

DOI: 10.20103/j.stxb.202411042690

朱念福, 吴绍发, 沈庆华, 胡兆贵, 马小民, 叶崇宇, 吴统贵. 林窗对马尾松和杉木林下乔木树种生长和组成多样性的影响. 生态学报, 2025, 45(15):

Zhu N F, Wu S F, Shen Q H, Hu Z G, Ma X M, Ye C Y, Wu T G. Effects of forest gaps on the growth and species composition diversity of trees in forests of *Pinus Massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15):

林窗对马尾松和杉木林下乔木树种生长和组成多样性的影响

朱念福¹, 吴绍发², 沈庆华³, 胡兆贵², 马小民¹, 叶崇宇¹, 吴统贵^{1,*}

1 华东沿海防护林生态系统定位观测研究站, 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

2 庆元林场, 庆元 323800

3 钱江源—百山祖国家公园龙泉保护中心, 龙泉 323700

摘要: 开辟林窗是促进人工林更新、近自然演替和增加树种组成多样性的重要经营方式之一。林分类型、林窗大小及其与林窗内树种更新生长的适配关系一直是林窗研究的焦点, 然而在不同区域、不同森林类型研究结果差异较大, 限制了林窗改造模式的应用。本文基于浙江丽水白云山林场马尾松和杉木人工林林窗, 分析了林窗大小(中林窗: 500 m² 和 250 m², 小林窗: 50 m²) 和林分类型对人工引入 10 个树种生长和自然更新乔木树种组成多样性的影响差异。结果表明: (1) 林窗大小和林分类型及其交互作用对人工引入树种生长(地径或树高)的影响存在显著差异。在中林窗内, 枫香、南方红豆杉、闽楠、木荷、朴树、无患子和细柄蕈树生长状况好于小林窗。枫香和无患子在马尾松林窗长势较好, 而南方红豆杉、红豆树、闽楠、木荷、细柄蕈树和浙江楠在杉木林窗长势较好。(2) 林窗大小和林分类型及其交互作用显著影响自然更新乔木树种组成多样性。相较于小林窗, 中林窗内自然更新乔木种类增加, Simpson 多样性指数和 Margalef 丰富度指数提高, Pielou 均匀度指数降低。马尾松林窗的 Simpson 多样性指数高于杉木林窗, 而 Margalef 丰富度指数则低于杉木林窗。综合考虑引入树种的生长状况和自然更新乔木树种组成多样性差异, 建议在南方低山丘陵区, 马尾松和杉木林开辟中等面积(250—500 m²) 林窗, 并在马尾松林窗中引入喜光、耐土壤瘠薄干旱树种, 如枫香和无患子, 在杉木林窗中引入喜光或耐阴、喜湿润肥沃土壤树种, 如南方红豆杉、红豆树、木荷和细柄蕈树等, 将有效促进树木生长, 提高树种组成多样性和丰富度。

关键词: 林窗; 马尾松; 杉木; 生长; 组成多样性

Effects of forest gaps on the growth and species composition diversity of trees in forests of *Pinus Massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*

ZHU Nianfu¹, WU Shaofa², SHEN Qinhua³, HU Zhaogui², MA Xiaoming¹, YE Chongyu¹, WU Tonggui^{1,*}

1 East China Coastal Forest Ecosystem Long-term Research Station, Research Institute of Subtropical Forestry, China Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

2 Qingyuan Forest Farm, Qingyuan 323800, China

3 Qianjiangyuan—Baishanzu National Park Longquan Conservation Center, Longquan 323700, China

Abstract: Creating forest gaps is one of the important management practices used to promote species regeneration, facilitate close-to-natural succession, and increase species composition diversity. The stand type, gap size, and adaptive relationships with species are critical for tree growth. However, significant differences in results across different regions and stand types

基金项目: 浙江省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才项目(2023R5251); 浙江省“领雁”计划重大技术攻关项目(2022C02053); 百山祖国家公园科研项目(2021KFLY12)

收稿日期: 2024-11-04; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wutonggui@163.com

have limited the application of gap-based restoration models. This study, based on forest gaps in *Pinus Massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations in Baiyun Mountain, Lishui, Zhejiang, analyzed the effects of different gap sizes (medium gaps: 500 and 250 m², small gaps: 50 m²) and stand type on the growth of ten planted tree species, as well as on the species composition diversity of naturally regenerating tree species. The results showed that: (1) there were significant differences in the effects of gap size, stand type, and their interactions on the growth (base diameter or height) of the ten planted tree species. Compared to small-size gaps, the growth of species such as *Liquidambar formosana*, *Taxus chinensis*, *Phoebe bournei*, *Schima superba*, *Sapium sebiferum*, *Sapindus mukorossi*, and *Altingia gracilipes* improved in medial-size gaps. In *Pinus massoniana* forest gaps, *Liquidambar formosana* and *Sapium discolor* showed better growth compared to *Cunninghamia lanceolata* forest gaps. Meanwhile, *Taxus chinensis*, *Ormosia hosiei*, *Phoebe bournei*, *Schima superba*, *Altingia gracilipes*, and *Phoebe chekiangensis* grew better in *Cunninghamia lanceolata* gaps. (2) Gap size, stand type, and their interactions significantly affected the species composition diversity of naturally regenerated tree species. Compared to small-size gaps, the number of species also increased in medial-size gaps, while the Pielou evenness index decreased. The Simpson diversity index was higher in *Pinus massoniana* gaps than in *Cunninghamia lanceolata* gaps, while the Margalef richness index was lower in *Pinus massoniana* gaps. Considering both the growth conditions of planted tree species and the species composition diversity of naturally regenerated trees, it is recommended to create medium-size (250—500 m²) gaps in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* forests. Additionally, light-loving, drought- and soil-poor-tolerant species, such as *Liquidambar formosana* and *Sapindus mukorossi*, should be planted in *Pinus massoniana* gaps, while light-loving or shade-tolerant, moisture- and fertile soil-loving species such as *Taxus chinensis*, *Ormosia hosiei*, *Schima superba*, *Celtis sinensis*, *Altingia gracilipes*, should be planted in *Cunninghamia lanceolata* gaps. This approach will effectively promote tree growth and enhance species composition diversity and richness in forest gaps.

