

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.02.003

# 南亚热带不同红锥混交林土壤碳库稳定性与碳库管理指数变化

王仁杰<sup>1</sup>, 蒋 焱<sup>1</sup>, 王 勇<sup>1\*</sup>, 刘庭薇<sup>1</sup>, 唐靓茹<sup>2</sup>, 刘雄盛<sup>1</sup>, 黄荣林<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院森林经营研究所, 广西南宁 530002; 2. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 湖南长沙 410004)

**摘要:** [目的] 研究不同类型红锥混交林土壤有机碳库及其碳库稳定性特征, 以为南亚热带不同红锥混交林碳平衡过程的评估和混交模式的筛选提供理论依据。[方法] 本研究以南亚热带红锥人工纯林(HC)、红锥+湿地松人工混交林(HS)、红锥+火力楠人工混交林(HH)、红锥+米老排人工混交林(HM)为研究对象, 分析不同林分类型土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、溶解性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)含量及碳库管理指数(CMI)的变化。[结果] 4种林分类型的SOC、EOC、POC、DOC、MBC含量随着土层深度的增加而降低; SOC与EOC、POC、MBC含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 且与POC的相关系数最大, 不同林分间SOC含量均表现为:  $HM > HH > HS > HC$ , 且0~20 cm土层与0~40 cm土层的变化一致; 4种林分类型0~40 cm土层的CMI表现为:  $HM > HH > HC > HS$ , 且20~40 cm土层的CMI变化与0~40 cm土层的变化一致。[结论] 4种林分类型SOC、EOC、POC、DOC、MBC含量主要受林分表层土的影响, CMI主要受林分下层土的影响, POC含量与SOC关系最为密切; 红锥阔叶混交林较红锥针阔混交林更能提高土壤肥力, 改善土壤质地, 且HM的阔叶混交模式土壤碳库质量最高, 在有机碳和活性碳增加的同时也有助于惰性碳的积累及碳库的稳定性。

**关键词:** 南亚热带; 红锥混交林; 活性有机碳; 碳库稳定性; 碳库管理指数

**中图分类号:** S718.55

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)02-0024-08

土壤碳库主要分为有机碳库和无机碳库, 其中, 前者所占比重较大, 在森林生态系统碳库中占有重要地位, 对土壤碳库具有深远影响<sup>[1]</sup>。土壤有机碳(SOC)是评价土壤质量状况的重要指标, 但其含量变化缓慢, 短期内不能快速灵敏的指示土壤碳库变化, 而土壤活性有机碳组分易被分解利用, 能够更灵敏地反映土壤管理措施和林分类型变化所引起的土壤碳库变化<sup>[2]</sup>。土壤活性有机碳通常用易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、溶解性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)4个指标进行表征<sup>[3]</sup>。Lefroy等<sup>[4]</sup>在土壤碳库研究的过程中结合土壤碳库指标和土壤中碳库活度两方面的内容, 提出了碳库管理指数(CMI)概念, 比较全

面和动态地反映外界条件对土壤有机质的影响<sup>[4]</sup>, 被广泛用于生态系统中土壤质量和碳库稳定性的评价<sup>[5]</sup>。人工林生态系统是全球碳循环的重要组成部分, 研究表明, 林型对人工林的碳库稳定性有显著影响<sup>[6]</sup>。我国南亚热带地区造林过程中, 人工纯林所占比重较大, 导致生态稳定性较差, 土壤碳固存能力下降<sup>[7]</sup>。目前, 人工混交林造林模式已逐渐成为趋势, 研究不同林型人工林生态系统土壤有机碳组分特征对评价土壤质量和碳库稳定性, 对筛选具有较强碳固存能力的优良造林模式, 推进当地林业的可持续发展具有重要意义。

红锥(*Castanopsis hystrix* Miq.)作为南亚热带地区典型的珍贵乡土阔叶树种之一, 其适应性强,

收稿日期: 2020-07-19 修回日期: 2020-11-23

基金项目: 广西林业科技推广项目(GL2017kt13); 广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题(2020-B-04-01)

