

间伐强度对萌生杉木林土壤有机碳及其活性组分的影响

叶建丰¹, 陈炎根², 张华峰³, 刘波², 李珍³, 应彬彬⁴, 饶盈¹

(1. 杭州市临安区天目山林场, 浙江 杭州 311311; 2. 杭州市临安区农业农村局, 浙江 杭州 311300; 3. 杭州市临安区农林技术推广中心, 浙江 杭州 311300; 4. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要:以杭州市临安区的林龄 12 年的二代萌生杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林为研究对象, 于 2017 年 12 月进行中度间伐 (50%) 和重度间伐 (70%), 2018 年和 2019 年连续观测 2 年, 通过对中度间伐、重度间伐和不间伐的土壤有机碳的对比, 探究高强度间伐对萌生杉木林土壤有机碳和土壤活性有机碳 (土壤微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳) 的影响及其季节性动态变化规律。结果表明: (1) 高强度间伐通过增加土壤碳源、改变土壤微环境的方式增加了土壤有机碳及其活性组分; (2) 土壤有机碳的季节性变化并不明显, 但三种土壤有机碳活性组分均有明显的季节性变化, 且不受间伐影响。因此, 从增加林分土壤碳库的角度出发, 建议对林分密度过大的萌生杉木林采取重度间伐。

关键词: 间伐; 萌生杉木林; 土壤有机碳; 土壤活性有机碳; 影响; 变化规律

中图分类号: S718.51 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2021)05-0022-06

Effects of Thinning Intensity on Soil Organic Carbon and Labile Components in Sprout *Cunninghamia lanceolata* Plantation

YE Jian-feng¹, CHEN Yan-gen², ZHANG Hua-feng³, LIU Bo², LI Zhen³, YING Bin-bin⁴, RAO Ying¹

(1. Lin'an Tianmu Mountain Forest Farm of Zhejiang, Hangzhou 311311, China; 2. Lin'an Agricultural and Rural Bureau of Zhejiang, Hangzhou 311300, China; 3. Lin'an Agricultural and Forestry Extension Center of Zhejiang, Hangzhou 311300, China; 4. College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: In December 2017, experiment of thinning intensity of 50% and 70% was implemented on sprout 12-year *Cunninghamia lanceolata* plantation in Lin'an, Zhejiang province. Continuous observation was carried out on soil organic carbon and labile components of the experimented stand in 2018 and 2019. The result shows high-intensity thinning increased soil organic carbon and its active components (soil microbial biomass carbon, water-soluble organic carbon and readily oxidizable organic carbon) by increasing soil carbon sources and changing the soil microenvironment. The seasonal changes of soil organic carbon were not obvious, but the three labile soil organic carbon components obvious, which were not affected by thinning.

Key words: thinning; sprout *Cunninghamia lanceolata* plantation; soil organic carbon; soil labile organic carbon; effect; change rule

森林在区域和全球碳循环中发挥着重要作用, 受到广泛关注^[1]。森林土壤碳库是整个森林生态系统碳库的重要组成部分, 约占 44%^[2]。土壤碳库可分为土壤有机碳库和土壤无机碳库两部分, 而土壤有机碳库储量大、更新周期相对较短, 导致其重要性远超土壤无机碳库^[3]。土壤活性有机碳是土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC)

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-07-20

作者简介: 叶建丰, 工程师, 从事森林培育工作; E-mail:627703394@qq.com。通信作者: 饶盈, 工程师, 从事森林培育工作; E-mail:tmslc_ry@163.com。

中的一部分, 具有易移动、易分解、易氧化和易矿化等特性^[4], 在土壤碳循环中十分活跃。土壤微生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC)、水溶性有机碳 (Water-soluble organic carbon, WSOC) 和易氧化有机碳 (Readily oxidizable carbon, ROC) 是土壤活性有机碳的不同表现形式, 即根据不同的测定方法的分类结果。其中, MBC 是有机物转化和循环的媒介, 也是植物养分的汇/源^[5]; WSOC 能直接被土壤微生物利用, 主要来源于土壤有机质的水解和微生物的代谢^[6]; ROC 是土壤有机碳中最易被氧化分解的部分, 对环境因子极其敏感^[7]。因此, 越来越多的研究者建议将土壤活性有机碳作为评估土壤肥力和质量的参考指标^[8-10]。

