

复层异龄林林下植物多样性与土壤性质对杉木保留密度的响应

张心艺^{1,2} 李铁华^{1,2}

(1.中南林业科技大学林学院 湖南长沙 410004; 2.中亚热带林学国家长期科研基地 湖南长沙 410004)

摘要:【目的】杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国南方最重要的速生用材树种之一。本文通过研究杉木不同保留密度对杉阔复层异龄林林下植物多样性、土壤理化性质和酶活性的影响,为杉木人工林地力维持和可持续经营提供理论依据。【方法】以湖南省永州市金洞管理区金洞林场杉阔复层异龄林为研究对象,设置3种杉木保留密度(525株/hm²、675株/hm²、975株/hm²),通过林下植被调查与多样性分析(草本、木本植物的科、属、种组成、Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数和群落相似度指数)、土壤理化性质(容重、含水率、总孔隙度、全碳、全氮、全磷、全钾、全钙、全镁)和酶活性(酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶)测定,分析林下植物多样性、土壤理化性质和酶活性对杉木保留密度的响应机制。【结果】(1)草本植物多样性指数随杉木保留密度的增加而增加,而木本多样性指数的变化规律与之相反。D525密度的林分中草本植物前三优势物种重要值之和最高,达到38.81%,D975密度的林分中木本植物前三优势物种重要值之和最高,达到77.39%。(2)土壤容重、含水率、总孔隙度在3种杉木保留密度的林分中无显著性差异($P > 0.05$),但随着杉木保留密度的降低,土壤的容重、含水率、总孔隙度都小范围增加,土壤全碳、全氮、全磷、全钾、全钙、全镁含量均随杉木保留密度的增加呈先增后减趋势,并在D675密度林分中含量达到最大,且与其它两个密度差异显著($P < 0.05$),杉木保留密度的降低有助于土壤养分积累。(3)土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性在3种杉木不同保留密度的林分中大都随着保留密度的增大呈先增后减的趋势,且均在D675密度林分中达到最大,与其它两个密度有显著差异($P < 0.05$)。(4)从相关性分析来看,草本植物与木本植物多样性指标大都呈负相关关系,且木本植物较草本植物来说与土壤理化性质、土壤酶活性相关性更高,土壤理化性质大都与土壤酶活性呈正相关关系;D975、D675密度林分中草本植物与密度的关系表现为正相关,且D975密度林分表达更为强烈,说明高保留密度更利于草本植物生长,D525、D675密度林分中木本植物与密度的关系表现为正相关,说明木本植物在低杉木保留密度下有更好的生长环境;D975、D525密度林分中土壤理化性质、酶活性与密度的关系绝大都表现为负相关,而D675密度林分中土壤理化性质、酶活性与密度的关系都表现为正相关,说明过高或过低的杉木保留密度对土壤理化性质改善、酶活性提高都有负面影响。【结论】本研究中,杉木保留密度为675株/hm²是杉阔复层异龄林经营的最适密度。林下植被的演替存在着密度效应,密度过高或过低易使林分出现生态位垄断的现象。保留密度的降低有助于改善土壤通气透水状况,促进土壤养分积累,提高酶活性,从而促进养分转化,提高林地土壤肥力,促进杉木人工林退化生态系统的恢复与重建。

关键词:杉木;密度;林下植被;土壤理化性质;土壤酶活性

Response of plant diversity and soil properties to *Cunninghamia lanceolata* retention density in the understorey of a compound heterogeneous forest

Abstract: 【Objective】 *Cunninghamia lanceolata* is one of the most important fast-growing timber species in southern China. This paper investigates the effects of different retention densities of cedar on understorey plant diversity, soil physicochemical properties and enzyme activities, and provides a theoretical basis for the maintenance

of woodland fertility and sustainable management of cedar plantation forests. **【Method】** Three types of retention densities (525 plants/hm², 675 plants/hm², 975 plants/hm²) were set up in the fir-coppice multi-storey xeric forest of the Jindong Forest Farm of the Jindong Management Area in Yongzhou City, Hunan Province. Understory vegetation surveys and diversity analyses (family, genus, and species composition of herbaceous and woody plants, Simpson's diversity index, Shannon-Wiener's diversity index, and Pielou's evenness index and community similarity index), soil physicochemical properties (bulk density, water content, total porosity, total carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, total calcium, and total magnesium), and enzyme activities (acidic phosphatase, sucrase, urease, catalase) were measured to analyse the response mechanism of understory plant diversity, soil physicochemical properties and enzyme activities to cedar retention density. **【Result】** (1) Herbaceous diversity index increased with the increase of cedar retention density, while the change pattern of woody diversity index was opposite. the sum of the importance values of the top three dominant species of herbaceous plants was the highest in the stand with D525 density, reaching 38.81%, and the sum of the importance values of the top three dominant species of woody plants was the highest in the stand with D975 density, reaching 77.39%. (2) Soil bulk weight, water content and total porosity did not differ significantly among the three cedar retention densities ($P > 0.05$), but with the decrease of cedar retention density, soil bulk weight, water content and total porosity increased slightly, and the contents of soil total carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, total calcium and total magnesium showed a tendency of increasing and then decreasing with the increase of cedar retention density and reached the maximum in the stand with the density of D675 and differed significantly from the other two densities ($P < 0.05$), which helped the accumulation of soil nutrients. The content reached the maximum in the D675 density stand, and the difference with the other two densities was significant ($P < 0.05$), and the reduction of the cedar retention density contributed to the accumulation of soil nutrients. (3) Soil acid phosphatase, sucrase, urease, and catalase activities mostly showed an increasing and then decreasing trend with increasing retention density in the stands of the three fir species at different retention densities, and all of them reached the maximum activity in the D675 density stand, which was significantly different from the other two densities ($P < 0.05$). (4) From the correlation analysis, most of the diversity indicators of herbaceous plants and woody plants were negatively correlated, and the correlation between woody plants and soil physicochemical properties and soil enzyme activities was higher than that of herbaceous plants, and most of the soil physicochemical properties were positively correlated with soil enzyme activities. The relationship between herbaceous plants and density in D975 and D675 density stands showed a positive correlation, and the D975 density stands showed a stronger expression, indicating that high retention density is more favourable to the growth of herbaceous plants, and the relationship between woody plants and density in D525 and D675 density stands showed a positive correlation, indicating that woody plants have a better growing environment in low cedar retention density; the relationship between the physical and chemical properties of the soil and enzyme activity and density in D975 and D525 density stands mostly showed a negative correlation, whereas soil In D975 and D525 density stands, the relationships between soil physical and chemical properties, enzyme activity and density were all positively correlated, indicating that too high or too low cedar retention density had a negative effect on the improvement of soil physical and chemical properties and enzyme activity. **【Conclusion】** In conclusion, the cedar retention density of 675 plants/hm² is the optimal density for the management of cedar and broadleaf old-growth forest. There is a density effect in the succession of understory vegetation, and too high or too low density will easily make the forest stand monopolise the ecological niche. Reduced retention density can help to improve soil aeration and water permeability, promote soil nutrient accumulation, and increase enzyme activity, thus promoting nutrient transformation, improving forest soil fertility, and facilitating the recovery and reconstruction of degraded ecosystems in cedar plantation forests.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; density; understory vegetation; soil physicochemical properties; soil enzyme activity