\* 通讯作者: 王勇(1983-), 男, 高级工程师. 主要研究方向: 森林生态学研究. Email: 742722538@qq.com

材质优良、用途广泛, 可作为用材林进行纯林种植, 提高经济效益, 亦可作为生态公益林混交造林树种, 增加生态效益<sup>[8]</sup>。研究表明, 与纯林相比, 阔叶混交及针阔混交等混交模式通过充分的利用林地空间, 改变林内小气候等方式, 增加植被多样性, 加强林地的土壤肥力<sup>[9]</sup>, 促进林木生长, 增加其总蓄积量与生物量<sup>[10]</sup>。目前, 对红锥人工纯林和混交林的研究多集中在幼林生长状况<sup>[11]</sup>、植被多样性<sup>[12]</sup>以及林分碳储量<sup>[13]</sup>等方面, 对土壤活性有机碳组分和碳库管理指数的研究鲜有报道。因此, 本文以15年生红锥人工纯林、红锥+湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)人工混交林、红锥+火力楠(*Michelia macclurei* Dandy)人工混交林、红锥+米老排(*Mytilaria laosensis* Lec.)人工混交林为研究对象, 探讨不同类型红锥混交林土壤有机碳组分及碳库稳定性的变化, 以期为南亚热带不同红锥混交林碳平衡过程的评估和混交模式的筛选提供理论依据。

## 1 研究地概况

研究区为广西国有高峰林场界牌分场, 地处南宁市兴宁区(108°07′~109°21′E, 22°50′~23°33′N), 地貌为低丘陵山地地带, 平均海拔350 m, 坡度18°左右; 雨热同季, 干湿分明; 据武鸣气象站资料, 年平均气温21℃左右, 全年雨水充沛, 年均

降水量1 200~1 500 mm, 主要集中于4-9月, 年均相对湿度81%; 日照充沛, 年日照总时数1 600 h左右, 是典型的南亚热带季风湿润气候<sup>[14]</sup>。该地区土壤类型主要为沉积岩风化发育的赤红壤<sup>[15]</sup>。土壤厚度多为40~60 cm, 土壤pH为4.10, 土壤容重为1.20 g·cm<sup>-3</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

本研究以立地条件基本一致的15年生红锥人工纯林(HC)、红锥+湿地松人工混交林(HS)、红锥+火力楠人工混交林(HH)、红锥+米老排人工混交林(HM)4种林型为研究对象(表1), 于2018年9月分别在4种林型中选择3个面积为20 m×30 m的固定样地, 其林分密度为1 000株·hm<sup>-2</sup>, 混交比例为1:1, 在每个样地坡上、坡中、坡下沿对角线选取3个土壤剖面, 将0~40 cm土层按照0~20、20~40 cm进行分层, 用自封袋采集土样带回实验室测定, 12个样地共72个样品。土样带回实验室去除根系等杂物, 过2 mm筛后将土壤分成2份, 1份风干保存, 用于土壤有机碳、活性碳的测定; 另1份放置4℃冰箱保存, 用于土壤微生物量碳含量的测定, 并以0~40 cm土层的含量表示整体林分的含量。

表1 不同样地的基本概况

Table 1 Basic situation of different sampling plots

林分类型 Forest types	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	林下灌木 Understory shrubs	林下草本 Understory herbs
HC 红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	14.40	17.2	鹅掌柴( <i>Schefflera octophylla</i> (Lour.) Harms)、杜茎山( <i>Maesa japonica</i> (Thunb.) Moritz)、厚壳树( <i>Ehretia thyrsoiflora</i> (Sieb. et Zucc.) Nakai)等	玉叶金花( <i>Mussaenda pubescens</i> Ait. f.)、半边旗( <i>Pteris dissitifolia</i> L.)、草珊瑚( <i>Sarcandra glabra</i> (Thunb.) Nakai)等
HS 红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	15.60	18.6	鹅掌柴、杜茎山、三叉苦( <i>Evodia lepta</i> (Spreng.) Merr.)等	鸭跖草( <i>Commelina communis</i> L.)、铁线蕨( <i>Adiantum capillus-veneris</i> L.)、半边旗等
	湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	15.20	21.1	
HM 红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	15.20	12.4	鹅掌柴、厚壳树、粗叶榕( <i>Ficus hirta</i> Vahl)等	鸭跖草、半边旗、铁线蕨等
	米老排 <i>Mytilaria laosensis</i>	17.90	15.6	
HH 红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	15.60	14.7	鹅掌柴、厚壳树、粗叶榕等	玉叶金花、鸭跖草、半边旗等
	火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	14.30	14.8	

### 2.2 测定及计算方法

土壤有机碳(SOC)采用浓硫酸重铬酸钾外

加热法测定<sup>[16]</sup>, 土壤易氧化有机碳(EOC)采用333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub>氧化法测定<sup>[17]</sup>, 土壤微生物

量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[18]</sup>, 土壤颗粒有机碳 (POC) 参考马和平等<sup>[19]</sup> 提供的方法测定, 土壤溶解性有机碳 (DOC) 用  $K_2SO_4$  溶液提取, 红外监测仪器测定<sup>[20]</sup>。本文以红锥纯林土壤作为对照, 采用 Blair 等<sup>[21]</sup> 提出的方法计算下列指标:

碳库活度 ( $L$ ) = 土壤活性有机碳含量/土壤非活性有机碳含量

碳库活度指数 ( $LI$ ) = 样品的碳库活度/参考土壤的碳库活度

碳库指数 ( $CPI$ ) = 样品总碳含量/参考土壤总碳含量

碳库管理指数 ( $CMI$ ) =  $CPI \times LI \times 100$

### 2.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行试验数据统计, 采用 SPSS 19.0 对土壤碳组分和碳库管理指数进行方差分析 ( $P < 0.05$ ) 和多重比较 (采用邓肯氏新复极差法), 对土壤活性有机碳与有机碳进行 Pearson 相关分析, 采用 SigmaPlot 14.0 作图。

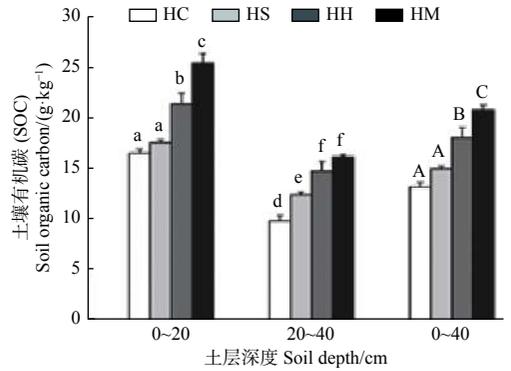
## 3 结果分析

### 3.1 不同红锥混交林土壤有机碳含量

图 1 表明: 不同红锥混交林土壤有机碳 (SOC) 含量均随着土层深度的增加而显著降低 ( $P < 0.05$ ), 而同一土层内不同林分土壤有机碳含量均表现为:  $HM > HH > HS > HC$ 。4 种林分类型中, 0~40 cm 土层与 0~20 cm 土层的变化趋势一致, 在 HS 和 HC 间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 其他林分间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 20~40 cm 土层, HS 的 SOC 含量显著大于 HC ( $P < 0.05$ ), HM 和 HH 间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在不同土层和不同林分类型中, HM 的 SOC 含量均最高; 0~20 cm 土层内 HM 的 SOC 比 20~40 cm 土层内的增加了 40%; 0~20 cm 土层内 HM 的 SOC 含量比 HC 增加了 53%, 20~40 cm 土层内 HM 的 SOC 含量比 HC 的增加了 62%, 0~40 cm 土层内 HM 的 SOC 含量比 HC 的增加了 56%。

### 3.2 不同红锥混交林土壤活性有机碳含量

图 2 表明: 不同红锥混交林的 4 种活性有机碳含量整体随着土层深度的增加而降低, 在同一林分类型中土壤颗粒有机碳 (POC) > 土壤易氧化有机碳 (EOC) > 土壤溶解性有机碳 (DOC) > 土壤微生物量碳 (MBC); 同一土层不同林分类型中,



注: HC: 红锥人工纯林、HS: 红锥+湿地松人工混交林、HH: 红锥+火力楠人工混交林、HM: 红锥+米老排人工混交林; 不同小写字母表示不同土层差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示不同林分间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Notes: HC: *Castanopsis hystrix* pure forest. HS: *Castanopsis hystrix*+*Pinus elliottii* mixed forest. HH: *Castanopsis hystrix*+*Michelia macclurei* mixed forest. HM: *Castanopsis hystrix*+*Mytilaria laosensis* mixed forest. Different lowercase letters indicate significant differences in different soil layers at 0.05 level. Different capital case letters indicate significant difference among different Forest types at 0.05 level. The same as below.

图 1 不同红锥混交林土壤有机碳含量

Fig. 1 The content of soil organic carbon of different mixed plantation of *Castanopsis hystrix* Miq.

除 20~40 cm 土层的 EOC 和 DOC 外, 其他均表现为:  $HM > HH > HS > HC$ 。同一林分类型中, 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层的 EOC 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 0~40 cm 土层的变化趋势表现为: HM 和 HH 显著大于 HC 和 HS ( $P < 0.05$ )。不同林分类型的 POC 在不同土层的变化均与 0~40 cm 土层的 POC 含量变化趋势基本相似; 20~40 cm 土层的 DOC 变化趋势表现为:  $HS > HH > HC > HM$ , 且 HS 显著大于其他 3 种林分类型 ( $P < 0.05$ ), 0~40 cm 土层的 DOC 表现为 HC 显著小于其他 3 种林分类型 ( $P < 0.05$ ); 除 0~20 cm 土层 HS 和 HH 的 MBC 差异不显著 ( $P > 0.05$ ) 外, 不同林分类型间、不同土层间的 MBC 均差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 3.3 不同红锥混交林土壤活性有机碳与有机碳的相关性分析