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是我国南方优良的造林树种, 生长快且耐贫瘠, 在南方山区占比较大, 为木材生产和区域生态保护起到了重要作用^[11]。间伐是森林经营活动中常见的手段之一, 随着林分密度的降低, 林分尺度上剩余林木的凋落物产量随之降低, 并使得更多的光照和雨水到达土壤表面, 改变土壤微环境, 从而显著影响土壤碳库^[12]。但是, 目前的研究主要集中在间伐后短期内对土壤有机碳及其活性组分的影响^[13-15], 以及间伐对土壤养分和肥力的影响^[16], 而对于间伐可能影响土壤碳库的季节性动态的研究较少。

本研究通过萌生杉木林不同间伐强度与不间伐的对比, 探究高强度间伐对萌生杉木林土壤有机碳及其活性组分的影响, 并阐明土壤有机碳的季节性动态变化规律, 以期为森林土壤碳库的研究提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市临安区於潜镇泗洲村 (30°14' N, 119°24' E), 属亚热带季风气候, 年均气温为 18.4℃, 年均降水量为 1 455 mm。实验林所在山地海拔在 40 ~ 100 m, 坡度在 26.3 ~ 27.3°。土壤较为贫瘠, 平均土层厚度仅为 15 cm, 属砂质壤土, 呈弱酸性。

研究对象为林龄 12 年的二代萌生杉木林 (2006 年, 原杉木林分被火烧殆尽后萌生, 至 2017 年底, 期间没有任何经营活动)。林分密度过大, 致使林下较为干净, 仅有少量草本植被, 如芒 *Miscanthus sinensis* 和蕨 *Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*。

1.2 样地设置与调查

实验林林分密度为 4 000 ~ 4 433 株·hm⁻², 设置中度间伐 (MT, 50%) 和重度间伐 (HT, 70%) 及不间伐 (CK, 0%) 3 种处理, 间伐强度为间伐掉的杉木材积占原林分蓄积的比例, 间伐剩余物留在原地。2017 年 11 月, 随机、均匀地布置了 9 个 20 m × 20 m 的标准样地, 以满足两种处理及 CK, 各 3 次重复。不同样地间留有宽约 5 m 不作业的缓冲区。在处理组的样地内, 定株作业后进行带状间伐, 并在 2017 年 12 月完成间伐。间伐前后均进行样地每木检尺。样地基本情况见表 1。

表 1 2017 年实验林的林分基本情况
Table 1 Stand traits for experiment before and after thinning in 2017

特征	CK	MT		HT	
		间伐前	间伐后	间伐前	间伐后
林分密度/(株·hm ⁻²)	4 167 ± 125	4 000 ± 82	1 683 ± 24	4 433 ± 120	1 133 ± 51
林分平均胸径/cm	7.8 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.8 ± 0.2	7.1 ± 0.1	7.4 ± 0.2
林分平均高/m	5.0 ± 0.2	5.1 ± 0.1	5.2 ± 0.2	4.4 ± 0.2	4.6 ± 0.3
单位断面积/(m ² ·hm ⁻²)	19.8 ± 0.7	17.2 ± 0.8	8.0 ± 0.2	17.5 ± 1.1	4.9 ± 0.5
单位蓄积/(m ³ ·hm ⁻²)	67.9 ± 2.6	59.6 ± 4.0	28.1 ± 1.7	54.1 ± 0.4	15.7 ± 0.6
间伐强度/%	0		53 ± 1		71 ± 1
坡度/(°)	26.3 ± 0.7		26.6 ± 0.5		27.3 ± 0.6
坡向	正南、东南		正南		正南、西南

