北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

混交模式对杉木木荷混交林三维光分布的影响：LESS模拟

袁璨 侯丹凌 余世有 杨亿 漆建波 陈玲

Effects of mixing patterns on three-dimensional light distribution in Chinese fir-*Schima superba* mixed forests: LESS simulation

Yuan Can, Hou Danling, Yu Shiyou, Yang Yi, Qi Jianbo, Chen Ling

引用本文:
袁璨, 侯丹凌, 余世有, 杨亿, 漆建波, 陈玲. 混交模式对杉木木荷混交林三维光分布的影响：LESS模拟[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3):100–112. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250513
Yuan Can, Hou Danling, Yu Shiyou, Yang Yi, Qi Jianbo, Chen Ling. Effects of mixing patterns on three–dimensional light distribution in Chinese fir–*Schima superba* mixed forests: LESS simulation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):100–112. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250513

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250513

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同混交模式对杉木人工林叶功能性状的影响

Effects of different mixed patterns on the functional traits of leaves in *Cunninghumia lanceolata* plantation

北京林业大学学报, 2025, 47(12): 97–108. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250189

温带云冷杉混交林凋落物养分的空间分布特征

Spatial distribution characteristics of litter nutrients in temperate spruce–fir mixed forests

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 73–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200065

基于Ripley *L*函数的云冷杉针阔混交林优势树种幼树的空间格局分析

Spatial pattern analysis of dominant tree species saplings in spruce–fir coniferous and broadleaved mixed forests based on Ripley *L* function

北京林业大学学报, 2024, 46(10): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230237

微地形对云冷杉阔叶混交林土壤有机碳和全氮的影响

Effects of micro–topography on soil organic carbon and total nitrogen in mixed spruce–fir–broadleaf forest

北京林业大学学报, 2022, 44(8): 88–97. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210237

长白山云冷杉林林隙冠层特征及与幼苗幼树的关系

Canopy characteristics in gaps and its relationship with seedlings and saplings in a spruce–fir forest in the Changbai Mountain area of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 54–62. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200131

长白山天然云冷杉针阔混交林主要树种胸径生长与林分空间结构的关系

Relationship between stand spatial structure and DBH increment of principal species in natural spruce–fir mixed forest in Changbai Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2022, 44(9): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210280

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250513

混交模式对杉木−木荷混交林三维光分布的影响: LESS 模拟

袁 璨[1] 侯丹凌[1] 余世有[2] 杨 亿[1] 漆建波[3] 陈 玲[1]
(1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 2. 国家林业和草原局华东调查规划院, 浙江 杭州 310019;
3. 北京师范大学遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100875)

摘要:【目的】长期纯林经营导致杉木人工林土壤肥力和林分生产力下降, 混交改造是提升林分质量的关键措施。然而, 混交模式对冠层光截获能力及空间异质性的定量影响机制尚不明确。本研究基于三维辐射传输模型 LESS(可精确模拟光辐射在冠层内的传输过程), 旨在解析混交林三维空间光分布规律, 为杉木人工林光环境优化配置提供科学依据。**【方法】**基于 LESS 模型, 构建 4 种混交格局(株间混交、行带混交、块状混交和不规则混交)和 5 种混交比例(杉木比例 50%～90%)的杉木−木荷混交林三维场景, 并以纯杉木林为对照, 定量模拟与分析不同混交模式下林分冠层光截获特征、水平与垂直方向的光空间分布特征, 以探究杉木−木荷混交林的三维空间光分布规律。**【结果】**(1)混交比例与混交格局共同影响林分冠层光截获能力。随杉木占比从 50% 升至 90%, 整体的光合有效辐射吸收比例(FPAR)均值由 0.748 降至 0.624, 下降 16.6%; 株间混交的整体光截获能力相对较高。(2)杉木与木荷的光竞争呈明显不对称性, 杉木在行带和块状混交中光获取优势显著, 而木荷在株间与不规则混交格局中更易维持较高的 FPAR 水平。(3)林分光分布表现出明显的空间异质性。水平方向上, 杉木比例为 50% 时光环境异质性最高, 随杉木比例升高逐渐趋于均匀; 垂直方向上, FPAR 峰值主要在 12～14 m 的主冠层。在混交场景中, 杉木比例为 80% 时垂直光分布最为均匀。**【结论】**本研究定量解析了杉木−木荷混交林的三维空间光分布规律, 表明混交比例与混交格局共同调控冠层光截获能力与空间异质性, 为杉木人工林光环境混交改造的空间配置优化与森林质量精准提升提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 杉木−木荷混交林; 非对称光截获; 光合有效辐射吸收比例 (FPAR); 三维空间异质性; 三维辐射传输模型 LESS; 冠层光分布模拟; 人工林质量精准提升
中图分类号: S725.2; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000−1522(2026)03−0100−13
引文格式: 袁璨, 侯丹凌, 余世有, 等. 混交模式对杉木−木荷混交林三维光分布的影响: LESS 模拟 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3): 100−112. Yuan Can, Hou Danling, Yu Shiyou, et al. Effects of mixing patterns on three-dimensional light distribution in Chinese fir-*Schima superba* mixed forests: LESS simulation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 100−112.

Effects of mixing patterns on three-dimensional light distribution in Chinese fir-*Schima superba* mixed forests: LESS simulation

Yuan Can[1] Hou Danling[1] Yu Shiyou[2] Yang Yi[1] Qi Jianbo[3] Chen Ling[1]
(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. East China Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, Zhejiang, China;
3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science and Digital Earth, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [**Objective**] Long-term monoculture management of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)

收稿日期: 2025−12−19 **修回日期:** 2026−01−29
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42371345)。
第一作者: 袁璨。主要研究方向: 林业遥感。Email: silviamacara@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 陈玲, 副教授。主要研究方向: 林业遥感。Email: chenling_2012@bjfu.edu.cn 地址: 同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

plantations has led to declines in soil fertility and stand productivity. Mixed-species conversion is a key strategy for improving stand quality, yet the quantitative mechanisms by which mixing patterns influence canopy light interception capacity and spatial heterogeneity remain unclear. This study employed the three-dimensional (3D) radiative transfer model LESS (LargE-Scale remote sensing data and image Simulation framework), which accurately simulates light radiation transfer within forest canopies, to elucidate the 3D light distribution patterns in mixed forests and provide a scientific basis for optimizing light environments in Chinese fir plantations. [**Method**] Using the LESS model, we constructed 3D scenes of Chinese fir-*Schima superba* mixed forests under four mixing patterns (individual-tree mixing, row-strip mixing, block mixing, and irregular mixing) and five mixing ratios (Chinese fir proportions ranging from 50% to 90%), with pure Chinese fir stands as the control. We quantitatively simulated and analyzed overall canopy light interception characteristics, as well as horizontal and vertical spatial light distribution patterns, to investigate the 3D light distribution dynamics in these mixed stands. [**Result**] (1) Both mixing ratio and mixing pattern jointly influenced canopy light interception. The mean of overall FPAR (Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation) decreased from 0.748 to 0.624 (a 16.6% reduction) as the Chinese fir proportion increased from 50% to 90%. Among the patterns, individual-tree mixing exhibited relatively higher overall light interception capacity. (2) Light competition between Chinese fir and *Schima superba* was markedly asymmetric. Chinese fir showed significant light acquisition advantages in row-strip and block mixing patterns, whereas *Schima superba* maintained higher FPAR levels more effectively under individual-tree and irregular mixing patterns. (3) Light distribution exhibited pronounced spatial heterogeneity. Horizontally, light environment heterogeneity peaked at 50% Chinese fir proportion and gradually became more uniform as the proportion increased. Vertically, FPAR maxima primarily occurred in the main canopy layer at 12−14 m; among mixed scenarios, the most uniform vertical light distribution was observed at 80% Chinese fir proportion. [**Conclusion**] This study quantitatively deciphered the 3D light distribution patterns in Chinese fir-*Schima superba* mixed forests, demonstrating that mixing ratio and pattern jointly regulate canopy light interception and spatial heterogeneity. These findings provide theoretical foundations and technical support for optimizing spatial configurations in light-environment-oriented mixed-species conversion and enabling precision enhancement of forest quality in Chinese fir plantations.

