浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(1): 33−44 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250155

引用格式: 杨芷一, 封昕怡, 淑婷, 等. 采伐强度对吉林蛟河针阔混交林叶功能性状的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(1): 33−44. YANG Zhiyi, FENG Xinyi, SHU Ting, *et al*. Impact of logging intensity on leaf functional traits of conifer-broadleaf mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(1): 33−44.

采伐强度对吉林蛟河针阔混交林叶功能性状的影响

杨芷一[1]，封昕怡[1]，淑　婷[1]，张　萌[2]，范秀华[1]

（1. 北京林业大学 理学院，北京 100083；2. 北京林业大学 国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心，北京 100083）

摘要：【目的】采伐是森林生态系统重要的干扰因子。研究不同采伐强度对针阔混交林叶功能性状的影响可为采伐后树种的恢复提供科学依据。**【方法】**以吉林蛟河针阔混交林中 4 种主要树种 (色木槭 *Acer mono*、水曲柳 *Fraxinus mandshurica*、紫椴 *Tilia amurensis* 和红松 *Pinus koraiensis*) 为研究对象，设置对照 (ck，采伐强度为 0)、轻度采伐 (T_1，17.24%)、中度采伐 (T_2，34.74%) 和重度采伐 (T_3，51.85%) 4 种不同处理，采集样品，分析其光合特性、叶结构性状等叶功能性状指标。运用单因素方差分析和最小显著差异法比较不同采伐处理的差异。**【结果】**不同采伐强度对色木槭、水曲柳、紫椴和红松 4 种树种的光合特性与叶结构性状产生了显著影响，色木槭、水曲柳、紫椴和红松的最大净光合速率分别在采伐强度为 T_3、T_2、T_1 和 ck 处理下最大，分别在采伐强度为 T_2、T_1、ck 和 T_3 时最小。通过叶结构性状分析发现：色木槭、水曲柳和紫椴比叶重在 T_1 时最大，色木槭与水曲柳的叶干物质质量分数在 T_3 时最大，水曲柳与紫椴的叶组织密度在 T_1 时最大，而色木槭则在 T_2 时最大。各树种的叶绿素相对含量在种内差异均不显著。**【结论】**采伐影响了各树种光合特性和叶结构性状：阔叶树种色木槭、水曲柳、紫椴分别在 T_3、T_2、T_1 采伐强度下碳同化能力最强，且采伐能够提升各阔叶树种叶结构性状参数；红松的光合能力随采伐强度增加而下降，叶结构性状不随采伐强度变化。低强度的采伐可提高吉林蛟河针阔混交林中阔叶树种的光合能力及资源配置效率，高强度的采伐会造成红松适应不良。图 1 表 4 参 48

关键词：采伐强度；针阔混交林；叶功能性状；光合特性；叶结构性状

中图分类号：S718.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2026)01-0033-12

Impact of logging intensity on leaf functional traits of conifer-broadleaf mixed forest in Jiaohe, Jilin Province

YANG Zhiyi[1]，FENG Xinyi[1]，SHU Ting[1]，ZHANG Meng[2]，FAN Xiuhua[1]

（1. College of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forest Management Engineering Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China）

Abstract: [**Objective**] Logging is a critical disturbance factor in forest ecosystems. This study aims to investigate the effects of logging intensity on leaf functional traits in a coniferous-broadleaved mixed forest, so as to provide scientific basis for post-logging species recovery. [**Method**] The 4 main tree species (*Acer mono*, *Fraxinus mandshurica*, *Tilia amurensis*, and *Pinus koraiensis*) in the conifer-broadleaf mixed forest of Jiaohe, Jilin Province were selected as the research subjects. The 4 different treatments were set up: control (ck, logging intensity was 0), light logging (T_1, 17.24%), moderate logging (T_2, 34.74%), and heavy logging (T_3, 51.85%). Samples were collected and data on photosynthetic characteristics and leaf structural traits were analyzed. One-

收稿日期：2025-02-24；修回日期：2025-06-22

基金项目：国家重点研发计划重点专项 (2022YFD2201003)

作者简介：杨芷一 (ORCID: 0009-0002-8100-956X)，从事光与植物生理生态学研究。E-mail: 694608320@qq.com。通信作者：范秀华 (ORCID: 0000-0002-2977-9658)，教授，博士，从事光与植物生理生态学研究。E-mail: blfanxh@bjfu.edu.cn

way ANOVA and least significant difference (LSD) tests were employed to compare inter-group differences. [**Result**] Different logging intensities significantly affected the photosynthetic characteristics and leaf structural traits of *A. mono*, *F. mandshurica*, *T. amurensis*, and *P. koraiensis*, whose maximum net photosynthetic rate was the highest under logging intensities of T_3, T_2, T_1, and ck, and the lowest under logging intensities of T_2, T_1, ck and T_3. Through the analysis of leaf structural traits, it was found that the leaf mass per area of *A. mono*, *F. mandshurica*, and *T. amurensis* was the highest under T_1, while the leaf dry matter content of *A. mono* and *F. mandshurica* was the highest under T_3. The leaf tissue density of *F. mandshurica* and *T. amurensis* was the highest under T_1, while that of *A. mono* was the highest under T_2. The relative content of chlorophyll in the leaves of each tree species showed no significant differences among the species. [**Conclusion**] Logging affects the photosynthetic characteristics and leaf structural traits of various tree species. Broadleaved species such as *A. mono*, *F. mandshurica*, and *T. amurensis* have the strongest carbon assimilation ability under T_3, T_2, and T_1 intensities, and logging can improve their leaf structural parameters. The photosynthetic capacity of *P. koraiensis* decreases with increasing logging intensity, while leaf structural traits do not change with logging intensity. Low-intensity logging can promote photosynthetic capacity and efficiency of resource allocation of broadleaved species, while high-intensity logging can lead to the maladaptation of *P. koraiensis*. [Ch, 1 fig. 4 tab. 48 ref.]

Key words: logging intensity; conifer-broadleaf mixed forest; leaf functional traits; photosynthetic properties; leaf structural traits

中国东北地区的针阔混交林是温带森林生态系统的核心组成部分，在维护国家生态安全、碳汇功能和保护生物多样性等方面具有不可替代的重要作用[1]。吉林蛟河针阔混交林是其典型代表，以红松 *Pinus koraiensis*、色木槭 *Acer mono*、紫椴 *Tilia amurensis*、水曲柳 *Fraxinus mandshurica* 等乔木为主要树种，凭借复杂的群落结构与功能，为区域气候调节、水土保持提供了重要支撑[2]。针阔混交林是该地区的顶级群落类型。由于 20 世纪以来的过度采伐等干扰，当地针阔混交林资源被严重破坏，大量原始林退化为次生林，生态功能减弱[3]，现仍处于演替早期阶段。现有研究认为：中低强度的采伐能够优化群落结构，有利于群落生产力与稳定性的提升；高强度的采伐会导致生态位的过度释放，对森林谱系多样性和功能多样性产生严重的负面影响[4]。鉴于仅有一定强度范围内的采伐才能有利于森林恢复，因此亟需相关研究为其恢复与可持续发展提供科学的理论支撑。

