

DOI: 10.20103/j.stxb.202306031177

陈涵,郭弘婷,陈睿,薛国华,王丽艳,姜姜.杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应.生态学报,2023,43(24):10274-10284.
Chen H, Guo H T, Chen R, Xue G H, Wang L Y, Jiang J. Understory plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations and its short-term environmental response to different thinning intensities. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10274-10284.

杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应

陈 涵¹, 郭弘婷², 陈 睿¹, 薛国华³, 王丽艳⁴, 姜 姜^{1,*}

1 南方现代林业协同创新中心, 凤阳山森林生态系统国家定位观测研究站, 南京林业大学, 南京 210037

2 海洋科学组, 多学科数字出版机构, 南京 210037

3 永丰县官山林场, 吉安 331500

4 江西省林业科学院, 南昌 330032

摘要:以江西省官山林场的杉木人工林为研究对象,探究不同间伐强度(0%、20%、40%)物种多样性、地上生物量、林分光环境和土壤理化性质及其之间的相关性。结果表明:(1)林下物种数量随间伐强度的增加而增加,林下灌木层优势种不断变化,而草本层一直不变。(2)林下植物各多样性指数均随间伐强度的增大而增大,除 Margalef 指数外,其余各指数均在间伐 40%与未间伐间呈显著差异。(3)灌木层地上生物量占总生物量的主体,且随间伐强度的增大而增大,不同间伐强度间差异显著,而草本层却呈相反趋势。(4)叶面积指数随间伐强度的增加而下降,冠层开度、林下直射光、散射光、总光照随之上升,但仅在间伐 40%后显著。(5)土壤全氮含量间伐后显著上升,但土壤磷、钾、有机质含量均显著下降(6)灌木层多样性指数与灌木层地上生物量、土壤全氮呈显著正相关,与草本层地上生物量、速效磷、全钾含量呈显著负相关。草本层多样性指数与冠层开度、林下直射光、林下散射光、林下总光照呈显著正相关,与草本层地上生物量、叶面积指数呈显著负相关。总之,林下植物地上生物量、土壤化学性质是影响灌木层多样性指数变化的主要控制因子,林分光环境是影响草本层的主要控制因子。就本研究 3 种间伐强度而言,该地杉木人工林的最适宜间伐强度为 40%。

关键词:杉木人工林;间伐强度;林下植物多样性;生物量;林分光环境;土壤化学性质

Understory plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations and its short-term environmental response to different thinning intensities

CHEN Han¹, GUO Hongting², CHEN Rui¹, XUE Guohua³, WANG Liyan⁴, JIANG Jiang^{1,*}

1 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Fengyangshan Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 Section Marine Science, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Nanjing 210037, China

3 Yongfeng County Guanshan Forest Farm, Ji'an 331500, China

4 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

Abstract: In order to improve the forest quality of *Cunninghamia lanceolata* plantation, ecological thinning experiment was carried out to explore the effects of thinning intensity on understory plants, biomass and environmental factors, and to provide theoretical basis for improving the stability of *Cunninghamia lanceolata* plantation and maintaining its sustainable management. *Cunninghamia lanceolata* plantation in Jiangxi Guanshan Forest State Farm was used for the experiment. One-way analysis of variance, Duncan range method and Pearson correlation analysis were used. The impacts of different thinning

基金项目:国家自然科学基金项目(32071612)

收稿日期:2023-06-03; 采用日期:2023-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangjiang@njfu.edu.cn

intensities (0%, 20%, 40%) on the understory species composition, species diversity, above-ground biomass, stand light environment and soil chemical properties were investigated, as well as the response of species diversity to each influencing factor. The results indicated that: (1) The number of species in the understory increased with the increase of thinning intensity, and the dominant species in the understory shrub layer changed continuously, while the herbaceous layer remained unchanged. (2) The diversity indices of understory plants increased with the thinning intensity, with significant difference between 40% thinning and unthinning, except for Margalef index. (3) The above-ground biomass of shrub layer accounted for the majority of the total biomass and increased with the increase of thinning intensity, while the herbaceous layer showed the opposite trend. (4) The leaf area index decreased with the increase of thinning intensity, and the canopy opening, direct light, scattered light, and total light all increased with thinning, with the significant difference observed at 40% thinning. (5) Soil total nitrogen content increased significantly with the increase of thinning intensity, but soil available nitrogen, phosphorus, potassium, and organic matter contents decreased significantly. (6) Shrub layer diversity index was significantly positively correlated with above-ground biomass and soil total nitrogen of shrub layer, and significantly negatively correlated with above-ground biomass, available phosphorus, and total potassium contents of herbaceous layer. The diversity index of herbaceous layer was positively correlated with canopy opening, direct light, scattered light and total light, while negatively correlated with aboveground biomass and leaf area index of herbaceous layer. In conclusion, thinning reduced the stand density, improved the light environment in the forest, and gradually accumulated the soil TN content, thus promoting the growth of understory plants, increasing the above-ground biomass of understory plants and increasing the understory plant diversity. Above-ground biomass and soil chemistry of understory plants were the main factors affecting the diversity of shrub layer, and stand light environment was the main factor affecting herbaceous layer. In terms of the three thinning intensities used in this study, the optimum thinning intensity of *Cunninghamia lanceolata* plantation was 40%.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata* plantations; thinning intensity; understory plant diversity; biomass; stand light environment; chemical properties of soil

