

川西柳杉幼林间伐后林下植被和土壤特征变化

周璇¹, 刘凯利¹, 胡佳怡², 董凯丽³, 赵苏亚⁴, 龚映匀², 陈国敏⁵, 张斌¹, 王瑞辉^{1*}

(1. 中南林业科技大学 林学院, 湖南 长沙 410004; 2. 广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004;
3. 广西壮族自治区国有七坡林场, 广西 南宁 530031; 4. 广西壮族自治区南宁良凤江国家森林公园, 广西 南宁 530031;
5. 黔东南州林业科学研究所, 贵州 凯里 556000)

摘要:为缓解柳杉人工林密度大、林分质量差等问题, 对其进行抚育间伐, 分析比较林下植被及土壤特征对不同间伐强度的响应, 旨在为柳杉人工林的科学经营提供一定的理论基础。以雅安市雨城国有林场羊子岭工区 8 年生柳杉人工林为研究对象, 在初始密度为 $2\ 800\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的人工林中设置 4 个强度(对照 0%、轻度 20%、中度 30%、重度 40%)开展间伐试验; 间伐 4 a 后, 监测并分析其林下植被、土壤特征变化。结果表明, 草本层各处理间 Shannon 指数及 Pielou 指数差异不显著, 轻度间伐多样性指数最低; 间伐后灌木层 Shannon 指数、Pielou 指数及物种丰富度显著高于对照, 分别是对照处理的 7、3、6 倍, 且灌木层物种丰富度增加量明显高于草本层。间伐可使土壤物理性质得到明显改善, 土壤容重随间伐强度增大而显著降低, 中度间伐强度相对于对照降低了 24.45%, 轻度和中度间伐的土壤毛管孔隙度与对照样地差异显著; 重度间伐土壤 pH 及有效磷(P)含量相对于对照显著降低 6.79%、25%, 土壤有机质、全氮(N)、全磷(P)以及水解 N 含量随间伐强度的增大而增加, 其中轻度间伐处理的土壤有机质含量增加量最高, 比对照增加了 94.66%。土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性随间伐强度增大而增强, 重度间伐和中度间伐活性最高, 且与其他处理差异显著。冗余分析结果显示, 胸径年增量、草本层植物多样性等均与土壤全 N 和水解 N 存在显著相关性。研究表明川西地区柳杉幼林可采取间伐措施改善林分环境。

关键词:柳杉人工林; 间伐强度; 林下植被; 土壤理化性质; 土壤酶活性; 冗余分析

中图分类号: S791.31

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2024)01-0044-08

Understory Vegetation and Soil Characteristic Variations of Young *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* Plantations After Thinning in Western Sichuan

ZHOU Xuan¹, LIU Kai-li¹, HU Jia-yi², DONG Kai-li³, ZHAO Su-ya⁴, GONG Ying-yun², CHEN Guo-min⁵,
ZHANG Bin¹, WANG Rui-hui^{1*}

(1. College of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Guangxi Eco-engineering Vocational & Technical College, Liuzhou 545004, Guangxi, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Qipo Forest Farm, Nanning 530031, Guangxi, China; 4. Liangfengjiang National Forest Park, Nanning 530031, Guangxi, China; 5. Qiandongnanzhou Institution of Forestry, Kaili 556000, Guizhou, China)

Abstract: To alleviate the deficiencies of high density and poor standing quality of *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantations, a thinning management was conducted to analyze and compare the responses of understory vegetation and soil properties on thinning intensities and to provide a theoretical basis for scientific management of the plantations. Taking the 8-year-old *C. japonica* var. *sinensis* plantations in Yangzil-

收稿日期: 2022-11-05 修回日期: 2022-12-21

基金项目: 国家林业和草原局“森林抚育成效监测国家级样地及监测体系建设项目”(2016-28-11); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200706); 中南林业科技大学研究生创新基金。

第一作者: 周璇。研究方向: 森林培育。E-mail: xiaverzhou@163.com

* 通信作者: 王瑞辉, 教授, 博士生导师。研究方向: 森林培育。E-mail: wang626389@163.com

ing State Owned Forest Farm, Ya'an City, Sichuan Province, China, as the research objects, four thinning intensities were set in an initial density of $2\ 800\ \text{plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ (control, 0%; light, 20%; medium, 30%; heavy, 40%) to carry out thinning experiment. Four years after thinning, the variation of understory vegetation diversity and soil properties were analyzed. It was found that in herb layer, no significant differences were found in Shannon and Pielou indices among different thinning treatments, and the diversity index of light thinning was the lowest. In shrub layer, Shannon index, Pielou index and species richness of the thinning treatment were 7, 3, and 6 times of the control. Moreover, the increase of species richness in the shrub layer was significantly higher than that in the herb layer. The soil physical properties were significantly improved by thinning. The soil bulk density decreased significantly with the increase of thinning intensities, and the medium thinning intensity decreased by 24.45% compared with the control. The soil capillary porosity of light and medium thinning treatments were significantly different from that of the control. Compared with the control, soil pH and available phosphorus content of heavy thinning decreased by 6.79% and 25%, and the contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus and hydrolyzed nitrogen increased with the increase of thinning intensities, and soil organic matter content of light thinning treatment increased by 94.66% compared with the control. The activities of soil catalase and sucrase increased with the increase of thinning intensities, and the highest activities were found in heavy and medium thinning treatments, and the differences were significant compared with other treatments. The results of redundancy analysis showed that annual DBH growth, herb layer vegetation diversity were correlated with soil total and hydrolyzed nitrogen. The study indicates that thinning management can be used to improve the environment for young *C. japonica* var. *sinensis* plantation in western Sichuan.

