

DOI:10.12171/j.1000-1522.20220302

不同经营方式对油松成熟人工林生长和植物多样性的影响

肖 军^{1,2} 雷 蕾¹ 李肇晨² 马成功³ 于胜利³ 肖文发¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 亚太森林恢复与可持续管理组织, 北京 100102; 3. 旺业甸实验林场, 内蒙古 赤峰 024023)

摘要:【目的】基于油松成熟人工林, 探索一种兼顾生态效益的大径级用材林培育方式, 为我国成熟人工林的科学经营提供参考。【方法】以赤峰市旺业甸实验林场 47 年生和 56 年生油松人工林为研究对象, 选取 2013 年和 2019 年调查的近自然经营、常规经营、封育管理样地乔灌木数据, 采用双因素方差分析方法比较 3 种经营方式对油松成熟人工林胸径增长速度、死亡率、幼树更新以及乔灌木多样性的影响差异。【结果】3 种经营油松成熟人工林年均胸径增长速度和 6 年死亡率差异显著($P < 0.05$), 近自然经营为 0.40 cm/a 和 0.51%, 常规经营为 0.36 cm/a 和 1.44%, 封育管理为 0.31 cm/a 和 3.55%; 6 年间, 近自然经营的林下植物种类增加 3 种、常规经营和封育管理分别减少 5 种和 9 种, 47 年生和 56 年生林分的乔木 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数增长排序为近自然经营 > 常规经营 > 封育管理, 更新树苗死亡率和 47 年生林分的草本 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数下降排序为常规经营 < 近自然经营 < 封育管理; 3 种经营对油松成熟人工林的乔木胸径生长和死亡率以及乔灌木多样性的影响差异具有时效性。3 种经营 56 年生油松人工林的年均胸径增长速度、乔木和灌木的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数均高于 47 年生人工林, 但草本 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数为 47 年生林分高于 56 年生林分。【结论】对油松成熟人工林进行合理经营可提升乔木胸径生长速度、降低死亡率并延缓林分植物多样性下降, 表明仍有必要对成熟人工林进行森林经营以获得更好的经济和生态效益; 综合比较 3 种经营对油松成熟人工林大径级林木培育和植物多样性保护的效果, 近自然经营是一种理想的经营方式。

关键词: 油松人工林; 成熟林; 生长; 植物多样性; 近自然经营; 旺业甸实验林场

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2023)00-0001-10

引文格式: 肖军, 雷蕾, 李肇晨, 等. 不同经营方式对油松成熟人工林生长和植物多样性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(0): 1-10. Xiao Jun, Lei Lei, Li Zhaochen, et al. Effects of different management regimes on growth and plant diversity in mature *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(0): 1-10.

Effects of different management regimes on growth and plant diversity in mature *Pinus tabulaeformis* plantations

Xiao Jun^{1,2} Lei Lei¹ Li Zhaochen² Ma Chenggong³ Yu Shengli³ Xiao Wenfa¹

(1. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;

2. Asia-Pacific Network for Sustainable Forest Management and Rehabilitation, Beijing 100102, China;

3. Wangyedian Experimental Forest Farm, Chifeng 024423, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To explore a management regime that takes into account the cultivation of large-diameter tree and ecological benefits base on the mature *Pinus tabulaeformis* plantation, as well as to provide a reference for mature plantation management in China. [Method] Taking 47- and 56-year-old *Pinus tabulaeformis* plantations in Wangyedian Experimental Forest Farm in Chifeng City as the research object, the

收稿日期: 2022-07-25 修回日期: 2022-11-27

基金项目: “十三五”重点研发计划(2016YFD0600200), 亚太森林恢复与可持续管理组织多功能森林经营试点示范项目(2011P3-INM、2015P8-INM-II)。

第一作者: 肖军。主要研究方向: 森林生态。Email: xiaojun@apfnet.cn 地址: 100102 北京市朝阳区阜通东大街 12 号宝能中心 A 座 6 层。

责任作者: 肖文发, 研究员, 博士导师。主要研究方向: 森林生态、全球气候变化与森林保护和可持续经营。Email: xiaowenf@caf.ac.cn 地址: 100102 北京市海淀区香山南路东小府 1 号中国林科院。

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

data of sample plots under close-to-nature management (CTNM), conventional management (CM) and no human intervention (NHI) were collected in 2013 and 2019. Two-factor variance analysis was used to compare the effects of three management regimes on mean DBH growth rate, mortality, seedling regeneration and diversity of trees, shrubs and herbs. [Result] There were significant differences in mean DBH growth rate and 6-year mortality of mature *Pinus tabuliformis* plantations under three management regimes ($P < 0.05$), CTNM was 0.40 cm/year and 3.55% respectively, CM was 0.36 cm/year and 1.44%, and NHI was 0.31 cm/year and 0.51%. The understory plants under CTNM increased 3 species in 6 years, while that decreased 5 species under CM and 9 species under NHI. The increase of Shannon-Wiener index and Simpson index of trees in 47- and 56-year-old stands in 6 years was CTNM > CM > NHI, while the decrease of tree seedling mortality and the Shannon-Wiener index and Simpson index of herbs in 47-year-old stands was CM < CTNM < NHI. The effects on tree growth, mortality and plant diversity under three management regimes disappeared over time. The mean DBH growth rate, Shannon-Wiener index and Simpson index of trees and herbs in 56-year-old stands were higher than that in 47-year-old stands under three management regimes. [Conclusion] Forest management can increase the mean DBH growth rate, reduce the tree mortality and delay the decline of plant diversity of mature *Pinus tabuliformis* plantation, suggesting that mature plantation should be managed regularly to improve the economic and ecological benefits. Compared with CM and NHI, CTNM is the best to maintain the plant diversity of mature *Pinus tabuliformis* plantation as well as to cultivate large-diameter tree.