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国南方重要的速生用材树种之一。人工林的已有数千年的栽培历史,在我国南方的 17 个省(区)广泛种植,具有病虫害发病率低,干材通直、种植简单、生长迅速等优点(Wang et al., 2010)。根据第九次森林资源清查数据,我国目前种植的杉木人工林的面积已达到 986.7 万 hm^2 ,蓄积量达到 7.55 亿 m^3 。由于长期的集约化管理和掠夺式经营,杉木人工林生态系统的脆弱性愈加明显,接连出现了土壤退化、生物多样性减少、生产力下降等一系列的生态环境问题,这对森林生态系统的健康和稳定性构成了严重威胁,限制了杉木人工林的可持续经营(Chen et al., 2016; Bi et al., 2007; 张驰等, 2014)。近年来,国内外逐步开始进行近自然改造试验,研究发现杉木人工林间伐后套种阔叶树种的近自然改造模式在林分结构、微生物多样性、促进养分归还等方面优于纯林及混交林模式(黄凯璇等, 2020; 明安刚等, 2017)。研究表明,杉阔复层异龄林的成功构建,可以有效改善土壤理化性质及微生物环境,提升土壤肥力,充分利用林下空间,为杉木可持续管理提供了新思路(查美琴等, 2020)。但以往研究主要集中在套种林木或保留林木的生长效果分析或是土壤质量变化,对杉木人工林群落植物结构及其多样性,特别是林下植物组成结构及其多样性与土壤性质的变化缺乏有效考虑,这极大限制了杉木人工林的可持续经营和退化生态系统的恢复与重建。

林分密度是人工林群落结构的重要指标,是制约林木群体生长发育过程的关键因素,对人工林生态系统的稳定性及生物生产力具有重要影响(刘雅静等, 2019)。诸多学者对林分密度与林下植被、土壤性质的关系展开研究,研究发现林分密度的改变会影响林分结构的异质性,从而改善林下微环境,土壤是植被生长的基质,是植被演替的重要驱动力因素之一(徐雪蕾等, 2019; Wu et al., 2014),植物群落会随着土壤养分种类及含量的变化而发生转变,从而改变植物多样性,而不同种类的植物对土壤中营养元素吸收量的不同也会导致土壤养分含量发生变化,从而影响土壤的稳定性(Gavinet et al., 2020)。研究表明,杉木保留密度过低($450 \text{ 株}/\text{hm}^2$)或过高($1950 \text{ 株}/\text{hm}^2$)皆不利于杉木生长和土壤地力维持,随着间伐强度的增加,可以提高林下植被的物种丰富度、多样性指数、覆盖度和生物量,显著改善土壤理化性质(相聪伟等, 2015)。因此,研究杉阔复层异龄林林下植被多样性,结合土壤理化性质、酶活性的研究,有助于我们理解杉木人工林近自然改造过程中林下植物演替物种多样性与土壤性质的关系。

本研究以湖南省永州市金洞管理区金洞林场杉阔复层异龄林为研究对象,探究杉木不同保留密度对林下植物多样性、土壤理化性质和酶活性的影响,明晰近自然改造过程中林下植被演替与土壤性质变化对杉木保留密度的响应,为杉木人工林林地地力维持和可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于湖南省永州市金洞管理区金洞林场($26^{\circ} 02' 10'' - 26^{\circ} 21' 37'' \text{ N}$, $110^{\circ} 53' 43'' - 112^{\circ} 13' 37'' \text{ E}$),处于南岭山系阳明山脉的东北部,西南高、东北低。林场平均海拔 650 m,地貌主要成土母岩以砂岩、页岩、碳质板岩为主,土层深厚肥沃,有机质含量高,土壤均为山地黄壤。该地区属中亚热带东南季风湿润气候区,年均气温 18°C ,极端高温 40°C ,极端低温 -8.4°C ,年降水量约 1745 mm,年蒸发量约 1225 mm,年均有效日照时数 1617 h,相对湿度 75%~82%,全年无霜期 302 d,植物生长期 290 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 5210 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 研究方法

2.1 样地设置

供试林分为金洞镇小金洞村($112^{\circ} 08' 09'' \text{ E}$, $26^{\circ} 13' 40'' \text{ N}$)的杉阔异龄复层林。杉木纯林于 1997 年营造,初植密度为 $2500 \text{ 株}/\text{hm}^2$;2018 年,进行部分主伐利用与林相改造;2019 年春,林分进行密度调整,设置 3 种杉木保留密度,分别为 $525 \text{ 株}/\text{hm}^2$ 、 $675 \text{ 株}/\text{hm}^2$ 、 $975 \text{ 株}/\text{hm}^2$,并在林下按 $1050 \text{ 株}/\text{hm}^2$ 的密度栽植地径 20 mm 的阔叶幼树(55%阔叶楠、30%木荷、15%枫香)。2022 年 6 月,在 3 种杉木保留密度的林分中各设置 3 块重复样地,共 9 块样地,样地面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 。样地基本情况如表 1。

表 1 样地杉木及阔叶幼树状况

Tab. 1 The condition of *Cunninghamia lanceolata* and broad-leaved saplings in the forests

杉木 保留密度 株/hm ²	杉木			阔叶幼树		
	平均胸径 /cm	平均树高 /m	平均材积 /m ³	平均地径 /mm	平均树高 /m	平均冠幅 /m
525.00	20.57	14.03	0.25	32.50	3.08	1.04
525.00	19.09	14.10	0.21	26.28	2.58	1.08
525.00	22.20	14.61	0.30	40.75	3.76	1.32
675.00	20.44	14.03	0.25	28.24	2.63	1.32
675.00	20.82	14.20	0.25	35.50	3.46	1.20
675.00	22.32	14.97	0.31	38.40	3.39	1.19
975.00	18.87	13.17	0.21	25.31	2.85	1.45
975.00	19.51	14.50	0.23	32.58	3.38	1.07
975.00	18.35	14.17	0.22	36.78	3.56	1.42

2.2 研究方法

2.2.1 林下植物调查与多样性指数计算 采用五点调查法, 在每个样地内的四角及中心分别设置 5 个 2 m×2 m 的小样方调查林下木本植物, 5 个 1 m×1 m 的小样方调查林下草本植物, 调查并记录小样方内的草本和木本植物的种类、数量、高度、盖度等, 并计算草本和木本植物群落的物种重要值、多样性指数、物种均匀度指数、群落相似度指数。公式如下:

$$\text{重要值} = \frac{\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}}{3}$$

$$\text{相对多度} = \frac{\text{样方中物种}i\text{的株数}}{\text{全部物种的总株数}} \times 100\%$$

$$\text{相对频度} = \frac{\text{物种在样方中出现的次数}}{\text{全部物种出现的总次数}} \times 100\%$$

$$\text{相对盖度} = \frac{\text{样方中物种}i\text{的盖度}}{\text{全部物种的盖度之和}} \times 100\%$$

$$\text{物种丰富度 } R = S$$

$$\text{Simpson 指数 } D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{物种的均匀度指数 } J = H / \ln S$$

$$\text{群落相似度指数 } IS = \frac{2c}{a+b} \times 100\%$$

式中, S 为群落中物种的总数即丰富度, P_i 为物种 i 的相对多度, a 为某个样地的物种数, b 为另一个样地的物种数, c 为两个样地的共有物种数。

2.2.2 土壤样品采集 采用五点取样法, 在每个样地内的四角及中心设置 5 个采样点, 去除土壤上面的覆盖物后, 在每个取样点挖一土壤剖面, 用 100 cm³ 环刀分别取 0-20 cm、20-40 cm、40-60 cm 土层的原状土, 带回实验室进行土壤物理性质分析; 另取 0-20 cm、20-40 cm、40-60 cm 土层的新鲜土样两份, 筛出植物根系、杂物和石砾, 一份存于-80℃冰箱用于土壤酶活性测定, 一份放于通风阴凉处风干, 风干后进行粉碎过筛, 用于土壤化学性质分析。