Key words: *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantation; thinning intensity; understory vegetation; soil physicochemical property; soil enzyme activity; redundancy analysis

我国人工林面积近 20 a 来居世界首位, 人工林在提高生态和经济效益中有突出贡献^[1], 但多数林分存在初植密度大、树种组成单一等问题, 造成林分质量低下^[2-3]。间伐作为一种重要的营林技术措施, 可通过改变林分密度, 直接影响林内透光性及小气候, 进而影响林分生长、林下生物多样性以及土壤理化性质^[4-6]。林下植被及土壤是森林生态系统的重要组成部分^[7-8], 亦是衡量间伐效果的重要因素, 而其变化与间伐强度、间伐时间等因素密切相关^[9-11]。间伐使适应性强的植物具有生存优势^[12], 以提高林下植被盖度和多样性^[13-14], 对长白落叶松 (*Larix olgensis*) 的研究表明, 间伐强度低于 35% 有利于草本多样性增加^[15], 但关于油松 (*Pinus tabulaeformis*) 的间伐试验表明, 58% 的间伐强度益于林下植物多样性的提高^[16]。林分地上部分及地下部分是联动的环境整体, 林下植被变化的同时也驱动了土壤性质的变化^[17]。一项关于植物多样性与土壤因子的关系表明, 植物物种分布可影响土壤有机质、全磷 (P) 和全钾 (K) 等^[18]。林下植被尤其是草本层所产生的低木质素和低纤维素浓度的根系及枯落物, 可显著提高林下枯落物的分解速率^[19], Elliott 等^[20]对东部落叶林生态系统中草本层的功能作用研究发现, 草本通过向森林地表提供高质量的凋落物, 在调

节生态系统碳氮循环过程中发挥重要作用。土壤酶是土壤重要组成部分, 关于相思人工林间伐试验表明, 间伐后林分植被覆盖提高了土壤酶活性^[21], 吴流通等^[22]针对不同植被类型土壤养分及酶活性的研究也证明了土壤养分与土壤过氧化氢酶和蔗糖酶间存在显著相关性。这些研究都证明了林下植被多样性及土壤性质的变化可用来评判林分管理措施的可行性。研究不同强度间伐林分的林下植被及土壤性质有助于了解间伐林分植被多样性及土壤生态系统功能状况, 为进一步实施合理的经营措施提供理论基础^[23-24]。

柳杉 (*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*) 是我国亚热带地区的主要造林树种之一, 为中高海拔地区的速生先锋树种。柳杉幼龄稍耐荫, 适生于温暖湿润气候和深厚肥沃且排水良好的酸性土壤, 在我国南方山地广为栽培。川西地区处长江上游, 其植物区系是长江重要的生态屏障, 具有重要的生态价值。目前该地区柳杉种植面积近 20 万 hm^2 , 由于初植密度大, 缺乏有效管理, 导致该地区柳杉林分存在生长表现差、林下植被稀疏等问题。目前关于柳杉的间伐试验主要侧重于生长^[25]、土壤理化性质^[26-27]等方面, 关于林分生长、林下植被与土壤理化性质间的关系的研究较少。因此, 本研究以川西地区

柳杉幼林为对象,设置系列强度开展间伐试验,研究间伐对林下植物多样性、土壤理化性质以及土壤酶活性等的影响,以期对柳杉用材林经营提供理论依据。

1 研究区概况

试验地位于四川省雅安市雨城区国有林场羊子岭工区(29°47'N,102°56'E),属于亚热带湿润季风气候区,年均气温 16.2℃,平均年降水量 1 800 mm,年平均空气湿度 79%。海拔 1 490~1 569 m,土壤为山地黄壤。2014 年柳杉林林下植被种类总计 7 种,分别为蕨(*Pteridium aquilinum*),中华薹草(*Carex chinensis*),卷柏(*Selaginella tamariscina*),碎米莎草(*Cyperus iria*),凤丫蕨(*Coniogramme japonica*),山茶(*Camellia japonica*),箭竹(*Fargesia spathacea*)。样地土壤容重 1.17 g·cm⁻³,pH 4.65~4.75,有机质含量 44.32 g·kg⁻¹,全 N 含量 2.55 g·kg⁻¹。

表 1 间伐后样地基本情况及林木生长年增量

Table 1 Basic situations of sampling plots and annual increments of tree growth

间伐强度	样地号	间伐后 保留密度/ (株·hm ⁻²)	2018 年		2014—2018 年			
			平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均胸径 年增量/cm	平均树高 年增量/m	平均单株材积 年增量/m ³	平均林分蓄积 年增量/ (m ³ ·hm ⁻²)
对照	CK1—3	2 800±25	11.50±0.30b	6.80±0.10d	0.53±0.18c	0.88±0.10a	0.014±0.001b	44.78±9.77a
轻度	L4—5	2 200±44	12.37±1.75b	7.17±0.15c	0.79±0.05b	0.95±0.03a	0.020±0.003ab	45.71±20.37a
中度	M7—9	1 950±85	13.27±0.47ab	8.90±0.30a	1.09±0.02a	0.90±0.13a	0.024±0.002ab	45.06±19.34a
重度	H10—12	1 700±69	14.27±0.23a	7.80±0.10b	1.12±0.13a	0.93±0.07a	0.029±0.002a	46.35±3.52a

