

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.06.015

青冈栎次生林土壤活性有机碳对 间伐强度的响应

齐梦娟¹, 石朔蓉¹, 姜春前^{1*}, 王书韧¹, 王 辉¹, 王景弟²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 湖南省慈利县林业局, 湖南 张家界 427200)

摘要: [目的] 探索不同间伐强度对青冈栎次生林土壤活性有机碳的响应。[方法] 以湖南省天心阁林场青冈栎次生林为研究对象, 于 2018 年设置 4 种间伐强度 (对照: 0%; 弱度间伐: 15%; 中度间伐: 30%; 强度间伐: 50%), 探讨不同间伐强度下 4 种土壤活性有机碳 (土壤微生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳) 含量变化及其在总有机碳中的分配比例。[结果] (1) 与对照样地相比, 中度间伐和强度间伐显著提高了土壤总有机碳含量, 弱度间伐降低了土壤总有机碳含量; (2) 间伐提高了土壤微生物量碳的含量, 降低了可溶性有机碳的含量, 土壤颗粒有机碳和易氧化有机碳含量在不同间伐处理下的变化趋势与总有机碳一致; (3) 不同间伐强度下土壤微生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳的分配比例分别为: 0.23%~0.54%、0.40%~0.78%、16.54%~47.30% 和 6.46%~14.29%, 强度间伐显著提高了微生物量碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳分配比例, 降低了可溶性有机碳的分配比例, 表明间伐提高了不稳定碳的比例, 且颗粒有机碳对间伐处理更敏感; (4) 相关性分析表明, 土壤总有机碳与各活性有机碳组分间呈极显著正相关, 且活性有机碳与土壤含水量和总氮含量呈正相关; 土壤活性组分碳间转化依赖于总有机碳量的变化, 且在一定的水分和氮素条件下易发生分解转变。[结论] 不同间伐处理对土壤有机碳及其活性组分的含量有显著影响, 强度间伐显著提高土壤有机碳及其活性组分的含量, 加快土壤中的碳素循环。

关键词: 青冈栎次生林; 间伐强度; 土壤有机碳; 土壤活性有机碳; 分配比例

中图分类号: S753.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)06-0122-08

土壤容纳生态系统中约 2/3 的碳, 是全球最大的碳汇^[1-2]。土壤有机碳与森林生态系统的物质循环和能量流动密切相关^[3-4], 但土壤有机碳总量的变化非常缓慢, 很难在短期内观测到它的细微变化。土壤活性有机碳是土壤有机碳中周转速率较快, 分解速度较强的部分^[5], 它直接参与土壤中碳循环的生态过程, 为微生物活动提供能量与养分^[6]。土壤活性有机碳能灵敏地反映出土壤管理措施和环境改变所引起的土壤碳库的波动, 更有助于研究土壤有机碳早期的动态变化, 维持土壤碳库平衡已经成为森林可持续经营的重要参考指标之一^[7]。

研究表明, 间伐通过调控林分密度和结构改变了森林生态系统内的小气候^[8], 增加了土壤温度, 减少了土壤湿度, 影响土壤含水量、容重、养分等理化性质; 而土壤活性有机碳含量主要受土壤有机碳含量的影响和土壤温湿度等的调控^[7], 土壤的生物化学性质对土壤有机质的分解与转化至关重要^[9]。近年来, 间伐对土壤有机质及其活性组分的影响进行了一些研究, Gong 等^[10]分析了 77 项已发表的森林间伐的研究, 发现间伐后森林土壤碳储量明显高于其他地区; 而 Zhang 等^[11]分析发现, 间伐对土壤总有机碳和土壤微生物量碳没有显著的

收稿日期: 2020-12-14 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505604)

作者简介: 齐梦娟, 硕士, 主要研究方向: 森林培育。E-mail: 17863806075@163.com

* 通讯作者: 姜春前, 博士, 研究员, 主要研究方向: 林业与气候变化研究。E-mail: jiangchq@caf.ac.cn

影响,但提高了土壤全氮含量;Kim等^[12]强调间伐后土壤性质的改变影响了橡树(*Quercus palustris* Münchh.)和落叶松林(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)的土壤微生物量碳。Ma等^[13]发现,中等间伐强度下土壤有机质含量与易氧化有机碳含量最高,且易氧化有机碳是土壤有机质改变的主要驱动力。因此,土壤有机碳库及其活性碳库的变化对评价间伐后森林土壤生产的稳定性和可持续性至关重要^[8]。

