

两种采伐方式对马尾松人工林林分空间结构的影响

王宇¹, 易艳灵^{1,2}, 刘海¹, 文晓晨¹, 李天一¹,
尹海锋¹, 李贤伟¹, 范川^{1*}

(1. 四川农业大学林学院, 四川 成都 611130; 2. 四川省内江市威远县新场镇人民政府, 四川 威远 641000)

摘要:【目的】探讨不同采伐方式和采伐强度对马尾松(*Pinus massoniana*)人工林空间结构的影响,为马尾松人工林林分结构优化和质量提升提供科学依据。【方法】以四川大茅坪国有林场马尾松人工林为研究对象,设置两种采伐方式:目标树经营(目标树数量0、100、167、233、300株/hm²)和基于目标树采伐蓄积强度设置相对应的传统抚育间伐(折算为0%、8.6%、16.1%、24.0%、29.2%),将目标树经营和传统抚育间伐中采伐强度为0株/hm²合并记为CK。采用基于Voronoi图的林分结构参数(混交度、角尺度、大小比数、开敞度和竞争指数)和空间结构评价指数对林分空间结构进行评价。【结果】两种采伐方式对林分混交度的影响有差别,具体为:目标树经营下,林分混交度呈上升趋势,而传统抚育间伐无显著变化。两种采伐实施后,林分角尺度表现为显著增加的趋势,但林分仍处于均匀分布格局,目标树经营相较于传统抚育经营,林分随机分布比例提升相对较高,林分大小比数无显著变化。两种采伐方式均能提高林分开敞度,且随采伐强度增加呈现出上升趋势,在同一采伐强度下,开敞度值表现出目标树经营大于传统抚育间伐。林分竞争指数呈现显著下降的趋势,且在同一采伐强度下,竞争压力表现为目标树经营小于传统抚育间伐;两种采伐方式均显著提高了林分空间结构评价指数,增长率分别为28.8%~65.6%(目标树经营)和14.2%~44.5%(传统抚育间伐)。【结论】基于研究区内马尾松人工林现状,目标树经营较传统抚育经营下林分空间结构更趋于合理,马尾松近熟林合理的目标树保留木数量为233株/hm²左右。

关键词: 马尾松人工林; 目标树经营; 传统抚育间伐; 林分空间结构; 采伐强度

中图分类号: S753; S756

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)05-0138-09



Initial impacts of two thinning methods on the spatial structure of *Pinus massoniana* plantations

WANG Yu¹, YI Yanling^{1,2}, LIU Hai¹, WEN Xiaochen¹, LI Tianyi¹,
YIN Haifeng¹, LI Xianwei¹, FAN Chuan^{1*}

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. People's Government of Xinchang Town, Weiyuan Country Neijiang City of Sichuan Province, Weiyuan 641000, China)

Abstract: 【Objective】This research aims to explore the effects of two tree thinning methods and intensities on the spatial structure of *Pinus massoniana* plantations, to provide a scientific basis for optimizing their structure and quality. 【Method】Two thinning methods-crop tree management and traditional tending management-with five thinning intensities (0, 100, 167, 233 and 300 trees/hm²) were established, at Damaoping State-Owned Forest Farm, an intensity of 0 trees/hm² was used as a control. Next we surveyed tree species (measuring tree height, diameter at breast height and distance between neighboring trees), drew Voronoi diagrams, and calculated spatial structure parameters for each stand: mingling index (*M*), neighborhood comparison (*U*), uniform angle index (*W*), opening degree (*K*), competition index (*CI*) and comprehensive evaluation index (*Z*). 【Result】After thinning, the *M* parameters for crop tree and traditional tending management were heterogeneous: the former increased, while the latter did not significantly change. The *W*

收稿日期 Received: 2021-07-07

修回日期 Accepted: 2023-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0600302); 德国政府财政贷款四川省林业可持续经营管理项目(G1403083)。

第一作者: 王宇(157473939@qq.com)。* 通信作者: 范川(fanchuan@sicau.edu.cn), 教授。

引文格式: 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. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202107012.

parameter increased, but the forest stands remained uniformly distributed. The forest was more randomly distributed with crop tree management than traditional tending management, while U parameters did not significantly change. Both thinning methods increased at the K parameter, which was larger for crop tree management than for traditional management. Both thinning methods saw a decrease in the CI parameter, likewise more so for traditional tending management. Finally, both crop tree and traditional management significantly improved the comprehensive evaluation indexes, which ranged from 28.8% to 65.6% and from 14.2% to 44.5%, respectively. 【Conclusion】The crop tree management was more reasonable than that of the traditional tending, with the number of target trees approximately 233 trees/hm² in the near-mature Masson pine forest.

Keywords: *Pinus massoniana* plantation; crop tree management; traditional tending management; spatial structure of stand; cutting intensity

林分空间结构直接或间接地决定了林分的稳定性及其发展潜力^[1],对保留木的生长和发育以及林分自然更新过程中的生长和生物量分配有很大影响^[2-3]。合理的林分空间结构能够保障森林多种功能的充分发挥,对于森林经营方向和优化决策的制定都具有不可或缺的指导及参考作用^[4]。鉴于林分空间结构的可控性,分析和重建林分空间结构已成为森林可持续经营的重要途径。

传统抚育间伐是人工林主要经营措施之一,国内关于传统抚育间伐对林分结构影响的研究较多^[5-6]。目标树经营作为一种效果较好的单株作业经营方式,国内外进行了大量的长期试验,大多数研究是从目标树生长(如树高、胸径和蓄积等)^[7]、物种多样性^[8]和林下更新^[9]等方面来分析其经营效果,但这两种经营思路本身存在着差异,其比较研究还较为鲜见。

