



毛梦蕾,祖奎玲,刘雨冰,等.庐山不同人工林林窗内植物多样性及其谱系结构的对比研究[J].江西农业大学学报,2025,47(3):683-693.

MAO M L,ZU K L,LIU Y B,et al.A comparative review of plant diversity and phylogenetic structure in forest gaps of different plantation forests in Lushan Mountain[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):683-693.

庐山不同人工林林窗内植物多样性 及其谱系结构的对比研究

毛梦蕾¹,祖奎玲¹,刘雨冰²,陶凌剑¹,肖如萍¹,张雨婷¹,曾 裕¹,刘苑秋^{1*}

(1.江西农业大学 林学院/鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室,江西 南昌 330045;
2.江西庐山国家级自然保护区管理局,江西 九江 332000)

摘要:【目的】林窗是森林中树木死亡倒伏后形成的空隙,可以改变森林的空间结构与林下植被生物多样性的组成,林窗的形成对森林群落生物多样性的动态变化及保护具有重要意义。【方法】以庐山国家级自然保护区的日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)与日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa*)人工林为研究对象,通过对2种人工林林窗内植物多样性的采样调查,分别探讨2种人工林林窗内物种多样性与系统发育多样性,并比较不同人工林下植物多样性谱系结构的差异。【结果】(1)日本扁柏人工林林窗内共有48种植物,隶属于26科40属;日本柳杉人工林林窗内共有114种植物,隶属于47科77属,不同面积日本柳杉林林窗的植物种类及多度均高于日本扁柏林林窗;(2)不同面积林窗下2种人工林的物种多样性存在差异,但均为中林窗内植物多样性最高;(3)日本柳杉林林窗下的植物多样性谱系结构在中小林窗面积下趋于聚集;日本扁柏林林窗下的植物多样性谱系结构在中等与大面积林窗下呈现集聚趋势。【结论】庐山地区不同人工林林窗内植物多样性组成存在明显差异,中等面积林窗有利于提高日本柳杉与日本扁柏人工林群落物种多样性与系统发育多样性。

关键词:植物多样性;系统发育多样性;林窗面积;日本柳杉;日本扁柏

中图分类号:Q948.1 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)03-0683-11

CSTR:32399.14.aauj.2025059



A comparative review of plant diversity and phylogenetic structure in forest gaps of different plantation forests in Lushan Mountain

MAO Menglei¹,ZU Kuiling¹,LIU Yubing²,TAO Lingjian¹,XIAO Ruping¹,
ZHANG Yuting¹,ZENG Yu¹,LIU Yuanqiu^{1*}

收稿日期:2024-12-26 修回日期:2025-02-27

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32301463)、江西省自然科学基金青年基金及面上基金项目(20224BAB213033,20232BAB205023)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200433)

Project supported by National Natural Science Foundation of China Youth Project (32301463), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20224BAB213033, 20232BAB205023) and Science and Technology Research Project of Jiangxi Provincial Department of Education (GJJ2200433)

作者简介:毛梦蕾,硕士生,orcid.org/0009-0007-4081-9749,18207002183@163.com;*通信作者:刘苑秋,教授,博士,主要从事森林生态及退化生态系统植被恢复研究,orcid.org/0000-0003-0385-9702,liuyq404@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.College of Forestry, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Lushan National Nature Reserve Administration of Jiangxi Province, Jiujiang, Jiangxi 332000, China)

Abstract: [Objective] Forest gaps, formed by the fall of trees in forests, can alter the spatial structure of forests and the composition of understory vegetation biodiversity. The formation of forest gaps is of great significance for the dynamic changes and protection of biodiversity in forest communities. [Method] This study focuses on the *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations in Lushan National Nature Reserve. By sampling and investigating the plant biodiversity within the forest gaps of these two plantations, the species diversity and phylogenetic diversity within the forest gaps of both plantations were explored and the differences in the phylogenetic structure of plant biodiversity under different plantations were compared. [Result] (1) A total of 48 plant species were found in the forest gaps of the *Chamaecyparis obtusa* plantation, belonging to 26 families and 40 genera; while in the *Cryptomeria japonica* plantation, there were 114 plant species, belonging to 47 families and 77 genera. The species richness and abundance in the *Cryptomeria japonica* forest gaps were higher than those in the *Chamaecyparis obtusa* forest gaps across different sizes; (2) The species diversity of the two plantations varied under different forest gap sizes, but both showed the highest plant diversity in medium-sized gaps; (3) The phylogenetic structure of plant diversity under the *Cryptomeria japonica* forest gaps tended to cluster in small and medium-sized gaps; the phylogenetic structure of plant diversity under the *Chamaecyparis obtusa* forest gaps showed a clustering trend in medium and large-sized gaps. [Conclusion] There are significant differences in the composition of plant biodiversity within forest gaps of different plantations in the Lushan area. Medium-sized forest gaps are beneficial for both *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations to enhance community species diversity and phylogenetic diversity.