Key Words: forest gap; *Pinus Massonian*; *Cunninghamia lanceolata*; growth; species composition diversity

林窗(Forest Gap)是森林中常见的中小尺度干扰^[1],主要由风雪、病虫害、火等自然因素^[2-4]和采伐等人为因素所引起^[5-6]。林窗发生后会在较短时间内形成异质微环境,直接调控光照、温度、水分和养分等环境因素的分布和变化^[7-8],从而影响植物的更新、生长和多样性等^[8-10],成为促进人工林近自然演替、增加林分物种多样性和结构多样性的重要经营措施之一^[11-13]。

林窗大小是影响林窗内植物生存、生长的主要因素^[1, 3]。研究发现,林窗越大,林窗内光照输入越多^[14],光照异质性越大^[15],有利于不同光照需求植物更新、生长,从而提高林窗内物种丰富度和多样性^[10, 13, 16-17]。但在不同林分类型、不同区域研究结论差异性较大^[18-20]。同时,林分特征也会影响林窗内植物更新和生长,一方面不同林分类型的土壤种子库存在较大差异,引起林窗内植物更新的多样性^[21];另一方面,林分类型通过调控凋落物组成和土壤养分特征等对林窗内植物生长产生直接或间接影响^[22-23]。

林窗内自然更新和人工引入乔木树种是提高森林冠层结构多样性和复杂性的重要方式,而森林乔木冠层结构是影响森林生产力和碳汇功能的关键因素^[24-25]。因此,研究林窗大小和林分类型对乔木树种生长和组成多样性的影响及其适配关系,对人工促进森林正向演替,提高森林冠层结构多样性具有重要意义。除了林窗大小和林分类型,乔木树种在林窗内定植和生长也受自身特性调控^[26-28],如喜光树种可能在较大林窗中生长状况较好^[21],而耐阴树种则可能在小林窗或林窗边缘生长良好^[27-29]。由此可见,林窗内自然更新和引入乔木树种的生长同时受林窗大小、林分类型和林窗内树种自身特性的协同影响^[18, 29-30]。

马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方地区面积最大的人工林针叶树种,约占我国森林面积的 11.1%^[31]。同时,普遍存在树种单一、结构简单等问题,严重限制其生态服务功能提升,如何促进人工林正向演替成为当前亟需解决的问题^[32]。本研究基于人工采伐形成的马尾松和杉木林窗^[12, 33],探究林窗对引入树种生长和自然更新乔木树种组成多样性的影响,分析林窗大小、林分类型与树种

适配关系,以期为南方低山丘陵区马尾松和杉木人工林经营提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于浙江省丽水市白云山生态林场($28^{\circ}23'—28^{\circ}27' \text{ N}$, $119^{\circ}52'—119^{\circ}58' \text{ E}$),海拔为 51—1073 m,属中亚热带季风气候,雨量充沛,四季分明,年均气温为 18.1°C ,年均降雨量为 1392.8 mm,年均相对湿度 75.8%。区域土壤为红黄壤^[32]。区域主要乔木树种有马尾松、杉木、枫香(*Liquidambar formosana*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、栎类(*Quercus* L)等,主要灌木有檵木(*Loropetalum chinensis*)、乌药(*Lindera aggregata*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)等,主要草本植物有狗脊(*Woodwardia japonica*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、蕨类(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)等。

1.2 样地设置

基于 2015 年在白云山生态林场建立的马尾松和杉木人工林林窗开展试验,马尾松和杉木林分地形因子(海拔、坡度和坡向)基本一致^[12]。两种林分共采伐形成了 28 个林窗,其中,在马尾松林(图 1)和杉木林(图 2)分别建立了 14 个近圆形林窗,包括 500 m²林窗 2 个、250 m²林窗 2 个和 50 m²林窗 10 个,各林窗间距大于 5 m。