注:不同小写字母表示同一指标不同间伐强度间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 调查与测定

2018 年秋末(间伐 4 a 后),系统开展林下植物调查、土壤理化分析以及土壤酶活性测定。

林下植物调查:于每个样地的 4 个角分别设置 2 m×2 m 的灌木样方,记录灌木的种类,调查其盖度、地径、高度以及健康(生长发育)状况。每个灌木样地内设置 1 个 1 m×1 m 的草本样方,调查草本植物种类、数量(株)和高度。

土壤理化分析:于每个样地内按五点取样法采样,去除地表枯落物,挖 0~20 cm 的土壤剖面,采用环刀法取土并测定土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤储水能力等;同时取土样,风干后分样地将土样等量混合作为混合样,测定 pH、有机质、全氮(N)、全 P、全 K、水解 N、有效 P 和速效 K 含量,以及土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性等指标。这些土壤理化性质指标均依据国家林草局颁布的森林土壤分析相关标准^[29]进行测定。

土壤酶活性测定^[30]:采用磷酸苯二钠-4-氨基安替比林比色法测定酸性磷酸酶活性;3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性;靛酚比色法测定

2 研究方法

2.1 间伐试验设计与布设

于 2014 年秋末,选择立地质量、海拔、坡度等立地条件基本一致的 8 年生柳杉人工纯林(密度为 2 800±25 株·hm⁻²)布设 12 个面积均为 600 m²(20 m×30 m)的固定样地开展间伐试验,样地间距 50 m 以上。试验采用随机区组设计,安排重度(40%,保留密度 1 700 株·hm⁻²)、中度(30%,1 950 株·hm⁻²)、轻度(20%,2 200 株·hm⁻²)以及对照(未间伐)4 个间伐强度处理,3 次重复。试验布设后对各样地进行每木检尺,采用胸径尺(0.1 cm)测定胸径,测高器(0.1 m)测定树高。2018 年进行复测,并计算各间伐强度柳杉林木生长年增量(胸径、树高、单株材积和林分蓄积年增量)。单株材积采用四川省柳杉人工林二元立木材积公式^[28]计算,依据样地内各单株材积计算林分蓄积量(表 1)。

脲酶活性;KMnO₄ 液滴定法测定过氧化氢酶活性。

2.3 数据处理

2.3.1 植物多样性 灌木层和草本层物种丰富度指数(S)、Shannon 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)。物种丰富度为调查样方内所有物种数的和,其余指标按以下公式计算

$$\text{Shannon 指数: } H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$\text{Pielou 指数: } J = \frac{H'}{\ln S} \quad (2)$$

式中: $P_i = \frac{n_i}{N}$,表示第 i 个物种的相对多度; n_i 表示物种 i 的个体数;N 表示物种 i 所在群落所有物种的个体数之和^[31]。

2.3.2 冗余分析和数据处理 以土壤理化性质为解释变量,林木生长增量、林下植被多样性及土壤酶活性为响应变量,通过 R 软件加载“vegan”包进行冗余分析。DCA(detrended correspondence analysis)分析结果中 Lengths of gradient 的第一轴的数值<3.0,选用 RDA(Redundancy analysis)分析。采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行描述性统计,单

因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析及多重比较。采用 Origin 2022 软件作图。

3 结果与分析

3.1 间伐对林下植物多样性的影响

各间伐处理的柳杉人工林林下植物多样性见表 2。由表 2 可以看出,草本层物种对于间伐的响应不明显,除对照外,Shannon 指数、Pielou 指数及物种丰富度随着间伐强度的增加而增大,重度间伐分别比轻度间伐增加了 101%、76%、25%;物种丰富度在轻度间伐与中度、重度间伐间存在显著差异。柳杉林分间伐增加了 4~5 个灌木种类,灌木层 Shannon 指数、Pielou 指数及物种丰富度随间伐强度增加而增大;且对照显著低于间伐强度处理,而间伐强度处理间差异不显著。

3.2 间伐对柳杉人工林土壤理化性质的影响

各间伐处理的柳杉人工林土壤水分物理性质见图 1。由图 1 可以看出,随着间伐强度的增加,土壤

容重显著降低,其中轻度、中度及重度间伐处理分别比对照样地降低了 8.72%、24.45%、17.65%;间伐措施显著增加了土壤毛管孔隙度,其中中度间伐的土壤毛管孔隙度相对于对照处理增加了 38.95%,轻度、中度、重度间伐处理之间差异不显著;间伐虽增加了非毛管孔隙度及土壤储水能力,但土壤非毛管孔隙度和土壤储水能力在各处理间差异不显著。

表 2 4 种间伐处理间柳杉人工林下植物多样性差异
Table 2 Differences of understory species diversity among four thinning treatments in *C. japonica* var. *sinensis* plantation

