

# 不同密度油松人工林群落特征与物种多样性耦合关系

吴海平<sup>1</sup>,孙清琳<sup>1</sup>,张彦君<sup>2</sup>,蔡茂<sup>1</sup>,赵鹏祥<sup>2</sup>,李卫忠<sup>2</sup>,王博恒<sup>1,2\*</sup>

(1. 国家林业和草原局 华东调查规划设计院,浙江 杭州 310019; 2. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

**摘要:**以黄土高原区油松人工林为研究对象,对比3种不同密度的油松人工林群落特征和物种多样性差异,构建两者间耦合关系模型,探讨不同密度油松人工林经营策略。结果表明:1)不同密度油松人工林群落特征具有差异,高密度(3 400~4 600株·hm<sup>-2</sup>)林分的角尺度显著大于中密度(2 200~2 800株·hm<sup>-2</sup>)、低密度(1 400~2 100株·hm<sup>-2</sup>)林分;低密度林分的混交度、平均胸径和冠幅显著高于中、高密度林分。2)不同密度林分的乔木、灌木和草本物种多样性指数均与其自身显著正相关;低密度林分中,乔木层和灌木层多样性指数、灌木层和草本层多样性指数显著负相关。3)不同植物群落具有不同特征,中、高密度林分物种多样性对群落贡献较高,低密度林分群落植物空间分布合理,生长状况良好。4)通过改善植物群落的空间分布结构和生长状况,可以提升中密度林分群落中乔木、灌木和草本的物种多样性,而在高、低密度的林分中,则需采取其他经营策略。

**关键词:**群落特征;物种多样性;人工林;油松;耦合关系

**中图分类号:**S791.254 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)05-0001-08

## Coupling Relationship Between Community Characteristics and Species Diversity of *Pinus tabulaeformis* Plantations with Different Densities

WU Hai-ping<sup>1</sup>, SUN Qing-lin<sup>1</sup>, ZHANG Yan-jun<sup>2</sup>, CAI Mao<sup>2</sup>, ZHAO Peng-xiang<sup>2</sup>,  
LI Wei-zhong<sup>2</sup>, WANG Bo-heng<sup>1,2\*</sup>

(1. Eastern China Forest Inventory and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, Zhejiang, China; 2. Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** Exploring the coupling relationship between community characteristics and species diversity is important to the management of plantation ecosystem, and it is also the theoretical basis of the management improvement of plantations. Taking *Pinus tabulaeformis* plantations in the Loess Plateau as the research objects, the community characteristics and species diversity of the plantations with three different densities were compared, the coupling relationship model between the two was constructed, and the management strategies of *P. tabulaeformis* plantations with different densities were discussed. The results were as follows. 1) The community characteristics of *P. tabulaeformis* plantations with different densities were different. The uniform Angle index of high-density plantation (3 400–4 600 trees · hm<sup>-2</sup>) was higher than those of medium-density (2 200–2 800 trees · hm<sup>-2</sup>) and low-density (1 400–2 100 trees · hm<sup>-2</sup>) plantations. The mingling index, mean DBH and crown width of low-density plantations were significantly higher than those of medium and high-density forests. 2) The species diversity indices of the trees, shrubs and herbs species of the plantations with different densities were significantly and positively correlated with themselves. In low-density stands, the tree layer's species diversity index was negatively correlated with shrub layer's, while the shrub layer's was negatively correlated with herbs layer's. 3) Different plant com-

收稿日期:2022-03-15 修回日期:2022-07-22

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0600203);陕西省林业科学研究重大项目(SHLY-2018-02)。

第一作者:吴海平,高级工程师。研究方向:森林可持续经营。E-mail:WHP42@126.com

\*通信作者:王博恒,博士。研究方向:林业调查与森林经营规划。E-mail:vancywang@126.com

munities had different characteristics. Medium and high-density plantations showed a great plant species richness, while low-density plantations showed a great spatial distribution and growth condition. 4) In medium-density plantations, species diversity of the trees, shrubs and herbs could be improved by rebuilding the spatial structure and growth condition of plant communities, while in high and low-density plantations, some other management strategies should be adopted.

**Key words:** community characteristics; species diversity; plantation; *Pinus tabulaeformis*; coupling relationship

人工林是陆地生态系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>,在维护区域生态安全、改善区域气候环境等方面具有积极的作用<sup>[2]</sup>。目前我国人工林普遍存在树种单一、结构不合理、病虫害频发的问题,成为现阶段社会经济发展与生态环境保护之间的重要矛盾<sup>[2-3]</sup>。在《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》明确提出加大人工纯林改造力度的背景下,针对人工林物种多样性和群落特征耦合关系的研究,可以为未来人工林林分改造和群落重建提供理论基础。

物种多样性是反映人工林生态系统稳定性和资源配置合理性的重要指标,受人为干扰<sup>[4]</sup>、林分空间结构<sup>[5]</sup>、林木竞争<sup>[6]</sup>等的共同影响。人工林生态系统中,植物群落的物种多样性往往与植物空间分布、生长状况等存在密切的关系。表现为植物群落的组成可以通过改变区域内竞争关系,影响植物的分布和生长<sup>[7]</sup>;同时,植物的生长及分布状况对光照、水分和空间资源等具有再分配作用<sup>[6]</sup>,间接改变了土壤含水量、土壤养分循环、空气湿度等,从而对植物群落中物种的丰富程度和多样性产生影响<sup>[8]</sup>。