2.2.3 土壤性质测定 容重采用环刀法测定; 含水率采用烘干法测定; 全碳含量采用重铬酸钾水合加热

法测定；全氮含量采用凯氏定氮法测定；全磷、全钾、全钙、全镁含量采用电感耦合等离子体质谱仪测定；酸性磷酸酶采用对硝基苯磷酸二钠比色法测定；蔗糖酶采用 3,5 二硝基水杨酸比色法测定；脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定；过氧化氢酶活性采用紫外吸收法测定。

2.2.3 土壤性质测定 采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件进行数据统计整理和初步计算，采用单因素方差分析（ANOVA）检验不同密度处理下植物多样性、土壤理化性质和土壤酶活性等显著性，采用 Pearson 相关分析检验杉木保留密度、植物多样性、土壤理化性质和土壤酶活性的关系。所有数值均为平均值±标准差。

3 结果分析

3.1 不同杉木保留密度对林下植物的影响

3.1.1 草本和木本植物组成分析 本研究在 3 种杉木保留密度的林分中共调查到 34 科 45 属 55 种草本植物，18 科 23 属 24 种木本植物。D525 密度林分中共有 21 科 24 属 28 种草本植物，D675 密度林分中共有 20 科 25 属 31 种草本植物，而 D975 密度林分中有 20 科 30 属 36 种草本植物，其中，D525 密度和 D675 密度林下草本群落相似度指数最高，为 61.02%，而 D675 密度和 D975 密度林下草本群落相似度指数最低，为 50.00%，可见，杉木保留密度影响着林下草本植物的组成。D525 密度林分中木本植物有 13 科 16 属 17 种，D675 密度林分中木本植物共有 14 科 18 属 18 种，D975 密度林分中木本植物共有 13 科 14 属 14 种，其中，D675 密度和 D975 密度林下草本群落相似度指数最高，为 77.42%，而 D525 密度和 D975 密度林下草本群落相似度指数最低，为 64.52%，说明随着杉木保留密度的降低，林下木本植物群落相似度降低，提高了群落间异质性。

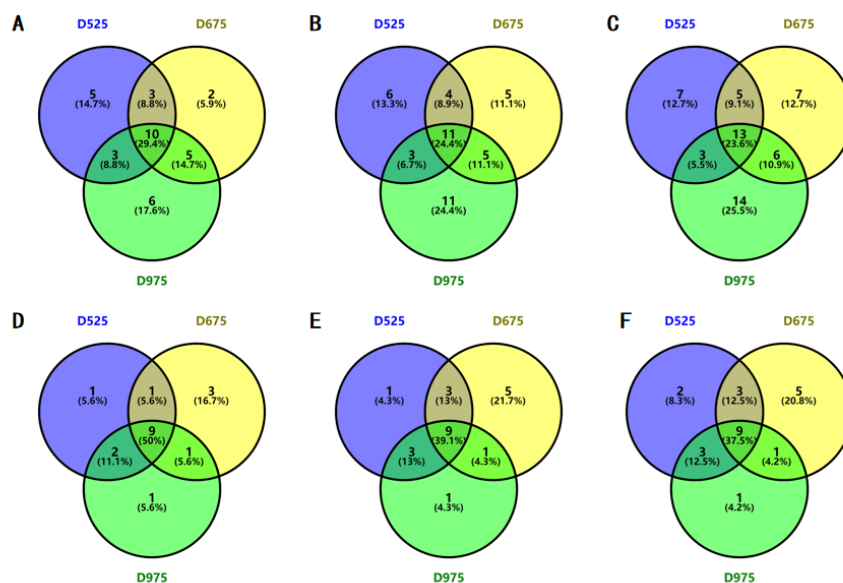


图1 杉木不同保留密度林下草本和木本植物科、属、种组成

注：(A) 草本科组成；(B) 草本属组成；(C) 草本种组成；(D) 木本科组成；(E) 木本属组成；(F) 木本种组成

Fig. 1 The family, genus and species composition of herbaceous and woody plants in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

Note: (A) The family composition of herbaceous plants; (B) The genus composition of herbaceous plants; (C) The species composition of herbaceous plants; (D) The family composition of woody plants; (E) The genus composition of woody plants; (F) The species composition of woody plants

3.1.2 草本和木本植物重要值分析 杉木不同保留密度林下草本植物的种类随密度的升高而降低。D525 密度林下以矮冷水花、淡竹叶、福建观音座莲为优势种，这三种优势种重要值分别为 20.63%、11.51%、6.67%，共计 38.81%；D675 密度林下主要以淡竹叶、蕨、绿叶地锦等植物为优势种，重要值分别为 18.01%、

9.07%、7.14%，共计 34.22%；D975 密度林下以淡竹叶、蕨、深绿短肠蕨等植物为优势种，重要值分别为 9.75%、7.08%、6.71%，共计 23.54%。D525 密度下草本植物前三大优势物种重要值之和相较于 D675 密度和 D975 密度分别高出 4.59%和 15.27%。

表 2 杉木不同保留密度林下草本植物重要值

Tab. 2 The importance values of herbaceous plants in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

物种			重要值/%		
科	属	种	D525	D675	D975
菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 Smilax	菝葜 <i>Smilax china</i>	—	2.64	2.82
		土茯苓 <i>Smilax glabra</i>	—	1.21	—
报春花科 Primulaceae	酸藤子属 Embelia	密齿酸藤子 <i>Embelia vestita</i>	—	—	3.36
车前科 Plantaginaceae	腹水草属 Veronicastrum	腹水草 <i>Veronicastrum stenostachyum</i>	3.88	1.71	3.63
唇形科 Lamiaceae	香茶菜属 Isodon	香茶菜 <i>Isodon amethystoides</i>	—	0.77	1.7
	葛属 Pueraria	葛 <i>Pueraria montana</i>	—	—	2.03
豆科 Fabaceae	鸡血藤属 Callerya	香花鸡血藤 <i>Callerya dielsiana</i>	—	—	1.64
	千金藤属 Stephania	金线吊乌龟 <i>Stephania cephalantha</i>	—	0.61	—
防己科 Menispermaceae	细圆藤属 Pericampylus	细圆藤 <i>Pericampylus glaucus</i>	6.43	4.15	4.47
	海金沙属 Lygodium	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	—	—	0.86
禾本科 Poaceae	淡竹叶属 Lophatherum	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	11.51	18.01	9.75
	芒属 Miscanthus	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	0.83	1.66	3.81
	求米草属 Oplismenus	求米草 <i>Oplismenus undulatifolius</i>	—	—	4.01
	狗尾草属 Setaria	皱叶狗尾草 <i>Setaria plicata</i>	—	1.18	—
合囊蕨科 Marattiaceae	观音座莲属 Angiopteris	福建观音座莲 <i>Angiopteris fokiensis</i>	6.67	—	3.86
胡椒科 Piperaceae	胡椒属 Piper	山蒟 <i>Piper hancei</i>	—	—	1.16
	络石属 Trachelospermum	络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	—	—	0.8
夹竹桃科 Apocynaceae	牛奶菜属 Marsdenia	牛奶菜 <i>Marsdenia sinensis</i>	0.95	2.32	—
	山姜属 Alpinia	山姜 <i>Alpinia japonica</i>	2.84	—	—
金星蕨科 Thelypteridaceae	凸轴蕨属 Metathelypteris	疏羽凸轴蕨 <i>Metathelypteris laxa</i>	1.32	—	—
堇菜科 Violaceae	堇菜属 Viola	七星莲 <i>Viola diffusa</i>	—	—	0.92
	黄鹌菜属 Youngia	黄鹌菜 <i>Youngia japonica</i>	—	0.62	—
菊科 Asteraceae	合耳菊属 Synotis	锯叶合耳菊 <i>Synotis nagensium</i>	3.24	—	—
		薄叶卷柏 <i>Selaginella delicatula</i>	1.02	—	0.82
卷柏科 Selaginellaceae	卷柏属 Selaginella	伏地卷柏 <i>Selaginella nipponica</i>	2.13	—	—
		江南卷柏 <i>Selaginella moellendorffii</i>	—	—	0.89
里白科 Gleicheniaceae	芒萁属 Dicranopteris	芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	—	1.17	—
		边缘鳞毛蕨 <i>Dryopteris marginalis</i>	—	1.34	—
鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	鳞毛蕨属 Dryopteris	阔鳞鳞毛蕨 <i>Dryopteris championii</i>	—	2.43	2.82
		阔叶鳞毛蕨 <i>Dryopteris campyloptera</i>	—	—	1.13
猕猴桃科 Actinidiaceae	猕猴桃属 Actinidia	毛花猕猴桃 <i>Actinidia eriantha</i>	—	1.28	1.17
	葡萄属 Vitis	东南葡萄 <i>Vitis chunganensis</i>	—	1.59	1.87
葡萄科 Vitaceae	牛果藤属 Nekemias	牛果藤 <i>Nekemias cantoniensis</i>	2.41	3.45	1.21
	地锦属 Parthenocissus	绿叶地锦 <i>Parthenocissus laetevirens</i>	0.69	7.14	—
蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 Rubus	高粱蔗 <i>Rubus lambertianus</i>	3.18	1.11	2.56