Keywords: plant diversity; phylogenetic diversity; forest gaps; *Cryptomeria japonica*; *Chamaecyparis obtusa*

【研究意义】森林是陆地生态系统的主体,拥有丰富的生物多样性资源,其在改善生态系统、调节全球气候等方面发挥着重要作用。依据我国开展的第九次全国森林资源普查结果,2013年至2018年期间,我国人工林面积增加了1 021万 hm^2 ,从6 933万 hm^2 增至7 954万 hm^2 ,稳居全球人工林面积之首^[1]。但我国多数人工林是追求短期经济效益的经济速生林,树种结构单一,森林生态系统抗风险能力差,进而引发土壤退化、森林生产能力降低、生态系统功能丧失、碳储量下降等一系列生态问题^[2]。尽管混交林的经营对策在一定程度上缓解了上述问题,但是多数人工林仍然缺乏长远稳定的发展策略^[3]。为了缓解人工林危机,林窗作为一种改良人工林林分、推进树木自然更新的办法在多个地域得到推广。林窗(forest gap)是森林中树木死亡倒伏后形成的空隙,它作为生态系统内一种常见的干扰方式,其动态与林下生物多样性密切相关。林窗的形成改变了林下植物的光、温度、水以及土壤等环境因子,使得资源环境出现异质性,影响着种子萌发、幼苗生长,进而扩大到影响森林生态系统的物质循环,导致植物多样性发生改变^[4]。同时,林窗具有一系列自身特征,包括林窗的大小、林窗形成年限、林窗形成原因等,此类特征对林窗内的微环境有着不同程度影响,比如,随着林窗的大小变化,林下植被的光照强度、温度等随之产生变化^[5]。这些特征的改变可能对林窗下植物多样性的形成具有重要影响,但目前已有研究较少涉及不同人工林林窗下植物多样性的对比。【前人研究进展】林下生物多样性是决定人工林生态系统稳定性的重要因素之一,不同程度林窗干扰下人工林生物群落中植物多样性的组成研究,对探究不同人工林的生态系统稳定性及其可持续经营均具有重要意义^[6]。目前,人工林物种多样性的研究多数局限于现存物种的丰富度上,其系统发育多样性包含了该区域物种之间的系统发育关系与进化信息^[7],是考虑植物进化历史过程中受到生境、物种相互作用等影响而做出评估的另一层面^[8]。因此,为了更加全面掌握人工林植物群落的特征及稳定性,有必要从物种多样性与系统发育多样性等多个角度来进行研究^[9]。近年来,谱系结构在探究维持群落物种多样性机制方面得到大量关注,除了群落的组成特征以外,谱系结构还可以了解群落进化发育与生态学发展进程,为群落物

种多样性的研究打开了崭新视角^[10]。谱系结构主要关注的是群落系统发育的平均亲缘关系相关性与最近亲缘关系相关性,亲缘关系相近的物种通常生态位也较为相近,因此此类物种之间的竞争关系激烈,聚集的谱系多样性即可体现出这一生态过程^[11]。

【本研究切入点】日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)与日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa*)原产日本,为柏科(*Cupressaceae*)常绿针叶树种,20世纪初作为重要造林树种引入江西庐山,随后全国十几个省市相继从庐山引种,至20世纪80年代,我国大陆引种栽培日本柳杉的有江西、福建、浙江、江苏等十多个地区,并成为亚高山地区主要造林树种^[12]。调查显示,庐山林窗形成的年限由2000年至最近2年不等,且目前不同林窗特征的日本柳杉与日本扁柏林下植物多样性尚未有学者进行对比研究,其生物多样性以及系统发育多样性是否受到林窗特征的影响尚不明确。【拟解决的关键问题】本试验以庐山日本柳杉与日本扁柏人工林为研究对象,量化林窗特征与环境因子,从植物多样性与系统发育多样性、谱系结构的角度出发探讨以下几个问题:(1)日本柳杉与日本扁柏不同面积林窗下的植物多样性、系统发育多样性以及谱系结构是否存在差异;(2)日本柳杉与日本扁柏林窗下物种多样性与系统发育多样性及其相关性如何?

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验以庐山为主要研究区域,庐山(29°30′~29°41′N,115°51′~116°07′E)地处于江西省九江市,北邻长江、东倚鄱阳湖,其中最高海拔1474 m的大汉阳峰为庐山最高峰^[13]。庐山南北长约25 km,东西宽

