

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240292

## 亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响

周雨飞<sup>1,2</sup> 罗超<sup>1</sup> 李生<sup>1</sup> 陈子熙<sup>1</sup> 邵慰忠<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 西南林业大学水土保持学院, 云南 昆明 650224;  
3. 建德市林业局, 浙江 杭州 311699)

**摘要:**【目的】分析马尾松纯林改造对林分结构的影响,旨在明确最适宜的改造方式,为马尾松林结构的优化和稳定性提供参考。【方法】以建德市马尾松次生林轻度间伐无补植(LTNP)、中度间伐无补植(MTNP)、重度间伐无补植(HTNP)、中度间伐补植(MTP)、重度间伐补植(HTP)、皆伐补植(CCP)后的林分为对象,探究间伐和补植两类措施对林分空间和非空间结构的影响,并对不同改造模式的林分结构进行综合评价。【结果】(1)间伐和补植改变了林分内树种组成。随着间伐强度的增加,树种多样性呈先增后降的趋势,林分胸径结构由“单峰”向“多峰”结构转变。林分中小径阶林木占比提高,在同等间伐强度下,补植林分内大径阶林木占比高于无补植林分。(2)CCP的角尺度显著低于其他改造林分,LTNP的混交度显著低于其他改造林分。随着间伐强度增加,开敞度逐渐增加,林层指数先增加后降低,大小比数和竞争指数逐渐减小,且在重度间伐强度下,补植林分的大小比数和竞争指数均低于未补植林分。(3)不同改造模式的林分结构综合评价排序为MTP>HTNP>CCP>HTP>MTNP>LTNP。【结论】马尾松中度间伐补植(浙江樟、浙江楠)后,整体林分结构得到显著优化,对促进马尾松纯林向针阔混交和阔叶混交林演替具有重要作用。本研究为马尾松林的可持续经营提供理论参考。

**关键词:** 马尾松; 间伐强度; 阔叶树补植; 林分结构; 单位圆法

中图分类号: S753; S791.248 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2025)01-0011-11

引文格式: 周雨飞, 罗超, 李生, 等. 亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 11-21. Zhou Yufei, Luo Chao, Li Sheng, et al. Effects of broadleaved transformation on stand structure of *Pinus massoniana* forest in subtropical area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 11-21.

### Effects of broadleaved transformation on stand structure of *Pinus massoniana* forest in subtropical area

Zhou Yufei<sup>1,2</sup> Luo Chao<sup>1</sup> Li Sheng<sup>1</sup> Chen Zixi<sup>1</sup> Shao Weizhong<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

3. Jiande Forestry Bureau, Hangzhou 311699, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] Forest structure plays a crucial role in tree growth and stability. Analyzing the impact of transformation practices on the structure of *Pinus massoniana* forests can provide theoretical reference for forest quality improvement and sustainable management. [Method] Different transformation treatments of secondary *P. massoniana* forests, including light thinning without replanting (LTNP), moderate thinning without replanting (MTNP), heavy thinning without replanting (HTNP), moderate thinning with broadleaf replanting (MTP), heavy thinning with broadleaf replanting (HTP), and clear cutting with broadleaf replanting (CCP) were selected as research objects in Jiande County, Zhejiang Province of

收稿日期: 2024-08-30 修回日期: 2024-11-21

基金项目: 世界银行贷款项目(8856-CN-JLJY3)。

第一作者: 周雨飞。主要研究方向: 森林生态学。Email: 2980461079@qq.com 地址: 311400 浙江省杭州市富阳区大桥路73号中国林业科学研究院亚热带林业研究所。

责任作者: 罗超, 助理研究员。主要研究方向: 脆弱生态区植被恢复。Email: chuckluo3@163.com 地址: 同上。李生, 研究员。主要研究方向: 脆弱区植被恢复与治理。Email: lnlyls@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

eastern China. We explored the effects of thinning and replanting on both spatial and non-spatial stand structures, and provided comprehensive evaluation of stand structure under different transformation treatments. [Result] (1) Thinning and broadleaf replanting significantly altered the forest species composition. With the increasing of thinning intensity, tree species diversity initially increased and then decreased. The DBH structure of stand changed from “single peak” to “multi-peak”. The proportion of small or medium diameter trees raised and non-replanted stands had a higher proportion than replanted stands under same thinning intensity. (2) In terms of space structure, the uniform angle index of CCP was significantly lower than that of other transformation types, and the mingling degree of LTNP was markedly lower compared with others. As thinning intensity increased, stand openness gradually increased, the forest layer index initially increased and then decreased. Additionally, both the dominance and competition index gradually decreased, and these two indexes were lower in broadleaf-replanted stands than in non-replanted ones under the heavy thinning intensity. (3) The rank of comprehensive evaluation value of stand structure was MTP > HTNP > CCP > HTP > MTNP > LTNP. [Conclusion] After moderate thinning and widening of *Pinus massoniana* (e.g., *Cinnamomum chekiangense*, *Phoebe chekiangensis*), the overall forest structure was significantly optimized, which plays an important role in promoting the transition of pure *Pinus massoniana* forests to mixed coniferous and broadleaved forests. This study provides theoretical reference for the sustainable management of *Pinus massoniana* forest.

**Key words:** *Pinus massoniana*; thinning intensity; broadleaved tree replanting; stand structure; unit circle method

林分结构调整是森林经营的重要内容,林分结构包括树种、胸径、树高、林木个体大小差异等非空间结构,也包括林木分布格局、单木竞争指数等空间结构,能直接或间接影响林分的稳定和发展潜力<sup>[1]</sup>。合理的林分结构是提高整个森林生态系统结构与功能的关键<sup>[2-3]</sup>,在一定程度上决定着森林的天然更新和演替方向,对森林质量优化和可持续经营具有重要的指导及参考作用。

马尾松(*Pinus massoniana*)作为亚热带低山丘陵区群落演替的先锋树种,由于其耐旱易存活、繁殖能力强等生态特征,以及速生丰产的高经济效益特点,是南方亚热带荒山造林的主要树种<sup>[4-5]</sup>。由于马尾松林长期高密度的纯林经营,造成了林地退化、生产力和多样性降低等问题<sup>[6-7]</sup>,严重影响了林地的可持续经营。因此,需要通过间伐和补植等抚育措施,对马尾松林进行阔叶化改造,促进马尾松低效纯林向针阔混交和阔叶混交林演替。

目前,许多学者针对马尾松林改造对林分结构与功能的影响进行了大量研究。马尾松林改造能够改善林分年龄和空间结构,在树种多样性、林分多功能提升等方面成效显著<sup>[8-9]</sup>。此外,马尾松林改造不仅提高了林分的生长活力和生长量,还能促进林下植被的稳定性和生长发育,有利于提升森林生态系统的结构和功能。人工采伐和抚育管理下的马尾松林林分形成的时间缩短,对林分质量提高有正面影响<sup>[10]</sup>。林分结构变化的驱动因素是复杂的,特别是