表 2 表明: 土壤 SOC 与土壤 EOC、POC、MBC 间呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 DOC 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 土壤 EOC 与土壤 POC、DOC、MBC 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 土壤 POC 与土壤 DOC 相关性不显著 ( $P > 0.05$ ), 与土壤 MBC 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 土壤 DOC 与 MBC

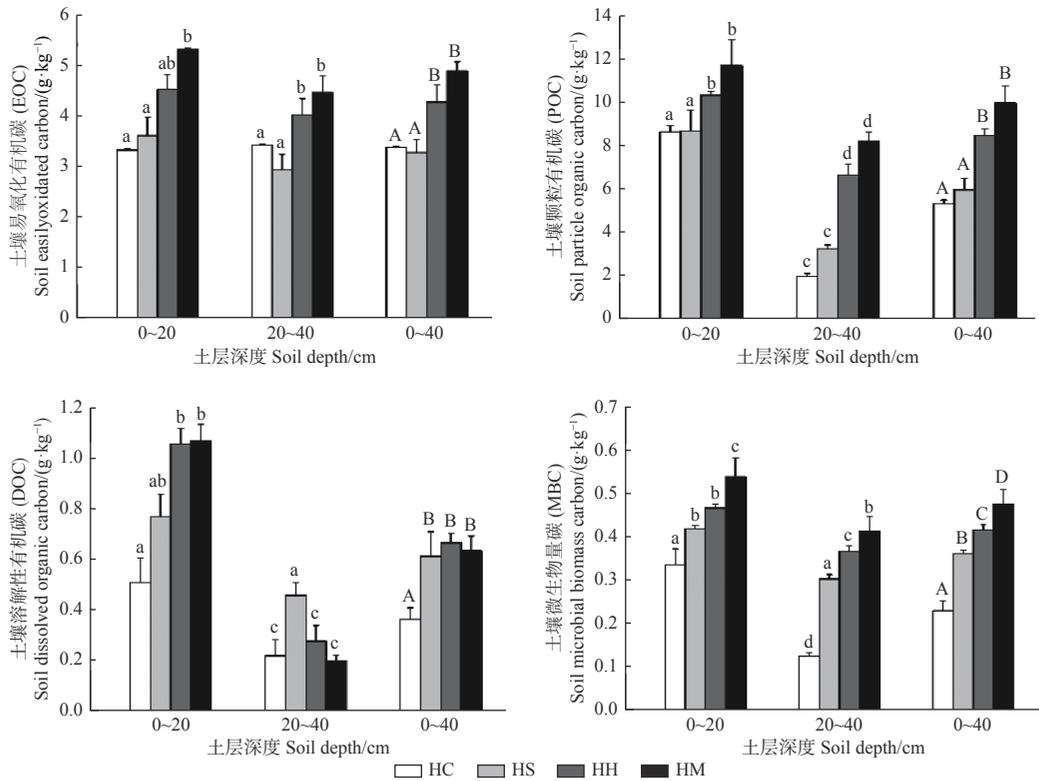


图 2 不同红锥混交林土壤活性有机碳含量

Fig. 2 The content of soil active organic carbon in different mixed plantation of *Castanopsis hystrix* Miq.

表 2 不同红锥混交林土壤活性有机碳与有机碳的相关性

Table 2 The relationship between soil active organic carbon and soil organic carbon of different mixed plantation of *Castanopsis hystrix* Miq.

指标 Index	SOC	EOC	POC	DOC	MBC
SOC	1				
EOC	0.722**	1			
POC	0.951**	0.625*	1		
DOC	0.603*	0.609*	0.498	1	
MBC	0.934**	0.588*	0.875**	0.734**	1

注: \*表示显著相关( $P < 0.05$ ) \*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )

Notes: \* means significant correlation at 0.05 level, and \*\* means extremely significant correlation at 0.01 level.

呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

### 3.4 不同红锥混交林碳库管理指数的变化

以 HC 土壤作为参照, 对其他 3 种红锥混交林的碳库管理指数 ( $CMI$ ) 进行计算, 结果 (表 3) 表明: 与对照相比, 4 种林分类型碳库活度 ( $L$ )、碳库指数 ( $CPI$ ) 和碳库管理指数 ( $CMI$ ) 在 0~20 cm 土层内均表现为:  $HM > HH > HS > HC$ , 其中, 4 种林分类型的  $L$  值差异不显著 ( $P > 0.05$ ),  $HS$  和  $HC$  间的  $CPI$  差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 其他林分间均差异显著 ( $P < 0.05$ ),  $HM$  和  $HH$  的  $CPI$  分别比  $HC$  增加了 53% 和 29%,  $HM$  的  $CMI$  显著大于其他 3 种林分, 比  $HC$  增加了 60.59%; 在 20~

表 3 不同红锥混交林碳库管理指数的变化

Table 3 The changes of carbon management index in different mixed plantation of *Castanopsis hystrix* Miq.