马尾松(*Pinus massoniana*)为我国南方山地主要造林与用材树种,在保障区域生态安全和木材需求上发挥着重要的作用,但长期以来不合理的经营管理或自然因素,这些人工林存在林分结构不合理、生物多样性减少、木材缺口增加、木材安全和生产力低下等问题^[10-11]。如何通过调整森林经营管理活动,合理地改善林分结构、提升生态功能已成为当前林业工作者需要面对的问题。本研究以马尾松人工林为研究对象,利用 ArcGIS 的空间分析功能确定空间结构单元,并计算林分空间结构参数,比较目标树经营和传统抚育间伐对林分空间结构的影响,并结合林分空间结构评价指数,对两种采伐方式改造马尾松人工林的效果进行了评价,以期对马尾松人工林的合理经营奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于四川省巴中市平昌县六门乡大茅坪(107°1'34"E, 31°31'37"N),平均海拔为 720 m,

地貌为阶梯状岭谷地貌。属中亚热带湿润季风气候区,多年日平均气温 16.8℃,年均日照 1 365.5 h,平均相对湿度 79%,无霜期 298 d,常年降水量 1 138.2 mm。大茅坪马尾松近熟林总面积 50 hm²,树种组成为 90% 马尾松、10% 柏木(*Cupressus funebris*),林分平均年龄 25 a,平均胸径 17 cm,平均树高 15 m,郁闭度 0.8,平均蓄积量 383 m³/hm²。研究区整体位于上坡,平均坡度为 13°;土壤为黄壤,土层浅薄,一般为 25~40 cm,pH 6.5~7.8。样地内除马尾松以外的主要乔木树种有:柏木、油桐(*Vernicia fordii*)、野鸦椿(*Euscaphis japonica*)、异叶榕(*Ficus heteromorpha*)等,这些树种均株数少且零散分布于马尾松林中。试验地林下枯落物厚度为 3~5 cm,草本盖度为 60%,灌草植被主要为杜鹃花(*Rhododendron simsii*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、山茶(*Camellia japonica*)、铁仔(*Myrsine africana*)、菝葜(*Smilax china*)、芒箕(*Dicranopteris pedata*)、松叶蕨(*Psilotum nudum*)等。

1.2 样地设置

经踏查,选择林分与环境条件基本一致的马尾松人工林作为试验地,常见目标树保留株数设置范围 0~300 株/hm²^[12],本研究中设置目标树数量 0、100、167、233 和 300 株/hm²(依次对应采伐强度记为 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4);以目标树经营中采伐干扰树后经折算蓄积采伐强度分别为 0%、8.6%、16.1%、24.0%、29.2% 设置传统抚育间伐(依次记为 V_0 、 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4),考虑到目标树经营(T_0)和传统抚育间伐(V_0)均有采伐强度 0 的设置,将其合并处理,记为 CK。因此,本研究中共计 9 种处理,每个处理 3 次重复,合计 27 块样地(9 个处理×3 次重复)。研究按照完全随机的原则,在试验区内布设了 27 个 20 m×30 m 的矩形固定样地,为了防止样地间对后续试验的干扰,设置了不低于 30 m 的缓冲隔离带,按照前期试验设计,随机将这些处理安排至这些矩形样地内。同时,对样地的基本

信息如经纬度、地形、海拔、土壤类型等因子做好记录(表 1)。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

采伐方式 thinning type	处理 treatment	海拔/m elevation	伐前林分密度/ (株·hm ⁻²) density before thinning	伐后林分密度/ (株·hm ⁻²) density after thinning	伐前林分平均 胸径/cm average DBH before thinning	伐后林分平均 胸径/cm average DBH after thinning
CK	CK	700~740	1 681±51	1 681±51	17.1±0.3	17.1±0.3
	T ₁	700~740	1 716±49	1 522±59	16.7±0.4	16.1±0.4
	T ₂	700~740	1 710±67	1 400±41	16.8±0.1	16.2±0.1
	T ₃	700~740	1 638±48	1 244±31	17.2±0.6	16.8±0.6
	T ₄	700~740	1 777±44	1 205±47	16.9±0.2	16.4±0.3
目标树经营 crop tree management						
	V ₁	700~740	1 739±25	1 333±33	16.3±0.2	17.7±0.2
	V ₂	700~740	1 655±44	1 681±57	17.1±0.5	18.4±0.5
	V ₃	700~740	1 760±48	1 138±58	17.3±0.4	19.7±0.4
抚育间伐 traditional tending management	V ₄	700~740	1 805±91	1 000±43	16.9±0.5	18.8±0.5

注:CK 为对照,T₁、T₂、T₃、T₄ 表示目标树保留株数 100、167、233 和 300 株/hm²;V₁、V₂、V₃、V₄ 表示采伐强度 8.6%、16.1%、24.0% 及 29.2%。CK represented the control, T₁, T₂, T₃ and T₄ represented target trees number of 100, 167, 233 and 300 per hm²; V₁, V₂, V₃ and V₄ indicated the cutting intensity of 8.6%, 16.1%, 24.0% and 29.2%. The same below.

