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

北京地区栓皮栎林下光环境对幼苗幼树生长的影响

周德弟 杨华 裴厦 宁杨翠

Effects of understory light environment on seedling and sapling growth in a *Quercus variabilis* plantation in Beijing region

Zhou Dedi, Yang Hua, Pei Sha, Ning Yangcui

引用本文:
周德弟, 杨华, 裴厦, 宁杨翠. 北京地区栓皮栎林下光环境对幼苗幼树生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):102–111. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250140
Zhou Dedi, Yang Hua, Pei Sha, Ning Yangcui. Effects of understory light environment on seedling and sapling growth in a *Quercus variabilis* plantation in Beijing region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):102–111. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250140

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250140

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

栓皮栎和锐齿槲栎幼苗光合特性对高温胁迫的响应
Photosynthetic response of *Quercus variabilis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* seedlings to high temperature stress
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 25–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210240

栓皮栎栓皮厚度的地理变异及其影响因素
Geographical variations and its influencing factors in the cork bark thickness of *Quercus variabilis*
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 11–18. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230029

林火干扰对林分结构及植被更新影响研究进展
Research progress on effects of fire disturbance on stand structure and vegetation regeneration
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 156–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240029

晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素
Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 103–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240228

栓皮栎种子贮藏物质和内源激素对萌发成苗的影响
Effects of storage substances and endogenous hormones on seed germination and seedling formation of *Quercus variabilis*
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 19–26. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220207

栓皮栎软木主要化学成分含量的地理差异
Geographical differences in the content of main chemical components in cork of *Quercus variabilis*
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 145–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220471

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250140

北京地区栓皮栎林下光环境对幼苗幼树生长的影响

周德弟[1]　杨　华[1]　裴　厦[2]　宁杨翠[2]
（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. 北京市生态环境保护科学研究院，北京 100037）

摘要:【目的】林下光环境的空间异质性直接影响林下幼苗幼树的分布和生长状况，探究不同光环境下幼苗幼树的生态响应机制，旨在为森林更新及植被恢复提供科学依据。**【方法】**在北京市西山栓皮栎人工林选取 5 块 30 m × 30 m 的典型样地，详细调查了胸径≥5 cm 乔木的胸径、树高、冠幅，胸径 < 5 cm 幼苗幼树的地径、树高（苗高）及其空间位置坐标，探究其林分结构特征。采用半球面摄像技术量化林下光环境参数，结合幼苗幼树生长指标（地径、树高），通过双因素方差分析检验不同光照条件下幼苗幼树生长的差异，并运用回归分析探究光环境因子与幼苗幼树生长指标之间的定量关系。**【结果】**(1)栓皮栎林分直径结构、幼苗幼树的地径以及树高均服从正态分布($P < 0.05$)。(2)光照透过率对栓皮栎幼苗幼树生长具有显著影响，其中直射光透过率 0.20、散射光透过率 0.15 和总光照透过率 0.15 可作为区分幼苗幼树生长响应差异的关键光环境阈值。当光照透过率低于该阈值时，不同光照透过率梯度间的幼苗幼树生长无显著差异($P > 0.05$)；而大于该阈值后，地径和树高均与光照透过率呈显著正相关($P < 0.05$)。(3)在同一光照透过率区间内，不同类型的林下光照透过率（直射光、散射光、总光照）对幼苗幼树生长的影响差异不显著($P > 0.05$)，但从线性回归分析的效应值来看，各光照对幼苗幼树生长的影响顺序为林下总光照 > 散射光 > 直射光。(4)林分幼苗幼树空间分布显示，幼苗幼树主要聚集分布在光照较弱的区域，这一空间格局进一步验证了适宜的光照条件对幼苗幼树生长的重要作用。**【结论】**栓皮栎幼苗幼树生长主要受光照透过率影响，表现出明显的阈值响应特征。在实际生产中，可在光照透过率达到阈值（直射光 ≥ 0.20 且散射光和总光照 ≥ 0.15）的林下补植，将有利于栓皮栎林幼苗幼树的生长，实现人工促进栓皮栎林的天然更新。

关键词：栓皮栎；林分结构；光环境；林下更新；植被恢复
中图分类号：S791.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)01−0102−10
引文格式：周德弟，杨华，裴厦，等. 北京地区栓皮栎林下光环境对幼苗幼树生长的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：102−111. Zhou Dedi, Yang Hua, Pei Sha, et al. Effects of understory light environment on seedling and sapling growth in a *Quercus variabilis* plantation in Beijing region［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 102−111.

Effects of understory light environment on seedling and sapling growth in a *Quercus variabilis* plantation in Beijing region

Zhou Dedi[1]　Yang Hua[1]　Pei Sha[2]　Ning Yangcui[2]
(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environment Protection, Beijing 100037, China)

Abstract:［**Objective**］The spatial heterogeneity of the forest understory light environment directly affects the distribution and growth of seedlings and saplings. Studying the ecological response mechanisms of seedlings and saplings under different light conditions aims to provide a scientific basis for forest regeneration and vegetation restoration.［**Method**］Five typical sample plots of 30 m × 30 m were selected in the *Quercus variabilis* plantation in the Western Hills of Beijing, detailed surveys were conducted on the DBH, tree height, and crown width of each tree (DBH ≥5 cm), as well as the basal diameter, seedling

收稿日期: 2025−04−23　**修回日期:** 2025−06−20
基金项目: 北京市生态环境保护科学研究院基金项目（Y2025-008）。
第一作者: 周德弟。主要研究方向：森林资源监测与评价技术。Email: dedizhou981124@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: 杨华，教授。主要研究方向：森林资源监测与评价技术。Email: huayang@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

height, and spatial coordinates of seedlings and saplings (DBH < 5 cm) to explore the stand structure characteristics. Hemispherical photography technology was used to quantify understory light environment parameters. Combined with seedling and sapling growth indicators (basal diameter, tree height), two-way analysis of variance was employed to test growth differences under different light conditions, and regression analysis was used to explore the quantitative relationships between light environment factors and seedling and sapling growth indicators. [**Result**] (1) The diameter structure of the *Q. variabilis* stand, as well as the basal diameter and tree height of seedlings and saplings, all followed a normal distribution ($P < 0.05$). (2) Light transmittance had a significant impact on the growth of *Q. variabilis* seedlings and saplings. Specifically, direct light transmittance of 0.20, diffuse light transmittance of 0.15, and total light transmittance of 0.15 could be identified as key light environment thresholds for distinguishing growth response differences among seedlings and saplings. When light transmittance was below these thresholds, there was no significant difference in seedling and sapling growth among different light transmittance gradients ($P > 0.05$). However, when exceeding these thresholds, both basal diameter and tree height showed a significant positive correlation with different light transmittance ($P < 0.05$). (3) Within the same light transmittance interval, different types of understory light transmittance (direct light, diffuse light, and total light) had no significant differences in their effects on the growth of seedlings and saplings ($P > 0.05$). However, according to the effect sizes derived from linear regression analysis, the influence of different light types on the growth of seedlings and saplings showed a numerical trend: understory total light > diffuse light > direct light. (4) The spatial distribution of seedlings and saplings in the stand shows that they are mainly clustered in areas with low light intensity. This spatial pattern further verifies the important role of suitable light conditions in the growth of seedlings and saplings. [**Conclusion**] The growth of *Q. variabilis* seedlings and saplings is mainly influenced by light transmittance, showing distinct threshold response characteristics. In practical production, supplementing planting in understory areas where light transmittance reaches the thresholds (direct light ⩾ 0.20, and both diffuse and total light ⩾ 0.15) would be beneficial for the growth of *Q. variabilis* seedlings and saplings, thereby facilitating the assisted natural regeneration of *Q. variabilis* plantations.