Key words: Chinese fir-*Schima superba* mixed plantation; asymmetric light capture; Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR); 3D spatial heterogeneity; 3D radiative transfer model LESS; canopy light distribution simulation; precision enhancement of plantation quality

杉木（*Cunninghamia lanceolata*）是中国南方重要的速生丰产针叶树种，具有显著的生态、经济与社会价值。其生长迅速、木材质地优良，常用于建筑、家具制造等领域，商品材供给量约占全国商业用材的四分之一[1]。与此同时，杉木具有较高的碳储存与固碳潜力，是提升森林碳汇能力的关键树种[2]。然而，杉木针叶养分含量低、分解速度慢，多代连栽易造成土壤肥力及生产力下降，生态环境恶化，严重制约了杉木林地的可持续经营[3−4]。相比之下，合理配置的混交林因种间生态位错位所引起的个体间差异，可实现资源互补，进而提升立地利用率和林分生产力[5]，可有效解决杉木多代连栽导致的一系列问题。在众多混交树种中，木荷（*Schima superba*）适应性强、耐贫瘠酸性土壤，根系发达，与杉木在光、根系等生态位上错位互补，是常被用于与杉木混交的树种[6]。随着大量成熟杉木林被砍伐，中国杉木人工林呈现中幼龄化、破碎化，并伴随蓄积量与生产力下降的趋势，整体质量亟需提升。在此背景下，开展杉木人工林混交改造与经营优化研究，明确混交林树种组成与空间配置的合理策略尤为迫切[7]。

在影响植被生长的众多因素中，太阳光作为光合作用的主要驱动力，在调控森林发育和树木生长方面发挥重要作用。光照条件不仅直接影响杉木和木荷幼苗的形态建成与生长速度，还影响林分内资源分配格局[8−9]。林芳馨等[10]在不同林内光环境差异条件下，探索杉木与林下植被之间根系竞争的相互作用，并从光环境变化这一视角出发，阐明了杉木人工林初始种植密度对林分内部物种间竞争关系的影响。自然环境中，种内和种间的光竞争较为激烈，而合理的混交格局和混交比例的杉木−木荷混交林能

够充分利用林分内光、水、肥等资源，加快成林速度，提高林分生产力，改善生态小环境，维持生态系统稳定[11−12]。然而，林分光环境并非均匀分布，而是受树种组成、冠层结构及空间配置方式共同作用，呈现显著的垂直与水平异质性；在混交林中，不同树种在高度、冠幅与空间占据方式上的差异进一步使光的传输、截获与吸收过程更加复杂。因此，需要在三维空间尺度上对林分光环境进行定量刻画，并引入可比较的量化指标来表征冠层对光资源的利用状况。

光合有效辐射吸收比例（Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation, FPAR）是指植被因光合作用吸收的光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation, PAR）占到达植被冠层的 PAR 的比例，能够直接反映植被冠层对光能的截获和吸收能力，是开展三维光环境分析的关键参数之一[13]。目前，FPAR 的获取方法可分为地面实测和遥感估算两大类[14]。其中地面实测主要通过 SunScan、AccuPAR 等专业仪器直接测量植被冠层 FPAR，但由于其空间代表性有限，且设备昂贵，实际应用受限[15]。遥感估算方法通过遥感图像来估算 FPAR，突破了这些局限，是进行大范围和长时序 FPAR 反演的主要手段[16]。目前，基于辐射传输模型的物理反演方法是生产多数 FPAR 产品的主要方法。其中，三维辐射传输模型 LESS（LargE-Scale remote sensing data and image Simulation framework）通过三角面片构建三维真实场景，利用前向光线追踪技术，能够精确模拟光辐射在冠层内的传输过程，克服传统简化模型带来的误差[17]。尽管遥感技术在 FPAR 反演中的应用已较为成熟，但现有研究多停留在冠层整体尺度，对于杉阔混交林内三维空间光分布特征的研究仍相对匮乏。

因此，本研究基于三维辐射传输模型 LESS，构建杉木−木荷混交林三维场景，定量分析混交格局及混交比例对三维空间光分布的影响。本研究旨在为精细化理解林分内光空间分布情况提供依据，从而探究混交模式对林地生产力的影响，并为现实杉木纯林混交改造经营中混交格局及混交比例的设置提供理论支持，不仅对杉木人工林的经营和构建具有重要的指导意义，还对我国杉木人工林质量精准提升有着积极的推动作用。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于福建省三明市将乐县国有林场，林场地处福建省西部，武夷山脉东南，三明市境内，属典型的低山丘陵地貌，土壤以红壤和黄红壤为主。该区域属亚热带季风气候，年平均气温为 19.8 ℃，无霜期 287 d。将乐县地势呈西北—东南高，中部低的盆谷格局[18]，该地区森林生态系统保持良好，植被类型丰富多样，主要呈现亚热带常绿阔叶林特征，截至 2022 年，森林覆盖率为 81.2%[19]。2024 年 8 月，于福建省将乐国有林场（26°45′N，117°23′E）开展野外样地调查，林场常见乔木有杉木、木荷、火力楠（*Michelia macclurei*）、马尾松（*Pinus massoniana*）、枫香（*Liquidambar formosana*）等。在杉木针阔混交林中，布设 1 个以木荷为主要混交树种的 30 m × 30 m 典型样地，样地坡向以东向为主，其次为东北向，平均坡度 19°，为近熟龄杉木人工林，林分郁闭度 0.85，该样地共包含 102 株单木，其中杉木 67 株，木荷 22 株，其他伴生树种 13 株。

1.2 数据来源

1.2.1 激光雷达数据

2024 年 8 月，使用飞马 SLAM100 手持激光雷达扫描仪对样地进行三维点云数据采集，扫描采用之字形往返并闭合的路线，以保证单木点云获取的完整性。原始数据经点云解算获得样地点云及轨迹数据后，使用 LiDAR360 软件（https://www.lidar360.com/LiDAR360）进行预处理：采用统计滤波法对点云数据进行去噪处理，利用改进的渐进三角网加密滤波算法进行地面点分类，再对地面进行归一化处理，将点云高度基准统一到地面。利用地基林业模块的 TLS 种子点编辑生成单木种子点，将其与 RTK 实测坐标进行空间匹配与手动校准，以提高种子点定位的可靠性，接着进行基于种子点的单木分割，得到杉木、木荷点云胸径、冠幅和枝下高等数据。

考虑到手持激光雷达受观测视角与冠层遮挡影响，树冠上层点云密度偏低，难以稳定提取树高、树冠面积/体积及叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）等对冠层空间信息敏感的参数[20]，本研究补充使用同期获取的机载激光雷达数据完成上述参数提取。机载数据由奥地利 RIEGL 公司生产的 LMS-Q680i 激光测量系统采集完成，机载点云在 LiDAR360 中完成预处理后，生成数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）与数字表面模型（Digital Surface Model, DSM），并通过 DSM 与 DEM 的高程差值运算输出冠层高度模型（Canopy Height Model, CHM），采用基于 CHM 探测树顶位置的方法进行单木分割，提取树高、树冠面积和树冠体积等参数；利用林业群体参数功能，提取出单木的 LAI 值。

1.2.2 植被组分光谱

选取生长状况良好、无明显病虫害和机械损伤的个体作为样本，使用 ASD 光谱仪 FieldSpec®4Hi-ResNG 对杉木和木荷的成熟健康叶片及树皮进行光

谱特性测定。获取反射率光谱后，对数据进行预处理，利用 PROSPECT 叶片辐射传输模型[21]反演叶片结构与光学相关参数，进而进行前向模拟获得叶片透过率光谱，光谱数据如图 1 所示。

2　研究方法

2.1　单木模型构建

单木是森林生态系统的基本结构单元，其模型直接影响森林场景的真实性和生态模拟的准确性。精确的树木模型能够捕捉树木形态、树冠及叶片的细节，使场景更加真实，从而更准确地反映冠层光截获能力、碳汇功能等生态过程[22]。尽管单木之间存在差异，但同一树种的个体在形态结构上具有显著的相似性。为简化样地三维场景的构建过程，本研究使用典型单木模型代表样地内同树种单木，以减少模型数量和纹理变化，从而降低渲染与计算的负担。

OnyxTREE 软件（https://www.onyxtree.com/）采用参数化建模技术构建高精度单木模型，其核心是通过调节树木形态结构参数（如高度、分枝曲率、叶片密度等）生成植物模型，并支持多种输出格式，如 BRO、CON、BMP、TGA、OBJ、3DS 等标准格式，可满足科研对三维结构分析的需求。OnyxTREE 软件的参数化存储极大降低了内存需求，同时支持通过参数调整快速生成形态变体。

由于 OnyxTREE 软件中未包含杉木与木荷的专属模型，因此从模型库中选取与目标树种形态特征最接近的基础模型作为参考。其中，杉木模型基于冷杉属白冷杉（*Abies concolor*）模型构建，木荷模型基于壳斗科沼生栎（*Quercus palustris*）模型构建。将 LiDAR360 提取的树高、冠幅及第一枝下高等关键形态参数的平均值作为初始输入参数，并参考中国植物志（http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200013987）及相关文献中[23–24]关于树体结构参数设定与树种形态特征的研究结果，对模型的树干参数、树枝参数、体积参数和叶片参数进行优化调整，重点考虑分枝角度与枝叶形态等形态学特征，以更准确地反映杉木与木荷的形态特征。完成参数优化后，将单木模型以 OBJ 格式导出，用于后续的三维可视化与模拟分析。