1.3 林分结构表征方法

1.3.1 目标树选择

根据试验设计,于 2018 年 2 月(作业前)调查样地内各林木的特征值,主要包括树高、枝下高和胸径等。共测定林木 2 786 株,其中马尾松(2 450 株)、柏木(251 株)和其他树种(85 株)。目标树经营实施单株木林分作业体系,并根据单木生长竞争特征现地进行林木分类,林木分为:目标树、特殊目标树、干扰树和一般木,并进行标记,此后伐除干扰树。其中目标树选择林分中处于优势地位的优势木,一般是生命力强、长势旺、干形通直、无损伤的林木;干扰树是选择邻近目标树并对目标树的生长产生不利影响(如挤压 1/3 以上树冠对目标树产生了干扰),也是生活力较强的优势木或亚优势木,但属于干形弯曲、枝条粗大、冠形不良或树干具有明显损伤等形质较差的林木,采伐后可以收获部分商品木材。传统抚育经营按克拉夫特林木分级法对林木进行分级(优势木、亚优势木、中等木、被压木和枯死木,依次记为Ⅰ级木、Ⅱ级木、Ⅲ级木、Ⅳ级木和Ⅴ级木),按经营强度依次采伐Ⅴ级木、Ⅳ级木以及部分Ⅲ级木。于 2018 年 9—11 月对试验地竞争木和间伐木进行采伐,采伐后,对胸径≥5 cm 以上的枝、桠全部收集,其余采伐剩余物散铺在林地,此后不再进行任何人为干预,均采用自然恢复。于 2019 年 4 月在研究区进行试验测量,对样地内每株林木的特征值进行实地测量并做好记录,同时用全站仪测量记录每株林木的相对坐标。

1.3.2 林分空间结构单元确定

通过 ArcGIS 10.0 生成泰森多边形和德洛内三

角网,泰森多边形能够更准确地确定最小结构单元,且多边形边数即为相邻木株数,德洛内三角网用于计算相邻木距离以及相邻木之间的夹角^[13]。同时,对样地边界进行边缘矫正,设置 2 m 缓冲区,缓冲区以内林木可作为中心木,处于缓冲区的林木只作为相邻木参与计算^[14]。以对照样地为例,生成 Voronoi 图如图 1 所示,内部边框表示矫正样地边界,中间边框表示样地边界,外部边框表示 Voronoi 的边界。

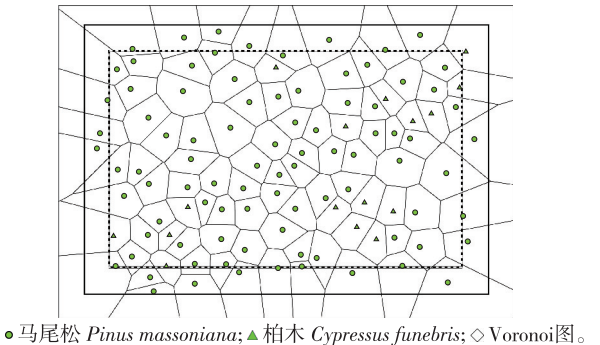


图 1 无经营样地 CK 构建的 Voronoi 图及其边缘矫正
Fig. 1 Voronoi diagram and edge correction of control plot CK

1.3.3 林分空间结构指数选取

1) 混交度(mingling index, M) 参照惠刚盈等^[15]的方法,计算公式为:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (1)$$
$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{中心木 } i \text{ 与相邻木 } j \text{ 树种相异} \\ 0, & \text{中心木 } i \text{ 与相邻木 } j \text{ 树种相同} \end{cases}$$

式中: M_i 为第*i*株对象木的混交度, M_i 可能取值为0、(0,0.25]、(0.25,0.5]、(0.5,0.75]、(0.75,1],其意义分别为零度、弱度、中度、强度和极强度混交; n 为相邻木株数,其值为Voronoi图边数。

2)大小比数(neighborhood comparison, U)参照惠刚盈等^[16]的方法,采用胸径作为特征因子,计算公式为:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (2)$$

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{参照树 } i \text{ 胸径} < \text{相邻木 } j \\ 0, & \text{参照树 } i \text{ 胸径} \geq \text{相邻木 } j \end{cases}$$

式中: U_i 为第*i*株对象木的大小比数,可能取值0、(0,0.25]、(0.25,0.5]、(0.5,0.75]、(0.75,1],其意义分别为优势、亚优势、中庸、劣势和极劣势地位。

3)角尺度(uniform angle index, W)采用惠刚盈等^[17]的方法,计算公式为:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (3)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角} < \text{标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角} \geq \text{标准角 } \alpha_0 \end{cases}$$

式中: W_i 为第*i*株对象木的角尺度,可能取值[0, 0.475]、[0.475, 0.517]、(0.517, 1],其意义分别为均匀分布、随机分布和团状分布; $\alpha_0 = \frac{360}{n+1}$ 。

4)竞争指数(competition index, C)采用应用较普遍的Hegyi简单竞争指数^[13],计算公式为:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{D_i L_{ij}} \quad (4)$$

$$C_i = \sum_{i=1}^e C_i \quad (5)$$

式中: C_i 为中心木*i*的竞争指数; D_i 为中心木*i*的胸径; D_j 为相邻木*j*的胸径; L_{ij} 为中心木*i*与相邻木*j*之间的水平距离。 C_i 为样地总竞争指数; e 为样地内中心木株数。

5)开敞度(opening degree, K)参照汪平等^[18]的研究方法进行计算,计算公式为:

$$K_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{L_{ij}}{H_{ij}} \quad (6)$$

式中: K_i 为第*i*株中心木的开敞度; L_{ij} 为中心木*i*与第*j*株相邻木的水平距离; H_{ij} 为对应相邻木*j*的树高。将开敞度取值划分为(0,0.2]、(0.2,0.3]、(0.3,0.4]、(0.4,0.5]、(0.5,+∞)5个状态区间,分别对应的是生长空间的5个不同状态:光照严重不足、光照不足、光照基本充足、光照充足和光照很充足。