注: 间伐强度为间伐掉的杉木材积占原林分蓄积的比例。

1.3 土样采集

由于研究区域的土壤厚度较薄, 约为 15 cm (部分区域仅 5 cm), 因此, 土壤样品仅在表层 (0 ~ 10 cm)

采集且不分层。每种处理间伐后连续 2 年（2018—2019 年）每季度（2、4、7、10 月）在各样地内随机、均匀地选择 3 处采样点，清除每个采样点地表的凋落物、腐殖质与较大的石砾，然后各采集一份土样，将 3 份土样充分混合以获得一个复合土样。将采集的复合土样带回实验室，挑出其中的植物根系，过 10 目筛，得到待测土样。将待测土样分成 2 份，一份保存于 4℃ 冰箱内（保存时间 ≤ 72 h），用于测定 MBC 含量、WSOC 含量和土壤含水量（ M_s ）；另一份自然风干并过 100 目筛后保存于室内阴凉干燥处（长期保存），用于测定 SOC 和 ROC 含量。

1.4 测定方法

M_s 通过烘干法测定^[17]。SOC 含量通过重铬酸钾-浓硫酸消煮法测定^[18]。MBC 含量通过氯仿熏蒸提取法测定^[19]。WSOC 含量通过水浸提法测定^[20]。ROC 含量通过高锰酸钾氧化法测定^[21]。

1.5 数据处理

本研究通过重复观测方差分析(RM-ANOVA)研究间伐强度对 SOC 及其活性组分(MBC、WSOC、ROC)和土壤环境因子(M_s)的影响。针对各季节内处理对各类碳组分的影响,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较法进行显著性分析。通过 Pearson 检验法分析土壤各因子间的相关性。

所有统计分析均使用 IBM SPSS 20.0, 显著性为 $P < 0.05$ 。制图在 Origin Pro 2018 内进行。

2 结果与分析

2.1 间伐对杉木林 SOC 含量的影响

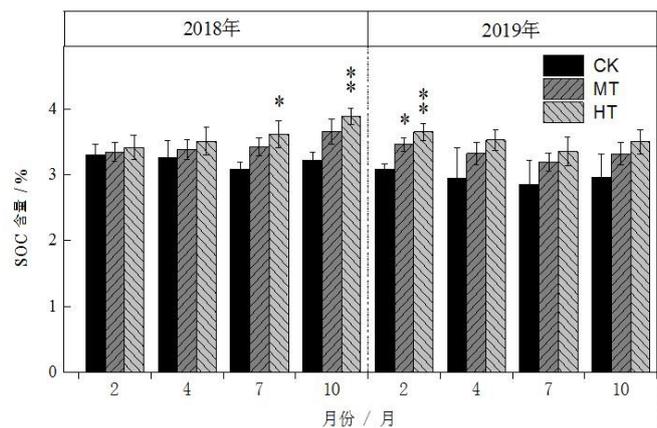
由图 1 可知, 2018 年, MT 和 HT 处理的萌生杉木林的平均 SOC 含量相较于 CK 的分别增加了 6.9% 和 9.5%; 2019 年, MT 和 HT 处理的平均 SOC 含量相较于 CK 的分别增加了 15.5% 和 16.9%。SOC 含量的季节性变化并不明显。

根据重复观测方差分析结果(表 2), 萌生杉木林的 SOC 含量仅在间伐后第一年与间伐强度显著相关($P < 0.05$), 而与季节、间伐强度与季节的交互作用没有明显的相关性。

2.2 间伐对杉木林 MBC 含量的影响

由图 2 可知, 2018 年, MT 和 HT 处理的萌生杉木林的平均 MBC 含量相较于 CK 的分别增加了 18.6% 和 31.2%; 2019 年, MT 和 HT 处理的平均 MBC 含量相较于 CK 的分别增加了 52.5% 和 58.2%。MBC 含量具有较为明显的季节性变化: 各处理组的 MBC 含量在间伐后第一年均呈现出先增加(冬季至春季)后减小(春季至夏季)再增加(夏季至秋季)的规律, 且在间伐后第二年延续了这一规律。