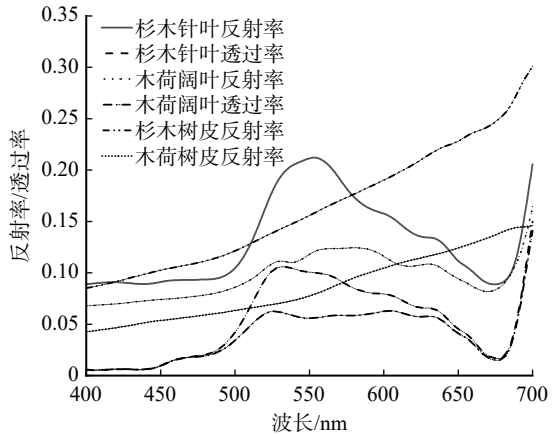


图 1　杉木和木荷光谱曲线

Fig. 1　Spectral curves of Chinese fir and *Schima superba*

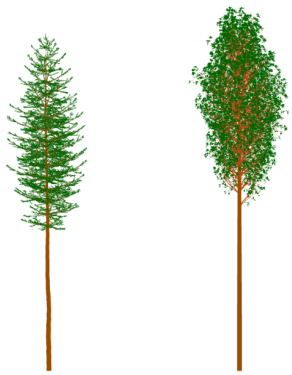
LAI 是描述植被叶片和冠层结构的关键参数，定义为单位地表面积上所有叶片表面积的一半，直接影响模型对光合作用、蒸腾作用以及碳、氮循环等生态过程的模拟精度[25]。在单木建模中，LAI 的数值与冠幅、树冠体积等结构参数共同决定了单木三维模型的结构真实性，是众多生态研究的基础[26]。将构建的单木模型导入 LESS，利用 LESS 计算其树冠体积和 LAI，并通过迭代校正对模型参数进行反复调整，使模型输出的关键结构特征（如树冠体积与 LAI）与样地实测均值趋于一致，从而确保模型在关键结构参数上的真实性，获得符合实际林分结构的杉木和木荷单木模型。单木结构参数如表 1 所示。该过程属于生态模型常用的校准思路，即通过迭代调整参数使模拟输出与实测值尽可能一致[27–28]。

2.2　三维森林场景构建

LESS 模型通过真实结构三维建模与光线追踪技术，可实现高精度森林场景的构建与辐射传输模拟。该模型基于三角面片网格（OBJ 格式）精确构建树木等场景元素的几何模型，并将每个对象（object）进一步细分为叶片、枝干等组分，分别定义其光学属

表 1　单木参数设置

Tab. 1　Parameter settings for individual trees

单木参数	杉木	木荷
胸径/cm	19.1	20.7
树高/m	15.5	16.5
冠幅/m	3.8	4.3
第一枝下高/m	6.8	8.4
叶面积指数（LAI）	5.6	6.1
树冠体积/m^3	55.0	70.6
缩略图		

性。随后采用实例化技术，通过几何变换矩阵将同一对象重复部署到不同位置，无需复制三角面片数据即可实现大规模森林场景的高效构建。在此基础上，设置光照条件和观测几何参数后，通过光线追踪模拟光线与场景的交互过程(包括吸收、反射和透射等物理过程)，输出关键遥感数据。

其中，光照参数通过 LESS 模型的太阳位置计算模块获取。该模块基于输入的时间、经纬度及海拔数据，自动计算太阳天顶角和方位角。这种参数化处理方法确保了光照模拟的时空准确性，为后续辐射传输计算提供了可靠的光照条件输入。具体输入参数见表 2。

为探究杉木–木荷混交林中三维空间光分布特征，本研究设置了混交格局和混交比例两个变量，并以纯林场景作为对照，场景株数设定为 100 株。本研究以杉木人工林针阔混交改造为应用背景，在保持杉木为主要树种的前提下，引入木荷以提升林分生产力。因此，将混交比例限定为杉木株数占总株数的 50% ~ 90%，并以 10% 为间隔设置 5 个梯度。本文中混交比例若无特别标注，均指杉木株数占总株数的百分比。在混交格局设置上，设计了株间混交、行带混交、块状混交和不规则混交 4 种混交格局(图 2)。将 4 种混交格局与 5 种混交比例进行组合

表 2 构建三维森林场景的 LESS 模型输入参数

Tab. 2 Input parameters of the LESS model for constructing a 3D forest scene

参数	详细参数及单位	数值
光照参数	SZA/(°)	24.4
	SAA/(°)	105
场景参数	长/m	30
	宽/m	30
	株数	100
传感器参数	波段范围/nm	400 ~ 700

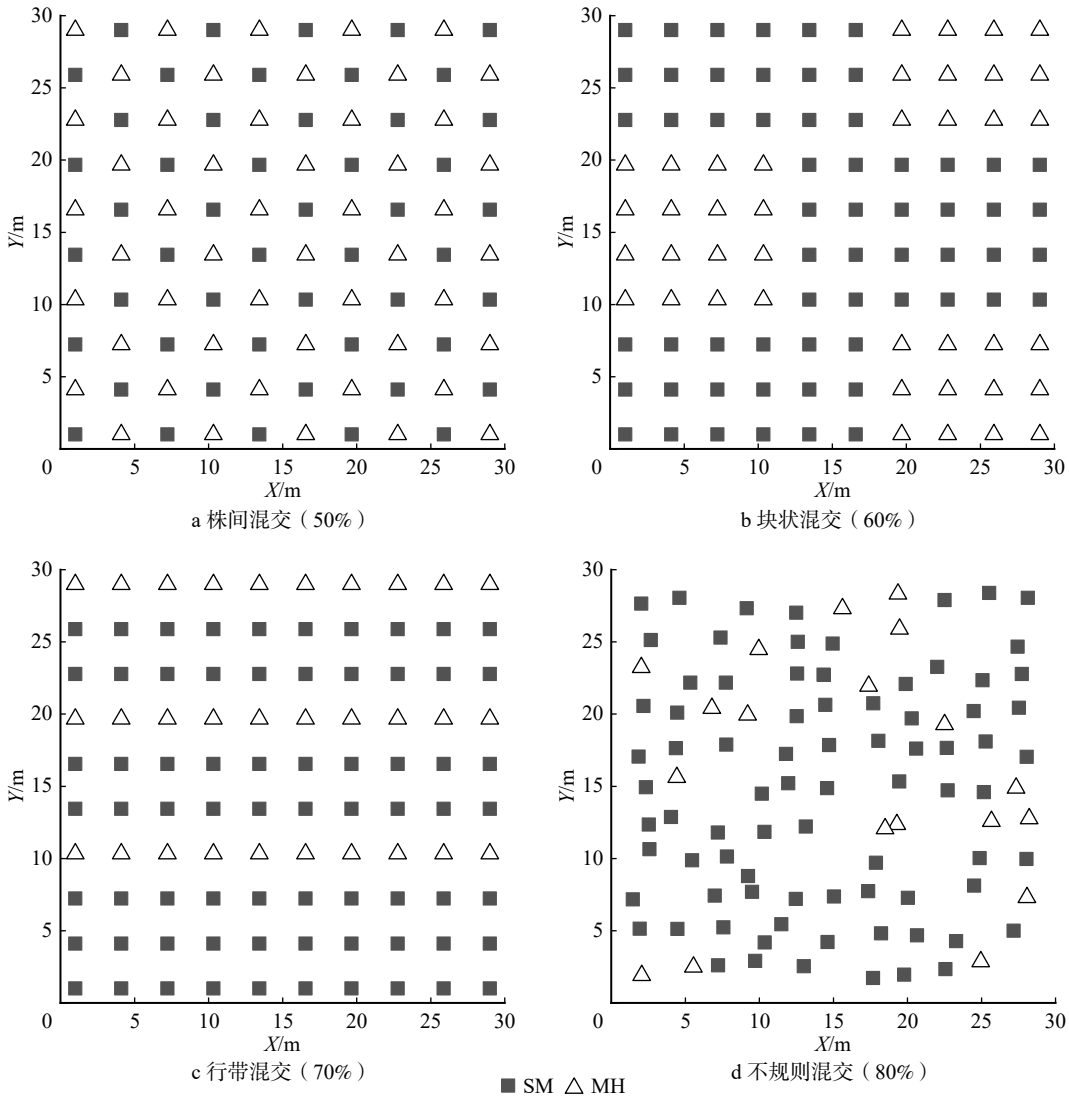


图 2 混交模式示意图(特定混交格局和比例)