间伐等可能破坏现有驱动机制的一些干扰会直接或间接影响林分结构<sup>[11]</sup>。有研究表明,中度间伐能形成稳定的空间结构,轻度间伐会导致大量幼苗的出现,而重度间伐则会导致局部树种多样性减少<sup>[12]</sup>。总体上,目前国内外大部分研究均采用结构参数的均值或一元、二元分布等形式量化林分空间结构特征<sup>[13-15]</sup>,而针对马尾松林改造后的林分结构的综合评价仍相对缺乏。此外,阔叶化改造前后树种组成、多样性等指标的变化与林分空间结构的关联机制也尚不明晰,需要进一步深入探讨。

因此,本研究以亚热带典型马尾松次生林不同改造模式的林分为研究对象,主要探究间伐和补植两类改造措施对林分空间和非空间结构的影响,并对不同改造模式的林分结构进行综合评价,分析阔叶化指标与林分结构的关系,从而更加科学合理地评判各类林分改造工程的效果,以期为区域内马尾松林的质量优化和可持续经营提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

研究区地处浙江省建德市(29°12'20" ~ 29°46'27" N, 118°53'46" ~ 119°45'51" E),属亚热带季风气候,温暖湿润,多年平均气温 16.9 °C,无霜期 254 d,年均降水量 1 528 mm,年均蒸发量 917.8 mm,年均相对湿度 77.7%,年均风速 1.65 m/s。土壤主要有黄壤、红壤、岩性土、潮土和水稻土<sup>[16]</sup>,地带性植被为壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、金缕梅科

(Hamamelidaceae)、木兰科(Magnoliaceae)、冬青科(Aquifoliaceae)、山茶科(Theaceae)等树种组成的常绿阔叶林<sup>[17]</sup>。

### 1.1 样地设置与调查

在研究区内选择改造前林分密度、立地条件和龄级基本一致的马尾松林为研究对象,按照马尾松间伐强度和是否补植划分为 6 类林分改造类型:轻度间伐无补植(light thinning without replanting, LTNP)、中度间伐无补植(moderate thinning without replanting, MTNP)、重度间伐无补植(heavy thinning without replanting, HTNP)、中度间伐补阔(moderate thinning with broadleaf replanting, MTP)、重度间伐补阔(heavy thinning with broadleaf replanting, HTP)、皆伐补阔(clear cut with broadleaf replanting, CCP),各类型样地间伐时间分布在 2005—2007 年, MTP、CCP 补植时间在 2010 年, HTP 补植时间在 2015 年。补植阔叶树苗均为 2 年生容器苗(地径 > 1 cm, 高度 > 1 m)。

样地调查于 2023 年 7—8 月进行。参考吴载璋<sup>[18]</sup>、谢阳生等<sup>[19]</sup>及张亚昊等<sup>[20]</sup>研究中的样地设置方法,根据典型抽样的方法,每类改造林分内随机设置 3 个 20 m × 20 m 的标准样地,样地间隔大于 30 m,共设置了 18 个标准样地。记录各林分样地经纬度和海拔、坡度和坡向等地形因子(表 1)。每个标准样地划分为 16 个 5 m × 5 m 的样方,对样方内的乔木进行每木检尺,记录树种、胸径、树高、冠幅,并标记目标树(马尾松)及 4 株相邻树,测量每株相邻树与目标树的距离和角度,用于计算林分空间结构指标。

### 1.2 非空间结构指标计算

#### 1.2.1 物种重要值

重要值( $I_A$ )是反映树种在林分中优势程度的定量指标,它能够反映树种在林分中的重要性<sup>[21]</sup>。

$$I_A = \frac{R_A + R_H + R_S}{3}$$

式中: $R_A$  为相对多度, $R_H$  为相对高度, $R_S$  为相对显

著度。具体而言, $R_A$  为某树种多度占有物种多度之和的百分比, $R_H$  为某树种的高度之和占有物种高度之和的百分比, $R_S$  为某树种的胸高断面积之和占有物种胸高断面积之和的百分比。

#### 1.2.2 物种多样性指数

选用 Simpson 多样性指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )、Margalef 丰富度指数( $H$ )表示树种多样性水平,后文分别简称为 Simpson 指数、Pielou 指数、Margalef 指数。

$$D = 1 - \sum_{t=1}^S P_t^2$$

$$J = \frac{-\sum_{t=1}^S P_t \ln P_t}{\ln N}$$

$$H = \frac{S - 1}{\ln N}$$

式中: $S$  为样地内植物种类总数, $N$  为样地内植物个体总数, $P_t$  为第  $t$  个种的个体数( $N_t$ )占样地内所有种个体总数( $N$ )的比值。

#### 1.2.3 林分蓄积量

基于林分内的主要树种,采用二元材积公式计算主要针叶和阔叶树种的单株材积<sup>[22-23]</sup>,所有单株材积累加得到样地蓄积量,最后换算为每公顷蓄积量。

$$V_m = 0.000\ 062\ 341\ 803\ D_{BH}^{1.855\ 149\ 7} H_E^{0.956\ 824\ 92}$$

$$V_s = 0.000\ 058\ 777\ 042\ D_{BH}^{1.969\ 983\ 1} H_E^{0.896\ 461\ 57}$$

$$V_k = 0.000\ 068\ 563\ 4\ D_{BH}^{1.933\ 221} H_E^{0.867\ 885}$$

式中: $V_m$ 、 $V_s$  和  $V_k$  分别为马尾松、杉木和阔叶树的单株材积, $D_{BH}$  为胸径, $H_E$  为树高。

### 1.3 空间结构指标计算

#### 1.3.1 水平空间结构

采用混交度( $M_i$ )、角尺度( $W_i$ )来描述林分的水平空间结构<sup>[24]</sup>。

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$$

表 1 不同改造林分样地概况

Tab. 1 Overview of sample plots in different transformation stands

林分改造模式	经纬度	间伐时间	间伐强度/%	补植树种	林龄/a	坡向	坡度/(°)
轻度间伐无补植(LTNP)	119°29'20"E, 29°33'30"N	2005	0~30		55	东南	40
中度间伐无补植(MTNP)	119°08'09"E, 29°25'34"N	2005	30~60		60	东	35
重度间伐无补植(HTNP)	119°08'08"E, 29°25'33"N	2007	>60		50	东南	40
中度间伐补阔(MTP)	119°31'14"E, 29°33'35"N	2005	30~60	浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i> 、 浙江樟 <i>Cinnamomum chekiangense</i>	60	南	35
重度间伐补阔(HTP)	119°13'18"E, 29°20'18"N	2007	60~80	乌桕 <i>Triadica sebifera</i> 、 山樱花 <i>Prunus serrulata</i>	50	南	40
皆伐补阔(CCP)	119°08'10"E, 29°25'43"N	2006	>80	紫楠 <i>Phoebe sheareri</i>	50	东南	35

式中:当目标树*i*与相邻木*j*非同种,  $v_{ij}=1$ , 否则  $v_{ij}=0$ 。

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij}$$

式中:当目标树*i*与相邻木*j*的夹角 $\alpha$ 小于标准角 $\alpha_0$ ,  $z_{ij}=0$ , 否则  $z_{ij}=1$ 。

### 1.3.2 垂直空间结构

采用开敞度( $O_i$ )、林层指数( $L_i$ )来描述林分的垂直空间结构<sup>[24]</sup>。

$$O_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 t_{ij}$$

式中:当  $D_{ij} \geq h_j - h_i$ ,  $t_{ij}=1$ , 反之  $t_{ij}=0$ 。其中,  $h_i$  为目标树*i*的树高,  $h_j$  为相邻木*j*的树高,  $D_{ij}$  为目标树*i*与相邻木*j*间的距离。

$$L_i = \frac{z_i}{3} \times \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 s_{ij}$$