黄龙山林区地处黄土高原腹地,水土流失严重,油松作为该地区重要的乡土树种和地带性造林树种,被广泛应用于当地的造林生产中<sup>[9-11]</sup>。目前该地区油松人工林群落混交度低、结构不合理、林下植被生长状况较差<sup>[2,5]</sup>,亟须开展人工林物种多样性和群落特征耦合关系的研究。因此,本研究以地处陕西省延安市的黄龙山林区油松人工林为对象,对比3种不同密度油松人工林群落特征,探讨群落特征和物种多样性的耦合关系,以期为该地区的油松人工林经营提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于黄土高原东南部(35°28′46″—36°02′01″N, 109°38′49″—110°12′47″E),总面积约 $1.94 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,地势西北高,东南低,地貌以丘陵沟壑为主,林区内的地形破碎化程度较高<sup>[12]</sup>。该地区属温带大陆性季风气候,四季分明,昼夜温差大,年平均气温8~12℃,无霜期175 d,全年日照时数2 370 h,年平均降水量350~600 mm,集中于7—9

月,占年降水量的60%左右。黄龙山林区森林资源储量丰富,有林地面积 $1.68 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,活立木蓄积量为 $6.02 \times 10^6 \text{ m}^3$ <sup>[13]</sup>,植被覆盖率85%。林区内主要乔木包括:油松(*Pinus tabulaeformis*)、杜梨(*Pyrus betulifolia*)、海棠(*Malus spectabilis*)、野山楂(*Crataegus cuneata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等;主要灌木包括:土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)等;主要草本植物包括:蒿属(*Artemisia* sp.)、藁草属(*Carex* sp.)、披针苔草(*Carex lanceolata*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地布设与调查

黄龙山油松人工林多于20世纪60年代造林在800~1 400 m的山地,普遍存在树种单一、林分密度过高、稳定性较低等问题。2017年7—8月,调查样地布设于陕西省延安市黄龙山林区(图1)。依据典型取样的方法,在林区内选取立地质量、海拔、坡度等条件相似的人工林分,布设20 m×30 m试验样地共15块。参考盛炜彤<sup>[2]</sup>和牛硕<sup>[12]</sup>对油松密度等级的划分,并结合前期踏查情况,将试验样地分为低密度(1 400~2 100 株·hm<sup>-2</sup>)样地(NF)5块,中密度(2 200~2 800 株·hm<sup>-2</sup>)样地(SS)5块、高密度(3 400~4 600 株·hm<sup>-2</sup>)样地(AF)5块。

样地调查中,起测径阶为4径阶,分别测定和记录胸径3 cm以上乔木树种胸径、树高、冠幅和相对位置。样地中分别设置5个1 m×1 m的草本调查样方和5个5 m×5 m的灌木调查样方<sup>[5]</sup>,样方布设情况见图2。各样方中,测定和记录植物的种类、盖度、多度和平均高度。

### 2.2 群落特征的差异分析

不同密度的油松人工林中,植物的空间分布格局和竞争关系存在较大的差异,导致林分内乔木、灌木和草本层空间结构和生长状况的异质化。为了阐明不同密度条件下油松人工林群落特征指标间的差异,本研究基于因素方差分析(ANOVA)和最小显

著差法(LSD法)分析了各密度林分中乔木、灌木和草本植物的群落特征差异。选取的群落特征指标包括乔木胸径、树高、平均冠幅、角尺度<sup>[14]</sup>、密集度<sup>[15]</sup>、混交度<sup>[16]</sup>和大小比数<sup>[17]</sup>,灌木和草本的多度、盖度和高度等指标。单因素方差分析使用R语言软件(3.6.1版本)基础模块,指标的显著性水平设置为 $P=0.05$ 。

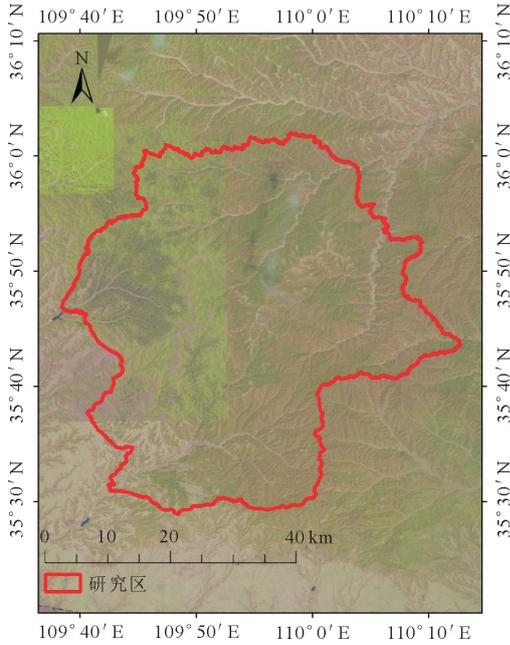


图 1 研究区位置

Fig. 1 The diagram of the locations of the study area

### 2.3 物种多样性的相关关系分析

乔木、灌木和草本层的物种多样性使用 Simpson 优势度指数( $S_{im}$ )、Margalef 丰富度指数( $M_{ar}$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $S_{ha}$ )和 Pielou 均匀度指数( $P_{ie}$ )进行评价<sup>[5]</sup>,计算公式如下