青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.)是我国亚热带常绿阔叶林的主要优势树种之一^[14],湖南省慈利县天心阁林场青冈栎次生林多为萌生矮林,严重影响森林系统服务功能。探讨不同间伐强度对土壤活性有机碳含量(土壤微生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳)及其在土壤总有机碳中比例的影响,进一步了解间伐后林地土壤活性有机碳的变化特征,以期对青冈栎次生林的可持续经营提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于湖南省慈利、桃源两县交界处天心阁林场(111°10'26"~111°11'57" E, 29°13'16"~29°14'31" N)。地形以丘陵为主,成土母岩为板页岩,土壤为红壤,土层较薄,立地条件中等。林场地处中亚热带季风湿润气候区,气候温和,雨量

充沛,光照充足。年平均气温 18.2℃,年降水量 1 615.1 mm,相对湿度 75.8%。地带性植被为常绿阔叶林,研究区前身为集体林场,现为采伐后形成的次生林,郁闭度高,多萌生,平均林龄 22 a。优势树种有青冈栎、黄檀(*Dalbergia hupeana* Hance)、柯(*Lithocarpus glaber* (Thunb.) Nakai)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.);灌木植物以铁仔(*Myrsine africana* Linn.)、崖花海桐(*Pittosporum illicioides* Makino)、油茶(*Camellia oleifera* Abel.)等为主;草本层主要有青绿苔草(*Carex breviculmis* R. Br.)、阔鳞鳞毛蕨(*Dryopteris championii* (Benth.) C. Chr.)和鸡矢藤(*Paederia scandens* (Lour.) Merr.)等。

2 研究方法

2.1 间伐处理

2018年7月,在天心阁林场选取坡度、坡向及海拔相似的样地,根据间伐蓄积量与样地总蓄积量之比进行间伐作业,按照随机区组设计,设置4种间伐处理:弱度间伐(15%, LIT)、中度间伐(30%, MIT)、强度间伐(50%, HIT)、对照(0%, CK)。在4种间伐处理的样地内,分别设置40 m×25 m的试验样地并重复3次。样地基本信息见表1。

表1 样地基本概况

Table 1 Basic overview of sample plots

处理 Treatment	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	平均海拔 Average altitude/m	林分密度 Density/ (株·hm ⁻²)	平均胸径 Average DBH/ cm	平均树高 Average height/m	郁闭度 Canopy density	灌木层盖度 Coverage degree/%	草本层盖度 Coverage degree/%
CK	东偏北28°	25	177	1 371	10.93	11.75	0.95	30.13	13.33
LIT	东偏北30°	23	173	1 264	12.55	10.14	0.85	30.07	36.87
MIT	东偏北29°	24	189	1 109	12.07	11.56	0.75	52.10	34.90
HIT	东偏北26°	25	169	1 055	13.16	12.07	0.60	57.13	51.57

2.2 样品采集

2020年8月下旬,采用分层多点混合取样法。每个处理样地内随机设置5个取样点,去除地表凋落物后进行取样,按0~10、10~20、20~30 cm分3层采集土样,将同一样地同一土层的5个土壤样品充分混匀并去掉土壤中可见植物根系、残体和碎石,后按四分法去除多余土样,用自封袋带回实验室分析。取一部分土壤置于冰箱中4℃保存,用

于测定土壤微生物量碳和可溶性有机碳,其余土壤风干后过2 mm土筛用于测定其余指标。

2.3 土壤样品测定

2.3.1 土壤基本理化性质测定 土壤总有机碳、氮含量使用元素分析仪(VARIO MAX CN by Germany Elementary)测定。

2.3.2 土壤活性有机碳组分测定 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸后用水体碳氮仪(Vario TOC)测

定^[15]；可溶性有机碳采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸钾溶液浸提后用水体碳氮仪测定^[15]；颗粒有机碳采用 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 六偏磷酸钠提取法测定^[16]；易氧化有机碳采用 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高锰酸钾溶液处理在 565 nm 下比色测定^[17]。

2.4 数据分析

所有数据采用 Excel 2016 进行整理，用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析（One-way ANOVA）、差异性检验和多重比较（LSD），显著水平设为 0.05。用 origin 2017 作图，采用 Pearson 进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同间伐强度对土壤总有机碳含量的影响