植物叶片对环境的变化极为敏感，能够通过调整生长策略达到与环境变化相适应的目的，因此叶片功能性状可以反映植株个体获取与保护资源的策略[5]。叶功能性状包括叶光合特性、叶结构性状、叶化学性状等[6]。当前，对于叶功能性状的研究多集中于叶对各种自然环境胁迫的响应。李昕蓉等[7]研究发现：叶结构性状受遗传调控为主，而叶化学性状更多受到环境驱动；刘阳等[8]对 4 种槭树 *Acer* spp.的研究结果显示：槭树的比叶面积等结构性状随着气候变化而波动；崔晓阳等[9]研究发现：对于水曲柳幼苗，较低的土壤水势导致非气孔因素改变，进而主导了光合抑制现象；郝珉辉等[10]研究发现：吉林蛟河乔木叶性状受坡向、海拔等地形因子的显著影响。关于采伐等人为扰动对不同种间叶功能性状影响的研究相对较少。当前对采伐的研究集中于林分结构、物种组成、幼苗更新等宏观生态功能领域[11]，而采伐强度对乔木叶、根等器官功能性状的研究则较为分散。巫志龙等[12]研究发现：对杉阔混交林进行中低强度采伐处理与重度采伐处理后，混交林中乔木细根生物量减少，并在 2 个处理间存在显著差异；米爽等[13]研究发现：重度采伐会导致幼苗的比叶面积显著下降。

国内外研究表明，采伐通过增加辐射有效性减少了各树种对资源的竞争，导致叶片变薄从而提升单位叶面积的光合速率[14]。采伐对叶功能性状的影响会因树种的不同而有所变化。欧洲黑松 *P. nigra* 在重度采伐 (减少 60%~70% 胸高断面积) 下叶干物质质量分数显著高于中度采伐 (减少 30%~40% 胸高断面积)，欧洲赤松 *P. sylvestris* 在重度采伐下光合速率显著高于对照组[15]，上述研究揭示了采伐干扰对叶功

能性状的影响，有助于了解养分循环的响应模式，确定最佳采伐强度并优化其树种配置方案[15]。因此，研究采伐强度对叶功能性状的影响具有重要的理论和实践意义[16]。

本研究以吉林蛟河针阔混交林中色木槭、水曲柳、紫椴和红松等 4 种主要树种为研究对象，探究不同采伐强度对各树种光合特性叶结构性状的影响，旨在揭示叶功能性状对不同采伐强度的响应，为该地区森林可持续经营提供理论支持，为量化采伐干扰的影响以及采伐后森林恢复管理提供科学依据。

1　研究区与方法

1.1　研究区概况

研究区域位于吉林省吉林市蛟河市国有林保护中心监测样地 (43°57′31″~43°58′03″N, 127°44′07″~127°44′40″E)，海拔为 430~457 m。该区域属于温带大陆性季风气候，夏季温暖多雨，冬季严寒干燥；年均气温为 3.8 ℃，年均降水量为 696.0 mm，降水集中于 7—8 月，冬季降雪显著，年平均积雪厚度为 30~65 cm，年均无霜期为 130.0 d，年均有霜期为 230.0 d。土壤母质主要为花岗岩，林下土壤属于山地暗棕色森林土，平均厚度为 30~80 cm，局部可达 100 cm 以上[17]。监测样地植被类型为典型的天然次生针阔混交林，主要乔木树种包括红松、紫椴、色木槭、水曲柳、春榆 *Ulmus japonica* 和蒙古栎 *Quercus mongolica* 等[17]。

1.2　监测样地设置

2011 年 7 月，在吉林蛟河针阔混交林成熟林中选取林分状况大体一致的 4 块面积为 1 hm^2 的固定标准地，使用全站仪将每块样地划分为 25 个 20 m×20 m 的样方，调查样地内所有胸径≥1 cm 树木的物种名称、胸径、树高、冠幅和位置坐标等。同年 12 月，经上级林业主管部门批准后依据间密留匀、留优去劣的原则，根据保留木相邻距离、树种以及林木大小确定采伐木，尽量去除先锋树种或个体数量较多的树种，并将生长状况不良的树木优先去除[18]。根据胸高断面积确定的 4 种不同采伐强度分别为对照 (ck，采伐强度为 0)、轻度采伐 (T_1，采伐强度为 17.24%)、中度采伐 (T_2，采伐强度为 34.74%)、重度采伐 (T_3，采伐强度为 51.85%)，获得 4 块采伐样地，于 2013、2015、2018、2021 年对样地进行了复测。样地概况见表 1。2023 年 7 月，在 4 个采伐样地中，选取色木槭、水曲柳、紫椴和红松 4 种树种作为研究对象，每个树种分别选择胸径、树高、冠幅接近平均水平的 3 株个体为目标树作为试验重复样。目标树中色木槭平均树高为 12.3 m，平均胸径为 12.4 cm；水曲柳平均树高为 33.0 m，平均胸径为 21.7 cm；紫椴平均树高为 21.0 m，平均胸径为 35.2 cm；红松平均树高为 26.0 m，平均胸径为 17.5 cm。

表 1　样地概况

Table 1　Survey of sample plots

采伐强度	海拔/m	坡度/(°)	密度/(株·hm^{-2})			胸高断面积/(m^2·hm^{-2})		
			2011年采伐前	2011年采伐后	2021年复测	2011年采伐前	2011年采伐后	2021年复测
ck	453	1	987	987	952	28.875	28.875	31.266
T_1	443	4	965	784	903	28.731	24.627	27.849
T_2	430	5	947	653	798	29.968	21.151	23.601
T_3	497	3	1 152	586	655	30.247	15.007	18.433

1.3　光合数据采集与处理

2023 年 7—8 月，选取所有晴天 7:00—10:30，使用便携式光合作用测定系统 (Li-6400XT, Li-COR, 美国) 进行光合数据的测定。用高枝剪剪下冠层中部的二级枝后迅速插入装有清水的水桶内进行二次取枝以维持枝条内的水势，确保实验数据准确。每株阔叶样树选取 3 片完整健康的叶片，每株针叶样树选取 4 束共 20 根完整健康的针叶叶片，分别进行光合参数的测定。

使用 Li-6400 光合仪提供的光强为 16 000 μmol·m^{-2}·s^{-1} 的标准光强红蓝光源，设定相对湿度 50%，控制叶室温度为 25 ℃，使用外接压缩二氧化碳 (CO_2) 小钢瓶控制 CO_2 摩尔分数为 400 μmol·mol^{-1}，气体流速设定为 500 μmol·s^{-1}，由强至弱依次设定光量子通量密度为 2 000、1 500、1 200、1 000、800、600、400、300、200、150、100、75、50、20、0 μmol·m^{-2}·s^{-1}。每次测量均在 2 000 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强

下诱导 30 min 后再进行光合参数的测定，每一光强下的测定时间不少于 120 s，不多于 240 s。测量完毕后将数据导出至电脑，使用非直角双曲线模型[19] 对测定的数据进行拟合，获得各树种的光响应曲线，并拟合出最大净光合速率 (μmol·m^{-2}·s^{-1})、暗呼吸速率 (μmol·m^{-2}·s^{-1})、表观量子效率 (μmol·m^{-2}·s^{-1})、光补偿点 (μmol·m^{-2}·s^{-1}) 和光饱和点 (μmol·m^{-2}·s^{-1})[20]。当叶室光强为 1 000 μmol·m^{-2}·s^{-1}，环境 CO_2 摩尔分数为 400 μmol·mol^{-1} 时，记录 4 种主要树种的光合气体交换参数，包括净光合速率 (μmol·m^{-2}·s^{-1})、气孔导度 (mol·m^{-2}·s^{-1})、胞间 CO_2 摩尔分数 (μmol·mol^{-1})、蒸腾速率 (mmol·m^{-2}·s^{-1}) 和水分利用效率 (mmol·mol^{-1})。