$$M_{ar} = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

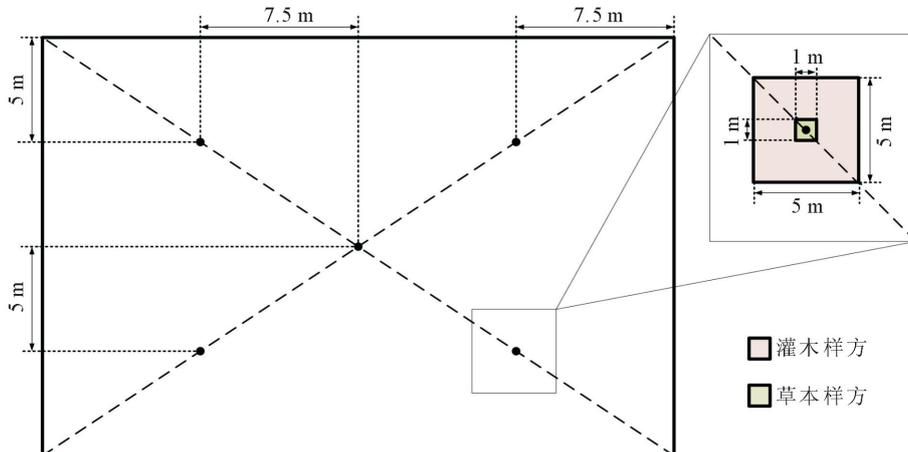


图 2 样方布设位置示意

Fig. 2 The diagram of the positions of quadrats in a sample plot

$$S_{ha} = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$S_{im} = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$P_{ie} = - \frac{\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (4)$$

式中: $S$ 为物种总数; $N$ 为个体总数; $P_i$ 为第*i*个物种的个体数量占总个体数量的比例,即 $P_i = N_i / N$ 。本研究在正态性检验和方差齐次性检验的基础上,基于 Pearson 法对乔木、灌木和草本的物种多样性进行相关性分析,相关系数和显著性的计算使用 R 语言软件(3.6.1)中的基础模块。

### 2.4 耦合关系分析

计算 13 个群落特征指标和 5 个物种多样性指标的主成分得分系数矩阵,在群落特征指标和物种多样性指标中,选取自第 1 主成分起累计贡献超过 80%的所有主成分,并计算各指标在每个主成分上的得分  $F_{ij}$  和  $P_{ij}$  及特征值  $\varphi_i$ ,进而计算样地  $j$  中群落特征指标  $F$  和物种多样性指标  $P$  的综合得分  $F_j$  和  $P_j$ ,计算公式为

$$F_{ij} = \sum (m_i \times X_j) \quad (5)$$

$$P_{ij} = \sum (n_i \times Y_j) \quad (6)$$

$$F_j = \frac{\sum (F_{ij} \times \varphi_i)}{\sum \varphi_i} \quad (7)$$

$$P_j = \frac{\sum (P_{ij} \times \varphi_i)}{\sum \varphi_i} \quad (8)$$

式中: $F_{ij}$  和  $P_{ij}$  是第  $j$  个样地中群落特征指标  $X$  和物种多样性指标  $Y$  的第  $i$  个主成分得分; $m_i$  和  $n_i$  是第  $j$  个样地中群落特征指标  $X$  和物种多样性指标  $Y$  的第  $i$  个主成分得分系数。

为阐明群落特征和物种多样性间的耦合关系,基于样地的不同群落特征指标综合得分  $F_j$  和物种多样性指标综合得分  $P_j$ ,对群落特征和物种多样性指标进行排序和回归分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同密度油松人工林群落特征差异

不同密度油松人工林在群落特征上的差异见表 1。

3.1.1 乔木层生长状况方面 林木的生长状况与光照、水分和空间等资源的竞争密切相关,而密度则直接影响个体能够分配的资源数量。低密度林分中林木的平均胸径和冠幅直径均显著大于中、高密度林分,不同类型林分中林木平均树高表现为低密度 > 中密度 > 高密度,但组间差异不显著。

3.1.2 乔木层空间结构方面 高密度林分的角尺度显著大于中、低密度林分,表明高密度林分内林木的分布状况更接近均匀分布状态,而中、低密度林分中则更接近于随机分布。混交度方面,低密度林分

混交度显著高于中、高密度的林分,表明低密度林分中其他树种自然更新状况良好,树种的空间隔离程度较低,而中、高密度林分则存在较强的树种空间隔离,林木种类单一。不同密度的油松人工林在密集度和比数上无显著差异,表明各密度林分内林木的大小分化程度和林木密集程度近似。

3.1.3 林下植物生长状况方面 不同密度的油松人工林林下灌木和草本群落特征无显著差异。在植物平均高度上,灌木和草本层表现出相似的特征,均为中密度林分低于高、低密度林分。平均盖度和多度方面,灌木和草本层略有差异,灌木层的平均盖度和多度均表现为高密度 > 中密度 > 低密度,而草本平均盖度表现为中密度 > 高密度 > 低密度,草本多度表现为中密度 > 低密度 > 高密度。