式中:当目标树*i*与相邻木*j*不属同层,  $s_{ij}=1$ , 否则  $s_{ij}=0$ ;  $z_i$  为目标树*i*所在空间结构单元中林层个数。

### 1.3.3 林木竞争态势

采用大小比数( $U_i$ )、竞争指数( $C_i$ )来描述林木竞争态势<sup>[24]</sup>。

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$$

式中:当目标树*i*胸径小于相邻木*j*时,  $k_{ij}=1$ , 否则  $k_{ij}=0$ 。

$$C_i = \sum_{j=1}^4 \frac{d_j}{d_i} \times \frac{1}{D_{ij}}$$

式中: $d_i$  为目标树*i*的胸径,  $d_j$  为相邻木*j*的胸径。

## 1.4 林分结构综合评价

### 1.4.1 指标选取和赋值

综合上述林分空间结构和非空间结构指标, 选取 10 个参数构建综合评价体系。由于不同指标之间存在取值和单位的差异, 需要对所选指标进行赋值和标准化处理, 参考魏红洋等<sup>[25]</sup>的研究, 各指标具体赋值情况见表 2。

### 1.4.2 综合评价方法

选择单位圆综合评价体系法<sup>[26]</sup>对不同林分类型的结构进行整体性的评价, 能够直观展现林分结构的优劣以及各指标的好坏程度。根据综合评价单位圆所围成的图形大小, 可以快速准确地确定林分的经营方向, 进而开展相应的森林经营措施。依据单位圆评价体系, 将林分结构的等级划分为 5 种(表 3)。

$$\omega = \frac{S_1 + S_2}{\pi}$$

式中: $\omega$  为林分的结构综合评价值,  $S_1$  为闭合图形扇形面积之和,  $S_2$  为闭合图形中三角形面积之和。

## 1.5 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同改造林分类型间的树种生长特征、物种多样性指数、蓄积量和空间结构指标的差异进行显著性检验; 并

表 2 林分结构综合评价指标及赋值情况

Tab. 2 Comprehensive evaluation index and assignment of stand structure

指标	评价标准	赋值	解释
A1胸径分布	[1.2,1.7]	1	以林分内相邻径级株数的比值( $q$ )进行量化, 天然异龄林分的典型胸径分布为合理状态( $q \in [1.2,1.7]$ ), 同龄林为单峰分布, 不完整异龄林为多峰分布
	多峰分布	0.5	
	单峰分布	0	
A2树种组成	$\geq 3$	1	依据树种与林分的断面积比值计算(十分法), 统计大于1成的树种数, $\geq 3$ 表示多优势树种混交林, 2表示混交林, 1表述纯林
	2	0.5	
	1	0	
A3树种多样性	正向指标	[0,1]	采用Simpson多样性指数表示
A4林分蓄积量	正向指标	[0,1]	反映林分生产力的大小
A5角尺度	$< 0.4$	0	描述林木个体在水平分布格局上的均匀性, $< 0.4$ 为均匀分布, [0.4, 0.5]为随机分布, $> 0.5$ 为聚集分布
	[0.4,0.5]	1	
	$> 0.5$	0.5	
A6混交度	正向指标	[0,1]	描述树种的空间隔离程度
A7开敞度	正向指标	[0,1]	反映目标树受相邻木遮蔽程度
A8林层指数	正向指标	[0,1]	反映林层在垂直方向上的复杂性和多样性
A9大小比数	逆向指标	[0,1]	反映林木分化程度大小和个体竞争态势
A10竞争指数	逆向指标	[0,1]	反映林木所承受的竞争压

表 3 林分结构评价等级

Tab. 3 Evaluation grade of stand structure

$\omega$ 值	评价等级
$\geq 0.70$	良好
[0.55 ~ 0.70)	较好
[0.30 ~ 0.55)	中等
[0.20 ~ 0.30)	较差
$< 0.20$	极差

注:  $\omega$ 为林分结构综合评价值。

采用分组线性回归模型分析了阔叶化指标与林分空间结构的关系。所有统计分析均通过 R4.3.2 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改造林分的树种组成和多样性

间伐和补阔改变了林分内的树种组成, 林分内马尾松的重要值随间伐强度的增加而减小, 补阔林分中, 补植树种重要值也处在前列(表 4)。除皆伐补阔林分(CCP)外, 其他改造林分仍以马尾松为最优势树种。CCP 补植树种为紫楠(*Phoebe sheareri*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*), 取代马尾松成为林分内优势树种。就林分内物种多样性而言(图 1), 轻度间伐无补植林分(LTNP)的 Simpson 指数显著低于其他林分( $P < 0.05$ ), LTNP 的 Pielou 指数显著低于其他林分( $P < 0.05$ )。重度间伐无补植林分(HTNP)的 Margalef 指数显著高于 LTNP、中度间伐

补植林分(MTP)与 CCP( $P < 0.05$ ), LTNP 和 CCP 的 Margalef 指数最低。说明 LTNP 和 CCP 林分中树种组成比较单一, 除了林分内优势树种外, 只有零星的树种分布, 且 LTNP 林分结构相较于其他改造林分也处于较差状态。

### 2.2 不同改造林分的胸径和树高结构

林分胸径结果(图 2a)显示: 中度间伐补阔林分(MTP)的马尾松平均胸径为 30.20 cm, 显著高于其他改造林分( $P < 0.05$ ), 而各林分改造模式中, 皆伐补阔林分(CCP)中其他树种的平均胸径显著高于除重度间伐无补植林分(HTNP)外的其他 4 个林分, 中度间伐补阔林分(MTP)马尾松的平均胸径显著高于其他林分。LTNP 中 57% 的林木胸径处于 10 ~ 20 cm, 呈“单峰左偏”分布; HTNP 和重度间伐补阔(HTP)中分别有 48% 和 80% 的林木胸径处于 0 ~ 10 cm, 林木数量随胸径增加显著降低, 呈“倒 J 型”分布; 而 MTP、中度间伐无补植(MTNP)和 CCP 林分的胸径则呈“多峰”结构(图 3a)。总体来看, 林分中小径阶林木占比随间伐强度增加而增加, 这说明间伐对林分更新有促进作用; 相同间伐强度下, 补植林分与未补植林分相比, 大径材阶木更多, 说明补植促进了林分内林木个体的生长。

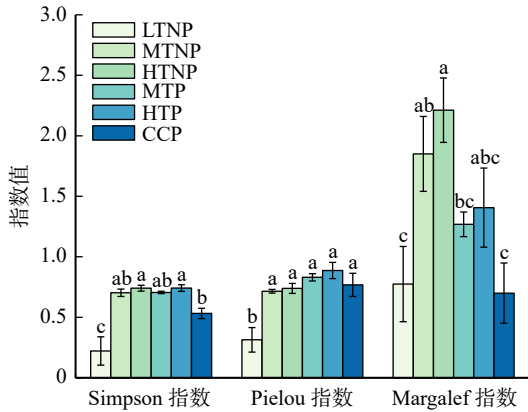
林分树高的结果(图 2b)显示: 无补植林分中马尾松平均树高在 10.96 ~ 16.57 m, 补阔林分中 MTP 马尾松的平均树高为 19.71 m, 显著高于除 HTNP 外