1.4 叶片功能性状采集与处理

每株目标树随机选取 15 片健康完整的叶片，使用手持叶绿素计 (SPAD-520PLUS) 对红松以外的 3 个阔叶树种进行叶绿素相对含量 (SPAD) 的测定，测量时避开主脉，每个取样叶片测定 3 次并记录，随后立即装入密封袋中。返回实验室后使用分析天平称量阔叶与针叶的鲜质量 (g)。使用扫描仪扫描叶片，使用 Image J 软件，利用像素格比对法计算出叶面积 (cm^2)。使用游标卡尺测量阔叶叶片厚度 (cm)，将 15 片叶片按照相同的方向叠放，测量时避开叶脉，每组叶片测量 3 次。利用排水法测量红松针叶的叶体积 (cm^3)。将叶片放入恒温 70 ℃ 的烘箱内 72 h 后，测量叶干质量 (g)。

为探讨每种采伐强度下不同树种的叶片结构性状，分别计算每个样品的比叶重 (g·cm^{-2})、叶干物质质量分数 (%)、阔叶叶组织密度 (g·cm^{-3}) 和针叶叶组织密度 (g·cm^{-3})[19]。

1.5 数据处理

用 SPSS 26.0 对数据进行处理分析，通过单因素方差分析 (one-way ANOVA) 以及最小显著差异法 (LSD) 进行不同组间多重比较 (P＜0.05)。利用 GraphPad Prism 9 制作图表。

2 结果与分析

2.1 不同采伐强度对各树种光合气体交换参数的影响

阔叶红松林 4 种主要树种的光合气体交换参数如表 2 所示。从光合气体交换参数的种间比较来看：水曲柳的净光合速率在各采伐强度下均显著高于色木槭与红松，且在 ck、T_2、T_3 处理下显著高于紫椴

表 2 不同采伐强度下各树种光合气体交换参数

Table 2 Photosynthetically gas exchange parameters of 4 tree species under different logging intensities

树种	采伐强度	净光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔导度/(mol·m^{-2}·s^{-1})	胞间CO_2摩尔分数/(μmol·mol^{-1})	蒸腾速率/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	水分利用效率/(mmol·mol^{-1})
色木槭	ck	4.67±0.32 Ca	0.06±0.03 Bab	252.61±61.16 Aa	0.84±0.36 Ba	6.13±1.77 Aa
	T_1	5.24±1.60 Ba	0.06±0.02 Bab	247.91±10.32 Aa	1.30±0.47 Ba	4.09±0.35 Ba
	T_2	4.56±0.22 Ba	0.05±0.01 Bb	243.64±32.43 Ba	0.76±0.16 Ca	6.29±1.63 Aa
	T_3	5.91±1.16 BCa	0.13±0.05 Ba	306.98±41.35 Aa	1.49±0.60 ABa	4.63±2.14 Aa
水曲柳	ck	11.22±0.27 Aa	0.20±0.01 Aa	295.74±5.76 Aa	3.03±0.86 Aa	3.87±1.18 ABa
	T_1	8.84±0.92 Ab	0.16±0.07 Aa	281.43±52.43 Aa	2.80±0.93 Aa	3.51±1.43 Ba
	T_2	12.03±0.84 Aa	0.29±0.15 Aa	307.33±36.75 Aa	2.54±0.35 Aa	4.77±0.55 Aa
	T_3	10.94±0.50 Aa	0.24±0.03 Aa	314.74±11.77 Aa	2.09±0.30 Aa	5.35±0.87 Aa
紫椴	ck	4.78±0.61 Cc	0.10±0.02 ABa	310.12±10.67 Aa	2.01±0.33 ABa	2.40±0.24 Bb
	T_1	9.19±0.06 Aa	0.13±0.01 ABa	268.08±7.40 Aa	1.19±0.11 Ba	7.72±0.74 Aa
	T_2	5.46±1.01 Bc	0.10±0.02 Ba	299.53±19.92 Aa	1.75±0.78 ABa	3.81±2.06 Ab
	T_3	7.08±0.53 Bb	0.16±0.06 Ba	311.17±23.44 Aa	2.20±0.60 Aa	3.37±0.73 Ab
红松	ck	6.35±0.54 Ba	0.11±0.06 ABa	279.23±39.75 Aab	1.46±0.68 Ba	5.04±1.88 ABab
	T_1	5.46±0.93 Bab	0.07±0.02 Ba	253.30±32.27 Ab	0.81±0.21 Bb	7.06±1.66 Aa
	T_2	5.25±1.11 Bab	0.08±0.02 Ba	281.77±16.99 ABab	0.97±0.20 BCab	5.49±0.78 Aab
	T_3	4.75±1.12 Cb	0.09±0.04 Ba	306.67±15.67 Aa	1.02±0.40 Bab	4.91±0.79 Ab

说明：数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同采伐强度间差异显著 (P＜0.05)，不同大写字母表示不同树种间差异显著 (P＜0.05)。

(P＜0.05)，仅在 T_1 处理下与紫椴无显著差异。在所有处理中，水曲柳的气孔导度和蒸腾速率均为最高且显著大于其他树种 (P＜0.05)；紫椴的水分利用效率在 T_1 处理中显著高于其他树种 (P＜0.05)；对于胞间 CO_2 摩尔分数，各采伐强度下普遍没有显著的种间差异，仅有色木槭在 T_2 处理中显著低于水曲柳与紫椴 (P＜0.05)。

从各树种在不同采伐强度间比较来看，色木槭和水曲柳的各项光合气体交换参数普遍较为稳定，仅有色木槭的气孔导度在 T_2 处理中显著小于 T_3 处理 (P＜0.05)，水曲柳的净光合速率在 T_1 处理中显著低于其他处理 (P＜0.05)，其余参数随采伐强度变化不显著。紫椴的气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数和蒸腾速率在各处理间展现出稳定性，而净光合速率与水分利效率均在 T_1 处理中显著高于其他处理 (P＜0.05)，可见，紫椴在面对轻度采伐时通过提升对水分的利用效率提升了其光合能力。红松的各项参数在各处理间差异显著 (P＜0.05)：净光合速率随着采伐强度的增加而下降，T_3 处理显著小于 ck 处理；T_3 处理胞间 CO_2 摩尔分数显著大于 T_1 组，水分利用效率则呈现为 T_1 处理显著大于 T_3 处理 (P＜0.05)；T_1 处理蒸腾速率显著小于 ck 处理 (P＜0.05)；气孔导度在各处理间无显著差异。

2.2　不同采伐强度对各树种光合-光响应曲线的影响

图 1 显示：随着光合有效辐射的增强，各树种净光合速率变化趋势较为一致。在光合有效辐射为 0~200 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时，各树种的净光合速率均呈快速增长。随着光合有效辐射的增加，净光合速率的增长速率逐步放缓。当光合有效辐射达到光饱和点时，净光合速率增长趋于平缓。