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)为中国长江流域、秦岭以南地区栽培最广、生长快、经济价值高的主要用材树种^[1-2],为改善杉木人工林的森林质量,人们往往采用间伐方式进行生产^[3]。间伐作为森林抚育的主要措施之一,有利于优化森林结构、改变物质循环过程、改善生态系统功能^[4-5]。林下植被在维持整个森林生态系统稳定性和养分循环过程中占据重要位置,同时在维护森林物种多样性,改善土壤理化性质特征,优化林分结构和改善立地条件等方面都发挥着独特的功能和作用^[6-7]。已有研究表明间伐可通过改变林分郁闭度,以致森林群落中的光、热、水、土等环境资源得到充分利用,从而促进林下植物生长、增加林下植物物种多样性^[8-9]。因此,研究不同间伐处理对于杉木林下植物多样性的影响具有重要意义。

目前,已有大量海内外学者研究间伐强度对林下植物多样性的影响。大多研究表明,林下植被的多样性随着间伐强度的增加而逐渐增大^[10]。但也有研究发现草本层物种丰富度随间伐强度的增大而增大,而灌木层物种丰富度却随间伐强度的增大呈先增后减的趋势^[11]。有关间伐强度对林下植物多样性的影响结果不尽相同,可能是由于生物量、土壤理化性质、林分光环境、林分类型等的不同所造成的^[12]。迄今为止,不少研究结果虽然揭示了不同间伐处理对杉木林下植物多样性、林下植物功能群、生物量、土壤理化性质等单方面的影响^[1-2,13-14],但林下植物多样性与这些因素均存在一定程度的相关,对不同间伐处理的杉木人工林下植物多样性及其影响因素进行系统研究,将有助于从本质上探讨杉木人工林下植物变化的调控机理。

以江西省官山林场 2017 年实施 3 种不同间伐强度(0%, 20%, 40%)的杉木人工林为研究对象,探讨分析不同间伐强度对林下植物组成、物种多样性、生物量、林分光环境和土壤理化性质的影响,并运用多元统计分析进一步探究杉木林下植物多样性和影响因子之间的关系,确定影响杉木林下植物多样性的关键控制因子,

以期为杉木人工林的可持续经营提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于江西省中部吉安市永丰县官山林场遇元分场,地理坐标为 115°17′—115°56′E, 26°38′—27°32′N。地貌主要是丘陵、山地,气候类型属于中亚热带湿润气候,四季分明,降雨充沛,光照充足,年均气温是 18℃,年均降雨量是 1627.3mm,无霜期是 279d。红壤是当地典型的土壤类型,面积也是最大。官山林场自然条件优越,适宜松、杉、竹及多种阔叶树生长,是江西省的林业重点产区。

1.2 样地设置

样地主要选取土壤类型、立地条件、杉木种源基本一致的杉木人工纯林,2017 年 12 月对样地进行间伐,于 2020 年 8 月进行采样,按间伐株数所占比例分为对照 0、20% 和 40% 间伐强度,每个间伐强度选择三处地点,每个地点设置 3 个重复,共设置 27 个 20m×20m 标准样方。不同间伐强度样地概况见表 1。

表 1 不同间伐强度样地概况

Table 1 Sample plots with different thinning intensities

间伐模式 Thinning model	间伐强度 Thinning intensity/%	林龄 Age/a	初始密度 Initial density/ (株/hm ²)	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average diameter/cm	平均树高 Average height/m
M1	0	13	2000	2000	0.9	9.27±0.55	9.02±1.00
M2	20	13	2010	1610	0.7	9.90±1.06	9.32±0.85
M3	40	13	2030	1230	0.6	11.10±1.14	10.56±0.49

M1:间伐强度 0% Thinning intensity 0%;M2:间伐强度 20% Thinning intensity 20%;M3:间伐强度 40% Thinning intensity 40%

1.3 林下植被多样性和生物量的调查与计算

在每个标准样方的四角和中心建立 5 个小样方,共 135 个小样方。按照植物多样性调查法,分别记录每个小样方内灌木层(5m×5m)和草本层(1m×1m)植物种类及数目,利用卷尺测量盖度。调查顺序为先调查灌木,再调查草本。地上部分生物量测定采用收获法,主要是采取各小样方内灌木和草本的植物物种,利用其地上部分干质量计算地上部分生物量,林下地上部分总生物量采用两者之和进行计算。

物种多样性指标包括重要值、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、Pielou 群落均匀度指数(E)、Margalef 丰富度指数(S')^[15–16]。具体计算如下:

植物重要值 = (相对多度 + 相对频度 + 相对盖度) / 3 (1)

$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ (2)

$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$ (3)

$E = H / \ln S$ (4)

$S' = (S - 1) / \ln N$ (5)

式中, P_i 是种 i 的个体数 N_i 与所有种总个体数 N 之比; S 表示物种总数。

1.4 林分光环境数据获取

在样地中安装 Nikon D70 相机,利用 Nikon AF10.5 mm 鱼镜头,在拍摄照片时,相机高度始终保持在 1.5m,并且镜头幅度始终保持水平放置。在 27 个标准样方中心点拍摄 3 张照片,共得到 81 张照片。照片的后续分析处理工作使用 GLA2.0 软件系统,最终得到的主要参数包括冠层开度、林下直射光、林下散射光、林下总光照以及叶面积指数等参数^[17]。

1.5 土壤样品采集和测定

在每个标准样地分上、中、下不同坡位采集 0—20cm 土样,每个坡位取三点混合后装入密封袋,共 81 个样

品,并记录采样点土地的经纬度。土壤样品利用密封袋采集,经实验室自然风干,剔除根系、碎石等杂物,过筛研磨后,制成待测土壤样品。

土壤 pH 值采用电位法测定。土壤 TN 含量采用 Vario Macro Cube(CNS)元素分析仪测定,碱解氮(速效氮 AN)采用碱解扩散法测定,TP 含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定,速效磷 AP 含量采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定,TK 含量采用氢氟酸-高氯酸消煮-火焰光度计测定,速效钾 AK 含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定,土壤有机质 SOM 采用重铬酸钾-硫酸法测定^[18]。