根据重复观测方差分析结果(表 2), 萌生杉木林的 MBC 含量与间伐强度和季节在间伐后两年内均极显著相关($P < 0.01$), 而与间伐强度和季节的交互作用没有明显相关性。



注: *和**分别代表相同月份间伐处理与 CK 间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$), 下同。

图 1 间伐后杉木林 SOC 含量的动态变化

Figure 1 Effect of thinning on soil organic carbon

表 2 重复观测方差分析结果
Table 2 The result of repeated measures ANOVA

因素	SOC	MBC	WSOC	ROC	M_s
2018 年					
T	0.029*	0.005**	0.020*	0.009**	0.084**
S	0.282	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***
T×S	0.244	0.153	0.267	0.001***	0.051
2019 年					
T	0.128	0.006**	0.004**	<0.001***	0.083
S	0.193	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***
T×S	0.898	0.430	0.482	0.003**	0.300

注: T为间伐强度; S为季节; T×S为间伐强度与季节的相互作用; *表示显著相关, $P < 0.05$; **表示极显著相关, $P < 0.01$; ***表示极其显著相关, $P < 0.001$ 。

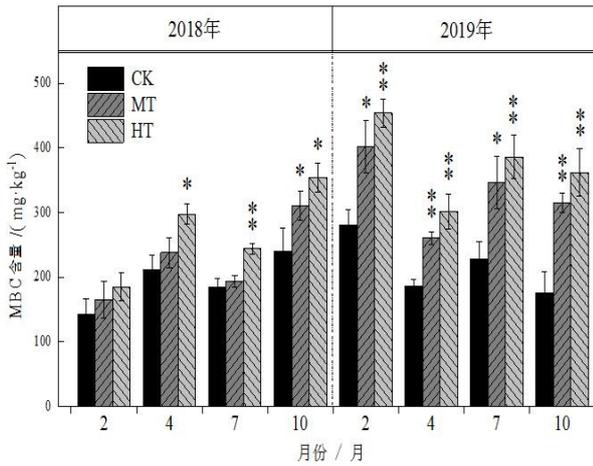


图 2 间伐后杉木林 MBC 含量的动态变化

Figure 2 Effect of thinning on soil microbial biomass carbon

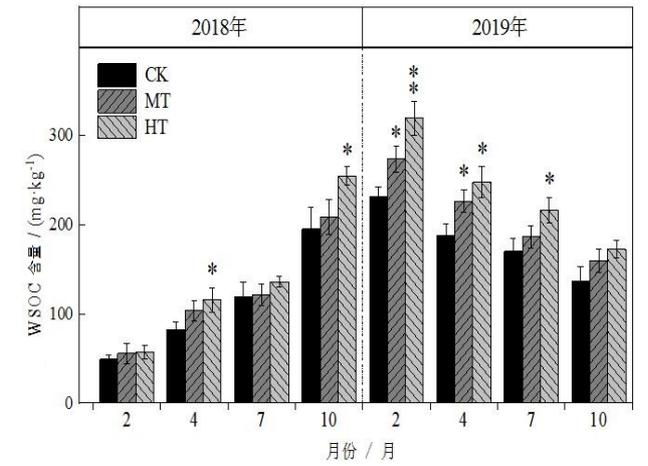


图 3 间伐后杉木林 WSOC 含量的动态变化

Figure 3 Effect of thinning on soil water-soluble organic carbon

2.3 间伐对杉木林 WSOC 含量的影响

由图 3 可知, 萌生杉木林的 WSOC 含量具有明显的季节性变化, 在间伐初期, WSOC 含量随着时间的增加而增加, 且在间伐后第二年的冬季达到峰值后逐渐降低。2018 年, MT 和 HT 处理的平均 WSOC 含量相较于 CK 的分别增加了 9.6% 和 22.4%; 2019 年, MT 和 HT 处理的平均 WSOC 含量相较于 CK 的分别增加了 16.3% 和 31.7%。WSOC 含量的整体变化规律表现为 HT(57.52 ~ 319.59 mg·kg⁻¹) > MT(55.90 ~ 273.88 mg·kg⁻¹) > CK(49.06 ~ 231.71 mg·kg⁻¹) (图 3)。