林下植物	间伐强度	多样性指数	均匀度指数	物种丰富度
草本	对照	1.11±0.19a	0.80±0.14a	4±0a
	轻度	0.57±0.63a	0.42±0.33a	3±2b
	中度	1.03±0.13a	0.62±0.11a	5±1a
	重度	1.15±0.36a	0.74±0.18a	5±1a
灌木	对照	0.21±0.37b	0.31±0.53b	1±1b
	轻度	1.47±0.38a	0.97±0.03a	5±2a
	中度	1.51±0.20a	0.95±0.03a	5±1a
	重度	1.69±0.07a	0.98±0.02a	6±1a

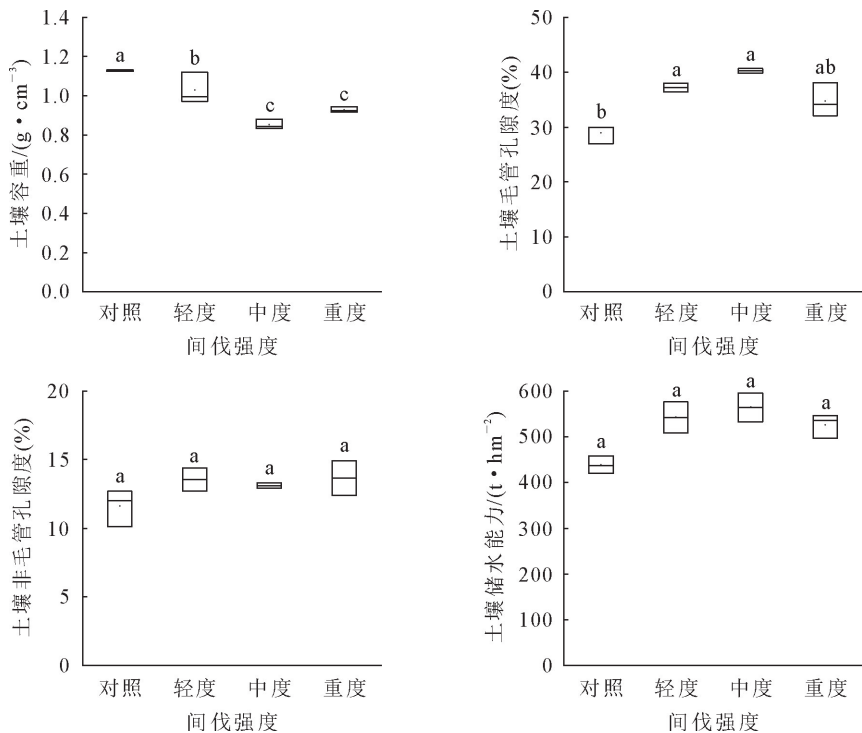


图 1 4 种间伐处理下柳杉林的土壤水分物理性质

Fig. 1 Soil physical properties of *C. japonica* var. *sinensis* plantation under four thinning treatments

各间伐处理的柳杉人工林土壤化学性质见表 3。由表 3 可知,间伐增加了柳杉林下土壤的酸度,对照的 pH 显著高于轻度、中度及重度间伐处理,重度间伐与对照相比,酸度值增加了 6%。间伐增加了土壤养分含量,轻度、中度和重度间伐处理的土壤有机质含量显著高于对照,分别增加 94.66%、57.64%、60.49%;轻度间伐的土壤全 N 含量达 4.08 g·kg⁻¹,显著高于其他处理;重度和中度间伐

处理的土壤水解 N 含量显著高于对照,增加量达 13.51%。间伐后土壤有效 P 含量显著低于对照处理,而三者间差异不显著。对照和中度间伐处理的土壤全 P 含量均显著低于轻度间伐。土壤全 K 及速效 K 含量虽有波动,但各处理间差异不显著。

3.3 间伐对柳杉人工林土壤酶活性的影响

各间伐处理的柳杉人工林土壤酶活性见图 2。由图 2 可知,轻度和中度间伐处理的土壤脲酶活性

显著高于对照和重度间伐处理,对照和重度间伐处理间脲酶活性差异不显著;土壤过氧化氢酶在重度间伐活性最高,可达 $3.92 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$,为对照处理的 2 倍,且与其他处理差异显著;土壤蔗糖酶活性随间伐强度增大而增强,在中度间伐活性最高,且与其他处理差异显著;土壤酸性磷酸酶活性虽然存在变化,但 4 个处理间差异不显著。

3.4 林木生长量、林下植物多样性与土壤性质的冗余分析

分别以柳杉 4 个生长指标的增量及 6 个林下植

物多样性指标为响应变量,以表征土壤理化性质、酶活性的主要指标为解释变量进行冗余分析(RDA 分析)。图 3A 表明,第 1 轴和第 2 轴共解释了柳杉年均生长增量差异的 71.34%。柳杉 4 个生长指标与土壤的非毛管孔隙度(NCP)、水解 N 含量(HN)、过氧化氢酶活性(CAT)、全 N 含量(TN)、土壤储水能力(WSC)和土壤毛管孔隙度(CP)等指标密切相关,其中,胸径年增量(DBH)、树高年增量(H)、单株材积年增量(STV)与全 N 含量(TN)、土壤的非毛管孔隙度(NCP)呈正相关关系。

表 3 4 种间伐处理下柳杉人工林的土壤化学性质

Table 3 Soil chemical properties of *C. japonica* var. *sinensis* plantation under four thinning treatments