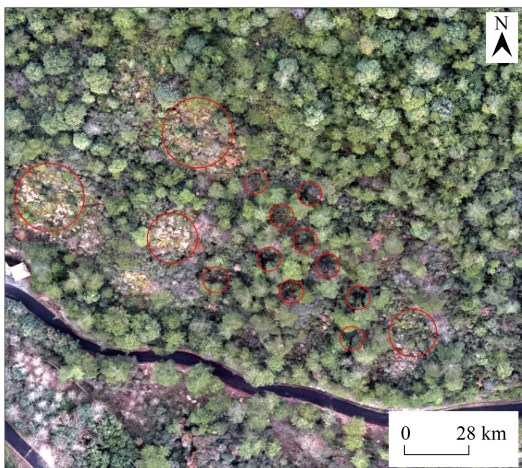


图 1 马尾松林窗

Fig.1 forest gaps of *Pinus massoniana*

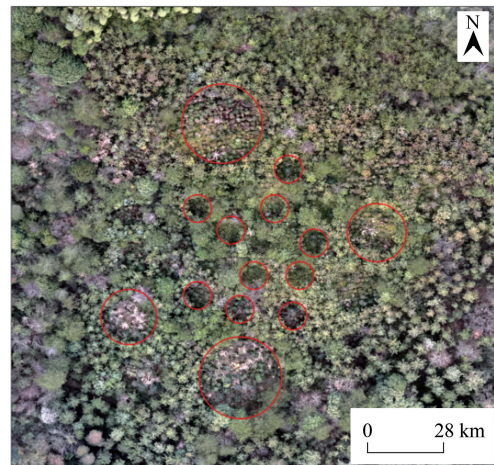


图 2 杉木林窗

Fig.2 forest gaps of *Cunninghamia lanceolata*

林窗采伐过程中将马尾松和杉木树干及枝条全部移出,林下灌草层植物连根清除,但马尾松和杉木树桩未移除,林窗内乔木树种自然更新依赖种子和土壤种子库。在 2016 年 3 月,在林窗中人工引入 10 种 2 年生阔叶树种实生苗,并编号挂牌,幼苗详细信息见文献^[12]。10 个树种分别为枫香、南方红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairei*)、红豆树(*Ormosia hosiei*)、闽楠(*Phoebe bournei*)、木荷(*Schima superba*)、朴树(*Celtis sinensis*)、山乌桕(*Sapium discolor*)、无患子(*Sapindus mukorossi*)、细柄蕈树(*Altingia gracilipes*)和浙江楠(*Phoebe chekiangensis*)。其中,500 m²林窗内每个树种随机种植 8 株(共 80 株),250 m²林窗内每个树种随机种植 4 株(共 40 株),50 m²林窗内每个树种随机种植 1 株(共 10 株)。

1.3 生长及乔木树种自然更新调查

2024 年 7 月,调查马尾松和杉木各林窗内 10 个人工引入树种的生长和死亡状况,测量地径和树高等数据(表 1)。定义林窗内所有高度大于 3 m 的自然更新木本植物为乔木,调查林窗内乔木树种自然更新状况,记录物种、地径和树高等信息(表 2)。

表 1 10 个树种生长状况

Table 1 Growth status of 10 tree species

树种 Species	存活株数 Surviving number		死亡株数 Dead number		平均地径 Mean base diameter/cm	平均树高 Mean height/m
	马尾松林窗	杉木林窗	马尾松林窗	杉木林窗		
	<i>Pinus massoniana</i> forest gaps	<i>Cunninghamia lanceolata</i> forest gaps	<i>Pinus massoniana</i> forest gaps	<i>Cunninghamia lanceolata</i> forest gaps		
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	29	34	5	0	7.4	5.89
南方红豆杉 <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	33	26	1	8	4.96	3.2
红豆树 <i>Ormosia hosiei</i>	21	31	13	3	3.79	2.58
闽楠 <i>Phoebe bournei</i>	23	29	11	5	2.78	1.7
木荷 <i>Schima superba</i>	32	34	2	0	6.84	4.47
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	4	14	30	20	3	2.4
山乌桕 <i>Sapium discolor</i>	17	27	17	7	13.47	9.49
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	20	29	14	5	5.64	4.31
细柄草树 <i>Altingia gracilipes</i>	33	32	1	2	8.29	6.65
浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i>	28	24	6	10	4.13	2.44

表 2 林窗内乔木树种自然更新状况

Table 2 Natural regeneration of tree species in forest gaps

林分类型 Stand type	自然更新乔木树种 Natural regenerated of tree species	平均地径 Mean base diameter/cm	平均树高 Mean height/m
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	华山矾 (<i>Symplocos chinensis</i>)、山油麻 (<i>Trema dielsiana</i>)、柏木 (<i>Cupressus funebris</i>)、格药桉 (<i>Eurya muricata</i>)、檫木 (<i>Sassafras tzumu</i>)、白栎 (<i>Quercus fabri</i>)、盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、老鼠矢 (<i>Symplocos stellaris</i>)、赛山梅 (<i>Styrax confusus</i>)、马尾松、白背叶 (<i>Mallotus apelta</i>)、枫香、浙江楠 (<i>Diospyros glaucifolia</i>)	5.61	4.07
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	南酸枣 (<i>Choerospondias axillaris</i>)、拟赤杨 (<i>Alniphyllum fortunei</i>)、杨梅 (<i>Myrica rubra</i>)、格药桉、檫木、浙江楠、老鼠矢、臭辣树 (<i>Evodia fargesii</i>)、赤杨叶 (<i>Alniphyllum fortunei</i>)、盐肤木	5.69	5.36

1.4 数据分析

研究中 500 m²和 250 m²林窗数量较少,参考同类研究方法^[34–35],将 50 m²林窗划分为小林窗(数量为 10 个),将 250 m²和 500 m²林窗划分为中林窗(数量为 4 个),用于后续数据统计分析。统计林窗内的自然更新乔木种类(S)及其数量,采用 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Margalef 丰富度指数表征林窗内自然更新乔木树种组成多样性^[36]:

Shannon-Wiener 指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \times \ln p_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$E = H / \ln S$$