Key words: *Pinus tabuliformis* plantation; mature forest; growth; plant diversity; close-to-nature management; Wangyedian Experimental Forest Farm

随着人工林的全球面积持续增加^[1],其在快速实现木材生产、维护生态安全、减缓气候变化、提升景观效果等诸多方面的作用更加突出^[2-4]。目前,人工林经营方式主要包括轮伐期经营、多功能经营、结构化经营、近自然经营、生态系统经营^[5-6]。研究表明,人工林在生物多样性保护、水土保持等生态系统服务方面不及天然林^[2,7],但可通过选择适宜的造林树种^[8]、差异化作业设计与经营管理^[9-10]、抚育调控^[11]、混交改造^[12]等进行提升。我国人工林面积居世界第一,2019年成熟林面积达到658.81万 hm^2 、蓄积量7.2亿 m^3 ,分别占人工林总面积的11.53%和总蓄积的21.26%^[13]。于此同时,全国近熟人工林面积高达808.61万 hm^2 ,且0.26亿 hm^2 人工林被纳入生态公益林^[13],可预见在未来一定时期内成熟人工林还将继续增加。加强人工林多目标经营研究,尤其是如何开展成熟人工林多目标经营,提高其经济效益和生态效益也是我国人工林未来发展亟需解决的难题之一。

油松(*Pinus tabuliformis*)是我国特有的常绿乔木针叶树种,抗瘠薄,是北方半干旱地区的主要用材林和造林树种,具有较高的经济与生态价值^[14];多年来主要按照《森林抚育规程》和森林经营方案进行经营管理。根据第九次全国森林资源清查结果,我国油松人工林总面积高达167.76万 hm^2 、总蓄积量0.81亿 m^3 ^[13]。相关研究主要针对油松中幼龄人工林

的抚育间伐、近自然化改造、密度控制等^[15-18],对成熟林研究较少。近自然经营自从被引入我国后已在多地进行了实践和应用,并表明有助于提高人工林幼、中、近熟林的乔木生长和生物多样性^[19-22],但其对油松成熟人工林在相关方面的影响研究未见报道。为寻求一种兼顾生态效益的大径级用材林培育方式,本研究以赤峰市旺业甸实验林场的油松成熟人工林为研究对象,对比分析近自然经营(CTNM)、常规经营(CM)、封育管理(NHI)对乔木生长和植物多样性的影响,以期为我国成熟人工林的科学经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和试验设计

本研究样地位于内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗旺业甸实验林场(118°09'~118°30'E, 41°21'~41°39'N),地处燕山北部山地的七老图山支脉,平均海拔1300 m,属中温带大陆性季风气候,主要土壤类型是棕色森林土。水热同期,年均降水量450 mm,全年日照数达2361.5 h,年均温度5.6℃,平均无霜期117 d。当地林分主要为人工林和封山育林形成的天然次生林,主要树种有油松、白桦(*Betula platyphylla*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、黑桦(*Betula dahurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等。

2013 年,在海拔、坡向、坡度、土壤状况等立地条件基本相同的邻近地块,按坡上、坡中、坡下在平均树龄 47 年和 56 年油松人工林内共设置 18 个水平面积为 600 m² 的圆形乔木样地(表 1),采用近自然经营、常规经营、封育管理进行林分经营。为最小化外部干扰,样地设置界桩与铁丝围栏,样地内外经营方式相同。近自然经营采用目标树林分作业体系确定林木类型,以目标树为中心伐除与其形成竞争的干扰木以及有病虫害、树势较弱、偏冠等生长不良的林木和部分一般木,抚育株数强度依据实地林木类型划定且不超过 20%,保留其他树种健康林木、更新幼苗以及林下灌木与草本,并补植山杨、蒙古栎等当地阔叶树^[18]。常规经营按照 GB/T15781—2009《森林抚育规程》进行林分管理,着重保留上层木,抚育下层木,主要通过抚育间伐调整林分密度,清除霸王树、被压木与病腐木等有害木和非优势层的其他树种,保留质量好、长势强的林木,抚育株数强度不超过 30%,伐后郁闭度不低于 0.6,保留木总体均匀分布且林分平均胸径不低于伐前林分平均胸径;清理影响油松幼苗、幼树生长的灌木与草本。封育管理按相同要求划定样地后进行封育经营。

1.2 数据调查

乔木样地设置后即进行首次乔木调查,对样地内所有胸径 5 cm 及以上树木进行调查并编号挂牌,记录其树种、胸径、优势度、损伤等指标,并基于调查数据确定林木类型(目标树、干扰树、特别目标树、一般木)和实施森林经营活动。2013 年夏季完成森林经营活动后,在乔木样地内各布设 10 m × 10 m 天然更新调查样方 1 个,以各样地中心呈品字形布设 5 m × 5 m 灌木样方 3 个,在每个样地中随机布

设 1 m × 1 m 草本样方 5 个,并同期调查更新幼树种类与数量、灌木和草本的种类与盖度。2019 年夏季对乔木、更新树种、灌木和草本进行了复查。

1.3 计算方法

采用 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数表示多样性基本特征,其计算公式分别为(1)和(2)^[23]。

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

$$\text{Simpson指数: } P = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

式中: S 为每个样方中的物种数, P_i 为每个样方中 i 种的数量(或盖度)占植物总数(或总盖度)的比例。

1.4 数据统计与分析

使用双因素方差分析比较 3 种经营(封育管理、常规经营和近自然经营)和 2 个经营时间(2013 年刚抚育后和 2019 年)47 年生和 56 年生林分的乔木平均胸径、乔木和草本多样性差异;同样使用双因素方差分析方法比较两个林龄和 3 种经营的乔木死亡率、灌木多样性差异。统计分析均使用 SPSS 25 和 R 4.0.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 乔木生长变化

对立地条件和林分初始状态基本一致的油松人工林分别采用封育管理、常规经营、近自然经营 6 年后,样地林木平均胸径均有增长但涨幅不一。双因素方差分析显示(图 1):47 年生和 56 年生油松人工林乔木胸径在 3 种经营($F = 9.38$, $P = 0.004$; $F = 4.10$, $P = 0.044$)和 2 个经营时间($F = 6.79$, $P = 0.023$; $F = 8.92$, $P = 0.011$)均差异显著,其年均胸径