表 1 不同密度油松人工林群落特征及其差异

Table 1 The discrepancy of community characteristics among *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities

| 植被层次 | 指标                                 | 林分类型                     |                          |                          |
|------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|      |                                    | 高密度(HD)                  | 中密度(MD)                  | 低密度(LD)                  |
| 乔木层  | 密集度(C)                             | 0.96±0.03 <sup>a</sup>   | 0.98±0.01 <sup>a</sup>   | 0.93±0.07 <sup>a</sup>   |
|      | 胸径( $D_{BH}$ )/cm                  | 10.23±1.95 <sup>b</sup>  | 12.92±0.72 <sup>b</sup>  | 16.32±3.71 <sup>a</sup>  |
|      | 树高( $h$ )/m                        | 10.56±3.03 <sup>a</sup>  | 12.92±0.90 <sup>a</sup>  | 13.85±2.73 <sup>a</sup>  |
|      | 冠幅直径( $C_D$ )/m                    | 2.86±0.42 <sup>b</sup>   | 3.22±0.14 <sup>b</sup>   | 3.79±0.18 <sup>a</sup>   |
|      | 角尺度(W)                             | 0.53±0.03 <sup>a</sup>   | 0.49±0.03 <sup>b</sup>   | 0.48±0.04 <sup>b</sup>   |
|      | 混交度(M)                             | 0.10±0.04 <sup>b</sup>   | 0.10±0.05 <sup>b</sup>   | 0.36±0.24 <sup>a</sup>   |
|      | 大小比数(U)                            | 0.49±0.01 <sup>a</sup>   | 0.50±0.02 <sup>a</sup>   | 0.48±0.03 <sup>a</sup>   |
| 灌木层  | 灌木多度( $S_A$ )/(株·m <sup>-2</sup> ) | 2.23±1.28 <sup>a</sup>   | 2.19±0.68 <sup>a</sup>   | 2.01±0.82 <sup>a</sup>   |
|      | 灌木平均盖度( $S_C$ )(%)                 | 40.00±25.00 <sup>a</sup> | 32.00±9.08 <sup>a</sup>  | 29.20±23.15 <sup>a</sup> |
|      | 灌木平均高度( $S_H$ )/m                  | 0.85±0.38 <sup>a</sup>   | 0.50±0.21 <sup>a</sup>   | 0.57±0.41 <sup>a</sup>   |
| 草本层  | 草本多度( $G_A$ )/(株·m <sup>-2</sup> ) | 23.76±12.18 <sup>a</sup> | 33.44±16.93 <sup>a</sup> | 27.44±19.15 <sup>a</sup> |
|      | 草本平均盖度( $G_C$ )(%)                 | 23.40±11.74 <sup>a</sup> | 26.20±7.33 <sup>a</sup>  | 15.60±11.15 <sup>a</sup> |
|      | 草本平均高度( $G_H$ )/m                  | 0.17±0.08 <sup>a</sup>   | 0.15±0.05 <sup>a</sup>   | 0.17±0.05 <sup>a</sup>   |

注:表中不同小写字母表示不同密度林分间在 0.05 水平上显著差异。

#### 3.2 不同层次植物物种多样性的相关关系

基于 Pearson 相关性分析见图 3,高、中、低密度林分植物多样性间表现出相似的相关关系。其中,灌木层 Marglef 指数与乔木层多样性指数的关系在高、中、低密度林分中分别表现为:较弱正相关、较强负相关和显著负相关。此外,中、高密度林分中,乔木、灌木和草本层物种多样性指数仅与其自身显著正相关,表明各层植物的多样性间无明显的相互作用关系,即某一层次植物物种组成的变化对其他层次植物物种组成无明显的促进或抑制作用。而低密度林分中,乔木层 Marglef、Shannon-Wiener 和 Pielou 指数均与灌木层 Marglef 指数显著负相关,表明乔木层的植物种类的变化对灌木层植物多样性具有显著的抑制作用;草本层 Marglef 指数与灌木层 simpson 指数、Pielou 指数显著负相关,表明灌木和草本层植物多样性间存在具有显著的抑制作用。

#### 3.3 群落特征与物种多样性耦合关系

对群落特征指标和物种多样性指标分别进行主

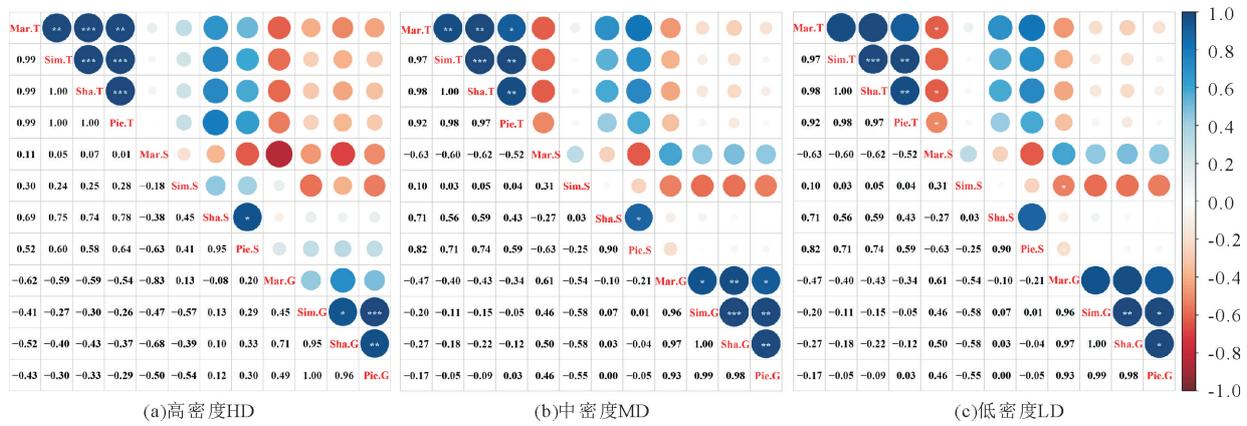
成分分析,得到指标在主成分上的特征值、贡献率(表 2)和因子的权重得分系数矩阵(表 3)。在群落特征的主成分分析中(表 2),分别在前 2 个主成分的累计贡献率分别达到 82.67%(HD)、82.89%(MD)和 89.2%(LD),均大于 80%,表明各组中,前 2 个主成分均可以代表林分群落特征。而在物种多样性主成分的分析中,高密度林分的前 2 个主成分的累计贡献率为 89.13%,中、低密度林分的前 3 个主成分累计贡献率分别为 90.1%和 94.47%,均大于 80%。表明高密度林分的物种多样性前 2 个主成分,中、低密度林分的物种多样性前 3 个主成分,可以分别代表相应林分的物种多样性特征。

