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

林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响

周来 程小芳 张梦

Effects of forest gaps on understory species diversity of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest

Zhou Lai, Cheng Xiaofang, Zhang Mengtao

引用本文:
周来, 程小芳, 张梦. 林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6):48–56. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220223
Zhou Lai, Cheng Xiaofang, Zhang Mengtao. Effects of forest gaps on understory species diversity of *Larix principis–rupprechtii* natural secondary forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):48–56. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220223

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220223

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

山西华北落叶松群落物种多样性
Species diversity of *Larix principis–rupprechtii* communities in Shanxi Province of northern China
北京林业大学学报, 2017, 39(6): 45–50. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170067

长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响
Effects of species diversity and structural diversity on productivity in different succession stages of typical natural forest in Changbai Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210071

塞罕坝华北落叶松纯林和混交林土壤肥力质量评价
Soil fertility quality evaluation of pure and mixed *Larix principis–rupprechtii* forests in Saihanba, Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(8): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210189

间伐强度对落叶松次生林冠层结构和林内光环境的影响
Influence of thinning intensity on canopy structure and light environment inside *Larix gmelinii* secondary forest
北京林业大学学报, 2018, 40(10): 11–23. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180021

华北落叶松人工林间伐后9～10年林下天然更新研究
Natural regeneration of *Larix principis–rupprechtii* plantations in 910 years after thinning
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 17–28. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200371

不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响
Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200322

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220223

林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响

周 来 程小芳 张梦弢
（山西农业大学林学院，山西 太谷 030801）

摘要:【目的】研究华北落叶松天然次生林林窗大小和光因子对林下植被多样性的影响，为森林物种多样性的保护和可持续经营提供科学依据。**【方法】**以关帝山华北落叶松天然次生林为研究对象，按面积等级选取 12 个林窗，于各林窗内设置 3 个 5 m × 5 m 样方，以调查样方中的灌木。同时，在每个 5 m × 5 m 样方内设置 1 个 1 m × 1 m 的草本调查样方。设置 12 个面积相同的林内对照样方（CK），并采用同样的方法调查植被。应用 Simpson 优势度指数（H'）、Shannon-Wiener 指数（H）、Pielou 均匀度指数（J_{sw}）、Margalef 丰富度指数（D）4 种多样性指标，分析华北落叶松天然次生林不同面积等级林窗中物种组成及物种多样性的差异。调查不同面积林窗的光因子指标，并分析华北落叶松天然次生林不同面积林窗中光因子与物种多样性的关系。**【结果】**在调查的 12 个林窗中，共记录到灌木植物 8 种，草本植物 32 种。林窗草本层的物种多样性指数均大于林内，而灌木层的物种多样性指数仅有Ⅲ级林窗和Ⅳ级林窗大于林内；对于灌木层，随着林窗面积的增大，H 值呈现先增高后降低趋势，其中Ⅲ级林窗内的 H 值最大，Ⅰ级林窗内的 H 值最小，均大于 CK，但草本层的 H'指数与林窗面积存在显著相关性（$P < 0.05$）。对于草本层，H、H'、J_{sw}、D 在小林窗最大，随林窗面积增大而逐渐减小，但均大于 CK。草本层的 D 值较灌木层高，其随林窗面积增加的变化趋势比灌木层更加明显。林窗内的直射辐射量、散射辐射量和总辐射量随着林窗面积的增大而显著变化（$P < 0.05$）。随着林窗面积的增大散射辐射量和总辐射量也随之增大，而直接辐射量是随着林窗的面积增大先减小后增大，在林窗面积为 50 ~ 100 m^2 时，直接辐射量最小。**【结论】**林窗面积在 100 ~ 150 m^2 时有利于提升灌木层的物种多样性水平，在 0 ~ 50 m^2 时有利于提升草本层的物种多样性水平，而在 50 ~ 100 m^2 林下群落物种丰富度最高；林窗内适宜的光因子有利于增加林下植被物种多样性，而过高的光因子反而不利于林下植被多样性的形成。华北落叶松天然次生林林下物种多样性保护过程中，应以中小面积的林窗为主。

关键词：森林生态；林窗；光因子；物种多样性；天然次生林；华北落叶松
中图分类号：S757.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)06−0048−09
引文格式：周来，程小芳，张梦弢. 林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响［J］. 北京林业大学学报，2024, 46(6): 48−56. Zhou Lai, Cheng Xiaofang, Zhang Mengtao. Effects of forest gaps on understory species diversity of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 48−56.

Effects of forest gaps on understory species diversity of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest

Zhou Lai Cheng Xiaofang Zhang Mengtao
(Department of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

Abstract: ［**Objective**］ The aim of this study was to study the effects of gap size and light factor on understory plant diversity in the *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest. ［**Method**］ Taking the natural secondary *Larix principis-rupprechtii* forest in Guandi Mountain of northern China as the research object, 12 gaps were selected according to the area grade, and three 5 m × 5 m quadrats were set in each gap to investigate the shrubs in the quadrats. Each 5 m × 5 m quadrat was set up with a 1 m × 1 m herb investigation quadrat, and another 12 forest control checks (CK) with the same area were set up to