Key words: *Quercus variabilis*; stand structure; light environment; understory regeneration; vegetation restoration

天然更新是森林生态系统稳定和可持续发展的基础，也是维持群落生物多样性、保障种群延续的关键生态过程[1]。在种群更新过程中，幼苗和幼树存活与生长不仅直接决定了未来种群的结构和规模，而且深刻影响着更新的质量和成效[2]。这些过程受到遗传特性和环境因子协同作用的共同驱动[3]。其中，林下光照是最具动态性的关键限制因子之一，可显著影响幼苗的生长和分布[4]。

在森林生态系统中，随着群落演替的推进，郁闭的林冠会大幅削弱太阳辐射，使得林下幼苗幼树接收到的光照减少[5]。现有研究多通过冠层结构来表征林下光照异质性。例如：董莉莉等[6]研究了不同间伐强度下林冠开度和叶面积指数与林下幼苗更新数量特征间的关系；刘子萱等[7]发现当林下光照条件达到一定强度后，增加光照强度能有效地促进幼树的生长。然而，不同树种对光环境的响应策略存在显著差异，以红松（*Pinus koraiensis*）为例，其幼苗幼树表现出独特的光响应模式，林下更新的幼苗幼树倾向分布于林下光照较弱的区域[8]。这表明，虽然适度增强光照通常有利于幼苗的地径和树高生长，但二者并非简单的线性关系，而是受物种光适应策略和环境阈值共同调控的复杂过程。明确不同树种的光响应特征及其光照透过率的阈值，对于制定针对性的森林更新策略至关重要。

栓皮栎（*Quercus variabilis*）为壳斗科（Fagaceae）栎属（*Quercus*）落叶乔木，广泛分布于我国北方山区，其根系发达、萌芽力强、耐干旱瘠薄、适应性强，主根具有水土保持作用，在生态环境保护和园林绿化中发挥着重要作用[9–10]。以往多通过林窗的大小来研究栓皮栎的更新，以及不同光环境对栓皮栎幼苗幼树生理生态的影响来分析林下光环境与栓皮栎幼苗幼树生长的关系。例如，马莉薇等[11]研究发现在今后的栓皮栎林经营中，将林窗大小控制在 150 ~ 200 m^2 范围内能有效促进幼苗幼树生长，实现林地

更新目标。然而，这些研究存在两个关键科学问题亟待解决：首先，关于不同强度林下光照对栓皮栎幼苗生长影响的差异性机制尚不明确；其次，光照透过率是否存在促进生长的临界阈值仍缺乏定量证据。厘清上述问题对于精准调控林下光环境、优化栓皮栎种群更新策略具有重要理论和实践价值，同时也能为抚育管理提供科学依据。例如，若能确定最佳光照透过率阈值，就可以通过调控林分密度来创造最适更新环境。为此，本研究以北京西山栓皮栎人工林为研究对象，拟选取地径和树高作为生长指标，采用半球摄影技术结合 Gap Light Analyzer 2.0（GLA）软件同步测定林下和林冠上层的光照参数，探究光照透过率与幼苗幼树生长的关系，以及林下光环境与幼苗幼树生长的相关性，旨在为栓皮栎林更新提供光环境调控依据，实现人工促进栓皮栎林的天然更新。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京西郊的西山，属太行山余脉，地跨海淀区、石景山区和门头沟区，地理位置介于 39°54′51″～40°03′32″N、116°05′58″～116°28′35″E 之间，总面积 6 005 hm^2。该区域海拔 300～400 m，表现出北温带半湿润大陆性季风气候特点，四季变化明显：春季时，冷暖空气频繁交替，大风天气较为常见；夏季降雨时间多且伴随着高温，降雨量占全年的绝大多数；秋季降雨较少，晴天较多，但是气温下降得快；冬季空气干燥，降雪较少，主导风向为西北风。多年平均气温 11.6 ℃，年均降水量 650～750 mm[12]。西山的森林覆盖比例达到 90% 以上，主要植被属于暖温带落叶阔叶林，其中绝大部分为人工林，经过持续的科学管护，已经形成了稳定的群落结构，较为突出的特点有：林冠密集高大郁闭，具有完善的生物多样性体系，完整包含了华北地带性植物群落的所有层次，堪称该地区森林生态系统的典型样本。针叶林以侧柏（*Platycladus orientalis*）和油松（*Pinus tabuliformis*）为主，阔叶林以刺槐（*Robinia pseudoacacis*）、栾树（*Koelreuteria paniculata*）、栓皮栎、元宝枫（*Acer truncatum*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）和黄栌（*Cotinus coggygria*）等占优，另有少量自然分布的乔木树种，如君迁子（*Diospyros lotus*）、构树（*Broussonetia papyrifera*）、臭椿（*Ailanthus altissima*）、蒙桑（*Morus mongolica*）等[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 林分信息调查

2024 年 9 月，在研究区内以栓皮栎纯林为研究对象，选取 5 块 30 m × 30 m 的典型样地，样地间坡向、海拔、坡度等地形因子基本一致，造林年份在 1960 年左右，造林后没有实施过抚育措施，样地林分郁闭度均维持在 0.8 以上，样地基本信息见表 1。首先在样地内调查胸径≥5 cm 乔木的胸径、树高、冠幅、第一枝下高；将胸径 < 5 cm 分为幼树和幼苗，其中树高≥1 m 为幼树，0.2 m≤苗高 < 1.0 m 为幼苗，分别测量幼苗、幼树的地径、树高（苗高）。利用高精度 RTK 设备对样地内每木、幼苗和幼树采集空间位置信息。统计林分内达到起测径阶的树木数量并分析其直径结构，绘制直径分布曲线，解析幼苗幼树地径结构及树高结构特征。