依据各主成分的贡献率(表 2)、各因子得分系数(表 3),基于式(5)一式(8)分别计算各密度林分中不同样地的乔木结构综合得分与灌木多样性综合得分,并进行排序和回归分析。

中、高密度林分中,植物群落的物种多样性得分较高(图 4),表明上述密度林分的植物群落主要受

群落物种多样性的影响;而低密度林分中,植物群落的群落特征得分较高,表明低密度植物群落表现出空间分布合理,生长状况良好的特征。

此外,中、高密度林分中,物种多样性与群落特征呈正相关关系,回归模型的决定系数分别为 0.714 6(MD)和 0.168 2(HD);而低密度林分中,物



注:Mar. T 为乔木层 Margalef 指数;Sim. T 为乔木层 Simpson 指数;Sha. T 为乔木层 Shannon-Winner 指数;Pie. T 为乔木层 Pielou 指数;Mar. S 为灌木层 Margalef 指数;Sim. S 为灌木层 Simpson 指数;Sha. S 为灌木层 Shannon-Winner 指数;Pie. S 为灌木层 Pielou 指数;Mar. G 为草本层 Margalef 指数;Sim. G 为草本层 Simpson 指数;Sha. G 为草本层 Shannon-Winner 指数;Pie. G 为草本层 Pielou 指数。

图 3 不同密度油松人工林乔木、灌木和草本层物种多样性的相关关系

Fig. 3 The correlational relationship among diversity indexes of tree, shrub and herb layers in *P. tabuli formis* plantations with different densities

表 2 主成分特征值( $\varphi_i$ )及贡献率

Table 2 Eigen-values and contribution rate of each principal component

| 林分类型    | 主成分 | 群落特征               |        |          | 多样性                |        |          |
|---------|-----|--------------------|--------|----------|--------------------|--------|----------|
|         |     | 特征值( $\varphi_i$ ) | 贡献率(%) | 累计贡献率(%) | 特征值( $\varphi_i$ ) | 贡献率(%) | 累计贡献率(%) |
| 高密度(HD) | PC1 | 8.67               | 66.72  | 66.72    | 6.01               | 50.07  | 50.07    |
|         | PC2 | 2.91               | 22.41  | 89.13    | 3.91               | 32.61  | 82.67    |
|         | PC3 | 0.80               | 6.13   | 95.26    | 1.70               | 14.16  | 96.83    |
|         | PC4 | 0.62               | 4.74   | 100.00   | 0.38               | 3.17   | 100.00   |
| 中密度(MD) | PC1 | 5.14               | 39.57  | 39.57    | 6.03               | 50.25  | 50.25    |
|         | PC2 | 4.74               | 36.47  | 76.03    | 3.92               | 32.64  | 82.89    |
|         | PC3 | 1.83               | 14.07  | 90.10    | 1.15               | 9.61   | 92.5     |
|         | PC4 | 1.29               | 9.90   | 100.00   | 0.90               | 7.50   | 100.00   |
| 低密度(LD) | PC1 | 5.57               | 42.87  | 42.87    | 5.82               | 48.49  | 48.49    |
|         | PC2 | 4.26               | 32.74  | 75.62    | 4.89               | 40.71  | 89.2     |
|         | PC3 | 2.45               | 18.85  | 94.47    | 1.07               | 8.90   | 98.11    |
|         | PC4 | 0.72               | 5.53   | 100.00   | 0.23               | 1.90   | 100.00   |

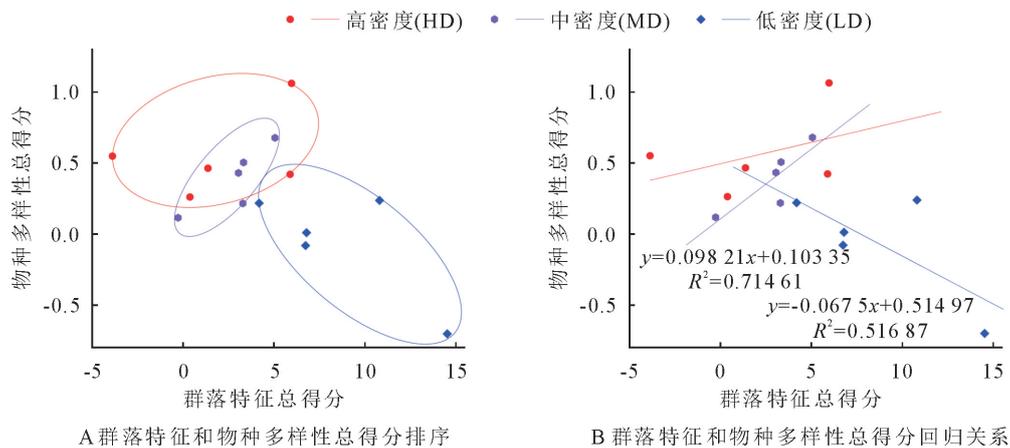


图 4 群落特征和物种多样性总得分排序和回归关系

Fig. 4 The ordination and regression plots of total score of community characteristics and species diversity