表 4 不同林分改造模式下主要树种的重要值

Tab. 4 Important values of main tree species under different stand transformation modes

林分改造模式	更新层物种	重要值/%	重要值累计/%
LTNP	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	92.24	96.91
	椴木 <i>Loropetalum chinense</i>	2.86	
	榿栎 <i>Quercus aliena</i>	1.81	
MTNP	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	58.90	84.47
	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	21.41	
	浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i>	4.16	
HTNP	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	46.21	81.13
	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	27.91	
	木荷 <i>Schima superba</i>	7.01	
MTP	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	68.97	85.71
	浙江樟 <i>Cinnamomum chekiangense</i>	9.66	
	浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i>	7.08	
HTP	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	35.45	71.25
	乌桕 <i>Triadica sebifera</i>	21.23	
	山樱花 <i>Prunus serrulata</i>	14.57	
CCP	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	58.80	98.46
	紫楠 <i>Phoebe sheareri</i>	37.27	
	钓樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	2.39	

注: 表中列出每个林分改造类型中重要值排名前3的物种。



不同小写字母表示不同林分类型之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

图1 不同林分改造模式的树种多样性

Fig. 1 Tree species diversity of different stand transformation modes  
 的其他4个林分 ( $P < 0.05$ )。LTNP 林分中73%的林木高度在10~15 m之间, 林层结构趋向于单层林; MTNP和HTNP林木高度分布区间较广, 林层数较多, 但高于20 m的林木占比仅为1.12%; 而MTP和HTP林层数多, 且高于20 m的林木占比达到13.66%; CCP林分中, 树高最大值为21 m, 低于10 m

的林木占比为66%(图3b)。

### 2.3 不同改造林分的蓄积量

林分蓄积量结果(图4)显示: 中度间伐补阔(MTP)林分蓄积量为  $13.06 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 高于其他改造林分, 而重度间伐补阔(HTP)林分蓄积量为  $1.09 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 低于其他林分; 林分总蓄积量大小顺序为  $\text{MTP} > \text{LTNP} > \text{HTNP} > \text{CCP} > \text{MTNP} > \text{HTP}$ 。除皆伐补阔(CCP)林分外, 其他林分中马尾松蓄积量占比均超过65%, 这表明在各林分中马尾松生产力仍处于较高水平。LTNP林分中, 马尾松蓄积量占比最多, MTP林分是所有改造林分中马尾松蓄积量和总蓄积量最高的林分, 说明中度间伐补植措施促进林分整体生长量作用更加明显。

### 2.4 不同改造林分的空间结构

在水平空间结构上, 不同改造模式之间的角尺度存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), LTNP的角尺度最大, CCP最小, 但所有林分的角尺度均小于0.4。混交度方面, LTNP显著低于其他改造模式 ( $P < 0.05$ ), 其他改造模式之间无显著差异, 基本为中高度混交(混

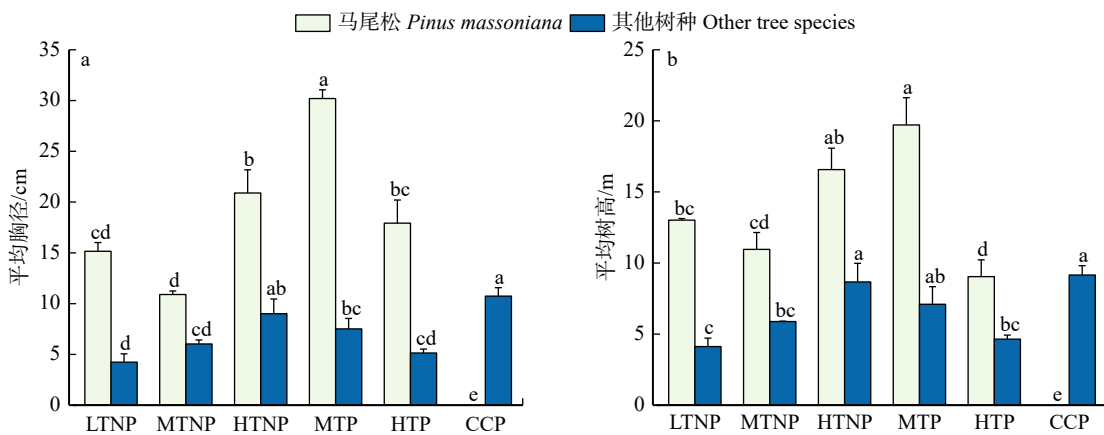


图2 不同林分改造模式下林分平均胸径和平均树高

Fig. 2 Average DBH and average tree height under different stand transformation modes

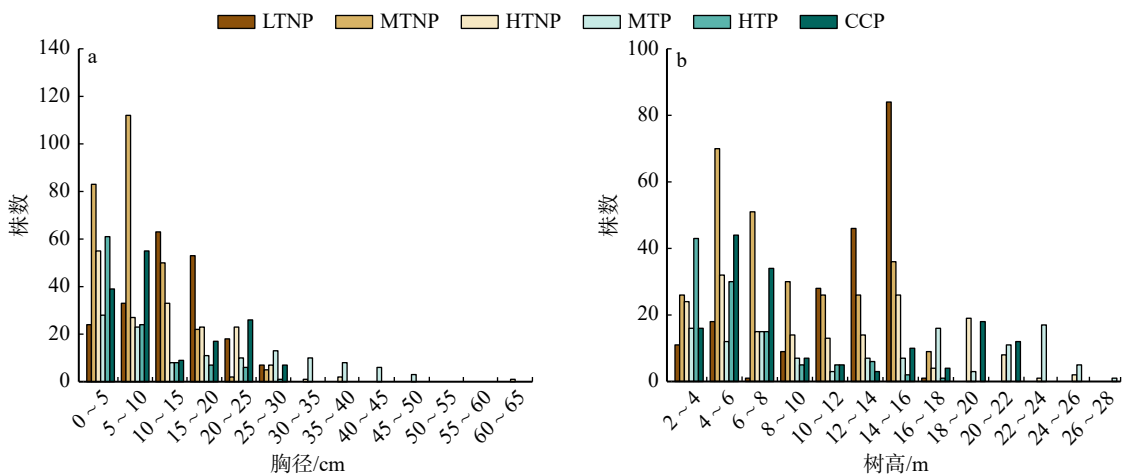


图3 不同改造模式下的林分胸径和树高结构

Fig. 3 Stand DBH and tree height structure under different transformation modes

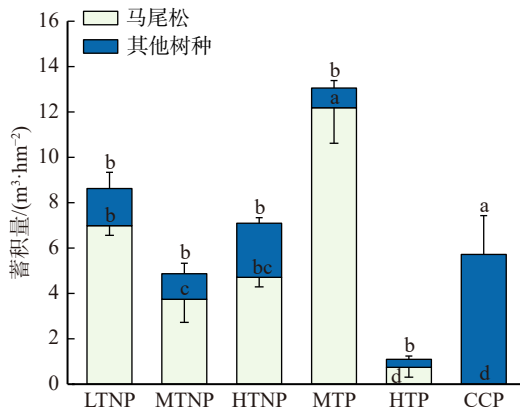


图 4 不同林分改造模式下的林分蓄积量

Fig. 4 Stand volume under different stand transformation modes

交度 0.6 ~ 0.8)。在垂直空间结构上, 开敞度方面, HTP 最高, 显著高于 MTP ( $P < 0.05$ ), 说明重度间伐补阔后, 林分的透光条件得到改善, 林木生长的空间更大。林层指数方面, MTP 和 CCP 显著高于除 HTNP 外的其他改造模式 ( $P < 0.05$ )。林木分化程度方面, 除 CCP 外, 林分的大小比数随间伐强度的增加而降低。林木竞争态势上, LTNP 的竞争指数显著高于其他改造模式, HTP 和 CCP 的竞争指数显著低于其他改造模式, 林分竞争指数随着间伐强度增加而降低, 且补阔林分的竞争指数显著低于未补植林分 (图 5)。