1.3.4 空间结构评价指标构建

空间结构评价指标(Z_i)计算参照文献[19-20]:

$$Z_i = \left(\frac{1+M_i}{\sigma_M} \cdot \frac{1+K_i}{\sigma_K} \right) / \left[(1+U_i) \cdot \sigma_U \cdot (1+C_i) \cdot \sigma_{CI} \cdot (1+|W_i-0.5|) \cdot \sigma_{|W-0.5|} \right] \quad (7)$$

为了比较马尾松人工林经营前后林分空间结构评价指标的变化,采用归一化处理得到:

$$x_i'' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

式中: σ_M 、 σ_K 、 σ_U 、 σ_{CI} 和 σ_W 分别为混交度、开敞度、大小比数、竞争指数和角尺度的标准差。 x_i 、 x_i'' 分别表示林分空间结构指数归一化前后的值; $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别表示样本数据中的最小值和最大值。

1.4 数据处理

使用Excel 2016和AcrGIS对数据进行整理、汇总和计算,采用SPSS 20.0对数据进行统计分析,GraphPad Prism和OriginPro 2017被用于图形制作。首先,在SPSS 20.0中采用Shapiro-Wilk test和Levene's test检查数据的正态性分布和方差齐性,如果数据不通过检验,则对数据采用log转化以使其满足正态性分布和方差齐性。为了分析经营方式和经营强度对林分空间结构参数(即混交度、角尺度、开敞度、竞争指数、大小比数和空间结构评价指标)的影响,采用广义线性模型(SPSS 20.0)分析了不同经营方式、经营强度及其交互作用对林分空间结构参数的影响,并将样地作为随机因子;同时,为了比较不同处理下各林分空间结构参数间的差异,采用“Wald”成对比较(Wald pairwise comparison,显著性水平设置为0.05,其值越大说明其影响程度越大)。

2 结果与分析

2.1 两种采伐方式对林分水平空间结构指标的影响

对照林分内零度混交比例达到了71.9%,树种隔离程度高的林木比例极低(图2)。说明林分内树种单一,大多是马尾松,只有少数柏木混交其间,树种间隔离程度较低。图2a表明,采伐方式(Wald值为102.49)和采伐强度(Wald值为53.92)会对林分混交度(M)产生极显著影响($P < 0.01$),其中采伐方式是影响林分混交度的主要影响因子。目标树经营方式下,随着采伐强度的增加,林分的混交度极显著递增($P < 0.01$),但在达到T₂采伐强度后,随着采伐强度的增加,林分的混交

度不会再呈现出显著差异,但仍然有增加趋势;传统抚育间伐下,随着采伐强度增加,混交度呈现出先上升后下降,并在 V_2 时达到最大值。基于成对比较的结果,同等采伐强度下,林分的混交度均表现为目标树经营极显著高于传统抚育间伐 ($P < 0.01$)。说明相对于传统抚育间伐,以目标树为中心树的干扰树采伐更有利于林分隔离程度的改善,零度混交状态的林木降低幅度为 $0.071 \sim 0.120$,会对增强林分稳定性产生积极的影响。

不同采伐方式下的林分角尺度 (W) 见图 2b,对照林分平均 W 为 0.401 ,林分处于均匀分布格局阶段。而在不同采伐方式下,林分中的随机分布结构单元比例有所增加,但林分平均 W 为 $0.402 \sim$

0.428 ,仍属于均匀分布格局。对比分析结果显示,采伐强度 (Wald 值为 25.73) 对林分角尺度有极显著的影响 ($P < 0.01$),而采伐方式 (Wald 值为 0.71) 对林分角尺度的影响不显著 ($P > 0.05$)。在目标树经营方式下,随着采伐强度增加,林分的角尺度呈现为先上升后下降 ($P < 0.01$),且在 T_3 时出现最大值。而传统抚育间伐下,相较于 CK,各处理下林分的角尺度呈现为递增 ($P < 0.01$),但各处理强度之间差异不显著 ($P > 0.05$)。成对比较结果显示,采伐强度 T_3 、 V_3 下,目标树经营后林分的角尺度极显著高于传统抚育间伐 ($P < 0.01$),而其余各经营强度下,这两者对林分的角尺度影响无显著差异 ($P > 0.05$)。

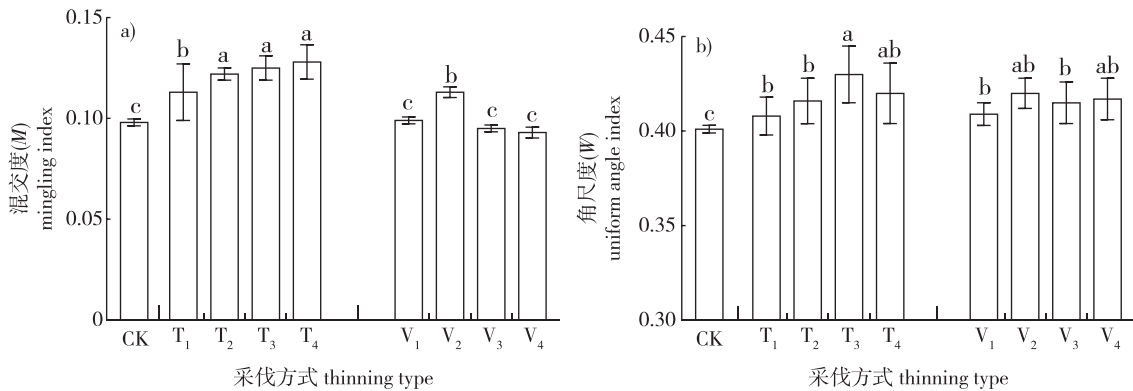


图2 不同采伐方式下的林分混交度和角尺度

Fig. 2 The mingling and uniform angle indexes of stands under different thinning types