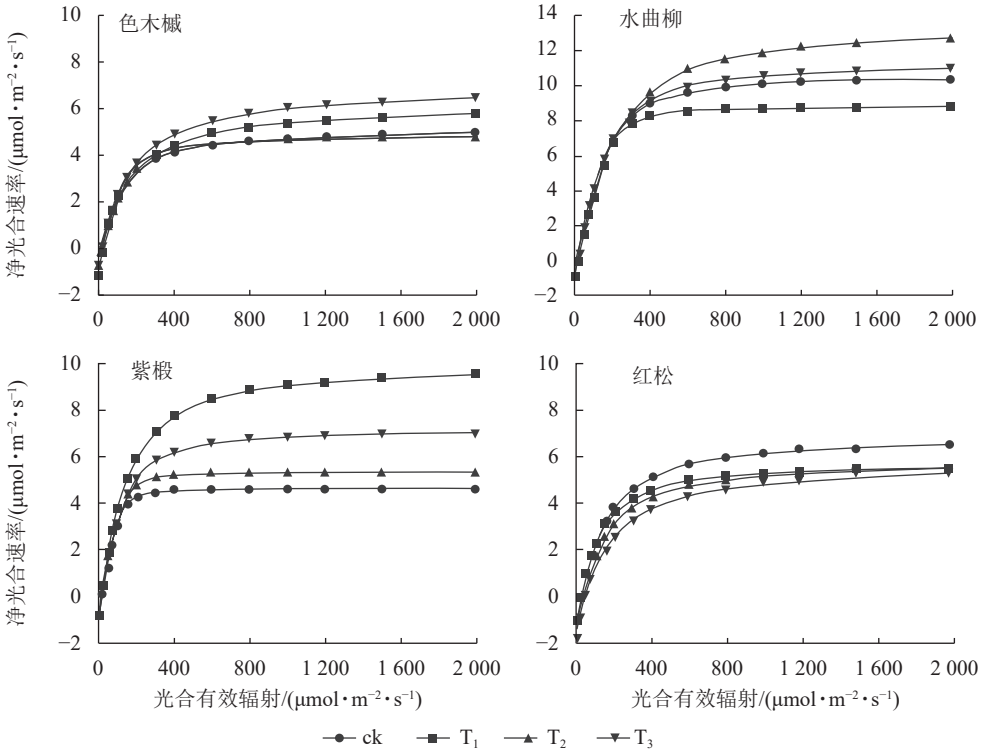

图 1　不同采伐强度下 4 种主要树种的净光合速率

Figure 1　Net photosynthetic rates of the 4 major tree species at different logging intensities

通过非直角双曲线模型得到色木槭、水曲柳、紫椴、红松 4 个树种的光响应参数，结果如表 3 所示。从种间比较来看，在所有处理中水曲柳最大净光合速率与表观量子效率均显著大于其他树种 (P＜0.05)，仅在 T_1 处理中与紫椴差异不显著。在 ck 与 T_1 处理中各树种间暗呼吸速率与光饱和点无显著差异；T_2 与 T_3 处理中，红松的光饱和点显著高于其他 3 种阔叶树 (P＜0.05)。ck 与 T_1 处理中，各树种间光补偿点无显著差异；在 T_2 处理中，红松光补偿点显著大于 3 种阔叶树 (P＜0.05)；在 T_3 组中红松和色木槭光补偿点显著大于水曲柳与紫椴 (P＜0.05)。

从不同处理间的比较来看，各树种暗呼吸速率和表观量子效率在各处理间差异不显著。色木槭的光补偿点、光饱和点各处理间差异不显著，T_3 处理的最大净光合速率显著大于 T_2 处理 (P＜0.05)。水曲柳

表 3 不同采伐强度下各树种光响应参数

Table 3 Light response parameters of 4 tree species under different logging intensities

树种	采伐强度	暗呼吸速率/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)	最大净光合速率/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)	光饱和点/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)	光补偿点/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)	表观量子效率/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)
色木槭	ck	0.68±0.22 Aa	4.94±0.28 Cab	1 538.21±661.82 Aa	20.27±22.30 Aa	0.02±0.01 Ca
	T_1	1.19±0.14 Aa	6.17±1.09 Bab	1 341.36±103.88 Aa	22.28±1.94 Aa	0.02±0.00 Ba
	T_2	0.78±0.42 Ba	4.87±0.68 Bb	1 719.69±1 150.68 Ba	12.91±6.29 Ca	0.02±0.01 Ba
	T_3	1.26±0.90 ABa	7.11±0.18 Ba	1 773.22±333.35 Ba	20.98±19.98 Aa	0.03±0.00 Ba
水曲柳	ck	1.51±0.53 Aa	10.57±1.40 Aab	1 335.97±473.77 Aab	21.73±10.80 Aa	0.04±0.01 Aa
	T_1	1.35±0.35 Aa	9.17±0.67 Ab	928.98±85.38 Ab	17.12±4.20 Aa	0.04±0.00 Aa
	T_2	1.37±0.20 ABa	12.26±0.72 Aa	1 505.02±199.00 BCa	20.83±3.18 Ba	0.04±0.00 Aa
	T_3	0.99±0.26 Ba	10.96±0.62 Aa	1 253.41±113.48 Bab	13.30±3.51 Ba	0.04±0.00 Aa
紫椴	ck	1.08±0.16 Aa	4.95±0.57 Cc	699.23±36.82 Ab	14.18±3.48 Aa	0.03±0.00 Ba
	T_1	0.81±0.10 Aa	9.52±0.25 Aa	1 859.17±703.38 Aa	11.56±0.42 Aa	0.03±0.00 Aa
	T_2	1.10±0.28 ABa	5.76±1.15 Bc	780.74±168.10 Cb	15.16±4.26 BCa	0.03±0.01 ABa
	T_3	1.15±0.37 Ba	7.28±0.51 Bb	1 084.89±370.58 Bb	15.30±1.98 Ba	0.03±0.01 Ba
红松	ck	1.24±1.07 Aa	6.61±0.66 Ba	2 953.14±971.84 Aa	25.80±23.92 Ab	0.03±0.00 Ba
	T_1	1.15±0.38 Aa	5.65±0.70 Bb	2 132.14±1 377.96 Ab	23.82±12.63 Ab	0.02±0.01 Ba
	T_2	1.46±0.39 Aa	5.60±0.63 Bb	2 525.07±1 532.40 Aa	35.53±9.64 Aab	0.02±0.01 Ba
	T_3	2.28±0.99 Aa	5.89±0.32 Cab	2 858.82±1 587.13 Aa	53.95±10.09 Aa	0.02±0.01 Ca

说明：数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同采伐强度间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示不同树种间差异显著 ($P<0.05$)。

的光补偿点在各处理间差异不显著， T_2、T_3 处理的最大净光合速率显著大于 T_1 处理，T_2 处理的光饱和点显著大于 T_1 处理 ($P<0.05$)。紫椴的光补偿点在各处理理间差异不显著， T_1 处理的最大净光合速率和光饱和点显著大于其他处理 ($P<0.05$)。ck 处理红松的最大净光合速率显著大于其他处理 ($P<0.05$)，T_1 处理光饱和点显著低于其他处理 ($P<0.05$)，T_3 处理光补偿点显著大于 ck 与 T_1 处理 ($P<0.05$)。

2.3 不同采伐强度对各树种叶结构性状与叶绿素的影响

由表 4 可见：红松的比叶重、叶干物质质量分数与叶组织密度均显著高于其他 3 种阔叶树种 ($P<0.05$)，且红松的 3 种叶结构性状在各采伐强度下种内差异均不显著，展现出针叶叶片结构上的稳定性。从阔叶树种的种间对比来看，仅有 T_3 处理下色木槭比叶重显著大于水曲柳 ($P<0.05$)，其他组内无种间差异。各阔叶树种叶干物质质量分数的变化规律一致，从大到小均为色木槭、紫椴、水曲柳。水曲柳的叶组织密度显著低于其他树种 ($P<0.05$)。