指标	对照	轻度	中度	重度
pH	$4.71 \pm 0.06a$	$4.45 \pm 0.08c$	$4.57 \pm 0.06b$	$4.39 \pm 0.05c$
有机质含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$45.94 \pm 3.35b$	$89.43 \pm 17.34a$	$72.42 \pm 5.82a$	$73.73 \pm 5.27a$
全 N 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$2.59 \pm 0.06c$	$4.08 \pm 0.42a$	$3.31 \pm 0.29b$	$3.28 \pm 0.22b$
全 P 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$0.46 \pm 0.01b$	$0.81 \pm 0.11a$	$0.38 \pm 0.02b$	$0.59 \pm 0.23ab$
全 K 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$3.36 \pm 0.43a$	$3.76 \pm 0.31a$	$3.94 \pm 0.31a$	$3.79 \pm 0.39a$
水解 N 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$0.32 \pm 0.01b$	$0.37 \pm 0.07ab$	$0.42 \pm 0.02a$	$0.41 \pm 0.02a$
有效 P 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$0.04 \pm 0.001a$	$0.023 \pm 0.007b$	$0.022 \pm 0.001b$	$0.030 \pm 0.005b$
速效 K 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$0.064 \pm 0.007a$	$0.060 \pm 0.012a$	$0.063 \pm 0.002a$	$0.050 \pm 0.006a$

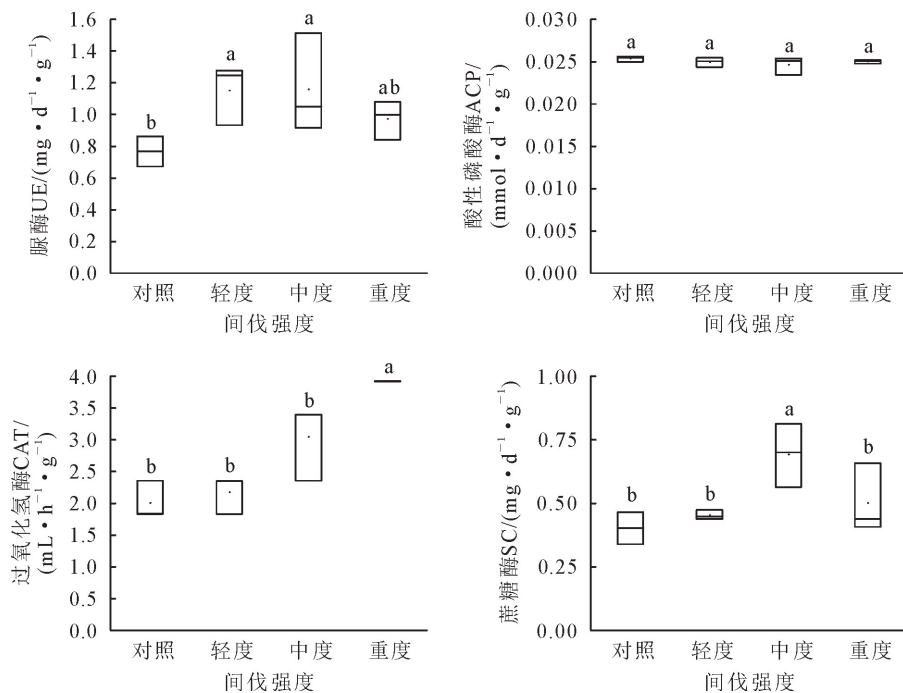


图 2 4 种间伐处理下柳杉人工林的土壤酶活性

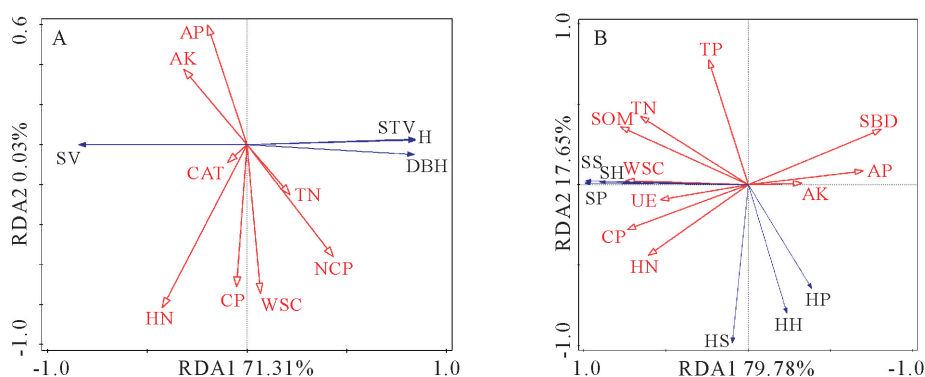
Fig. 2 Soil enzymatic activities of *C. japonica* var. *sinensis* plantation under four thinning treatments

由图 3B 可以看出,柳杉林下植被多样性 2 个轴的解释量分别为 79.78% 和 17.65%,由环境因子和植被多样性指标形成的夹角可知,草本层多样性指标均与有效 P 含量(AP)、速效 K 含量(AK)呈负相关关系,而与土壤储水能力(WSC)、土壤有机质含量(SOM)、土壤全 N(TN)及水解 N(HN)含量等存在正相关关系。灌木层多样性指数与全磷含量(TP)显著负相关,与速效 K 含量(AK)、水解 N 含

