

## 广西不同林龄马尾松人工林土壤碳储量动态变化<sup>\*</sup>

李玉凤<sup>1,2</sup>, 马姜明<sup>1,2,3\*\*</sup>, 何静桦<sup>1,2</sup>, 秦佳双<sup>1,2,4</sup>, 零天旺<sup>5</sup>, 李明金<sup>5</sup>, 杨章旗<sup>3</sup>, 王永琪<sup>1,2</sup>, 宋尊荣<sup>1,2</sup>

(1. 广西师范大学, 可持续发展创新研究院, 广西桂林 541006; 2. 珍稀濒危动植物生态与环境教育重点实验室, 广西桂林 541006; 3. 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西南宁 530002; 4. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006; 5. 横县镇龙林场, 广西南宁 530327)

**摘要:** 为了解不同林龄马尾松 *Pinus massoniana* 人工林土壤碳储量的动态变化, 选取广西横县镇龙林场不同林龄(幼龄林、中龄林、成熟林、过熟林)的马尾松人工林为研究对象, 对林地土壤有机碳含量及土壤碳储量的变化特征进行研究, 并探讨其影响因素。研究表明, 随着林龄递增, 各土层土壤有机碳含量及土壤碳储量总体表现为增加趋势, 且不同林龄的同一土层之间均差异显著。不同林龄 0—60 cm 土层土壤有机碳含量表现为过熟林(16.82±0.23) g/kg>成熟林(13.47±0.14) g/kg>中龄林(10.91±0.38) g/kg>幼龄林(10.74±0.14) g/kg, 且差异显著( $P<0.05$ )。不同林龄 0—60 cm 土层土壤碳储量表现为过熟林(104.92±18.08) t/hm<sup>2</sup>>成熟林(100.52±1.18) t/hm<sup>2</sup>>中龄林(80.25±5.34) t/hm<sup>2</sup>>幼龄林(80.23±4.54) t/hm<sup>2</sup>, 且差异显著( $P<0.05$ )。各林龄土壤有机碳含量、土壤碳储量主要集中在 0—20 cm 土层, 并随土层深度的增加而递减, 表现为土壤碳表聚现象, 表层(0—20 cm)土壤碳储量所占比例均明显高于其他土层, 表明不同林龄主要影响马尾松人工林土壤表层的碳含量; 不同林龄土壤有机碳含量、土壤碳储量与乔木、灌木层 Shannon-Wiener 指数、物种丰富度、凋落物层现存量、总孔隙度、土壤含水量、土壤 pH 值均无显著相关关系( $P>0.05$ ), 与根系生物量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ), 与土壤容重呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ); 群落总生物量、地上部分生物量均与表层(0—20 cm)土壤有机碳含量和土壤碳储量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ), 与 20—40, 40—60 cm 土层土壤有机碳含量呈显著正相关关系( $P<0.05$ ), 而与后两个土层的土壤碳储量均无显著相关。该结果为研究土壤碳储量动态变化提供科学依据, 有利于实现尾松人工林多目标可持续经营。

**关键词:** 土壤有机碳含量 土壤碳储量 影响因子 林龄 马尾松人工林

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2020)06-0638-08

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20210119.004

### 0 引言

全球和区域碳循环是当前全球气候变化研究的

核心, 土壤作为陆地生态系统碳循环的重要来源, 通过碳排放和固定作用对生态系统碳循环产生直接影响<sup>[1]</sup>。土壤有机碳是表征土壤质量的重要指标, 除可

<sup>\*</sup> 广西创新驱动发展专项课题(桂科 AA17204087-7), 桂林市科学研究与技术开发计划项目(20190205, 20180107-3), 广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题(2019-B-04-01)和广西研究生教育创新计划项目(XYCSZ2019081)资助。

#### 【作者简介】

李玉凤(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。

#### 【\*\*通信作者】

马姜明(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事退化生态系统的恢复与重建研究, E-mail: mjming03@163.com。

#### 【引用本文】

李玉凤, 马姜明, 何静桦, 等. 广西不同林龄马尾松人工林土壤碳储量动态变化[J]. 广西科学, 2020, 27(6): 638-645.

LI Y F, MA J M, HE J H, et al. Dynamic Changes of Soil Carbon Storage of *Pinus massoniana* Plantations at Different Stand Ages in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(6): 638-645.