Fig. 2 Schematic diagram illustrating the mixing patterns (specific mixing pattern and corresponding proportions)

模拟，共构建 20 个混交场景，加设纯杉木林对照场景，最终构建 21 个三维森林场景，为后续三维空间光分布特征分析提供了系统的实验体系。

2.3　FPAR 的计算与输出

LESS 模型是一种基于光线追踪的三维辐射传输模型，能够模拟入射光在场景中的吸收、反射与透射过程，并输出反射率、反照率及 FPAR 等参数。在 LESS 中，光线追踪根据实现方式分为前向光子追踪与后向路径追踪两类。其中，后向路径追踪主要用于计算传感器辐亮度等观测量，而本研究所需的 FPAR 则通过前向光子追踪实现。前向光子追踪从光源发射光子，并跟踪其在冠层中的多次散射路径，主要考虑太阳直射光与天空散射光的入射。

在前向光子追踪过程中，当光子与场景元素（如叶片）发生碰撞时，可根据叶片的局部光学属性计算该次碰撞的吸收能量。在朗伯假设下，叶片在波长为 λ 处的吸收率可表示为

$$\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda - \tau_\lambda \tag{1}$$

式中：λ为波长，α_λ为叶片的吸收率，ρ_λ为反射率，τ_λ表示透过率。

设光子经历（Q–1）次散射后的剩余能量为 $P^{Q-1}(\lambda)$，其表达式为

$$P^{Q-1}(\lambda) = P^0(\lambda) \cdot \prod_{q=1}^{Q-1} \left(\rho_{q,\lambda} + \tau_{q,\lambda}\right) \tag{2}$$

式中：Q 为当前累计碰撞次数，$P^0(\lambda)$ 为光子在波长 λ 处的初始能量，$\rho_{q,\lambda}$ 和 $\tau_{q,\lambda}$ 分别为光子在第 q 次碰撞表面、波长 λ 处的反射率和透过率。

因此，每个碰撞点记录的吸收能量为

$$\Delta P_{\text{abs}}(\lambda) = (1 - \rho_\lambda - \tau_\lambda) \cdot P^{Q-1}(\lambda) \tag{3}$$

式中：$\Delta P_{\text{abs}}(\lambda)$为光子在第 Q 次碰撞时被叶片吸收的能量。

在此基础上，LESS 可根据光子碰撞点的空间位置与碰撞元素类别，将吸收能量分别累计为不同高度层与不同组分的吸收量，从而获得冠层分层、分组分的吸收能量统计结果[17]。

本研究中，FPAR 的定义分为两类：单株 FPAR 指冠层吸收的 PAR 总量与其冠幅水平投影范围内到达冠层顶参考平面上的入射 PAR 总量之比，分母等价于入射 PAR 通量密度乘以该单株冠幅投影面积；其余尺度的 FPAR 均指该组分吸收的 PAR 占到达整个森林冠层顶参考平面上的入射 PAR 总量之比。

3　结果与分析

3.1　冠层光截获整体特征

从图 3 可知，混交比例和混交格局是影响林分整体 FPAR 的重要因素。不同混交格局的杉木–木荷混交林整体的 FPAR 变化总体趋势相似，均随杉木比例降低而增加，冠层对光的截获和吸收能力增强。当杉木混交比例为 50% 时，林分整体的 FPAR 范围为 0.720 ~ 0.773，均值为 0.748；当混交比例为 90% 时，林分整体的 FPAR 范围为 0.589 ~ 0.637，均值为 0.624，下降约 16.6%。在相同混交比例下，规则混交格局（株间、行带、块状）通常比不规则格局更有利于提高 FPAR，其中株间格局的 FPAR值优势最为明显，在所有混交比例下均保持较高的 FPAR，尤其在杉木低混交比例（50% ~ 70%）时优势显著。

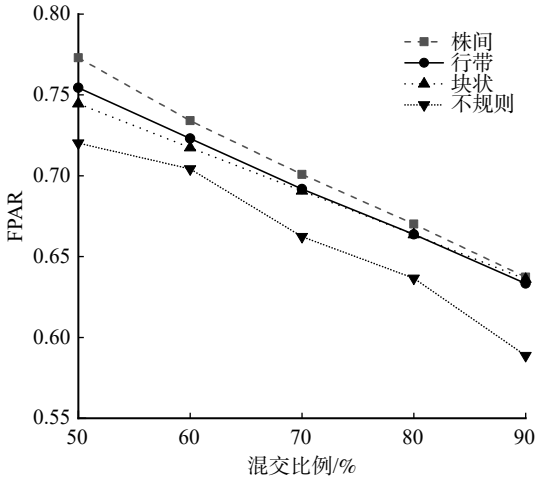


图 3　不同混交格局和混交比例对杉木–木荷混交林 FPAR 的影响

Fig. 3　Impacts of varying mixing patterns and proportions on FPAR in Chinese fir-*Schima superba* mixed plantations

图 4 展示了不同混交场景下，杉木与木荷 FPAR 的变化规律。需要注意的是，林分尺度 FPAR 与单株尺度 FPAR 反映的对象不同：前者体现群落冠层的光截获水平，后者则反映树种和个体层面的光截获差异。在所有混交格局中，杉木 FPAR 均随着混交比例的提升呈线性或近线性上升趋势。当杉木混交比例从 50% 提高到 90% 时，杉木单株平均 FPAR 从 0.357 ~ 0.469 增加到 0.466 ~ 0.531，增幅由高到低依次为株间混交、不规则混交、行带混交和块状混交（图 4c）。在混交格局方面，块状和行带格局在各混交比例下的杉木 FPAR 值始终较高；株间混交在低比例时杉木 FPAR 值表现最低，但在高比例时增长幅度较大，接近块状和行带格局。不规则混交杉木 FPAR 值整体波动较大，低比例时较低，高比例时略有提升但仍偏低。因此，块状和行带格局有利于杉木在不同混交比例下均保持较好的光能利用，而株间混交仅在杉木比例较高时才显现优势。

随着杉木混交比例的增加，木荷单株平均 FPAR 整体呈缓慢上升趋势，但变化幅度小于杉木。杉木数量优势不仅提升了杉木个体的光利用效率，同时

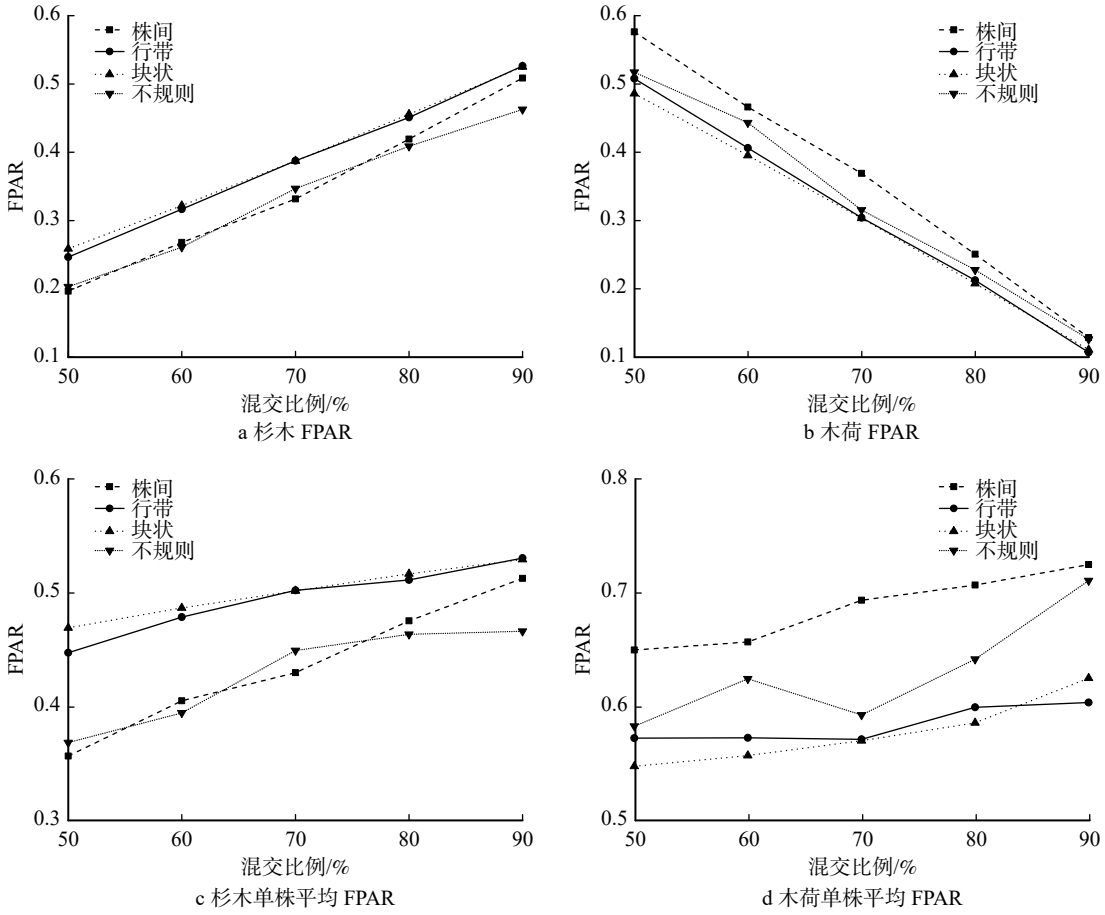


图 4 不同混交格局下杉木与木荷 FPAR 随杉木混交比例的变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of FPAR for Chinese fir and *Schima superba* as a function of the Chinese fir mixing proportion under different mixing patterns