林型 Forest type	0~20 cm 土层 Soil layer			20~40 cm 土层 Soil layer			0~40 cm 土层 Soil layer		
	$L$	$CPI$	$CMI$	$L$	$CPI$	$CMI$	$L$	$CPI$	$CMI$
HC	0.25 a	1.00 a	100.00 a	0.53 a	1.00 a	100.00 a	0.34 a	1.00 a	100.00 a
HS	0.26 a	1.06 a	114.37 a	0.32 b	1.25 b	74.23 b	0.29 a	1.13 a	95.04 a
HH	0.27 a	1.29 b	138.19 a	0.37 ab	1.49 c	107.18 a	0.31 a	1.37 b	124.41 ab
HM	0.27 a	1.53 c	160.59 b	0.38 ab	1.63 c	116.88 a	0.31 a	1.57 c	140.20 b

40 cm 土层内 HC 的  $L$  值大于其他 3 种林分, 且 HS 显著小于 HC ( $P < 0.05$ ), HM 和 HH 的  $CPI$  显著大于其他 2 种林分, HS 的  $CMI$  显著小于其他 3 种林分, 比 HM 降低了 36.49%, 比 HC 降低了 25.77%; 在 0~40 cm 土层内, 4 种林分类型  $L$  值差异不显著性 ( $P > 0.05$ ), HM 的  $CPI$  和  $CMI$  显著大于对 HS 和 HC ( $P < 0.05$ ), 与 HC 相比, 分别高出了 57.00% 和 40.20%。

## 4 讨论

### 4.1 不同红锥混交林土壤有机碳含量变化特征

森林生态系统中植被凋落物、根系分布及外界耕作措施等因素直接作用于表土, 其分解产物不断被土壤固持和稀释, 最终导致土壤表层有机碳 (SOC) 含量较高<sup>[22]</sup>。本研究表明, 红锥纯林和 3 种红锥混交林的 SOC 含量随着土层深度的加深而逐渐减少, 与杨-桉短期混交林地土壤养分的变化一致<sup>[23]</sup>。本研究中, 0~40 cm 土层 SOC 的含量代表了整个林分有机碳的水平, 其结果表明: HM 和 HH 的阔叶混交模式其 SOC 含量显著大于 HS 的针阔混交模式和 HC, 且红锥+米老排混交林 (HM) 的 SOC 含量显著大于其他林分。森林中 SOC 含量受到植被凋落物的输入量和分解速率等因素的影响<sup>[24]</sup>。红锥+湿地松的针阔混交模式 (HS) 中, SOC 含量较低可能是由于针叶质地粗硬, 纤维素含量高, 表皮富被蜡质层, 透水性能差<sup>[25]</sup>, 导致其林分凋落物分解缓慢, 减少了有机碳在土壤中的积累。研究表明, 北亚热带地区木荷-青冈栎混交林土壤活性碳库高于杜英纯林<sup>[26]</sup>; 中亚热带典型林研究区土壤有机质含量表现为: 人工阔叶混交林 > 人工针阔混交林 > 人工阔叶纯林<sup>[27]</sup>; 南亚热带地区人工纯林生态系统碳储量表现为: 火力楠纯林 > 米老排纯林 > 红锥纯林 > 马尾松纯林 > 铁力木纯林, 其中, 红锥纯林碳储量处于中等水平, 且米老排纯林、红锥纯林、马尾松纯林和铁力木纯林的土壤有机碳储量差异较小<sup>[28]</sup>。本研究中, 土壤 SOC 含量表现为: 红锥人工阔叶混交林 > 红锥人工针阔混交林 > 红锥人工纯林, 说明南亚热带地区红锥混交林, 尤其是红锥人工阔叶混交林具有较强的土壤碳固存能力。