收稿日期: 2022−06−03 **修回日期:** 2022−08−24
基金项目: 山西省优秀博士资助项目（SXBYKY2021065），山西农业大学博士科研启动项目（2021BQ15），山西省高等学校科技创新项目（2021L138），国家自然科学基金青年科学基金项目（31901308），北京林业大学中央高校基本科研业务费专项（BFUKF202304）。
第一作者: 周来，博士，讲师。主要研究方向：森林经营理论与技术、森林结构与生长模拟。Email: zhoulai807@126.com 地址：030801 山西省晋中市太谷区铭贤南路 1 号。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

investigate vegetation in the same way. Four diversity indicators, Simpson dominance index, Shannon-Wiener index, Pielou evenness index, and Margalef richness index were used to analyze the differences in species composition and species diversity in different area grades of the *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest. We investigated the light factor indicators of different areas of forest gaps, and analyzed the relationship between light factors and species diversity in different areas of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest. [**Result**] In the 12 forest gaps investigated, a total of 8 species of shrubs and 32 species of herbaceous plants were recorded. The species diversity index of the herb layer in the gap was larger than that in the forest, while the species diversity index of the shrub layer was only higher than the forest gap of grade Ⅲ and grade Ⅳ. In the shrub layer, with the increase of the gap area, the *H* value of the Shannon-Wiener index showed a trend of first increasing and then decreasing. The *H* value was the smallest, and both were greater than CK, but there was a significant correlation between the *H*′ index of the herb layer and the gap area ($P < 0.05$). In the herb layer, the Shannon-Wiener index *H*, Simpson index *H*′, Pielou evenness index J_{sw}, and Margalef abundance index *D* were the largest in the small gap, and gradually decreased with the increase of gap area, but it was higher than CK. The *D* value of the herb layer was higher than that of the shrub layer, and the changing trend of the *D* value of herb layer with the increase of the gap area was more obvious than that of the shrub layer. The direct radiation, scattered radiation and total radiation in the gap changed significantly with the increase of the gap area ($P < 0.05$). With the increase of gap area, the amount of scattered radiation and total radiation also increased, and the amount of direct radiation was reduced first and then increased as the area of the forest gap increased, and the direct radiation was the smallest when the forest gap area was 70−100 m^2. [**Conclusion**] When the forest gap area is 100−150 m^2, it is beneficial to improve the species diversity level of the shrub layer, and it is beneficial to improve the species diversity level of the herb layer when it is 0−50 m^2, and the species richness of the understory community is the highest in 50−100 m^2. Appropriate light factors in forest gaps are beneficial to increase the diversity of understory vegetation species, however, too high light factor is not conducive to the formation of understory vegetation diversity. Therefore, in the process of protection of forest species diversity of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forests, small and medium-sized gaps should be the focuses.

Key words: forest ecology; forest gap; light factor; species diversity; natural secondary forest; *Larix principis-rupprechtii*

生物多样性是指生物体与其所处的生态系统的组合，伴随着多种相关的生态进程，是人类生活的基础，其潜能影响着人类生存和发展的未来[1]。物种多样性是生态系统的主要特征之一，是种群数量和分布均匀程度的量化，反映其结构的复杂性[2]。群落种类的多样化，既是其内部结构与空间上的异质，又是其功能的主要特点，受国内外学者广泛关注[3]。

林窗作为影响物种多样性的重要因素之一，在森林植被演替与循环[4]、维持生物多样性、稳定森林群落结构方面发挥着重要作用[5−6]。林窗面积影响着林窗中微生境因子的变化，是林窗的最基本特征之一[7]。林窗在林中不同地区分布造成林间生态系统的异质性[8]，同时，林下植被的异质资源能为林下植被植物的种类更新提供有效资源和空间[9−10]，进而促进林下植被种类更新[11−12]。光因子为林窗生态环境的重要生态因子之一，影响其他生态环境因素，如林地温度、湿度、土壤养分状况等。林窗内部生态环境研究是研究林窗干扰和林窗内更新的基础。了解林窗内部生态因子的特征及变化规律、影响因素有利于揭示林窗内更新机制。通过对林窗干扰、林窗生态因子变化规律及森林树种生物学特性的综合分析，可以实现对森林群落的物质共存、动态更新及多样性维持机制进行深入的探究[13]。

我国对林窗的研究在南方较多，相关研究大多关注林窗面积特征及其林分环境因子特征方面。臧润国等[14]对不同面积大小、不同生长期的热带常绿阔叶林林隙中的树种多样性进行分析，研究发现林隙中的植物多样性随林隙年龄的增大而呈现出明显的递减趋势。赵秀海等[15]分析了我国阔叶红松（*Pinus koraiensis*）林林隙大小、发育阶段与林隙内树种多样性之间的相关关系，研究发现林隙大小与林隙内树种多样性之间存在着显著相关性。崔宁洁等[12]对马尾松（*Pinus massoniana*）人工林林窗大小及季节变化与树种多样性之间的关系进行了分析，认为林

窗大小对其内部植物的物种组成和丰富度具有重要影响。以上研究主要关注了林窗面积及发展动态对其内部植被特征的影响。

国外林窗研究的研究对象多是热带和亚热带森林。Naaf 等[16]探究了林窗大小、光照以及食草动物对欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)林草本层植被的影响，结果显示物种数量随着林窗大小和光照可用性的增加而增加；食草动物减少了树木再生，从而降低了竞争，也导致了物种数量增加。Shabani 等[17]分析了生境因素对林窗物种多样性的影响，发现海拔与生物多样性具有显著的相关性。Brandani 等[18]研究了热带湿润森林林窗的内部异质性以及对物种丰富度的维持作用。Barik等[19]研究了亚热带阔叶森林林窗和林下的微环境变化及其对物种多样性的影响，指出林窗大小变化引起的光照和水分状况变化对耐荫和不耐荫树种组成和丰富度产生重要影响。Pedersen 等[20]探究了成熟混交林林窗对地上树木和森林生长速率的影响，结果表明林窗虽然增加了物种多样性，但森林增长率却明显下降。这些研究表明，林窗内生态因子对林下植被生长的重要性，尤其是光照因子。