1.6 数据处理

使用 Excel 进行数据整理计算和 Origin 2018 绘制图件和数据分析,采用 SPSS 进行统计与相关性分析,采用单因素分析(One-way ANOVA)和 Duncan 极差法($P<0.05$)进行数据多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同间伐强度林下物种组成及重要值

在所调查的 27 个样方中,共发现林下植物 29 科,43 属,52 种。灌木层中,M1 发现 7 科 8 属 10 种,M2 为 12 科 18 属 18 种,M3 为 17 科 29 属 35 种。草本层中,M1 发现 4 科 4 属 5 种,M2 为 8 科 8 属 9 种,M3 为 10 科 10 属 11 种。杉木人工林灌木、草本层物种数量均随间伐强度的增加而增加。

各间伐强度林下草本层的优势种均是芒萁(*Dicranopteris pedata*)和狗脊蕨(*Woodwardia japonica*),而灌木层中随间伐强度的变化优势种组成也随之变化。在 M1 中优势种为黄瑞木(*Adinandra millettii*),M2 为山茶(*Camellia japonica*),M3 为乌饭子(*Vaccinium bracteatum*)和乌药(*Lindera aggregata*)(表 2)。

表 2 不同间伐强度前五名林下植物种类及重要值

Table 2 Top five understory herb layer species and its important value with different thinning intensities

层次 Layer	序号 Num.	物种名称 Name of the species	科属 Family and genera	不同间伐强度重要值(IV) Important value in different thinning intensities		
				M1(0%)	M2(20%)	M3(40%)
灌木层 Shrub layer	1	黄瑞木(<i>Adinandra millettii</i>)	山茶科红淡属	24.22	—	5.89
	2	乌饭子(<i>Vaccinium bracteatum</i>)	杜鹃花科越橘属	16.19	9.66	7.5
	3	越橘(<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	杜鹃花科越橘属	13.11	—	—
	4	冬青(<i>Ilex chinensis</i>)	冬青科冬青属	12.15	—	—
	5	盐肤木(<i>Rhus chinensis</i>)	漆树科盐肤木属	9.64	—	—
	6	柃木(<i>Eurya japonica</i>)	山茶科柃木属	—	7.27	—
	7	檵木(<i>Loropetalum chinense</i>)	金缕梅科檵木属	—	—	5.33
	8	山茶(<i>Camellia japonica</i>)	山茶科山茶属	—	13.74	—
	9	白檀(<i>Symplocos paniculata</i>)	山矾科山矾属	—	11.09	—
	10	毛杜鹃(<i>Rhododendron pulchrum</i>)	杜鹃花科杜鹃属	—	6.47	—
	11	白栎(<i>Quercus fabri</i>)	壳斗科栎属	—	—	4.61
	12	乌药(<i>Lindera aggregata</i>)	樟科山胡椒属	—	—	7.49
草本层 Herb layer	1	芒萁(<i>Dicranopteris pedata</i>)	里白科芒萁属	56.21	46.42	26.77
	2	菝葜(<i>Smilax china</i>)	百合科菝葜属	14.77	—	8.78
	3	狗脊蕨(<i>Woodwardia japonica</i>)	乌毛蕨科狗脊属	14.54	13.51	20.94
	4	芭茅(<i>Miscanthus floridulus</i>)	黍亚科芒属	12.16	—	—
	5	土茯苓(<i>Smilax glabra</i>)	百合科菝葜属	2.33	—	7.55
	6	乌蕨(<i>Stenolomachus ansum</i>)	鳞始蕨科肖乌蕨属	—	9.34	—
	7	淡竹叶(<i>Lophatherum gracile</i>)	禾本科淡竹叶属	—	8.87	—
	8	地苣(<i>Melastoma dodecandrum</i>)	野牡丹科野牡丹属	—	5.86	—
	9	半岛鳞毛蕨(<i>Dryopteris peninsulae</i>)	鳞毛蕨科鳞毛蕨属	—	—	15.98

2.2 不同间伐强度林下物种多样性与生物量

如表 3 所示,三种间伐强度林下植物 4 种多样性指数排序均为:M3>M2>M1。方差分析结果显示,灌木层中除 Pielou 指数外,其余各指数在间伐(20%、40%)与不间伐的情况下均呈显著差异性($P<0.05$)。其中,Margalef 指数在 20%和 40%的间伐强度间也具有显著差异。草本层 Simpson 指数和 Pielou 指数在各间伐强度间均无显著差异($P>0.05$),但 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数仅在无间伐与间伐 40%间有显著差异($P<0.05$)。总体而言,间伐强度需要达到 40%,才会显著提升林下植物多样性。

表 3 不同间伐强度林下物种多样性指数
Table 3 Species diversity index of understory vegetation with different thinning intensities

层次 Layer	多样性指数 Species diversity	不同间伐强度 Different thinning intensities		
		M1(0%)	M2(20%)	M3(40%)
灌木层 Shrub layer	<i>D</i>	0.76±0.02a	0.89±0.03b	0.92±0.01b
	<i>H</i>	1.53±0.09a	2.41±0.26b	2.80±0.08b
	<i>E</i>	0.92±0.01a	0.92±0.03a	0.92±0.02a
	<i>S</i>	1.80±0.18a	3.80±0.75b	5.1±0.51c
草本层 Herb layer	<i>D</i>	0.45±0.23a	0.69±0.11a	0.76±0.05a
	<i>H</i>	0.84±0.41a	1.45±0.21ab	1.72±0.11b
	<i>E</i>	0.58±0.23a	0.74±0.10a	0.81±0.04a
	<i>S</i>	0.87±0.37a	1.69±0.57ab	1.92±0.19b