		寒莓 <i>Rubus buergeri</i>	—	5.42	1.76
		空心蔗 <i>Rubus rosifolius</i>	4.33	3.23	1.58
		山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	—	—	2.06
茄科 Solanaceae	茄属 Solanum	白英 <i>Solanum lyratum</i>	—	—	1.91
清风藤科 Sabiaceae	清风藤属 Sabia	尖叶清风藤 <i>Sabia swinhoei</i>	2.5	—	4.85
忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 Lonicera	忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	1.5	—	—
	构属 Broussonetia	藤构 <i>Broussonetia kaempferi</i>	—	0.8	—
桑科 Moraceae	榕属 Ficus	珍珠莲 <i>Ficus sarmentosa</i>	—	—	1.4
		褐果薹草 <i>Carex brunnea</i>	1.67	2.47	—
莎草科 Cyperaceae	薹草属 Carex	十字薹草 <i>Carex cruciata</i>	2.47	4.63	3.30
		条穗薹草 <i>Carex nemostachys</i>	1.67	1.04	1.35
蹄盖蕨科 Athyriaceae	双盖蕨属 Diplazium	深绿短肠蕨 <i>Diplazium viridissimum</i>	6.04	4.04	6.71
碗蕨科 Dennstaedtiaceae	鳞盖蕨属 Microlepia	边缘鳞盖蕨 <i>Microlepia marginata</i>	1.56	7.2	2.75
	蕨属 Pteridium	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i>	2.03	9.07	7.08
乌毛蕨科 Blechnaceae	狗脊属 Woodwardia	狗脊 <i>Woodwardia japonica</i>	4.19	4.24	3.30
苋科 Amaranthaceae	牛膝属 Achyranthes	柳叶牛膝 <i>Achyranthes longifolia</i>	1.04	—	—
荨麻科 Urticaceae	冷水花属 Pilea	矮冷水花 <i>Pilea peltoides</i>	20.63	1.42	—
鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草属 Commelina	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	1.95	2.02	—
罂粟科 Papaveraceae	紫堇属 Corydalis	小花黄堇 <i>Corydalis racemosa</i>	—	—	4.68
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 Oxalis	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	1.34	—	—

D525 密度林下木本植物主要以杜茎山、豆腐柴、茶等为优势种，这三种优势种重要值分别为 29.91%、23.28%、6.19%，共计 59.38%；D675 密度下灌木植物主要以杜茎山、紫麻、豆腐柴植物为优势种，重要值分别为 58.93%、7.82%、7.30%，共计 74.05%；D975 密度下灌木植物主要以杜茎山、大叶白纸扇、琴叶榕植物为优势种，重要值分别为 63.46%、9.60%、4.33%，共计 77.39%。D975 密度下灌木植物前三大优势物种重要值之和相较于 D675 密度和 D525 密度的分别高出 4.51%和 30.33%。

表 3 杉木不同保留密度林下木本植物重要值

Tab. 3 The importance values of woody plants in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

物种			重要值/%		
科	属	种	D35	D45	D65
安息香科 Styracaceae	安息香属 Styrax	白花龙 <i>Styrax faberi</i>	2.32	—	—
报春花科 Primulaceae	杜茎山属 Maesa	杜茎山 <i>Maesa japonica</i>	29.91	58.93	63.46
	大青属 Clerodendrum	大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	1.87	5.32	—
唇形科 Lamiaceae	豆腐柴属 Premna	豆腐柴 <i>Premna microphylla</i>	23.28	7.3	—
	紫珠属 Callicarpa	红紫珠 <i>Callicarpa rubella</i>	2.35	1.57	3.68
大戟科 Euphorbiaceae	乌柏属 Triadica	山乌柏 <i>Triadica cochinchinensis</i>	—	0.82	—
冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 Ilex	毛冬青 <i>Ilex pubescens</i>	—	—	1.04
禾本科 Poaceae	筱竹属 Thamnocalamus	筱竹 <i>Thamnocalamus spathiflorus</i>	—	2.40	—
漆树科 Anacardiaceae	盐麸木属 Rhus	盐麸木 <i>Rhus chinensis</i>	—	1.09	—
	白马骨属 Serissa	六月雪 <i>Serissa japonica</i>	—	0.66	—
茜草科 Rubiaceae	玉叶金花属 Mussaenda	大叶白纸扇 <i>Mussaenda shikokiana</i>	3.39	2.32	9.6
		琴叶榕 <i>Ficus pandurata</i>	5.04	—	4.33
桑科 Moraceae	榕属 Ficus	台湾榕 <i>Ficus formosana</i>	1.16	—	—
山茶科 Theaceae	山茶属 Camellia	茶 <i>Camellia sinensis</i>	6.19	2.41	1.66

鼠刺科 <i>Iteaceae</i>	鼠刺属 <i>Itea</i>	峨眉鼠刺 <i>Itea omeiensis</i>	6.18	—	1.20
鼠李科 <i>Rhamnaceae</i>	鼠李属 <i>Rhamnus</i>	薄叶鼠李 <i>Rhamnus leptophylla</i>	3.24	0.98	—
五加科 <i>Araliaceae</i>	楸木属 <i>Aralia</i>	楸木 <i>Aralia elata</i>	2.93	2.82	4.07
绣球科 <i>Hydrangeaceae</i>	常山属 <i>Dichroa</i>	常山 <i>Dichroa febrifuga</i>	2.65	0.84	2.46
荨麻科 <i>Urticaceae</i>	紫麻属 <i>Oreocnide</i>	紫麻 <i>Oreocnide frutescens</i>	2.54	7.82	2.81
叶下珠科 <i>Phyllanthaceae</i>	叶下珠属 <i>Phyllanthus</i>	落萼叶下珠 <i>Phyllanthus flexuosus</i>	2.01	1.10	1.79
ae		算盘子 <i>Glochidion puberum</i>	—	1.23	—
芸香科 <i>Rutaceae</i>	花椒属 <i>Zanthoxylum</i>	花椒筋 <i>Zanthoxylum scandens</i>	—	0.58	0.84
樟科 <i>Lauraceae</i>	木姜子属 <i>Litsea</i>	山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	2.43	1.81	1.47
	山胡椒属 <i>Lindera</i>	山榧 <i>Lindera reflexa</i>	2.51	—	1.59

