

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.015

采伐强度对杉阔混交人工林细根生物量及形态特征影响

巫志龙^{1,2}, 周成军^{1,2}, 周新年^{1,2*}, 刘富万¹, 陈文¹, 蓝建华¹

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福建福州 350002; 2. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福建福州 350002)

摘要: [目的] 比较杉阔混交人工林在不同采伐强度下细根生物量及形态特征的差异, 探究林木细根生长与采伐强度的关系, 以期为区域杉阔混交人工林科学经营提供基础数据和理论参考。[方法] 以闽北杉阔混交人工林为研究对象, 2011年8月实施4种不同采伐强度(按蓄积量计算分别为中度择伐34.6%、强度择伐48.6%、极强度择伐67.6%和皆伐100%)试验, 并与未采伐对照; 经自然恢复5 a后, 采用根钻法分2层(0~10、10~20 cm)获取乔木树种活细根(≤ 2 mm), 分析采伐强度对0~20 cm土层细根总生物量及形态特征的影响。[结果] 中度和强度择伐细根总生物量分别为225.31、257.96 g·m⁻², 与未采伐(219.35 g·m⁻²)差异不显著($P > 0.05$), 极强度择伐和皆伐分别比未采伐显著降低了47.0%和66.3%($P < 0.05$); 各种强度的择伐下细根比根长和比表面积与未采伐无显著差异($P > 0.05$), 皆伐比未采伐分别显著增大了41.5%和71.2%($P < 0.05$); 细根根长密度和根表面积密度随采伐强度增大而变化的规律与细根总生物量的变化规律一致, 极强度择伐比未采伐分别显著降低了51.9%和46.9%($P < 0.05$), 皆伐比未采伐分别显著降低了54.9%和49.2%($P < 0.05$)。[结论] 杉阔混交人工林不同采伐强度5 a后, 中度和强度择伐仍能维持林木细根生物量和吸收水分与养分能力, 而极强度择伐和皆伐都出现显著降低; 从有效维持和促进林木细根生长的角度, 建议类似林分适宜采伐强度不超过强度择伐。

关键词: 采伐强度; 细根生物量; 细根形态; 杉阔混交人工林

中图分类号: S718.5; S752.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)04-0128-06

在森林生态系统中, 根系是植物与土壤之间进行物质交换和能量流动的桥梁^[1-2]。林木细根(≤ 2 mm)吸收水分和养分的表面积大且生理活性强, 对保持水土、改善土壤结构、促进养分循环和碳平衡等有不可或缺的作用^[2-4], 且对气候变化有重要指示意义^[5]。细根作为林木根系中最活跃、最敏感的组成部分, 其结构与功能特征往往因外界环境条件的变化而改变, 其中, 细根生物量高低与林木生产力密切相关, 细根形态变化影响其功能发挥^[6-7]。

林木根系的研究倍受人们关注^[8], 以往有关根

系的研究主要解决自然因素对细根的影响^[6,9], 而人为采伐干扰对细根生长和分布影响的研究资料仍然十分有限, 特别是对细根形态特征研究尤为不足^[10], 研究结论也存在较大差异。Noguchi等^[11]研究表明, 10年生日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa* (Sieb. et Zucc.) Endl.)间伐3 a后(间伐强度65%), 小于1 mm细根总生物量明显降低, 但对细根形态的影响不明显; 尤健健等^[7]研究表明, 中度间伐(保留郁闭度0.7)条件下, 油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)林细根总生物量、根长密度和根表面积密度都达到最大; 张犇等^[12]研究表明, 阔叶红松林择

收稿日期: 2020-09-02 修回日期: 2021-04-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(30972359); 福建省林业厅科学基金项目(闽林科[2012]2号K8512001); 福建省教育厅A类科技项目(JA14124); 福建农林大学部级创新平台资助(ptjh13002); 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2016036)

*通讯作者: 周新年, 教授。研究方向: 森林生态采运和工程索道。E-mail: zxn0818@163.com

伐 40 a 后(择伐强度 40%), 生长季未采伐和择伐的年平均细根生物量差异不显著; 杨秀云等^[10]研究表明, 华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 间伐 10 a 后(间伐强度 20%), 细根生物量降低, 波动范围变窄。