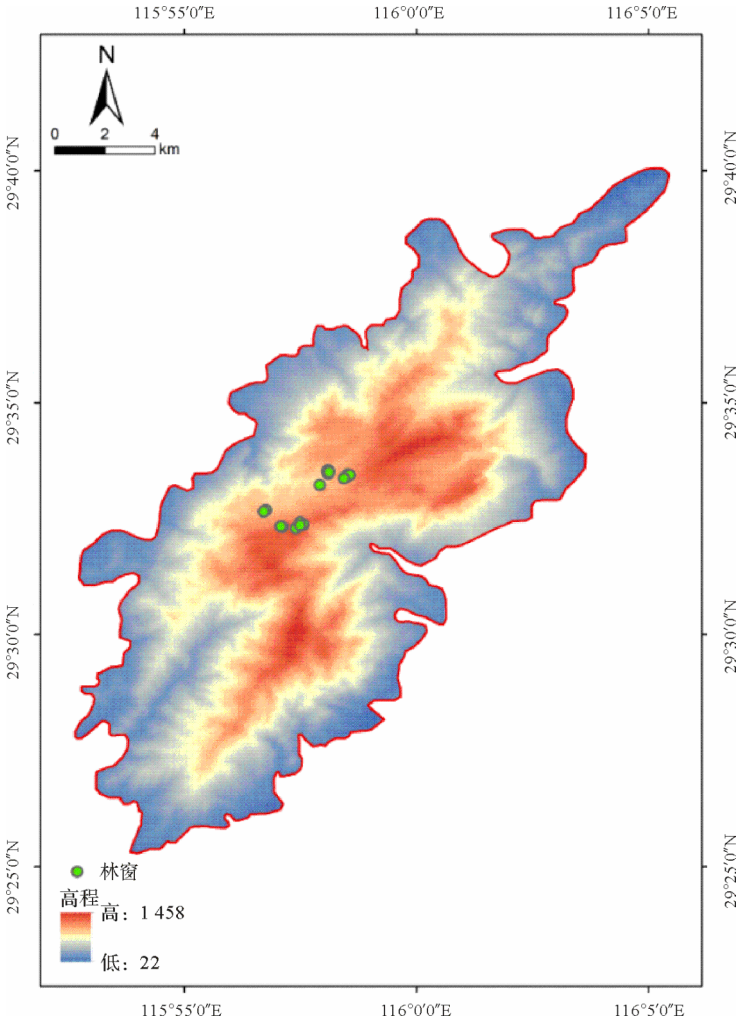


图1 研究区域地理位置图

Fig.1 Geographic location map of the project area

约10 km,总面积达到 $3.05 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。庐山地属湿润气候区,全年最高温度 32°C ,最低气温 -16.8°C ,全年平均温度 11.4°C ,全年平均降雨量1 917 mm,良好的水热条件造就了庐山丰富的物种多样性^[14]。日本柳杉与日本扁柏人工针叶林多生长于庐山海拔1 000~1 300 m,其中日本柳杉约占庐山造林面积的6%,成林面积可达 259 hm^2 ,为庐山的主要造林树种^[13]。

1.2 林窗样地调查

以庐山地区日本柳杉与日本扁柏人工林为研究对象,于2022年对庐山地区人工林进行前期实地调查,根据前期调查结果将林窗划分为大($>500 \text{ m}^2$)、中($200 \sim 500 \text{ m}^2$)、小($<200 \text{ m}^2$)3个不同等级,在每个等级林窗内设置若干样地,共设置23个样地,根据林窗的不同大小布设最小 $5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$,最大 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样地,调查样地内乔木种类并每木检尺胸径、树高、冠幅;每个样地内的4个顶角和中心共设置5个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的灌木调查样方和 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本调查样方,记录样地内的所有植物种类和数量,植物种类根据《中国植物志》进行鉴定。

1.3 多样性指数的计算与分析

植物多样性指数主要选取重要值、物种丰富度指数、香农多样性指数与辛普森优势度指数来测度物种多样性^[15-16],公式如下:

$$\text{重要值} = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对优势度}) / 3 \quad (1)$$

$$\text{香农-威纳多样性指数: } H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$\text{辛普森指数: } D = 1 - \sum \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (3)$$

$$\text{物种丰富度指数: } R = S \quad (4)$$

式(1)、式(2)、式(3)和式(4)中: S 代表物种数, P_i 为种 i 的相对多度。 N 为总个体数, N_i 为第 i 个种的个体数量。

此外,研究还引入了系统发育多样性指数(phylogenetic distance, PD),它衡量的是群落内所有物种在系统发育树上分支的总长度。同时,还考虑了系统发育结构指数,该指数由净谱系亲缘关系指数(Net relatedness index, NRI)构成,反映了群落中物种间平均的系统发育距离,以及净最近种间亲缘关系指数(Nearest taxon index, NTI),它表示的是每个物种与其最接近的亲缘物种之间的遗传距离^[17]。NRI与NTI是基于平均谱系距离(mean phylogenetic distance, MPD)与平均最近谱系距离(mean nearest taxon distance, MNTD)进行标准化测度后得到的值,NRI和NTI值反映了谱系的集聚程度,如果NRI和NTI值均大于0反映了谱系聚类,如果NRI和NTI值小于0,则反映了谱系分散^[18]。

其公式如下:

$$\text{系统发育多样性指数: } PD = \sum Lb \quad (5)$$

$$\text{净谱系亲缘关系指数: } NRI = -1 \times \frac{MPDs - MPD_{\text{mds}}}{SD(MPD_{\text{mds}})} \quad (6)$$

$$\text{净最近种间亲缘关系指数: } NTI = -1 \times \frac{MNTDs - MNTD_{\text{mds}}}{SD(MNTD_{\text{mds}})} \quad (7)$$

Lb 是物种在系统发育树上从其最近共同祖先到树根的分支长度。

多样性指数基于R 4.3.2进行计算,处理后的数据基于SPSS 26进行分析,采用Pearson相关性分析检验物种多样性、系统发育多样性和系统发育结构间的相互关系以及环境因子与物种多样性、系统发育多样性、系统发育结构间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同面积林窗下日本柳杉与日本扁柏人工林内植物物种组成的比较