3.1.3 草本和木本植物多样性指数分析

草本植物的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均随杉木保留杉木密度的增大而增大，其中，不同杉木保留密度林分的 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数无显著性差异 ($P > 0.05$)，而 D525 密度林分的 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于 D975 等密度下的 ($P < 0.05$)。而木本植物的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均随杉木保留密度的增加而降低，但杉木不同保留密度林分的 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数无显著性差异 ($P > 0.05$)，D525 密度林分的 Shannon-Wiener 多样性指数最高且显著高于 D975 密度 ($P < 0.05$)。

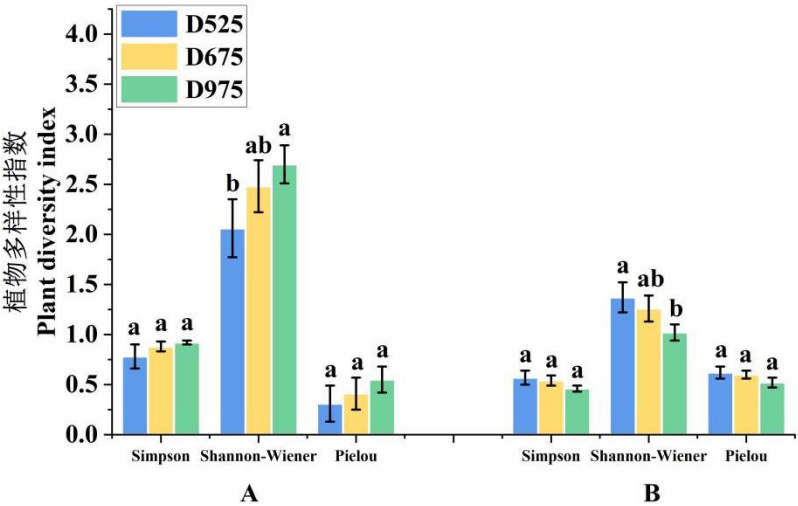


图2 杉木不同保留密度林下草本和木本植物多样性指数

Fig. 2 The diversity indices of herbaceous and woody plants in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

注：(A) 草本；(B) 木本。不同小写字母代表杉木不同保留密度间在 0.05 水平上差异显著不同。

Note: (A) Herbaceous plants; (B) Woody plants. The different small letters indicate significant difference among different retention densities in the *Cunninghamia lanceolata* forests at 0.05 level among the three months in the same forest, the same below.

3.2 不同杉木保留密度对土壤理化性质的影响

3.2.1 物理性质分析 容重反映了土壤的紧实程度，土壤容重在不同杉木保留密度的林分中差异均不显著 ($P > 0.05$)，但均随着土层的加深大致呈下降的趋势，土壤容重的降低，表明土壤更加的疏松，具有更好的通气透水性。其中，在 0-20 cm 的土层中，D675 密度林分的土壤容重最大，为 1.16 g/cm³，在 20-40 cm 的土层中，D975 密度林分的土壤容重最大，为 1.16 g/cm³，在 40-60 cm 的土层中，D975 密度林分的土壤容重最大，为 1.15 g/cm³。含水率反映土壤的水分含量，土壤含水率均随着土层的加深呈下降的趋势，

但在不同杉木保留密度的林分中没有显著性差异 ($P > 0.05$)。在 0-20cm 的土层中, D975 密度林分的含水率最大, 为 31.60%, 在 20-40 cm 的土层中, D675 密度林分的含水率为 27.59%, 为最大值, 在 40-60 cm 的土层中, D675 密度林分的含水率最大, 为 27.35%。总孔隙度反映了土壤基质容纳空气和水的量, 总孔隙度在不同杉木保留密度的林分中差异均不显著 ($P > 0.05$)。在 0-20 cm 的土层中, D975 密度林分的总孔隙度最大, 为 57.90%, 在 20-40 cm 的土层中, D675 密度林分的总孔隙度最大, 为 57.87%, 在 40-60 cm 的土层中, D525 密度林分的总孔隙度最大, 为 58.17%。

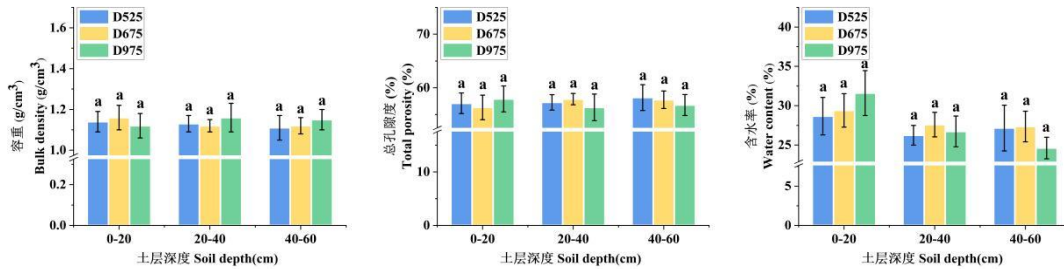


图3 杉木不同保留密度林分对土壤物理性质的影响

Fig. 3 The effect of soil physical properties in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

3.2.2 化学性质分析 土壤全碳含量随杉木保留密度的增加呈先增后减趋势, 并随土层的加深含量逐渐降低, 在 20-40 cm 土层中, D675 密度林分的土壤全碳含量最高, 分别是 D525 和 D975 密度林分的 1.18 倍和 1.32 倍, 且各密度间差异显著 ($P < 0.05$); 在 20-40 cm 土层中, D525 密度林分的土壤全碳含量最低, 与其它两个密度差异显著 ($P < 0.05$); 在 40-60 cm 土层中, D675 密度林分的土壤全碳含量最高, 与其它两个密度差异显著 ($P < 0.05$)。土壤全氮含量随保留密度的变化规律同土壤全碳含量, D675 密度林分的土壤全氮含量在 0-20、20-40、40-60 cm 土层中均达到了最大值, 且与其它两个密度有显著性差异 ($P < 0.05$)。土壤全磷、全钾、全镁含量均随保留密度的增加呈先增后减趋势, 且最大值均出现在 D675 密度林分中, 且与其它两个密度有显著性差异 ($P < 0.05$)。3 种杉木保留密度的林分土壤全钙含量在随保留密度的表现也与上述元素含量变化相同, 但在 0-20cm 土层中, D675 密度林分的土壤全钙与 D975 密度无显著性差异 ($P > 0.05$), 在 20-40cm 土层中, D675 密度林分的土壤全钙与 D525 密度无显著性差异 ($P > 0.05$), 在 40-60cm 土层中, 各密度间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