从不同处理间比较来看，3 种阔叶树种的比叶重呈相同的变化规律，从大到小均为 T_1、T_3、T_2、ck。色木槭与紫椴的叶干物质质量分数最大值出现在 T_3 处理，且显著大于 T_1 处理 ($P<0.05$)。水曲柳的叶干物质质量分数与之相反，最大值出现在 T_1 处理。色木槭的叶组织密度随采伐强度的增加而增加，在 T_3 处理显著大于 ck 处理 ($P<0.05$)，水曲柳与紫椴的叶组织密度最大值出现在 T_1 处理，且均显著大于 ck 处理。

ck 处理的色木槭叶绿素相对含量显著大于紫椴和水曲柳 ($P<0.05$)；T_2 处理的色木槭叶绿素相对含量显著大于紫椴 ($P<0.05$)；T_3 处理中色木槭叶绿素相对含量显著大于水曲柳 ($P<0.05$)。各树种的叶绿素相对含量在不同采伐强度下种内差异均不显著。

3 讨论

3.1 采伐强度对树种光合特性的影响

采伐是一种重要的森林经营措施，合理强度的采伐能够减弱竞争、改善光照条件和地下水肥条件，

表 4　不同采伐强度下各树种叶结构性状与叶绿素指数

Table 4　Leaf structural traits and SPAD of 4 tree species under different logging intensities

树种	采伐强度	比叶重/(g·cm^{-2})	叶干物质质量分数/%	叶组织密度/(g·cm^{-3})	叶绿素相对含量
色木槭	ck	23.31±2.18 Bb	0.35±0.03 Bab	0.24±0.02 ABb	40.33±3.23 Aa
	T_1	34.11±6.52 Ba	0.33±0.01 Bb	0.27±0.07 BCab	43.42±7.54 Aa
	T_2	28.53±3.19 Bab	0.38±0.01 Aa	0.31±0.02 ABa	40.94±3.17 Aa
	T_3	32.18±5.94 Ba	0.38±0.03 Aa	0.34±0.05 Aa	41.85±3.43 Aa
水曲柳	ck	20.95±2.48 Ba	0.22±0.01 Cb	0.17±0.02 Cb	34.98±2.68 Ba
	T_1	29.24±4.86 Ba	0.25±0.01 Da	0.20±0.02 Ca	37.94±4.54 Aa
	T_2	22.26±6.00 Ba	0.23±0.03 Bab	0.18±0.03 Cab	37.08±4.36 ABa
	T_3	23.56±3.67 Ca	0.24±0.01 Bab	0.18±0.02 Bab	36.51±1.90 Ba
紫椴	ck	18.21±1.73 Bc	0.32±0.04 Bab	0.18±0.02 BCc	34.85±3.96 Ba
	T_1	31.71±5.84 Ba	0.30±0.03 Cb	0.29±0.03 ABa	36.70±4.83 Aa
	T_2	23.13±3.22 Bbc	0.34±0.04 Aab	0.25±0.03 BCb	34.16±2.72 Ba
	T_3	27.45±3.81 BCab	0.35±0.04 Aa	0.25±0.02 Bb	38.26±2.46 ABa
红松	ck	122.04±2.23 Aa	0.39±0.01 Aa	0.29±0.08 Aa	—
	T_1	126.10±1.93 Aa	0.40±0.02 Aa	0.35±0.04 Aa	—
	T_2	125.42±6.30 Aa	0.39±0.04 Aa	0.39±0.14 Aa	—
	T_3	124.63±3.37 Aa	0.39±0.02 Aa	0.36±0.08 Aa	—

说明：数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同采伐强度间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示不同树种间差异显著 ($P<0.05$)。—表示无此项。

从宏观上促进森林生产力的提升[21]。本研究发现：从光合生理方面来说，采伐对 4 种树种的光合特性均产生了显著影响，且各树种对不同采伐强度的响应模式不同，体现出不同树种面对环境变化时光合策略的差异。

色木槭的光合能力 (最大净光合速率和净光合速率) 在重度采伐条件下显著高于其他处理，而其他光合参数均不随采伐强度产生显著变化，表明内源性因素并非驱动其光合速率提升的主要原因。采伐会显著提高林下光照水平。陈涵等[22] 研究发现：随着采伐强度的增大，冠层开度、直射光和散射光均有显著增加，因此重度采伐可能使林下光照接近或达到色木槭的光饱和点，从而提升了其光合速率。黄一鑫等[19] 研究也发现：在光照强度大的林窗环境下，色木槭最大净光合速率显著高于光强较弱的林下和林缘，为本研究推断提供了进一步佐证。色木槭在中度采伐条件下净光合速率显著低于其他采伐强度，胞间 CO_2 摩尔分数和蒸腾速率最低，水分利用效率最高，证明气孔限制了叶片与外界的气体交换和蒸腾作用，植物通过提升水分利用效率来适应环境，保障光合作用的产出[23]。

水曲柳的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、最大净光合速率及表观量子效率在各个采伐强度下均显著高于其他树种，表现出极强的光合能力和对环境的适应能力。水曲柳的光合速率和气孔开闭随环境变化改变可塑性极强，且两者的响应存在显著耦合关系，这增强了水曲柳在面临不同强度采伐时对环境的适应性[24]。孔鑫等[25] 研究也发现：水曲柳幼苗的光合和水力性状对光照强度的可塑性较强，使得水曲柳在森林异质性较高的光环境中的生存能力显著提升，从侧面印证了本研究的观点。

紫椴的最大净光合速率与水分利用效率均是在未采伐状态下最低，轻度采伐时最高。在本研究采伐样地的另一项研究表明：未采伐林分中冠层郁闭导致光合有效辐射低于紫椴最适区间，可能引发其光限制效应[26]。此外，王宣璎等[27] 研究还发现：紫椴对光适应范围极为狭窄，因此导致紫椴的光合能力在强度采伐时上升后又在中度与重度采伐时产生显著的光抑制。

红松的光合特性对采伐强度的响应呈现出复杂的生态适应机制。随着采伐强度增加，红松的净光合速率显著下降，对照组较高的最大净光合速率表明，完整的林冠结构通过适度遮荫维持了稳定的光温条件，避免了强光抑制和水分过度蒸散，从而优化了红松的光合碳同化能力[28]。重度采伐组的光饱和点显

著高于对照组和轻度采伐组，这可能是红松面对强光胁迫的适应性调整，通过提升光能利用上限来补偿因林分结构破坏导致的散射光减少[29]。然而，这种高光饱和点并未转化为实际光合效率的提升，暗示重度干扰可能引发光系统损伤或代谢失衡[30]。胞间 CO_2 摩尔分数在各处理间的差异则揭示了非气孔限制的存在：尽管气孔导度未显著变化，但重度采线的 CO_2 摩尔分数显著低于轻度采伐组，结合水分利用效率的逆向响应，表明叶肉导度降低可能是主要内源性限制因素[31]。蒸腾速率在轻度采伐时下降则可能源于被动的气孔调节，这种水分保存策略虽提升水分利用效率却牺牲了光合速率[32]。这些结果共同印证了适度采伐的生态合理性，既能通过林隙形成促进光能利用，又可避免高强度的采伐引发红松适应不良[33]。

3.2 采伐强度对树种叶结构性状及叶绿素的影响

植物通过选择不同的响应策略有针对性地改变叶片结构，从而对环境表现出不同的适应性[7]。本研究结果显示：采伐改变了 3 种阔叶树种的各项叶结构性状。阔叶乔木的比叶重反映其资源利用效率与光合能力，高比叶重体现为叶片结构紧密、光合组织密集，适应干旱或强光环境从而提升资源利用效率[34]。本研究中，3 种阔叶树种的比叶重均在轻度采伐时提升最为显著，反映植物对资源分配的优化策略：轻度干扰下光资源增加而胁迫较弱，叶片通过适度增厚提高光能捕获效率[4]；中重度采伐下光照强度虽持续增加，但可能因机械损伤或水分胁迫抑制比叶面积的进一步提升[35]。此外，对照组因冠层郁闭度高、光限制显著，叶片倾向于降低构建成本，符合叶片经济谱理论[36]。从树种角度来看，色木槭的比叶重在重度采伐条件下显著高于水曲柳与紫椴。这可能与色木槭具有更强的光适应能力有关：色木槭在干扰后通过增加叶片厚度及调整结构比例来提升抗逆性[37]，而水曲柳和紫椴因生态策略差异未形成类似响应。