表 1 乔木样地基本概况

Tab. 1 General profiles of plots with different treatments

林龄 Stand age	经营类型 Management regime	2013年抚育前 Before tending in 2013			2013年抚育后 After tending in 2013			2019年			抚育 强度 Thinning	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)
		乔木密度 (株·hm ⁻²) Density/ tree·hm ⁻²	平均胸径 Mean DBH/cm	胸高断面面积 Basal area/ m ² ·hm ⁻²	乔木密度 (株·hm ⁻²) Density/ tree·hm ⁻²	平均胸径 Mean DBH/cm	胸高断面面积 Basal area/ m ² ·hm ⁻²	乔木密度 (株·hm ⁻²) Density/ tree·hm ⁻²	平均胸径 Mean DBH/cm	胸高断面面积 Basal area/ m ² ·hm ⁻²			
47	NHI	1 056 ± 174a	17.42 ± 1.06a	25.44 ± 1.53a	1 056 ± 174a	17.42 ± 1.06a	25.44 ± 1.53a	1 022 ± 164a	18.89 ± 1.08a	29.21 ± 1.44a	0%c	1 148–1 171	≤ 22
47	CM	972 ± 172a	17.23 ± 0.79a	23.73 ± 2.33a	717 ± 104a	18.90 ± 0.60a	20.72 ± 1.94a	711 ± 98a	20.90 ± 0.66a	25.30 ± 2.10a	25% ± 2%a	1 129–1 157	≤ 20
47	CTNM	961 ± 59a	16.51 ± 0.50a	23.17 ± 0.39a	789 ± 49a	17.84 ± 0.30a	21.50 ± 0.53a	789 ± 49a	20.17 ± 0.16a	26.79 ± 0.58a	18% ± 1%b	1 165–1 201	≤ 20
56	NHI	645 ± 40a	24.40 ± 0.71a	32.19 ± 0.61a	645 ± 40a	24.40 ± 0.71a	32.19 ± 0.61a	622 ± 34a	26.64 ± 0.75a	38.20 ± 0.88a	0%c	1 342–1 367	≤ 15
56	CM	689 ± 83a	21.47 ± 1.19a	29.16 ± 1.81a	517 ± 38a	24.13 ± 0.79a	26.78 ± 1.45a	511 ± 34a	26.43 ± 0.65a	31.78 ± 1.57a	24% ± 4%a	1 349–1 373	≤ 15
56	CTNM	689 ± 6a	23.43 ± 1.14a	32.09 ± 2.27a	578 ± 20a	24.69 ± 0.85a	29.47 ± 1.97a	572 ± 24a	27.18 ± 0.76a	36.17 ± 2.20a	16% ± 2%b	1 322–1 359	≤ 16

注:经营类型NHI、CM、CTNM分别为封育管理、常规经营、近自然经营;表中数值为平均值 ± 标准误差;小写字母表示相同龄级的某一指标在不同经营方式下的显著性差异($P < 0.05$)。Notes: NHI, CM, CTNM represents no human intervention, conventional management and close-to-nature management respectively; The values in the table are mean ± standard error; Lowercase letters indicate the significantly differences of corresponding values at the same stand age under different management regimes ($P < 0.05$).

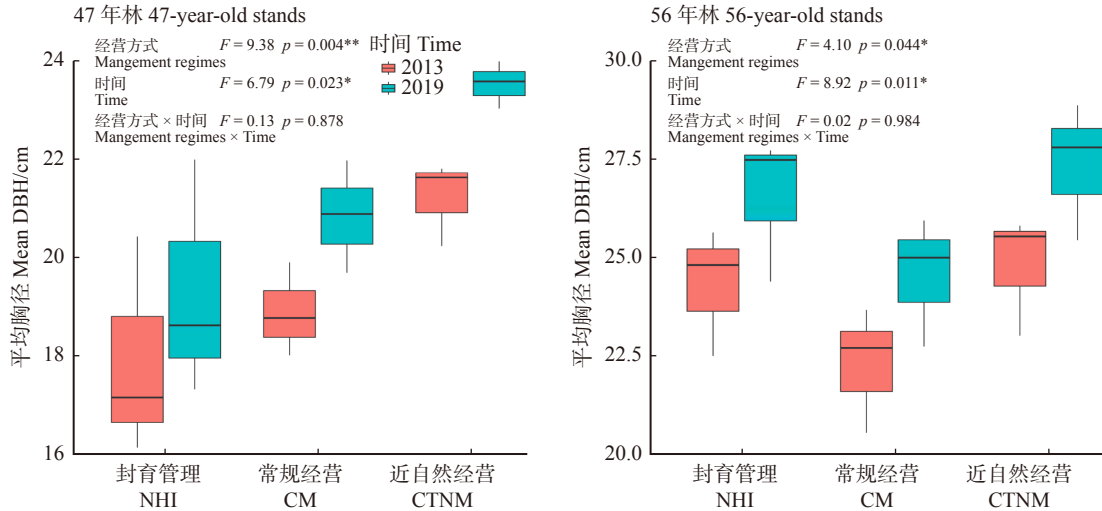


图1 2013—2019年3种经营的乔木平均胸径增长

Fig. 1 Mean DBH growth of trees under three management regimes during 2013–2019

增长排序为近自然经营((0.39 ± 0.04) cm/a, (0.42 ± 0.04) cm/a) > 常规经营((0.33 ± 0.02) cm/a, (0.38 ± 0.01) cm/a) > 封育管理((0.24 ± 0.02) cm/a, (0.37 ± 0.04) cm/a); 两个林龄的乔木胸径在经营时间和经营方式之间均无显著交互作用。以上表明, 近自然经营的油松成熟人工林乔木胸径增长效果最佳(0.40 cm/a), 常规经营次之(0.36 cm/a), 对照经营最差(0.31 cm/a), 但经营措施对林木生长的影响差异随时间推移而减弱。另外, 3种经营56年生林分的年均胸径增长均高于47年生林分, 这表明当地60年左右的油松人工林仍在高速增长, 应提高其主伐年龄以充分发挥林木的生长潜力(现行林业行业标准《主要树种龄级与龄组划分》^[24]规定, 北部地区油松的成熟人工林林龄为41~60年)。

2013—2019年间, 除近自然经营的47年生林分外, 封育管理、常规经营的两个龄级和近自然经营的56年生林分均有被压木或病虫害木死亡。从图2可见, 3种经营的油松成熟人工林乔木死亡率差异显著($F = 6.30$, $P = 0.014$), 47年生和56年生林分的乔木死亡率为封育管理($(4.63 \pm 0.92)\%$, $(2.46 \pm 1.44)\%$) > 常规经营($(0.61 \pm 0.61)\%$, $(2.27 \pm 1.14)\%$) > 近自然经营($(0.00 \pm 0.00)\%$, $(1.01 \pm 1.01)\%$); 乔木死亡率在林龄和经营方式之间无显著交互作用。这表明合适的森林经营能够显著降低油松成熟人工林保留木死亡率, 但不同经营方式对乔木死亡率的影响差异会随时间推移而减弱。