1.2.2 光环境数据获取与处理

采用配备鱼眼镜头的相机获取林冠的半球影像，在每棵幼苗幼树的正上方 10 cm 处进行固定高度的拍摄，从而得到完整的天空图像（图 1）。在拍摄鱼眼照片时，为了避免过度曝光对图像造成影响，拍摄时间应在阴天或者接近日出日落的时间段，每个位点拍摄两张照片，以确保图像的稳定性和代表性。

采用 Gap Light Analyzer 2.0（GLA）软件对冠层图像进行数字化处理[14]。在软件中，输入调查地点的经纬度、海拔、坡度、坡向等一系列基本信息，并将天顶角设置为 60°，通过分析可获取林冠开度、叶面积指数、林下直射光、林下散射光、林下总光照以及林冠上方直射光、散射光和总光照等数据。随后，将林下直射光、散射光和总光照分别与林冠上方直射光、散射光和总光照进行比值计算，得到林下不同类型光照的透过率。

表 1 栓皮栎人工林样地基本情况

Tab. 1 Basic information of *Quercus variabilis* plantation sample plots

样地号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m	密度/(株·hm^{-2})	坡位
1	288	20～25	西南	15.90	7.06	4.30	1 200	下
2	220	25～30	南	13.70	11.67	3.39	1 475	上
3	229	25～30	南	14.60	11.29	4.02	1 275	中
4	215	25～30	南	14.20	11.22	4.04	825	上
5	233	25～30	南	12.30	10.80	3.94	1 575	上

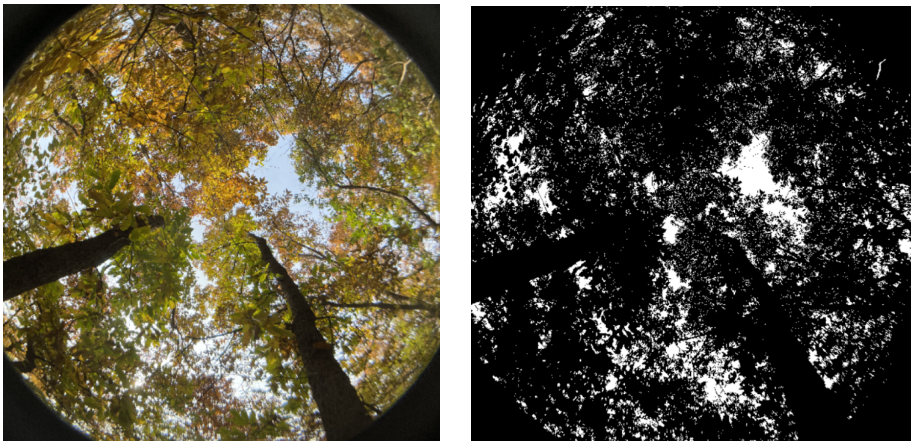


图 1　栓皮栎幼苗幼树全天空照片

Fig. 1　Hemispherical photograph above *Q. variabilis* seedlings and saplings

1.3　数据分析

1.3.1　林分结构特征分析

运用 origin2024 软件对样地调查得到的幼苗幼树的树高（苗高）、地径以及乔木的胸径进行分析，绘制分布图。

1.3.2　方差分析与回归分析

运用 R 4.0.3 软件中的 stats 包对林下散射光、林下直射光和林下总光照与幼苗幼树的地径和树高进行双因素方差分析，运用双因素方差检验探究不同类型和强度光照透过率与幼苗幼树地径、树高生长之间的关联性，采用最小显著差异法进行多重比较。

为了进一步量化林下光照与幼苗幼树的树高和地径的关系，采用 R 4.0.3 软件对林下散射光、林下直射光和林下总射光和幼苗幼树的树高、地径进行回归分析，得到 R^2 值，并用软件中的 ggplot 包绘图，其中选择回归线两侧平行线之间的宽度区间（W）来表征相同光照水平下的生长变异范围。

1.3.3　林下光照与幼苗幼树空间分布的关系

选择林冠开度、叶面积指数以及各类型林下光照等参数，采用 origin2024 软件绘制能够反映样地光照和幼苗幼树位置信息的热图，探究幼苗幼树的分布与林下光照的关系。

2　结果与分析

2.1　林分结构与幼苗幼树结构特征

林分直径结构反映了林木个体大小在径阶上的分布数量。研究样地内栓皮栎林分株数密度介于 825 ~ 2 625 株/hm^2 之间，平均胸径为 12.3 ~ 15.9 cm。直径分布分析（图 2A）表明：林分直径结构服从正态分布，但具有正偏度特征，分布曲线呈右偏形态，主要径阶集中在 14、16 和 18 cm 3 个等级。栓皮栎幼苗幼树种群特征可以通过其地径和树高（苗高）分布特征来反映，对 5 块样地幼苗幼树的实测数据分析表明，其地径均值为 0.91 cm。高度均值为 0.86 m，经卡方检验（$P < 0.05$）证实，二者虽呈正态分布，但均表现出右偏趋势（图 2B，C）。具体而言，幼苗幼树的地径主要分布在 0.25 ~ 1.25 cm 的小径级区间，从幼苗幼树的树高（苗高）来看，主要分布在低树高（0.25 ~ 1.25 m），其中 0.25 ~ 0.75 m 树高区间的个体占比尤为突出（图 2B，C）。然而，林下幼苗幼树的生长表现存在较大变异，树高分布范围为 0.25 ~ 3.75 m，地径分布范围为 0.25 ~ 4.75 cm。这种异质性可能源于林下光环境的显著差异—仅有少量位于林隙且竞争力强的幼树能够获取充足光照，而大多数个体则受限于有限的光资源，导致生长表现分化明显。

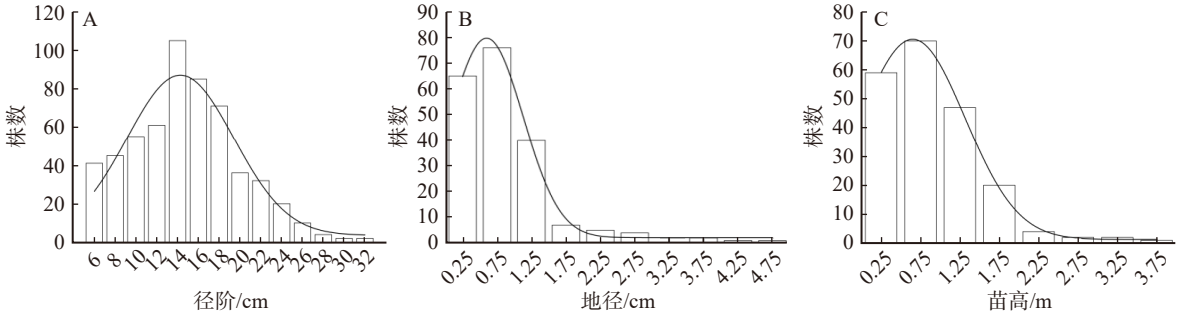


图 2　栓皮栎林分结构（A）与幼苗幼树地径（B）和树高（C）

Fig. 2　Stand structure (A), ground diameter (B) and tree height (C) of seedlings and saplings of *Q. variabilis*