### 4.2 不同红锥混交林土壤活性有机碳含量变化特征

土壤活性有机碳主要来源于凋落物分解、土壤有机质水解、植物根系以及微生物群系的代谢产物<sup>[29]</sup>, 对外部环境敏感性较强, 对整个生态系统的

碳循环具有重要作用<sup>[30]</sup>。本研究结果表明: 4 种不同组分活性有机碳随着土层深度的增加逐渐减少, 不同林分活性有机碳与有机碳的趋势也基本相似, 与其有很好的正相关性, 该结果表明土壤活性有机碳含量在很大程度上是由 SOC 含量决定的, 不同林分类型决定了有机质的输入量, 从而影响了土壤中 SOC 的含量, 而 SOC 含量的高低决定了活性有机碳的含量<sup>[31]</sup>。前期研究表明, HM 和 HH 的阔叶混交模式土壤有机碳、全氮含量、全磷含量和土壤微生物量碳、氮含量显著高于 HS 和 HC<sup>[32]</sup>, 4 种不同活性有机碳的变化趋势与前期研究基本一致, 表明不同林分内植物凋落物、土壤腐殖质及微生物群系的差异造成土壤肥力和土壤微生物量的不同, 从而间接影响了土壤活性有机碳的含量。

在亚热带土壤中, 由  $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$  氧化而得的 EOC 值可以作为土壤活性有机碳一个很好的评价指标<sup>[33]</sup>, 但 Vieira 等<sup>[34]</sup>指出, 该指标在部分热带地区土壤中的响应并不敏感。本研究中, EOC 与 SOC 及其他活性有机碳都呈显著或极显著相关, 综合表明, 在南亚热带红锥混交林中, EOC 值可以作为土壤活性有机碳很好的评价指标。土壤颗粒有机碳 (POC) 由与沙砾结合的植物残体和微生物体组成, 该指标对 SOC 的变化非常敏感<sup>[35-36]</sup>, Skjemstad 等<sup>[37]</sup>曾用 POC 替代 EOC 计算碳库管理指数 ( $CMI$ )。在本研究中 POC 与 SOC 呈极显著正相关且相关系数达 0.951, 大于 EOC 与 SOC 的相关性, 但与 DOC 无显著相关, 该结果表明 POC 比 EOC 更敏感地反应了土壤有机质的动态变化, 但能否用于计算  $CMI$  仍有待进一步验证。土壤溶解性有机碳 (DOC) 是地表植被及覆盖物淋溶, 土壤根系分泌及微生物新陈代谢产物, 对土壤有机碳浓度及土壤物理化学循环过程产生重要的影响<sup>[38]</sup>。研究表明, 水土流失过程的差异性将影响土-水界面的物质交换过程<sup>[39]</sup>。本研究中, HS 内 20~40 cm 土层中 DOC 的含量显著大于其他 3 种林分, 最终对整个林分 DOC 的含量产生重要影响, 其原因可能是针阔混交林中针叶保水效果差, DOC 随径流、壤中流下渗速度快, 从而导致林分下层土壤 DOC 含量高于其他林分, 其具体原因仍待进一步研究。土壤微生物量碳 (MBC) 是土壤碳库中较为活跃的部分之一, 在土壤碳循环中起重要作用, 也是表征土壤生物肥力的重要指标<sup>[40]</sup>。本研究中, 0~40 cm 土层, 不同林分类型

MBC 之间均呈显著差异且 HM 的 MBC 最高, MBC 与 SOC 的相关性仅次于 POC 与 SOC, 且与 POC、DOC、EOC 均呈显著或极显著正相关, 表明 MBC 对其他组分活性有机碳密切相关, 其活跃性大, HM 的土壤生物肥力最高。

#### 4.3 不同红锥混交林土壤碳库管理指数特征

土壤有机碳库与全球碳循环密切相关, 其积累和分解直接影响全球的碳平衡<sup>[41]</sup>。土壤碳库活度 ( $L$ )、碳库指数 ( $CPI$ ) 和碳库管理指数 ( $CFI$ ) 均反映了土壤有机碳库的质量, 其值越大, 碳库质量越高<sup>[42]</sup>, 其中,  $L$  增加表示有机碳越易于被微生物分解和被植物吸收利用,  $CPI$  和  $CFI$  的增加分别表示该林地土壤碳积累能力和碳库稳定性比参考土壤有所提升<sup>[43]</sup>。本研究结果表明, 整个林分内,  $L$  无显著差异,  $CPI$  表现为混交林大于 HC, 阔叶混交显著大于针阔混交; 整个林分内  $CFI$  表现为阔叶混交大于 HC, 针阔混交小于 HC, 但在 0~20 cm 土层中, 混交林  $CFI$  都大于 HC。该结果表明, 红锥混交林同时提高了土壤活性碳含量和非活性碳的含量, 而不同红锥混交林中土壤有机碳提升比例较大, 导致土壤碳积累能力比红锥纯林高, 但 HS 的针阔混交模式碳库稳定性比红锥纯林有所下降, 主要是由于其 20~40 cm 土层内土壤活性有机碳严重下降造成的。综合三者的变化表明: 与 HC 相比, HM 的阔叶混交模式土壤碳库质量最高, 更有利于碳循环和碳平衡。