也增强了木荷的光能截获能力。当杉木混交比例从 50% 提高到 90% 时，木荷单株平均 FPAR 从 0.548 ~ 0.650 增加到 0.604 ~ 0.725，增幅由高到低依次为不规则混交、块状混交、株间混交和行带混交。在混交格局方面，株间混交下木荷单株平均 FPAR 在各混交比例下均为最高；不规则混交总体呈上升趋势，并在高杉木比例（80% 和 90%）阶段增幅较大。相比之下，行带与块状混交中木荷单株平均 FPAR 整体偏低，且随比例变化的幅度相对较小。在行带和块状等同种成带或成块的空间配置下，木荷受光水平的提升空间有限，可能与杉木遮蔽增强有关。

图 5a 为不同混交格局下，各混交比例间 FPAR 变异系数（coefficient of variation, CV）的变化。林分整体的 FPAR 的 CV 较为稳定，约为 6% ~ 8%，其中行带混交与块状混交的整体 FPAR 的 CV 相对较低，不规则混交相对较高，说明不规则配置下对杉木占

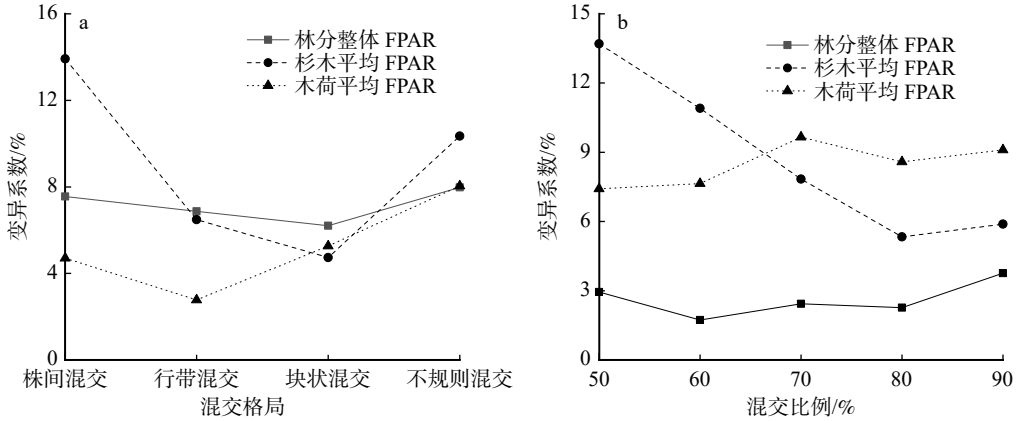


图 5 不同混交模式下 FPAR 变异系数变化

Fig. 5 Variation of the FPAR coefficient of variation under different mixing patterns

比变化的响应起伏更大。相比之下，树种尺度 FPAR 的 CV 差异更为明显。杉木平均 FPAR 的 CV 在株间混交与不规则混交下较高、在块状混交下较低；木荷平均 FPAR 的 CV 整体低于杉木，但不规则混交下相对较高。

图 5b 为不同混交比例下，各混交格局间 FPAR 的 CV 变化。林分整体的 FPAR 在格局间的 CV 始终保持在较低水平，约为 2%～4%，且不同混交格局间 FPAR 的 CV 差异相对较小。相比之下，树种尺度上杉木平均 FPAR 的 CV 随混交比例的变化差异显著，在 50% 混交比例时达到最高，约为 14%，随后随着杉木比例的增加逐渐下降。木荷平均 FPAR 的 CV 变化趋势与杉木不同，在 50%～70% 比例时略有上升，由 7.4% 增加至 9.7%，随后有所回落。

3.2　水平方向的光空间分布

在水平层面上，通过比较不同空间位置单木的 FPAR，分析杉木–木荷混交林的光空间分布特征。图 6 展示了在不同混交比例（60%、80%）与混交格局（株间混交、行带混交、块状混交）组合下，单木 FPAR 值在水平层面上的空间分布情况。

图 7 展示了不同杉木混交比例下，4 种混交格局对单木 FPAR 值的影响。图中箱型图的箱体上下边界分别表示上下四分位数，横线表示中位数，离散点表示各单木 FPAR 值，黑色方块表示均值。纯杉木林作为对照组，其 FPAR 分布最为集中、异质性最低，反映出冠层光环境较为均一。对比可知，不同混交比例及混交格局对杉木–木荷混交林冠层光空间分布的异质性影响显著。总体而言，随着杉木混交比例的增加，各格局单木 FPAR 值的离散程度普遍呈减小趋势，表明在杉木低混交比例时，冠层光截获的差异较大，光环境空间异质性较强；而随着杉木占比的增多，光分布趋于均匀。在杉木混交比例为 50%～70% 时，株间混交下单木 FPAR 整体较高且个体间差异较小，表明其更有利于群落内光能的均匀分配。不规则混交在部分个体中出现较高 FPAR，但整体波动较大、稳定性较差；行带与块状混交的整体表现居中。随着杉木混交比例升高至 80%～90%，各混交模式间的差异逐渐减小，FPAR 分布趋于集中，箱体高度明显缩小，混交对单木 FPAR 的提升作用减弱，群落光能分配模式逐渐接近纯杉木林。

3.3　垂直方向的光空间分布

为表征冠层垂直结构，将场景按高度分层并输出分层 FPAR，以刻画光资源在垂直方向的吸收与分配特征。考虑到下部无叶片层会导致分层 FPAR 接近 0，从而影响异质性度量的稳定性，本研究将冠层有效层定义为有叶片参与吸收的高度范围，并仅在该范围内计算垂直异质性指标。该方法能够更准确地反映混交林冠层内光资源利用的差异，为混交经营配置优化提供量化依据。

图 8 展示了不同混交模式下杉木–木荷混交林中不同垂直高度层的 FPAR 分布特征。由图可知，各混交比例下 FPAR 随高度增加呈单峰型变化，峰

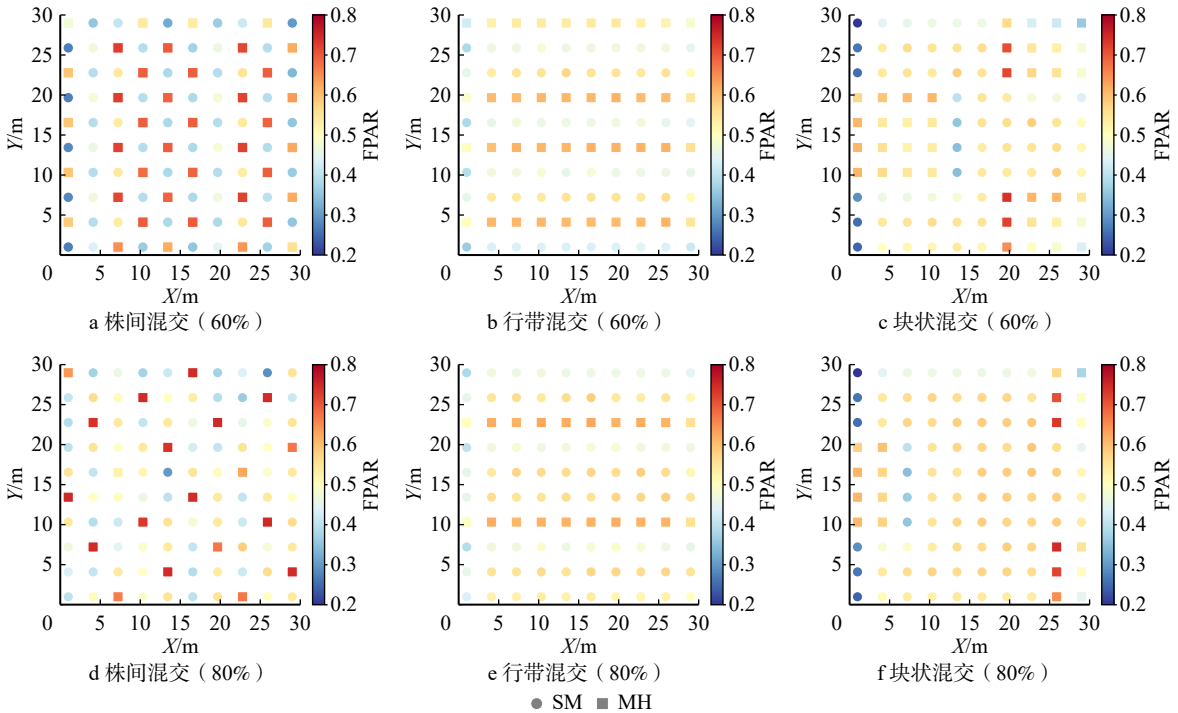


图 6　杉木–木荷混交林 FPAR 空间分布情况

Fig. 6　Spatial distribution of FPAR in Chinese fir-*Schima superba* mixed plantations