2.2 不同光照类型下的幼苗幼树生长的方差分析

双因素方差分析结果(表 2)显示:在同一类型光照、不同光照透过率下,幼苗幼树的地径和树高生长均大多存在显著差异($P < 0.05$);但同一光照透过率下,不同类型光照(即直射光、散射光及总光照)对幼苗幼树的地径、树高生长的影响均无显著性差异。在树高生长方面,当 3 种光照透过率均低于 0.15 时,各类型光照在(0.05, 0.10] 和(0.10, 0.15] 的光照透过率区间内幼苗幼树的树高生长差异不显著($P > 0.05$)。然而,当光照透过率超过 0.15 后,散射光和总光照中不同区间的树高生长均呈现显著差异($P < 0.05$)。相较之下,直射光对树高的影响呈现一定的滞后性,在(0.15, 0.20] 和(0.20, 0.25] 两个光照透过率区间之间的差异并不显著($P > 0.05$),说明其对树高生长的促进作用较为缓慢。

在地径生长方面,光照透过率也表现出明显的阈值效应。当 3 种透光率均低于 0.20 时,直射光中不同区间内的地径差异不显著($P > 0.05$)。然而,在散射光和总光照中,(0.10, 0.15] 和(0.15, 0.20] 两个光照透过率区间内地径生长差异性显著($P < 0.05$),而此时直射光中仍未体现出明显差异($P > 0.05$)。当光照透过率超过 0.20 后,3 种类型光照中,不同光照透过率区间的地径生长差异均变得显著($P < 0.05$),显示出较强的响应性。

综合分析表明,当散射光和总光照透过率超过 0.15,直射光透光率超过 0.20 时,栓皮栎幼苗幼树的地径和树高均随光照透过率的增加而显著提升。因此,建议在林分抚育管理中,可将直射光透过率 0.20,散射光和总光照透过率 0.15 作为促进栓皮栎幼苗幼树生长的关键光照透过率阈值。

2.3 林下光照与栓皮栎幼苗幼树地径、树高的回归分析

随着林冠透过率的增加,林下光照也增强,栓皮栎幼苗幼树地径、树高均表现出明显的正响应(图 3)。其中,W 表示相同光照条件下地径和树高的生长变异范围。可以观察到,在相同的地径或树高条件下,林下光照呈现出多值分布特征。具体来说,在地径方面,随着林下总光照的增强,幼苗幼树的地径主要在 $W = 2.4$ cm 的区间范围内增长;随着林下散射光的增强,幼苗幼树的地径增长区间缩减至 $W = 2.2$ cm;而随着林下直射光的增强,幼苗幼树地径的增长范围进一步缩减至 $W = 2.0$ cm。然而,值得注意的是,随着地径的进一步增加,部分数据逐渐偏离原有区间,呈现出一定程度的离散性。在树高方面,随着林下直射光、散射光以及总光照的增加,幼苗幼树的树高增长均集中在 $W = 1.6$ m 的区间内,表明树高对光照变化的响应更集中且变化梯度更明显。林下总光照与地径、树高的相关性最强,其次为散射光,而直射光的相关性相对较弱($R^2_{\text{林下总光照}} > R^2_{\text{散射光}} > R^2_{\text{直射光}}$)。此外,各类林下光照对树高的促进效应普遍强于对地径的影响($R^2_{\text{树高}} > R^2_{\text{地径}}$)。总的来说,林下光照类型不仅影响栓皮栎幼苗幼树的生长幅度,其作用强度也存在差异,总光照具有更优的生长促进效果,且对树高的影响要强于地径。

2.4 林下光照与幼苗幼树空间分布的关系

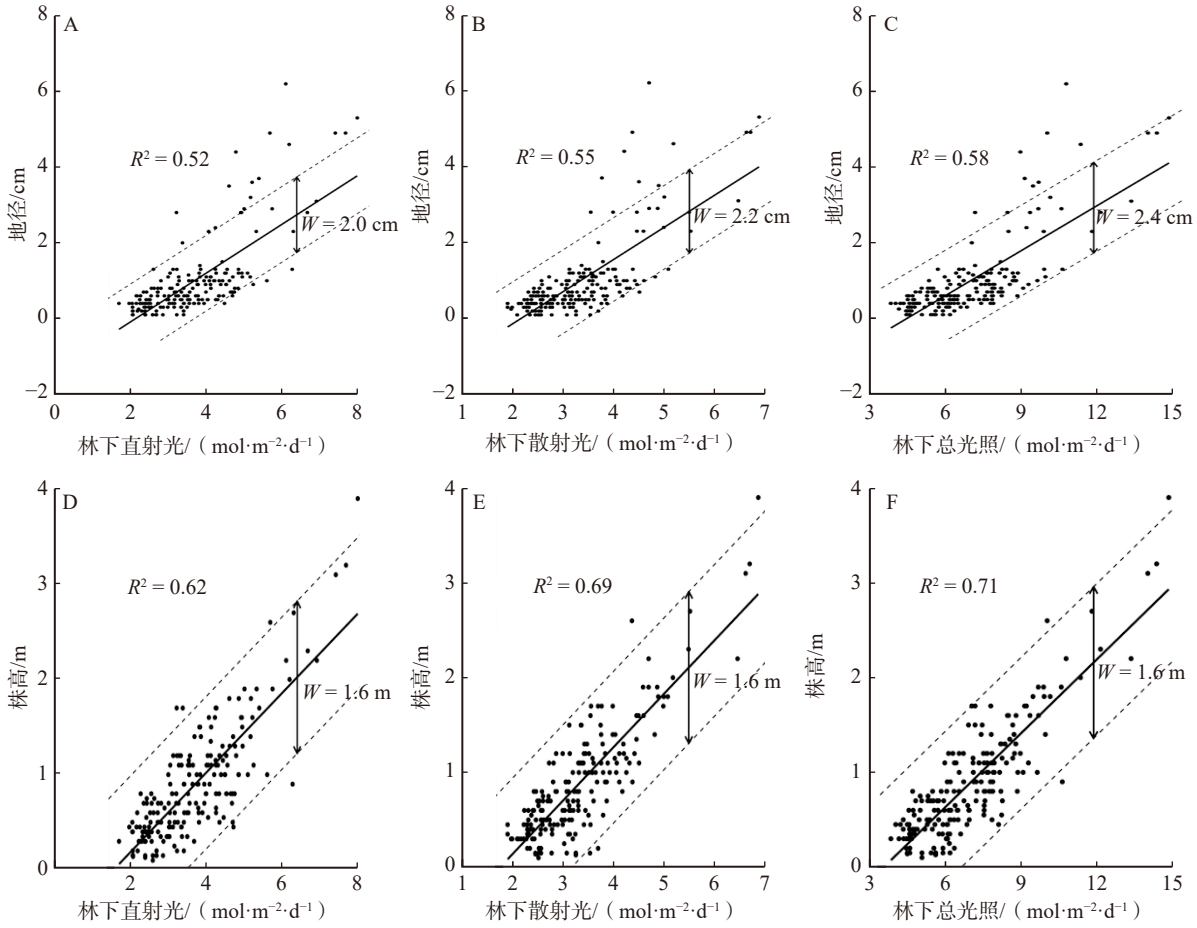
样地冠层特征分布图和幼苗幼树相对位置分布图(图 4)显示:林冠开度大的区域,叶面积指数较小,具体而言,样地西偏北方向的区域表现出林冠开度最小(9.75% ~ 11.00%),而叶面积指数最大(2.5 ~ 2.7);与此相反,在样地北部和西部各分布区域有一处林冠开度最大(19.80% ~ 21.25%),而叶面积指数最小(1.5 ~ 1.7)。南侧区域则整体呈现中等程度的林冠开度与叶面积指数值,另外,样地幼苗主要分布在光照较弱的区域。总体来看,叶面积指数与林冠开度的空间分布特征在很大程度上与冠幅的空间结构高度吻合,说明冠层结构在小尺度空间上的分布