## 5 结论

4 种林分类型土壤有机碳 (SOC) 及活性有机碳 (EOC、POC、DOC、MBC) 含量随着土层深度的增加而降低, 有机碳与各组分活性有机碳密切相关, 但与颗粒有机碳 (POC) 关系最密切; 红锥阔叶混交林较红锥针阔混交林更有利于土壤有机碳积累, 改善土壤质地, 其有机碳含量和碳库活度 ( $L$ ) 主要受表层 (0~20 cm) 土壤的影响, 而碳库管理指数 ( $CFI$ ) 主要受下层 (20~40 cm) 土壤的影响, 且红锥+米老排 (HM) 的阔叶混交模式土壤碳库质量最高, 在 SOC 和 EOC、POC、DOC、MBC 增加的同时, 更有利于惰性碳的固存及碳库的稳定性。

#### 参考文献:

[1] Chu J, Zhu F, Chen X, et al. Effects of cadmium on photosynthesis of

*Schima superba* young plant detected by chlorophyll fluorescence[J].

Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(11): 1-9.

[2] 杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1226-1236.

[3] 吴亚丛, 李正才, 程彩芳, 等. 林下植被抚育对樟树人工林土壤活性有机碳库的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3341-3346.

[4] Lefroy R D B, Blair G, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and <sup>13</sup>C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155(1): 399-402.

[5] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 林业科学研究, 2011, 24(6): 754-759.

[6] 王晖. 南亚热带四种人工林土壤碳固持及其主要相关过程研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.

[7] 明安刚, 刘世荣, 莫慧华, 等. 南亚热带红锥、杉木纯林与混交林碳贮量比较[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 244-251.

[8] Forrester D I, Pares A, O'Hara C, et al. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of eucalyptus and nitrogen-fixing acacia[J]. Ecosystems, 2013, 16(1): 123-132.

[9] 林文树, 穆丹, 王丽平, 等. 针阔混交林不同演替阶段表层土壤理化性质与优势林木生长的相关性[J]. 林业科学, 2016, 52(5): 17-25.

[10] 管杰然, 商天其, 伊力塔, 等. 天目山常绿落叶阔叶混交林优势种生物量变化及群落演替特征[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6761-6772.

[11] 彭玉华, 谭长强, 郑威, 等. 环境因子对广西红锥幼林生长的影响[J]. 生态科学, 2020, 39(2): 90-94.

[12] 闫玮明, 孙冰, 裴英才, 等. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 898-907.

[13] 何斌, 梁伟克, 陈文军, 等. 湿地松、杉木林取代马尾松林后土壤肥力的差异[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 11-13.

[14] 卢立华, 贾宏炎, 农友, 等. 红锥经营模式对林木生长及乔木层碳储量的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 63-66.

[15] 唐靓茹. 南亚热带4种红锥人工林碳储量研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.

[16] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 166-167.

[17] Blair G J, Lefroy R D B, Singh B P, et al. Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate[J]. Driven by Nature Plant Litter Quality and Decomposition, 1997, 46(7): 1459-1466.

[18] Jenkinson D S, Powelson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass[J]. Soil Biol Biochem, 1976, 8(3): 209-213.

[19] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山西坡不同海拔梯度表层土壤碳氮变化特性的研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 240-246.