目前，我国北方有关林窗干扰的研究较少，特别是不同大小林窗对物种多样性影响的生态机制。此外，国内关于光环境因子对林下植被影响的研究也较少，且多是从光环境因子或森林群落其他特征进行单方面分析[21−22]。因此，本研究探讨了关帝山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)天然次生林林窗大小对林下植被多样性的影响，同时分析等级林窗内部光因子与林下植被物种多样性之间的关系，揭示林下植被生物多样性的形成和维持机制，以期为森林群落物种多样性的保护和可持续经营提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省庞泉沟国家级自然保护区(111°22′ ~ 111°33′E，37°45′ ~ 37°55′N)。该区地处吕梁山脉中段，海拔 1 500 ~ 2 831 m，最高峰孝文山，为关帝山的主峰。该区属于暖温带半湿润区，年均气温 4.3℃，相对湿度 70%，年均降水量 820 mm 左右，无霜期 180 d。区内的植被类型为寒温性针叶混交林、针阔混交林和温性阔叶混交林。主要的乔木树种有华北落叶松、云杉(*Picea asperata*)、山杨(*Populus davidiana*)、红桦(*Betula albosinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、油松(*Pinus tabuliformis*)等。主要的灌木树种有美蔷薇(*Rosa bella*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)等，草本植物以华北苔草(*Carex hancockiana*)、小红菊(*Chrysanthemum chanetii*)、野草莓(*Fragaria vesca*)等为主[2]。

1.2 林窗调查

在研究区域内分别选择海拔、坡度、坡向等环境因子相似，林窗形成木腐烂程度、形成方式基本一致的林窗，且各林窗间距大于 10 m[23]。林窗分布的海拔范围为 1 987.2 ~ 2 098.6 m，天然次生林林分平均胸径为 29.8 cm，平均高 25.6 m，平均坡度为 17.4°，坡向为西南，平均密度约为 325 株/hm^2。测量林窗长轴和短轴的长度，采用椭圆面积公式与海伦公式(Heron's formula)计算林窗面积[23]。结合前人对林窗面积的划分依据[24−25]及样地的实际林窗特征，将林窗面积划分为 4 个等级：0 ~ 50 m^2、50 ~ 100 m^2、100 ~ 150 m^2、150 ~ 250 m^2。每个面积等级内选择 3 个林窗(3 个重复)，共 12 个。各林窗内边缘正西南、中间、边缘正东北分别设置 5 m × 5 m 灌木调查样方，并于各 5 m × 5 m 样方中间位置设置 1 m × 1 m 的草本调查样方 1 个，在距林窗 10 m 外设置相同面积的林内对照样方(CK)，共 12 个。各对照样方内，按照同样的方式设置灌木及草本样方。共调查林窗灌木样方 36 个，草本样方 36 个，林内对照灌木样方 36 个，草本样方 36 个，共 144 个样方。

2 研究方法

2.1 林窗面积计算

按照研究区域内的林窗形状，分别用两种方法进行了分析。在一般或接近卵形的情况下，采用椭圆区域的方法，而在非规则或较大的情况下，采用海伦公式。

椭圆面积公式

$$A = \pi LW/4 \tag{1}$$

式中：A 为椭圆面积，L 为椭圆长轴，W 为椭圆短轴。

海伦公式

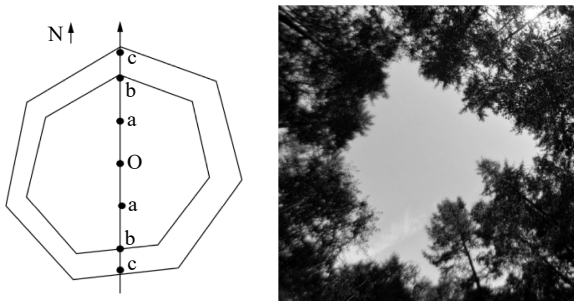
$$S_\Delta = [s(s-a)(s-b)(s-c)]/2 \tag{2}$$

式中：S_Δ为三角形面积，s 为半周长，a、b、c 为边长。

2.2 林窗光因子测定

采用半球摄影法对林窗冠层指标进行测定[26]。沿南北方向，分别于林窗中心、林冠边缘、林窗中心与林冠连线的中点和林冠下方布设图像采集点(图 1)。采集图像点的高度为距离地面 1.3 m。为了避免过度曝光对图像的影响，采集时段设定为 06:00—09:00，15:00—19:00[27]，并且在每个测量点至少拍摄 3 张照片。共拍摄 300 张冠层照片，选取 84 张进行

处理分析。利用 Gap Light Analyzer 2.0（GLA）软件对冠层图像进行数字化处理[28]，设定一组有关该测量点的经纬度、海拔、坡度、坡向等基础资料，并设定天顶角为 60°，得直接辐射（trans direct radiation，TDR）、散射辐射（trans diffuseradiation，TDF）和总辐射（trans total radiation，Tot）等光因子指标。



O.林窗中心；a.中心与冠缘连线中点；b.林冠边缘；c.林冠下。O, forest gap center; a, midpoint of the line between center and crown edge; b, canopy edge; c, under canopy.

图 1　冠层结构和光因子数据采集

Fig. 1　Canopy structure and light factor data acquisition

2.3　物种多样性测定

各样方内，测量并统计所有高度小于 3 m 的木本植物（含乔木幼苗幼树），以及草本植物（含草质藤本和蕨类植物）的物种名称、株（丛）数、冠幅（盖度）和高度。采用 α 多样性测量方法[3]中的 Simpson 优势度指数（H'）、Shannon-Wiener 指数（H）、Pielou 均匀度指数（J_{sw}）、Margalef 丰富度指数（D）计算灌木层、草本层的物种多样性指数综合测定华北落叶松天然次生林林下物种多样性。

$$H' = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2 \tag{3}$$

$$H = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \tag{4}$$

$$J_{sw} = \frac{-\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i}{\ln S} \tag{5}$$

$$D = (S-1)/\ln N \tag{6}$$

式中：$P_i = N_i/N$，表示第 i 个物种的个体数 N_i（i = 1，2，3，…，S）占所有物种的个体总数 N 的比例。其中，S 为样方内的物种数。

2.4　统计分析

运用 Microsoft Office Excel 2010 对林窗和样方数据进行整理与分析。在 SPSS 17.0 统计软件环境下，采用单因素方差分析法（One-way ANOVA）分析不同等级林窗间各多样性指数差异。利用 Excel 软件作图。

