spp. plantations with different densities in mountainous area of Liaodong [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, **42**(1): 94-103.
- [30] 刘帅楠, 李 广, 吴江琪, 等. 黄土丘陵区不同土地类型下土壤养分特征——基于生态化学计量学[J]. 草业学报, 2021, **30**(3): 200-207.
- LIU S N, LI G, WU J Q, *et al.* Characteristics of soil nutrients under different land types in the loess hill region based on ecological chemometrics[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(3): 200-207.
- [31] 张 磊, 贾淑娴, 李啸灵, 等. 亚热带米槠天然林凋落物和根系输入变化对土壤磷组分的影响[J]. 生态学报, 2022, **42**(2): 656-666.
- ZHANG L, JIA S X, LI X L, *et al.* Effects of litter and root inputs changes on soil phosphorus fractions in a subtropical natural forest of *Castanopsis carlesii* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(2): 656-666.
- [32] 杨 欢, 尹春英, 唐 波, 等. 川西亚高山针叶林树种云杉和冷杉土壤酸碱性差异及其机制[J]. 生态学报, 2018, **38**(14): 5 017-5 026.
- YANG H, YIN C Y, TANG B, *et al.* Difference in soil pH values between *Picea asperata* and *Abies faxoniana* stands in subalpine regions and a preliminary study on its mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(14): 5 017-5 026.
- [33] 谷振军, 刘 倩, 曾纪孟, 等. 马尾松人工林密度控制对林下植被多样性的影响[J]. 森林与环境学报, 2021, **41**(5): 504-509.
- GU Z J, LIU Q, ZENG J M, *et al.* Effects of density management on understory plant diversity in plantation forests of *Pinus massoniana* [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, **41**(5): 504-509.
- [34] 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 [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **502**: 119 749.
- [35] 胡文浩, 张晓婧, 陈雅杰, 等. 坝上地区不同年代退耕还林生境的草本层植物多样性及影响因子[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1 116-1 126.
- HU W H, ZHANG X J, CHEN Y J, *et al.* Herb diversity and its impact factors in different periods from 1970s to 2000s of the returning farmland to forest project in the Bashang Area of North China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 1 116-1 126.
- [36] 许 丽, 丰 菲, 刘 莹, 等. 煤矸石山植物物种多样性与土壤化学因子的关系——以灵武矿区生态修复初期为例[J]. 煤炭科学技术, 2020, **48**(4): 97-104.
- XU L, FENG F, LIU Y, *et al.* Relationship between plant species diversity and soil chemical properties in coal gangue dump: Early stage of ecological restoration in Lingwu Mining Area [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, **48**(4): 97-104.
- [37] 杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 放牧牦牛行为及其对高寒草地土壤特性的影响研究进展[J]. 草业学报, 2019, **28**(7): 186-197.
- DU Z Y, CAI Y J, WANG X D, *et al.* Research progress on yak grazing behavior and its influence on the soil properties of alpine grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, **28**(7): 186-197.
- [38] 李梦佳, 何中声, 江 蓝, 等. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1 148-1 157.
- LI M J, HE Z S, JIANG L, *et al.* Distribution pattern and driving factors of species diversity and phylogenetic diversity along altitudinal gradient on the south slope of Daiyun Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 1 148-1 157.
- [39] 芦 倩, 李 毅, 刘贤德, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林土壤水分特征[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(5): 142-148.
- LU Q, LI Y, LIU X D, *et al.* Soil moisture variation characteristics of *Picea crassifolia* forestry in Pailugou Watershed of Qilian Mountains [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, **40**(5): 142-148.
- [40] 姜小蕾, 郝 青, 李 伟, 等. 青岛崂山次生植物群落物种分布及多样性特征[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(8): 22-33.
- JIANG X L, HAO Q, LI W, *et al.* Species distribution and diversity characteristics of secondary plant communities in Laoshan Mountain of Qingdao, Shandong Province of Eastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(8): 22-33.

(编辑:潘新社)