在14个中大日本柳杉林窗样地中重要值高的优势物种包括:玉山竹(*Yushania niitakayamensis*)、日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)、茶树(*Camellia sinensis*)、黄山松(*Pinus taiwanensis*)。中林窗的优势物种包括:山樱花(*Cerasus serrulata*)、日本柳杉、栎(*Quercus acutissima*)、蜡瓣花(*Corylopsis sinensis*)。小林窗的优势物种包括:羊柴(*Corethroedendron fruticosum*)、日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)、小叶白辛树(*Pterosty-*

rax corymbosus)、白叶莓(*Rubus innominatus*)(表 1)。在 9 个日本扁柏林窗样地中,不同大小林窗下优势物种组成存在差异,大林窗下重要值高的优势物种主要包括:山鸡椒(*Litsea cubeba*)、日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa*)、老鼠矢(*Symplocos stellaris*)、臭蜡(*Evodia fargesii*)。中林窗的优势物种包括:山鸡椒(*Litsea cubeba*)、日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、中国绣球(*Hydrangea chinensis*)。小林窗的优势物种包括:日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa*)、蜡瓣花(*Corylopsis sinensis*)、中国绣球(*Hydrangea chinensis*)、柃木(*Eurya japonica*)(表 2)。

表 1 日本柳杉林不同大小林窗内重要值前十的植物

Tab.1 Important values of the top ten plant species in forest gaps of different sizes of <i>Cryptomeria japonica</i>			
样地类型 Plot type	物种名称 Species name	隶属的科 Family	重要值 Importance value
大林窗 Large forest gap	玉山竹	禾本科	174.00%
	山鸡椒	樟科	92.12%
	茶树	山茶科	65.61%
	黄山松	松科	43.94%
	青榨槭	槭树科	40.15%
	日本柳杉	杉科	39.86%
	蜡瓣花	金缕梅科	39.58%
	日本扁柏	柏科	37.63%
	栎	壳斗科	33.20%
	凹叶厚朴	木兰科	29.82%
中林窗 Medium forest gap	山樱花	蔷薇科	70.82%
	日本柳杉	杉科	69.98%
	栎	壳斗科	62.10%
	蜡瓣花	金缕梅科	60.50%
	合欢	含羞草科	44.58%
	凹叶厚朴	木兰科	39.28%
	腋毛泡花树	清风藤科	29.97%
	青榨槭	槭树科	29.14%
	悬钩子	蔷薇科	29.00%
	中国绣球	虎耳草科	27.73%
小林窗 Small forest gap	羊柴	豆科	123.31%
	日本柳杉	杉科	90.47%
	小叶白辛	安息香科	63.23%
	白叶莓	蔷薇科	56.41%
	大青	马鞭草科	50.02%
	悬钩子	蔷薇科	48.63%
	枹栎	壳斗科	38.47%
	黄丹木姜子	樟科	37.07%
	蜡瓣花	金缕梅科	34.01%
	华空木	蔷薇科	33.78%

2.2 不同面积林窗下日本柳杉与日本扁柏人工林内物种多样性与系统发育多样性

不同林窗面积下日本柳杉林的 Shannon–Wiener 指数为 2.20~3.41,且最大值出现在中林窗中;不同林窗面积下日本扁柏的 Shannon–Wiener 指数为 1.27~2.26,且最大值出现在大林窗中(表 3)。

表 2 扁柏林不同大小林窗内重要值前十的植物

Tab.2 Important values of the top ten plant species in forest gaps of different sizes of *Chamaecyparis obtusa*

样地类型 Plot type	物种名称 Species name	隶属的科 Family	重要值 Importance value
大林窗 Large forest gap	山鸡椒	樟科	172.73%
	日本扁柏	柏科	123.60%
	老鼠矢	山矾科	24.27%
	臭蜡	芸香科	18.07%
	杉木	杉科	17.69%
	檫木	樟科	15.85%
	盐肤木	漆树科	15.31%
	粉叶柿	柿科	15.12%
	牯岭悬钩子	蔷薇科	13.02%
	大柄冬青	冬青科	12.79%
中林窗 Medium forest gap	山鸡椒	樟科	161.70%
	日本扁柏	柏科	90.79%
	檫木	樟科	30.55%
	漆树	漆树科	28.97%
	中国绣球	虎耳草科	28.71%
	羽叶泡花树	清风藤科	26.78%
	老鼠矢	山矾科	24.00%
	大青	马鞭草科	18.75%
	臭蜡	芸香科	17.85%
	白蜡树	木犀科	15.88%
小林窗 Small forest gap	日本扁柏	柏科	165.48%
	蜡瓣花	金缕梅科	76.27%
	中国绣球	虎耳草科	60.04%
	柃木	山茶科	26.29%
	山樱花	蔷薇科	25.53%
	枹栎	壳斗科	24.47%
	野漆树	漆树科	24.36%
	紫珠	马鞭草科	20.69%
	白檀	山矾科	20.13%
	柃木	山茶科	19.22%

由图 2 中物种多样性与系统发育多样性的相关性热图可知,日本柳杉林林窗系统发育多样性中的 NRI 指数与 PD、SR 指数存在显著负相关关系,Shannon-Wiener 指数与 Simpson、SR、PD、PE 指数存在显著正相关关系,SR 与 PD、PE 存在显著正相关关系。日本扁柏林林窗 Shannon-Wiener 指数与 PD、PE 指数存在显著正相关关系,SR 与 Shannon-Wiener、PD、PE 指数存在显著正相关关系,NTI、NRI 与其他各项指数之间相关关系不显著。