Simpson 多样性指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (p_i)^2$$

Margalef 丰富度指数:

$$R = (S - 1) / \ln N$$

式中, p_i 为第 i 个树种株数占林窗内自然更新乔木总株数 N 的百分比, S 为自然更新乔木种类。

使用 R(version 4.3)对数据进行统计分析。采用双因素方差分析方法检验林窗大小和林分类型及其交互作用对 10 个人工引入树种地径和树高生长的影响,以及对自然更新乔木树种组成多样性的影响,并对具有显著差异的生长、组成多样性指标进行多重比较(显著性水平设置为 $P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 林窗大小和林分类型对引入树种生长的影响

林窗大小和林分类型及其交互作用对 10 个人工引入树种生长存在显著的影响(表 3—5)。林窗大小显著影响了人工引入树种的生长(地径或树高)($P<0.05$)。根据地径生长状况,南方红豆杉、木荷、朴树和无患子在中林窗大于小林窗(表 3,表 4)。根据树高生长状况,南方红豆杉、闽楠、木荷、无患子和细柄蕈树在中林窗大于小林窗(表 3,表 5)。可见,相较于小林窗,南方红豆杉、闽楠、木荷、朴树、无患子和细柄蕈树生长状况在中林窗较好。

表 3 林窗大小和林分类型对 10 个树种生长影响

Table 3 Effects of forest gap sizes and stand types on the growth of 10 tree species

变异来源 Source of variability	生长指标 Growth index	F				
		枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	南方红豆杉 <i>Taxus chinensis var. mairei</i>	红豆树 <i>Ormosia hosiei</i>	闽楠 <i>Phoebe bournei</i>	木荷 <i>Schima superba</i>
林窗大小 Forest gap size	地径	0.2	5.6 *	3.17	4.3	8.48 **
	树高	0.43	4.94 *	2.55	5.02 *	5.6 *
林分类型 Stand type	地径	10.21 **	8.6 **	1.37	9.45 **	0.27
	树高	0.22	15.78 ***	8.93 **	6.06 *	5.55 *
林窗大小×林分类型 Forest gap size×stand type	地径	1.56	0.64	0.19	0.24	0.63
	树高	0.08	7.3 *	3.13	0.6	2.17
变异来源 Source of variability	生长指标 Growth index	F				
		朴树 <i>Celtis sinensis</i>	山乌桕 <i>Sapium discolor</i>	无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	细柄蕈树 <i>Altingia gracilipes</i>	浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i>
林窗大小 Forest gap size	地径	19.72 **	0.15	15.72 ***	0.87	0.5
	树高	1.69	0.23	11.77 **	94 **	0.03
林分类型 Stand type	地径	—	—	0.72	2.32	0.7
	树高	—	—	2.95	11.36 **	6.1 *
林窗大小×林分类型 Forest gap size×stand type	地径	—	—	6.4 *	2.28	3.05
	树高	—	—	0.09	7.28 *	0.27

朴树和山乌桕在马尾松 50 m²和 250 m²林窗内未成活,— 表示不进行差异性分析;* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$

表 4 不同林窗间 10 个树种地径生长差异(均值±标准误)

Table 4 Growth difference in base diameter of 10 tree species among different forest gaps (Mean±SE)

林窗 Forest gap	地径 Base diameter/cm				
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	南方红豆杉 <i>Taxus chinensis var. mairei</i>	红豆树 <i>Ormosia hosiei</i>	闽楠 <i>Phoebe bournei</i>	木荷 <i>Schima superba</i>
马尾松小林窗 Small size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	8.47±0.15aA N=6	3.96±0.19bB N=7	5.23±0.03aA N=5	2.41±0.11aB N=4	4.63±0.65bA N=6
马尾松中林窗 Middle size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	8.02±0.38aA N=4	5.01±0.29aA N=4	4.1±0.54aA N=4	2.85±0.08aA N=4	7.43±0.46aA N=4
杉木小林窗 Small size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	6.01±0.53aB N=10	5.2±0.42aA N=7	5.61±0.35aA N=10	3.02±0.12aA N=9	5.62±0.63aA N=10
杉木中林窗 middle size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	6.94±0.59aA N=4	5.72±0.14aA N=4	4.92±0.19aA N=4	3.29±0.21aA N=4	7.23±0.86aA N=4

续表

林窗 Forest gap	地径 Base diameter/cm				
	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	细柄蕈树 <i>Altingia gracilipes</i>	浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i>
马尾松小林窗 Small size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	—	—	5.11±0.35aA N=8	7.47±0.27aB N=9	4.67±0.16aA N=3
马尾松中林窗 Middle size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	—	—	5.77±0.11aA N=4	8.36±0.3aA N=4	4.02±0.13aA N=4
杉木小林窗 Small size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	2.52±0.06 b N=3	6.92±0.97a N=8	3.56±0.46bB N=8	8.57±0.35aA N=9	4.43±0.2aA N=8
杉木中林窗 Middle size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	3.21±0.12a N=3	7.48±0.82a N=4	6.54±0.54aA N=4	8.36±0.22aA N=4	4.7±0.27aA N=4

— 列中不同小写字母表示同一林分中不同大小林窗数值存在差异, 一列中不同大写字母表示不同林分中相同大小林窗数值存在差异; N 为样本量, 由于林窗内每个树种引入数量有限 (1 株、4 株或 8 株), 当林窗内某树种全部死亡时, 样本量 N 将减小; 朴树和山乌柏在马尾松 50 m² 和 250 m² 林窗内未成活, — 表示不进行差异性分析

表 5 不同林窗间 10 个树种树高生长差异 (均值±标准误)

Table 5 Growth difference in height of 10 tree species among different forest gaps (Mean±SE)