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国南方重要的造林和用材树种, 在我国森林资源和亚热带森林生态系统中占有重要地位, 在林业生产上也有重要战略意义^[13]。我国人工林经营长期沿用传统的皆伐方式, 近年来, 人工林择伐理念才得到重视^[13-14]。探讨采伐强度对林木细根的影响程度及其影响机制, 对于推进人工林采伐经营方式由皆伐向择伐转变, 准确评估人工林采伐经营对人工林生产力和生态稳定性的影响至关重要。为此, 以闽北杉阔混交人工林为研究对象, 比较不同采伐强度 5 a 后细根生物量及形态特征差异, 旨在探究采伐强度对细根生长的影响以及适宜采伐强度, 为该区域杉阔混交人工林科学经营提供基础数据和理论参考。

1 试验概况

福建省建瓯市($117^{\circ}58' \sim 118^{\circ}57'$ E, $26^{\circ}38' \sim 27^{\circ}20'$ N), 地处闽江上游, 武夷山脉东南面、鹫峰山脉西北侧。该区气候条件为中亚热带海洋性季风气候, 年均气温 18.7℃, 年均降水量 1 733 mm, 年均蒸发量 1 450 mm, 年均相对湿度 80%, 年日照时数 1 612 h, 年均无霜期 286 d^[15]。

福建省建瓯市墩阳林业采育场 47 林班 08 大班 40 小班, 属山地丘陵地形, 海拔 250~350 m, 土壤为山地黄红壤; 小班面积为 8.4 hm², 造林密

度为 3 300 株·hm⁻², 造林树种为杉木和木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.), 株数比例为 1:1.53。于 2011 年 7 月建立杉阔混交人工林择伐与更新长期跟踪试验基地, 试验林为 18 年生杉阔混交人工林, 林分和立地条件基本一致^[15-16]。按胸高断面积计算树种组成为 51.88% 阔叶树、46.78% 杉木、1.34% 马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.); 主要灌木有櫟木 (*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliv.)、黄瑞木 (*Adinandra millettii* (Hook. et Arn.) Benth. et Hook. f. ex Hance)、三花冬青 (*Ilex triflora* Bl.)、尖连蕊茶 (*Camellia cuspidata* (Kochs) Wright ex Gard.) 和山樱花 (*Cerasus serrulata* (Lindl.) G. Don ex London) 等; 主要草本有细齿叶柃 (*Eurya nitida* Korthals)、五节芒 (*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.)、狗脊 (*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)、芒萁 (*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.) 和淡竹叶 (*Lophatherum gracile* Brongn.) 等。

因为该试验林 2011 年 8 月前从未间伐, 林分密度过大, 为使择伐后释放充足的林分生长空间, 所以没设置弱度择伐。于 2011 年 8 月实施中度择伐 (MI)、强度择伐 (HI)、极强度择伐 (EHI) 和皆伐 (CC), 蓄积量择伐强度分别为 34.6%、48.6%、67.6%、100%, 断面积择伐强度分别为 35.9%、50.1%、74.8%、100%, 并以未采伐 (NC) 为对照。各种采伐强度试验样地面积为 800 m²(在上、下坡位各设 1 块 20 m × 20 m 标准样地, 每块样地四角用水泥桩长期固定), 试验林采伐后均保持自然恢复^[16]。采伐 5 a 后于 2016 年 7 月进行了复查, 试验林地林分和土壤概况见表 1。

表 1 不同采伐强度 5 a 后试验林地概况

Table 1 Geophysical characteristics of the experimental forestland under different harvesting intensities after 5 years