[20] 吕国红, 周广胜, 周莉, 等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应

- 用[J]. 气象与环境学报, 2006, 22 (2): 51-55.
- [21] 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): 1459-1466.
- [22] 段 斐, 方江平, 周晨霓. 西藏原始暗针叶林凋落物有机碳释放特征与土壤有机碳库关系研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (3): 349-355.
- [23] 张贾宇, 徐叶宁, 陶慧颖, 等. 杨-桉短期混交的林地土壤养分异质性[J]. 生态环境学报, 2018, 27 (2): 216-223.
- [24] 张广帅, 张全军, 于秀波, 等. 不同地下水水位灰化墓草分解过程中木质素降解与碳、氮、磷释放的关系[J]. 生态学报, 2019, 40 (9): 3006-3015.
- [25] 刘 欣, 彭道黎, 邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24 (4): 735-743.
- [26] 程彩芳, 李正才, 周君刚, 等. 北亚热带地区退化灌木林改造为人工阔叶林后土壤活性碳库的变化[J]. 林业科学研究, 2015, 28 (1): 101-108.
- [27] 曹小玉, 李际平, 委 霞. 中亚热带典型林分空间结构对土壤养分含量的影响[J]. 林业科学, 2020, 56 (1): 20-28.
- [28] 郑 路, 蔡道雄, 卢立华, 等. 南亚热带不同树种人工林生态系统碳库特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34 (12): 110-116.
- [29] 肖 焱, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. 生态学报, 2015, 35 (23): 42-50.
- [30] 吴江琪, 马维伟, 李 广, 等. 杂海湿地沼泽化草甸中不同积水区土壤活性有机碳含量[J]. 湿地科学, 2017, 15 (1): 137-143.
- [31] 荣 丽, 李守剑, 李贤伟, 等. 不同退耕模式细根(草根)分解过程中C动态及土壤活性有机碳的变化[J]. 生态学报, 2011, 31 (1): 139-146.
- [32] 唐靛茹, 刘雄盛, 蒋 焱, 等. 红锥4种林型土壤理化性质及微生物量差异分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40 (1): 76-81.
- [33] 张慧玲, 吴建平, 熊 鑫, 等. 南亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应[J]. 生态学报, 2018, 38 (2): 657-667.
- [34] Vieira F C B, Bayer C, Zanatta J A, *et al.* Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1-2): 195-204.
- [35] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
- [36] Bayer C, Dick D P, Ribeiro G M, *et al.* Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect[J]. Ciência Rural, 2002, 32(3): 401-406.
- [37] Skjemstad J O, Swift R S, McGowan J A. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon[J]. Australian Journal of Soil Research, 2006, 44(3): 255-263.
- [38] 蒲玉琳, 叶 春, 张世榕, 等. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. 生态学报, 2017, 37 (2): 367-377.
- [39] 庞学勇, 包维楷, 吴 宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15 (3): 390-398.
- [40] 赖家明, 李开志, 黄从德, 等. 不同改造措施对马尾松低效林土壤活性有机碳的影响[J]. 林业科学研究, 2013, 26 (2): 167-173.
- [41] 胡海清, 罗碧珍, 罗斯生, 等. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展[J]. 林业科学, 2020, 56 (4): 163-172.
- [42] 徐 鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 环境科学, 2013, 34 (10): 4009-4016.
- [43] 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, 2018, 39 (15): 5548-5554.

# The Change of Soil Carbon Stabilization and Carbon Management Index in Different Mixed Plantations of *Castanopsis hystrix* in Subtropical Area of South China

WANG Ren-jie<sup>1</sup>, JIANG Yi<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, LIU Ting-wei<sup>1</sup>,  
TANG Jing-ru<sup>2</sup>, LIU Xiong-sheng<sup>1</sup>, HUANG Rong-lin<sup>1</sup>

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning 530002, Guangxi, China; 2. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hu'nan, China)

**Abstract:** [Objective] To study the soil organic carbon pool of different plantations of *Castanopsis hystrix* mixed forest and its stability in order to provide reference for the evaluation of carbon balance process and the selection of mixed models of *C. hystrix* mixed plantations in subtropics of south China. [Method] The *C. hystrix* pure forest (HC), *C. hystrix* + *Pinus elliottii* mixed forest (HS), *C. hystrix* + *Michelia macclurei* mixed forest (HH), *C. hystrix* + *Mytilaria laosensis* mixed forest (HM) were used as trial objects in this study, and the changes of soil organic carbon (SOC), easily oxidizable carbon (EOC), particle organic carbon (POC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC) and carbon pool management index (CMI) of different mixed plantations were analyzed. [Result] The contents of SOC, EOC, POC, DOC, and MBC decreased with the increase of soil depth in the four kinds of mixed plantations. SOC had a significant positive correlation with EOC, POC, and MBC ( $P < 0.01$ ), and the correlation coefficient between SOC and POC was the largest. The order of SOC content was HM > HH > HS > HC among different stands, and the change of 0-20 cm soil layer was consistent with that of the whole stand (0-40 cm soil layer). The change of CMI in 20-40 cm soil layer was consistent with that of the whole stand, and the order was HM > HH > HC > HS. [Conclusion] The contents of SOC, EOC, POC, DOC and MBC are mainly affected by the surface soil, CMI is mainly affected by the subsoil, and the POC content is most closely related with SOC in the four mixed plantations. The *C. hystrix* broadleaved mixed forests can improve soil fertility and soil quality, and the broadleaved mixed model of HM has the highest soil carbon pool quality, with the increase of organic carbon and activated carbon, it also contributes to the accumulation of inert carbon and the stability of carbon pool.

**Keywords:** south subtropical forests of China; the mixed plantations of *Castanopsis hystrix* Miq.; labile organic carbon; soil carbon stabilization; carbon management index

(责任编辑: 徐玉秀)