3　结果与分析

3.1　华北落叶松天然次生林林窗内灌草物种组成

林窗和非林窗林地样方灌草物种组成的调查结果见表 1、2。在灌木层中，共记录到植物 8 种，其中株（丛）数占比最多的前 5 个物种为美蔷薇、灰栒子、三裂绣线菊、小叶忍冬（*Lonicera microphylla*）、毛榛（*Corylus mandshurica*）。在草木层中，共记录到植物 32 种，其中株（丛）数占比最多的前 5 个物种为野草莓、小红菊、华北苔草、四叶葎（*Galium bungei*）和五福花（*Adoxa moschatellina*）。

在Ⅰ级林窗中，数量最多的灌木植物为美蔷薇，占比达 39.47%，而数量最多的草本植物为野草莓，占比达 36.57%。Ⅱ级林窗中，最常见的灌木植物是灰栒子，占比为 38.75%，最多的草本植物为小红菊，占比达 29.89%。Ⅲ级林窗中数量最多的灌木植物为灰栒子，占比达 35.48%，最多的草本植物为野草莓，也占比为 35.24%。Ⅳ级林窗中数量最多的灌木植物为灰栒子，占比高达 43.56%，最多的草本植物为小红菊，占比高达 48.91%。林内对照组（CK）中数量最多的灌木植物为灰栒子，占比高达 51.11%，最多的草本植物为华北苔草，占比为 45.94%。

3.2　不同面积等级林窗灌草物种多样性的比较

根据 α 多样性测度方法[3]中的 H'、H、J_{sw}、D 等 4 个指标计算华北落叶松天然次生林林窗与林下物种

表 1　不同林窗等级华北落叶松天然次生林灌木层主要植物株（丛）数占比

Tab. 1　Proportion of main plants in shrub layer of natural secondary forest of *Larix principis-rupprechtii* in different forest gap grades　　%

物种 Species	林窗等级 Forest gap grade				CK
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
美蔷薇 *Rosa bella*	39.47	31.25	12.90	21.78	24.44
灰栒子 *Cotoneaster acutifolius*	34.21	38.75	35.48	43.56	51.11
三裂绣线菊 *Spiraea trilobata*	18.42	6.25	17.35	11.88	6.60
小叶忍冬 *Lonicera microphylla*	7.90	22.50	24.19	10.89	2.20
毛榛 *Corylus mandshurica*	0.00	0.00	4.84	7.92	15.56
合计Total	100.00	98.75	94.76	96.03	99.91

注：Ⅰ~Ⅳ表示林窗面积分别为0 ~ 50 m^2、50 ~ 100 m^2、100 ~ 150 m^2、150 ~ 250 m^2。下同。Notes: Ⅰ−Ⅳ represent the forest gap areas are 0−50 m^2, 50−100 m^2, 100−150 m^2, 150−250 m^2, respectively. The same below.

表 2 不同林窗等级华北落叶松天然次生林草木层主要植物株（丛）数占比

Tab. 2 Proportion of main plants in herb layer of natural secondary forest of *Larix principis-rupprechtii* in different forest gap grades

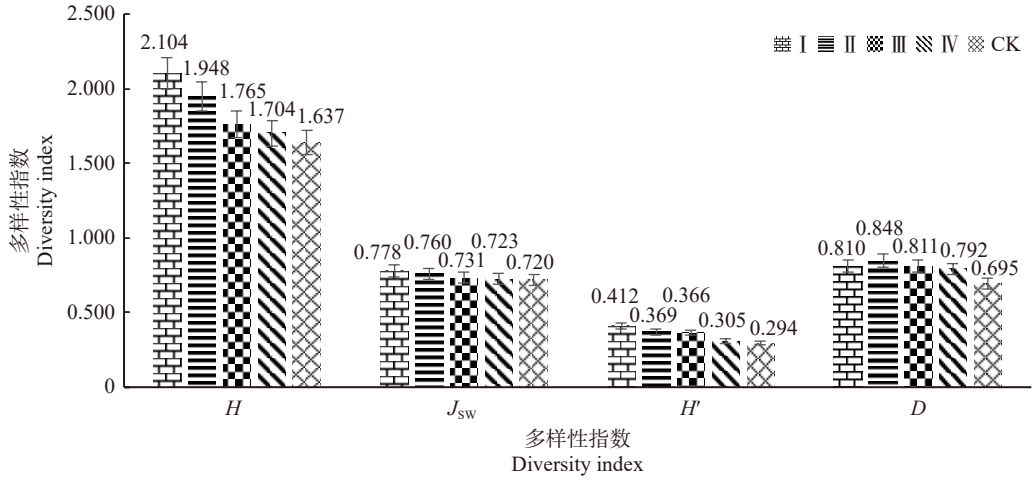
%

物种 Species	林窗等级 Forest gap grade				CK
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
野草莓 *Fragaria vesca*	36.57	15.76	35.24	0.00	0.00
小红菊 *Chrysanthemum chanetii*	10.49	29.89	14.58	48.91	31.53
华北苔草 *Carex hancockiana*	15.35	26.63	20.14	34.30	45.94
四叶葎 *Galium bungei*	3.06	9.23	4.51	1.46	4.51
五福花 *Adoxa moschatellina*	15.35	0.00	7.29	3.64	0.00
合计Total	80.82	81.51	81.76	88.31	81.98

多样性指数（图 2、3），结果表明，总体来看林窗内的物种多样性水平高于非林窗物种多样性水平，林窗的形成在一定程度上促进了群落物种多样性水平的提高。

3.2.1 Shannon-Wiener 指数

在灌木层中，随着林窗面积的增大，*H* 值呈现出先增大后减小的趋势，其中以Ⅲ级林窗的 *H* 值最大，Ⅰ级林窗的 *H* 值最小，不同面积等级林窗灌木 Shannon-Wiener 指数变化范围为 1.408 ~ 1.775，均大于 CK。呈现出Ⅲ级（1.775）> Ⅳ级（1.444）> Ⅱ级（1.434）> Ⅰ级（1.408）> CK（1.269）趋势，表明面积大的林窗相对更有利于提高群落的物种多样性水平；对于草本层，不同面积林窗草本 Shannon-Wiener 指数的变化范围为 1.704 ~ 2.104，也均大于 CK。*H* 值在小林窗最大，随着林窗面积的增大而逐渐减小，整体表现为Ⅰ级（2.104）> Ⅱ级（1.948）> Ⅲ级（1.765）> Ⅳ级（1.704）> CK（1.637）。



H. Shannon-Wiener 指数；J_{sw}. Pielou 均匀度指数；*H*′. Simpson 优势度指数；*D*. Margalef 丰富度指数。下同。*H*, Shannon-Wiener index; J_{sw}, Pielou evenness index; *H*′, Simpson dominance index; *D*, Margalef richness index. The same below.