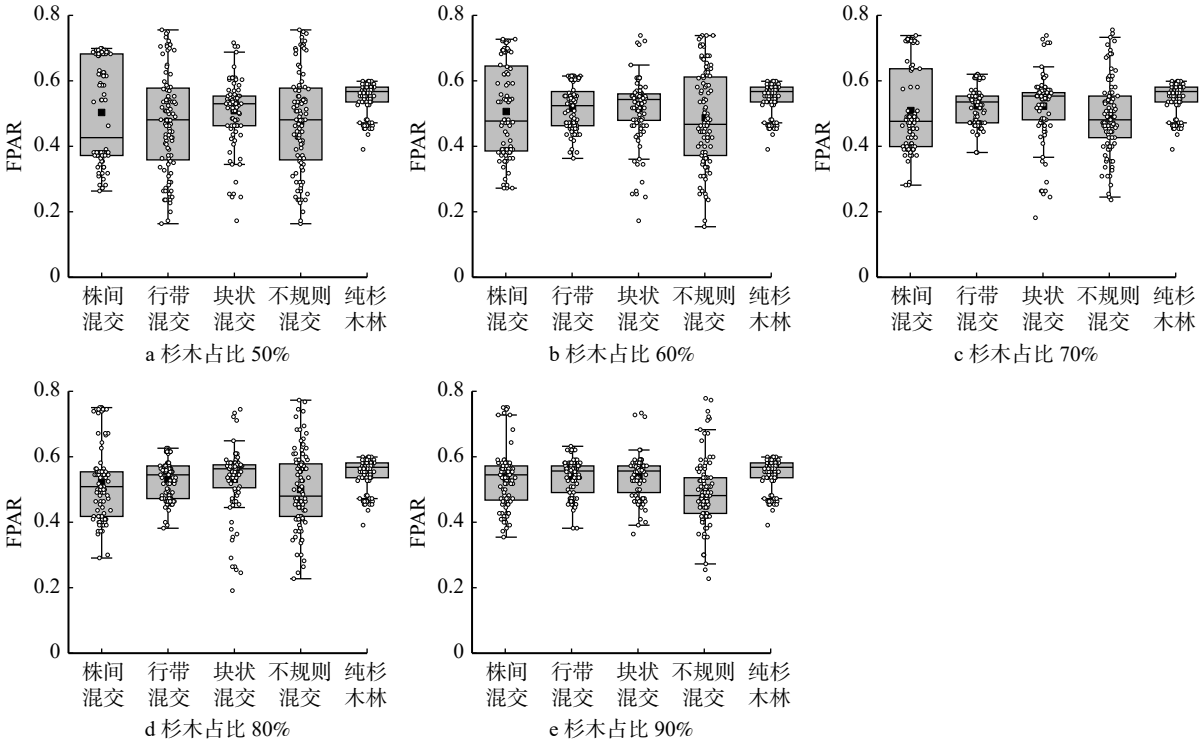


图 7 不同杉木混交比例与混交格局下单木 FPAR 分布箱型图

Fig. 7 Boxplot of individual-tree FPAR under varying Chinese fir mixing proportions and mixing patterns

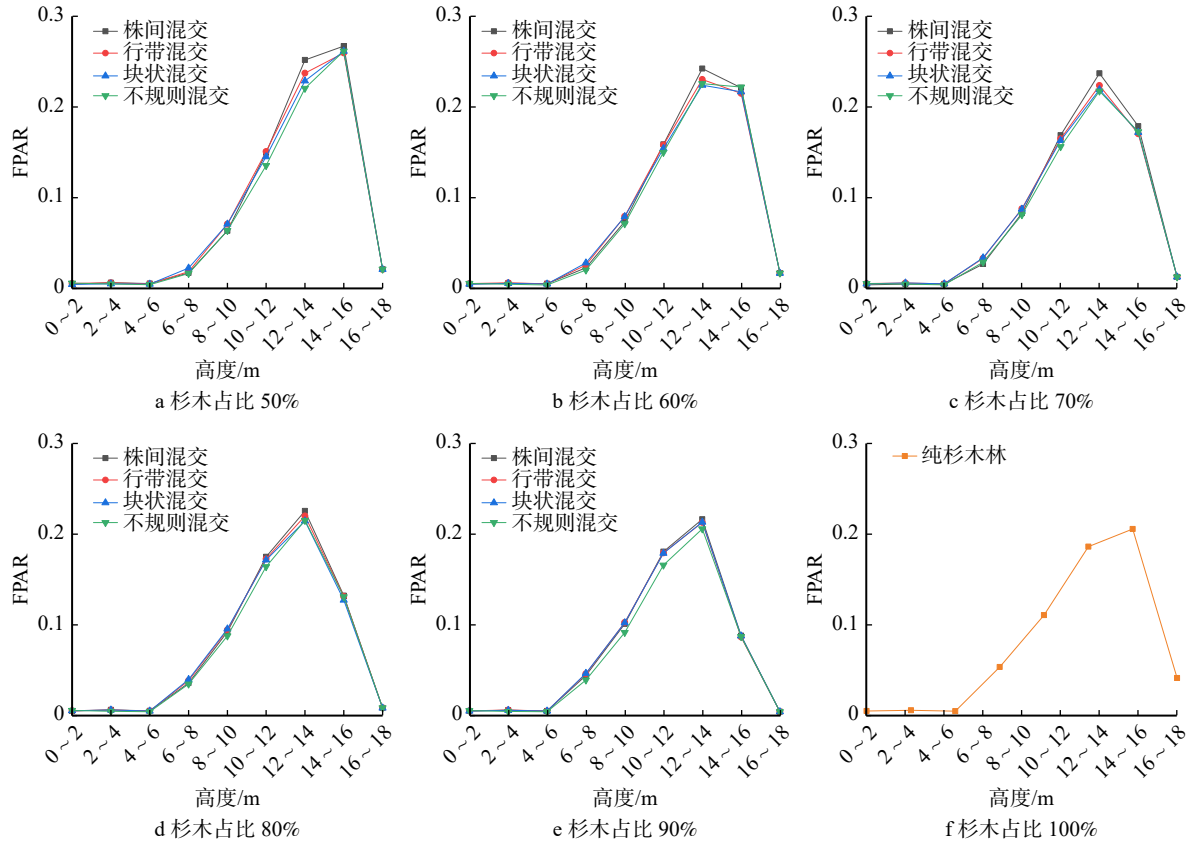


图 8 杉木−木荷混交林不同垂直高度层的 FPAR 分布特征

Fig. 8 FPAR distribution characteristics across different vertical canopy layers in Chinese fir-*Schima superba* mixed plantations

值主要出现在 12 ~ 14 m 高度层附近，随后逐渐下降。冠层下部(0 ~ 6 m)FPAR 接近于零，光能截获较少；中上层(6 ~ 16 m)为主要光截获区域，其中 12 ~ 14 m 高度层对应杉木与木荷主冠层分布，是光能吸收最集中的高度范围。随着杉木比例由 50% 提高至 90%，各混交格局下 FPAR 峰值水平整体呈略有降低的趋

势，表明在杉木占比提高的条件下，冠层对光的截获与吸收能力有所减弱，与林分整体的 FPAR 的变化趋势一致。不同混交格局下，FPAR 垂直分布曲线形态基本一致，格局间差异总体较小。在冠层下部，各格局差异不明显，主要表现为峰值附近曲线的轻微错开。株间混交在多数比例下峰值附近的 FPAR 略高于其他格局，反映混交格局对上层光环境具有一定调节作用，但差异幅度相对有限。