由表 2 可知：不同间伐强度下各土层土壤总有机碳（TOC）含量为 $11.41\sim 39.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与对照（CK）相比， $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层中，中度间伐（MIT）和强度间伐（HIT）的 TOC 含量增加，弱度间伐（LIT）的 TOC 含量降低，即 $\text{HIT} > \text{MIT} > \text{CK} > \text{LIT}$ 。 $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层中，HIT 处理下 TOC 含量与 CK 和 LIT 处理差异显著，TOC 含量分别高 18.3% 和 38.6%，MIT 比 LIT 高 25.8%，HIT 与 MIT 处理间差异不显著； $10\sim 20 \text{ cm}$ 土层，不同间伐处理间 TOC 含量差异不显著； $20\sim 30 \text{ cm}$ 土层，CK 处理下 TOC 含量最高，且与 HIT 差异显著（ $P < 0.05$ ），与 LIT 和 MIT 差异不显著。在垂直剖面，不同土层间土壤 TOC 含量存在差异，并且不同间伐处理下土壤 TOC 含量均表现为 $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层显著高于 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30 \text{ cm}$ 土层（ $P < 0.05$ ）。

3.2 不同间伐强度对土壤微生物量碳的影响

由图 1A 可知：不同间伐强度下各土层土壤微生物量碳（MBC）含量为 $38.65\sim 121.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与对照（CK）相比， $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层中，间伐处理后的土壤 MBC 总含量均有所增加，随间伐强度的增大呈增加的趋势，即 $\text{HIT} > \text{MIT} > \text{LIT} > \text{CK}$ 。 $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层，MIT 和 HIT 处理的土壤 MBC 含量均与 CK 处理差异显著，分别是 CK 的 156.3% 和 166.5%（ $P < 0.05$ ），LIT 增加了 MBC 含量，但与 CK 差异不显著； $10\sim 20 \text{ cm}$ 土层，HIT 处理的 MBC 含量与 CK 和 LIT 的差异显著，分别比 CK 和 LIT 增加了 48.2% 和 58.3%（ $P < 0.05$ ），MIT 处理与其他处理间差异不显著； $20\sim 30 \text{ cm}$ 土层，不同间伐处理间及与 CK 间均差异不显著。在垂直剖

表 2 土壤总有机碳及碳氮比（均值 ± 标准误，下同）
Table 2 Soil total organic carbon and carbon to nitrogen ratio (Mean ± SE. The same below.)

处理 Treatment	土层 Soil layer/cm	总有机碳 TOC/(g·kg ⁻¹)	碳/氮 C/N
CK	0~10	33.78 ± 1.00 Abc	12.98 ± 1.00 Abc
	10~20	16.65 ± 3.11 Ba	11.40 ± 0.65 Ba
	20~30	16.43 ± 1.24 Ba	11.48 ± 0.44 Ba
LIT	0~10	28.83 ± 0.89 Ac	10.66 ± 1.43 Ac
	10~20	19.65 ± 5.85 Ba	13.27 ± 4.82 Aa
	20~30	14.37 ± 2.62 Bab	10.70 ± 2.45 Aa
MIT	0~10	36.26 ± 5.05 Aab	16.61 ± 0.87 Aa
	10~20	16.89 ± 0.44 Ba	10.59 ± 1.86 Ba
	20~30	14.20 ± 2.62 Bab	11.21 ± 2.65 Ba
HIT	0~10	39.96 ± 1.20 Aa	14.07 ± 0.89 Aab
	10~20	19.14 ± 5.32 Ba	11.24 ± 1.09 Ba
	20~30	11.41 ± 2.49 Cb	9.64 ± 0.87 Ba

注：不同大写字母表示同一间伐强度不同土层间差异显著（ $P < 0.05$ ）；不同小写字母表示同一土层不同间伐强度间差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。

Notes: The difference of cutting strength between different soil layers was significant ($P < 0.05$), and different lowercase letters showed significant difference between different cutting strength of the same soil layer ($P < 0.05$). The same below.