D:Simpson 优势度指数;*H*:Shannon-Wiener 多样性指数;*E*:Pielou 均匀度指数;*S*:Margalef 丰富度指数;同行未出现相同字母差异显著($P<0.05$)

如表 4 所示,灌木层均为林下植被层总生物量的主体,占比为 51.25%—78.42%,且 M3>M2>M1,表明灌木地上生物量对不同间伐强度的响应较草本更为敏感。不同间伐强度间的灌草层地上部分生物量均呈显著差异性($P<0.05$),但灌木层地上生物量及其所占生物量比例随间伐强度的增加而增加,而草本层相反。总体来看,间伐强度为 40%时林下植被层地上生物量达到最佳水平(表 4)。

表 4 不同间伐强度林下植物地上生物量
Table 4 Aboveground biomass of understory vegetation with different thinning intensities

生物量 Biomass	层次 Layer	不同间伐强度 Different thinning intensities		
		M1(0%)	M2(20%)	M3(40%)
地上生物量/(g/m ²)	灌木层	143.19±4.56a	183.90±6.12b	234.99±7.34c
Aboveground biomass	草本层	136.22±4.25a	88.82±0.83b	64.66±1.97c
	总生物量	279.41±8.75a	272.72±6.04a	299.65±6.92b
所占总生物量比例/%	灌木层	51.25	67.43	78.42
Proportion of the total biomass	草本层	48.75	32.57	21.58

表 5 结果表明,灌木层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数与灌木地上生物量均呈极显著正相关($P<0.01$),草本层 Shannon-Wiener 指数与其呈显著正相关($P<0.05$)。而灌木层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、草本层 Shannon-Wiener 指数均与草本地上生物量呈极显著负相关($P<0.01$),草本层 Simpson 指数、Margalef 指数与其呈显著负相关($P<0.05$)。其余多样性指数与生物量无显著相关性($P>0.05$)。

2.3 不同间伐强度林下物种多样性与林分光环境

如图 1 所示,冠层开度、林下直射光、林下散射光、林下总光照比值均随间伐强度的增大而增大,但叶面积指数呈逐渐减小趋势。对于 5 种林下光环境指标,仅在未间伐与间伐强度为 40%间存在显著差异($P<0.05$)。

表 5 不同间伐强度林下物种多样性指数与地上生物量的相关系数

Table 5 Correlative coefficient of species diversity and aboveground biomass with different thinning intensities

层次 Layer	多样性指数 Species diversity	灌木层地上生物量 Aboveground biomass of shrub layer	草本层地上生物量 Aboveground biomass of herb layer	地上总生物量 Total aboveground biomass
灌木层 Shrub layer	<i>D</i>	0.855 **	-0.962 **	0.282
	<i>H</i>	0.903 **	-0.962 **	0.414
	<i>E</i>	-0.038	0.011	-0.084
	<i>S</i>	0.894 **	-0.923 **	0.476
草本层 Herb layer	<i>D</i>	0.597	-0.671 *	0.197
	<i>H</i>	0.748 *	-0.820 **	0.293
	<i>E</i>	0.531	-0.566	0.243
	<i>S</i>	0.620	-0.757 *	0.074

* : $P<0.05$; * * : $P<0.01$

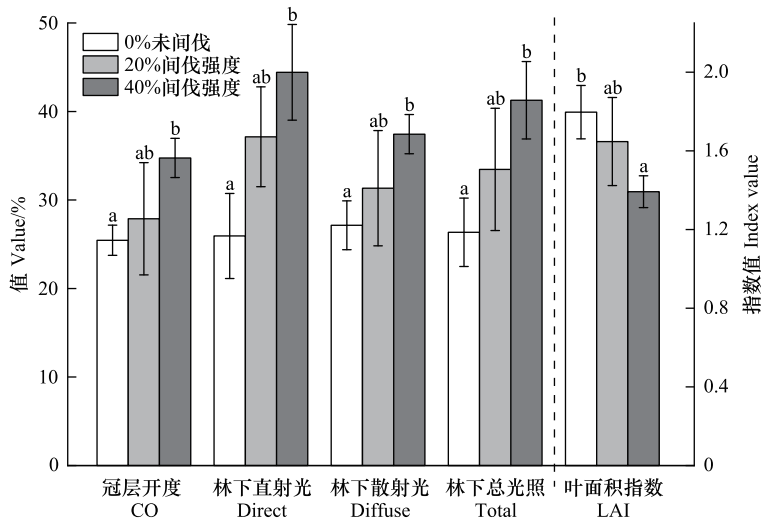


图 1 不同间伐强度林下光环境指标

Fig.1 Understory light environment index of different thinning intensities

CO:冠层开度 Canopy openness;Direct:林下直射光 Direct solar radiation under canopy;Diffuse:林下散射光 Diffuse solar radiation under canopy; Total:林下总光照 Total solar radiation under canopy;LAI 叶面积指数 Leaf area index;未出现相同字母差异显著 ($P<0.05$)

相关性分析结果表明,灌木层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数与林下直射光呈显著正相关,Margalef 指数与叶面积指数呈显著负相关($P<0.05$)。草本层 Simpson 指数与林下直射光、林下散射光、林下总光照呈显著正相关,与叶面积指数呈显著负相关;Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数与冠层开度、林下直射光、林下散射光、林下总光照呈显著正相关,与叶面积指数呈显著负相关;Pielou 指数与林下直射光呈显著正相关,与叶面积指数呈显著负相关($P<0.05$)。总体来看,间伐后草本层物种多样性指数与光环境指数相关性比灌木层更大(表 6)。