2.3 日本柳杉与日本扁柏的谱系结构分析

由图 3 可知,从 NTI 来看,日本柳杉林林窗在大林窗中趋于发散。日本扁柏林窗,从 NRI 来看整体均趋于发散,而 NTI 在中等与大面积林窗下呈现集聚趋势,说明日本扁柏人工林林窗下生物多样性在较大林窗下系统发育关系更近。

表3 日本柳杉与日本扁柏林的物种多样性与系统发育多样性
Tab.3 Species diversity and phylogenetic diversity of *Cryptomeria japonica*
and *Chamaecyparis obtusa* forests

人工林类型 Plantation forest type	林窗面积/m ² Forest gap area	Shannon– Wiener	Simpson	Species richness	PD	PE	NRI	NTI
扁柏林 <i>Chamaecyparis obtusa</i> forest	物种多样性 Species diversity			系统发育多样性 Phylogenetic diversity				
	770	2.20	0.79	24	2 592.30	833.79	−1.91	0.66
	756	1.27	0.50	12	1 647.31	326.93	−0.57	1.37
	349	1.29	0.51	12	1 680.45	297.17	−0.67	1.38
	230	2.19	0.80	17	1 937.94	547.08	0.05	−3.77
	207	2.26	0.82	22	2 301.00	649.48	0.20	1.23
	133	1.78	0.77	11	1 553.37	427.20	−1.73	1.08
	128	1.53	0.74	6	1 129.38	195.44	−1.41	−2.92
	107	1.99	0.77	18	2 143.74	495.03	−1.27	0.66
	85	1.44	0.70	6	1 108.29	213.03	−1.24	−1.23
柳杉林 <i>Cryptomeria japonica</i> forest	2 484	2.28	0.77	35	3 593.20	725.79	−0.42	−1.59
	1 679	2.97	0.93	32	3 735.26	630.01	0.95	−1.93
	1 376	3.41	0.95	59	5 448.83	1 133.02	−0.06	−1.07
	1 183	2.97	0.91	45	4 659.27	912.55	0.77	−1.06
	669	3.02	0.94	28	3 514.52	653.82	0.59	−0.80
	478	3.01	0.93	32	3 664.11	598.79	−0.07	1.66
	396	2.73	0.91	21	2 835.49	310.15	−0.05	1.20
	340	3.62	0.96	63	6 038.92	1 614.41	−0.56	2.07
	254	2.77	0.92	24	3 142.21	614.14	1.31	0.61
	191	2.65	0.89	27	2 953.73	478.83	0.45	−0.62
	156	3.38	0.96	41	4 569.80	889.72	0.00	1.39
	117	2.20	0.84	13	2 491.81	332.15	2.49	0.10
	106	2.84	0.92	23	3 000.12	483.13	0.91	−0.50
	47	2.72	0.91	24	3 202.41	491.30	0.05	−0.91

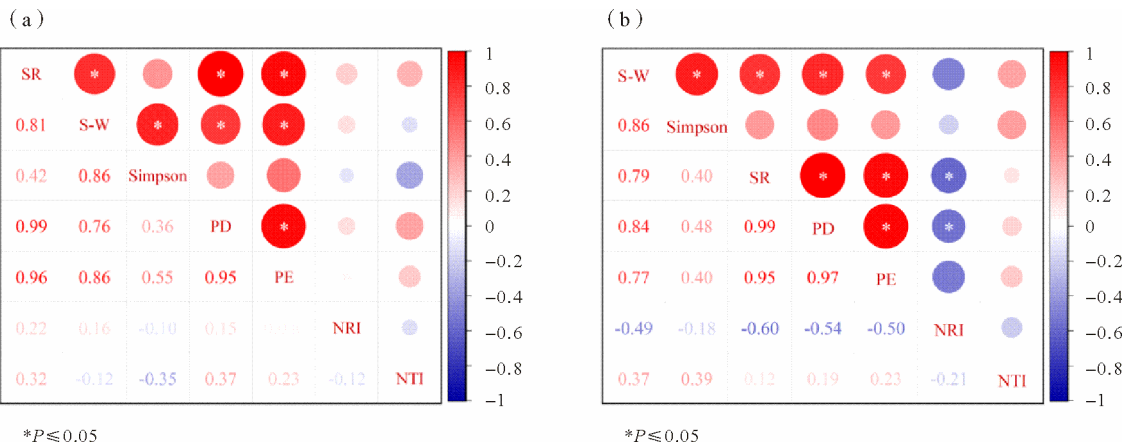


图2 日本扁柏(a)与日本柳杉(b)林窗内物种多样性指数与系统发育指数之间的相关分析
Fig.2 Correlation analysis between species diversity indices and phylogenetic indices in *Cryptomeria japonica* (a)
and *Chamaecyparis obtusa*(b)forest gaps