量(HN)呈显著正相关。

4 讨论

间伐 4 a 后柳杉林林下植被调查结果表明,间伐对草本层的多样性影响较小,而显著提升灌木层 Shannon 指数、Pielou 指数及物种丰富度。这或许与林内透光度的改变有关,对照的林分密度大,林内透光性小,林下碎米莎草、凤丫蕨等喜荫植物较



DBH、H、STV、SV、SBD、CP、NCP、WSC、SOM、TN、TP、HN、AK、AP、HH、HP、HS、SH、SP、SS、UE、CAT 分别表示胸径年增量、树高年增量、单株材积年增量、总蓄积年增量、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤储水能力、有机质、全 N、全 P、水解 N、速效 K、有效 P、草本层 Shannon 指数、草本层 Pielou 指数、草本层物种丰富度指数、灌木层 Shannon 指数、灌木层 Pielou 指数、灌木层物种丰富度指数、脲酶、过氧化氢酶。

图 3 4 种间伐处理下土壤性质影响林木生长量、林下植物多样性的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of the effects of soil physicochemical properties on growth increment, understory vegetation diversity and soil enzyme activities under four thinning treatments

多^[32],中度和重度间伐后草本层出现了喜光耐荫的植物如乌菰莓(*Cayratia japonica*)、双蝴蝶(*Tripterospermum chinense*)等,而轻度间伐除 20% 的林木,其林分密度仍较高,对喜光植物而言光照较弱,同时又改变了喜荫植物的环境,因此轻度间伐草本层的物种丰富度较低。间伐后林内光照、温湿条件的改变使灌木层增加了槲木(*Aralia chinensis*)、猕猴桃(*Actinidia*)、箭竹(*Fargesia spathacea*)和柃木(*Eurya japonica*)等喜光物种,间伐丰富了林下植物的组成,有利于增强人工林林分结构的稳定性^[33-34]。本研究间伐后林下灌木物种丰富度增加量明显多于草本。张柳桦等^[35]对 10 年生马尾松人工林的间伐结果显示,间伐 16 a 后草本层变化明显大于灌木层。这可能与草本种源相关,本研究中试验地海拔较高,林下草本种类稀少,导致草本层物种数量增加不明显。

柳杉人工林土壤容重随间伐强度的增大而减小;间伐后土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度及储水能力增大。总体来看,间伐可增加柳杉林土壤孔隙度,改善土壤通气性^[36-38]。土壤通气性状况直接影响土壤的蓄水保肥能力,良好的通气性可促进林木对水分和养分的吸收,改善林木的生长状况。土壤物理性质的改善与林下植被多样性的增加密不可分,因试验地海拔较高,林下植被多为 1 年生草本及落叶灌木,间伐后灌草多样性增大,一方面在地表层产生了凋落物^[39],另一方面其根系可改善土壤的疏松状况,从而使得土壤结构得到改善^[40]。与此同时灌草及林内凋落物的增加,是土壤有机质增加的主要原因^[41-42]。土壤有机质可直接影响土壤的通气性、保水性和土壤温度,间伐后光照面积的增大,促使地表升温,有利于枯落物及 1 年生草本根系及腐殖质的

分解,进一步增加土壤的养分含量^[43],而腐殖质的分解,还增加了土壤中的有机酸,这或许是土壤 pH 随间伐强度增大而减小的原因。本研究中轻度间伐处理下土壤全 P 含量较高,土壤 P 的来源主要有大气沉降和植物凋落物输入,虽然间伐增加了林下植被,但对于中度和重度间伐来说间伐期林分郁闭度降低,容易造成全 P 含量有所流失,因此中度、重度间伐的土壤全 P 含量相对较低。

土壤酶活性与土壤理化性质关系密切,在土壤养分的固定、动植物残体的分解、有机物的合成等方面发挥着重要作用^[44-45]。土壤酶参与了土壤反应中全部的生化过程,间伐对柳杉林土壤脲酶、过氧化氢酶及蔗糖酶活性影响较大,土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性随间伐强度增大而增强,分别在重度间伐(40%)、中度间伐(30%)时酶活性最高。通过冗余分析发现,柳杉生长因子增量和林下植物多样性与主要的土壤理化性质指标,如全 N、有机质、水解 N 含量等呈正相关关系。林木生长、林下植被与土壤性质的相关性,更深层地展现了其互作关系,间伐后林下植被增加,土壤酶及土壤微生物等促使凋落物分解加速,从而改善土壤理化特性^[46-48],最终促进林分生长发育^[49-50]。

5 结论

间伐能有效改善柳杉人工林林下植被多样性,重度间伐效果最为明显;间伐对灌木层的影响大于草本层。间伐可改善柳杉人工林土壤理化性质,土壤容重随间伐强度的增大而减小;间伐后土壤毛管孔隙度、土壤有机质含量、水解 N 及全 N 含量随间伐强度的增大而增加。间伐能改变土壤脲酶、蔗糖酶活性,以重度间伐最为显著。冗余分析表明柳

杉人工林生长与林下植物多样性及土壤理化性质相关,高密度柳杉幼林宜采用间伐措施来改善林分环境,提高林木生长质量。

参考文献:

- [1] 刘姗姗,黄鑫毅,彭仲炜,等. 中国林种用途造林面积数据(1991—2014)与时空分析[J]. 全球变化数据学报,2021,5(1):37-44.
- [2] 彭舜磊,王得祥,赵辉,等. 我国人工林现状与近自然经营途径探讨[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):184-188.
PENG S L, WANG D X, ZHAO H, *et al.* Discussion the status quality of plantation and near nature forestry management in china[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2):184-188. (in Chinese)
- [3] 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[J]. 生态学报,2018,38(1):1-10.
LIU S R, YANG Y J, WANG H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in china: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1):1-10. (in Chinese)
- [4] 钟呈,王瑞辉,符伟男,等. 不同年龄杉木人工林抚育成效分析——以江西省靖安县为例[J]. 林业资源管理,2017(1):43-49.
- [5] REBECCA S, SAKIKO Y, YUICHI Y, *et al.* Meta-analysis of management effects on biodiversity in plantation and secondary forests of Japan[J]. Conservation Science and Practice, 2019, 1:14.
- [6] 郭海洋,王涛,贾炜玮. 抚育间伐对林口林业局主要针叶树种生长结构及生物多样性的影响[J]. 东北林业大学学报,2019,47(12):1-6.
GUO H F, WANG T, JIA W W. Effects of thinning on growth, structure and biodiversity of main coniferous species in Northeast China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(12):1-6. (in Chinese)
- [7] HARMER R, KERR G, STOKES V, *et al.* The influence of thinning intensity and bramble control on ground flora development in a mixed broadleaved woodland[J]. Forestry, 2017, 90(2):247-257.
- [8] LINDGREN P, SULLIVAN T. Influence of stand thinning and repeated fertilization on plant community abundance and diversity in young lodgepole pine stands: 15-year results[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 308:17-30.
- [9] 宋重升,王有良,张利荣,等. 间伐强度对杉木人工林材种结构的影响[J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2022,51(2):195-203.
SONG C S, WANG Y L, ZHANG L R, *et al.* Effect of thinning intensity on timber structure of Chinese fir plantation [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2022, 51(2):195-203. (in Chinese)
- [10] 郑鸣鸣,任正标,王友良,等. 间伐强度对杉木中龄林生长和结构的影响[J]. 森林与环境学报,2020,40(4):369-376.
- [11] 鲍斌,丁贵杰. 抚育间伐对马尾松林分生长与植物多样性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(3):30-33,46.
- [12] 张洋洋,周清慧,许骄阳,等. 林分密度对马尾松林下植物与土壤种子库多样性的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(7):2355-2362.
ZHANG Y Y, ZHOU Q H, XU J Y, *et al.* Impacts of stand density on diversity of understory plant and soil seed banks in a *Pinus massoniana* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7):2355-2362. (in Chinese)
- [13] TRENTINI C P, CAMPANELLO P I, VILLAGRA M, *et al.* Thinning of loblolly pine plantations in subtropical Argentina: Impact on microclimate and understory vegetation[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 384:236-247.
- [14] 张宏芝,白庆红,徐成立,等. 间伐对华北落叶松人工林林下植被的短期影响[J]. 林业资源管理,2010(6):40-44.
- [15] 田佳歆,刘盛,冯万斌,等. 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[J]. 东北林业大学学报,2022,50(3):30-34,50.
TIAN J X, LIU S, FENG W B, *et al.* Effects of thinning intensity on canopy structure and herbaceous species diversity of *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(3):30-34, 50. (in Chinese)
- [16] 马履一,李春义,王希群,等. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. 林业科学,2007,43(5):1-9.
MA L Y, LI C Y, WANG X Q, *et al.* Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5):1-9. (in Chinese)
- [17] 邱新彩. 间伐与混交对塞罕坝北落叶松人工林土壤肥力的影响[D]. 北京:北京林业大学,2021.
- [18] 李伟,张翠萍,魏润鹏. 广东中西部桉树人工林植物多样性与林龄和土壤因子的关系[J]. 生态学报,2014,34(17):4957-4965.
- [19] MELILLO J M, ABER J D, LINKINS A E, *et al.* Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: plant litter to soil organic matter[J]. Plant Soil, 1989, 115:189-198.
- [20] ELLIOTT K J, VOSE J M, KNOEPP J D, *et al.* Functional role of the herbaceous layer in eastern deciduous forest ecosystems[J]. Ecosystems, 2015, 18:221-236.
- [21] 刘颂颂,陈葵仙,沈德才,等. 间伐对华南地区相思人工林土壤理化性质、微生物及酶活性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(2):23-29,42.
- [22] 吴流通,张智浩,解国玲,等. 元阳梯田不同植被类型土壤养分及酶活性特征[J]. 广东农业科学,2022,49(3):86-95.
- [23] 曹芹,邱新彩,刘欣,等. 不同间伐强度对华北落叶松人工林土壤养分-微生物生物量-胞外酶化学计量的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(4):83-92.
CAO Q, QIU X C, LIU X, *et al.* Effects of different thinning intensities on the C:N:P stoichiometry of soil nutrients, microbial biomass, and extracellular enzymes in *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(4):83-92. (in Chinese)
- [24] 李俊杰,韩梦豪,赵家豪,等. 间伐对马尾松人工林林下植物多