叶干物质质量分数表征碳投资策略，高叶干物质质量分数指示叶片抗逆性强、代谢缓慢，通过增加木质素等结构物质延长寿命，但牺牲生长速率[38]。在各采伐强度下，3 种阔叶树种的叶干物质质量分数从大到小均为色木槭、紫椴、水曲柳，体现出一定的稳定性，这可能是由于色木槭的策略倾向于保守，通过更高的叶干物质增强养分保留能力，从而适应资源贫瘠或扰动强烈的竞争环境[39]；水曲柳作为开拓性树种，低的叶干物质质量分数表明其倾向于快速生长来提升在竞争环境中的适应能力[40]。各树种对采伐的响应也具有差异：在轻度采伐下，水曲柳叶干物质达到峰值，这可能与水曲柳对光照变化较为敏感有关[28]。作为喜光树种，在轻度采伐下水曲柳所处的光照环境得到改善，叶片能够吸收更多的光能进行光合作用，合成更多有机物并储存在叶片中，进而使得叶干物质显著增加[30]。紫椴在轻度采伐下叶干物质质量分数最低。前人研究表明：叶干物质通常与光合速率呈负相关。本研究也发现：紫椴光合速率与水分利用效率在轻度采伐下达到最大，与叶干物质质量量分数呈现负相关，与前人观点一致[41]。在重度采伐下，色木槭与紫椴叶干物质质量分数达最大值，可能源于高强度干扰加剧资源竞争和土壤养分限制，高叶干物质质量分数通过提升组织密度增强对物理损伤的抗性，同时延长叶片寿命以适应资源胁迫[42]。同时，色木槭的光饱和点也在重度采伐强度下达到最大，代表着色木槭通过增加叶组织的机械强度更有效地拦截和利用强光，从而提高对高强度环境胁迫的耐受性[28]。

叶组织密度关联叶片机械强度与光合效率，高叶组织密度通过增厚栅栏组织或细胞密度增加光能捕获率，但可能限制气体交换，体现生长与抗胁迫间的平衡[43]。水曲柳的叶组织密度总是显著低于紫椴和色木槭，与其比叶重、叶干物质质量分数的变化规律保持一致，共同提示水曲柳倾向于快速光合而非增强机械防御的生长策略[44]。紫椴的叶组织密度在轻度采伐时达到峰值，可能作为耐荫树种，适度干扰既缓解竞争又不致暴露于过强光照，使紫椴在光能获取与叶结构稳定间达到最优平衡[17]。徐程扬[45] 研究也发现：紫椴幼苗能在环境光强增加时通过改变冠层结构提升其光截获能力，从冠层结构的角度补充支持了本研究结果。比叶重、叶干物质质量分数与叶组织密度三者共同反映了植物在光合产物分配、环境适应及资源获取-保存策略间的平衡[46]。

叶绿素相对含量的增加是植物为了提高光能捕获效率而做出的适应性调整[47]。不同的采伐强度对各树种的叶绿素相对含量的影响不大，这可能是由于叶绿素作为光合作用的关键色素，其相对含量受到多种因素的共同调控。在采伐过程中，虽然光照、温度、水分等环境因子会发生变化，但这些变化可能并未达到足以显著影响叶绿素合成的阈值[48]。

4　结论

本研究检验了不同采伐强度对吉林蛟河 4 种主要树种叶光合特性、叶结构性状以及叶绿素相对含量的影响。主要结论如下：①采伐改善了 3 种阔叶树种的光合能力，色木槭、水曲柳、紫椴分别在重度、中度、轻度采伐强度下碳同化能力最强，采伐普遍提升了 3 种阔叶树种的比叶重、叶干物质质量分数和叶组织密度。②红松的光合能力随采伐强度增加而下降，叶结构性状不随采伐强度增加而变化，体现出红松针叶适应环境变化的保守策略。③紫椴与水曲柳通过提升光饱和点来适应中低强度的采伐，体现出这 2 个树种对于强光的捕获潜能。④采伐强度对各树种叶绿素相对含量、暗呼吸速率影响不显著。总体而言，中低强度的采伐可促进针阔混交林中阔叶树种的光合能力及资源配置效率，但高强度的采伐会造成红松适应不良。

5　参考文献

[1] 朱教君, 张秋良, 王安志, 等. 东北地区森林生态系统质量与功能提升对策建议[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022(5): 41−48. ZHU Jiaojun, ZHANG Qiuliang, WANG Anzhi, *et al*. Suggestions for improving the qualities and functions of forest ecosystems in Northeast China[J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2022(5): 41−48. DOI: 10.12356/j.2096-8884.2022-0052.

[2] 鲁君悦, 吴兆飞, 张春雨, 等. 吉林蛟河针阔混交林林层结构对生产力的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(5): 2024−2032. LU Junyue, WU Zhaofei, ZHANG Chunyu, *et al*. Influence of forest strate structure on productivity of coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohe, Jilin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(5): 2024−2032. DOI: 10.5846/stxb202005131220.

[3] 郝珉辉, 李晓宇, 夏梦洁, 等. 抚育采伐对蛟河次生针阔混交林功能结构和谱系结构的影响[J]. 林业科学, 2018, **54**(5): 1−9. HAO Minhui, LI Xiaoyu, XIA Mengjie, *et al*. Effects of tending felling on functional and phylogenetic structures in a multi-species temperate secondary forest at Jiaohe in Jilin Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(5): 1−9. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20180501.

[4] 耿燕, 赵秀海, 安黎哲. 阔叶红松林乔木地上碳储量和碳增量对采伐强度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2022, **44**(10): 23−32. GENG Yan, ZHAO Xiuhai, AN Lizhe. Responses of tree aboveground carbon storage and carbon increment to logging intensity in a broadleaved Korean pine forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, **44**(10): 23−32. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20220403.

[5] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(2): 206−216. WANG Changshun, WANG Shiping. A review of research on responses of leaf traits to climate change[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(2): 206−216. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0020.

[6] JONES H. Stomatal control of photosynthesis and transpiration[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, **49**(Spec): 387−398. DOI: 10.1093/jxb/49.Special_Issue.387.

[7] 李昕蓉, 彭明俊, 彭明春, 等. 半湿润常绿阔叶林叶功能性状对环境梯度的响应及群落构建特征[J]. 生态学杂志, 2025, **44**(7): 2174−2084. LI Xinrong, PENG Mingjun, PENG Mingchun, *et al*. Leaf functional traits response to environmental gradients and community assembly characteristics in semi-humid evergreen broad-leaved forests[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, **44**(7): 2174−2084. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202507.025.

[8] 刘阳, 许丽颖, 魏统超, 等. 4 种槭树叶功能性状及其关系对季节变化的响应[J]. 植物研究, 2023, **43**(2): 242−250. LIU Yang, XU Liying, WEI Tongchao, *et al*. Response of leaf functional traits and their relationships to seasonal changes in four *Acer* species[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2023, **43**(2): 242−250. DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2023.02.009.