### 2.5 不同改造林分的结构综合评价

不同改造模式的林分结构综合评价值  $\omega$  排序为 MTP(0.48) > HTNP(0.36) > CCP(0.33) > HTP(0.31) > MTNP(0.26) > LTNP(0.14)。重度间伐无补植 (HTNP)、中度间伐补阔 (MTP)、重度间伐补阔 (HTP) 和皆伐补阔 (CCP) 的林分结构评价等级都处

于中等水平, 整体来看, 这 4 类改造模式的林木在水平分布格局上更加均匀 (图 6)。虽然 HTP 和 CCP 的林分蓄积量较低, 且 HTP 林层结构过于单一, CCP 基本处于同林龄状态, 但综合树种空间隔离程度、竞争态势等指标, 其林分结构仍处在中等水平。在中度间伐无补植 (MTNP) 林分中, 经过一定强度间伐后, 由于未采取补植措施, 林分内自然更新的阔叶树较多, 但由于缺乏抚育管理, 新生木在与保留木的竞争中处于劣势, 不仅影响林分内保留木的生长, 还导致胸径分布、林分蓄积量和竞争指数偏低。因此, 其林分结构的评价等级为较差。轻度间伐无补植 (LTNP) 林分内原有的林分结构保留完整, 保留木较多且处于同一生长水平, 导致其胸径分布、树种组成系数、混交度和林层指数赋值过低。此外, 林分内树种单一, 整体空间结构分布不均, 导致林木个体间竞争激烈, 竞争指数赋值过低。因此, 其林分结构的评价等级为极差。

### 2.6 林分结构与阔叶化指标的线性回归

为探究阔叶化指标变化与林分空间结构的关联机制, 对林分结构综合评价  $\omega$  值与林分内阔叶树占比及树种多样性指数进行线性回归 (图 7)。在未补植林分, 阔叶树占比、Simpson 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数均对  $\omega$  值有显著正效应 ( $P < 0.05$ ); 而在阔叶树补植林分, 林分综合结构与阔叶树占比呈负相关, 与树种多样性指数均无显著相关性 ( $P > 0.05$ )。说明马尾松间伐促进了树种组成、多样性的提升, 有利于改善林分结构, 而当前补植的阔叶树尚处在生长前期和中期阶段, 其阔叶化程度和树种多样性对林分结构的影响尚未完全体现。

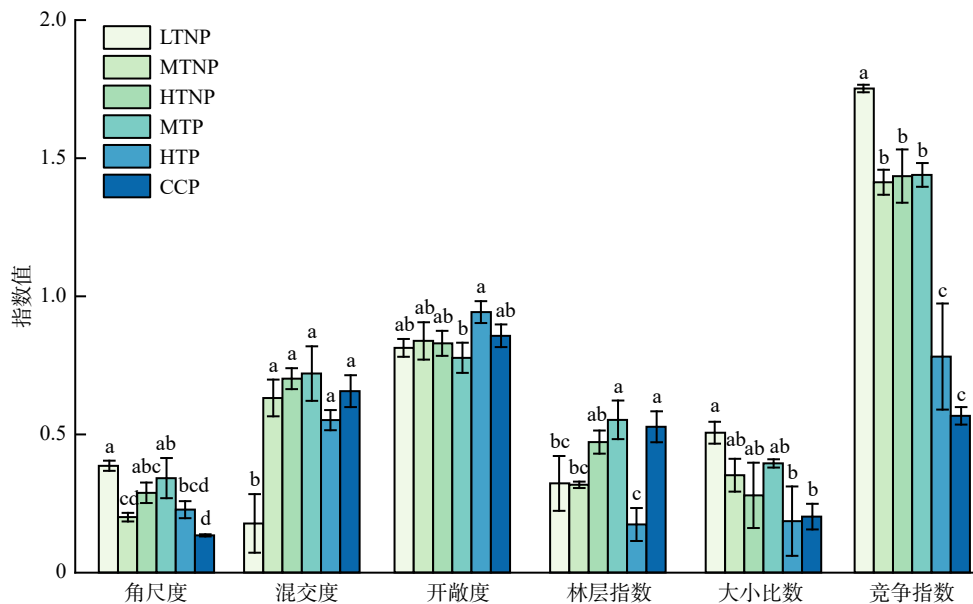
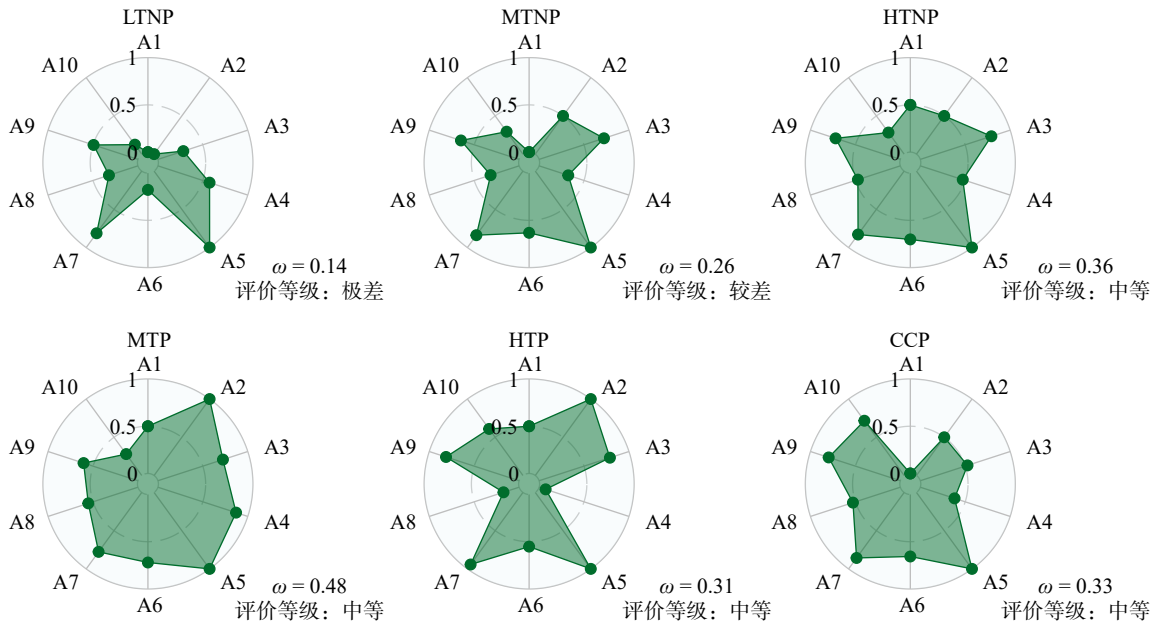