采伐强度 Harvesting intensity	坡度 Slope gradient/(°)		坡向 Slope aspect		林分因子 Forest factors			土壤理化性质 Soil physical and chemical properties				
	上坡 Top	下坡 Bottom	上坡 Top	下坡 Bottom	胸径 DBH/ cm	树高 Height/ m	密度 Density/ (株·hm ⁻²)	温度 Temperature/ ℃	湿度 Moisture/ %	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全N Total N/ (g·kg ⁻¹)	全P Total P/ (g·kg ⁻¹)
NC	31	32	W	S	12.7	12.0	3 213	18.52	30.67	34.20	1.07	0.18
MI	32	32	W	S	14.8	13.2	1 638	19.50	31.01	35.31	0.99	0.22
HI	31	31	SW	S	13.5	12.2	1 717	20.52	29.46	35.11	0.75	0.15
EHI	32	29	SW	SW	12.9	11.0	1 313	21.33	28.50	34.77	0.85	0.12
CC	29	30	SW	SW	—	—	—	23.18	26.69	21.65	0.41	0.05

注: NC: 未采伐; MI: 中度择伐; HI: 强度择伐; EHI: 极强度择伐; CC: 皆伐。S: 南; W: 西; SW: 西南。下同。

Notes: NC: Non-cutting; MI: Selective harvesting at medium intensity; HI: Selective harvesting at high intensity; EHI: Selective harvesting at extra-high intensity; CC: Clear-cut harvesting. S: South; W: Western; SW: Southwest. The same below.

2 研究方法

在每块标准样地中央，沿等高线划分上方、中间、下方位置，各随机选取1个细根取样点。取样根钻规格为内径10 cm，高度10 cm；取样深度为土壤表层0~20 cm(按0~10、10~20 cm分2层取土柱)，取样前先清除土表凋落物。将每种采伐强度样地相同取样位置的同一土层的土柱混合在一起，获得3个混合样品，装入塑料袋并编号。所取土样当天带回实验室，立即用清水浸泡，反复淘洗，过40目筛网；将洗净后的根放入大培养皿，根据细根的颜色、外形、弹性、根皮与中柱分离难易程度鉴别^[10]，仔细挑出乔木层树种(主要是杉木和木荷)≤2 mm的活细根。运用WinRHIZO(Pro 2009c)根系图像分析系统，对分离出的活细根测定长度、直径、表面积和体积等基本数据；然后，将细根样品放入烘箱，80℃烘干至恒质量，用电子天平称量细根干质量(精度为0.001 g)。细根生物量及形态特征计算方法参考文献[7]。分别于2016年10月和2017年1、4、7月在试验样地进行了4

次细根取样，每次取样和实验室处理方法均相同。

运用Microsoft Excel 2007进行数据初步整理和计算，运用SPSS 19.0数据分析软件，对不同采伐强度下细根总生物量和形态特征进行单因素方差分析(One way ANOVA)^[7]，并结合最小显著性差异法(LSD)检验比较参数间差异性($P < 0.05$)。

3 结果与分析

3.1 细根生物量变化

表2表明：在0~10 cm土层中，随着采伐强度的增大，细根生物量呈先增大后减小的变化规律，中度择伐最大($175.40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)，皆伐最小($45.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)；在10~20 cm土层中，细根生物量随采伐强度增大呈波动变化，中度择伐降低，强度择伐最大($116.64 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)，极强度择伐和皆伐呈明显下降趋势；各种采伐强度下，细根生物量表现为0~10 cm土层高于10~20 cm土层；中度和强度择伐0~20 cm土层细根总生物量略有增大，但均与未采伐差异不显著($P > 0.05$)，极强度择伐和皆伐显著降低($P < 0.05$)，分别比未采伐降低了47.0%和66.3%。

表2 不同采伐强度5 a后细根生物量变化

Table 2 The change of fine root biomass under different harvesting intensities after 5 years

$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$

土层 Soil layer/cm	采伐强度 Harvesting intensity				
	NC	MI	HI	EHI	CC
0~10	141.66 ± 10.64	175.40 ± 19.35	141.32 ± 9.80	92.17 ± 16.79	45.51 ± 16.16
10~20	77.69 ± 10.66	49.91 ± 4.84	116.64 ± 25.33	24.07 ± 5.18	28.37 ± 6.06
0~20	$219.35 \pm 19.39 \text{ a}$	$225.31 \pm 23.44 \text{ a}$	$257.96 \pm 22.20 \text{ a}$	$116.24 \pm 21.10 \text{ b}$	$73.88 \pm 21.15 \text{ b}$

注：均值±标准误；同一行不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Notes: Mean ± S.E. Different letters of same row indicated significant difference ($P < 0.05$). The same below.