2.4 不同间伐强度林下物种多样性与土壤理化性质

如图 2 所示,在坡位相同时,土壤全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、土壤有机质含量随间伐强度的增大而下降,而土壤全氮含量随之上升。且土壤全氮、全钾、速效钾、有机质含量的上中下坡和速效氮、全氮含量的下坡以及速效磷含量的上坡在不同间伐强度间均有显著差异,而其他各坡位的土壤各化学指标仅在未间伐和间伐间有显著差异($P<0.05$)。

相关性分析结果表明,灌木层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数与土壤全氮含量呈极显著正相关($P<$

0.01),与速效磷、全钾含量呈显著负相关($P<0.05$);另外,灌木层 Margalef 指数与全氮含量呈极显著正相关。草本层 Shannon-Wiener 指数与土壤全氮含量呈显著正相关,Margalef 指数与全磷、速效磷、全钾含量呈显著负相关($P<0.05$)(图 3)。

表 6 不同间伐强度林下物种多样性指数与光环境指标的相关系数

Table 6 Correlative coefficient of species diversity and light environment index with different thinning intensities

层次 Layer	多样性指数 Species diversity	冠层开度 CO	林下直射光 Direct	林下散射光 Diffuse	林下总光照 Total	叶面积指数 LAI
灌木层 Shrub layer	<i>D</i>	0.518	0.739 *	0.584	0.647	-0.616
	<i>H</i>	0.548	0.736 *	0.589	0.649	-0.644
	<i>E</i>	-0.392	-0.332	-0.407	-0.408	0.238
	<i>S</i>	0.612	0.739 *	0.616	0.666	-0.702 *
草本层 Herb layer	<i>D</i>	0.650	0.853 **	0.778 *	0.815 **	-0.820 **
	<i>H</i>	0.716 *	0.914 **	0.824 **	0.872 **	-0.854 **
	<i>E</i>	0.485	0.715 *	0.623	0.666	-0.695 *
	<i>S</i>	0.775 *	0.869 **	0.843 **	0.870 **	-0.802 **

3 讨论

3.1 不同间伐强度杉木人工林林下植物群落结构与物种多样性

间伐后可以降低林分密度,增加林下环境异质性,改善林下光照和空间,促进林下植物生长,对提高生物多样性起着重要作用^[11]。本研究中,随着间伐强度的增大,林分密度随之降低,林下光照和水分条件得到改善,森林碎片化促进植物迁移和扩散,从而增加林下灌草层的物种数量。灌木层优势种组成较丰富并随间伐强度的变化而变化,这可能是由于间伐后树冠打开而增加的可用光照可能不利于耐阴植物生长而有利于乌药、乌饭子等喜光植物生长^[19]。杉木是一种适应性较强的树种,林下草本层的物种组成相对简单,以一些常见的草本植物为主,这些草本植物可能也具有较强的适应性,因而导致三种间伐强度下草本层优势种均为芒萁和狗脊蕨。

植物多样性是生态系统多样性的基本组成部分,在管理森林中,生物多样性可以提高经济和生态弹性、生产力和群落稳定性^[20]。在本研究中,林下多样性指数均随间伐强度的增加而增加,表明间伐确实有益于林下植物生长发育,这与大多数研究结果一致^[20-22]。且间伐强度需要达到 40%,可明显促进物种多样性。这和王艳平等人^[23]的结论相似,抚育间伐可改变林下植被组成、植物多样性,且在强度间伐区达到最高。这可能是由于间伐只有达到一定强度,才能充分有效改善林内微环境,为植物的生长发育提供充分的资源,促进杉木人工林林下植被迅速更新,从而提高物种多样性^[9]。但这与 Alice Nunes 等人^[24]的研究结果不同,松树林间伐后林下植物多样性指数并未发生显著性增大或减小,物种丰富度和多样性均未受到影响,这可能受树种、林分密度、间伐强度等不同导致。

3.2 影响因子对杉木人工林林下植物物种多样性的影响

地上部分生物量可以反应群落优势度和多样性的差异。在本研究中,灌木层地上生物量占林下植被层生物量的主体,灌木和林下植被总地上生物量均显著上升,这与王祖华等人的研究结果一致^[25]。究其原因可能是对林分进行间伐或砍伐可以使林下灌木受到更多光照,促进林下植被层的生长^[26]。大多数研究得出草本层生物量随间伐强度的增加也呈上升趋势^[9,27],而本研究中却呈下降趋势。这可能是由于在杉木人工林环境中,随着间伐强度的增大,林分密度得到改善,为灌木植物提供更多生长空间和资源,且灌木植物通常具有更高的生长速率和竞争力,而灌木层和草本层存在着激烈的竞争关系,草本植物的竞争压力加大,从而导致其生长受到限制^[28]。相关性结果表明,整体上林下植物地上生物量对灌木层影响更大,这可能是由于灌木层生物量对灌草层植物提供栖息地和养分资源的贡献更大。