表 2 不同光照透过率对栓皮栎幼苗幼树生长的影响

Tab. 2 Effects of different light transmittance on growth of seedlings and saplings of *Q. variabilis*

光照透过率区间	直射光		散射光		总光照	
	地径/cm	树高/m	地径/cm	树高/m	地径/cm	树高/m
(0.05, 0.10]	0.31 ± 0.16ab	0.32 ± 0.15A	0.31 ± 0.06ab	0.35 ± 0.07A	0.35 ± 0.09ab	0.35 ± 0.09A
(0.10, 0.15]	0.53 ± 0.40a	0.52 ± 0.28A	0.47 ± 0.24a	0.49 ± 0.24A	0.45 ± 0.26a	0.47 ± 0.23A
(0.15, 0.20]	0.79 ± 0.45ab	0.95 ± 0.38B	0.81 ± 0.54b	0.86 ± 0.39B	0.82 ± 0.41b	0.94 ± 0.33B
(0.20, 0.25]	1.39 ± 1.00c	1.14 ± 0.41B	1.88 ± 1.45c	1.40 ± 0.42C	1.91 ± 1.22c	1.43 ± 0.39C
(0.25, 0.30]	3.36 ± 1.82d	1.88 ± 0.66C	2.87 ± 1.04d	2.01 ± 0.36D	3.35 ± 1.76d	2.00 ± 0.61D
(0.30, 0.35]	4.20 ± 1.16e	2.94 ± 0.70D	4.55 ± 0.98e	3.10 ± 0.70E	4.55 ± 0.98e	3.10 ± 0.70E

注:不同大写字母表示树高在同一类型光照不同光照透光率区间之间存在显著差异($P < 0.05$),不同小写字母表示地径在同一类型光照不同光照透光率区间之间存在显著差异($P < 0.05$)。



*W*表示相同光照水平下的生长变异范围；实线为回归直线；虚线为与回归直线平行的直线。

图 3　林下光照与栓皮栎幼苗幼树地径、树高的相关性

Fig. 3　Correlations of understory light with ground diameter and tree height of seedlings and saplings for *Q. variabilis*

存在明显的非均质性。进一步分析热图(图 4)发现，林下光照(包括散射光、直射光和总光照)强度大的区域，林冠开度也越大，即在林冠开度较小的区域，林下可获得的各类光照强度普遍较低(直射光在 1.7 ~ 2.5 之间、散射光在 1.9 ~ 2.5 之间、总光照在 3.8 ~ 5.0 之间)。这一系列空间分布特征共同揭示了冠层结构对林下光环境的影响。

3　讨　　论

3.1　林下光环境对幼苗幼树生长的影响

林分直径结构和树高分布是反映林分结构特征与生长动态的重要指标[15]。本研究样地内乔木的直径分布及栓皮栎幼苗幼树的地径和树高分布均呈右偏正态分布(偏度系数为正)，表明该林分以中小径级乔木为主，林下更新个体也主要集中在小地径级(0.25 ~ 1.25 cm)和低树高级(0.25 ~ 1.25 m)。此外，幼苗幼树的树高(0.25 ~ 3.75 m)和地径(0.25 ~ 4.75 cm)跨度较大，这与刘子萱等[7]对白扦(*Picea meyeri*)幼树在不同林下光环境中生长表现的研究结果一致，白扦幼树也表现出地径和树高分布范围较宽的特征。这一现象的主要原因在于林隙区域的光照充足，仅有少数竞争力强的幼树能够充分利用资源并快速生长，而大多数幼苗幼树由于生长在闭合冠层下，光照受限，生长缓慢，导致群体内个体间差异显著。

在树木生长的不同时期(幼苗期、幼树期)，其生长情况会受到多种外部条件的综合影响。然而，在本研究中，由于地形特征、土壤性质及水分条件等生境因子空间异质性较低，故重点探讨了林下光照条件对栓皮栎幼龄个体地径和高度生长的调控作用。研究发现，尽管栓皮栎幼苗表现出一定程度的耐阴能力，但在幼苗生长初期，对于林下的光照条件有着明确的需求。只有当光照透过率满足其基本生长需求时，幼苗才能维持理想的生长状态。当林下光照条件低于某一水平时，即便增加光照，对幼苗和幼树的地径及树高生长也未见显著促进作用。相反，一旦林下的光照透过率超过了某个关键临界值时，增加光照能有效促进幼苗幼树生长。这种响应机制源于栓皮栎幼苗幼树的光合特性：在弱光条件下，碳同化过程直接受限导致生长减缓；但当光照增强至临界值以上时，其叶片能通过结构适应性调整，有效提升光能利用率，从而促进生长速率的加快[16]。