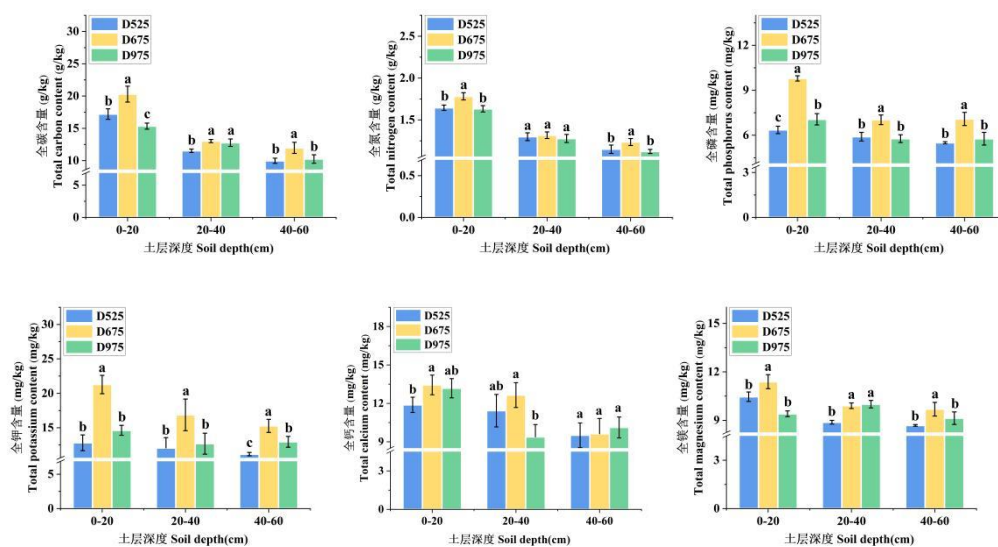


图4 杉木不同保留密度林分对土壤化学性质的影响

Fig. 4 The effect of soil chemistry properties in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

3.2.3 酶活性 3种杉木保留密度的林分土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性随着保留密度的增大呈先增后减的趋势,均在D675密度林分中活性达到最大。D675密度林分中土壤酸性磷酸酶活性在0-20cm土层中与其它两个密度差异显著($P < 0.05$),在40-60cm土层中,3种杉木不同保留密度的林分土壤酸性磷酸酶活性有显著性差异($P < 0.05$)。D675密度林分中土壤蔗糖酶、脲酶活性在0-20cm、20-40cm土层中均与其它两个密度差异显著($P < 0.05$),且在40-60cm土层中与D525密度林分土壤蔗糖酶、脲酶活性无显著性差异($P > 0.05$),与D975密度差异显著($P < 0.05$)。土壤过氧化氢酶活性在20-40cm、40-60cm土层中随杉木保留密度的变化规律与上述3种酶活性相同,D675密度林分中土壤过氧化氢酶活性最高,但在0-20cm土层中,D525密度林分土壤过氧化氢酶活性达到最大值。

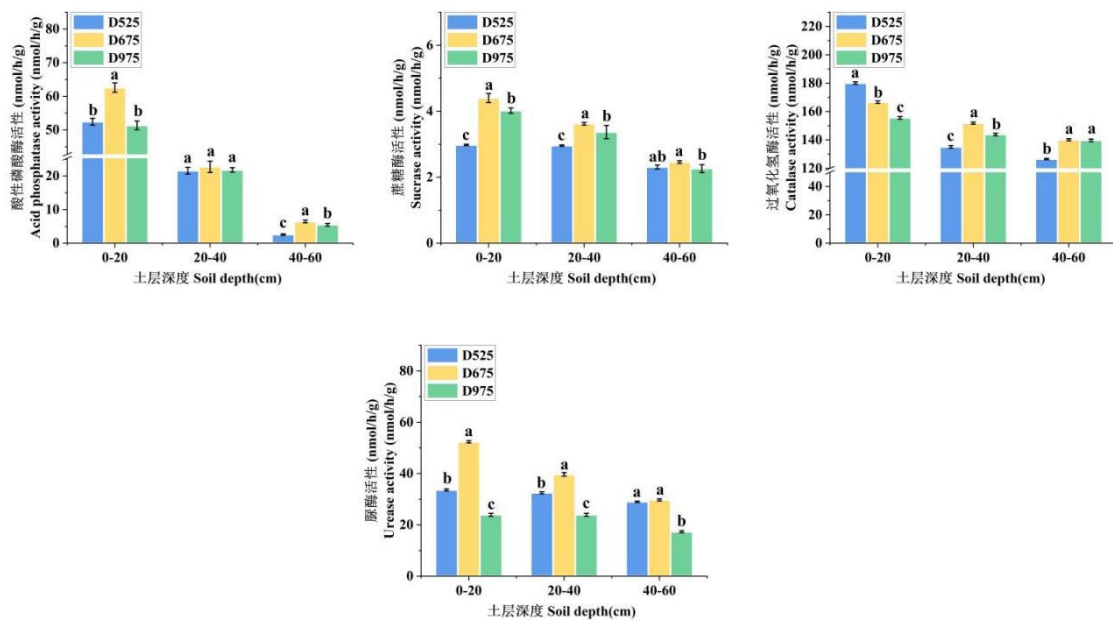


图5 杉木不同保留密度林分对土壤酶活性的影响

Fig. 5 The effect of soil enzyme activity in the *Cunninghamia lanceolata* forests at different retention densities

3.3 杉木保留密度、林下植物多样性与土壤性质相关性分析

左侧为林下植物、土壤理化性质和土壤酶活性指标的相关性分析热图,从图中可以看出,草本植物与木本植物多样性指标大都呈负相关关系,且木本植物较草本植物来说与土壤理化性质、土壤酶活性相关性更高。土壤理化性质(除总孔隙度)均与土壤酶活性呈正相关关系,其中酸性磷酸酶活性与含水率、全磷含量呈显著正相关($P < 0.05$),与全碳、全氮、全钙含量呈极显著正相关($P < 0.01$),过氧化氢酶活性与全碳、全氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与全钙含量呈极显著正相关($P < 0.05$),蔗糖酶活性与含水率、全碳、全磷、全钾、全镁含量呈显著正相关($P < 0.05$),与全氮、全钙含量呈极显著正相关($P < 0.01$),脲酶活性与全碳、全磷、全钾含量呈显著正相关($P < 0.05$),与全镁含量呈极显著正相关($P < 0.01$),酸性磷酸酶活性与过氧化氢酶、蔗糖酶活性呈极显著正相关($P < 0.01$)。

右侧为密度与林下植物、土壤理化性质、土壤酶活性指标的动态环状热图,表达的是不同杉木保留密度的林分中各个指标的表达差异性与聚类性。从杉木保留密度与林下植物的关系来看,D975、D675密度林分中草本植物与密度的关系表现为正相关,且D975密度林分表达更为强烈,而D525密度林分中草本植物与密度的关系则表现为负相关,说明杉木保留密度的升高更有利于草本植物的生长;D525、D675密度林分中木本植物与密度的关系表现为正相关,而D975密度林分中木本植物与密度的关系则表现为负相关,说明木本植物在低杉木保留密度下有更好的生长环境。从杉木保留密度与土壤理化性质、酶活性的关系来看,D975、D525密度林分中土壤理化性质、酶活性与密度的关系绝大都表现为负相关,而D675密度林分中土

壤理化性质、酶活性与密度的关系都表现为正相关,说明过高或过低的杉木保留密度对土壤理化性质改善、酶活性提高都有负面影响,而 D675 密度林分中土壤理化性质、酶活性的表现相对来说是最优的。