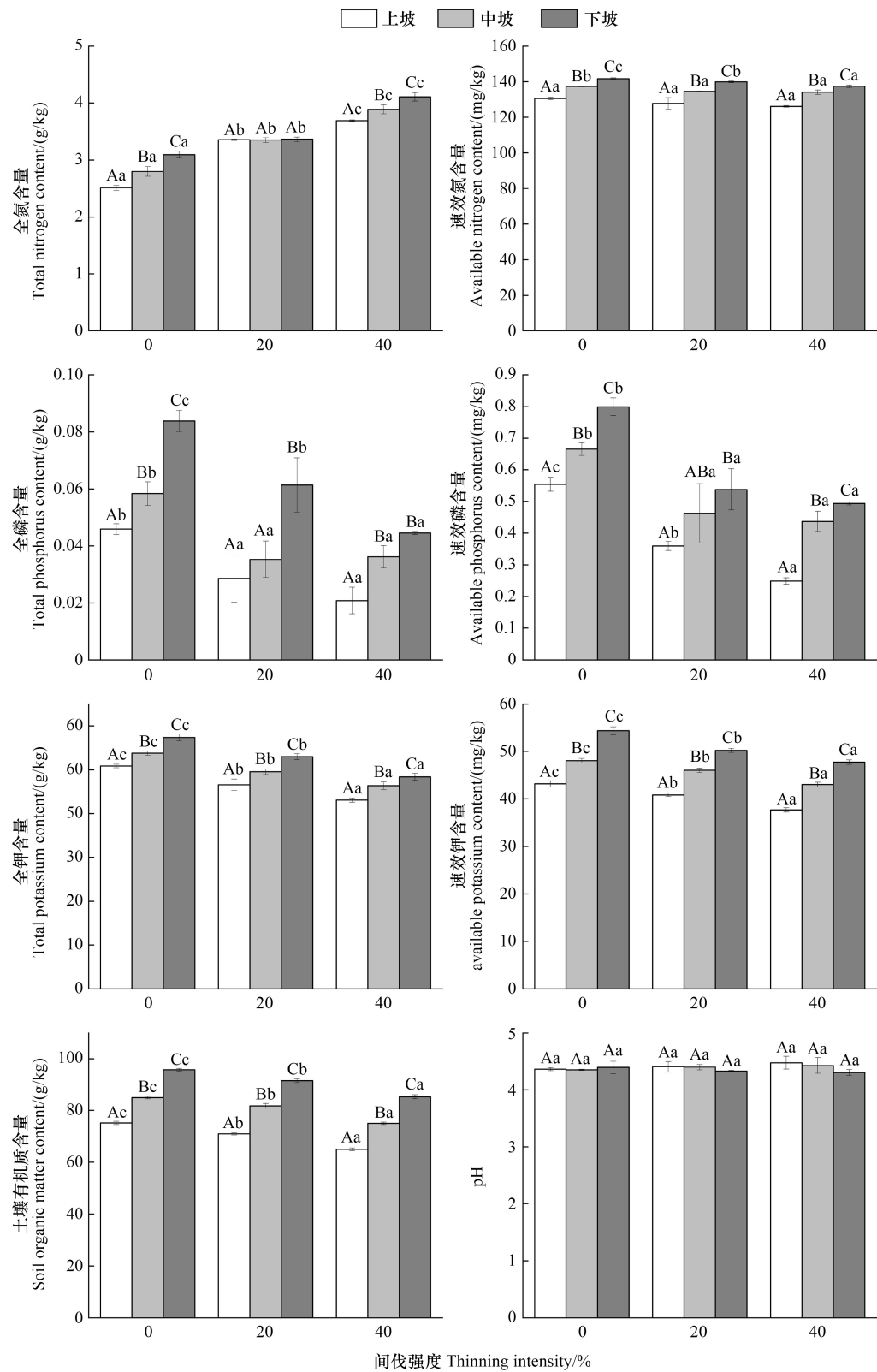


图 2 不同间伐强度不同坡位土壤化学性质

Fig.2 Soil chemical properties of different slope positions with different thinning intensities

未出现相同小写字母表示不同间伐强度间差异显著 ($P<0.05$), 未出现相同大写字母表示不同坡位间差异显著 ($P<0.05$)

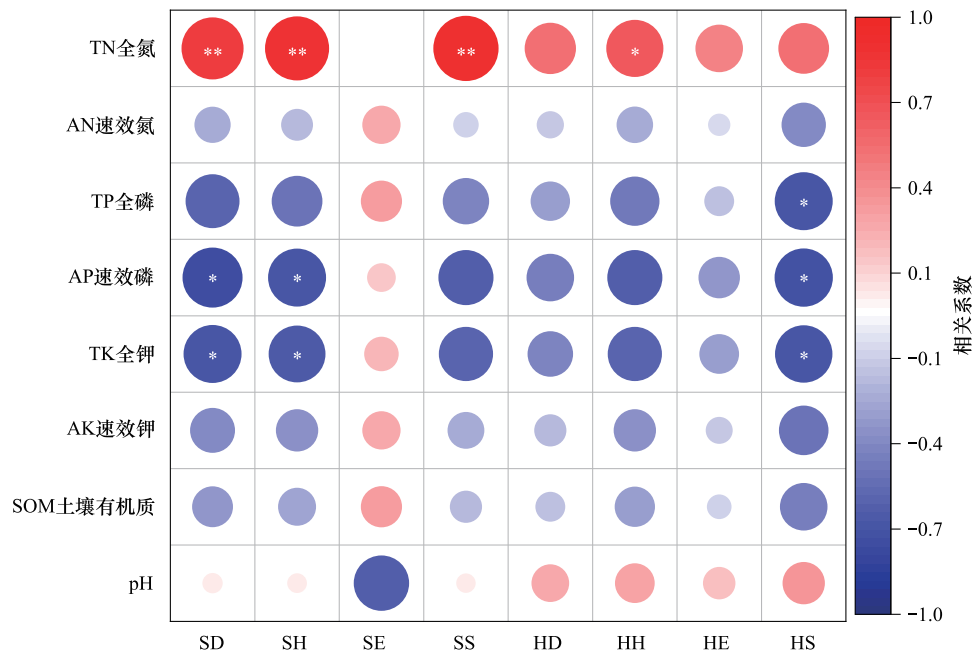


图3 不同间伐强度林下物种多样性指数与土壤化学性质的相关性

Fig.3 Correlation between species diversity and soil chemical properties with different thinning intensities

SD:灌木层 Simpson 优势度指数;SH:灌木层 Shannon-Wiener 多样性指数;SE:灌木层 Pielou 均匀度指数;SS:灌木层 Margalef 丰富度指数;HD:草本层 Simpson 优势度指数;HH:草本层 Shannon-Wiener 多样性指数;HE:草本层 Pielou 均匀度指数;HS:草本层 Margalef 丰富度指数;*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$