本研究发现，林下光环境对林下幼苗幼树地径、

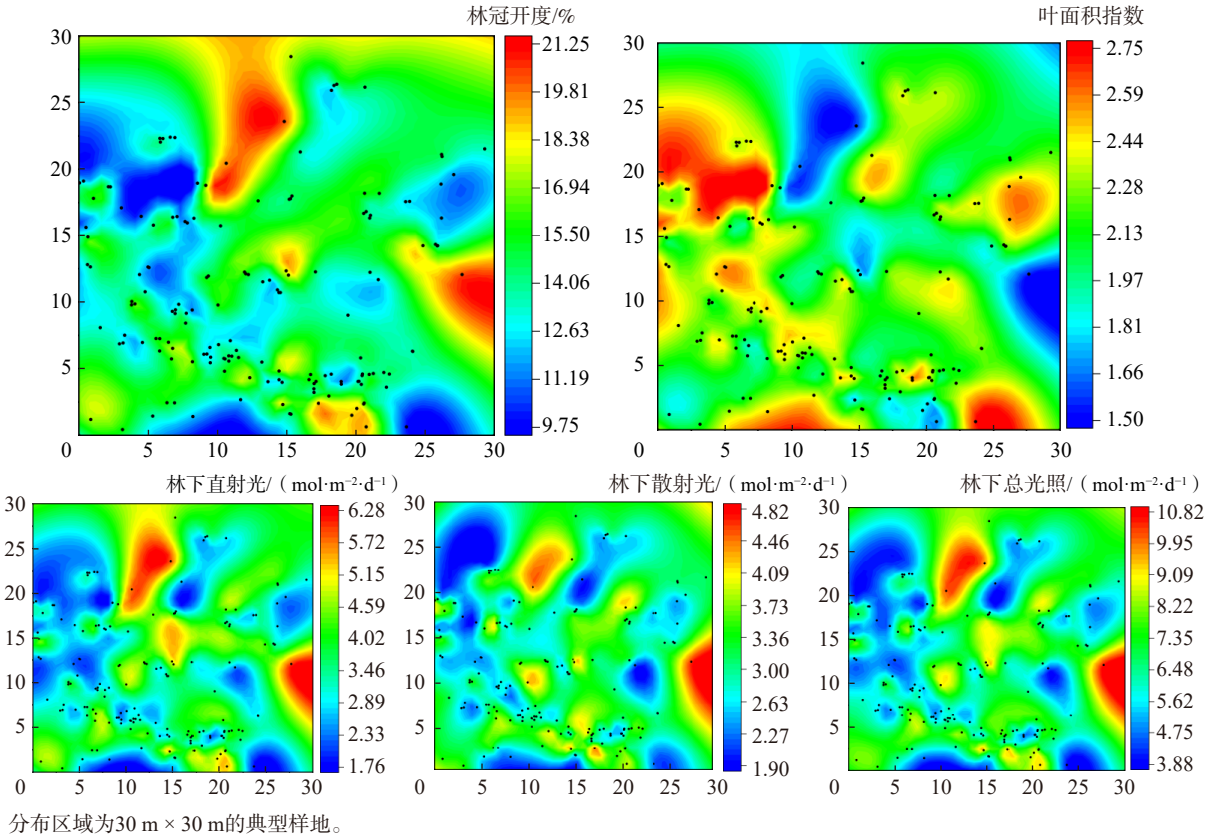


图 4 冠层因子及林下光照分布

Fig. 4 Distribution of canopy factors and understory light

树高生长的促进作用存在阈值(直射光透过率大于0.20，散射光和总光照透过率大于 0.15)。姚华忆等[17]研究表明，当林分郁闭度在 0.5 时，林下红豆树(*Ormosia hosiei*)幼树树高、地径的生长以及对矿物营养的利用是最好的。刘建霞等[18]研究表明，云杉林(*Picea asperata*)郁闭度大于 0.6 时有利于天然林林下大黄(*Rheum tamguticum*)株高、地径的增长。刘子萱等[7]研究表明，林下光照指数在超过 0.5 这个临界值时，幼树生长与光照指数大小呈显著线性关系。这些结论与本研究的发现相互印证，共同揭示了林下弱光环境对植物生长的限制作用。值得注意的是，不同树种对低光照条件的适应策略存在分化。有些树种幼苗幼树在弱光条件下通过改变叶片大小以及改变植物内光合色素的含量来增加幼苗幼树的光合作用[19]，如罗奇辉[20]研究表明，兴安落叶松(*Larix gmelinii*)幼树在遮阴条件下光合色素含量增加。虽然前期研究均表明林下光照对幼苗幼树生长存在阈值效应，但郁闭度仅能定性反映光照影响，光照指数虽可定量表征光照强度对生长的影响，但其计算过程较为复杂。相比之下，本研究选取的光照透过率通过简单计算即可实现林下光照的定量评估。

3.2 林下光照对幼苗幼树地径和树高影响的差异

一般认为，较好的林下光环境有利于幼树地径、树高的增长[21]，栓皮栎幼苗幼树的生长与光环境的关系也符合这一规律。本研究发现，在同一光照条件下，幼苗幼树的地径、树高在某一范围内变化，即生长变异范围(W 值)。这一现象是由多种因素共同导致，包括环境异质性以及幼苗幼树的形态可塑性等[22]。从光照类型来看，地径生长的变异范围在总光照条件下最大(W = 2.4 cm)，其次是散射光(W = 2.2 cm)，直射光下最小(W = 2.0 cm)，这种变异范围差异性可以归因于不同光照类型对植物生长的非均一性影响。直射光穿过冠层，光照强度出现明显的斑块化差异，弱光区与强光区并存，但是强光区会引发幼苗幼树的光抑制效应，从而使得个体在生长上表现出相对一致性，这与黄慧敏等[23]研究结果一致；而散射光由于森林冠层对阳光的多重散射作用，使其在林下具有较好的空间分布均匀性，能够为不同冠高的幼苗幼树提供光合有效辐射，从而支持更广泛的幼苗幼树生长策略，这与段嘉瑞[24]的研究结果一致。相比之下，在不同光照类型下，树高生长的变异范围均保持较窄且稳定的状态(W = 1.6 m)，这可能与树高生长策略有关。在弱光环境下，植物通常优先将资源分配给垂直生长，以获得更多的光照竞争优势，这一策略可能受较强的遗传调控或生理约束，这与冉春燕等[25]研究结果一致。值得注意的是，

在地径的大径级区，光照出现数据离散现象，这是因为随着个体增大，其他环境因子（如土壤养分、水分竞争）或生物因子（如个体间竞争）的影响逐渐增强，而光照的影响相应减弱。