- 样性的动态影响[J]. 生态学杂志, 2022, 42(4): 788-795.
- LI J J, HAN M H, ZHAO J H, *et al.* Dynamic effects of thinning on understory plant diversity in *Pinus massoniana* plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 42(4): 788-795. (in Chinese)
- [25] 刘仁东, 鲜伟, 张文, 等. 抚育间伐强度对柳杉人工林林分生长的影响[J]. 四川林业科技, 2015, 36(5): 116-117.
- [26] 戎建涛, 张晓红, 郜爱玲, 等. 不同间伐强度经营对柳杉人工林土壤理化性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 206-211.
- RONG J T, ZHANG X H, GAO A L, *et al.* Effects of different thinning intensity managements on soil physicochemical properties of *Cryptomeria fortunei* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 206-211. (in Chinese)
- [27] 龚映匀, 王瑞辉, 张斌, 等. 抚育间伐对川西柳杉人工林生长和土壤有机碳的影响[J]. 林业资源管理, 2020(6): 96-104.
- [28] 四川省林业调查规划院. 柳杉二元立木材积表, 单木出材率表: DB51/T 1462-2012[S]. 四川: 四川省质量监督局, 2012: 2.
- [29] 国家林业和草原局. 森林土壤分析方法: 中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1210-1275-1999[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [30] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 271-319.
- [31] 宋启亮, 董希斌. 大兴安岭不同类型低质林群落稳定性的综合评价[J]. 林业科学, 2014, 50(6): 10-17.
- SONG Q L, DONG X B. Comprehensive evaluation of forest community stability of different types of low-quality forest stands in the Greater Hignnan mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(6): 10-17. (in Chinese)
- [32] 刘凯利. 川西中山柳杉人工林抚育间伐成效分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [33] 孙启越, 张卫强, 赵连清, 等. 皆伐前后油松人工林下植物多样性变化及与土壤水分的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(3): 119-129.
- SUN Q Y, ZHANG W Q, ZHAO L Q, *et al.* Variation of understory plant diversity and its relationship with soil moisture in *Pinus tabulaeformis* plantation before and after clearcutting[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(3): 119-129. (in Chinese)
- [34] 董凯丽, 张国湘, 王瑞辉, 等. 抚育间伐对湿地松人工林生长及林下植被多样性的影响[J]. 林业资源管理, 2019(4): 59-68.
- [35] 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 等. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5709-5717.
- ZHANG L H, QI J Q, LI T T, *et al.* Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng Mountain, Xinjin County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5709-5717. (in Chinese)
- [36] 颜忠鹏. 不同抚育间伐强度对桉树人工林林分及土壤性质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [37] 祁金虎, 杨会侠, 丁国泉, 等. 抚育间伐对辽东山区人工红松林土壤物理性质及持水特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(5): 48-51.
- [38] 周全, 王瑞辉, 钟呈, 等. 抚育间伐对不同龄林杉木人工林土壤理化性质和固土保水的影响研究[J]. 林业资源管理, 2019(4): 47-54.
- [39] 温晶, 张秋良, 李嘉悦, 等. 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[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 95-100, 118.
- [40] 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(3): 1-12.
- XU X L, SUN Y J, ZHOU H, *et al.* Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(3): 1-12. (in Chinese)
- [41] 柳思勉. 干扰强度对会同杉木林内环境特征的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [42] 周焘, 王传宽, 周正虎, 等. 抚育间伐对长白落叶松人工林土壤碳、氮及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1651-1658.
- [43] 党鹏, 王乃江, 王娟婷, 等. 黄土高原子午岭不同发育阶段油松人工林土壤理化性质的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 42(6): 115-121.
- DANG P, WANG N J, WANG J T, *et al.* Change of soil physical-chemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantation at different development stages in Ziwlun region of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 42(6): 115-121. (in Chinese)
- [44] 刘晴, 徐阳, 张妍, 等. 抚育间伐对辽东山区红松人工林土壤酶活性的影响[J]. 森林工程, 2021, 37(3): 67-71.
- LIU Q, XU Y, ZHANG Y, *et al.* Effects of thinning on soil enzyme activities of *Pinus koraiensis* plantation in Liaodong mountain area[J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 67-71. (in Chinese)
- [45] 王树梅, 范少辉, 官凤英, 等. 带状采伐对毛竹林土壤理化性质、酶活性及优势菌群的短期影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(1): 46-51.
- [46] 周运红, 李建亮, 王利东, 等. 间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29-37.
- ZHOU Y H, LI J L, WANG L D, *et al.* Effects of thinning on litter decomposition of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(12): 29-37. (in Chinese)
- [47] 董莉莉, 刘红民, 汪成成, 等. 间伐对蒙古栎次生林生态系统碳储量的短期和长期影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(5): 614-620.
- [48] 于世川, 张建国, 叶权平, 等. 抚育间伐对黄龙山辽东栎林分质量的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 33(3): 52-60.
- YU S C, ZHANG J G, YE Q P, *et al.* Evaluation of the effect of thinning on *Quercus wutaishanica* forest quality in Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 33(3): 52-60. (in Chinese)
- [49] 张甜. 抚育间伐对小兴安岭天然针阔混交林生态功能的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [50] 管惠文, 董希斌, 曲杭峰, 等. 抚育间伐强度对大兴安岭落叶松次生林土壤肥力的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(2): 27-33.