林窗 Forest gap	树高 Height/m				
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	南方红豆杉 <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	红豆树 <i>Ormosia hosiei</i>	闽楠 <i>Phoebe bournei</i>	木荷 <i>Schima superba</i>
马尾松小林窗 Small size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	5.64±0.68aA N=6	2.06±0.16bB N=7	4.5±0.2aA N=5	1.26±0.06aA N=4	2.67±0.45bB N=6
马尾松中林窗 Middle size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	5.86±0.25aA N=4	3.49±0.22aA N=4	2.65±0.24aB N=4	1.68±0.08aB N=4	5.21±0.15aA N=4
杉木小林窗 Small size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	5.21±0.35aA N=10	4±0.33aA N=7	5.17±0.4aA N=10	1.74±0.14bA N=9	5.2±0.52aA N=10
杉木中林窗 Middle size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	5.75±0.93aA N=4	3.86±0.37aA N=4	5.26±0.48aA N=4	2.62±0.5aA N=4	5.79±1.11aA N=4

林窗 Forest gap	树种树高 Height/m				
	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	细柄蕈树 <i>Altingia gracilipes</i>	浙江楠 <i>Phoebe chekiangensis</i>
马尾松小林窗 Small size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	—	—	2.93±0.32bA N=8	4.66±0.28bB N=9	2.55±0.25aA N=3
马尾松中林窗 Middle size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	—	—	4.97±0.34aA N=4	6.18±0.16aA N=4	2.37±0.11aB N=4
杉木小林窗 Small size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	1.53±0.67a N=3	5.61±0.65a N=8	3.85±0.62bA N=8	6.31±0.41aA N=9	3.07±0.23aA N=8
杉木中林窗 Middle size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	2.59±0.5a N=3	6.1±0.77a N=4	6.29±1.18aA N=4	6.47±0.68aA N=4	3.17±0.19aA N=4

— 列中不同小写字母表示同一林分中不同大小林窗数值存在差异, 一列中不同大写字母表示不同林分中相同大小林窗数值存在差异; N 为林窗样本量, 由于林窗内每个树种种植数量有限 (1 株、4 株和 8 株), 当林窗内某树种全部死亡时, 样本量将减少; 朴树和山乌柏在马尾松 50 m² 和 250 m² 林窗内未成活, — 表示不进行差异性分析

林分类型对除朴树、山乌柏以外 8 个人工引入树种的生长产生了显著影响 ($P<0.05$), 而朴树和山乌柏在马尾松林 250 m² 和 50 m² 林窗内无存活。根据地径生长状况, 枫香和无患子在马尾松林窗大于杉木林窗; 而南方红豆杉、闽楠和细柄蕈树在马尾松林窗小于杉木林窗 (表 3, 表 4)。根据树高生长状况, 南方红豆杉、红

豆树、闽楠、木荷、细柄蕈树和浙江楠在马尾松林窗小于杉木林窗(表 3,表 5)。可见,在不同林分类型林窗中,人工引入树种的生长状况不同,枫香和无患子在马尾松林窗生长状况较好,而南方红豆杉、红豆树、闽楠、木荷、细柄蕈树和浙江楠在杉木林窗生长状况较好。

此外,林窗大小和林分类型交互作用对南方红豆杉、无患子和细柄蕈树的生长状况产生了显著影响($P<0.05$)。南方红豆杉和细柄蕈树的树高在马尾松小林窗生长状况显著低于在马尾松中林窗内($P<0.05$),但在杉木不同大小林窗中无显著差异。无患子的地径在杉木小林窗生长状况显著低于在杉木中林窗内($P<0.05$),但在马尾松不同大小林窗中无显著差异。可见,同一树种在不同林分类型适宜生长的林窗大小也不同。

2.2 林窗大小和林分类型对自然更新树种组成多样性的影响

林窗大小和林分类型及其交互作用对自然更新树种组成多样性的影响具有差异(表 6—7)。林窗大小显著影响 4 个多样性指标,小林窗的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数显著高于中林窗($P<0.001$, $P<0.001$),而中林窗的 Simpson 多样性指数和 Margalef 丰富度指数显著高于小林窗($P<0.01$, $P<0.001$)。可见,相较于小林窗,中林窗内自然更新乔木种类和数量增加,多样性和丰富度增加,但部分树种株数占比较高,导致均匀度减小。

林分类型仅显著影响了 Simpson 多样性指数(表 6),马尾松林窗的 Simpson 多样性指数高于杉木林窗($P<0.05$)。可见,马尾松林窗内自然更新乔木种类分布较均匀,优势树种不明显。林窗大小和林分类型交互作用显著影响了 Margalef 丰富度指数,与杉木小林窗和马尾松中林窗相比,杉木中林窗的 Margalef 丰富度指数则显著较高。可见,杉木中林窗内自然更新乔木种类较多,且杉木林分不同大小林窗的树种丰富度差异较大。

表 6 林窗大小和林窗类型对自然更新树种组成多样性影响

Table 6 Effects of forest gap sizes and stand types on the composition diversity of tree natural regeneration

变异来源 Source of variability	F			
	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index
林窗大小 Forest gap size	25.46 ***	27.43 ***	9.64 **	15.15 ***
林分类型 Stand type	3	1.7	6.03 *	1.84
林窗大小×林分类型 Forest gap size×stand type	0.5	0.25	3.56	5.62 *

* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$

表 7 不同林窗中自然更新树种组成多样性差异(均值±标准误)