图 9 展示了不同森林场景下有效冠层分层 FPAR 变异系数的变化特征，可用于表征杉木−木荷混交林垂直光分布的异质性。总体上，4 种混交格局的变异系数随杉木占比提高呈现明显的“先降低后升高”变化趋势。当杉木占比较低时，变异系数整体处于较高水平，说明有效冠层内不同高度层之间的光吸收差异较大，垂直异质性较强；其中株间混交与不规则混交的变异系数通常高于行带与块状混交。随着杉木占比增加至中等水平，变异系数显著下降，表明冠层内垂直光分布趋于均衡；最低值出现在杉木占比约 80% 附近，且块状混交整体最低，行带次之。进一步提高杉木占比至 90% 后，各混交格局的变异系数均出现回升，提示在高杉木占比条件下，有效冠层内的垂直异质性再次增强。作为对照，纯杉木林的变异系数低于各混交场景，说明其有效冠层内分层 FPAR 分配相对更均一。

4　讨　　论

本研究基于三维辐射传输模型 LESS，系统分析了杉木−木荷混交林冠层三维空间光分布特征及其光能截获效应。相比传统的二维或参数化模型，LESS 模型能够还原真实场景的空间异质性及光辐射实际传播路径，从而显著提高了理论结果的准确性与解释力。

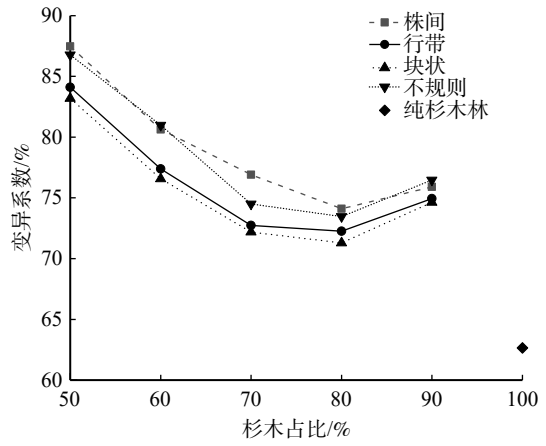


图 9　混交比例与混交格局对杉木−木荷混交林内光分布垂直异质性的影响

Fig. 9　Effects of mixing proportion and mixing pattern on the vertical heterogeneity of light distribution in Chinese fir-*Schima superba* mixed plantations

4.1　混交模式对冠层光截获的影响机制

研究结果表明，混交比例与混交格局共同影响杉木−木荷混交林的林分冠层光截获能力。随着杉木混交比例升高，林分总 FPAR 整体呈下降趋势；而引入木荷可增强冠层对光合有效辐射的截获能力，且在杉木占比较低时，株间混交更有利于提升林分整体光能截获水平。该现象可从结构效应与互补效应两方面理解：一是针叶树种与阔叶树种在冠形、冠幅及叶片空间占据方式上存在差异，改变了冠层对入射辐射的遮挡与吸收过程，从而影响林分尺度的光能截获[29]。二是混交林中物种间性状差异及空间分配差异可产生互补效应，提高资源利用效率并带来林分生产力优势，这一规律在多树种人工林与混交林中具有普遍性[30]。此外，叶片性状与光学特性差异可能进一步强化这种互补效应，阔叶树在叶片形态与冠层光截获策略上常表现出与针叶树不同的响应路径[31]，从而在相同立地条件下对冠层辐射传输产生差异化影响。冠层结构复杂度提升与生态系统生产力和稳定性增强之间的正相关关系亦得到全球尺度证据支持[32]，表明结构维度的改变可能通过多途径影响林分功能表现。

混交格局方面，空间上更均匀混合的配置有助于提高冠层空间占据与结构协调性，从而提升光截获并减弱局部遮阴[33]。相比之下，不规则混交格局因树木分布随机性较强，易形成局部密集区，导致光分布不均。此外，行带和块状混交更有利于杉木的光获取，而木荷则在株间混交中表现更优。这表明，混交格局通过调节树种的空间配置改变了竞争强度与资源分配模式[34]。在行带和块状混交中，杉木为直立树冠结构，在同种聚集条件下更易形成相对连续的光截获层，减少侧向遮蔽，从而提高冠层光截获能力；而木荷在株间混交中表现更优，可能因其树冠较开展，与杉木交错分布时能更充分地利用侧向光资源，缓解了种间竞争的不对称性。从经营角度看，若以维持杉木作为优势树种的受光优势并降低个体受光波动为目标，可优先采用行带或块状等同种聚集式混交配置，以形成相对连续的上层受光界面；若以提高混交阔叶树种的生长潜力、增强林分结构多样性为目标，则可采用株间混交或适度不规则配置。

4.2　光空间分布格局与经营启示

光空间异质性是维持多树种林分生态功能与群落稳定性的重要机制之一[10]。水平层面，本研究发现当杉木与木荷比例接近 5∶5 时，单木尺度 FPAR 的离散程度较大，表明冠层内光资源分配更不均匀；

而随着杉木比例升高，光分布趋于均匀。该变化反映了光在空间上的再分配方式。比例相对均衡时，针叶与阔叶冠层高度与冠幅上的差异叠加，使同一水平尺度上同时出现较多高光与低光区域[35]；而当杉木占比过高、结构更接近纯林时，冠层几何特征更一致，水平光分布随之趋于均匀，光空间异质性降低。

垂直层面上，FPAR 在 12～14 m 高度层普遍出现峰值，说明该层承担了冠层光截获与吸收的主要贡献，是林分光截获的核心功能层。与此同时，在混交场景中，杉木占比约 80% 时分层 FPAR 的变异系数最低，表明此时不同高度层之间的 FPAR 差异相对较小，垂直光分配更均匀。冠层垂直结构异质性可显著影响光截获与冠层光合过程[36]，混交导致的树冠结构与分层差异进一步改变光吸收与光截获能力[33]。当混交比例处于一定范围时，针叶与阔叶树种相对高度与冠幅配置有利于形成“分层而不完全闭合”的冠层结构，使垂直剖面光衰减趋于缓和，从而提高中下层可用光并改善分层光能分配均衡性。分层光环境的改善有助于林下更新与生境维持，并对群落保育及微环境调节具有积极作用[37]。

林下层对光环境差异具有敏感响应，不同混交配置下林下植物多样性可表现出显著差异[38]，因此冠层光环境格局的优化可与林下生境改善目标统筹考虑。基于上述模拟及机制分析，建议混交林经营时重点关注以下原则：(1)合理调节混交比例与格局，优先选择协同增益效应强的规则混交，结合当地微地形和环境异质性适当布置不规则混交，以优化光能分布和资源利用效率；(2)适度提升群落结构空间异质性，避免单一树种覆盖或过度集中，保障群体光资源分配均衡，有利于生物多样性和系统稳定性提升；(3)分层经营重点关注中上层光能分配，通过调节主冠层厚度与层次，促进下层植被恢复与群落功能提升；(4)在实际经营管理过程中结合结构化三维模型工具，持续监测和优化冠层空间配置，为定量遥感、生态模拟与综合资源评估奠定基础。

5 结　　论

本研究基于 LESS 模型模拟了杉木−木荷混交林在不同混交比例和格局下的三维空间光分布，主要结论有以下 3 点。

(1)混交比例与混交格局共同影响林分冠层光截获能力。随着杉木比例的增加，林分整体的 FPAR 持续下降，说明适度混交(特别是杉木比例 50%～70%)有利于增强冠层整体光截获能力。相同混交比例下，规则混交格局总体高于不规则混交格局，其中株间混交在各比例下保持相对较高的冠层光截获水平。这为杉木−木荷混交林的营林实践中确定树种比例和配置方式提供了关键定量依据。

(2)杉木与木荷存在明显的光竞争不对称性。杉木在行带和块状混交中光获取优势显著，而木荷在株间与不规则混交中受光限制最小，更能维持较高的冠层光截获能力。这说明通过调整混交格局可以调节种间关系，缓解强光竞争，促进混交林的稳定和协同生长。

(3)光空间分布呈现显著的水平与垂直分异格局。水平方向上，杉木比例 50% 时光环境异质性最高，有利于促进多样性；比例提高后，光分布均匀度增加，更适合杉木集约经营。垂直方向上，分层 FPAR 随高度呈单峰型变化，峰值主要出现在 12～14 m 高度层附近；在设定的比例梯度内，杉木比例 80% 时垂直光分布最均匀。这为实现人工林的多重经营目标提供了指导。

受本研究三维场景设定与数据获取范围限制，仍存在以下不足亟待后续研究完善：(1)混交比例仅覆盖杉木占比 50%～90%，未纳入杉木占比低于 50% 的阔叶优势情景，后续可扩展至更宽比例梯度开展对比验证；(2)本研究采用单期观测参数进行模拟，未考虑季节动态与物候变化，光分布特征仅代表某一时段情况，未来需结合多时相模拟以揭示时空变化规律；(3)实际林分中生长动态和树种生理反应等过程尚未实现模型耦合。今后可进一步整合地形因子、林下组分及多年气候数据，结合高分辨率遥感观测与冠层自动监测，实现多时空尺度、动态图景的 FPAR 模拟与监测，提高模型的生态响应能力。

参 考 文 献

[1] 莫永俊, 曹小玉, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型的杉木林林分结构多样性评价 [J]. 生态学报, 2024, 44(2): 745−756.
Mo Y J, Cao X Y, Zhao W F, et al. Evaluation of stand structure diversity of *Cunninghamia lanceolata* forest based on structural equation modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 745−756.