林分光环境是影响林下植物多样性的影响因素之一,间伐是改变林下光照的一种直接方法。本研究中,随着间伐强度的增加,除叶面积指数显著减小外,其余各光环境指数均显著增加,这与大多数研究结果基本一致^[29-31]。间伐通过改变林分郁闭度改善冠层结构,调整林内光环境^[32],林地接收的辐射量大幅增加,使植物可获得光照以及自然资源得到重新分配,且通过研究发现林下冠层受到的光辐射主要是林下直射光^[33]。林下光环境对草本层的影响更大,这可能是因为杉木人工林中,草本层植物在生长和繁殖过程中更加依赖光照,且更容易在光照充足的环境下发芽、生长和繁殖。而这与宋鑫或等^[34]发现冠层结构和林下光环境与灌木层多样性指数相关性更大的结论不同,可能是人工林树种、人工林微环境、种子来源可得性的差异所致^[35]。

间伐导致土壤理化性质变化,间接影响林下植物多样性变化。在本研究中,土壤氮含量随间伐强度增加而显著上升,可能是间伐促进林下植被生长,为微生物提供碳源,且杉木为浅根性树种,根系较发达再生能力强,更有利于稳定土壤微环境,促进氮的积累,补充表土层氮输入^[36]。导致土壤中磷等养分含量显著下降的原因较为复杂,可能是磷作为植物生长发育必需的大量营养元素之一,间伐后林内光照增强,促进林下植被生长,从而增加磷需求,又因为林下植被根系分布较浅,可优先获取养分资源,从而增加了对表层土磷素的吸收利用,如本研究表明土壤全磷含量与草本层丰富度指数等呈明显负相关。同时,间伐促进杉木的生长和蓄积量,同样增加对土壤磷的吸收利用^[37-39]。通常,土壤氮素含量提高也将增加亚热带森林植物对磷的需求,易于使土壤中可溶性磷向非活性磷酸盐库迁移而难以被利用^[39]。因此,为了满足需求,土壤磷酸酶活性将增加以加速有机磷的矿化,从而加速磷素在土壤-植物-微生物之间的周转,久而久之土壤总磷显著降低。另外,土壤有机质是影响土壤磷形态转化的重要土壤性质^[39],土壤有机质对磷的吸附机制与土壤铁铝氧化物有密切的关系。土壤有机质可以形成铁、铝晶型化合物,促进了表面积巨大且孔性较多的非晶型化合物的形成,从而增加铝氧化物对磷的吸附^[40]。因此,本研究表明间伐导致土壤有机质降低,可能会导致铁铝氧化物对磷的吸附降低,因此不利于土壤磷素的固存。此外,多样性指数均与土壤全氮呈显著正相关,且土壤化学性质对灌

木层的影响更大。可能是人工林林下灌木层会增加枯枝落叶含量,而这是土壤中氮元素的主要来源之一,且灌木中凋落物有机物的生物降解率大于草本,更有效促进土壤中养分循环^[41]。

4 结论

综合研究结果表明,40%间伐强度后,该地林下地上总生物量达到最大,林分密度、林分郁闭度等因素改变进而显著改善林分光环境、土壤氮含量,促进林下植物生长,林下物种多样性和生物量显著上升。地上生物量、林下直射光与土壤化学性质为林下灌木层植物多样性变化的主控因子,草本层地上生物量与各林分光环境指标为林下草层多样性变化的主控因子。从短期间伐效应来看,建议在杉木人工林幼龄林阶段进行40%强度间伐(1230株/hm²),同时适度施以氮肥,将大大有利于该地杉木人工林可持续经营。但本文仅设置了三个间伐强度,不足以全面代表间伐强度对林下植物多样性的影响。同时,相关研究表明地下生物量也与林下植物具有相关性,而本文仅探讨了地上生物量的研究情况,且影响杉木人工林林下植物多样性的因素诸多且复杂,其机制有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 赵朝辉,方晰,田大伦,项文化. 间伐对杉木林林下地被物生物量及土壤理化性质的影响. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 102-107.
- [2] 詹桂尧. 不同间伐强度对杉木人工林林下植物多样性的影响. 安徽农学通报, 2017, 23(16): 111-116.
- [3] 黄光文,邓胜国,徐香琴,谢惠林,张祖姣,姜红宇. 间伐杉木林林下植物多样性调查与分析. 湖南科技学院学报, 2021, 42(3): 27-29.
- [4] Paletto A, Pieratti E, Meo I, Agnelli A E, Cantiani P, Chiavetta U, Mazza G, Lagomarsino A. A multi-criteria analysis of forest restoration strategies to improve the ecosystem services supply: an application in Central Italy. *Annals of Forest Science*, 2021, 78(1): 1-16.
- [5] Wang D, Chen X L, Chen H Y H, Olatunji O A, Guan Q W. Contrasting effects of thinning on soil CO₂ emission and above- and belowground carbon regime under a subtropical Chinese fir plantation. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 361-369.
- [6] 李俊杰,韩梦豪,赵家豪,胡敬东,关庆伟. 间伐对马尾松人工林林下植物多样性的动态影响. 生态学杂志, 2023, 42(4): 788-795.
- [7] 曹铭昌,乐志芳,雷军成,徐海根. 全球生物多样性评估方法及研究进展. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 8-16.
- [8] Xu X L, Wang X J, Hu Y, Wang P, Saeed S, Sun Y J. Short-term effects of thinning on the development and communities of understory vegetation of Chinese fir plantations in Southeastern China. *Peer J*, 2020, 8: e8536.
- [9] 温晶,张秋良,李嘉悦,魏玉龙. 间伐强度对兴安落叶松林林下植被多样性及生物量的影响. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 95-100, 118.
- [10] 汪娅琴,王德炉,吴丽丽. 间伐强度对光皮桦天然次生林天然更新及植物多样性的影响. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 19-24, 32.
- [11] 王佳佳,贺涛,张沂,徐海量,李丙文. 间伐强度对阿尔泰山天然林下植被的影响. 生态学报, 2022, 42(23): 9761-9768.
- [12] 郭弘婷,纪小芳,汪成,邹汉鲁,王丽艳,姜姜. 我国人工林林下灌木层植物多样性空间变异及影响要素. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(4): 144-152.
- [13] 李萌,陈永康,徐浩成,尤业明,温远光,朱宏光,蔡道雄,黄雪蔓. 不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响. 生态学报, 2020, 40(14): 4985-4993.
- [14] 赵苏亚. 抚育间伐对杉木人工林土壤微生物和理化性质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [15] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [16] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [17] Tsai H C, Chiang J M, McEwan R W, Lin T C. Decadal effects of thinning on understory light environments and plant community structure in a subtropical forest. *Ecosphere*, 2018, 9(10): 1-14.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] Wei L P, Archaux F, Hulin F, Bilger I, Gosselin F. Stand attributes or soil micro-environment exert greater influence than management type on understory plant diversity in even-aged oak high forests. *Forest Ecology and Management*, 2020, 460: 117897.
- [20] Duguid M C, Frey B R, Ellum D S, Kelty M, Ashton M S. The influence of ground disturbance and gap position on understory plant diversity in upland forests of southern New England. *Forest Ecology and Management*, 2013, 303: 148-159.
- [21] Ducherer K, Bai Y G, Thompson D, Broersma K. Thinning of a ponderosa pine/douglas-fir forest in south-central BC: impacts on understorey vegetation. *Journal of Ecosystems and Management*, 2013, 14(1): 1-15.