2.2 植物多样性变化

2.2.1 乔木多样性变化

图3表明: 56年生林分的乔木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均高于47年生林分; 分别采取3种经营6年后, 仅封育管理56年生林分的乔

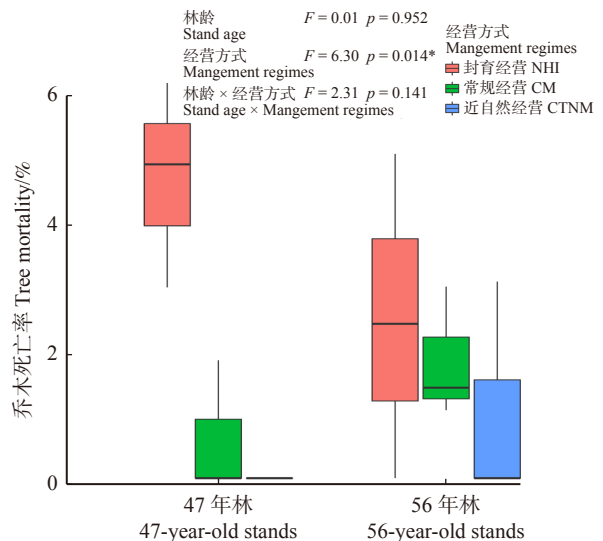


图2 2013—2019年3种经营的乔木死亡率

Fig. 2 Tree mortality under three management regimes during 2013–2019

木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数略微下降, 其余的不变或增加; 3种经营47年生林分的乔木 Shannon-Wiener 指数($F = 27.08$, $P < 0.001$)和 Simpson 指数($F = 19.20$, $P < 0.001$)差异显著, 且近自然经营效果最优; 3种经营56年生林分的乔木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数差异不显著, 但其增量排序为近自然经营 > 常规经营 > 封育管理; 两个林龄的乔木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在经营时间和经营方式之间均无显著交互作用; 林下更新树苗数量6年间均出现大幅下降, 排序为封育管理(88%) > 近自然经营(75%) > 常规经营(50%), 树种变化排序为近自然经营(4种) > 常规经营(0种) > 封育管理(-1种)。以上表明, 对油松成熟人工林放弃经营不利于维持林分乔木多样性, 注重培育混交

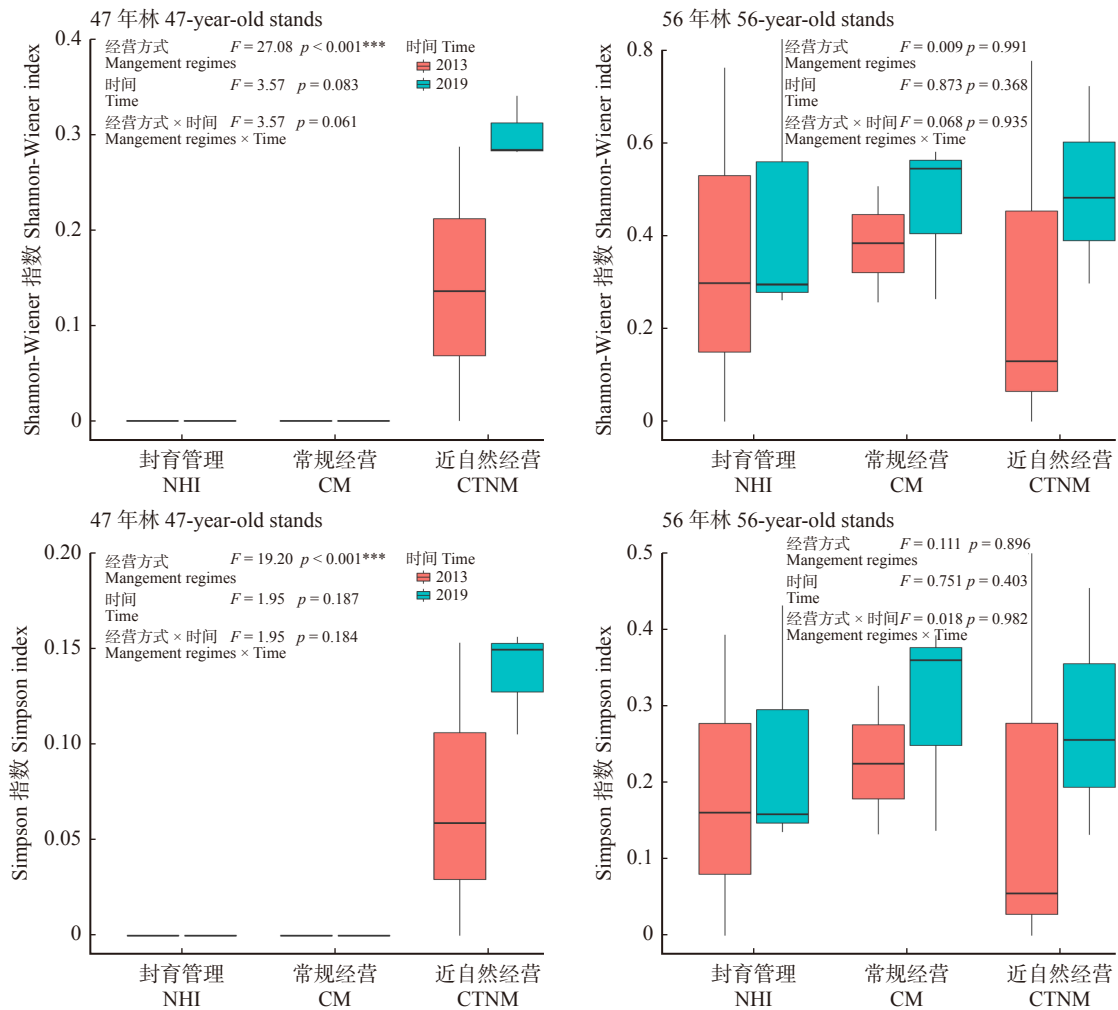


图 3 2013 年和 2019 年 3 种经营的乔木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数

Fig. 3 Shannon-Wiener index and Simpson index of trees under three management regimes in 2013 and 2019