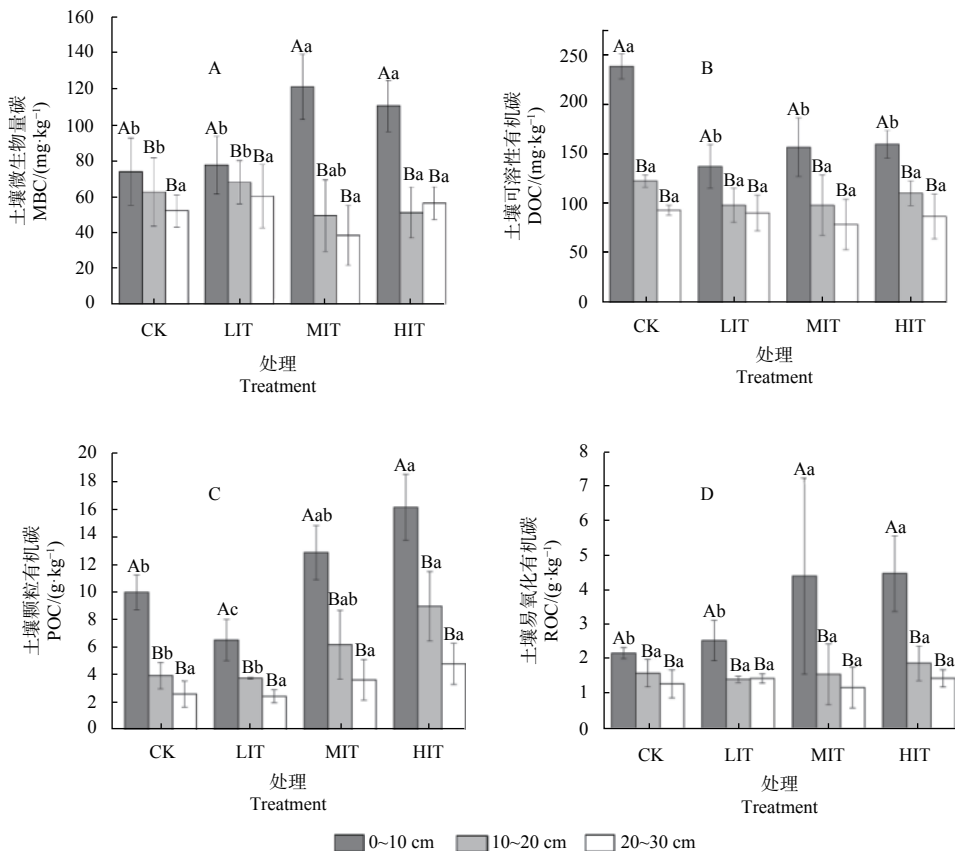
面，土壤 MBC 含量主要集中在 $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层，且随着土层的加深而递减； $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层与 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30 \text{ cm}$ 土层的土壤 MBC 含量差异显著（ $P < 0.05$ ）。

3.3 不同间伐强度对土壤可溶性有机碳的影响

由图 1B 可知：不同间伐强度下各土层土壤可溶性有机碳（DOC）含量为 $79.93\sim 239.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相比， $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层中，间伐处理后土壤的 DOC 均显著降低（ $P < 0.05$ ）。 $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层，土壤 DOC 含量表现为 $\text{CK} > \text{HIT} > \text{MIT} > \text{LIT}$ ，CK 土壤的 DOC 含量显著高于间伐处理，比 LIT、MIT、HIT 分别高出 72.9%、51.7%、48.8%（ $P < 0.05$ ）； $10\sim 20 \text{ cm}$ 和 $20\sim 30 \text{ cm}$ 土层土壤的 DOC 含量在不同间伐强度间差异不显著。在垂直剖面，同一间伐强度下， $0\sim 10 \text{ cm}$ 土层土壤的 DOC 含量与 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30 \text{ cm}$ 土壤的 DOC 含量差异显著（ $P < 0.05$ ），即随着土层加深，土壤的 DOC 含量下降。

3.4 不同间伐强度对土壤颗粒有机碳的影响

由图 1C 可知：不同间伐强度下，各层土壤颗粒有机碳（POC）含量为 $2.51\sim 16.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与对照（CK）相比， $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层中，LIT 降低了 POC



注: 不同大写字母表示同一间伐强度不同土层质之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一土层不同间伐强度之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: The difference of cutting strength between different soil layers was significant ($P < 0.05$), and different lowercase letters showed significant difference between different cutting strength of the same soil layer ($P < 0.05$).

图 1 不同间伐处理下土壤活性有机碳组分含量变化

Fig. 1 Changes of soil labile organic carbon content under different thinning treatments

含量, MIT 和 HIT 增加了 POC 含量, 即间伐后 POC 含量为 HIT > MIT > CK > LIT。0~10 cm 土层, 与 CK 相比, HIT 和 MIT 显著提高了 POC 的含量, 分别比 CK 增加了 61.3% 和 28.6% ($P < 0.05$), LIT 显著降低了 POC 的含量, 是 CK 的 34.5% ($P < 0.05$); 10~20 cm 土层, HIT 显著提高了 POC 的含量, 是 CK 的 225.7% ($P < 0.05$), MIT 提高了 POC 含量, LIT 降低了 POC 含量, 但 MIT、LIT 与 CK 差异不显著; 20~30 cm 土层, 不同间伐强度间 POC 含量差异不显著。

3.5 不同间伐强度对易氧化有机碳的影响

由图 1D 可知: 不同间伐强度下各土层土壤易氧化有机碳 (ROC) 含量为 1.19~4.46 g·kg⁻¹, 与对照 (CK) 相比, 0~30 cm 土层中, MIT 和 HIT 的 ROC 含量增加, LIT 的 ROC 含量无显著变化。0~10 cm 土层, ROC 含量为 HIT > MIT > LIT > CK, MIT 和 HIT 显著提高了 ROC 的含量, 分别