Table 7 Difference in the composition diversity of natural tree regeneration among different forest gaps (Mean±SE)

林窗 Forest gap	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index
马尾松小林窗 Small size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	0.35±0.01aA	0.31±0.03aA	0.92±0.01aA	1.6±0.13aA
马尾松中林窗 Middle size gaps of <i>Pinus massoniana</i> forest	0.26±0.04bA	0.16±0.03bA	0.97±0.01aA	1.82±0.16aB
杉木小林窗 Small size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	0.33±0.01aA	0.29±0.03aA	0.78±0.05bB	1.45±0.1bA
杉木中林窗 Middle size gaps of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	0.22±0.03bA	0.1±0.02bA	0.99±0.01aA	2.36±0.06aA

一列中不同小写字母表示同一林分中不同大小林窗数值存在差异,一列中不同大写字母表示不同林分中相同大小林窗数值存在差异

3 讨论

3.1 林窗大小和林分类型对人工引入树种生长的影响

研究发现,林窗大小和林分类型及其交互作用对人工引入的 10 个树种 8 年生长的影响存在差异。各树种在不同林窗中生长状况存在差异的原因可能与光照强度及分布、土壤水肥条件、灌草遮蔽效应和引入树种特性等因素有关^[27, 29, 37—38]。

林窗大小会显著影响林窗内的光照强度和分布^[3, 39],而光照强度及分布会影响林窗内耐阴树种和喜光树种的定植和生长^[26, 40]。光照强度一般随着林窗面积增大而增大,并受周围环境和微地形等因素影响^[29—30]。因此,在中等面积(250—500 m²)的马尾松或杉木林窗内,喜光树种(如枫香、木荷、无患子和细柄蕈树等)长势较好;而红豆树等幼苗期耐阴树种则在较小面积(50 m²)的林窗中长势较好。

林分类型可以通过影响凋落物分解和微生物等调控林窗内的土壤水肥条件^[3, 22, 38],而土壤水肥条件则会影响树木生长。一般而言,较瘠薄干旱土壤,水肥条件良好土壤有利于喜湿润肥沃环境的树木生长。研究中的马尾松林分土壤较杉木林分瘠薄干旱^[12, 33],因此,相较于马尾松林窗,南方红豆杉、红豆树、闽楠、木荷、细柄蕈树和浙江楠等喜湿润肥沃土壤树种在相同大小的杉木林窗中长势较好。同时,研究中的马尾松林分密度较杉木林分低^[12],导致马尾松林窗接收更多直射光,而杉木林窗接收更多漫反射光。因此,马尾松林窗可能有利于光照需求大且耐土壤瘠薄干旱树种的生长,如枫香和无患子在马尾松林窗长势好于在相同大小杉木林窗内,而耐阴、喜湿润肥沃土壤的树种(红豆树、浙江楠等)则长势较差。同时,由于光照、水肥条件等综合影响,不同林分类型的相同大小林窗的生境差异可能大于不同大小林窗^[33],从而导致同一树种在不同林分类型适宜生长的林窗大小不同。

此外,林窗内的灌木和草本植物会与乔木树种竞争光、水和养分等资源^[3],抑制幼树生长,甚至产生严重的遮蔽效应导致幼苗死亡。研究中,马尾松林窗内灌木盖度较高,而杉木林窗内草本盖度较高^[12, 33],即相同大小的马尾松林窗的灌草遮蔽效应大于杉木林窗,从而导致马尾松林窗内较多树木死亡,如朴树和山乌桕在马尾松林 50 m²和 250 m²林窗内无存活。同时,乔木树种生长还与自身特性和林窗发生时间密切相关^[5, 41]。与林窗发生初期结论不同^[12],杉木小林窗并不适合闽楠、浙江楠等乔木树种在中后期的生长,原因可能是闽楠等树种幼苗期时较耐阴,随着生长发育增加了光照需求^[42],但林窗内光照资源随着林窗发生时间增加而减少。

3.2 林窗大小和林分类型对天然更新乔木树种组成多样性的影响

乔木树种组成多样性结果表明,林窗大小和林分类型及其交互作用影响乔木树种自然更新。小林窗的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数高于中林窗,表明小林窗内树种分布更为均匀,即小林窗中自然更新的乔木没有数量占优的树种,原因可能是林窗面积较小,林窗内自然更新的种类和株数均较少^[43—44],以及小林窗中心区域到林窗边缘距离较短,光照强度较低,不利于喜光树种定植^[3, 26, 45]。实地调查也表明了 250 m²和 500 m²林窗内,檫木、山油麻等少数自然更新树种株数占比较高。而中林窗的 Simpson 多样性指数和 Margalef 丰富度指数高于小林窗,表明中等面积林窗的树种多样性和丰富度较高^[3, 44],原因可能在于适当面积的林窗能保持林窗微环境及小气候,并提供差异较大的光照环境,从而为不同光照需求树种的定植和生长提供了较为适宜的环境^[24, 46],有利于更多树种共存。

马尾松林窗的 Simpson 多样性指数高于杉木林窗,而 Margalef 丰富度指数则低于杉木林窗,原因可能是相较于杉木林窗,马尾松林窗内光照较强、土壤水肥条件较差,适合耐土壤瘠薄、生长速率较快的喜光树种定植^[12, 33],以及灌草遮蔽效应较强,因此林窗内资源竞争可能更为激烈,不利于耐阴树种定植和生长,从而导致了马尾松林窗内更新乔木种类相对较少,优势种不明显;而杉木林窗内自然更新乔木种类较多,但部分树种数量占比较大,优势种明显。