图 2 华北落叶松天然次生林不同面积等级林窗内灌木层物种多样性的比较

Fig. 2 Comparison of species diversity of shrub layer in different area grades of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest

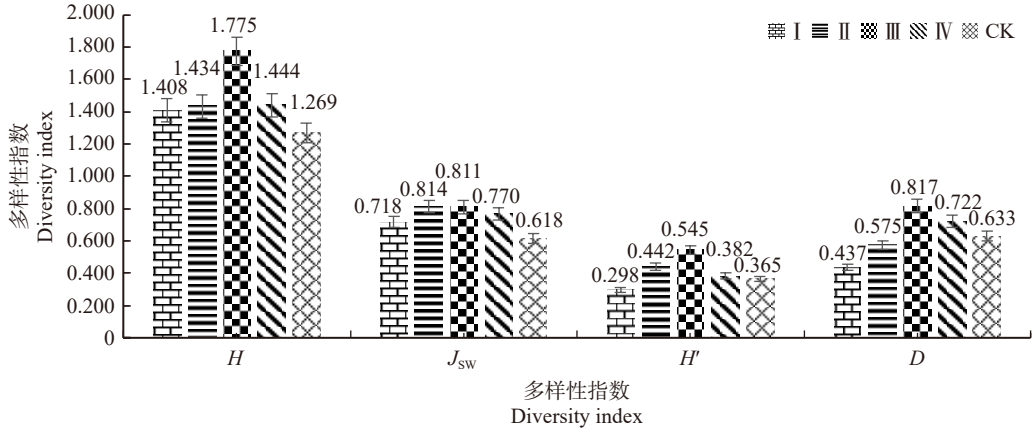


图 3 华北落叶松天然次生林不同面积等级林窗内草本层物种多样性的比较

Fig. 3 Comparison of species diversity of herb layer in different area grades of *Larix principis-rupprechtii* natural secondary forest

3.2.2　Simpson 优势度指数

由图 2、3 中 H' 的变化趋势可知，随着林窗面积的增大灌木层的 H'值呈先增大后减小的变化趋势，其中以Ⅲ级林窗的 H'值最大，Ⅰ级林窗的 H'值最小，不同面积等级林窗灌木 Simpson 优势度指数的变化范围为 0.298 ~ 0.545，呈现出Ⅲ级（0.545）> Ⅱ级（0.442）> Ⅳ级（0.382）> CK（0.365）> Ⅰ级（0.298）趋势；在草本层中，H'值随林窗面积增加呈现出逐渐降低的变化趋势，不同面积林窗草本 Simpson 优势度指数的变化区间为 0.305 ~ 0.412，均大于 CK。整体表现为Ⅰ级（0.412）> Ⅱ级（0.369）> Ⅲ级（0.366）> Ⅳ级（0.305）> CK（0.294）。这表明林窗会增加森林群落的物种不稳定性，对于灌木层，大林窗内的物种不稳定性程度最高，而对于草本层，小林窗内的物种不稳定性程度最高。

3.2.3　Pielou 均匀度指数

随着林窗面积等级增加，灌木层 J_{sw} 值呈现先增加后降低的变化趋势，其中以Ⅱ级林窗的 J_{sw} 值最大，Ⅰ级林窗的 J_{sw} 值最小。不同面积林窗灌木 Pielou 均匀度指数变化范围为 0.718 ~ 0.814，均高于 CK。其大小顺序为Ⅱ级林窗（0.814）> Ⅲ级（0.811）> Ⅳ级（0.770）> Ⅰ级（0.718）> CK（0.618）趋势。表明林窗面积等级对灌木层物种均匀分布程度的影响存在差异，其中Ⅱ级林窗内物种均匀度最高；草本层中，不同面积等级林窗草本 Pielou 均匀度指数的变化范围为 0.723 ~ 0.778，也均大于 CK。整体表现为Ⅰ级（0.778）> Ⅱ级（0.760）> Ⅲ级（0.731）> Ⅳ级（0.723）> CK（0.720）。与灌木层相比，草本层群落的物种均匀度指数变化不大。总体上，Ⅰ级林窗和Ⅱ级林窗的 J_{sw} 值都比较大，表明在小林窗中，草本层的分布更为均匀。

3.2.4　Margalef 丰富度指数

不同面积等级的林窗内各层次 Margalef 丰富度指数 D 表现出明显差别，在灌木层中，随着林窗面积等级的增加，D 值的变化表现为先增加后降低的趋势，其中以Ⅲ级林窗的 D 值最大，Ⅰ级林窗的 D 值最小，不同面积林窗灌木 Margalef 丰富度指数的变化范围为 0.437 ~ 0.817，由大到小的顺序为Ⅲ级林窗（0.817）> Ⅳ级（0.722）> CK（0.633）> Ⅱ级（0.575）> Ⅰ级（0.437）。在草本层中，不同面积等级林窗草本 Margalef 丰富度指数最小值为 0.792，最大值 0.848，均大于 CK。D 值随林窗面积增大先增大后减小，整体表现为Ⅱ级（0.848）> Ⅲ级（0.811）> Ⅰ级（0.810）> Ⅳ级（0.792）> CK（0.695）。通过对灌木层与草本层的 D值进行对比分析发现，草本层的 D 值高于灌木层，且其 D 值随林窗面积等级的增加发生的变化更加明显，林窗对草本层物种数量的影响较灌木层更大。