为 CK 的 201.2% 和 204.6% ($P < 0.05$), LIT 与 CK 间差异不显著; 10~20 cm 土层, HIT 比 CK 增加了 17.6%; 20~30 cm 土层, LIT 和 HIT 分别比 CK 增加了 12.1% 和 12.3%。在垂直剖面上, 同一间伐强度下 ROC 含量随土层加深降低, 且 0~10 cm 土层与 10~20、20~30 cm 的 ROC 含量差异显著 ($P < 0.05$)。

3.6 不同间伐强度对土壤活性有机碳占总有机碳比例的影响

由表 3 可知: 0~30 cm 土层中, 土壤微生物量碳 (MBC) 的分配比例为 0.23%~0.54%; 0~10 cm 土层, MBC 分配比例随着间伐强度的增加呈先增后降的趋势, 在 MIT 下 MBC 在总有机碳 (TOC) 中的比例最高; 10~20 cm 土层, MBC 在 TOC 中所占比例没有同一趋势, 且相互之间差异不显著; 20~30 cm 土层, 不同间伐处理后 MBC 在 TOC 中所占比例均有所增加, HIT 显著提

高了 MBC 在 TOC 中所占比例。土壤可溶性有机碳 (DOC) 的分配比例为 0.40%~0.78%，间伐处理降低了 DOC 在 TOC 中的比例。POC 的分配比例为 16.54%~47.30%；0~10、10~20 cm 土层，不同间伐处理的 POC 分配比例先降后升，MIT 和 HIT 提高了 POC 在 TOC 中所占比例，LIT 处理

的 POC 所占比例则低于 CK；20~30 cm 土层，LIT、MIT 和 HIT 均提高了 POC 在 TOC 中所占比例。ROC 的分配比例为 6.46%~14.29%；0~10 cm 土层，MIT 和 HIT 显著提高了 ROC 在 TOC 中的比例；10~20、20~30 cm 土层，ROC 在 TOC 中所占比例没有同一趋势，且相互之间差异不显著。

表 3 不同间伐强度下土壤活性有机碳占总有机碳比例

Table 3 The ratio of soil labile organic carbon to total organic carbon under different thinning intensity

处理 Treatment	土层深度 Soil layer/cm	土壤活性有机碳占总有机碳的比例 The ratio of soil active organic carbon to total organic carbon/%			
		颗粒有机碳 POC	易氧化有机碳 ROC	微生物量碳 MBC	可溶性有机碳 DOC
CK	0~10	29.83 ± 0.042 Aab	6.46 ± 0.01 Ab	0.23 ± 0.38 Bb	0.71 ± 0.19 Aa
	10~20	24.95 ± 0.084 ABb	9.95 ± 0.03 Aa	0.32 ± 0.28 Aa	0.76 ± 1.51 Aa
	20~30	16.54 ± 0.060 Bb	8.07 ± 0.03 Aa	0.32 ± 0.42 Ab	0.59 ± 1.27 Aa
LIT	0~10	22.89 ± 0.054 Ab	7.67 ± 0.01 Aab	0.29 ± 0.47 Aab	0.48 ± 0.88 Ab
	10~20	20.40 ± 0.050 Ab	7.73 ± 0.02 Aa	0.27 ± 0.87 Aa	0.52 ± 0.64 Aa
	20~30	18.08 ± 0.061 Ab	10.47 ± 0.03 Aa	0.40 ± 0.69 Aab	0.65 ± 1.53 Aa
MIT	0~10	35.94 ± 0.061 Aa	14.29 ± 0.07 Aa	0.34 ± 0.87 Aa	0.45 ± 1.34 Ab
	10~20	37.20 ± 0.153 Aab	9.37 ± 0.05 Aa	0.33 ± 0.77 Aa	0.59 ± 1.36 Aa
	20~30	26.62 ± 0.118 Aab	8.54 ± 0.05 Aa	0.34 ± 0.27 Aab	0.56 ± 1.35 Aa
HIT	0~10	40.68 ± 0.068 Aa	12.85 ± 0.04 Aab	0.32 ± 0.27 Aab	0.40 ± 0.46 Bb
	10~20	47.30 ± 0.050 Aa	8.22 ± 0.02 Aa	0.40 ± 1.22 Aa	0.60 ± 1.12 ABa
	20~30	42.04 ± 0.089 Aa	12.72 ± 0.01 Aa	0.54 ± 1.96 Aa	0.78 ± 2.20 Aa