3.2 细根形态特征变化

由表3可知：在0~10 cm土层中，随着采伐强度增大，细根比根长和比表面积均呈先减小后增大的变化趋势，强度择伐最小，皆伐最大；根长密度和根表面积密度随采伐强度的增大均呈先增大后减小的变化趋势，中度择伐最大，皆伐最小。在10~20 cm土层中，细根比根长和比表面积随采伐强度的增大而变化的规律与0~10 cm土层的变化规律相似；根长密度和根表面积密度随采伐强度的增大呈波动变化，规律性不甚明显，其中，极强度择伐和皆伐均明显减小。

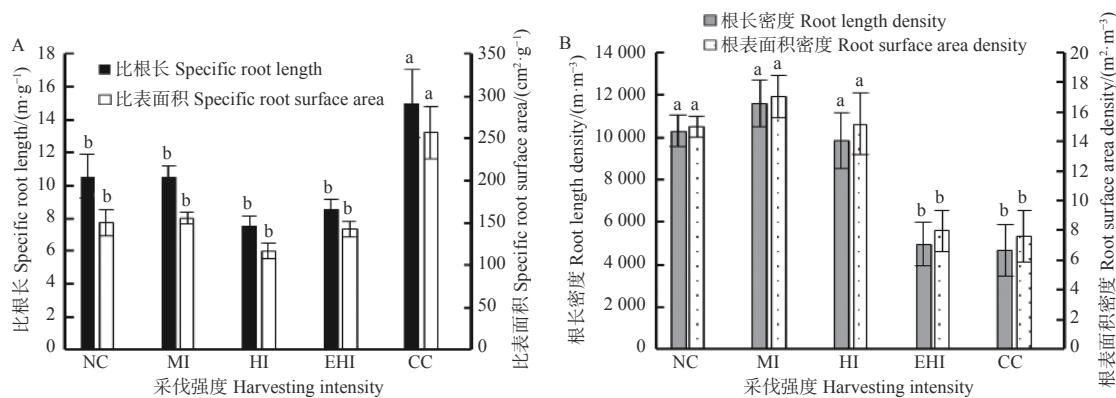
在0~20 cm土层中，细根比根长和比表面积

(图1A)多重比较结果表明：二者随采伐强度的变化规律相似，均表现为各种强度的择伐都与未采伐差异不显著($P > 0.05$)，但皆伐显著大于未采伐($P < 0.05$)，皆伐细根比根长和细根比表面积分别比未采伐提高了41.5%和71.2%；根长密度和根表面积密度(图1B)多重比较结果表明：二者随采伐强度的变化规律相似，均表现为中度和强度择伐均与未采伐差异不显著($P > 0.05$)，但极强度择伐和皆伐均显著降低($P < 0.05$)，极强度择伐根长密度和根表面积密度分别比未采伐降低了51.9%和46.9%，皆伐根长密度和根表面积密度分别比未采伐降低了54.9%和49.2%。

表3 不同采伐强度5 a后细根形态特征变化

Table 3 The change of fine root morphological characteristic under different harvesting intensities after 5 years

土层 Soil Layer/ cm	采伐强度 Harvesting intensity	细根形态特征 Fine root morphological characteristic			
		比根长 Specific root length/ (m·g ⁻¹)	比表面积 Specific root surface area/ (cm ² ·g ⁻¹)	根长密度 Root length density/ (m·m ⁻³)	根表面积密度 Root surface area density/ (m ² ·m ⁻³)
0~10	NC	11.15 ± 1.34	154.29 ± 15.67	14 474.90 ± 1 396.24	20.24 ± 1.53
	MI	10.84 ± 0.58	155.14 ± 7.01	18 629.82 ± 1 841.71	26.59 ± 2.63
	HI	7.82 ± 0.65	123.72 ± 12.90	10 528.82 ± 515.24	16.38 ± 0.86
	EHI	8.31 ± 0.57	135.25 ± 8.07	7 341.33 ± 1 321.97	11.60 ± 1.82
	CC	17.14 ± 2.09	273.26 ± 29.56	6 626.72 ± 2 058.15	10.11 ± 2.92
10~20	NC	10.48 ± 1.97	156.12 ± 23.07	6 141.37 ± 199.10	9.73 ± 0.22
	MI	9.34 ± 1.11	158.95 ± 15.33	4 566.11 ± 765.31	7.50 ± 0.89
	HI	8.10 ± 0.96	127.11 ± 13.69	9 146.54 ± 2 453.84	13.96 ± 3.49
	EHI	10.94 ± 1.23	192.47 ± 16.86	2 581.45 ± 711.69	4.33 ± 1.04
	CC	12.04 ± 1.72	236.51 ± 33.24	2 674.24 ± 441.28	5.13 ± 0.73