复层林分的近自然经营通过保护和补植当地阔叶树种可明显提高乔木多样性。

2.2.2 灌木多样性变化

调查发现, 油松成熟人工林内灌木零星分布, 种类和株数均较少; 样地中共发现 9 种灌木, 隶属于

4 科 7 属, 蔷薇科最多(4 种), 以土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)最为常见。其中, 2013 年仅 1 块近自然经营样地有 3 种灌木, 其余样地仅 1 种或无; 6 年后, 3 种经营的灌木种类增长排序为近自然经营(4 种) > 常规经营(3 种) > 封育管理(2 种)。从图 4 可见,

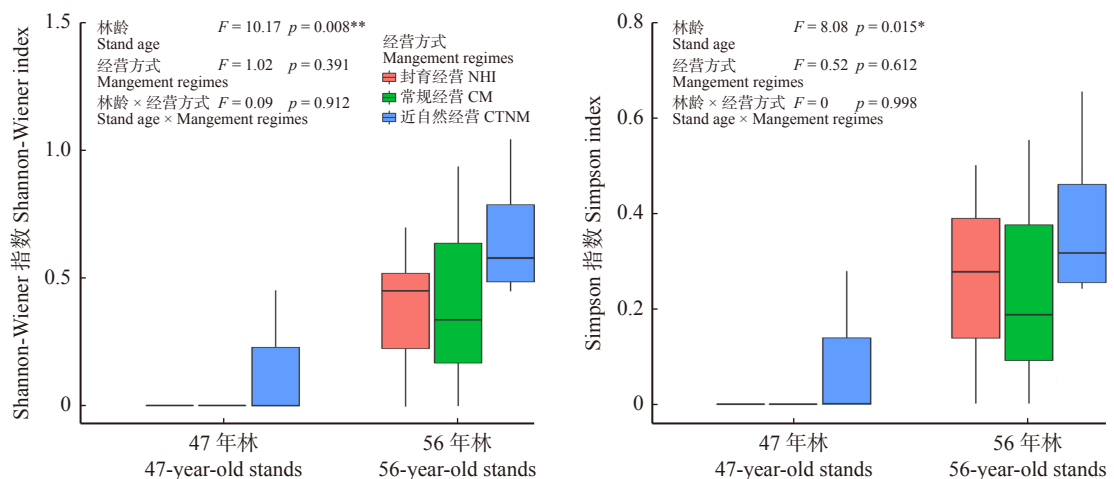


图 4 2019 年 3 种经营灌木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数比较

Fig. 4 Shannon-Wiener index and Simpson index of shrubs under three management regimes in 2019

3种经营的灌木 Shannon-Wiener 指数($F = 10.17$, $P = 0.008$)和 Simpson 指数($F = 8.08$, $P = 0.015$)仅在林龄上差异显著,且 56 年生林分的灌木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均高于 47 年生林分,可能是由于灌木繁殖体有限,需要更长时间扩散到新的生境^[25];两个林龄的灌木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在林龄与经营方式之间无显著交互作用。以上表明,在成熟人工林内灌木种类和株数均较少的情况下,经营措施虽能提高灌木多样性但作用有限。

2.2.3 草本多样性变化

根据调查,样地内草本种类共有 58 种,隶属于 20 科 43 属;蔷薇科、菊科植物最多(各 8 种),共占总种数的 28%。2013—2019 年间,3 种经营油松成熟人工林的草本种类均减少,排序为近自然经营(5 种) < 常规经营(8 种) < 封育管理(11 种)。从图 5 可知,47 年生林分的草本 Shannon-Wiener 指

数、Simpson 指数在不同经营方式($F = 7.69$, $P = 0.008$; $F = 16.41$, $P < 0.001$)和经营时间($F = 43.09$, $P < 0.001$; $F = 7.91$, $P = 0.017$)均存在显著差异,其下降排序为封育管理 > 近自然经营 > 常规经营;56 年生林分的草本 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数在两个经营时间($F = 55.17$, $P < 0.001$; $F = 12.97$, $P = 0.004$)差异显著;但两个林龄的草本 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数在经营时间和经营方式之间均无显著交互作用。以上表明,森林经营对成熟人工林下的草本多样性影响显著,但不同经营方式导致的草本多样性变化差异随时间推移而减弱。