2.2 两种采伐方式对林木间竞争态势的影响

大小比数 (U) 作为中心木与邻近木之间大小关系的量化指标,取值越大,中心木胸径大于相邻木的树木株数越少,相邻个体占优势,反之,中心木占优势。采伐方式 (Wald 值为 0.37) 和采伐强度 (Wald 值为 4.76) 对林分大小比数的影响不显著 ($P > 0.05$) (图 3a),说明两种采伐方式对林分的大

小比数没有显著影响。但两种采伐方式都对柏木的劣势生长状态略有改善,目标树经营提高了马尾松的优势地位,传统抚育间伐增加了马尾松处于中庸状态个体的比例。

采伐方式 (Wald 值为 217.55) 和采伐强度 (Wald 值为 $3\,359.07$) 对林分的竞争指数 (C) 影响极显著 ($P < 0.01$) (图 3b)。其中,采伐强度是竞争

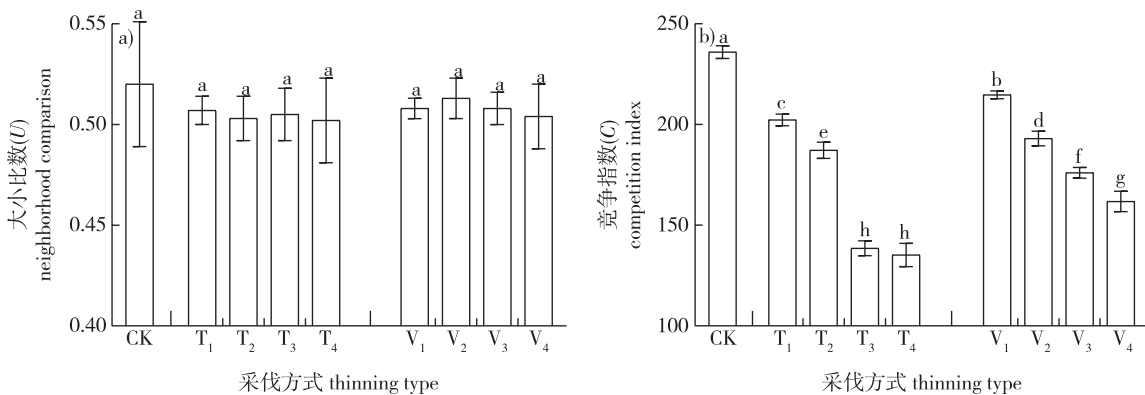


图3 不同采伐方式下的林分大小比数和竞争指数

Fig. 3 The neighborhood comparison and competition index of stands under different thinning types

指数的主要影响因子。在目标树经营方式下,随着采伐强度增加,林分的竞争指数极显著降低($P<0.01$),在达到 T_4 采伐强度时最低,采伐后林木竞争总和降低幅度为 14.2%~42.7%。在传统抚育间伐方式下,林分的竞争指数也随着经营强度增加而极显著下降($P<0.05$),降低幅度为 9.0%~31.4%。基于成对比较的结果,在经营强度相同的情况下,目标树经营方式下林分的竞争指数均表现为极显著低于传统抚育间伐($P<0.05$)。说明目标树较传统抚育间伐能较大程度地降低林木间的竞争激烈态势,提高林木生长活力。

2.3 两种采伐方式对林分透光条件和林分空间结构评价指数的影响

林分的平均开敞度 $K=0.180$,结构单元中开敞度小于 0.3 的占 90%以上,表明林分中绝大部分林

木生长空间严重不足。采伐方式(Wald 值为 10.95)和采伐强度(Wald 值为 62.66)对林分开敞度有极显著影响($P<0.01$)(图 4a),其中采伐强度是影响林分开敞度的主要影响因子。在目标树经营方式下,林分的开敞度随采伐强度增加,呈现出上升趋势($P<0.01$),在 T_3 时达到最大值;在传统抚育间伐下,随着采伐强度增大,林分的开敞度也呈上升趋势($P<0.01$)。基于成对比较的结果可以看出,在采伐强度 1 和 2 时,目标树经营和传统抚育间伐对林分开敞度的改变无显著差异($P>0.05$);而采伐强度 3 和 4 时,目标树经营方式下林分的开敞度极显著高于传统抚育经营($P<0.01$);这说明在较高采伐强度下,目标树经营对林分开敞度的提升显著高于传统抚育经营,林木个体获得更多的生长空间和资源,同时也利于大径材的培育。

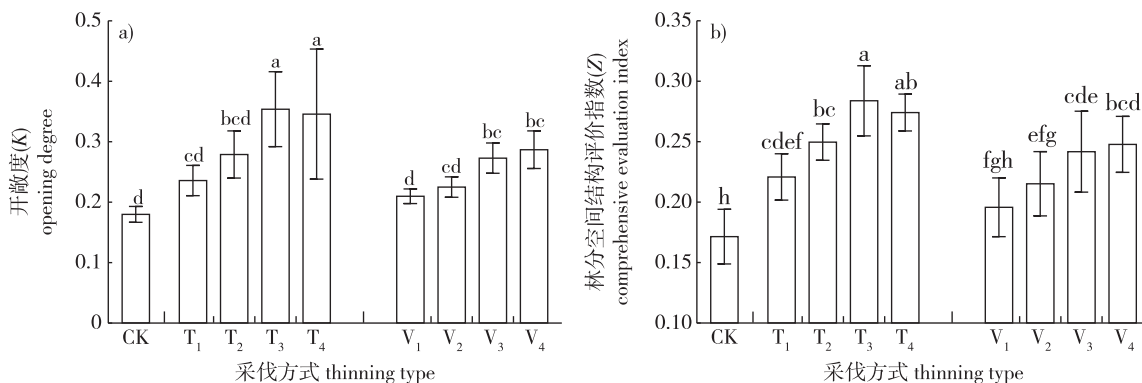


图4 不同采伐方式下的林分开敞度和空间结构评价指数

Fig. 4 The opening degree and comprehensive evaluation index of stand spatial structure under different thinning types