- [22] Markgraf R, Doyon F, Kneeshaw D. Forest landscape heterogeneity increases shrub diversity at the expense of tree seedling diversity in temperate mixedwood forests. *Forests*, 2020, 11(2): 160.
- [23] 王艳平, 沙霖楠, 关庆伟. 间伐对杉木林下地被物多样性及土壤理化性质的影响. *安徽农业科学*, 2014, 42(21): 7047-7051, 7081.
- [24] Nunes A, Oliveira G, Cabral M S, Branquinho C, Correia O. Beneficial effect of pine thinning in mixed plantations through changes in the understory functional composition. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 387-396.
- [25] 王祖华, 李瑞霞, 王晓杰, 关庆伟. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2778-2782.
- [26] Bhattarai S, Karki U, Poudel S, Paneru B, Ellis N. Maintenance of non-timber plants at low heights increased the solar radiation influx and understory vegetation biomass in woodlands. *Global Journal of Agricultural and Allied Sciences*, 2020, 2(1): 18-24.
- [27] 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 张鹏, 胡杨, 王新杰. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. *林业科学*, 2019, 55(3): 1-12.
- [28] Chávez V, MacDonald S E. Understory species interactions in mature boreal mixedwood forests. *Botany*, 2010, 88(10): 912-922.
- [29] 田平, 韩海荣, 康峰峰, 程小琴, 朱江, 周文嵩. 密度调整对太岳山华北落叶松人工林冠层结构及林下植被的影响. *北京林业大学学报*, 2016, 38(8): 45-53.
- [30] 田佳歆, 刘盛, 冯万斌, 赵士博, 王诗俊, 孙宇, 李恩鹏, 程福山. 间伐强度对长白落叶松人工林冠层结构和草本物种多样性的影响. *东北林业大学学报*, 2022, 50(3): 30-34, 50.
- [31] 董莉莉, 张慧东, 毛沂新, 魏文俊, 王睿照, 颜廷武, 尤文忠. 间伐对红松 *Pinus koraiensis* 针阔混交林冠层结构及林下植被的影响. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(2): 159-165.
- [32] 王莉, 林莎, 李远航, 陈梦飞, 贺康宁. 青海大通典型林分冠层结构与林下植被物种多样性关系研究. *西北植物学报*, 2019, 39(3): 524-533.
- [33] 张甜, 朱玉杰, 董希斌. 抚育间伐对大兴安岭天然用材林冠层结构及光环境特征的影响. *东北林业大学学报*, 2016, 44(10): 1-7.
- [34] 宋鑫彧, 董希斌, 曲杭峰, 刘慧, 赵状. 抚育间伐强度对小兴安岭天然针阔混交林冠层结构和林下植被的影响. *东北林业大学学报*, 2021, 49(2): 24-30.
- [35] Alem S, Pavlis J, Urban J, Kucera J. Pure and mixed plantations of *Eucalyptus camaldulensis* and *Cupressus lusitanica*: their growth interactions and effect on diversity and density of undergrowth woody plants in relation to light. *Open Journal of Forestry*, 2015, 5(4): 375-386.
- [36] 齐梦娟. 间伐强度对青冈栎次生林土壤养分和土壤活性有机碳的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- [37] 李常准, 陈立新, 段文标, 李少然, 李亦菲, 于颖颖, 朱佳慧, 赵戈榕. 凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 100-109.
- [38] Vesterdal L, Dalsgaard M, Felby C, Raulund-Rasmussen K, Jørgensen B B. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 1995, 77(1/2/3): 1-10.
- [39] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.
- [40] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 高洪军, 朱平, 徐明岗, 张文菊. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征. *生态学报*, 2018, 38(11): 3848-3858.
- [41] 李欣颖, 张萌, 郭洋楠, 李丹丹, 邓杨, 陆兆华. 采煤沉陷区林下植物多样性与土壤因子的关系. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 268-276.