图 5 不同林分改造模式下的林分结构参数

Fig. 5 Stand structure parameters under different transformation modes



$\omega$  为林分结构综合评价值。

图6 不同改造模式下的林分结构综合评价单位圆

Fig. 6 Comprehensive evaluation unit circle of stand structure under different transformation modes

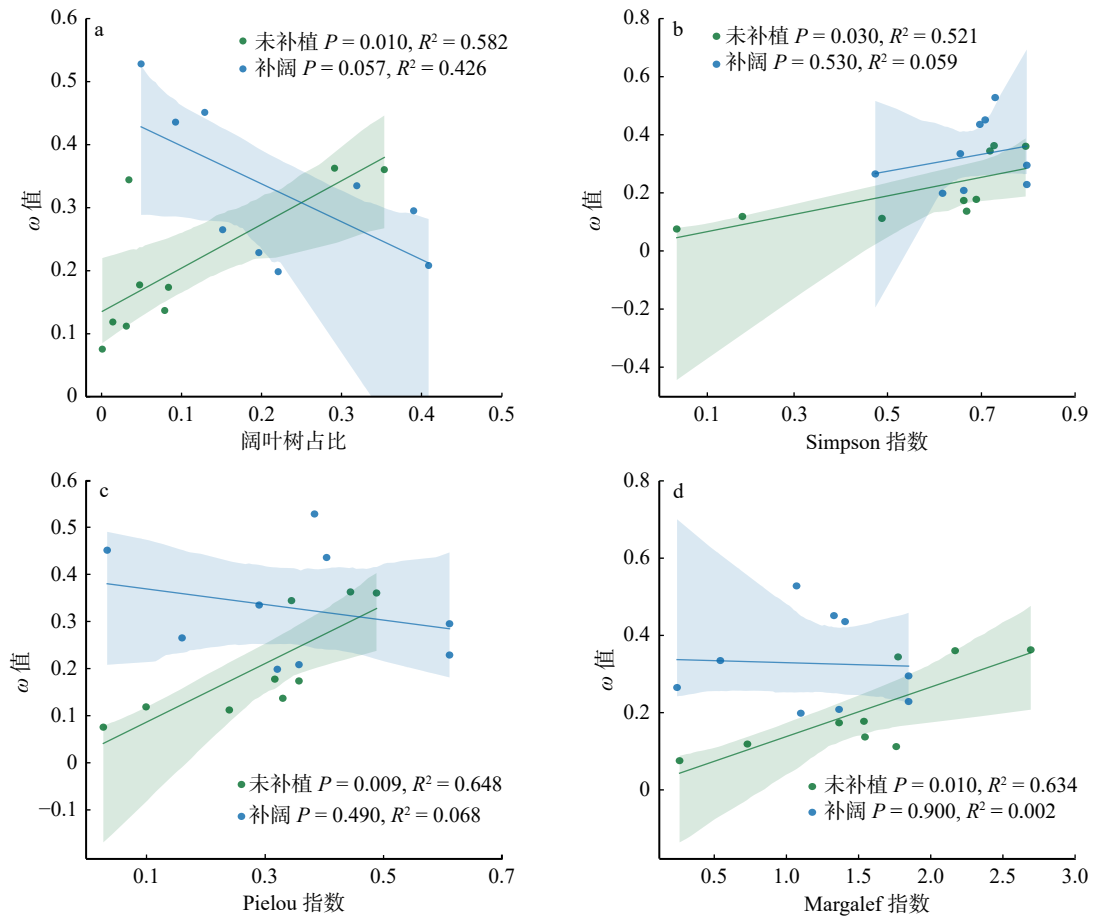


图7 林分结构与阔叶树占比及树种多样性指数的线性回归分析

Fig. 7 Linear regression analysis of stand structure with broadleaved tree proportion and tree species diversity index

### 3 讨论

本研究发现马尾松林改造对林分结构, 包括空

间和非空间结构参数均有显著影响。从非空间结构指标来看, 随着间伐强度的增加, 马尾松优势度逐渐降低。櫟木(*Loropetalum chinense*)、细齿叶桉(*Eurya*

*nitida*)等林下自然更新树种迅速占据生态位,其优势度逐渐增加,促进了马尾松纯林向针阔混交林演替<sup>[27]</sup>。而树种多样性则随着间伐强度增加呈现先增加后降低的趋势,这是因为中度间伐相对于其他间伐强度,林分密度更适中,提高光照和养分供应效率,物种生存的空间和资源更多,能够保证更多物种共存,符合“中度干扰假说”<sup>[28-29]</sup>。同时,随着间伐强度增加,林分中小径阶林木占比逐渐增加,中度间伐林分胸径结构呈“多峰”分布,重度间伐林分呈“倒J型”分布;从树高结构可以看出,经过间伐和补阔措施后,树高分布更均匀,说明林分由单层同龄林逐渐向异龄复层林转变<sup>[30]</sup>。这与王懿祥等<sup>[22]</sup>研究结果类似,马尾松间伐提高了林分内林木个体大小的不一致性。此外,由于马尾松属强喜光树种,间伐后营养空间增大,也促进了马尾松保留木的生长,特别是加快了原优势木的生长<sup>[9]</sup>,因此中度间伐补阔林分蓄积量整体处于最高水平。

在水平空间结构方面,基于邻体效应的林分结构参数能够有效体现林木空间的多维特征<sup>[31]</sup>。角尺度和混交度作为描述林分水平空间结构的指标,是维持物种多样性和发挥林分多功能生态效益的基础<sup>[32]</sup>。本研究发现,皆伐补阔林分的角尺度显著低于其他改造林分,且所有林分的角尺度均小于 0.4,说明马尾松林在间伐和阔叶树补植后,林木水平分布格局比较均匀。除轻度间伐无补植林分为低混交度外,其他林分均为中高度混交度,即间伐和补阔措施提高了混交度,这与 Boivin-Dompierre 等<sup>[33]</sup>和王宇等<sup>[34]</sup>的研究结果类似,但与吴蒙蒙等<sup>[35]</sup>的研究结果存在一定差异。林分混交度主要是由林木种类和数量决定<sup>[2]</sup>,轻度间伐林分马尾松保留木较多,树种组成变化较小,而经过中、高强度间伐后,林分中其他劣势树种或者补植的阔叶树得到更多生存空间和资源,这些树种多为散生,增加了树种的隔离程度,提高了林分混交度<sup>[36]</sup>。总体来看,间伐配合阔叶树补植使得改造林分形成针阔混交林基本结构,虽然补植的阔叶树尚处在生长相对早期阶段,对林分综合结构的影响尚未完全体现,但增加了林分物种多样性和结构复杂性,并发挥了针阔树种的生态互补价值<sup>[19]</sup>。