[9] 崔晓阳, 宋金凤, 张艳华. 不同土壤水势条件下水曲柳幼苗的光合作用特征[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(6): 794−802. CUI Xiaoyang, SONG Jinfeng, ZHANG Yanhua. Some photosynthetic characteristics of *Fraxinus mandshurica* seedlings grown under different soil water potentials[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, **28**(6): 794−802. DOI: 10.3321/j.issn:1005-264X.2004.06.008.

[10] 郝珉辉, 张忠辉, 赵珊珊, 等. 吉林蛟河针阔混交林树木生长与生境的关联性[J]. 生态学报, 2017, **37**(10): 3437−3444. HAO Minhui, ZHANG Zhonghui, ZHAO Shanshan, *et al*. Habitat associations of tree growth in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(10): 3437−3444. DOI: 10.5846/stxb201603030376.

[11] 岳庆敏, 何怀江, 张春雨, 等. 阔叶红松林林木与林分生长对采伐干扰的响应[J]. 生态学报, 2024, **44**(5): 2019−2028. YUE Qingmin, HE Huaijiang, ZHANG Chunyu, *et al*. Responses of tree growth and stand productivity to harvesting disturbance in Korean pine-broadleaved forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(5): 2019−2028. DOI: 10.20103/j.stxb.202305151018.

[12] 巫志龙, 周成军, 周新年, 等. 采伐强度对杉阔混交人工林细根生物量及形态特征影响[J]. 林业科学研究, 2021, **34**(4): 128−133. WU Zhilong, ZHOU Chengjun, ZHOU Xinnian, *et al*. Effects of harvesting intensity on fine root biomass and morphological characteristics of mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees[J]. *Forest Research*, 2021, **34**(4): 128−133. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.015.

[13] 米爽, 宋子龙, 秦江环, 等. 抚育采伐对吉林蛟河针阔混交林幼苗更新的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, **41**(5): 159−169. MI Shuang, SONG Zilong, QIN Jianghuan, *et al*. Effects of tending thinning on seedling regeneration in a mixed conifer-broadleaf forest in Jiaohe, Jilin Province of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, **41**(5): 159−169. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20190021.

[14] HE Zhibin, CHEN Longfei, DU Jun, *et al*. Responses of soil organic carbon, soil respiration, and associated soil properties to long-term thinning in a semiarid spruce plantation in northwestern China[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(12): 4387−4396. DOI: 10.1002/ldr.3196.

[15] CACHINERO-VIVAR A M, NAVARRO-CERRILLO R M, CABRERA-PUERTO R J, *et al*. Impact of thinning on leaf economics, plant hydraulics, and growth dynamics[J]. *Forest Ecology and Management*, 2024, **562**: 121914. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.121914.

[16] 兰倩, 陈绍志, 李婷婷. 采伐对森林发展的影响[J]. 林业科技通讯, 2024(1): 11−16. LAN Qian, CHEN Shaozhi, LI Tingting. Effects of logging on forest development[J]. *Forest Science and Technology*, 2024(1): 11−16. DOI: 10.13456/j.cnki.lykt.2023.11.30.0002.

[17] 何怀江, 张忠辉, 张春雨, 等. 采伐强度对东北针阔混交林林分生长和物种多样性的短期影响[J]. 林业科学, 2019, **55**(2): 1−12. HE Huaijiang, ZHANG Zhonghui, ZHANG Chunyu, *et al*. Short-term effects of thinning intensity on stand growth and species diversity of mixed coniferous and broad-leaved forest in northeastern China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(2): 1−12. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20190201.

[18] 刘晨, 张春雨, 赵秀海. 采伐干扰对吉林蛟河针阔混交林生产力稳定性的影响[J]. 林业科学, 2022, **58**(3): 1−9. LIU Chen, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai. Effects of disturtance by thinning on productivity stability of conifer-broadleaf mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, **58**(3): 1−9. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20220301.

[19] 黄一鑫, 程艳霞. 森林光环境对 4 种乔木幼树光合和光谱反射特性的影响[J]. 生态学报, 2022, **42**(22): 9121−9129. HUANG Yixin, CHENG Yanxia. Photosynthetic characteristics and spectral reflectance characteristics of four natural tree saplings under forest light environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9121−9129. DOI: 10.5846/stxb202105171289.

[20] 冯浩育, 陈思帆, 索奥丽, 等. 不同火烈度下山西太岳山油松林灌木层物种多样性和叶功能性状[J]. 北京林业大学学报, 2024, **46**(6): 38−47. FENG Haoyu, CHEN Sifan, SUO Aoli, *et al*. Species diversity and leaf functional traits of shrub layer in *Pinus tabuliformis* forest under different fire intensities in Taiyue Mountain, Shanxi Province of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, **46**(6): 38−47. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20230324.

[21] 何怀江. 采伐干扰对吉林蛟河针阔混交林碳储量和碳平衡的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2018. HE Huaijiang. *Effects of Thinning Disturbance on Carbon Storage and Carbon Balance in Coniferous and Broad-leaved Mixed Forest in Jiaohe, Jilin Province*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2018.000096.

[22] 陈涵, 郭弘婷, 陈睿, 等. 杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应[J]. 生态学报, 2023, **43**(24): 10274−10284. CHEN Han, GUO Hongting, CHEN Rui, *et al*. Understory plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations and its short-term environmental response to different thinning intensities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(24): 10274−10284. DOI: 10.20103/j.stxb.202306031177.

[23] JIANG Hangjin, SU Jinghan, REN Zirong, *et al*. Dual function of overexpressing plasma membrane H(+)-ATPase in balancing carbon-water use[J]. *Science Advances*, 2024, **10**(45): eadp8017. DOI: 10.1126/sciadv.adp8017.

[24] 管惠文, 董希斌. 间伐强度对落叶松次生林冠层结构和林内光环境的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, **40**(10): 13−23. GUAN Huiwen, DONG Xibin. Influence of thinning intensity on canopy structure and light environment inside *Larix*

gmelinii secondary forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(10): 13−23. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180021.

[25] 孔鑫, 王爱英, 郝广友, 等. 水曲柳幼苗水力结构和光合生理对光强梯度变化的耦合响应[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, **47**(1): 83−91. KONG Xin, WANG Aiying, HAO Guangyou, *et al*. Coordinated responses of hydraulic architecture and photosynthetic characteristics in *Fraxinus mandschurica* seedlings to change of light intensity irradiance[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Sciences Edition*), 2023, **47**(1): 83−91. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202106018.

[26] 徐程扬, 翟明普. 紫椴幼苗的叶片运动与光截获[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(4): 488−493. XU Chengyang, ZHAI Mingpu. Leaf movement and sunlight interception of *Tilia amurensis* seedlings[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, **25**(4): 488−493. DOI: 10.3321/j.issn:1005-264X.2001.04.018.

[27] 王宣璎, 张翼, 范秀华. 东北阔叶红松林 4 种树木幼苗光合荧光特征对氮添加的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, **46**(3): 69−79. WANG Xuanying, ZHANG Yi, FAN Xiuhua. Response of photosynthetic and fluorescence characteristics to nitrogen addition by seedlings of four dominant tree species in broadleaved-Korean pine forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, **46**(3): 69−79. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20220488.

[28] 陈巧玲, 王俪玢, 程艳霞. 采伐强度对红松天然、人工移植幼苗光合生理特性影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, **44**(9): 21−29. CHEN Qiaoling, WANG Lifen, CHENG Yanxia. Effects of cutting intensity on photosynthetic physiological characteristics of natural and transplanted *Pinus koraiensis* seedlings[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, **44**(9): 21−29. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20210088.