作为养分来源外,还可改善土壤结构和保水能力,增强生物活性,并对土壤肥力的可持续产生重要影响。森林有机碳库对气候变化、碳平衡等方面调控作用显著<sup>[2]</sup>。全球土壤有机碳库约为1 500 Pg,土壤中有有机形式的碳储存量是大气中碳储存量的2倍,并且在联合国政府气候变化专门委员会(IPCC)大多数气候区域中,土壤有机碳储存量是植被碳库的2—3倍<sup>[3]</sup>。土壤碳库体量巨大,其微小变化也可能会对全球碳循环以及气候变化产生重要影响,因此土壤有机碳的储存可作为缓解气候变化的一个廉价而有效的选择<sup>[4]</sup>。大量研究表明,环境、生物及人类活动等诸多因子均会影响土壤碳储量的分布,因此开展森林土壤碳储量动态变化研究意义重大<sup>[5]</sup>。近自然经营作为人工林新增碳汇的重要选择,主要促进人工林正向演替,包括朝异龄林时间结构发展以及形成多层林分状态,缩短演替时间,同时减少人为干扰<sup>[6]</sup>。本研究样地的幼龄林经过3 a左右除草抚育,之后未做任何抚育处理,树种和立地环境相适应。马尾松人工林由幼龄林近自然恢复到过熟林,林分结构出现变化进而影响其生物量 and 生产力,间接调控林分固碳能力和潜力<sup>[7]</sup>。

马尾松 *Pinus massoniana* 作为主要的松树人工林树种,是广西地区典型代表群落之一,具有耐干旱贫瘠、适应能力强等特性。广西马尾松人工林分布面积约  $2.443 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,占广西整个用材林面积的54.6%<sup>[8]</sup>。国内外学者对土壤有机碳含量及土壤碳储量的研究既集中于国家<sup>[9]</sup>、区域<sup>[10]</sup>等大尺度,同时也从具体森林类型方面展开<sup>[11]</sup>。目前,对土壤有机碳的研究主要集中在土地利用方式<sup>[12]</sup>、人类活动和地理特征<sup>[13]</sup>、森林经营管理措施以及环境因子<sup>[14,15]</sup>对土壤有机碳的影响等方面。本文通过研究南亚热带马尾松人工林近自然恢复过程中土壤碳储量的动态变化,为土壤肥力的提高及近自然恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于广西南宁市横县镇龙林场,地处广西横县北部,地理坐标为东经109°08′—109°19′,北纬23°02′—23°08′,属南亚热带季风气候区,海拔为

400—700 m,地貌类型以低山丘陵为主。年平均气温21.5℃,极端低温-1.0℃,极端高温39.2℃;年平均降雨量1 477.8 mm;年平均日照时长1 758.9 h,日照充足,热量充沛;土壤多为赤红壤,呈酸性或微酸性<sup>[16]</sup>。

### 1.2 样地设置与群落调查

在研究区域选取幼龄林(2012年种植)、中龄林(1999年种植)、成熟林(1986年种植)和过熟林(1960年种植)4种林龄类型为研究对象,在立地条件相似、长势较为一致的地段,各设置3个20 m×20 m的标准样地,共计12个,计算样地内植物Shannon-Wiener物种多样性指数、丰富度等特征指标<sup>[17]</sup>,各林龄样地概况见(表1)。

### 1.3 生物量的测定

本研究基于样地群落调查,采用收获法和建立各器官生物量模型的方法估测生物量。于2018年夏季7—8月,对样地内胸径≥5 cm的乔木进行每木检尺,灌木按照1 cm<胸径(DBH)<5 cm随机选取样品,每个等级选取3—5株,根据胸径、树高实测结果,选择适合本研究的已有乔木层生物量方程进行估算<sup>[16]</sup>。灌木层地上部分分为叶、枝、干、花果,分别称量其鲜质量,将样品放置于105℃烘箱内烘干2 h,然后85℃烘至恒重,测量出各器官干鲜质量比,以此计算各器官的干质量和总质量。根据样地实测数据估算其生物量,灌木层生物量模型为  $W_{灌} = a \times D^b \times H^c$ ,乔木层生物量模型为  $W_{乔} = a \times (D^2 H)^b$ ,式中, $D$ 表示胸径或基径(cm), $H$ 表示树高(m), $a$ 、 $b$ 和 $c$ 均为模型参数,具体参见文献<sup>[16]</sup>。

在每个样地分别设置5个1 m×1 m的草本样方,5个0.5 m×0.5 m的凋落物样方,收割样方内全部凋落物,把采集的样品带回实验室于85℃烘干至恒重,以此测算生物量<sup>[18]</sup>。根系总生物量采用平均木土柱取样法<sup>[19]</sup>,并按照平均木生长的坡向,明确平均木与相邻树木的树冠交点处,于交点处、交点处与平均木连线的中点分别挖取0.3 m×0.3 m土柱各3个<sup>[19]</sup>,将收获的所有根系划分为细根(直径≤0.2 cm)、小根(0.2<直径≤0.5 cm)、中根(0.5<直径≤1.0 cm)和粗根(直径>1.0 cm),将样品根系置于80℃条件下烘干至恒重后称量。