3.3　不同面积等级林窗群落物种多样性相关性

通过对群落各层次植被的 4 个物种多样性指数进行相关分析（表 3）发现，灌木层和草本层物种多样性指数之间的相关性较弱（$P > 0.05$），但草本层的 H' 指数与林窗面积存在显著相关性（$P < 0.05$）；草本层的 J_{sw} 指数与 H 指数存在极显著相关性（$P < 0.01$）；灌木层和草本层的其他物种多样性指数均无显著相关性（$P > 0.05$）。表明灌草的 4 个物种多样性指数值不存在直接的关系。

3.4　不同面积等级林窗的光因子特征

不同面积等级林窗的光因子特征如表 4 所示。结果表明，林窗的存在对光因子产生了显著影响，直射辐射量、散射辐射量和总辐射量在不同面积的林窗内差异显著（$P < 0.05$）。随着林窗面积的增大散射

表 3　不同面积等级林窗华北落叶松天然次生林群落中物种多样性指数的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficients of species diversity index in natural secondary forest community of *Larix principis-rupprechtii* in different area grades

多样性指数 Diversity index	面积 Area	灌木层 Shrub layer (SL)				草本层 Herb layer (HL)			
		H	J_{sw}	*H'*	*D*	*H*	J_{sw}	*H'*	*D*
面积Area	1.000								
SL-*H*	0.172	1.000							
SL-J_{sw}	0.292	0.546	1.000						
SL-*H'*	0.266	0.856	0.901	1.000					
SL-*D*	0.740	0.772	0.672	0.813	1.000				
HL-*H*	−0.932	−0.493	−0.549	−0.592	−0.931	1.000			
HL-J_{sw}	−0.927	−0.523	−0.509	−0.583	−0.938	0.997**	1.000		
HL-*H'*	−0.974*	−0.030	−0.361	−0.236	−0.657	0.884	0.863	1.000	
HL-*D*	−0.572	−0.116	0.491	0.245	−0.308	0.432	0.484	0.406	1.000

注：*H*. Shannon-Wiener指数；J_{sw}. Pielou均匀度指数；*H'*. Simpson优势度指数；*D*. Margalef丰富度指数。*表示显著相关（$P < 0.05$）；**表示显著相关（$P < 0.01$）。Notes: *H*, Shannon-Wiener index; J_{sw}, Pielou evenness index; *H'*, Simpson dominance index; *D*, Margalef richness index. * indicates significant correlation at $P < 0.05$ level; ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level.

表 4 不同面积等级林窗内光因子变化

Tab. 4 Changes of light factors in gaps of different area grades

林窗面积 Forest gap size/m²	总辐射量 Total amount of radiation/%	直射辐射量 Direct solar radiation/%	散射辐射量 Diffuse solar radiation/%
0 ~ 50	14.29 ± 0.57[a]	10.69 ± 1.15[a]	19.03 ± 0.68[a]
50 ~ 100	15.17 ± 0.78[b]	8.97 ± 1.31[b]	22.41 ± 1.06[b]
100 ~ 150	19.96 ± 1.03[c]	12.56 ± 1.77[c]	28.74 ± 1.59[c]
150 ~ 250	24.35 ± 1.49[d]	15.92 ± 2.43[d]	32.81 ± 1.54[d]

注：表中数值表示平均值 ± 标准误差；不同字母表示不同林窗面积等级之间差异显著（显著性水平$\alpha = 0.05$）。Notes: values in the table represent mean ± standard error; different letters indicate significant differences between varied levels of forest gap area (significance level $\alpha = 0.05$).

辐射量和总辐射量也随之增大，而直射辐射量是随着林窗的面积增大先减小后增加，在林窗面积为 50 ~ 100 m² 时，直射辐射量最小。

4 讨论与结论

4.1 讨 论

群落的物种组成和种类是由群落内的物种与环境条件之间的相互作用决定的，这种相互作用也体现了不同环境条件下物种组成的差异[29]。林窗通过改善微环境，提高了部分物种的种子发芽率。因此，一些原本不能在林下自然更新的植物种类能够在林窗内生长，从而促进林下物种的更新[30−31]。随林窗面积等级的增加，灌木层的物种多样性指数呈现了先增加后降低的趋势，其中在林窗面积 100 ~ 150 m² 时达到最高。这一趋势与林窗内直射辐射量的变化趋势（先降低后增加）相反。这种现象可能是因为，相较于小林窗，中等大小的林窗在空间资源、光照和水分等方面都较为充足，为灌木的生长创造了有利环境，从而促进了灌木物种多样性水平提升。然而，过大面积的林窗导致直射辐射量过高（表 4），可能会造成水热分布不均，从而降低灌木层的物种多样性。林窗内草本层的各物种丰富度指数受林窗面积等级的影响则不完全相同。Simpson指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数在 0 ~ 50 m² 林窗面积等级时均达到最大值。然而，总体来看，随林窗面积等级的增大，各物种多样性指数呈现逐渐降低的趋势。周东等[29]的研究也得出了类似的结论。这一趋势与本研究中观察到的林窗内总辐射量和散射辐射量随着林窗面积等级增大而增大的趋势相反（表 4）。较大面积等级林窗的光环境条件更接近无林地或采伐空地，导致环境异质性也就相对较小，从而物种丰富度较低。此外，群落内部的种间资源和空间竞争也是影响因素[32]。研究表明，林窗内更新物种的种类、数量及其分布均匀程度受林窗大小的影响，存在一个最适更新的林窗面积范围[10,33]，其物种多样性水平最高。通过比较不同面积等级林窗内灌木和草本的优势种变化及其与林内对照组的对比，草本的优势种的类型受林窗面积等级的影响更为明显（表 1、2）。光质数据的变化也显示，草本植物对光照的响应比灌木更为敏感。