注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图1 不同采伐强度5 a后细根形态特征差异(0~20 cm 土层)

Fig. 1 The difference of fine root morphological characteristic under different harvesting intensities after 5 years (0~20 cm soil layer)

4 讨论

森林采伐后林地生态环境条件变化, 促使细根生物量组成和分布也随之改变^[17]。一方面采伐后出现大量细根死亡和分解, 细根生物量降低^[18]; 另一方面采伐后林冠层面积减少, 光辐射增强, 淀落物分解加快归还养分, 以及保留木生长, 细根生物量将随着时间的推移得以逐渐恢复^[10,12]。细根生物量与土壤养分、水分、温度等环境条件密切相关^[19], 而细根生产主要受养分条件的控制^[20]。以往相关研究表明, 其结果存在较大差异, 主要有采伐干扰使细根生物量增加^[21,22]、降低^[10-11,23,24]、随间伐强度的增大呈先增大后降低^[7]、随间伐强度的增加而减少^[18]以及采伐后细根总生物量降低但与未采伐差

异不显著^[25]等, 造成研究结果存在差异主要与试验林分类型和立地条件差异以及不同采伐强度和恢复时间等有关。本研究表明, 杉阔混交人工林中度和强度择伐在一定程度上促进了林木细根生物量增长但与未采伐差异不显著, 极强度择伐和皆伐使林木细根生物量显著降低。分析其原因可能是适度择伐(中度和强度)调整了林分密度, 并未对林地造成严重破坏和水土流失, 反而有利于改善林地光照、水热和养分条件^[12,15], 保留木光合作用效率提高, 使林木光合产物更多地分配到地下根系, 有效弥补了林分密度减小所引起的细根死亡; 在极强度择伐和皆伐下, 易引起林地光照、水热和养分等环境条件激烈变化^[15-16], 林分密度和林冠面积锐减,

林木地上光合有效面积减少^[10],造成林木细根生物量显著减少。

随着环境条件的变化,植物细根形态特征发生改变,以提高其对外部环境变化的适应性和竞争能力^[1]。植物细根营养吸收效率可由比根长和比表面积来衡量^[25],土壤养分缺乏的条件下,根系比根长会增加^[26]。本研究表明,杉阔混交人工林细根比根长和比表面积都表现为各种强度择伐均与未采伐无显著差异,皆伐显著增大。这可能是因为杉阔混交人工林皆伐后水土流失严重,土壤养分比较匮乏(表1),伐根萌芽更新幼树幼苗通过增加细根比根长和比表面积来提高养分吸收效率,反映了更新幼树幼苗对土壤养分减少的适应和调节机制。植物细根吸收水分和养分的能力可由根长密度和根表面积密度来评价^[7]。本研究表明,杉阔混交人工林细根根表面积密度随采伐强度变化的规律与根长密度的变化规律一致,都表现为中度和强度择伐均与未采伐无显著差异,极强度择伐和皆伐都显著减小,这与尤健健等^[7]研究结果相似。极强度择伐和皆伐显著降低了细根对水分和养分的吸收能力,是细根生物量降低的反映。