表 1 广西南亚热带马尾松人工林样地概况

Table 1 General situation of *P. massoniana* plantations plot in south subtropical area of Guangxi

林分类型 Stand types	林龄 Ages (a)	坡向 Aspect	坡位 Slope position	海拔 Elevation (m)	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均树高 Average tree height (m)	密度 Density (trees/hm <sup>2</sup> )	郁闭度 Canopy density	主要物种 Main species	
									灌木层 Shrub layer	乔木层 Arbor layer
幼龄林 Young stand	8	NW	中 Middle	313	10.55	5.65	1 300	0.7	展毛野牡丹、广西水锦树 <i>Melastoma normale</i> , <i>Wendlandia aberrans</i>	/
中龄林 Middle-aged stand	19	SE	中上 Mid-uphill	378	12.67	10.79	1 407	0.8	三桠苦、鹅掌柴 <i>Melicope pteleifolia</i> , <i>Schefflera heptaphylla</i>	山乌柏、鹅掌柴 <i>Sapium discolor</i> , <i>S. heptaphylla</i>
成熟林 Mature stand	34	N	中上 Mid-uphill	262	28.23	25.12	598	0.8	三桠苦、狭基润楠 <i>M. pteleifolia</i> , <i>Machilus attenuata</i>	狭基润楠、广西水锦树 <i>M. attenuata</i> , <i>W. aberrans</i>
过熟林 Overripe stand	60	SE	上 Uphill	258	41.27	26.55	197	0.8	纽子果、海南冬青 <i>Ardisia palysticta</i> , <i>Ilex hainanensis</i>	鹅掌柴、海南冬青、大叶栎 <i>S. octophylla</i> , <i>I. hainanensis</i> , <i>Quercus griffithii</i>

#### 1.4 土壤样品的采集、处理和析

在每个样地内进行土壤剖面挖掘,采用土钻(内径 5 cm)进行取样,按 0—20, 20—40 和 40—60 cm 深度进行分层,从下而上采集土壤样品,土壤样品室内自然风干,去除杂质后研磨过筛(孔径 0.15 mm)。每层采集环刀样品 3 个,采用环刀法测定各林分土壤容重、总孔隙度以及土壤含水量等指标。按土水质量比 1:2.5,用 pH 酸度计测定 pH 值。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化外加热法<sup>[20]</sup>测定,再根据土壤有机碳含量计算土壤碳储量:

$$SOC_n = \sum_{i=1}^n (1 - G_i) \times D_i \times C_i \times T_i / 10,$$

式中,  $SOC_n$  为分  $n$  层调查的单位面积土壤碳储量 ( $t/hm^2$ ),  $G_i$  为第  $i$  层直径  $\geq 2$  mm 的石砾含量(%),  $D_i$  为第  $i$  层土层容重 ( $g/cm^3$ ),  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量 ( $g/kg$ ),  $T_i$  为第  $i$  层土层厚度 (cm)。

#### 1.5 数据分析

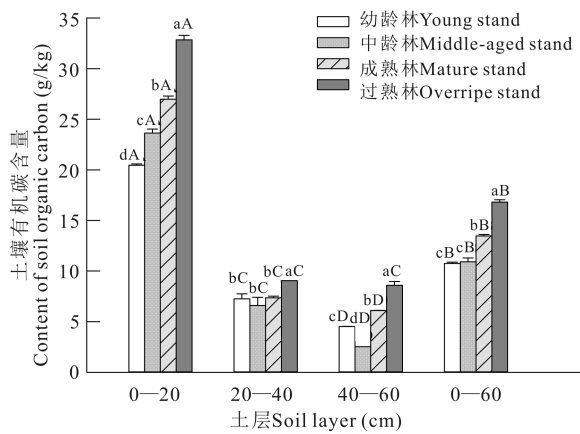
采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析、Duncan 多重比较和 Pearson 相关性分析,用 Sigmaplot 12.5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量的变化