表 3 因子得分系数矩阵

Table 3 Matrix of component score coefficient

| 林分类型    | 指标                    | 群落特征主成分 |       |       | 指标            | 多样性主成分 |       |
|---------|-----------------------|---------|-------|-------|---------------|--------|-------|
|         |                       | PC1     | PC2   | PC3   |               | PC1    | PC2   |
| 高密度(HD) | <i>W</i>              | -0.11   | 0.08  | —     | Mar. <i>T</i> | 0.16   | 0.04  |
|         | <i>M</i>              | 0.11    | -0.11 | —     | Sim. <i>T</i> | 0.16   | 0.07  |
|         | <i>U</i>              | 0.09    | -0.1  | —     | Sha. <i>T</i> | 0.16   | 0.06  |
|         | <i>C</i>              | 0.05    | 0.3   | —     | Pie. <i>T</i> | 0.16   | 0.08  |
|         | <i>D<sub>BH</sub></i> | 0.1     | 0.1   | —     | Mar. <i>S</i> | 0.04   | -0.21 |
|         | <i>h</i>              | 0.11    | -0.02 | —     | Sim. <i>S</i> | 0.08   | 0.01  |
|         | <i>C<sub>D</sub></i>  | 0.04    | 0.31  | —     | Sha. <i>S</i> | 0.1    | 0.19  |
|         | <i>S<sub>A</sub></i>  | -0.11   | -0.03 | —     | Pie. <i>S</i> | 0.07   | 0.22  |
|         | <i>S<sub>C</sub></i>  | -0.09   | -0.08 | —     | Mar. <i>G</i> | -0.11  | 0.12  |
|         | <i>S<sub>H</sub></i>  | -0.05   | 0.31  | —     | Sim. <i>G</i> | -0.1   | 0.18  |
|         | <i>G<sub>A</sub></i>  | 0.1     | -0.12 | —     | Sha. <i>G</i> | -0.11  | 0.19  |
|         | <i>G<sub>C</sub></i>  | 0.11    | 0.06  | —     | Pie. <i>G</i> | -0.1   | 0.18  |
|         | <i>G<sub>H</sub></i>  | 0.1     | 0.02  | —     | —             | —      | —     |
| 中密度(MD) | <i>W</i>              | -0.07   | 0.17  | 0.15  | Mar. <i>T</i> | 0.15   | 0.09  |
|         | <i>M</i>              | 0.14    | 0.13  | 0.08  | Sim. <i>T</i> | 0.14   | 0.11  |
|         | <i>U</i>              | 0.09    | -0.12 | 0.33  | Sha. <i>T</i> | 0.15   | 0.1   |
|         | <i>C</i>              | -0.13   | -0.11 | 0.12  | Pie. <i>T</i> | 0.13   | 0.11  |
|         | <i>D<sub>BH</sub></i> | 0.19    | 0.05  | 0.04  | Mar. <i>S</i> | -0.13  | 0     |
|         | <i>h</i>              | 0.13    | -0.14 | 0.11  | Sim. <i>S</i> | 0.04   | -0.16 |
|         | <i>C<sub>D</sub></i>  | -0.15   | 0.01  | 0.35  | Sha. <i>S</i> | 0.1    | 0.12  |
|         | <i>S<sub>A</sub></i>  | -0.14   | 0.13  | -0.21 | Pie. <i>S</i> | 0.12   | 0.13  |
|         | <i>S<sub>C</sub></i>  | -0.15   | -0.09 | 0.04  | Mar. <i>G</i> | -0.13  | 0.17  |
|         | <i>S<sub>H</sub></i>  | 0.01    | 0.13  | 0.4   | Sim. <i>G</i> | -0.09  | 0.21  |
|         | <i>G<sub>A</sub></i>  | -0.03   | 0.19  | -0.12 | Sha. <i>G</i> | -0.1   | 0.2   |
|         | <i>G<sub>C</sub></i>  | 0.01    | 0.19  | 0.18  | Pie. <i>G</i> | -0.09  | 0.21  |
|         | <i>G<sub>H</sub></i>  | 0.16    | 0.05  | -0.11 | —             | —      | —     |
| 低密度(LD) | <i>W</i>              | -0.07   | -0.11 | 0.32  | Mar. <i>T</i> | 0.12   | 0.12  |
|         | <i>M</i>              | 0.11    | -0.18 | 0.09  | Sim. <i>T</i> | 0.1    | 0.16  |
|         | <i>U</i>              | -0.11   | -0.1  | -0.02 | Sha. <i>T</i> | 0.1    | 0.16  |
|         | <i>C</i>              | 0.08    | -0.01 | 0.36  | Pie. <i>T</i> | 0.09   | 0.17  |
|         | <i>D<sub>BH</sub></i> | 0.17    | 0.04  | -0.11 | Mar. <i>S</i> | -0.09  | -0.16 |
|         | <i>h</i>              | 0.18    | -0.02 | -0.02 | Sim. <i>S</i> | -0.16  | 0.04  |
|         | <i>C<sub>D</sub></i>  | -0.06   | 0.21  | -0.09 | Sha. <i>S</i> | -0.17  | -0.02 |
|         | <i>S<sub>A</sub></i>  | 0.15    | -0.05 | 0.18  | Pie. <i>S</i> | -0.12  | 0.13  |
|         | <i>S<sub>C</sub></i>  | 0.16    | -0.05 | -0.17 | Mar. <i>G</i> | 0.13   | -0.1  |
|         | <i>S<sub>H</sub></i>  | 0.15    | -0.03 | -0.17 | Sim. <i>G</i> | 0.12   | -0.14 |
|         | <i>G<sub>A</sub></i>  | 0.08    | 0.18  | 0.2   | Sha. <i>G</i> | 0.12   | -0.14 |
|         | <i>G<sub>C</sub></i>  | 0.03    | 0.23  | 0.08  | Pie. <i>G</i> | 0.11   | -0.11 |
|         | <i>G<sub>H</sub></i>  | 0.06    | 0.21  | 0.09  | —             | —      | —     |