3.7 土壤有机碳及活性组分与土壤理化因子间的相关性

由表 4 可知：土壤含水量与土壤 ROC 和 POC 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与土壤 TOC 和 MBC 呈显著正相关 ($P < 0.05$)；土壤 TN 与土壤 MBC 呈显著相关 ($P < 0.05$)，与土壤 TOC 及其

他活性组分碳间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；土壤 C/N 与 ROC、POC 和 MBC 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；土壤 TOC 与其活性组分碳间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。除土壤 DOC 外，ROC 与 POC 和 MBC 两两之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，土壤 DOC 与 POC 和 MBC 呈显著正相关 ($P < 0.05$)，

表 4 土壤有机碳及活性组分与理化因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil organic carbon and labile components and soil physicochemical factors

	pH	含水量	TN	C/N	TOC	ROC	POC	MBC
TOC	-0.395	0.592*	0.926**	0.804**				
ROC	-0.095	0.723**	0.747**	0.814**	0.898**			
POC	0.013	0.737**	0.771**	0.725**	0.886**	0.912**		
MBC	-0.238	0.596*	0.706*	0.859**	0.880**	0.949**	0.798**	
DOC	-0.542	0.373	0.817**	0.548	0.817**	0.563	0.672*	0.593*

注：*， $P < 0.05$ (双尾)；**， $P < 0.01$ (双尾)。TOC，土壤有机碳；DOC，土壤可溶性有机碳；ROC，土壤易氧化有机碳；MBC，土壤微生物量碳；POC 土壤颗粒有机碳；TN，土壤全氮。

Notes: *, $P < 0.05$ (双尾); **, $P < 0.01$ (双尾). TOC, soil organic carbon; DOC, soil soluble organic carbon; ROC, soil easily oxidizable organic carbon; MBC, soil microbial biomass carbon; POC, soil particulate organic carbon; TN, soil total nitrogen.

与 ROC 相关性不显著。土壤 pH 与土壤活性有机碳组分相关性不显著。

4 讨论

青冈栎次生林土壤有机碳主要聚集在土壤表层,随着土层的加深而下降,符合一般规律^[18]。有研究发现,间伐提高了土壤有机碳含量^[19-20]。本研究中,随着间伐强度增大土壤有机碳含量呈先降后升的趋势,原因可能为本研究区优势树种为青冈栎,且多为萌生矮林,凋落物数量少,而凋落物又是土壤有机碳的重要来源^[21],强度间伐极大提高了林下灌木与草本的种类及覆盖度(表1),为微生物提供碳源,补充了森林表层有机碳的输入。C/N 反映微生物对有机碳的矿化分解速率^[22],在弱度间伐下土壤 C/N 明显低于对照林地,加快土壤有机碳的分解,且低植被覆盖度减少了碳源的输入,导致在弱度间伐(15%)下有机碳含量下降。

有研究表明,间伐处理下土壤颗粒有机碳(POC)含量明显高于对照林地^[13,23]。本研究表明,强度间伐显著提高了 POC 含量,弱度间伐降低了其含量,与土壤总有机碳的变化一致(图1C)。原因可能为 POC 在总有机碳中的分配比例最高,而且植物凋落物的分解是 POC 的主要来源^[24],间伐短期后林窗促进了林下植被的发育,灌草凋落物的增加补充了乔木层碳含量的损失^[25]。不同间伐强度下,易氧化有机碳(ROC)分配比例随土层的加深呈先降后升趋势(中度间伐除外)(表3)。可能是因为一方面相比于高郁闭度对照林地,间伐改善了林内环境提高了灌草层覆盖度,草本植物细根系发达,主要集中在表层,根系分泌物及其自身的分解为微生物提供了丰富的能源物质^[26],所以,0~10 cm 土层的 ROC 含量较高;另一方面,ROC 与土壤含水量极显著相关,中度间伐与强度间伐下土壤含水率高,ROC 随着水分下渗到 20~30 cm 土层,被微生物固持,导致 ROC 的含量变高^[27-28]。

土壤微生物量碳(MBC)含量随间伐强度的增加呈增加的趋势,与雷蕾等^[29]研究马尾松林土壤微生物群落的结果相反,这可能是因为马尾松是先锋树种,木质素含量与 C 含量高,凋落物分解慢,青冈栎凋落物中木质素含量低,加快了凋落物的分解^[30],改善了土壤质量,提高了土壤微生物的活性;但 MBC 在总有机碳中的分配比例低,表明 MBC 含量在很大程度上依赖于总有机碳及其他活