本研究因受条件限制,杉阔混交人工林不同采伐强度5 a后尚属于短期,仅分析了乔木树种表层(0~20 cm)活细根生物量和形态特征差异,未涉及单株林木细根、林下植被细根以及死细根等。森林择伐是森林经营的重要途径,未来应对杉阔混交人工林择伐与更新长期试验基地持续跟踪调查,加强对不同强度采伐后林地植被、凋落物和土壤主要生态环境因子恢复动态,细根生物量、寿命、形态和分解速率动态变化以及细根生长与植被、凋落物和土壤主要生态环境因子恢复之间的相互关系等的长期深入研究。

5 结论

杉阔混交人工林不同采伐强度5 a后,对0~20 cm土层乔木树种活细根,中度和强度择伐细根总生物量略增大但与未采伐差异不显著($P > 0.05$),细根比根长、比表面积、根长密度和根表面积密度均与未采伐差异不显著($P > 0.05$),表明中度和强度择伐有利于促进林木细根生长,能维持细根生物量和吸收水分与养分能力;极强度择伐和皆伐下林木细根总生物量、根长密度和根表面积密度都显著低于未采伐($P < 0.05$),表明极强度择伐和皆伐不利于林木细根生长,降低了细根生物量和吸

收水分与养分能力,短期尚难以恢复。因此,从有效维持和促进林木细根生长的角度出发,建议类似林分适宜采伐强度不超过强度择伐。

参考文献:

- [1] 王政权,郭大立.根系生态学[J].植物生态学报,2008,32(6):1213-1216.
- [2] Santantonio D, Grace J C. Estimating fine-root production turnover from biomass and decomposition data: a compartment flow model[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(5): 900-908.
- [3] Philpott T J, Barker J S, Prescott C E, et al. Retention trees slow post-harvest fine-root decomposition in a coastal temperate rainforest[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 430: 431-444.
- [4] 肖海龙,盛茂银.陆地森林植被植物细根对全球气候变化的响应研究进展[J].生态科学,2020,39(2): 199-206.
- [5] Valverde-Barrantes O J, Freschet G T, Roumet C, et al. A worldview of root traits: the influence of ancestry, growth form, climate and mycorrhizal association on the functional trait variation of fine-root tissues in seed plants[J]. New Phytologist, 2017, 215(4): 1562-1573.
- [6] 张 咪,刘永峰,贾艳梅,等.黄土高原刺槐细根形态特征和生物量研究[J].西北林学院学报,2019,34(2): 22-27.
- [7] 尤健健,张文辉,邓 磊,等.间伐对黄龙山油松中龄林细根空间分布和形态特征的影响[J].生态学报,2017,37(9): 3065-3073.
- [8] 王明凯,李文彬,文 剑.基于探地雷达对粗根的识别技术研究[J].森林工程,2020,36(3): 21-27.
- [9] 张小全.环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响[J].林业科学研究,2001,14(5): 566-573.
- [10] 杨秀云,韩有志,张芸香,等.采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响[J].生态学报,2012,32(1): 64-73.
- [11] Noguchi K, Han Q M, Araki M G, et al. Fine-root dynamics in a young hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) stand for 3 years following thinning[J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(4): 284-291.
- [12] 张 薜,金光泽.择伐对阔叶红松林细根生物量及其时空分布的影响[J].林业科学研究,2014,27(2): 240-245.
- [13] 周新年.山地森林生态采运理论与实践[M].北京:中国林业出版社,2018: 1-25.
- [14] 周新年,赖阿红,周成军,等.山地森林生态采运研究进展[J].森林与环境学报,2015,35(2): 185-192.
- [15] 巫志龙,周成军,周新年,等.杉阔混交林不同强度择伐对土壤温度的影响[J].森林与环境学报,2015,35(1): 8-12.
- [16] 巫志龙,周成军,周新年,等.不同强度采伐5年后杉阔混交人工林土壤呼吸速率差异[J].林业科学,2019,55(6): 142-149.
- [17] Tian D L, Peng Y Y, Yan W D, et al. Effects of thinning and litter fall removal on fine root production and soil organic carbon content in Masson pine plantations[J]. Pedosphere, 2010, 20(4): 486-493.
- [18] 刘运科,范 川,李贤伟,等.间伐对川西亚高山粗枝云杉人工林细根生物量及碳储量的影响[J].植物生态学报,2012,36(7): 645-654.
- [19] 张小全,吴可红.森林细根生产和周转研究[J].林业科学,2001,37(3): 126-138.
- [20] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species[J]. Plant and Soil, 1996, 187(2): 159-219.
- [21] Berish C W, Ewel J J. Root development in simple and complex tropical successional ecosystems[J]. Plant and Soil, 1988, 106(1): 73-84.
- [22] López B C, Sabate S, Gracia C A. Thinning effects on carbon alloca-