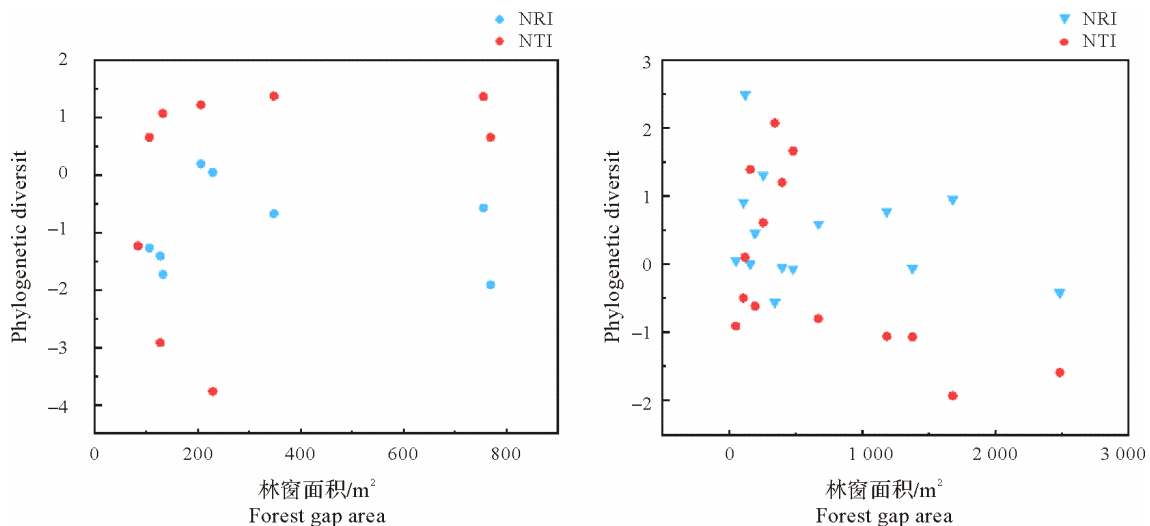


图3 日本扁柏林(a)林窗与日本柳杉林(b)林窗系统发育结构指数

Fig.3 Phylogenetic structural indices of forest gaps in *Cryptomeria japonica* (a) and *Chamaecyparis obtusa* (b)

3 讨 论

3.1 日本柳杉林与日本扁柏林林窗下木本植物物种组成

林窗的存在能够增加植物多样性,改变森林群落的物种组成,前人对喀斯特森林林窗的研究表明,林窗的出现改变了林内光环境特征,其作为主要驱动因子影响了林下灌木层与幼苗的更新发育^[19]。本研究结果显示庐山日本扁柏人工林林窗内共有 48 种植物,隶属于 26 科 40 属,其中樟科与柏科为日本扁柏人工林内的主要优势科;庐山日本柳杉人工林林窗内共有植物 114 种,隶属于 47 科 77 属,其中蔷薇科、山茶科、杉科与樟科为日本柳杉人工林内的主要优势科。不同树种人工林林窗下的科属种差距较大,不同面积林窗下优势种组成以及数量特征也同样有所区别,研究表明,在不同面积日本扁柏人工林林窗中的优势种均为山鸡椒与日本扁柏,可能是由于山鸡椒作为喜光植物在林窗光环境得到改良的情况下快速生长,从而占据大量灌木层空间。而在日本柳杉人工林林窗中大林窗与小林窗的优势种均为玉山竹,中林窗优势种为山樱花。这可能是因为多年来竹类植物凭借着自身克隆整合的生长优势,快速扩张进入光照温度降水条件良好的林窗内部;同时也有研究表面当群落的物种多样性越低,群落结构越简单时,竹类植物更容易进行扩张,中林窗中的优势种未出现山竹可能是因为中林窗下的物种多样性高、群落结构复杂导致的^[20]。因此,不同面积林窗的主要种类组成差异反映出林窗的生境差异,大林窗下拥有更好的光照条件,其物种组成多为喜光落叶植物;而在小林窗下的物种多为常绿植物,为林窗在森林多样性维护的实际运用提供理论帮助。

3.2 日本柳杉林与日本扁柏林林窗下植物多样性与系统发育多样性

森林物种多样性指数能够作为森林生态功能效应参考标准,林窗的形成增加了森林植物多样性^[21],在森林恢复的研究中显示,森林的自然恢复相较人工恢复更有利于促进物种多样性的形成,最终在人工林生态功能效应经营上体现出来^[22]。本研究中的日本柳杉林林窗与日本扁柏林林窗的 Shannon-Wiener 指数均随着林窗面积的增大出现了先增大后减小的趋势,这与李艳等^[23]和刘少冲等^[24]的研究结果一致,林窗面积的增加能够为林下植物的发育提供更有利的生长环境,从而促进多样性增长,但当林窗面积过大且接近无树木林地的状况反而对森林群落发展有消极作用。对于庐山日本柳杉与日本扁柏人工林而言,中林窗(200~500 m²)下物种多样性指数最大,故而在中等面积林窗下森林植物群落能够更好地利用环境资源,这与杨桦次生林林窗下的物种多样性研究结果一致^[24]。物种丰富度指数在 2 个不同树种林窗下都随着林窗面积增大而呈现增大趋势。也有研究指出,随着林窗面积的增加多样性指数表现出线性增加的变化趋势,另有研究表明大林窗比中小面积的林窗有着更强的光环境异质性,为打破更多的种子休眠提供了良好的光照环境,使得林窗下的物种丰富度指数提高^[25]。但从数值的角度上来说日本柳杉

林林窗的物种丰富度指数明显大于日本扁柏林林窗,这可能是由于日本扁柏林林窗包含了更多幼年期林窗,而日本柳杉林林窗更多由中年期林窗组成。林窗在初期形成时植物多样性较低、物种丰富度较低,优势种较为突出,随着林窗年龄的增长更多植物得以发育生长,植物种间竞争逐渐趋于激烈^[26]。随着林窗步入成熟期,经过剧烈的竞争林窗内部分物种已经淘汰步入稳定阶段,物种丰富度与多样性再度回落到较低水平^[27]。