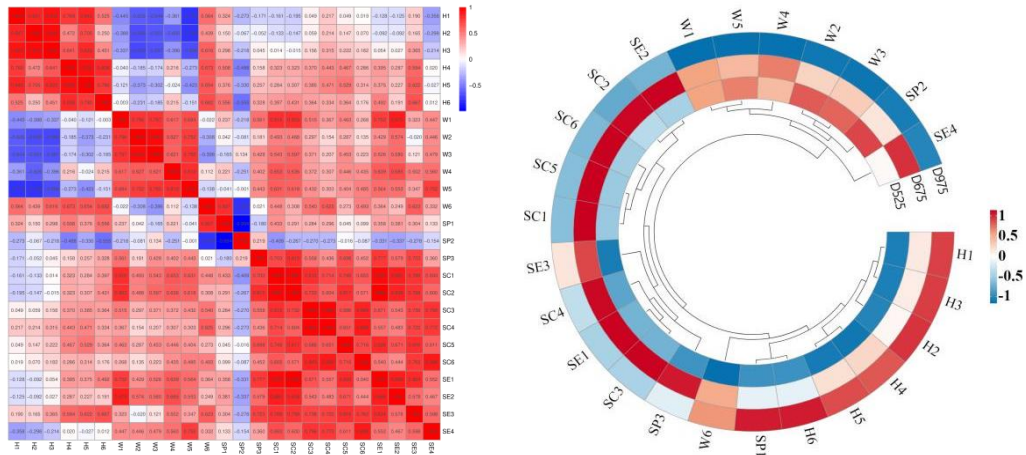


图 6 相关性热图与动态环状热图

Fig. 6 Correlation Heatmap and Dynamic Ring Heatmap

注: H1 为草本科数目; H2 为草本属数目; H3 为草本种数目; H4 为草本 Simpson 指数; H5 为草本 ShannonWiener 指数; H6 为草本 Pielou 指数; W1 为木本科数目; W2 为木本属数目; W3 为木本种数目; W4 为木本 Simpson 指数; W5 为木本 ShannonWiener 指数; W6 为木本 Pielou 指数; SP1 为土壤容重; SP2 为土壤总孔隙度; SP3 为土壤含水率; SC1 为土壤全碳含量; SC2 为土壤全氮含量; SC3 为土壤全磷含量; SC4 为土壤全钾含量; SC5 为土壤全钙含量; SC6 为土壤全镁含量; SE1 为土壤酸性磷酸酶活性; SE2 为土壤过氧化氢酶活性; SE3 为土壤蔗糖酶活性; SE4 为土壤脲酶活性。

Note: H1 is the number of herbaceous families; H2 is the number of herbaceous genera; H3 is the number of herbaceous species; H4 is the herbaceous Simpson index; H5 is the herbaceous ShannonWiener index; H6 is the herbaceous Pielou index; W1 is the number of woody families; W2 is the number of woody genera; W3 is the number of woody species; W4 is the woody Simpson index; W5 is the woody ShannonWiener index; W6 is the woody Pielou index; SP1 is the soil bulk weight; SP2 is the soil total porosity; SP3 is the soil water content; SC1 is the soil total carbon content; SC2 is the soil total nitrogen content; SC3 is the soil total phosphorus content; SC4 is the soil total potassium content; SC5 is the soil total calcium content; SC6 is the soil total magnesium content; SE1 is the soil acid phosphatase activity; SE2 is soil catalase activity; SE3 is soil sucrase activity; SE4 is soil urease activity.

4 讨论

4.1 杉木保留密度对林下植物的影响

林下植被层是森林生态系统的重要组成部分,林分密度通过改变林下光照、温度和湿度来影响林下植被组成(Rivaie, 2014)。在本研究中,3种杉木保留密度的杉阔异龄复层林中共出现34科45属55种草本植物,18科23属24种木本植物,其中,D525密度的林分中共有21科24属28种草本植物,13科16属17种木本植物,D675密度的林分中共有20科25属31种草本植物,14科18属18种木本植物,D975密度的林分中有20科30属36种草本植物,13科14属14种木本植物,且草本植物和木本植物的多样性指数在各密度间无显著性差异($P > 0.05$)。虽然3种杉木保留密度的林分林下植物科、属、种数量和多样性指数差异不大,但随着杉木保留密度的降低,植被群落的相似性指数也随之降低,说明杉阔异龄复层林林下植被的演替因杉木保留密度的不同而存在差异性。Alem等(2015)发现林分密度与林下植物物种多样性没有显著相关关系,但是人工林下植物物种多样性与到达植被层的光照有显著相关性,这也说明了林分密度对林下植被的影响,可能与林分内的高大乔木对光照的截留有关,进而影响所到达林下植被的光照。舒韦维等(2021)研究发现杉木林下植被各多样性指数在不同密度($650 \text{ 株}/\text{hm}^2$ – $1650 \text{ 株}/\text{hm}^2$)间均无显著差异,与本研究结果基本一致。本研究中,D525密度的林分中草本植物前三优势物种重要值之和最高,D975密度的林分中木本植物前三优势物种重要值之和最高,均不同程度地出现了生态位垄断的现象,且草本植物多样性指数随杉木保留密度的增加而增加,而木本多样性指数的变化规律与之相反,结合相关性分析的结果,可以看出杉阔异龄复层林林下草本植物与木本植物的演替存在竞争关系。总体来说,杉木保留

密度虽对林下植被多样性没有显著影响,但群落的演替出现了异质性,当杉木保留密度为 675 株/hm²时,杉阔异龄复层林林下草本、木本种群数量稳定保持且优势树种的竞争优势更大。

4.2 杉木保留密度对土壤理化性质的影响

土壤容重、含水率、总孔隙度作为土壤物理性质的重要指标,反映了土壤的紧密度与其储水量之间关联性,土壤越疏松多孔,容重越小,反之土壤越紧实,容重越大,越不利于植物从土壤中吸收水分和养分(梁士楚等, 2019)。本研究中,3 种杉木保留密度的林分土壤容重、含水率、总孔隙度无显著差异($P > 0.05$),但随着杉木保留密度的减小,林分的土壤容重、含水率、总孔隙度都有小范围增加,说明保留密度降低可以改变土壤通气透水状况。

土壤养分作为土壤化学性质的重要评价指标,是森林植物生长所需营养物质的重要供给源,其养分含量的高低直接影响林木的生长状况(Ni et al., 2019)。作为重要速生树种,杉木产生凋落物较少且难分解,养分归还量少,土壤氮素、磷素不足成为限制杉木生长的主要因子(Zhang et al., 2018)。镁有利于促进根系更好的生长以及提高植物的养分和水分的利用效率也是许多酶合成所必需的元素。钾是植物必需的营养元素之一,它能加速植物对二氧化碳的同化过程,有助于促进碳水化合物的转移、蛋白质的合成和细胞的分裂。在本研究中,土壤全碳、全氮、全磷、全钾、全钙、全镁含量均随着杉木保留密度的增加呈先增后减趋势,杉木保留密度的降低有效提高了土壤的养分含量,且在 D675 密度的林分中土壤养分含量达到最大,且与其它两个密度差异显著($P < 0.05$)。周树平等(2017)发现柚木人工林在密度为 650-1450 株/hm²的范围内,土壤理化性质随着密度的增大先有所改善之后又变差,与本研究结果一致。