林窗中的光线因为树冠层的变化而更加复杂[34−35]，这不仅影响了土壤中有机物的降解和新陈代谢，也影响了植物光合作用。因此，对土壤有机质、林下植被的生长发育及其种类和结构产生了一定影响。相关研究表明，林窗内的光照和温度是影响植物生长生长发育的重要因素[36−37]。结果显示，林下直射辐射量、林下散射辐射量和林下总辐射量的相对增加有利于林下植物多样性的提升及其分布区域的扩大。然而，随着林窗面积的增大，虽然光因子也随着增加，物种多样性水平却逐渐减少（表 4，图 2、3）。这主要是因为过大的林窗面积导致光强过高，进而增加水分散失，降低植物的资源利用效率，总体上不利于群落发展[23]，从而降低物种多样性水平。

森林群落物种多样性的增加是增强森林群落稳定性的重要因素之一[38]。研究表明，中小尺度的林窗干扰对森林群落的物种丰富度有显著影响。由于生态系统的特点，自然干扰造成的林窗区域大小在不同区域间存在较大的差异[39−40]。本研究使用了 4 个物种多样性指标，对华北落叶松天然次生林的林窗和非林窗下的物种生物多样性进行了分析，揭示了林窗与非林窗条件下生物多样性的显著差异。然而，目前尚无有效方法能够充分反映出各种群间的差异，并将这些差异与种群的生物特性联系起来。此外，不同地区林窗的规模和数量也会对物种的多样性和富集程度产生一定的影响。

4.2 结 论

林窗面积等级不同，通过光因子影响林下植被的物种多样性。不同类型的光因子对灌木和草本多样性的影响存在差异。林窗面积在 100 ~ 150 m² 时有利于提升灌木层的物种多样性水平，在 0 ~ 50 m² 时有利于提升草本层的物种多样性水平，而在 50 ~ 100 m² 林下群落物种丰富度最高。适当的光因子有

利于增加林下植被物种多样性，但过高的光照因子反而不利于林下植被多样性的形成。在天然次生林的林下植被物种多样性保护过程中，林窗应以中小面积等级为主。

参 考 文 献

[1] 马克平, 钱迎倩. 生物多样性保护及其研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 1998, 4(1): 95−99.
Ma K P, Qian Y Q. Biodiversity conservation and its research progress[J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 1998, 4(1): 95−99.

[2] 周来. 落叶松天然林灌草多样性对林分乔木特征的响应 [J]. 森林与环境学报, 2023, 43(1): 44−51.
Zhou L. Response of shrub and herb biodiversity to stand arbor characteristics in a natural larch forest[J]. Journal of Forest and Environment, 2023, 43(1): 44−51.

[3] 刘兵兵, 张波, 赵鹏武, 等. 林窗对大兴安岭南段杨桦次生林林下物种多样性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(4): 65−74.
Liu B B, Zhang B, Zhao P W, et al. Effect of forest gap on understory species diversity of poplar and birch secondary forests in southern section of Daxing'an Mountains[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 65−74.

[4] 谭辉, 朱教君, 康宏樟, 等. 林窗干扰研究 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 587−594.
Tan H, Zhu J J, Kang H Z, et al. A research review on forest gap disturbance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 587−594.

[5] Elias R B, Dias E. Gap dynamics and regeneration strategies in *Juniperus-Laurus* forests of the Azores Islands[J]. Plant Ecology, 2009, 200(2): 179−189.

[6] Yamamoto S. Gap regeneration of major tree species in different forest types of Japan[J]. Vegetatio, 1996, 127(2): 203−213.

[7] He Z, Wang L, Jiang L, et al. Effect of micro-environment on species distribution patterns in the regeneration layer of forest gaps and non-gaps in a subtropical natural forest, China[J]. Forests, 2019, 10(2): 90.

[8] Han W, Chen L, Liu J, et al. Effect of gap size and elevation on the regeneration and coexistence of *Abies, Betula*, and *Acer* tree species in a subalpine coniferous forest[J]. Forests, 2023, 14(10): 2099.

[9] Dupuy J M, Chazdon R L. Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(11): 3716−3725.

[10] 李兵兵, 秦琰, 刘亚茜, 等. 燕山山地油松人工林林隙大小对更新的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(6): 147−151.
Li B B, Qin Y, Liu Y Q, et al. Effects of gap size on regeneration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Yanshan Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(6): 147−151.

[11] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 等. 中亚热带常绿阔叶林林隙及其自然干扰特征的研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1126−1130.
Yan S J, Hong W, Wu C Z, et al. Gaps and their natural disturbance characteristics in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1126−1130.

[12] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(5): 477−490.
Cui N J, Zhang D J, Liu Y, et al. Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps of varying sizes in *Pinus massoniana* plantations[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(5): 477−490.

[13] 江国华, 汪秀琴, 吴泽民. 安徽查湾甜槠林不同大小林隙光因子对比分析 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2017, 14(6): 18−23.
Jiang G H, Wang X Q, Wu Z M. Comparative analysis of gap light factors of *Castanopsis eyrei* forest with different sizes in Chawan, Anhui[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(6): 18−23.

[14] 臧润国, 王伯荪, 刘静艳. 南亚热带常绿阔叶林不同大小和发育阶段林隙的树种多样性研究 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 485−488.
Zang R G, Wang B S, Liu J Y. Tree species diversity in gaps of different sizes and developmental stages in lower subtropical evergreen broadleaved forest, South China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 485−488.

[15] 赵秀海, 张春雨, 郑景明. 阔叶红松林林隙结构与树种多样性关系研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2236−2240.
Zhao X H, Zhang C Y, Zheng J M. Correlation between gap structure and tree diversity of mixed-broad-leaved Korean pine forests in northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2236−2240.

[16] Naaf T, Wulf M. Effects of gap size, light and herbivory on the herb layer vegetation in European beech forest gaps[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 244(1−3): 141−149.

[17] Shabani S, Akbarinia M, Jalali S, et al. The effect of physiographic factors on plant species diversity in forest gaps (case study: Lalis forest, Chalous)[J]. Iranian Journal of Biology, 2010, 23(3): 418−429.