采伐方式(Wald 值为 13.11)、采伐强度(Wald 值为 94.40)对林分空间结构评价指数(Z)影响极显著($P<0.01$),其中,采伐强度是影响林分空间结构评价指数的主要影响因子(图 4b)。在目标树经营和传统抚育经营下,随采伐强度增加均呈极显著递增($P<0.01$)。基于成对比较的结果,在采伐强度相同的情况下,两种经营方式在采伐强度 1 和 4 时差异不显著($P>0.05$);在采伐强度 2 和 3 下,目标树经营均极显著高于传统抚育间伐($P<0.01$)。说明目标树经营和传统抚育间伐均对林分空间结构改造产生了积极作用, Z 值增长率分别为 28.8%~65.6%和 14.2%~44.5%。

3 讨论

森林经营的本质是对林分结构进行调控,通过调整不合理的或控制合理的林分空间结构达到发挥森林多功能和实现森林长期稳定生长和发育的

目的^[5]。结合林分空间结构的分析手段探讨不同经营措施下人工林的空间结构变化,以寻求最优的林分结构模式^[21],进而为人工林的质量提升和合理经营提供可行的方法。

3.1 林分水平空间结构指标

混交度和角尺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生态功能效益的基础^[2]。本研究发现林分的混交度在采伐后有显著性差异。具体表现为,相同采伐强度下,相较于对照林地,目标树经营后林分的混交度呈现逐渐上升,而传统抚育间伐无显著改变,这与文献[22-24]关于目标树经营有助于林分混交度提高的结论类似,而与吴蒙蒙等^[25]研究结果不同。究其原因,林分混交度主要是由林木种类和数量决定的。目标树经营中,林分中被砍伐的竞争木主要是同种树种(本研究中指马尾松),而异种树种(如柏木、油桐和野鸦椿等)则以生态目标树的名义被保

留下来,增加了不同种类树木的占比,因此提高了林分的混交度。但这些树种可能在林分中属于劣势木在传统抚育间伐中被砍伐掉,由于这些树种相对于主要树种马尾松比例太小,所以对林分混交度没有显著改变。本研究中采伐强度是影响林分角尺度的主要影响因子,在目标树经营和传统抚育间伐下,随着采伐强度增加,林分角尺度呈现先增后降的趋势,但变化幅度不大,这与姜廷山等^[26]和赵中华等^[27]研究结果相似。虽然两种方式均显著提高了林分角尺度,但林分仍处于均匀分布,这可能在采伐进程中,均未考虑到林木间的角度关系,因此需要继续探究其他能诱导林分向随机分布发展的经营方式和采伐强度。

3.2 林木间竞争态势

大小比数和竞争指数描述了林分中相邻木的竞争态势^[28]。其中,大小比数作为呈现林木在林分中优势程度的指数,其主要受到中心木和相邻木之间胸径大小的影响。本研究中,无论是采伐方式还是采伐强度均对其没有显著影响,这与李建等^[5]和王晓荣等^[29]关于采伐对林分大小分化程度影响不显著的结果一致,这主要是因为大小比数的变化往往比较复杂,应以树种的生物学和生态学特性不同而异^[30]。竞争指数量化了林木之间竞争强度的重要指标,能较好地反映林木个体生长对生境等资源需求与占有量之间的关系。研究发现在目标树经营和传统抚育间伐下,随着采伐强度增大,竞争指数表现出下降的趋势,这与朱玉杰等^[31]和姜廷山等^[26]研究所得结论一致,主要是由于采伐强度越大,相邻木之间的距离就越大,竞争就越小。在相同采伐强度下,相较于传统抚育间伐,目标树经营对竞争指数影响更显著。究其原因,竞争指数不仅与相邻木间距离为负相关关系,也与相邻木胸径大小呈现出负相关关系^[32]。传统抚育间伐方式主要是采用的下层劣势木采伐,在胸径改变上显著低于目标树经营,不利于林分内竞争压力的缓解;而目标树经营伐除了目标树周围的竞争木,降低了相邻木之间相对胸径大小,因此,采伐干扰树后,能够使马尾松的竞争压力得到释放,有利于保留林木的生长发育^[33]。

3.3 林分透光条件

开敞度作为描述林下光照条件的重要参数,它能够对林内光环境的强弱进行表达,也代表了林木生长营养空间的大小,数值越大,透光条件越好,林木的生长空间越充足^[16]。研究发现在目标树经营和传统抚育间伐下,随着采伐强度增大,开敞度呈

现出上升趋势,这与朱玉杰等^[31]和姜廷山等^[26]研究所得结论一致,这主要是由于采伐强度越大,林木间间隙就越大,林分透光条件就越好;在传统抚育间伐下只有较高强度的采伐才能将林分冠层打开。此外,在相同采伐强度下,相较于传统抚育间伐,目标树经营对开敞度影响更显著。究其原因,开敞度主要受林木间距离和树高大小影响,传统抚育间伐方式主要是采用下层采伐,对林冠层疏开作用不大,不利于林分内光照条件的改善,而目标树经营伐除了目标树周围的竞争木,实现了上层林冠的稀疏,上下林层光照疏通。