4.3 杉木保留密度对土壤酶活性的影响

土壤酶作为化学反应的生物催化剂,对维持土壤生态系统的稳定起着重要作用,它以吸附或复杂综合体的方式存在于土壤中,推动着土壤的代谢过程(Yin et al., 2014; Decesare et al., 2020)。本研究中,土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性随杉木保留密度的升高呈先增后减趋势,D675 密度下的土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性均高于其它两个密度($P < 0.05$)。土壤过氧化氢酶主要分解土壤中的过氧化氢,该酶活性的提高有助于降低土壤中过度累积的过氧化氢对植物根系的危害。相关性分析的结果可以看出,土壤酶活性提高与土壤养分积累紧密相关,酸性磷酸酶活性与全磷含量呈显著正相关($P < 0.05$),与全碳、全氮、全钙含量呈极显著正相关($P < 0.01$),过氧化氢酶活性与全碳、全氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与全钙含量呈极显著正相关($P < 0.05$),蔗糖酶活性与全碳、全磷、全钾、全镁含量呈显著正相关($P < 0.05$),与全氮、全钙含量呈极显著正相关($P < 0.01$),脲酶活性与全碳、全磷、全钾含量呈显著正相关($P < 0.05$),与全镁含量呈极显著正相关($P < 0.01$),土壤酶直接参与了土壤养分元素的有效化过程,酸性磷酸酶对土壤磷素的有效性转化具有重要作用(Jia et al., 2019),脲酶是能够促进氮素的转化(Wang, 2021),蔗糖酶发生酶促反应,与葡萄糖的产生紧密相关(He et al., 2019),这 3 种酶活性的提高说明土壤的分解代谢活动在该密度下相对活跃,能提供更多的有效养,从而促进林木的生长。

5 结论

在杉阔异龄复层林中,林下植被的演替存在着密度效应,密度过高或过低容易使林分出现生态位垄断的现象,草本植物与木本植物多样性指标呈负相关关系,木本植物较草本植物来说与土壤理化性质、土壤酶活性相关性更高。土壤物理性质整体上无显著性差异,但保留密度的降低改善了土壤通气透水状况。土壤养分含量和土壤酶活性协同变化,均随着保留密度的升高呈先增后减趋势,保留密度的降低有助于土壤养分的积累,改善和提高了林地土壤肥力,酶活性的提高促进的养分转化,从而促进地上植物生长。综上所述,杉木保留密度对杉阔异龄复层林的构建有显著影响。在本研究中,杉木保留密度为 675 株/hm²是杉阔异龄复层林经营的最适密度。

参 考 文 献

- 查美琴, 徐海东, 成向荣, 等. 2020, 不同林龄杉木+闽楠复层林土壤磷形态及微生物功能多样性变化. 生态学报, 40(19): 6938-6947.
- Zha M Q, Xu H D, Cheng X R, et al., 2020, Variations of soil phosphorus form and microbial functional diversity in *Cunninghamia lanceolata* + *Phoebe bounei* multi-layered mixed plantations of different ages. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6938-6947.
- 黄凯璇, 汤新艺, 秦欢, 等. 2020. 近自然经营对杉木人工林地被物和土壤碳氮积累的影响. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1556-1565.
- Huang K X, Tang X Y, Qin H, et al., 2020, Effects of Close-to-nature Management on Carbon and Nitrogen Accumulation of Ground Cover and Soil of *Cunninghamia lanceolata* Plantations. *Chinese Journal Ecology Environment*, 2020, 29(8): 1556-1565.
- 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 等. 2019, 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征. 生态学报, 39(8): 2752-2761.
- Liang S C, Yuan X X, Lu X M, et al., 2019, Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang river, southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 39(8): 2752-2761.
- 刘雅静, 张书源, 李静, 等. 2019, 坡位和密度对桉树林生产力和林下植被多样性的影响. 林业与环境科学, 35(4):48-55.
- Liu Y J, Zhang S Y, Li J, et al. 2019, Effect of slope position and density on the species diversity of understory vegetation and productivity of eucalyptus plantation. *Forestry and Environmental Science*, 35(4):48-55.
- 明安刚, 刘世荣, 李华, 等. 2017, 近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响. 生态学报, 37(23): 7833-7842.
- Ming A G, Liu S R, Li H, et al., 2017, Effects of close-to-nature transformation on biomass and its allocation in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 37(23): 7833-7842.
- 倪惠菁, 苏文会, 范少辉, 等. 2019, 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展. 生态学杂志, 38(3): 863-872.
- Ni H J, Su W H, Fan S H, et al., 2019, Responses of forest soil nutrient cycling to nutrient input modes: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 38(3): 863-872.
- 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 2021, 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 41(11): 4521-4530.
- Shu W W, Ln L H, Li H, et al., 2021, Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 41(11): 4521-4530.
- 张驰, 张林, 李鹏, 等. 2014, 亚热带常绿阔叶林凋落物生产及季节动态对模拟氮沉降增加的响应. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1205-1210.
- Zhang C, Zhang L, Li P, et al., 2014, Response of litter production and its seasonality to increased nitrogen deposition in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1205-1210.
- 周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 2017, 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究. 植物研究, 37(2):200-210.
- Zhou S P, Liang K N, Du J, et al. 2017, Research on Understory Vegetation and Soil physicochemical Properties of Teak Plantation with Difference Stand Densities. *Bulletin of Botanical Research*, 37(2): 200-210.
- 相聪伟, 张建国, 段爱国, 等. 2015, 杉木人工林材种结构的立地及密度效应研究[J]. 林业科学研究, 28(5): 654-659.
- Xiang C W, Zhang J G, Duan A G, et al. 2015, Effects of site quality and planting density on wood assortment rate in Chinese Fir Plantation. *Forest Research*, 28(5):654-659.
- 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 等. 2019, 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, 55(3): 1-12.
- Xu X H, Sun Y J, Zhou H, et al. 2019, Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(3): 1-12.
- Alem S, Pavlis J, Urban J, et al. 2015, 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*, 5(4):375-86.
- Bi J, Blanco JA, Seely B, et al. 2007, Yield decline in Chinese-fir plantations: A simulation investigation with implications for model complexity. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9): 1615-1630.
- Chen Y, Chen G, Robinson D, et al. 2016, Large amounts of easily decomposable carbon stored in subtropical forest subsoil are associated with r-strategy-dominated soil microbes. *Soil Biology and Biochemistry*, 95: 233-242.
- Decesare F, Garzillo A M, Buonocore V, et al. 2000, Use of sonication for measuring acid phosphatase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 825~832
- Gavinet J, Ourcival J M, Gauzere J, et al. 2020, Drought mitigation by thinning: Benefits from the stem to the stand along 15 years of experimental rainfall exclusion in a holm oak coppice. *Forest Ecology Management*, 473: 118266.
- He Y, Lan Y, Zhang H, et al. 2022, Research characteristics and hotspots of the relationship between soil microorganisms and

vegetation: A bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 141: 109145.

Jia J, Cao Z, Liu C, et al. 2019, Climate warming alters subsoil but not topsoil carbon dynamics in alpine grassland. *Global Change Biology*, 25(12): 4383-4393.

Rivaie A-Aravin. 2014, The effects of understory vegetation on P availability in *Pinus radiata* forest stands: A review. *Journal of Forestry Research*, 25(3): 489-500.

Wang S L, Zhang W D, Sanchez F. 2010, Relating net primary productivity to soil organic matter decomposition rates in pure and mixed Chinese fir plantations. *Plant and Soil*, (1): 501-510.

Wang Y J. 2021, Effects of stand density on soil microbial community composition and enzyme activities in subtropical *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook plantations. *Forest Ecology and Management*, 479(1).

Wu J P, Liu Z F, Wang X L, et al. 2011, Effects of understory removal and tree girdling on soil microbial community composition and litter decomposition in two *Eucalyptus* plantations in South China. *Functional Ecology*, (4): 921-931.

Yin R, Deng H, Wang H L, et al. 2014, Vegetation type affects soil enzyme activities and microbial functional diversity following re-vegetation of a severely eroded red soil in subtropical China. *Catena*, 115: 96-103.

Zhang X, Gu H Y, Chen X W. 2018, Effects of selective cutting on soil phosphorus forms and availability in Korean pine broad-leaved forest in Xiaoxing'an Mountains of China. *The Journal of Applied Ecology*, 29(2) : 441-448.