3 讨 论

3.1 不同经营方式对乔木生长的影响

乔木生长受林龄、立地条件^[26]、林分多样性^[27]、

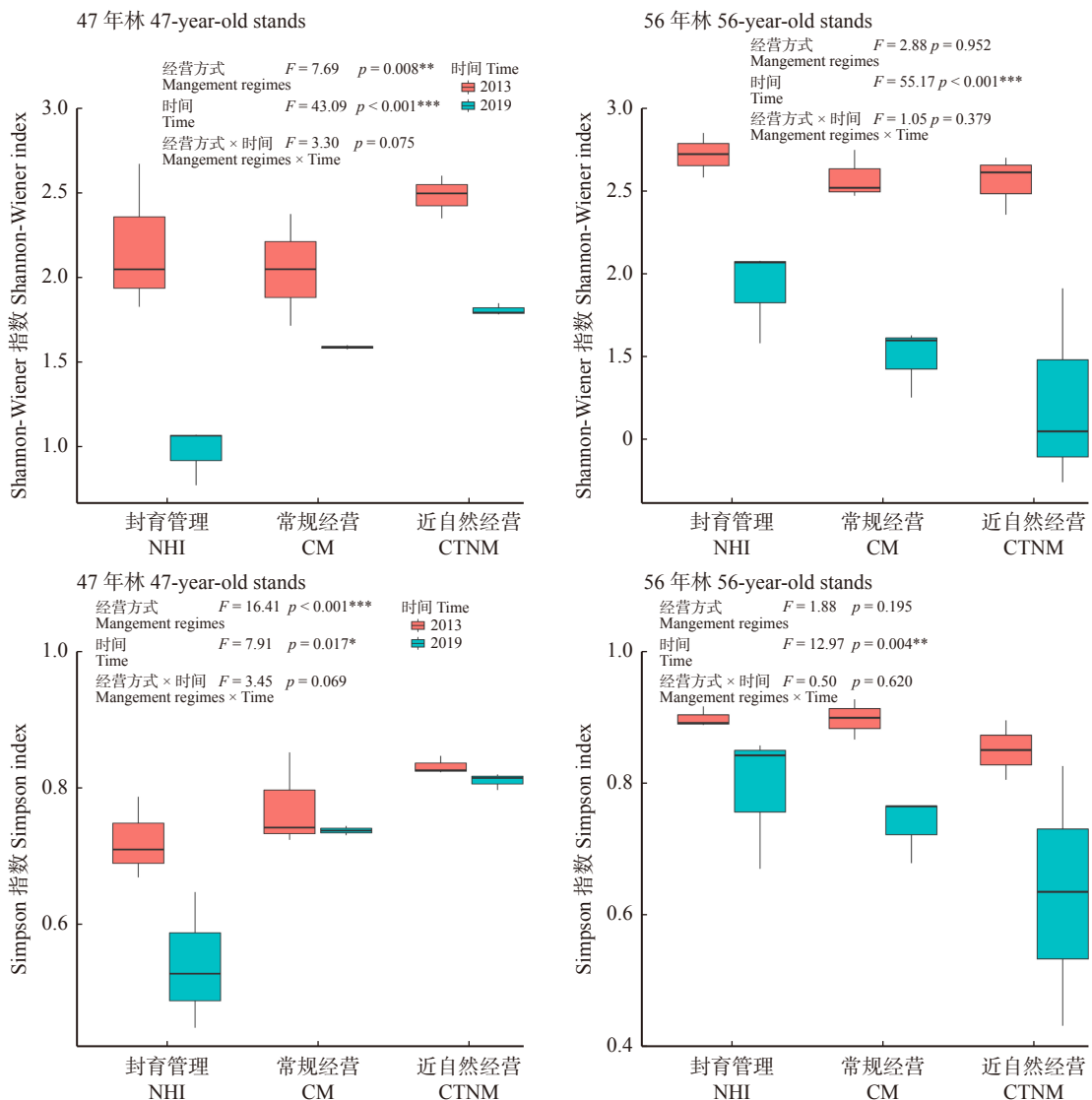


图 5 2013 年和 2019 年 3 种经营草本 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数比较

Fig. 5 Shannon-Wiener index and Simpson index of herbs under three management regimes in 2013 and 2019

经营措施等影响。其中,森林经营作为人工干预林木生长的重要途径,通过减少竞争物种数量、调整林分密度和空间结构等方式降低林分竞争强度^[28]、改善林内光照水平与土壤水肥竞争状况^[29]、加速林分营养循环速度^[30]等促进保留木生长,而差异化的经营方式还有助于保留木更好地利用其生物学特性、空间位置及竞争关系^[31-32]。在本研究中,在林龄和立地条件等基本一致情况下,近自然经营和常规经营通过抚育措施移除病死木、霸王树、被压木及部分长势较差林木,改善了保留木(尤其是目标树)的营养空间和竞争压力,提高了油松人工林生长速度;近自然经营的效果更好,可能是其通过优化树种组成和保留林下灌草植物加速了养分循环^[33]以及其抚育强度更适合该龄级油松人工林^[34]。油松成熟人工林平均胸径增长为近自然经营>常规经营>封育管理,表明近自然经营是一种有效的培养大径级用材林经营模式,与林同龙^[19]、Wang等^[20]分别针对杉木人工林、马尾松人工林的近自然经营研究结论一致。油松成熟人工林死亡率为近自然经营<常规经营<封育经营,表明近自然经营和常规经营通过抚育措施清理了油松成熟人工林中病虫害木和部分长势差的林木,显著提升了林分的整体健康状况,进而降低了乔木死亡率,与 Suzanne等^[35]和 Ding等^[36]研究结论一致;而近自然经营的效果优于常规经营,可能是由于前者形成的复层针阔混交林在稳定性和抗逆性方面要高于后者的单层油松纯林^[27,37-38],实地调查也发现其林分虫害更少^[39]。本研究还发现,3种经营对47年生和56年生油松人工林胸径生长、死亡率的影响差异均随时间推移而减弱,这说明经营措施对乔木的胸径生长和死亡率影响具有时限性^[40],为取得更好的经营效果,仍有必要对成熟人工林进行经营。

3.2 不同经营方式对植物多样性的影响

人工林的植物多样性主要取决于对林分结构的构建和调控^[41],合理的森林经营方式能显著提高乔木多样性^[42]。在立地条件、林分初始状态等基本一致的情况下,近自然经营和常规经营通过抚育措施直接改变树种构成比例,林下更新也因林木密度、林分结构、林窗面积调整等而加强;尤其是近自然经营在理念上更注重生态效益,在经营过程中注意保护和补植乡土树种,更好地促进了白桦、五角枫、蒙古栎等当地阔叶树种更新,进而增加了乔木多样性,与相关研究结论一致^[43-44]。林分经营以后,乔木竞争随郁闭度再次提高而逐渐加剧,不同经营方式对乔木多样性的影响差异随之逐渐减弱,同时还导致林下更新或补植的幼树保存率大幅下降^[45-46]。

在无人干扰的情况下,林下植被的生长发育随郁闭度增加而受抑制,物种数量和多样性指数呈减少趋势^[46-47],但合理经营可通过降低林分郁闭度、改善生长空间等提高林下生物多样性^[42,48],与本研究结论一致。对油松成熟林人工林进行经营6年后,封育管理、常规经营林下植物种数分别减少9种、5种,近自然经营增加3种;草本物种数和多样性指数总体下降,灌木种类和多样性指数增加,但草本的下降幅度高于灌木的上升幅度,可能是由于草本对微环境变化更敏感,在林分郁闭度增加过程中受到乔木和灌木的双重抑制^[29,49]。本研究还发现,3种经营灌木多样性无显著差异,但近自然经营的效果总体好于常规经营,可能是由于成熟林中的灌木均位于乔木层下而不是近自然经营的抚育对象,而常规经营为减少养分消耗、方便抚育与集材等而清理部分灌木;3种经营47年生林分的草本多样性差异显著,且抚育强度更大的常规经营在2个林龄的草本多样性指数下降均小于近自然经营,这表明提高抚育强度有利于增加草本多样性^[49];灌木和草本的多样性指数在经营时间与经营方式之间均无显著交互作用,这表明随着林分生长和郁闭度提高,物种间竞争会加剧,不同经营方式对林下灌木和草本多样性的影响差异因此而逐渐减弱^[15]。

4 结 论

(1)对油松成熟人工林进行合理经营能够提升乔木胸径生长速度并降低死亡率。封育管理、常规经营、近自然经营油松成熟人工林的年均胸径增长速度和6年死亡率差异显著($P < 0.05$),近自然经营的效果最好(0.40 cm/a 和 0.51%),常规经营次之(0.36 cm/a 和 1.44%),对照管理最差(0.31 cm/a 和 3.55%)。鉴于3种经营的56年生林分乔木胸径生长速度均高于47年生林分,建议当地提高油松人工林的主伐年龄以充分发挥林分生长潜力。