[29] 胡乘风, 陈巧玲, 乔雪涛, 等. 阔叶红松林主要树种光合与光谱反射特性及初级生产力研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(5): 12−24. HU Chengfeng, CHEN Qiaoling, QIAO Xuetao, *et al*. Photosynthetic, spectral reflectance characteristics and primary productivity of main tree species in broadleaved Korean pine forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(5): 12−24. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20190364.

[30] 董潇潇, 靳红磊, 王宏斌. 植物光系统高光适应机制研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, **52**(11): 1725−1732. DONG Xiaoxiao, JIN Honglei, WANG Hongbin. Research progress on adaptive mechanisms of photosystem to highlight in plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, **52**(11): 1725−1732. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2016.1014.

[31] 邢红爽, 乌佳美, 陈健, 等. 植物光合作用限制因素与植被生产力研究进展[J]. 生态学报, 2023, **43**(12): 5186−5199. XING Hongshuang, WU Jiamei, CHEN Jian, *et al*. Research progress on limiting factors of plant photosynthesis and vegetation productivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(12): 5186−5199. DOI: 10.5846/stxb202203290780.

[32] 项文化, 田大伦, 闫文德, 等. 白栎光合特性对二氧化碳浓度增加和温度升高的响应[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21**(3): 247−253. XIANG Wenhua, TIAN Dalun, YAN Wende, *et al*. Photosynthetic responses of *Quercus fabri* leaves to increase in CO_2 concentration and temperature[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2004, **21**(3): 247−253. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2004.03.003.

[33] 张海军, 张淑兰, 王长宝. 小兴安岭红松种群天然更新及影响因子的探讨[J]. 林业资源管理, 2015(2): 150−153. ZHANG Haijun, ZHANG Shulan, WANG Changbao. The natural regeneration and its impact factors of Korean pine population in Xiaoxing' anling Mountain[J]. *Forest Resources Management*, 2015(2): 150−153. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2015.02.027.

[34] 冯秋红, 史作民, 董莉莉, 等. 南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应[J]. 生态学报, 2010, **30**(21): 5781−5789. FENG Qiuhong, SHI Zuomin, DONG Lili, *et al*. The response of functional traits of *Quercus* species to meteorological factors in temperate zone of NSTEC[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(21): 5781−5789. DOI: 10.20103/j.stxb.2010.21.008.

[35] FAGÚNDEZ J, SÁNCHEZ A. High variability and multiple trade-offs in reproduction and growth of the invasive grass *Cortaderia selloana* after cutting[J]. *Weed Research*, 2024, **64**(3): 251−260. DOI: 10.1111/wre.12631.

[36] 陈晓萍. 亚热带常绿阔叶林木本植物冠层尺度叶功能性状对碳代谢温度响应特征的调节[D]. 福州: 福建师范大学, 2022. CHEN Xiaoping. *Regulation of Leaf Functional Traits on Carbon Metabolism-temperature Response at Canopy Scale in a Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest*[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2022. DOI: 10.27019/d.cnki.gfjsu.2022.000067.

[37] 谢立红, 黄庆阳, 曹宏杰, 等. 五大连池火山色木槭叶功能性状特征[J]. 生物多样性, 2019, **27**(3): 286−296. XIE Lihong,

HUANG Qingyang, CAO Hongjie, *et al*. Leaf functional traits of *Acer mono* in Wudalianchi Volcano, China[J]. *Biodiversity Science*, 2019, **27**(3): 286−296. DOI: 10.17520/biods.2018300.

[38] ALI A M, DARVISHZADEH R, SHAHI K R, *et al*. Validating the predictive power of statistical models in retrieving leaf dry matter content of a coastal wetland from a Sentinel-2 image[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(16): 1936. DOI: 10.3390/rs11161936.

[39] FRESCHET G T, CORNELISSEN J H C, van LOGTESTIJN R S P, *et al*. Evidence of the “plant economics spectrum” in a subarctic flora[J]. *Journal of Ecology*, 2010, **98**(2): 362−373. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01615.x.

[40] 巢林, 欧梦菲, 陈健, 等. 喀斯特 11 种典型生态恢复树种凋落叶分解及其对土壤碳排放的激发效应[J]. 生态学报, 2024, **44**(8): 3397−3407. CHAO Lin, OU Mengfei, CHEN Jian, *et al*. Leaf litter decomposition and its priming effect of eleven typical ecological restoration tree species in the karst area of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(8): 3397−3407. DOI: 10.20103/j.stxb.202307291630.

[41] 韩多红, 周德峰, 孟好军, 等. 河西走廊干旱荒漠区 9 个梨品种光合特性的比较研究[J]. 西部林业科学, 2020, **49**(3): 36−40. HAN Duohong, ZHOU Defeng, MENG Haojun, *et al*. Comparative study on photosynthetic characteristics of 9 pear varieties in arid desert area of Hexi Corridor[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, **49**(3): 36−40. DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2020.03.006.

[42] KIM S, HAN S H, LEE J, *et al*. Impact of thinning on carbon storage of dead organic matter across larch and oak stands in South Korea[J]. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2016, **9**(4): 593−598. DOI: 10.3832/ifor1776-008.

[43] 钟巧连, 刘立斌, 许鑫, 等. 黔中喀斯特木本植物功能性状变异及其适应策略[J]. 植物生态学报, 2018, **42**(5): 562−572. ZHONG Qiaolian, LIU Libin, XU Xin, *et al*. Variations of plant functional traits and adaptive strategy of woody species in a karst forest of Central Guizhou Province, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, **42**(5): 562−572. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0270.

[44] 夏梦洁, 王晓霞, 郝珉辉, 等. 吉林蛟河针阔混交林功能性状分布格局及其对地形因素的响应[J]. 生态学报, 2021, **41**(7): 2794−2802. XIA Mengjie, WANG Xiaoxia, HAO Minhui, *et al*. Distribution pattern of functional traits and its response to topographic factors in a conifer and broad-leaved mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(7): 2794−2802. DOI: 10.5846/stxb202006051462.

[45] 徐程扬. 不同光环境下紫椴幼树树冠结构的可塑性响应[J]. 应用生态学报, 2001, **12**(3): 339−343. XU Chengyang. Response of structural plasticity of *Tilia amurensis* sapling crowns to different light conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(3): 339−343. DOI: 10.3321/j.issn:1001-9332.2001.03.005.

[46] 卫舒平. 华北落叶松天然更新对抚育间伐的响应及环境解释[D]. 太谷: 山西农业大学, 2023. WEI Shuping. *Response of Natural Regeneration of Larix principis-rupprechtii to Tending and Thinning and Its Environmental Explanation*[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023. DOI: 10.27285/d.cnki.gsxnu.2023.000126.

[47] 淑婷, 程艳霞, 封昕怡, 等. 吉林蛟河针阔混交林主要阔叶树种叶性状对冠层垂直高度变化的响应[J]. 安徽农业大学学报, 2025, **52**(1): 9−15. SHU Ting, CHENG Yanxia, FENG Xinyi, *et al*. Response of leaf trait of dominant broad-leaved tree species to canopy vertical height changes in coniferous and broadleaved mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2025, **52**(1): 9−15. DOI: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20250320.003.

[48] 黄键, 王德新, 杨松, 等. 氮磷叶面喷施对云南松苗木叶绿素含量及其异速生长关系的影响[J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, **43**(3): 33−41. HUANG Jian, WANG Dexin, YANG Song, *et al*. Effect on chlorophyll content and allometric growth relationship of *Pinus yunnanensis* seedlings by foliar spraying of nitrogen and phosphorus[J]. *Journal of Southwest Forestry University* (*Natural Sciences*), 2023, **43**(3): 33−41. DOI: 10.11929/j.swfu.202209014.