另外，林下光照与幼苗幼树的地径、树高（苗高）线性拟合表明：林下总光照对幼苗幼树的生长作用最大，散射光居中，直射光最小，这一研究结果与张志[26]的研究结果一致。黄慧敏等[23]对紫耳箭竹（*Fargesia decurvata*）种群的研究表明，林下直射光是林下辐射的主要类型，这是由于该研究的林冠开度较大（平均值 23% 左右），直射光对幼苗幼树树高、地径生长的影响较大，而本研究的林冠开度较小（平均值 14% 左右），散射光分布得更均匀，散射光对幼苗幼树树高、地径生长的影响相对更大。因此，后续可以根据林下幼苗幼树对不同类型光照的需求，通过轻度疏伐（如伐除弱势木、衰老木以及非目标树种），来调节林冠开度，将林分直射光透过率调整至 > 0.20，同时使散射光与总光照透过率 > 0.15；或在此类光条件达标的林下位置，挖掘鱼鳞坑以保持土壤水分，为种子萌发与幼苗生长创造有利微生境，从而有利于人工促进森林更新。

3.3　林下光照对幼苗幼树空间分布的影响

林下光环境在森林更新和演替过程中发挥着重要作用，而冠层结构是影响林内光照的关键因素。本文通过对栓皮栎林冠层结构、林下光环境和幼苗幼树分布格局的影响进行研究，发现冠层结构通过调控林内光环境，影响林下幼苗和幼树的空间分布。研究结果表明，林冠开度与叶面积指数呈负相关关系，而与林下光照分布呈正相关，这一发现与张彦雷等[27]的研究结果一致。此外，样地内的幼苗幼树主要分布在光照较弱的区域。尽管理论上，高光照区域更有利于幼苗幼树生长，但实际观测数据显示这些区域的幼苗幼树密度反而较低，该观测结果与杜昕等[8]研究结果一致。这可能源于两方面机制：一是高强度光照加剧了种内竞争，仅有少数竞争力强的个体能够存活；二是过强的光照加速了土壤水分蒸发，使幼苗面临干旱胁迫[28]。值得注意的是，南向方位区域虽然光照条件并非最优，但幼苗幼树分布密度较高，表明该区域的光照、水分等环境因子达到了相对理想的平衡状态。相比之下，北向方位区域虽然具备较优的光照条件，却几乎未观测到幼苗幼树的分布，这主要归因于 2023 年北京暴雨引发的山体滑坡，导致该区域地表覆盖大量碎石，土壤条件恶化，严重限制了幼苗幼树的定居与生长。这一空间分布格局充分揭示了光照、水分、土壤条件以及自然干扰事件在共同调控栓皮栎幼苗空间分布中的关键作用。适度的光照条件更有利于森林的天然更新，但不同树种及生长阶段对光照的需求存在显著差异。例如，王荣等[29]指出，阳性树种（如枫香）幼苗幼树生长更适应于高光环境；而罗奇辉[20]研究表明，兴安落叶松幼苗期需要较强的光照支持其早期发育，而进入幼树阶段后则偏好弱光环境。因此，合理的林冠开度能够优化林内光环境，从而促进林下更新。在后续森林抚育管理中，应结合目标树种的生态特性与更新阶段，优化林冠密度，从而营造有利于幼苗幼树生长的光照环境，以促进森林更新和提升林分结构稳定性。

4　结　　论

本研究以北京西山栓皮栎人工林为研究对象，针对林下光照对幼苗幼树生长的影响机制不清，光照类型作用差异不明，以及促进更新缺乏具体光环境阈值依据等问题，利用双因素方差分析和线性回归等方法，重点研究了不同光照类型（直射光、散射光与总光照）以及不同光照透过率对栓皮栎幼苗幼树地径与树高生长的影响，明确了其促进幼苗幼树生长的关键光照透过率阈值及不同类型光照的作用差异。研究得到以下结论。

（1）揭示了林下光照促进栓皮栎幼苗幼树生长存在明确的阈值效应：当林下散射光透过率和总光照透过率超过 0.15，且直射光透过率超过 0.20 时，栓皮栎幼苗幼树的地径和树高生长均开始随光照增加而出现显著提升。

（2）阐明了不同光照类型对幼苗幼树生长的影响强度与特点存在差异：总体而言，总光照和散射光相比直射光具有更优的生长促进效果，其中对树高生长的促进作用尤为显著。

（3）提出了基于光环境调控促进更新的措施：可通过轻度疏伐，如人工采伐病弱木、衰老木以及非目标树种，来调节林冠开度，将林分直射光透过率调整至 > 0.20，同时使散射光与总光照透过率 > 0.15，有效促进林下更新。

本研究结果为促进华北地区栓皮栎人工林的林下更新及森林结构优化提供了直接的科学依据和可操作的技术参数。未来可进一步长期跟踪不同疏伐强度下的光环境与种群更新动态，并可将此光照阈值体系在其他地区及树种中进行验证与推广，以完善人工林林下更新技术体系。

参　考　文　献

[1] Ashton M S , Larson B C. Germination and seedling growth of *Quercus* (Section *Erythrobalanus*) across openings in a mixed-

deciduous forest of southern New England, USA[J]. Forest Ecology & Management, 1996, 80(1−3): 81−94.

[2] 马莉薇, 张文辉, 薛瑶芹, 等. 秦岭北坡不同生境栓皮栎实生苗生长及其影响因素 [J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6512−6520.
Ma L W, Zhang W H, Xue Y Q, et al. Growth characteristics and influencing factors of *Quercus variabilis* seedlings on the north slope of Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6512−6520.

[3] Annika P, Beaton J K, Stockan J A, et al. Tree nursery environments and their effect on early trait variation[J]. Forestry: An International Journal of Forest Research, 2025: 1−12.

[4] Chao K J , Lin Y C , Song G Z M , et al. Understorey light environment impacts on seedling establishment and growth in a typhoon-disturbed tropical forest[J]. Plant Ecology, 2022, 223(8): 1007−1021.

[5] Parelle J , Roudaut J P , Ducrey M. Light acclimation and photosynthetic response of beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings under artificial shading or natural Mediterranean conditions[J]. Annals of Forest Science, 2006, 63(3): 257−266.

[6] 董莉莉, 张慧东, 毛沂新, 等. 间伐对红松 *Pinus koraiensis* 针阔混交林冠层结构及林下植被的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 159−165.
Dong L L, Zhang H D, Mao Y X, et al. Influence of thinning on canopy structure and understory vegetation of coniferous-broad leaved *Pinus koraiensis* mixed forest[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(2): 159−165.

[7] 刘子宣, 贾存, 秦志强, 等. 华北落叶松林下光环境对白扦幼树生长的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(6): 111−117.
Liu Z X, Jia C, Qin Z Q, et al. Effects of light conditions on the growth of understory *Picea meyeri* sapling in *Larix principis-rupprechtii* forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(6): 111−117.