在垂直空间结构方面,林分垂直空间结构影响林分内的资源供应、分配以及利用效率<sup>[37]</sup>。本研究发现,林分开敞度随着间伐强度的提高而增加,重度间伐补阔林分的开敞度高于其他改造林分,且所有改造林分的开敞度均高于 0.75。这与刘雪强<sup>[38]</sup>的研究结果相似,说明马尾松林在间伐后,林分透光度得到显著改善,补植阔叶树种后,林木垂直分布层次也

更均匀。而间伐补阔林分的林层指数则随间伐强度的增加呈先增加后降低的趋势,中度间伐补阔和皆伐补阔林分的林层指数高于其他 4 类改造林分,而重度间伐补阔林分的林层比较单一。这主要因为林层指数与树高直接关联,而重度间伐补阔林分中马尾松保留木很少,补植乌桕(*Triadica sebifera*)和山樱花(*Prunus serrulata*)后的恢复时间仅 5~6 年,树高结构较单一,林层尚未分化,后期随着恢复时间增加,林木个体间的生长差异不断增大,林层分化会逐渐明显<sup>[39]</sup>。

林木间的竞争普遍存在,对林分结构的发育演替也有着深刻影响<sup>[40]</sup>。本研究结果表明,不同马尾松改造林分的大小比数和竞争指数存在显著差异性,随着间伐强度增加,林分的大小比数和竞争指数逐渐减小,且补阔林分的竞争态势要低于未补植林分。这与姜廷山等<sup>[41]</sup>的研究结果类似,但李建等<sup>[42]</sup>和王晓荣等<sup>[43]</sup>研究表明,采伐对林分大小分化程度影响不显著,这可能是因为轻度间伐林分中马尾松数量仍较多,主要存在的是种内竞争,同质的生态位对环境和资源的竞争更激烈<sup>[44]</sup>;而中高强度间伐增加了相邻木之间的距离,减少了林木间的竞争。此外,补植阔叶树与保留马尾松在个体大小和生长活力方面均存在一定差异,从而导致大小比数存在显著差异性。

## 4 结 论

马尾松林分改造后的树种组成发生明显变化,补植树种逐渐取代马尾松成为优势种。随着间伐强度增加,林分中小径阶林木占比提高,林分由单层同龄林逐渐向复层异龄林转变。中、重度间伐和阔叶树补植后的林木水平分布格局较均匀,达到了中高度混交状态,林分透光度得到显著改善,林分内竞争态势得到缓解。补阔林分的结构优于未补植林分,马尾松中度间伐补阔(浙江樟 *Cinnamomum chekiangense*、浙江楠 *Phoebe chekiangensis*)后的整体林分结构最佳。因此,应采取适当抚育间伐和补植乡土树种,合理调整、优化林分结构,促进马尾松低效纯林向针阔混交和阔叶混交林演替。本文重点讨论了同一时间尺度下的马尾松林改造后的林分结构,然而间伐和补植对林分的影响是复杂且长期的,不同改造模式下林分结构的动态变化还需持续监测。

### 参 考 文 献

- [1] 赖国桢,汪雁楠,黄宝祥,等. 林分空间结构优化栅格间伐模型[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 199-205.  
Lai G Z, Wang Y N, Huang B X, et al. A grid thinning model based on forest spatial structure optimization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2021,

- 45(3): 199–205.
- [2] Katharina W, Christian A, Dominik S, et al. Short-term dynamics of structural complexity in differently managed and unmanaged European beech forests[J/OL]. *Trees, Forests and People*, 2022, 8: 100231[2022–02–26]. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100231>.
- [3] Dubravac T, Barčić D, Rosavec R, et al. The dynamics of stand structure development and natural regeneration of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Plitvice Lakes National Park[J]. *Forests*, 2024, 15(2): 357–375.
- [4] 简尊吉, 倪妍妍, 徐瑾, 等. 中国马尾松林土壤肥力特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5279–5288.  
Jian Z J, Ni Y Y, Xu J, et al. Soil fertility in the *Pinus massoniana* forests of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5279–5288.
- [5] 孟祥江, 何邦亮, 马正锐, 等. 我国马尾松林经营现状及近自然育林探索[J]. *世界林业研究*, 2018, 31(3): 63–67.  
Meng X J, He B L, Ma Z R, et al. Current situation of Masson pine forest management and its practice of close-to-nature silviculture in China[J]. *World Forestry Research*, 2018, 31(3): 63–67.
- [6] 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 1–10.  
Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 1–10.
- [7] Hassan T F, Awais S, Xiaohong W, et al. Perspectives of plantation forests in the sustainable forest development of China[J]. *iForest-Biogeoeciences and Forestry*, 2021, 14: 166–174.
- [8] 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.  
Li M, Chen Y K, Xu H C, et al. Effects of different thinning intensities on undergrowth plant functional groups in subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4985–4993.
- [9] 李学勤. 抚育间伐对马尾松木荷混交林生长和土壤理化性质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.  
Li X Q. The impacts of tending and thinning on the growth and soil physiochemical properties of the mixed forests of *Pinus massoniana* and *scheme superba*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [10] Thom D, Taylor A R, Seidl R, et al. Forest structure, not climate, is the primary driver of functional diversity in northeastern North America[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 143070[2020–10–17]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143070>.
- [11] Wang Z C, Li Y X, Wang G Y, et al. Drivers of spatial structure in thinned forests[J/OL]. *Forest Ecosystems*, 2024, 11: 100182[2024–03–16]. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100182>.
- [12] Chai Z Z, Tan W. Impacts of close-to-nature management on the stand states of Masson pine forests[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 45–54.
- [13] 王志鸣, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 恩施州不同海拔马尾松天然次生林林分结构特征研究[J]. *西南林业大学学报*, 2019, 39(1): 114–122.  
Wang Z M, Guo Q J, Ai X R, et al. Structure characteristics of *Pinus massoniana* natural secondary forest at different altitude of Enshi[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2019, 39(1): 114–122.
- [14] 向钦, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 林分空间结构与物种多样性随空间尺度变化的规律研究[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 151–160.  
Xiang Q, Guo Q J, Ai X R, et al. Variations on stand spatial structure and species diversity in different spatial scales[J]. *Forest Research*, 2022, 35(3): 151–160.
- [15] 薛卫星, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 鄂西南天然林主要乔木树种物种组成及林分空间结构动态变化研究[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(6): 1051–1061.  
Xue W X, Guo Q J, Ai X R, et al. Study on the dynamic changes of main tree species composition and stand spatial structure of natural forest in Southwest Hubei[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(6): 1051–1061.
- [16] 余裕龙, 沈素君, 许惠春, 等. 建德市毛竹林土壤养分本底调查与分析[J]. *绿色科技*, 2021, 23(17): 173–175, 179.  
Yu Y L, Shen S J, Xu H C, et al. Investigation and analysis of soil nutrient background of Moso bamboo forest in Jiande City[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2021, 23(17): 173–175, 179.
- [17] 张晔华, 傅伟, 林华, 等. 建德市森林风景资源调查与评价[J]. *绿色科技*, 2023, 25(5): 182–188.  
Zhang Y H, Fu W, Lin H, et al. Investigation and evaluation of forest landscape resources in Jiande City[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2023, 25(5): 182–188.
- [18] 吴载璋. 马尾松林冠下套种阔叶树对林下植被的影响[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(4): 393–397.  
Wu Z Z. Spatial and temporal undergrowth patterns after interplanting broad-leaved trees under a *Pinus massoniana* canopy[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(4): 393–397.
- [19] 谢阳生, 孟京辉, 曾冀, 等. 马尾松人工纯林近自然化改造效果分析[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(2): 31–38.  
Xie Y S, Meng J H, Zeng J, et al. Analysis on the effect of close-to-nature transformation of *Pinus massoniana* artificial pure forest[J]. *Forest Research*, 2023, 36(2): 31–38.
- [20] 张亚昊, 佃袁勇, 黄光体, 等. 不同演替阶段马尾松林林分空间结构对物种多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2357–2365.  
Zhang Y H, Dian Y Y, Huang G T, et al. Effects of spatial structure on species diversity in *Pinus massoniana* plantation of different succession stages[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2357–2365.
- [21] 吴敏娟, 尤誉杰, 张晓红, 等. 不同干扰模式对受害马尾松人工纯林林分结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 58–66.  
Wu M J, You Y J, Zhang X H, et al. Effects of different disturbance patterns on stand structure of infected pure *Pinus massoniana* plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 58–66.
- [22] 王懿祥, 张守攻, 陆元昌, 等. 干扰树间伐对马尾松人工林目标树生长的初期效应[J]. *林业科学*, 2014, 50(10): 67–73.  
Wang Y X, Zhang S G, Lu Y C, et al. Initial effects of crop trees growth after crop tree release on *Pinus massoniana* plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(10): 67–73.
- [23] 吴建强, 王懿祥, 杨一, 等. 干扰树间伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 340–348.