注: *W* 为角尺度; *M* 为混交度; *U* 为大小比数; *C* 为密集度; *D<sub>BH</sub>* 为胸径; *h* 为树高; *C<sub>D</sub>* 为冠幅直径; *S<sub>A</sub>* 为灌木多度; *S<sub>C</sub>* 为灌木平均盖度; *S<sub>H</sub>* 为灌木平均高度; *G<sub>A</sub>* 为草本多度; *G<sub>C</sub>* 为草本平均盖度; *G<sub>H</sub>* 为草本平均高度; Mar. *T* 为乔木层 Margalef 指数; Sim. *T* 为乔木层 Simpson 指数; Sha. *T* 为乔木层 Shannon-Winner 指数; Pie. *T* 为乔木层 Pielou 指数; Mar. *S* 为灌木层 Margalef 指数; Sim. *S* 为灌木层 Simpson 指数; Sha. *S* 为灌木层 Shannon-Winner 指数; Pie. *S* 为灌木层 Pielou 指数; Mar. *G* 为草本层 Margalef 指数; Sim. *G* 为草本层 Simpson 指数; Sha. *G* 为草本层 Shannon-Winner 指数; Pie. *G* 为草本层 Pielou 指数。

种多样性与群落特征呈负相关关系, 回归模型的决定系数为 0.516 9(LD)。表明在中密度林分(2 200~2 800 株·hm<sup>-2</sup>)和高密度(3 400~4 600

株·hm<sup>-2</sup>)林分中, 可以通过改善植物群落的空间分布结构和生长状况, 促进群落中乔木、灌木和草本的物种多样性的增加。在低密度林分中, 乔木、灌木

和草本的空间分布较为合理,对于光照等资源利用效率较高。在该密度下(1 400~2 100 株·hm<sup>-2</sup>),增加群落整体多样性或会破坏现存植物群落的生态位稳态,造成物种生态位的重叠,激化不同物种间的资源竞争,进而抑制植物群落的发育。

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

通过建立油松人工林群落特征与物种多样性的耦合关系,分析讨论不同密度林分油松人工林的经营策略,结果表明:1)高密度林分的角尺度显著大于中、低密度林分;低密度林分混交度、平均胸径和冠幅直径显著高于中、高密度。2)中、高密度林分中,各层次物种多样性指数仅与其自身显著正相关,而低密度林分中,乔木层多样性指数与灌木层 Margalef 指数显著负相关,草本层 Margalef 指数与灌木层多样性指数显著负相关。3)不同密度的林分中,植物生长的特征具有差异,中、高密度林分中,植物种类丰富;而低密度林分中,植物空间分布合理,生长状况较好。

人工林生态系统的演替同时受到人为和自然干扰,演替过程和速度往往与天然林生态系统存在较大差异。本研究结果表明,油松人工林乔木层植物的生长状况和空间分布状态存在显著差异,这主要是由于人工林造林时往往以严格的株行距为标准<sup>[18]</sup>,控制林木间的空间距离,而中、高密度的林分受到人工抚育经营措施的影响程度较低,林木分布的状态近似于造林时的标准均匀分布状态。相较于中、高密度的林分,低密度的林分中,较高强度的经营抚育措施不仅直接改变了原有乔木的分布格局,同时也为萌生幼苗的天然更新提供了物质条件<sup>[19]</sup>,促使林木的分布更接近于随机分布,并继续向随机分布过渡,最终形成近似于天然林的稳定格局。混交度方面,低密度林分混交度显著高于中、高密度的林分。这与较高的林分密度下林木间对光照、水分和空间等资源强烈竞争有关<sup>[20]</sup>。有限的资源抑制了其他树种的自然更新和发育,造成林分内树种单一,林分内树种空间隔离程度较高<sup>[21]</sup>。此外,本研究中3种密度油松人工林在密集度和大小比数上无显著差异,主要是由于人工林中林木属同期栽植,林木的大小分化程度和林木密集程度近似。而植物生长状况方面,林木的平均树高、胸径和冠幅直径均随密度的降低而增加,这与低密度下林木的竞争强度较低有关,与一些学者的研究也展现出相似的结果<sup>[22-24]</sup>。灌木和草本群落的生长状况在3个密度林分中无显著差异,这主要是由于油松林的凋落物油

性高且不易分解<sup>[25-26]</sup>,凋落物积累厚度较大,灌草植物生长状况普遍较差。

### 4.2 结论

高密度林分可以制定适当的采伐和经营方案,降低林分密度,改善林木的生长状况;中密度林分可以考虑通过疏伐、生长伐、修枝等措施,改善植物群落的空间分布结构和生长状况,进而提升乔木、灌木和草本层的物种多样性,达到人工林“提质增效”的目的<sup>[27]</sup>;低密度林分,现有植物群落对资源利用的状态合理,增加群落整体多样性会造成生态位上的重叠,激化不同物种间的资源竞争,进而抑制植物群落的发育。因此,应考虑群落特征与多样性间的均衡,通过土壤改良,结构化抚育等方法,同时改善该类型林分中植物生长状况、结构和多样性。