根据重复观测方差分析结果 (表 2), 萌生杉木林的 WSOC 含量与间伐强度和季节在间伐后两年内均显著相关 (*P* < 0.05), 而与间伐强度和季节的交互作用没有明显相关性。

2.4 间伐对杉木林 ROC 含量的影响

由图 4 可知, 萌生杉木林的 ROC 含量具有明显的季节性变化, 在每年夏季达到峰值, 在冬季达到谷值。2018 年, MT 和 HT 处理的平均 ROC 含量相较于 CK 的分别增加了 16.3% 和 20.0%; 2019 年, MT 和 HT 处理的平均 ROC 含量相较于 CK 的分别增加了 27.1% 和 35.0%。ROC 含量的整体变化规律表现为重度间伐 (3.92 ~ 23.45 g·kg⁻¹) > 中度间伐 (3.76 ~ 18.60 g·kg⁻¹) > 不间伐 (3.48 ~ 16.73 g·kg⁻¹)。

根据重复观测方差分析结果 (表 2), 萌生杉木林的 ROC 含量与间伐强度、季节和间伐强度与季节的交互作用在间伐后两年内均显著相关 (*P* < 0.05)。

2.5 土壤相关因子分析

从土壤各因子的相关性分析结果来看 (表 3), M_s 与 MBC、WSOC 和 ROC 含量均显著相关 (*P* < 0.05), 而与 SOC 含量无明显相关性; SOC 含量与 MBC 含量显著相关 (*P* < 0.05), 而与 WSOC 含量和 ROC 含量无明显相关性; MBC 含量与 WSOC 含

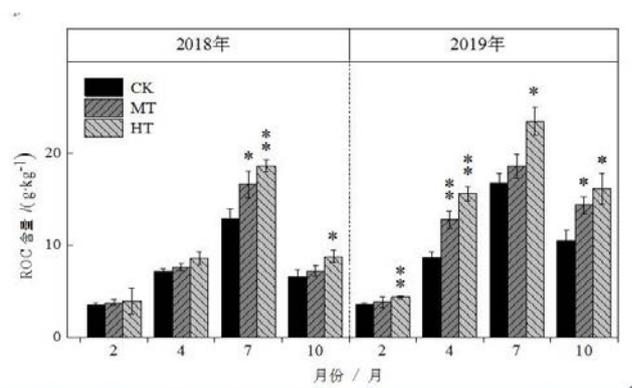


图 4 间伐后杉木林 ROC 含量的动态变化

Figure 4 Effect of thinning on soil readily oxidizable organic carbon

表 3 土壤各因子相关性分析
Table 3 Correlation analysis on soil factors

因子	SOC	MBC	WSOC	ROC
M _s	0.120	0.549*	0.573*	0.874**
SOC		0.511*	0.256	0.074
MBC			0.794**	0.186
WSOC				0.107

量极显著相关 ($P < 0.01$), 而与 ROC 含量的相关性不明显; WSOC 含量与 ROC 含量的相关性也不明显。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤有机碳在全球碳循环中有重要作用, 其主要受土层厚度、经纬度^[22]、森林类别^[23]和经营措施^[24]等因素影响。本研究发间伐增加了萌生杉木林的土壤有机碳含量, 这与前人的研究结果一致^[25-26]。这可能有两方面的原因: 其一, 间伐以采伐剩余物的形式为土壤提供了额外的碳源, 被分解成土壤有机碳。同时, 更高的间伐强度意味着更多的采伐剩余物作底物, 这也解释了土壤有机碳的增幅为何与间伐强度正相关。其二, 间伐打开了林窗, 扩大了土壤接受阳光照射的面积与机会, 进而增加了土壤温度^[27], 改变了土壤微环境^[28], 进一步刺激了与碳转化相关的微生物, 并提高了相关酶的活性^[14], 从而促进采伐剩余物的降解和土壤有机碳的生成。