- Wu J Q, Wang Y X, Yang Y, et al. Effects of crop tree release on stand growth and stand structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 340–348.
- [24] Li Y F, Hui G Y, Zhao Z H, et al. Spatial structural characteristics of three hardwood species in Korean pine broad-leaved forest: validating the bivariate distribution of structural parameters from the point of tree population [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 314: 17–25.
- [25] 魏红洋, 张一帆, 董灵波, 等. 帽儿山主要林分类型空间结构状态综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(10): 131–139.
- Wei H Y, Zhang Y F, Dong L B, et al. Comprehensive evaluation of spatial structure state for the main forest types in Maoershan Mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(10): 131–139.
- [26] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 等. 天然混交林最优林分状态的  $\pi$  值法则 [J]. 林业科学, 2016, 52(5): 1–8.
- Hui G Y, Zhang G Q, Zhao Z H, et al. A new rule of  $\pi$  value of natural mixed forest optimal stand state[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(5): 1–8.
- [27] 姜雨, 白宇, 吕宝磊, 等. 不同间伐强度对华北落叶松人工林天然更新的影响 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(4): 39–45, 260.
- Jiang Y, Bai Y, Lü B L, et al. Effects of different thinning intensities on the natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(4): 39–45, 260.
- [28] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state[J]. Science, 1978, 199: 1302–1310.
- [29] 张雅娴, 樊江文, 李愈哲, 等. 短期围栏封育后再利用对草地植物群落的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3295–3306.
- Zhang Y X, Fan J W, Li Y Z, et al. Effects of grassland reuse after short-term grazing exclusion on plant community[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3295–3306.
- [30] 张华锋, 陈思宇, 刘刚, 等. 松材线虫病疫木卫生伐对马尾松纯林林分结构的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 745–751.
- Zhang H F, Chen S Y, Liu G, et al. Effects of sanitation cutting pine wilt diseased trees on the stand structure of pure *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(4): 745–751.
- [31] Hui G, Zhang G, Zhao Z, et al. Methods of forest structure research: a review[J]. Current Forestry Reports, 2019, 5: 142–154.
- [32] Liu N, Wang D, Guo Q. Exploring the influence of large trees on temperate forest spatial structure from the angle of mingling [J/OL]. Forest Ecology and Management, 2021, 492: 119220 [2021-04-17]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119220>.
- [33] Boivin-Dompierre S, Achim A, Pothier D. Functional response of coniferous trees and stands to commercial thinning in eastern Canada[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 384: 6–16.
- [34] 王宇, 易艳灵, 刘海, 等. 两种采伐方式对马尾松人工林林分空间结构的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 138–146.
- Wang Y, Yi Y L, Liu H, et al. Initial impacts of two thinning methods on the spatial structure of *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(5): 138–146.
- [35] 吴蒙蒙, 王立海, 侯红亚, 等. 采伐强度对阔叶红松林空间结构的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(9): 6–9.
- Wu M M, Wang L H, Hou H Y, et al. Influence of cutting intensities on spatial structure of broadleaved Korean pine forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(9): 6–9.
- [36] 吴初平, 张骏, 沈爱华, 等. 千岛湖次生林不同演替阶段林分空间结构研究 [J]. 植物研究, 2015, 35(1): 16–21.
- Wu C P, Zhang J, Shen A H, et al. Stand spatial structure at different successional stages of secondary forest in Qiandao Lake region[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(1): 16–21.
- [37] 张晓红, 张会儒. 蒙古栎次生林垂直结构特征对目标树经营的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 4(5): 56–65.
- Zhang X H, Zhang H R. Response of vertical structure characteristics of natural secondary *Quercus mongolica* forest to crop tree release[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 4(5): 56–65.
- [38] 刘雪强. 基于林分结构优化的栓皮栎人工林模拟抚育采伐效果评价 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- Liu X Q. Evaluation of simulated tending and felling effect of *Quercus variabilis* plantation based on stand structure optimization[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [39] 曹雨婷, 叶生晶, 张超, 等. 大同山杉木人工林林分空间结构与种内竞争关系 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(5): 8–12, 18.
- Cao Y T, Ye S J, Zhang C, et al. Spatial structure of forest stand and intra-specific competition in the *Cunninghamia lanceolata* plantation in Datong Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(5): 8–12, 18.
- [40] Hui G Y, Wang Y, Zhang G Q, et al. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 49–58.
- [41] 姜廷山, 王鹤智, 董灵波, 等. 不同抚育强度对兴安落叶松林空间结构的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(12): 9–14.
- Jiang T S, Wang H Z, Dong L B, et al. Effects of different intermediate cutting intensities on the spatial structure of *Larix gmelinii* forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(12): 9–14.
- [42] 李建, 彭鹏, 何怀江, 等. 采伐对吉林蛟河针阔混交林空间结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 48–57.
- Li J, Peng P, He H J, et al. Effects of thinning intensity on spatial structure of multi-species temperate forest at Jiaohe in Jilin Province, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 48–57.
- [43] 王晓荣, 胡文杰, 雷蕾, 等. 不同营林措施对马尾松林物种组成及空间结构的短期影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(1): 9–19.
- Wang X R, Hu W J, Lei L, et al. Short-term effects of different forest management practices and spatial structure of *Pinus massoniana* stand[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019, 39(1): 9–19.
- [44] Pichon B, Gounand I, Donnet S, et al. The interplay of facilitation and competition drives the emergence of multistability in dryland plant communities[J/OL]. Ecology, 2024, 105(8): e4369[2024-07-02]. <https://doi.org/10.1002/ecy.4369>.

(责任编辑 孟瑶 李 契  
责任编辑 张会儒)