此外,由于本研究对象选择具有一定局限性,故结论仅适用于黄龙山地区油松人工林生态系统,未来的研究中可以纳入更多地区和类型的样本,以期更好地阐明人工林群落特征与物种多样性的耦合关系。

### 参考文献:

- [1] CHAPIN F S, MATSON P A, MOONEY H A. 2011. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer, 2011.
- [2] 盛炜彤. 中国人工林及其育林体系[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [3] 刘家顺. 中国林业产业政策研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [4] 周建国, 李新旺, 胡金明, 等. 怒江流域云南段生物多样性保护地人为干扰分析[J]. 热带地理, 2018, 38(4): 465-474. ZHOU J G, LI X W, HU J M, et al. Human disturbance of biodiversity conservation areas in the Nujiang River Basin in Yunnan Province[J]. Tropical Geography, 2018, 38(4): 465-474. (in Chinese)
- [5] WANG B H, BU Y K, LI Y J, et al. Quantifying the relationship among impact factors of shrub layer diversity in Chinese pine plantation forest ecosystems[J]. Forests, 2019, 10(9): 781.
- [6] WANG B H, BU Y K, TAN G H, et al. Quantifying the effect of crown vertical position on individual tree competition: total overlap index and its application in sustainable forest management[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7498.
- [7] WEISKITTEL A R, HANN D W, KERSHAW Jr J A, et al. Forest growth and yield modeling[M]. New Jersey: Wiley, 2011.
- [8] 卢炜丽. 重庆四面山植物群落结构及物种多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [9] 洪德伟. 晋西黄土区油松根系与土壤的摩擦力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [10] 韩兆敏. 内蒙古砒砂岩区油松和沙棘茎流耗水特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

- [11] 张志达. 对森林经营若干问题的思考[J]. 林业资源管理, 2008(4):12-14.  
ZHAN Z D. On some issues of forest management[J]. Forest Resources Management, 2008(4):12-14. (in Chinese)
- [12] 牛硕. 黄龙山林区人工油松林模拟抚育与预测[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2016.
- [13] 段高辉, 赵鹏祥, 周远博, 等. 黄龙山林区油松人工林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5):161-166, 194.  
DUAN G H, ZHAO P X, ZHOU Y B, *et al.* On site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in the forest region of Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5):161-166, 194. (in Chinese)
- [14] 惠刚盈, Gadow K V, Albert M. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999(1):39-44.  
HUI G Y, Gadow K V, Albert M. The neighborhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999(1):39-44. (in Chinese)
- [15] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4):1-9.  
HUI G Y. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4):1-9. (in Chinese)
- [16] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. 林业科学研究, 2001(1):23-27.  
HUI G Y, HUI Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. Forest Research, 2001(1):23-27. (in Chinese)
- [17] 惠刚盈, Gadow K V, Albert M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学研究, 1999(1):4-9.  
HUI G Y, Gadow K V, Albert M. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. Forest Research, 1999(1):4-9. (in Chinese)
- [18] 张艳华, 方升佐, 田野, 等. 无性系和株行距对杨树人工林生长和树冠结构的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(5):13-19, 94.  
ZHANG Y H, FANG S Z, TIAN Y. Effects of clone and planting spacing on growth and morphological traits of poplar plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(5):13-19, 94. (in Chinese)
- [19] 郭秋菊. 择伐和火干扰对长叶松幼苗更新的影响[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2013.
- [20] 康昕. 个体大小差异对群落生物量及物种多样性的影响[D]. 南京:南京大学, 2016.
- [21] 周远博, 卜元坤, 陈佳琦, 等. 黄龙山油松林水平空间结构分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1):45-53.  
ZHOU Y B, BU Y K, CHEN J Q, *et al.* Horizontal spatial structure of *Pinus tabulaeformis* forests in Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1):45-53. (in Chinese)
- [22] 吴镇发. 不同造林密度对海南蒲桃林分生长和土壤理化性质的影响[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(4):60-61, 70.
- [23] 韩照日格图, 白玉荣, 王立军, 等. 沙地樟子松林分密度对林木生长的影响研究[J]. 林业调查规划, 2021, 46(4):1-6.  
HANZHAORIGETU, BAI Y R, WANG L J, *et al.* Effects of stand density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on forest growth in sandy land [J]. Forest Inventory and Planning, 2021, 46(4):1-6. (in Chinese)
- [24] 王成德. 人工林树冠生长模拟及密度控制决策技术研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- [25] 杨晨, 刘勇, 陈晓, 等. 油松人工林下真菌群落对凋落物分解的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(7):41-47.  
YANG C, LIU Y, CHEN X, *et al.* Effect of fungal communities on litter decomposition under *Pinus tabulaeformis* artificial forests[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(7):41-47. (in Chinese)
- [26] 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 油松叶凋落物分解速率、养分归还及组分对间伐强度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5):52-57.  
LI G F, LIU Y, LI R S, *et al.* Responses of decomposition rate, nutrient return and composition of leaf litter to thinning intensities in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(5):52-57. (in Chinese)
- [27] 邓伦秀. 杉木人工林林分密度效应及材种结构规律研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2010.