土壤活性有机碳是土壤有机碳分解、矿化、养分循环和微生物活动等过程中的重要纽带, 受土壤理化性质、土壤微生物和林分情况等多个因素的影响^[29]。本研究结果表明, MBC、WSOC、ROC 含量均与间伐强度显著相关, 这与前人的研究结果一致^[19-21]。首先, MBC 含量与土壤有机碳含量显著相关, 土壤有机碳能为土壤微生物提供更多的碳源^[5], 使 MBC 含量在很大程度上受 SOC 含量的影响。其次, WSOC 含量和 ROC 含量均与土壤含水量显著相关。间伐增加了土壤温度和土壤含水量, 促进了微生物对采伐剩余物和凋落物等碳源的分解和土壤呼吸, 进一步加速土壤碳循环, 从而导致了 WSOC 和 ROC 的累积^[15]。再次, WSOC 含量与 MBC 含量显著相关。有研究发现土壤微生物能直接利用和吸收 10% ~ 40% 的水溶性有机碳^[30-31], 说明土壤含水量很可能是在影响土壤微生物活性的基础上间接影响了水溶性有机碳。

此外, 土壤有机碳的季节性变化并不明显, 但三种土壤活性有机碳 (MBC、WSOC 和 ROC) 含量均有明显的季节性变化, 且不受间伐影响。郑爱泉等^[32]也发现森林土壤活性有机碳具有明显的季节动态, 其变化不仅与林分类型相关, 同时受土壤小气候 (土壤温度和土壤含水量) 的影响。这可能是因为土壤活性有机碳组分不稳定、易移动且易氧化^[33], 导致其对环境因子 (尤其是土壤含水量) 较为敏感, 例如本研究中三种土壤活性有机碳 (MBC、WSOC 和 ROC) 含量均与土壤含水量显著相关 ($P < 0.05$) (表 3)。

3.2 结论

本研究以杭州市临安区的二代萌生杉木林土壤为研究对象, 通过为期 2 年的对两种高强度 (50% 和 70%) 与不间伐的林地土壤的对比, 发现: ①高强度间伐通过增加土壤碳源、改变土壤微环境的方式增加了土壤有机碳及其活性组分 (土壤微生物量碳、水溶性有机碳和易氧化有机碳); ②土壤有机碳含量的季节性变化并不明显, 但三种土壤活性有机碳活性组分均有明显的季节性变化, 且不受间伐影响。因此, 从增加林分土壤碳库的角度出发, 建议对林分密度过大的二代萌生杉木林采取重度间伐。

参考文献:

- [1] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263: 185 - 190.
- [2] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. Science, 2011, 333: 988 - 992.
- [3] 何姗, 刘娟, 姜培坤, 等. 经营管理对森林土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36 (04): 818 - 827.
- [4] 李书杨, 满秀玲, 魏红. 大兴安岭白桦林和兴安落叶松林土壤活性有机碳动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46 (12): 64 - 70.
- [5] ZHANG Q, MIAO F, WANG Z, et al. Effects of long-term fertilization management practices on soil microbial biomass in China's cropland: a meta-analysis[J]. Agron J, 2017, 109 (4): 1183 - 1195.
- [6] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12 (1): 71 - 75.
- [7] CHEN X L, CHEN H Y H, CHEN X, et al. Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations[J]. App Soil Ecol, 2016, 107: 162 - 169.
- [8] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. 生态学报, 2019, 39 (15): 5546 - 5554.
- [9] 张淑香, 张文菊, 徐明岗. 土壤活性有机碳的影响因素与综合分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (06): 1178 - 1179.
- [10] 张文雯, 韩海荣, 程小琴, 等. 间伐对华北落叶松人工林土壤活性有机碳含量及酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (10): 3347