[8] 杜昕, 董雪, 谷会岩, 等. 阔叶红松林下幼苗、幼树定植生境散射辐射特征 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(6): 145−156.
Du X, Dong X, Gu H Y, et al. Diffuse radiation environment of regeneration seedlings andsaplings under a broadleaved-Korean pine forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(6): 145−156.

[9] 刘琳奇, 李扬, 王谦, 等. 栓皮栎实生幼苗生长发育动态特征 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 86−92.
Liu L Q, Li Y, Wang Q, et al. Dynamic characteristics of *Quercus variabilis* seedling growth[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(5): 86−92.

[10] 高文强, 倪妍妍, 刘建锋, 等. 不同地理区域栓皮栎种群结构及其空间格局 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 375−381.
Gao W Q, Ni Y Y, Liu J F, et al. Population structure and spatial pattern of *Quercus variabilis* among different geographical areas [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 375−381.

[11] 马莉薇, 张文辉, 周建云, 等. 秦岭北坡林窗大小对栓皮栎实生幼苗生长发育的影响 [J]. 林业科学, 2013, 49(12): 43−50.
Ma L W, Zhang W H, Zhou J Y, et al. Effects of forest gap size on the growth of *Quercus variabilis* seedlings on north slopes of the Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(12): 43−50.

[12] 卢欣艳. 北京西山森林火险影响因素时空规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
Lu X Y. The spatial and temporal rules of forest fire factors in Beijing Xishan centre[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.

[13] 高敏. 基于抚育间伐的北京西山林场侧柏林可燃物调控影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Gao M. Study on fuel regulation effect of *Platycladus orientalis* forest in Beijing Xishan Forest Farm based on thinning[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[14] 李晖, 杨华, 谢榕. 长白山云冷杉林林隙冠层特征及与幼苗幼树的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(7): 54−62.
Li H, Yang H, Xie R. Canopy characteristics in gaps and its relationship with seedlings and saplings in a spruce-fir forest in the Changbai Mountain area of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(7): 54−62.

[15] 王千雪, 万盼, 刘灵, 等. 兴安落叶松天然林林木直径与树高分布的分层特征 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(5): 82−90.
Wang Q X, Wan P, Liu L, et al. The layered characteristics of DBH and height distribution of *Larix gmelini* nature forest[J]. Forest Research, 2018, 31(5): 82−90.

[16] 赵国华, 李厦, 尤海舟, 等. 光照胁迫对栓皮栎幼苗叶片解剖结构的影响 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50(23): 103−105,139.
Zhao G H, Li S, You H Z, et al. Effects of light stress on leaf anatomical structure of *Quercus variabilis*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(23): 103−105,139.

[17] 姚华忆, 谢义春, 王碧艳, 等. 郁闭度对柳杉人工林下红豆树幼树生长和矿质营养的影响 [J]. 贵州科学, 2024, 42(3): 23−27.
Yao H Y, Xie Y C, Wang B Y, et al. Effects of canopy closure on the growth and mineral nutrition of *Ormosia hosiei* saplings under *Cryptomeria fortunei* plantation[J]. Guizhou Science, 2024, 42(3): 23−27.

[18] 刘建霞, 黄睿, 单凤娇, 等. 郁闭度和海拔梯度对天然林林下大黄生长的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(3): 24−30.
Liu J X, Huang R, Shan F J, et al. The effects of canopy density and elevation gradient on the growth of *Rheum officinale* in natural forest understories[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(3): 24−30.

[19] 赵佳宝. 不同环境条件下栓皮栎幼苗的生理生态响应研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
Zhao J B. Physiological and ecological responses of *Quercus variabilis* seedlings under different environmental conditions[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.

[20] 罗奇辉. 遮阴对兴安落叶松幼苗幼树光合特性影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
Luo Q H. Effects of shading on photosynthetic characteristics of *Larix gmelinii* seedlings and saplings[D]. Hohhot: Inner Mongolia

Agricultural University, 2023.

[21] 朱凯月, 王庆成, 吴文娟. 林隙大小对蒙古栎和水曲柳人工更新幼树生长和形态的影响 [J]. 林业科学, 2017, 53(4): 150−157.
Zhu K Y, Wang Q C, Wu W J. Effect of gap size on growth and morphology of transplanted saplings of *Quercus mongolica* and *Fraxinus mandshurica*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(4): 150−157.

[22] 郭志华, 王荣, 肖文发. 不同光环境下喜树与四川大头茶幼苗的表型可塑性 [J]. 林业科学, 2009, 45(9): 6−12.
Guo Z H, Wang R, Xiao W F. Phenotypic plasticity of the seedlings of *Camptotheca acuminata* and *Gordonia acuminata* under different light regimes[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9): 6−12.

[23] 黄慧敏, 董蓉, 何丹妮, 等. 冠层结构和光环境的时空变化对紫耳箭竹种群特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2129−2138.
Huang H M, Dong R, He D N, et al. Effects of temporal and spatial variation of canopy structures and light conditions on population characteristics of *Fargesia decurvata*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2129−2138.

[24] 段嘉瑞. 灵空山松栎混交林群落光环境特征及其对幼苗存活的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
Duan J R. Light environment characteristics of pine-oak mixed forest community in Lingkong Mountain and its effect on seedling survival[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.

[25] 冉春燕, 陶建平, 宋利霞. 喜树 (*Camptotheca acuminata*) 幼苗形态和光合作用对不同光环境的适应 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2006, 31(2): 142−146.
Ran C Y, Tao J P, Song L X. Morphological and photosynthetic acclimation to different canopy conditions in seedlings of *Canptotheca acuminate*[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2006, 31(2): 142−146.

[26] 张志. 云杉次生林林分空间结构对冠层及林内光照分布的影响 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2023.
Zhang Z. The influence of spatial structure of *Picea asperata* secondary forest stand on canopy and light distribution within the forest[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023.

[27] 张彦雷, 康峰峰, 韩海荣, 等. 太岳山油松人工林冠下光环境特征与冠层结构 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2014, 38(2): 169−174.
Zhang Y L, Kang F F, Han H R, et al. Measurement and analysis on understory light environment and canopy structure of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Taiyue Mountain[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(2): 169−174.

[28] 陈梦园. 两个种源栓皮栎幼苗生长对干旱胁迫的响应及生理机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
Chen M Y. Responses and physiological mechanism of seedling growth of two provenances of *Quercus variabilis* to drought stress[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.

[29] 王荣, 郭志华. 不同光环境下枫香幼苗的叶片解剖结构 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1719−1724.
Wang R, Guo Z H. Responses of seedling leaf anatomical structure of *Liquidambar formosana*, a deciduous broadleaf tree to different light regimes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(11): 1719−1724.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　孟　平）