(2)3种经营56年生林分的乔木和灌木 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数高于47年生林分,而草本 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数为47年生林分高于56年生林分。对油松成熟人工林分别采用3种经营6年后,近自然经营保持林分多样性方面效果总体上最好,常规经营次之,对照管理最差。其中,近自然经营的林下植物种数增加3种,常规经营和封育管理分别减少5种和9种;47年生和56年生林分的乔木 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数增长排序为近自然经营>常规经营>封育管理;更新树苗死亡率和47年生林分的草本 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数下降排序为常规经营<

近自然经营 < 封育管理。

(3) 3种经营在促进油松成熟人工林的乔木胸径生长、降低乔木死亡率以及维持乔灌木多样性的影响差异均随时间推移而减弱,表明森林经营对林分的影响具有时效性。随着我国成熟林人工林面积不断扩大,尤其是在生态保护政策和经济补偿的推动下,纳入生态公益林的成熟人工林也将进一步增加,有必要定期开展森林经营活动,以实现更好的成熟人工林经济效益和生态效益。

参考文献

- [1] FAO. Global forest resources assessment 2020-key findings[M/OL]. Rome: FAO, 2020[2022-05-14]. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.
- [2] Hua F, Bruijnzeel L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches[J]. *Science*, 2022, 376: 839–844.
- [3] Brockerhoff E G, Jactel H, Parrotta J A, et al. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity?[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17: 925–951.
- [4] 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.
- [5] 张可欣, 刘宪钊, 雷相东, 等. 马尾松人工林不同经营方式短期经济效益分析[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(5): 43–54.
Zhang K X, Liu X Z, Lei X D, et al. Short-term economic benefit analysis under different management modes of *Pinus massoniana* plantation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(5): 43–54.
- [6] 张会儒, 雷相东, 李凤日. 中国森林经理学研究进展与展望[J]. *林业科学*, 2020, 56(9): 130–142.
Zhang H R, Lei X D, Li F R. Research progress and prospects of forest management science in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(9): 130–142.
- [7] Wang C, Zhang W, Li X, et al. A global meta-analysis of the impacts of tree plantations on biodiversity[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2022, 31: 576–587.
- [8] Kawamura K, Yamaura Y, Soga M, et al. Effects of planted tree species on biodiversity of conifer plantations in Japan: a systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Forest Research*, 2021, 26(3): 237–246.
- [9] Mitschka J H. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1–3): 81–95.
- [10] Pawson S M, Brin A, Brockerhoff E G, et al. Plantation forests, climate change and biodiversity[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22: 1203–1227.
- [11] 张英豪, 毛炎新, 奉国强. 不同密度控制下油松人工林的生态效益评估[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(4): 80–85.
Zhang Y H, Mao Y X, Feng G Q. Evaluation of ecological benefits in *Pinus tabulaeformis* plantation with different stand densities[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(4): 80–85.
- [12] 周芳萍, 徐建民, 陆海飞, 等. 利用珍贵树种改造尾巨桉纯林的混交模式研究[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(1): 10–19.
Zhou F P, Xu J M, Lu H F, et al. Transformation of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* clone plantation into mixed-species forest using precious tree species[J]. *Forest Research*, 2022, 35(1): 10–19.
- [13] National Forestry and Grassland Administration. Forest resources in China: the 9th national forest inventory[M]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2019: 25.
- [14] 郭浩, 王兵, 马向前, 等. 中国油松林生态服务功能评估[J]. *中国科学C辑: 生命科学*, 2008, 38(6): 565–572.
Guo H, Wang B, Ma X Q, et al. Evaluation on ecological service value of *Pinus tabulaeformis* in China[J]. *Science in China Series C: Life Science*, 2008, 38(6): 565–572.
- [15] 马履一, 李春义, 王希群, 等. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 1–9.
Ma L Y, Li C Y, Wang X Q, et al. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 1–9.
- [16] 修勤绪, 陆元昌, 曹旭平, 等. 目标树林分作业对黄土高原油松人工林天然更新的影响[J]. *西南林学院学报*, 2009, 29(2): 13–19.
Xiu Q X, Lu Y C, Cao X P, et al. Effect of target tree stand management on natural regeneration of *Pinus tabulaeformis* plantations on Loess Plateau Area[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2009, 29(2): 13–19.
- [17] 高云昌, 张文辉, 何景峰, 等. 黄龙山油松人工林间伐效果的综合评价[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1313–1319.
Gao Y C, Zhang W H, HE J F, et al. Effects of thinning intensity on *Pinus tabulaeformis* plantation in Huanglong Mountain, Northwest China: a comprehensive evaluation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1313–1319.
- [18] 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 等. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J]. *世界林业研究*, 2009, 22(1): 20–27.
Lu Y C, Zhang S G, Lei X D, et al. Theoretical basis and implementation techniques on close-to-nature transformation of plantations[J]. *World Forestry Research*, 2009, 22(1): 20–27.
- [19] 林同龙. 杉木人工林近自然经营技术的应用效果研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(3): 11–16.
LIN T L. Application effect research on intimate natural forestry management techniques for *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(3): 11–16.