[18] Brandani A, Hartshorn G S, Orians G H. Internal heterogeneity of gaps and species richness in Costa Rican tropical wet forest[J]. Journal of Tropical Ecology, 1988, 4(2): 99−119.

[19] Barik S, Pandey H, Tripathi R, et al. Microenvironmental variability and species diversity in tree fall gaps in a sub-tropical broadleaved forest[J]. Vegetatio, 1992, 103(1): 31−40.

[20] Pedersen B S, Howard J L. The influence of canopy gaps on overstory tree and forest growth rates in a mature mixed-age, mixed-species forest[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196(2−3): 351−366.

[21] 陈厦, 桑卫国. 暖温带地区 3 种森林群落叶面积指数和林冠开阔度的季节动态 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 431−436.
Chen X, Sang W G. Dynamics of leaf area index and canopy openness for three forest communities in the warm temperate zone of China[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2007, 31(3): 431−436.

[22] 陈高, 代力民, 周莉. 受干扰长白山阔叶红松林林分组成及冠层结构特征 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 116−120.
Chen G, Dai L M, Zhou L. Structure of stand and canopy characteristics of disturbed communities of broadleaved *Pinus koraiensis* forest in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of

Ecology, 2004, 23(5): 116−120.

[23] 姚俊宇, 伍炫蓓, 孙千惠, 等. 林窗大小对川西马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 214−220.
Yao J Y, Wu X B, Sun Q H, et al. Effects of canopy gap size on understory species diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(2): 214−220.

[24] 赵桂玲. 林窗研究进展: 国家自然科学基金重点项目部分成果简介 [J]. 中国科学基金, 2013, 27(4): 218−221.
Zhao G L. Progress on study of forest gap[J]. China Science Foundation, 2013, 27(4): 218−221.

[25] 李艳, 姚小兰, 郝建锋, 等. 林窗对川西周公山柳杉人工林林下物种多样性的影响 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(6): 1238−1245.
Li Y, Yao X L, Hao J F, et al. Effects of forest gap on underforest species diversity in a *Cryptomeria fortunei* plantation in Zhougong mountain, West Sichuan[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(6): 1238−1245.

[26] Macfarlane C. Classification method of mixed pixels does not affect canopy metrics from digital images of forest overstorey[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 833−840.

[27] 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.

[28] 马泽清, 刘琪璟, 曾慧卿, 等. 南方人工林叶面积指数的摄影测量 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1971−1980.
Ma Z Q, Liu Q J, Zeng H Q, et al. Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1971−1980.

[29] 周东, 刘国彬. 林窗对子午岭天然辽东栎群落林下植物多样性的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 91−98.
Zhou D, Liu G B. Effects of forest gap on plant diversity of natural *Quercus liaotungensis* community in the Ziwuling Mountain of the Loess Plateau[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(22): 91−98.

[30] 陈国鹏, 鲜骏仁, 曹秀文, 等. 林窗对岷江冷杉幼苗生存过程的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6475−6486.
Chen G P, Xian J R, Cao X W, et al. Effects of canopy gap on the survival dynamics of *Abies faxoniana* seedlings in a subalpine coniferous forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6475−6486.

[31] 韩文娟, 袁晓青, 张文辉. 油松人工林林窗对幼苗天然更新的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 2940−2948.
Han W J, Yuan X Q, Zhang W H. Effects of gap size on seedling natural regeneration in artificial *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 2940−2948.

[32] 戚裕锋, 杨徐烽, 张奇平, 等. 浙江天童受损常绿阔叶林实验生态学研究 (Ⅴ): 不同干扰下植被恢复初期主要树种五年的恢复和更新 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2010(3): 10−25.
Qi Y F, Yang X F, Zhang Q P, et al. Experimental ecology research on destroyer evergreen broad-leaved forests in TNFP, Zhejiang (Ⅴ): five-year recovery and regeneration of main trees after different disturbances[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2010(3): 10−25.

[33] 汪金松, 范秀华, 范娟, 等. 地上竞争对林下红松生物量分配的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2447−2457.
Wang J S, Fan X H, Fan J, et al. Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (*Pinus koraiensis*)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2447−2457.

[34] 金鹏, 徐明, 冉富菊, 等. 森林光环境特征及其生态作用 [J]. 山地农业生物学报, 2023, 42(2): 38−47.
Jin P, Xu M, Ran F J, et al. Characteristics of forest light environment and its ecological effects[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2023, 42(2): 38−47.

[35] 王一, 刘江, 张金鑫, 等. 辽东山区天然次生林两个不同坡向林窗光温空间分布特征 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 933−940.
Wang Y, Liu J, Zhang J X, et al. Spatial distribution characteristics of photosynthetic photon flux density and air temperature in gaps at two different slope directions of secondary forest ecosystem in montane area of eastern Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 933−940.

[36] 王荣, 郭志华. 木荷幼苗对常绿阔叶林不同光环境的光合响应 [J]. 林业科学研究, 2007, 20(5): 688−693.
Wang R, Guo Z H. Photosynthetic responses of *Schima superba* grown in different light regimes of subtropical evergreen broadleaved forest[J]. Forest Research, 2007, 20(5): 688−693.

[37] 张敏, 朱教君. 光温条件对不同种源红松种子萌发的影响 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(6): 613−623.
Zhang M, Zhu J J. Effects of light and temperature on seed germination of *Pinus koraiensis* with different provenances[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(6): 613−623.

[38] 张立敏, 陈斌, 李正跃. 应用中性理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性 [J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1556−1563.
Zhang L M, Chen B, Li Z Y. Analysis of the species diversity and community stability in local-community using the Neutral Theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1556−1563.

[39] 毛志宏, 朱教君. 干扰对植物群落物种组成及多样性的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2695−2701.
Mao Z H, Zhu J J. Effects of disturbances on species composition and diversity of plant communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2695−2701.

[40] 朱教君, 刘足根. 森林干扰生态研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1703−1710.
Zhu J J, Liu Z G. A review on disturbance ecology of forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1703−1710.

(责任编辑 范 娟
责任编委 臧润国)