[2] Li X, Ramos Aguila L C, Wu D, et al. Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages [J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166962.

[3] 解婷婷, 徐定兰, 易伶俐, 等. 林层高度对不同品质凋落物分解动态的影响 [J]. 植物科学学报, 2024, 42(6): 757−765.
Xie T T, Xu D L, Yi L L, et al. Effects of forest canopy height on decomposition dynamics of litter with varying qualities [J]. Plant Science Journal, 2024, 42(6): 757−765.

[4] Farooq T H. Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) a green gold of China with continues decline in its productivity over the successive rotations: a review [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(5): 11055−11067.

［5］ Mo X, Lu J, Lin J, et al. The effect of mixed plantations on Chinese fir productivity: a meta-analysis [J]. Forests, 2025, 16(1): 105.

［6］ Liang H, Wang L, Wang Y, et al. Root development in *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* seedlings expresses contrasting preferences to nitrogen forms [J]. Forests, 2022, 13(12): 2085.

［7］ Zhang Z, Zhong Y, Yang L, et al. Landscape pattern and succession of Chinese fir plantations in Jiangle County, China [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12497.

［8］ Liu Q Q, Ma X Q, Li Y J, et al. Response of seed germination and seedling growth of Chinese fir to different light intensities [J]. The Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3845−3852.

［9］ Liu B, Liu Q, Daryanto S, et al. Responses of Chinese fir and *Schima superba* seedlings to light gradients: implications for the restoration of mixed broadleaf-conifer forests from Chinese fir monocultures [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 419: 51−57.

［10］ 林芳馨, 胥清利, 曲晓宇, 等. 光环境差异对杉木幼林林下植被多样性及根系种间竞争的影响 [J]. 西南林业大学学报, 2024, 44(9): 35−43.
Lin F X, Xu Q L, Qu X Y, et al. Effects of light environment differences on understory vegetation diversity and root interspecific competition of young *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2024, 44(9): 35−43.

［11］ 付志高, 李芬好, 肖以华, 等. 基于杉木退化人工林碳储量、生产力及其碳汇经济的阔叶树种选择研究 [J]. 林业科学研究, 2024, 37(6): 93−103.
Fu Z G, Li F H, Xiao Y H, et al. Selections of broad-leaved tree species planting in Chinese fir degraded plantation forests: Based on carbon stock, productivity and carbon-sink economy [J]. Forest Research, 2024, 37(6): 93−103.

［12］ Yang S, Mao K, Yang H, et al. Stand characteristics and ecological benefits of Chinese Fir, Chinese Cedar, and mixed plantations in the mountainous areas of the Sichuan Basin [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 544: 121168.

［13］ Gitelson A A, Peng Y, Huemmrich K F. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 147: 108−120.

［14］ 田定方, 范闻捷, 任华忠. 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2020, 24(11): 1307−1324.
Tian D F, Fan W J, Ren H Z. Progress of fraction of absorbed photosynthetically active radiation retrieval from remote sensing data [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(11): 1307−1324.

［15］ Sun Z, Sun L, Liu Y, et al. Estimating fraction of absorbed photosynthetically active radiation of winter wheat based on simulated sentinel-2 data under different varieties and water stress [J]. Remote Sensing, 2024, 16(2): 362.

［16］ Wang Y, Zhan Y, Xie D, et al. Rapid estimation of decameter FPAR from sentinel-2 imagery on the google earth engine [J]. Forests, 2022, 13(12): 2122.

［17］ Qi J, Xie D, Yin T, et al. LESS: LargE-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 695−706.

［18］ 孙雅楠, 刘亚静, 孙钊, 等. 将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 18−27.
Sun Y N, Liu Y J, Sun Z, et al. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of Eastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 18−27.

［19］ 付尧, 尹晶萍, 许昊, 等. 基于非线性联立方程系统的杉木生物量动态预测 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(4): 151−161.
Fu Y, Yin J P, Xu H, et al. Dynamic model for *Cunninghamia lanceolata* biomass based on nonlinear simultaneous equations system [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(4): 151−161.

［20］ d' Hont B, Calders K, Antonelli A, et al. Integrating terrestrial and canopy laser scanning for comprehensive analysis of large old trees: Implications for single tree and biodiversity research[J/OL]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2025 [2025−10−28]. https://doi.org/10.1002/rse2.70021.

［21］ Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75−91.

［22］ Blanchard E, Birnbaum P, Ibanez T, et al. Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas [J]. Trees, 2016, 30(6): 1953−1968.

［23］ Xu Y, Du C, Huang G, et al. Morphological characteristics of tree crowns of *Cunninghamia lanceolata* var. *Luotian* [J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(3): 837−856.

［24］ 林胜. 基于树干解析的杉木与木荷混交成效分析 [J]. 福建林业科技, 2023, 50(3): 32−37.
Lin S. Study on the mixed effect of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* based on trunk analysis [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2023, 50(3): 32−37.

［25］ Fang H, Baret F, Plummer S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications [J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 739−799.

［26］ Jucker T, Fischer F J, Chave J, et al. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database [J]. Global Change Biology, 2022, 28(17): 5254−5268.

［27］ André F, de Wergifosse L, de Coligny F, et al. Radiative transfer modeling in structurally complex stands: towards a better understanding of parametrization [J]. Annals of Forest Science, 2021, 78(4): 92.

［28］ 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述 [J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618−671.
Liang S L, Bai R, Chen X N, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019 [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(6): 618−671.

［29］ Forrester D I, Ammer C, Annighöfer P J, et al. Effects of crown

architecture and stand structure on light absorption in mixed and monospecific *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* forests along a productivity and climate gradient through Europe [J]. Journal of Ecology, 2018, 106(2): 746−760.

[30] Feng Y, Schmid B, Loreau M, et al. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions [J]. Science, 2022, 376: 865−868.

[31] 陈婷萱, 谢海萍, 王晋旭, 等. 不同混交模式对杉木人工林叶功能性状的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12): 97−108.
Chen T X, Xie H P, Wang J X, et al. Effects of different mixed patterns on the functional traits of leaves in *Cunninghumia lanceolata* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 97−108.

[32] Liu X, Feng Y, Hu T, et al. Enhancing ecosystem productivity and stability with increasing canopy structural complexity in global forests [J]. Science Advances, 2024, 10(20): eadl1947.

[33] Plaga B N E, Bauhus J, Pretzsch H, et al. Influence of crown and canopy structure on light absorption, light use efficiency, and growth in mixed and pure *Pseudotsuga menziesii* and *Fagus sylvatica* forests [J]. European Journal of Forest Research, 2024, 143(2): 479−491.

[34] Han Y, Wang B, Sun H. Effects of species mixing on maximum size-density relationships in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)-dominated mixed forests converted from even-aged pure stands [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1342307.

[35] 张志, 郭洋, 万舒珂, 等. 关帝山云杉次生林空间结构对林内光环境的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 41−48.
Zhang Z, Guo Y, Wan S K, et al. Effects of spatial structure of *Picea asperata* secondary forest on light environment in Guandi Mountain of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 41−48.

[36] Béland M, Baldocchi D D. Vertical structure heterogeneity in broadleaf forests: effects on light interception and canopy photosynthesis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108525.

[37] 马惠英, 文英, 韩云花, 等. 水曲柳阔叶混交林冠层光分布与天然更新相关性研究 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 97−101.
Ma H Y, Wen Y, Han Y H, et al. Correlations between light distribution of the crown layer and natural regeneration of *Fraxinus mandshurica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 97−101.

[38] Wang M, Guo H, Jiang J. Understory plant diversity in *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. plantations under different mixed planting patterns [J]. Forests, 2025, 16(8): 1290.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 惠刚盈）