- tion to fine roots in a *Quercus ilex* forest[J]. Tree Physiology, 2003, 23(17): 1217-1224.
- [23] Leuschner C, Hartevel M, Hertel D. Consequences of increasing forest use intensity for biomass, morphology and growth of fine roots in a tropical moist forest on Sulawesi, Indonesia[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009, 129(4): 474-481.
- [24] Kramer-Walter K R, Bellingham P J, Millar T R, et al. Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum[J]. Journal of Ecology, 2016, 104(5): 1299-1310.
- [25] 绍 森. 择伐对太岳山油松林表层细根生物量和土壤养分含量的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2017, 46 (6): 654-658.
- [26] Hill J O, Simpson R J, Moore A D, et al. Morphology and response of roots of pasture species to phosphorus and nitrogen nutrition[J]. Plant and Soil, 2006, 286(1-2): 7-19.

Effects of Harvesting Intensity on Fine Root Biomass and Morphological Characteristics of Mixed Plantations of *Cunninghamia lanceolata* and Broadleaved Trees

WU Zhi-long^{1,2}, ZHOU Cheng-jun^{1,2}, ZHOU Xin-nian^{1,2}, LIU Fu-wan¹, CHEN Wen¹, LAN Jian-hua¹

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center of National Forestry and

Grassland Administration, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: [Objective] To compare the differences in fine root biomass and morphological characteristics of mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees under different harvesting intensities, reveal the relationship between fine root growth and harvesting intensity, and provide basic data and theoretical references for the management of regional mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees. [Method] A mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees in northern Fujian Province in China was used as the research object. Selective harvesting at medium intensity (34.6% removal of growing stock volume), high intensity (48.6%), at extra-high intensity (67.6%), and clear-cut harvesting (100%) were conducted and non-cutting as the control in August 2011. After 5 years of natural recovery, the basic data of biomass and morphological characteristics of living fine root (≤ 2 mm) of tree species were collected from two soil depths (0-10 cm and 10-20 cm) via root drilling methods. The influence of harvesting intensity on the total biomass and morphological characteristics of fine root in the 0-20 cm soil layer was analyzed. [Result] For the total fine root biomass, non-cutting, selective harvesting at medium and high intensities were 219.35, 225.31 and 257.96 g·m⁻², there was no significant difference among them ($P > 0.05$). But the total fine root biomass under selective harvesting at extra-high intensity and clear-cut harvesting were significantly reduced by 47.0% and 66.3% respectively compared with non-cutting ($P < 0.05$). For the specific root length and specific root surface area, there was no significant difference between selective harvesting at various intensities and non-cutting ($P > 0.05$). The specific root length and specific root surface area under clear-cut harvesting were significantly increased by 41.5% and 71.2% respectively compared with non-cutting ($P < 0.05$). The changes of root length density and root surface area density with harvesting intensity increasing were consistent with their change of total fine root biomass. The root length density and root surface area density under selective harvesting at extra-high intensity were significantly reduced by 51.9% and 46.9% respectively compared with non-cutting ($P < 0.05$). The root length density and root surface area density under clear-cut harvesting were significantly reduced by 54.9% and 49.2% respectively compared with non-cutting ($P < 0.05$). [Conclusion] 5 years after harvesting, the fine root biomass and the ability to absorb water and nutrients of the mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees can be maintained under selective harvesting at medium and high intensities, but will be significantly reduced under selective harvesting at extra-high intensity and clear-cut harvesting. From the perspective of effectively maintaining and promoting the growth of fine roots of forest trees, it is recommended that suitable harvesting intensity of similar forests should not exceed the selective harvesting at high intensity.

Keywords: harvesting intensity; fine root biomass; fine root morphology; mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaved trees