- [20] Wang X, Lu Y, Xing H, et al. Effects of close-to-nature conversion on *Pinus massoniana* plantations at different stand developmental stages[J]. *Tropical Conservation Science*, 2018, 2: 1–16.
- [21] Fang X, Tan W, Gao X, et al. Close-to-nature management positively improves the spatial structure of *Masson pine* forest stands[J]. *Web Ecology*, 2021, 21: 45–54.
- [22] 李国雷, 刘勇, 徐扬, 等. 间伐强度对油松人工林植被发育的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 70–75.
- Li G L, Liu Y, Xu Y, et al. Effects of thinning intensity on the development of undergrowth in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2): 70–75.
- [23] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533–548.
- Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533–548.
- [24] 国家林业局调查规划设计院, 黑龙江省林业监测规划院. 主要树种龄级与龄组划分: LY/T 2908—2017[S]. 北京: 国家林业局, 2017: 4.
- Academy of Inventory and Planning, State Forestry Administration, Heilongjiang Forestry Monitoring And Planning Institute. Regulations for age-class and age-group division of main tree-species: LY/T 2908—2017[S]. Beijing: State forestry administration, 2017: 4.
- [25] Holyoak M, Leibold M A, Holt R D. Metacommunities: spatial dynamics and ecological communities[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2005.
- [26] 杨晓聪, 陈晓蕾, 窦松傲, 等. 林龄和立地条件对冀北山地油松单木生长量和生长率的影响[J]. *林业与生态科学*, 2022, 37(4): 363–369.
- Yang X C, Cheng X Q, Dou S A, et al. Influence of age and site factors on the growth of *Pinus tabulaeformis* in mountain areas of northern Hebei Province[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2022, 37(4): 363–369.
- [27] Juliette C, Matteo T, David F, et al. Forest diversity promotes individual tree growth in central European forest stands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54: 71–79.
- [28] 胡雪凡, 段光爽, 张会儒, 等. 蒙古栎次生林林木竞争对不同抚育间伐方式的响应[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(1): 1–9.
- Hu X F, Duan G S, Zhang H T, et al. Response of tree competition in natural secondary *Quercus mongolica* forest to thinning treatment[J]. *Forest Research*, 2021, 34(1): 1–9.
- [29] 原志坚, 王孝安, 王丽娟, 等. 抚育对黄土高原油松人工林林下植被功能多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 339–346.
- Yuan Z J, Wang X A, Wang L J, et al. Effects of tending on functional diversity of understory vegetation in *Pinus tabulaeformis* plantation on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(2): 339–346.
- [30] 朱教君, 李凤芹, 松崎健, 等. 间伐对日本黑松海岸林更新的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1361–1367.
- ZHU J J, LI F Q, Matsuzaki T, et al. Influence of thinning on regeneration in a coastal *Pinus thunbergii* forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1361–1367.
- [31] 陈辉荣, 周新年, 蔡瑞添, 等. 天然林不同强度择伐后林分空间结构变化动态[J]. *植物科学学报*, 2012, 30(3): 230–237.
- Chen H R, Zhou X N, Cai R, et al. Tracking analysis of forest spatial structure change after different selective cutting intensities in a natural forest[J]. *Plant Science Journal*, 2012, 30(3): 230–237.
- [32] Li Y F, He J A, Lu L H, et al. The long-term effects of thinning and mixing on species and structural diversity of Chinese fir plantations[J]. *New Forests*, 2021, 52: 285–302.
- [33] 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周周期[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4668–4677.
- Guo J, Yu L H, Fang X, et al. Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4668–4677.
- [34] 武朋辉, 白高平, 党坤良, 等. 抚育间伐对秦岭南坡油松中龄林生长的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(1): 20–26.
- Wu P H, Bai G P, Dang K L, et al. Thinning effects on growth of *Pinus tabulaeformis* middle-age forest on southern slope of Qinling Mountains[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(1): 20–26.
- [35] Suzanne W S, Trevor B H, Ian R C. Pre-commercial thinning effects on growth, yield and mortality in even-aged paper birch stands in British Columbia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 190(2): 163–178.
- [36] Ding Y, Zang R G. Effects of thinning on the demography and functional community structure of a secondary tropical lowland rain forest[J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 279: 111805[2022–09–10]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111805>.
- [37] 林思祖, 黄世国. 论中国南方近自然混交林营造[J]. *世界林业研究*, 2001, 14(2): 73–79.
- Lin S Z, Huang S G. An establishment and management of nature-approximating mixed forests in South China[J]. *World Forestry Research*, 2001, 14(2): 73–79.
- [38] 刘钦, 邓洪平, 李宗峰, 等. 贵州赤水桫欏国家级自然保护区植物群落特征[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 19–31.
- Liu Q, Deng H P, Li Z F, et al. Characteristics of plant community in the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve, Southwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(1): 19–31.
- [39] 陈肖. 半干旱地区油松纯林改造成混交林效益分析[J]. *农业科技与信息*, 2008(6): 31–32.
- Chen X. Analysis of mixed transformation of *Pinus tabulaeformis* plantation in semi-arid area of Northwest China[J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2008(6): 31–32.
- [40] Luiz F S D, Gustavo S, José C L, et al. Growth, mortality, and recruitment of tree species in an Amazonian rainforest over 13 years of reduced impact logging[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 430: 150–156.

- [41] 方升佐, 田野. 人工林生态系统生物多样性与生产力的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 55(4): 1–6.
Fang S Z, Tian Y. The relationship between biodiversity and productivity in the artificial plantation ecosystem[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, 55(4): 1–6.
- [42] 陆晓明. 马尾松人工林近自然化改造对物种多样性及生物量的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2014.
Lu X M. The effects of near nature transformation on species diversity and biomass in *Pinus massoniana* plantation[D]. Nanjing: Guangxi University, 2014.
- [43] Ming A G, Yang Y J, Liu S R et al. A decade of close-to-nature transformation alters species composition and increases plant community diversity in two coniferous plantations[J/OL]. Frontier in Plant Science, 2020, 11: 01141[2022–10–14]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01141>.
- [44] 刘俊杰, 吕倩, 沈逸, 等. 目标树初期经营对杉木人工林林下植物多样性和土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(2): 408–415.
Liu J J, Lü Q, Shen Y, et al. Early effects of target tree management on plant diversity and soil physicochemical properties in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(2): 408–415.
- [45] 张甜. 抚育间伐对小兴安岭天然针阔混交林生态功能的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
Zhang T. Effect of thinning on the ecological function of natural mixed broadleaf-conifer secondary forest in Xiaoxing'an Mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [46] 江萍. 不同林龄油松人工林抚育间伐效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
Jiang P. Studies on thinning effects of different aged *Pinus tabulaeformis* plantations[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [47] 罗毓明, 谭向平, 邹晓君, 等. 我国南方 4 种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(1): 1–10.
Luo Y M, Tan X P, Zou X J, et al. Understory plant diversity characteristics and influencing factors of four common plantations in South China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2022, 30(1): 1–10.
- [48] Haughian S R, Frego K A. Short-term effects of three commercial thinning treatments on diversity of understory vascular plants in white spruce plantations of northern New Brunswick[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 370: 45–55.
- [49] 郭海洋, 王涛, 贾炜玮. 抚育间伐对林口林业局主要针叶树种生长结构及生物多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(12): 1–6.
Guo H F, Wang T, Jia W W. Effects of thinning on growth, structure and biodiversity of main coniferous species in Northeast China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(12): 1–6.

(责任编辑 范 娟
责任编辑委)