性有机碳组分的分解与转化^[31-32]。

本研究显示,相比于对照处理,间伐后土壤可溶性有机碳(DOC)的含量下降,且不同间伐强度间 DOC 含量差异不显著。可能是因为 DOC 既是微生物新陈代谢的产物又是微生物可利用的底物^[33]。微生物能快速利用水溶性碳转换成自身生物量碳,后间伐引起的温度湿度变化促进微生物呼吸,加速对凋落物的分解,补充土壤中可溶性碳含量,以抵消间伐引起的 DOC 的变化^[12]。DOC 相比于其他活性碳组分,其含量与所占有机碳比例显著低于 POC 和 ROC(表3),所以,间伐后降低 POC 和 ROC 含量的增加抵消了 DOC 含量的降低,使间伐后土壤活性有机碳含量增加。

对比不同间伐处理下 POC 和 ROC 在总有机碳中的分配比例发现,POC 与 ROC 在土壤有机碳中的分配比例较高,表明这 2 种活性碳组分更能有效的表示土壤碳库的活跃度,而且 POC 的分配比例范围远大于 ROC,说明 POC 对间伐处理的变化更敏感。这与翟凯燕等^[22]对马尾松土壤活性有机碳的研究结果不同,其研究发现 ROC 对间伐处理更敏感,这可能与植被类型、林分演替阶段及土壤条件有关^[34],有待进一步研究凋落物分解与 POC 和 ROC 的关系。中、强度间伐后土壤活性有机碳的含量明显增加,可能是因为活性有机碳库受季节影响较强,在秋冬季节达到高峰^[30],而本次取样时间为 8 月,且产生的林窗会增加林地表面光照,促进林下植被的发育,土壤微生物活性增强^[24],凋落物分解加快,增加了活性有机碳在总有机碳库中的占比。

5 结论

在青冈栎次生林的萌生林中,强度间伐显著提高土壤有机碳含量,有利于有机碳的积累。同时土壤活性有机碳含量与土壤含水量和氮素含量呈显著正相关,在适度的环境因素下易转换为活性有机碳,增加土壤中不稳定碳的含量。土壤颗粒有机碳(POC)对碳库的波动更敏感,土壤微生物量碳(MBC)对土壤有机碳早期变化更灵敏,土壤颗粒有机碳(POC)和微生物量碳(MBC)可以用作表征土壤碳库和肥力的指标。因此,在未来全球氮沉降的背景下,间伐对土壤活性有机碳的影响应更关注土壤颗粒有机碳(POC)与微生物量碳(MBC)的变化。

参考文献:

- [1] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3): 279-294.
- [2] Montagnini F, Nair P. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 2004, 61-62(1-3): 281.
- [3] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis[J]. *Forest Ecology & Management*, 2001, 140(2-3): 227-238.
- [4] Deb S, Bhadoria P, Mandal B, *et al.* Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation[J]. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 2015, 3(1): 26-34.
- [5] 沈 宏, 曹志洪. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18 (3): 32-38.
- [6] Wang Q K, Wang S L, Feng Z W. Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broadleaved forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 1-6.
- [7] 张宇辰, 彭道黎. 间伐对塞罕坝华北落叶松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26 (4): 961-968.
- [8] Romeo F, Settineri G, Sidari M, *et al.* Responses of soil quality indicators to innovative and traditional thinning in a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 465: 118106.
- [9] Lull C, Bautista I, A Lidón, *et al.* Temporal effects of thinning on soil organic carbon pools, basal respiration and enzyme activities in a Mediterranean Holm oak forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 464: 118088.
- [10] Gong C, Tan Q, Liu G, *et al.* Forest thinning increases soil carbon stocks in China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118812.
- [11] Zhang X, Guan D, Li W, *et al.* The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 36-43.
- [12] Kim S, Li G, Han S H, *et al.* Microbial biomass and enzymatic responses to temperate oak and larch forest thinning: Influential factors for the site-specific changes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2068-2079.
- [13] Ma J, Kang F, Cheng X, *et al.* Moderate thinning increases soil nitrogen in a *Larix principis-rupprechtii* (Pinaceae) plantations[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 118-128.
- [14] 胡 满, 曾思齐, 龙时胜. 青冈栎次生林主要树种空间分布格局及其关联性研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39 (6): 66-71.
- [15] 吴晓玲, 张世榕, 蒲玉琳, 等. 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27 (10): 1607-1616.
- [16] Garten C T, Post W M, Hanson P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 45(2): 115-145.
- [17] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 393-406.
- [18] 窦艳星, 侯 琳, 马红红, 等. 间伐对松栎混交林土壤活性有机碳的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35 (5): 64-69.
- [19] 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): 3347-3355.
- [20] Baena C W, M Andrés-Abellán, Lucas-Borja M E, *et al.* Thinning and recovery effects on soil properties in two sites of a Mediterranean forest, in Cuenca Mountain (South-eastern of Spain)[J]. *Forest Ecology & Management*, 2013, 308: 223-230.
- [21] 习 丹, 余泽平, 熊 勇, 等. 江西官山常绿阔叶林土壤有机碳组分沿海拔的变化[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (10): 3349-3356.
- [22] 翟凯燕, 马婷瑶, 金雪梅, 等. 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36 (3): 609-615.
- [23] Cheng X R, Yu M, Li Z. Short term effects of thinning on soil organic carbon fractions, soil properties, and forest floor in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2018, 9(2): 21-29.
- [24] Ares A, Neill A R, Puettmann K J. Understorey abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands[J]. *Forest Ecology & Management*, 2010, 260(7): 1104-1113.
- [25] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, *et al.* How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?[J]. *Geoderma*, 2007, 137(3-4): 253-268.
- [26] 房 飞, 唐海萍, 李滨勇. 不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分影响研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (11): 1774-1779.
- [27] 徐 侠, 王 丰, 栾以玲, 等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳[J]. *生态学杂志*, 2008, 27 (7): 1115-1121.
- [28] 袁 喆, 罗承德, 李贤伟, 等. 间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24 (6): 127-131.
- [29] 雷 蕾, 肖文发, 曾立雄, 等. 马尾松林土壤微生物群落结构对不同营林处理的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38 (16): 229-239.
- [30] 宋 影, 辜夕容, 严海元, 等. 中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态[J]. *环境科学*, 2014, 35 (3): 1151-1158.
- [31] 陈信力, 刁娇娇, 郑 婷, 等. 间伐对重阳木人工林土壤微生物量碳氮和酶活性影响[J]. *林业科技开发*, 2014, 28 (2): 59-63.
- [32] 郭传阳, 林开敏, 郑鸣鸣, 等. 间伐对杉木人工林土壤微生物生物量碳氮的短期影响[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2020, 44 (5): 125-131.
- [33] 郑宪志, 张星星, 林伟盛, 等. 不同树种对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响[J]. *福建师大学报:自然科学版*, 2018, 34 (6): 86-93.
- [34] 张 雪, 韩士杰, 王树起, 等. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化[J]. *生态学杂志*, 2016, 35 (2): 282-289.

Response of Soil Labile Organic Carbon to Thinning Intensity in Secondary Forest of *Cyclobalanopsis glauca*

QI Meng-juan¹, SHI Shuo-rong¹, JIANG Chun-qian¹, WANG Shu-ren¹, WANG Hui¹, WANG Jing-di²

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Cili Forestry Bureau, Zhangjiajie 427200, Hu`nan, China)

Abstract: [Objective] To study the response of soil labile organic carbon to thinning intensities in the secondary forest of *Cyclobalanopsis glauca*. [Method] Experiments were carried out to investigate the changes of SOC and its labile chemical components (MBC, DOC, POC and ROC) as well as their distribution ratio following a short term intensity adjustment of stand woods with 4 treatments: light (15%, LIT), moderate (30%, MIT), high (50%, HIT) and the contrast (unthinning, CK) in secondary forest of *Cyclobalanopsis glauca*. [Result] (1) Compared with the CK, the MIT and HIT significantly increased the SOC content, while LIT reduced the SOC content. (2) Thinning increased the soil MBC content and reduced the DOC content. The variation trend of soil POC and ROC contents under different thinning treatments was consistent with that of the SOC. (3) Under different thinning intensity, the distribution proportion for soil MBC and POC, DOC and ROC were 0.23%-0.54%, 0.40%-0.78%, 16.54%-47.30% and 6.46%-14.29%, the HLT significantly increased the proportion of MBC allocation as well as POC and ROC and reduced the allocation proportion of DOC, showing that thinning treatments increased the proportion of unstable carbon and POC was more sensitive to the thinning processing. (4) Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between soil total organic carbon and labile organic carbon components, and labile organic carbon was positively correlated with soil water content and total nitrogen content, the carbon conversion of soil labile components was dependent on the change of total organic carbon, and it was easy to decompose under certain water and nitrogen conditions. [Conclusion] Thinning treatment has significant effects on the contents of soil organic carbon and its labile components, and HLT will significantly increase the contents of soil organic carbon and its labile components and accelerate the carbon cycle in the soil.

Keywords: the secondary forest of *Cyclobalanopsis glauca*; thinning intensity; soil organic carbon; soil labile organic carbon; distribution ratio

(责任编辑: 徐玉秀)