4 结论

林窗大小和林分类型可能通过调控林窗内光照强度及分布、灌草盖度和土壤水肥条件等,从而影响树木生长和天然更新乔木树种组成多样性。综合考虑天然更新乔木树种组成多样性和引入树种生长状况,建议在马尾松林和杉木林开辟中等面积(250—500 m²)林窗,有助于提高天然更新乔木树种多样性和丰富度。同时,建议在马尾松林窗中引入喜光、耐土壤瘠薄干旱树种,如枫香、无患子等;而在杉木林窗中可引入大部分树种,如木荷、朴树和细柄蕈树等喜光树种,以及南方红豆杉、红豆树、闽楠和浙江楠等耐阴、喜湿润肥沃土壤树种。在未来南方低山丘陵区人工林林窗改造时,考虑林窗大小、林分类型和树种特性的适配性,将有助于提升林窗内树木存活率,促进树木生长,并提高乔木树种多样性和丰富度。

参考文献(References):

- [1] Zhu J J, Zhang G Q, Wang G G, Yan Q L, Lu D L, Li X F, Zheng X. On the size of forest gaps: can their lower and upper limits be objectively defined? *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 213: 64-76.
- [2] Greenberg C H. Long-term recovery dynamics following hurricane-related wind disturbance in a southern Appalachian forest. *Forest Ecology and Management*, 2021, 502: 119704.
- [3] Tian A L, Halik Ü, Fu W T, Sawiridin S, Cheng S Y, Lei J Q. Research history of forest gap as small-scale disturbances in forest ecosystems. *Forests*, 2024, 15(1): 21.
- [4] 田奥磊, 布热比衣木·吾斯曼, 玉米提·哈力克, 王新英, 刘茂秀. 洪水漫溢对林窗微环境时空差异的影响——以塔里木河中游荒漠河岸林为例. *生态学报*, 2024, 44(2): 770-779.
- [5] Zhu J J, Lu D L, Zhang W D. Effects of gaps on regeneration of woody plants: a meta-analysis. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(3): 501-510.
- [6] Orman O, Wrzesiński P, Dobrowolska D, Szewczyk J. Regeneration growth and crown architecture of European beech and silver fir depend on gap characteristics and light gradient in the mixed montane old-growth stands. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118866.
- [7] Zhang X Y, Heděnc P, Yue K, Ni X Y, Wei X Y, Chen Z H, Yang J, Wu F Z. Global forest gaps reduce litterfall but increase litter carbon and phosphorus release. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 288.
- [8] 陈龙斌, 孙昆, 张旭, 孙洪刚, 姜景民. 林隙对樟和枫香幼苗早期生长阶段功能性状的影响. *生态学报*, 2023, 43(19): 8035-8046.
- [9] Li J S, Li S, Liu C, Guo D G, Zhang Q X. Response of Chinese pine regeneration density to forest gap and slope aspect in northern China: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162428.
- [10] 周来, 程小芳, 张梦雯. 林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响. *北京林业大学学报*, 2024, 46(6): 48-56.
- [11] 陈国鹏, 鲜骏仁, 曹秀文, 刘锦乾, 杨永红, 雷炜. 林窗对岷江冷杉幼苗生存过程的影响. *生态学报*, 2016, 36(20): 6475-6486.
- [12] 刘伟, 王敏彪, 杜有新, 尤根彪, 王军峰, 练发良, 何小勇. 林窗大小对 2 种针叶林更新效果的初步分析. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(10): 1299-1306.
- [13] Ren S Y, Ali A, Liu H M, Yuan Z Q, Yang Q S, Shen G C, Zhou S S, Wang X H. Response of community diversity and productivity to canopy gap disturbance in subtropical forests. *Forest Ecology and Management*, 2021, 502: 119740.
- [14] 刘少冲, 段文标, 陈立新. 小兴安岭阔叶红松林不同大小林隙光照时空分布特征. *东北林业大学学报*, 2014, 42(8): 46-51.
- [15] 陈梅, 朱教君, 闫巧玲, 吴祥云, 谭辉. 辽东山区次生林不同大小林窗光照特征比较. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2555-2560.
- [16] 姚俊宇, 伍炫蓓, 孙千惠, 吴霞. 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. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(2): 214-220.
- [17] 沙欢, 梁咏亮, 彭妞, 高峰, 李静尧, 魏文轩, 庞丹波, 陈林. 林窗大小对青海云杉林灌草层维管植物物种多样性的影响. *生态学杂志*, 2024, 43(8): 2382-2394.
- [18] Yang X, Li J J, Fan N Q, Wang Y W, Zhang Z D. Effects of gap size on natural regeneration in *Picea asperata* forests of northern China. *Forests*, 2023, 14(10): 2102.
- [19] Han W Y, Chen L, Liu J Y, Wang G G, Liu D, Liu G H. Effect of gap size and elevation on the regeneration and coexistence of *Abies*, *Betula*, and *Acer* tree species in a subalpine coniferous forest. *Forests*, 2023, 14(10): 2099.
- [20] Mohabbati F, Eshaghi R J, Pahrizkar P. The effect of gap size on herbaceous biodiversity and soil properties in the Beech forest with different management background in Mazandran and Guilan provinces. *Forest Research and Development*, 2024, 10(3): 343-361.
- [21] Yan Q L, Gang Q, Zhu J J. Size-dependent patterns of seed rain in gaps in temperate secondary forests, Northeast China. *Forests*, 2019, 10