相较于物种多样性将每一个物种视为独立的生态等价物,系统发育多样性更加注重植物在漫长的进化历史中对植物间相互作用以及生境的影响^[28],系统发育结构能够补充说明系统发育多样性,可结合推断群落构建的生态学过程^[28]。2种不同树种人工林林窗下的SR指数均与PD、PE存在显著正相关关系,即随着物种丰富度指数的增加系统发育多样性指数也随之增加。日本扁柏林林窗植物群落系统发育结构在中小面积中均趋于发散($NRI < 0$, $NTI < 0$),有研究指出系统发育结构发散是由于影响该区域群落构建主要过程为植物的种间竞争^[29]。同时日本柳杉林林窗植物群落发育结构在中小林窗面积下趋于聚集($NRI > 0$, $NTI > 0$),则可能是受到生境过滤的影响^[30]。对于日本扁柏林林窗与日本柳杉林林窗中NRI与NTI正负不一的状况提出2种猜想,可能是由于植物的种间竞争与生境过滤共同影响了该地区的植物群落构建过程^[31],也可能是因为NRI为群落中所有物种对系统发育距离的平均值,反映着整个系统发育树的发育模式,而NTI关注的是群落系统发育树末端的最近亲缘关系相关性,与参数本身的适用范围有关^[32]。

致谢:林业良种良法推广示范项目(2022年)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 杜志,胡觉,肖前辉,等.中国人工林特点及发展对策探析[J].中南林业调查规划,2020,39(1):5-10.
DU Z, HU J, XIAO Q H, et al. Analysis on characteristics and development countermeasures of plantation resources in China [J]. Central south forest inventory and planning, 2020, 39(1): 5-10.
- [2] ZHANG J, FU B, STAFFORD-SMITH M, et al. Improve forest restoration initiatives to meet sustainable development goal 15 [J]. Nature ecology & evolution, 2021, 5(1): 10-13.
- [3] LIU C L C, KUCHMA O, KRUTOVSKY K V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future [J]. Global ecology and conservation, 2018, 15: e00419.
- [4] 黄庆荣,施逸啸,江蓝,等.格氏栲天然林植物功能性状与系统发育对林窗大小的响应[J].森林与环境学报.2023,43(5):449-456.
HUANG Q R, SHI Y X, JIANG L, et al. Responses of plant functional traits and phylogeny to gap size in *Castanopsis kawakamii* natural forest [J]. Journal of forest and environment, 2023, 43(5): 449-456.
- [5] 沙欢,梁咏亮,彭妞,等.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[J].生态学杂志,2024,43(8): 2382-2394.
SHA H, LIANG Y L, PENG N, et al. Effects of forest gap size on species diversity of vascular plants in shrub and herb layer of *Picea crassifolia* in Helan Mountains, Chinese [J]. Journal of ecology, 2024, 43(8): 2382-2394.
- [6] 盘李军,许涵,李艳朋,等.不同树种配置模式对人工林物种和功能多样性恢复的影响[J].林业与环境科学,2023,39(1):55-64.
PAN L J, XU H, LI Y P, et al. The effects of configuration modes of different trees on the restoration of species diversity and functional diversity in planted forests [J]. Forestry science and technology, 2023, 39(1): 55-64.
- [7] CADOTTE M W, DINNAGE R, TILMAN D. Phylogenetic diversity promotes ecosystem stability [J]. Ecology, 2012, 93(8): 223.
- [8] 陈博,江蓝,谢子扬,等.格氏栲天然林林窗植物物种多样性与系统发育多样性[J].生物多样性,2021,29(4): 439-448.
CHEN B, JIANG L, XIE Z Y, et al. Taxonomic and phylogenetic diversity of plants in a *Castanopsis kawakamii* natural forest [J]. Biodiversity science, 2021, 29(4): 439-448.
- [9] YANG J, ZHANG G, CI X, et al. Functional and phylogenetic assembly in a Chinese tropical tree community across size