3.4 林分空间结构评价

本研究中发现,目标树经营在采伐强度 T_2 和 T_3 时对林分的综合改善效果要显著优于传统抚育经营,这与胡雪凡等^[34]的研究结果一致。其次,本研究也发现,中高强度的干扰树采伐更有利于改善林分空间结构,与姜廷山等^[26]对大兴安岭落叶松林的研究结果相似,而与李建等^[5]研究结果出现一定差异。可能是相对于次生林而言,人工林的初始造林密度大、树种单一,需要较高强度的采伐干扰才能达到优化林分结构的目的。但需要考虑的是,过高强度的采伐将会导致林内生物量蓄积量的大幅降低,林地生产力未得到充分发挥,也不利于林分的稳定性^[35]。同时也是研究选择与 T_4 相比林分综合效果提升并不显著的 T_3 作为最优采伐强度的原因。因此确定采伐方式和采伐强度时,也应对其他方面的影响因素进行综合分析,才能有利于林分结构的优化。

本研究对不同采伐方式和采伐强度后林分空间结构的影响进行了比较研究,发现两种采伐方式实施后,林分角尺度和开敞度均表现为极显著增加;林分竞争指数呈现出极显著下降;而林分大小比数无显著变化;这两种采伐方式对林分混交度的影响有异质性,表现为目标树经营下,林分混交度呈上升趋势,而传统抚育间伐无显著变化。再运用林分空间结构参数构建空间结构评价指数进行综合评价,得出目标树经营较传统抚育经营更适合马尾松人工林林分改造。由此,提出了研究区马尾松近熟人工林最佳的采伐方式为目标树经营,其合理的目标树保留株数为 233 株/hm² 左右。

参考文献(reference):

- [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].J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(3): 199–205. DOI: 10.12302/j.issn.1000–2006.202005027.
- [2] LIU N, WANG D W, GUO Q X. Exploring the influence of large trees on temperate forest spatial structure from the angle of mingling[J]. For Ecol Manag, 2021, 492: 119220. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119220.
- [3] DONG L B, BETTINGER P, LIU Z G. Optimizing neighborhood-based stand spatial structure: four cases of boreal forests[J]. For Ecol Manag, 2022, 506: 119965. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119965.
- [4] 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]. J Beijing For Univ, 2013, 35(4): 1–9.
- [5] 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]. J Beijing For Univ, 2017, 39(9): 48–57. DOI: 10.13332/j.1000–1522.20170220.
- [6] YE S X, ZHENG Z R, DIAO Z Y, et al. Effects of thinning on the spatial structure of *larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Sustainability, 2018, 10(4): 1250. DOI: 10.3390/su10041250.
- [7] 周超凡, 冯林艳, 何潇, 等. 目标树经营对云冷杉针阔混交林单木生长的影响研究[J]. 林业科学研究, 2022, 35(2): 19–27. ZHOU C F, FENG L Y, HE X, et al. Effects of target tree management on single tree growth in spruce-fir mixed forest[J]. For Res, 2022, 35(2): 19–27. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.02.003.
- [8] 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, LYU Q, SHEN Y, et al. Early effects of target tree management on plant diversity and soil physicochemical properties in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27(2): 408–415. DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2020.02014.
- [9] 李荣, 何景峰, 张文辉, 等. 近自然经营间伐对辽东栎林植物组成及林木更新的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 83–91. LI R, HE J F, ZHANG W H, et al. Effects of near-natural management thinning on plant composition and forest regeneration of *Quercus liaotungensis* forest[J]. J Northwest A & F Univ (Nat Sci Ed), 2011, 39(7): 83–91. DOI: 10.3321/j.issn:1001–7488.2009.10.004.
- [10] 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 For Res, 2018, 31(3): 63–67. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2018.0023.y.
- [11] 曾冀, 雷渊才, 贾宏炎, 等. 桂西南马尾松人工林生长对不同强度采伐的动态响应[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2): 335–341. ZENG J, LEI Y C, JIA H Y, et al. Dynamic growth response of *Pinus massoniana* plantation on intensive thinning in southwestern Guangxi, China[J]. For Res, 2017, 30(2): 335–341. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.02.021.
- [12] HE W C, WANG Y, WANG X, et al. Stand structure adjustment influences the biomass allocation in naturally generated *Pinus massoniana* seedlings through environmental factors[J]. Front Plant Sci, 2022, 13: 997795. DOI: 10.3389/fpls.2022.997795.
- [13] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4707–4716. CHEN Y G, SHI Y J, et al. Intraspecific and Interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram[J]. Acta Ecol Sin, 2007, 27(11): 4707–4716. DOI: 10.3321/j.issn:1000–0933.2007.11.039.
- [14] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 等. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 1–5. ZHOU H M, HUI G Y, ZHAO Z H, et al. Treatment methods of plot boundary trees in spatial forest structure analysis[J]. Sci Silvae Sin, 2009, 45(2): 1–5. DOI: 10.3321/j.issn:1001–7488.2009.02.001.
- [15] 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, 14(1): 23–27. HUI G Y, HU Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. For Res, 2001, 14(1): 23–27. DOI: 10.3321/j.issn:1001–1498.2001.01.004.
- [16] 惠刚盈, VON GADOW K, 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, 12(1): 1–6. HUI G Y, VON GADOW K, ALBERT M. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. For Res, 1999, 12(1): 1–6. DOI: 10.3321/j.issn:1001–1498.1999.01.001.
- [17] 惠刚盈, VON GADOW K, 胡艳波, 等. 林木分布格局类型的角尺度均值分析方法[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1225–1229. HUI G Y, VON GADOW K, HU Y B, et al. Characterizing forest spatial distribution pattern with the mean value of uniform angle index[J]. Acta Ecol Sin, 2004, 24(6): 1225–1229. DOI: 10.3321/j.issn:1000–0933.2004.06.020.
- [18] 汪平, 贾黎明, 魏松坡, 等. 基于 Voronoi 图的侧柏游憩林空间结构分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(2): 39–44. WANG P, JIA L M, WEI S P, et al. Analysis of stand spatial structure of *Platycladus orientalis* recreational forest based on Voronoi diagram method[J]. J Beijing For Univ, 2013, 35(2): 39–44.
- [19] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. 林分择伐空间结构优化模型研究[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 25–31. TANG M P, TANG S Z, LEI X D, et al. Study on spatial structure optimizing model of stand selection cutting[J]. Sci Silvae Sin, 2004, 40(5): 25–31. DOI: 10.3321/j.issn:1001–7488.2004.05.004.
- [20] 曹小玉, 李际平, 封尧, 等. 杉木生态公益林林分空间结构分析及评价[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 37–48. CAO X Y, LI J P, FENG Y, et al. Analysis and evaluation of the stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* ecological forest[J]. Sci Silvae Sin, 2015, 51(7): 37–48. DOI: 10.11707/j.1001–7488.20150705.
- [21] 赵阳, 余新晓, 黄枝英, 等. 北京西山侧柏水源涵养林空间结构特征研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 183–188. ZHAO Y, YU X X, HUANG Z Y, et al. Spatial structure characteristic of *Platycladus orientalis* forests in Beijing Xishan Mountain[J]. Res Soil Water Conserv, 2011, 18(4): 183–188. DOI: 10.3969/j.issn.1000–2006.2010.04.026.
- [22] YIN H F, SU Y, LIU S Z, et al. Consistent response of nematode communities to management of coniferous plantations[J]. For Ecosyst, 2022, 9: 100045. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100045.
- [23] BOIVIN-DOMPIERRE S, ACHIM A, POTHIER D. Functional response of coniferous trees and stands to commercial thinning in eastern Canada[J]. For Ecol Manag, 2017, 384: 6–16. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.10.024.