- (2): 123.
- [22] Tong R, Ji B Y, Wang G G, Lou C Y, Ma C, Zhu N F, Yuan W W, Wu T G. Canopy gap impacts on soil organic carbon and nutrient dynamic: a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 2024, 81(1): 12.
- [23] 晋梦然, 贾梅花, 肖倩茹, 刘金福. 林窗凋落物化感作用对格氏栲幼苗生长的影响. *生态学报*, 2022, 42(20): 8288-8299.
- [24] Fischer R, Knapp N, Bohn F, Shugart H H, Huth A. The relevance of forest structure for biomass and productivity in temperate forests: new perspectives for remote sensing. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40(4): 709-734.
- [25] Liu X Q, Feng Y H, Hu T Y, Luo Y, Zhao X X, Wu J, Maeda E E, Ju W M, Liu L L, Guo Q H, Su Y J. Enhancing ecosystem productivity and stability with increasing canopy structural complexity in global forests. *Science Advances*, 2024, 10(20): eadl1947.
- [26] Lu D L, Wang G G, Yu L Z, Zhang T, Zhu J J. Seedling survival within forest gaps: the effects of gap size, within-gap position and forest type on species of contrasting shade-tolerance in Northeast China. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2018, 91(4): 470-479.
- [27] 安冉, 许芳泽, 邓祥鹏, 赵善超, 向玮. 林隙大小对天山云杉幼树更新的影响. *北京林业大学学报*, 2023, 45(11): 23-32.
- [28] Xie H T, Chang M Y, Bao B H, Li X Q, Wang G G. Linking canopy gap features and microhabitat heterogeneity with seedling regeneration in a mixed coastal shelterbelt forest of eastern China. *Forest Ecology and Management*, 2024, 571: 122259.
- [29] Zhou L Y, Thakur M P, Jia Z, Hong Y, Yang W J, An S Q, Zhou X H. Light effects on seedling growth in simulated forest canopy gaps vary across species from different successional stages. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, 5: 1088291.
- [30] Lu D L, Wu D N, Zhu J J, Ge X W, Teng D X, Zhu C Y, Zhang J X, Zhang G Q, Gao T, Liu H Q, Wang G G. Resolving gap patterns and dynamics from a new perspective: Ratio effects of the evergreen versus deciduous trees in broadleaved-Korean pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2024, 554: 121653.
- [31] 孙长山. 探索中国森林资源发展现状. *林业勘查设计*, 2020, 49(4): 22-24.
- [32] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. *生态学报*, 2018, 38(1): 1-10.
- [33] 杜有新, 刘伟, 王军峰, 尤根彪, 叶和军, 练发良, 何小勇. 采伐林窗对白云山 3 种人工林林下植物多样性的早期影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2121-2128.
- [34] 刘华, 张丹桔, 张健, 杨万勤, 李勋, 张艳, 张明锦. 马尾松人工林林窗大小对四种凋落叶质量损失和养分释放的影响. *生态学报*, 2017, 37(02): 513-522.
- [35] 宋思梦, 张丹桔, 张健, 杨万勤, 张艳, 周扬, 李勋. 马尾松人工林林窗边缘效应对油樟化学计量特征的影响. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1081-1090.
- [36] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展. *林业科学*, 2020, 56(9): 143-152.
- [37] 王丽霞, 段文标, 陈立新, 杜珊. 红松阔叶混交林林隙大小对土壤水分空间异质性的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 17-24.
- [38] Hou M T, Zhang G Q, Li Y L, Xie J Q, Zang L P, Liu Q F, Chen D M, Sui M Z, He Y J. The effects of canopy gaps on soil nutrient properties: a meta-analysis. *European Journal of Forest Research*, 2024, 143(3): 861-873.
- [39] Gendreau-Berthiaume B, Kneeshaw D. Influence of gap size and position within gaps on light levels. *International Journal of Forestry Research*, 2009, 2009: 581412.
- [40] Zhu J J, Matsuzaki T, Lee F Q, Gonda Y. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182(1): 339-354.
- [41] Lyu Q, Luo Y, Liu S Z, Zhang Y, Li X J, Hou G R, Chen G, Zhao K J, Fan C, Li X W. Forest gaps alter the soil bacterial community of weeping cypress plantations by modulating the understory plant diversity. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 920905.
- [42] 王振兴, 朱锦懋, 王健, 汪滢, 卢钰茜, 郑群瑞. 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应. *生态学报*, 2012, 32(12): 3841-3848.
- [43] Wang Z B, Yang H J, Wang D H, Zhao Z. Spatial distribution and growth association of regeneration in gaps of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) plantation in northern China. *Forest Ecology and Management*, 2019, 432: 387-399.
- [44] Muscolo A, Bagnato S, Sidari M, Mercurio R. A review of the roles of forest canopy gaps. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(4): 725-736.
- [45] 曾洪, 吴雨茹, 钟欣艺, 许银, 鱼舜尧, 林静芸, 魏俊德, 郝建锋. 华西雨屏带马尾松人工林林窗大小对植物多样性与土壤理化性质的影响. *四川农业大学学报*, 2023, 41(2): 185-192.
- [46] 刘江丽, 吕倩, 刘俊杰, 陈小红, 范川, 李贤伟. 林窗尺度对马尾松人工林林下灌草层优势种生态位的早期影响. *西北植物学报*, 2022, 42(2): 312-325.