- classes, spatial scales and habitats[J]. Functional ecology, 2014, 28(2): 520-529.
- [10] 慈秀芹, 李捷. 系统发育多样性在植物区系研究与生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2017, 25(2): 175-181.
CI X Q, LI J. Phylogenetic diversity and its application in floristics and biodiversity conservation[J]. Biodiversity science, 2017, 25(2): 175-181.
- [11] 卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 等. 沿海海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构[J]. 生物多样性, 2014, 22(4): 438-449.
LU M M, HUANG X C, CI X Q, et al. Phylogenetic community structure of subtropical forests along elevational gradients in Ailao Mountains of southwest China[J]. Biodiversity science, 2014, 22(4): 438-449.
- [12] WANG C, LI P, XIAO T, et al. Effects of climate change and forest gap disturbance on the growth characteristics of Japanese cypress and Japanese cedar on Mount Lushan, subtropical China[J]. Journal of soils and sediments, 2024, 24(4): 1528-1540.
- [13] 白天军, 刘苑秋, 温林生, 等. 庐山日本柳杉早材与晚材年轮宽度对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 61-69.
BAI T J, LIU Y Q, WEN L S, et al. Response of earlywood and latewood ring width of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, eastern China[J]. Journal of Beijing forestry university, 2020, 42(9): 61-69.
- [14] 韦玉贵, 彭琬钰, 邱颖青, 等. 庐山日本柳杉水分利用效率对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(3): 48-57.
WEI Y G, PENG W Y, QIU Y Q, et al. Response of water use efficiency of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, Jiangxi Province of eastern China[J]. Journal of Beijing forestry university, 2023, 45(3): 48-57.
- [15] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.
FANG J Y, SHEN Z H, TANG Z Y, et al. The protocol for the survey plan for plant species diversity of China's mountains[J]. Biodiversity science, 2004, 12(1): 5-9.
- [16] 吴成丹, 孟昭军, 刘曼红, 等. 挠力河自然保护区退耕湿地植物多样性及其与土壤化学因子的关系[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 969-979.
WU C D, MENG Z J, LIU M H, et al. Vegetation diversity and its relationship with soil chemical factors in reclaimed wetland in Naolihe Nature Reserve[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 969-979.
- [17] KRAFT N J, CORNWELL W K, WEBB C O, et al. Trait evolution, community assembly, and the phylogenetic structure of ecological communities[J]. The American naturalist, 2007, 170(2): 271-283.
- [18] 刘巍, 曹伟. 长白山植物群落谱系结构及环境因子对其的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 63-68.
LIU W, CAO W. Environmental drivers shape the phylogenetic structure of plant communities in Changbai Mountain[J]. Journal of arid land resources and environment, 2013, 27(5): 63-68.
- [19] 李羽翎. 茂兰喀斯特森林林窗内光资源再分配对木本植物更新的影响机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
LI Y L. Study on the influence mechanism of light reallocation on woody species regeneration in Maolan Karst Forests[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [20] 王晓荣, 胡兴宜, 庞宏东, 等. 毛竹扩展对杉木林和阔叶林群落结构与多样性的影响[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(5): 474-482.
WANG X R, HU X Y, PANG H D, et al. Effects of moso bamboo expansion on community structure and diversity of artificial forests, Chinese fir stands, and broad-leaved forest[J]. Journal of forest and environment, 2022, 42(5): 474-482.
- [21] 米湘成, 王绪高, 沈国春, 等. 中国森林生物多样性监测网络: 二十年群落构建机制探索的回顾与展望[J]. 生物多样性, 2022, 30(10): 211-233.
MI X C, WANG X G, Shen G C, et al. Chinese forest biodiversity monitoring network (CForBio): twenty years of exploring community assembly mechanisms and prospects for future research[J]. Biodiversity science, 2022, 30(10): 211-233.
- [22] REN Y, LYU Y, FU B, et al. Biodiversity and ecosystem functional enhancement by forest restoration: a meta-analysis in China[J]. Land degradation & development, 2017, 28(7): 2062-2073.
- [23] 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 Zhongong Mountain, West Sichuan[J]. Acta botanica boreali-occidentalia Sinica, 2015, 35(6): 1238-1245.
- [24] 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. Effects of forest gap on understory species diversity of poplar and birch secondary forests in southern section of the Da Xing'an Mountains[J]. Journal of northwest A&F university (natural science edition), 2020, 48(4): 65-74.
- [25] HAGHVERDI K, KIADALIRI H, SAGHEB-TALEBI K, et al. Variability of plant diversity and soil features following gap creation in caspian beech forests of Iran[J]. 2012, 3(9): 4622-4635.
- [26] 卢群, 曾小康, 石俊慧, 等. 深圳湾福田红树林群落演替[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4662-4671.
- LU Q, CENG X K, SHI J H, et al. Succession of a mangrove forest in Futian, Shenzhen Bay[J]. Acta ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4662-4671.
- [27] 李其斌, 张春雨, 赵秀海. 长白山不同演替阶段针阔混交林群落物种多样性及其影响因子[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7147-7155.
- LI Q B, ZHANG C Y, ZHAO X H. Species diversity and influencing factors of coniferous and broad-leaved mixed forest communities in different successional stages of Changbai Mountain[J]. Acta ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7147-7155.
- [28] 程毅康, 张辉, 王旭, 等. 功能多样性和谱系多样性对热带云雾林群落构建的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(3): 217-226.
- CHENG Y K, ZHANG H, WANG X, et al. Effects of functional diversity and phylogenetic diversity on the tropical cloud forest community assembly[J]. Chinese journal of plant ecology, 2019, 43(3): 217-226.
- [29] QIAN H, ZHANG J, SANDEL B, et al. Phylogenetic structure of angiosperm trees in local forest communities along latitudinal and elevational gradients in eastern North America[J]. Ecography, 2020, 43(3): 419-430.
- [30] 廉敏, 铁军. 山西陵川南方红豆杉自然保护区鹅耳枥植物群落谱系结构特征[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2267-2276.
- LIAN M, TIE J. Phylogenetic structure characteristics of *Carpinus turczaninowii* community in *Taxus chinensis* Nature Reserve in Lingchuan, Shanxi Province[J]. Acta ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2267-2276.
- [31] KRESS W J, ERICKSON D L, JONES F A, et al. Plant DNA barcodes and a community phylogeny of a tropical forest dynamics plot in Panama[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2009, 106(44): 18621-18626.
- [32] XU Y, LIU J, LI H, et al. The effects of evolutionary and environmental variance on estimates of phylogenetic diversity in temperate forest plots[J]. Journal of plant ecology, 2021, 14(1): 96-107.