- [24] PIIRONEN T, VALTONEN A, ROININEN H. The seed-to-seedling transition is limited by ground vegetation and vertebrate herbivores in a selectively logged rainforest[J]. *For Ecol Manag*, 2017, 384: 137–146. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.10.037.
- [25] 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]. *J Northeast For Univ*, 2013, 41(9): 6–9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.09.002.
- [26] 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, 19. 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]. *J Northeast For Univ*, 2018, 46(12): 9–14, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2018.12.002.
- [27] 赵中华, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 结构化森林经营方法在阔叶红松林中的应用[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(4): 467–472. ZHAO Z H, HUI G Y, HU Y B, et al. Application of structure-based forest management in broadleaved Korean pine mixed forest[J]. *For Res*, 2013, 26(4): 467–472. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1498.2013.04.012.
- [28] HUI G Y, WANG Y, ZHANG G Q, et al. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests[J]. *For Ecol Manag*, 2018, 422: 49–58. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.03.045.
- [29] 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*, 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]. *J Southwest For Univ*, 2019, 39(1): 9–19. DOI: 10.11929/j.swfu.201809021.
- [30] 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]. *Bull Bot Res*, 2015, 35(1): 16–21. DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2015.01.004.
- [31] 朱玉杰, 董希斌. 大兴安岭地区落叶松用材林不同抚育间伐强度经营效果评价[J]. *林业科学*, 2016, 52(12): 29–38. ZHU Y J, DONG X B. Evaluation of the effects of different thinning intensities on larch forest in great Xing'an Mountains[J]. *Sci Silvae Sin*, 2016, 52(12): 29–38. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20161204.
- [32] 林富成, 王维芳, 门秀莉, 等. 兴安落叶松人工林空间结构优化[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(4): 68–76. LIN F C, WANG W F, MEN X L, et al. Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation[J]. *J Beijing For Univ*, 2021, 43(4): 68–76. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20200228.
- [33] 邢海涛, 陆元昌, 刘宪钊, 等. 基于近自然改造的马尾松林分竞争强度研究[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(9): 42–54. XING H T, LU Y C, LIU X Z, et al. Competition intensity of *Pinus massoniana* stand based on close-to-nature management[J]. *J Beijing For Univ*, 2016, 38(9): 42–54. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160023.
- [34] 胡雪凡, 张会儒, 周超凡, 等. 不同抚育间伐方式对蒙古栎次生林空间结构的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 137–147. HU X F, ZHANG H R, ZHOU C F, et al. Effects of different thinning patterns on the spatial structure of *Quercus mongolica* secondary forests[J]. *J Beijing For Univ*, 2019, 41(5): 137–147. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20190037.
- [35] 李婷婷, 陆元昌, 庞丽峰, 等. 杉木人工林近自然经营的初步效果[J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 90–100. LI T T, LU Y C, PANG L F, et al. Initial effect of close-to-nature management of Chinese fir plantation[J]. *Sci Silvae Sin*, 2014, 50(5): 90–100. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20140512.

(责任编辑 孟苗婧 郑琰燚)