由图 1 可知,除幼龄林与中龄林间差异不显著

外,不同林龄马尾松林土壤有机碳含量(0—60 cm)均差异显著( $P < 0.05$ ),随着林龄的增加,土壤有机碳含量递增,表现为过熟林( $16.82 \pm 0.23$ )  $g/kg >$  成熟林( $13.47 \pm 0.14$ )  $g/kg >$  中龄林( $10.91 \pm 0.38$ )  $g/kg >$  幼龄林( $10.74 \pm 0.14$ )  $g/kg$ 。土壤有机碳含量的最大值( $32.84 \pm 0.45$ )  $g/kg$  和最小值( $2.52 \pm 0.00$ )  $g/kg$  分别出现在过熟林 0—20 cm 和中龄林 40—60 cm 土层。随着林龄增加,土壤有机碳含量在 0—20 cm 土层呈持续增大的趋势,20—40 cm 土层与 40—60 cm 土层在中龄林阶段下降,之后不断升高,并在过熟林阶段达到最高,总体表现出波动性增加的趋势。20—40 cm 土层表现为过熟林显著高于其他林龄,其他林龄间差异不显著;不同林龄在 0—20 和 40—60 cm 土层均表现为差异显著。不同林龄马尾松林土壤有机碳含量随着土层深度的增加均呈逐渐减少的趋势,在垂直分布上表现为表层(0—20 cm)土壤有机碳含量最高,不同林龄主要影响土壤表层的碳含量。0—20, 20—40 和 40—60 cm 土层的平均土壤有机碳含量分别为( $25.97 \pm 5.30$ )  $g/kg$ , ( $7.56 \pm 1.04$ )  $g/kg$  和( $5.43 \pm 2.56$ )  $g/kg$ 。幼龄林、中龄林和成熟林的土壤有机碳含量在各土层之间均差异显著( $P < 0.05$ ),过熟林 20—40 cm 土层与 40—60 cm 土层的土壤有机碳含量差异不显著( $P > 0.05$ )。



不同小写字母表示同一土层不同林龄间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一林龄不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lower letters show significant differences under different stand ages in the same soil layer ( $P < 0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences among different levels of the components of the forest at the same stand age ( $P < 0.05$ )

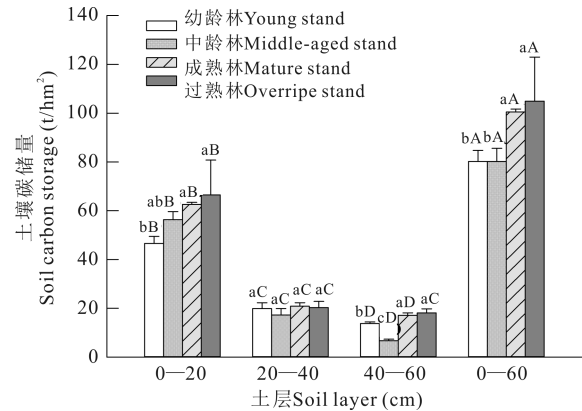
图1 不同林龄马尾松人工林各土层有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content in different soil layers in the *P. massoniana* plantations at different stand ages

## 2.2 土壤碳储量的变化

由图2可知, 成熟林和过熟林马尾松人工林土壤碳储量(0—60 cm 土层)显著高于幼龄林和中龄林 ( $P < 0.05$ ), 随着林龄的增加, 土壤碳储量亦递增, 表现为过熟林 ( $104.92 \pm 18.08$ )  $t/hm^2 >$  成熟林 ( $100.52 \pm 1.18$ )  $t/hm^2 >$  中龄林 ( $80.25 \pm 5.34$ )  $t/hm^2 >$  幼龄林 ( $80.23 \pm 4.54$ )  $t/hm^2$ 。不同林龄土壤碳储量的最大值 ( $66.51 \pm 14.29$ )  $t/hm^2$  和最小值 ( $6.68 \pm 0.66$ )  $t/hm^2$  分别出现在过熟林 0—20 cm 土层和中龄林 40—60 cm 土层。不同林龄 0—20 cm 土层土壤碳储量变化规律与 0—60 cm 土层基本一致, 在 20—40 cm 土层均无显著差异, 在 40—60 cm 土层表现为成熟林和过熟林显著高于其他林龄, 幼龄林显著高于中龄林。随着林龄的递增, 各土层土壤碳储量均表现为增大的趋势, 各林龄马尾松人工林土壤碳储量均随着土层深度的增加呈逐渐减少的趋势。0—20, 20—40 和 40—60 cm 土层平均土壤碳储量分别为 ( $58.00 \pm 8.69$ )  $t/hm^2$ , ( $19.57 \pm 1.59$ )  $t/hm^2$  和 ( $13.92 \pm 5.17$ )  $t/hm^2$ , 表层(0—20 cm)土壤碳储量均显著大于下层土壤 ( $P < 0.05$ ), 这主要是因为 0—20 cm 土层土壤有机碳含量最高。幼龄林、中龄林和成熟林的土壤碳储量在各土层之间均差异显著

( $P < 0.05$ ), 过熟林 20—40 cm 土层与 40—60 cm 土层的土壤碳储量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。



不同小写字母表示同一土层不同林龄间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一林龄不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lower letters show significant differences under different stand ages in the same soil layer ( $P < 0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences among different levels of the components of the forest at the same stand age ( $P < 0.05$ )

图2 不同林龄马尾松人工林各土层碳储量

Fig. 2 Soil carbon storage in different soil layers in the *P. massoniana* plantations at different stand ages

由图3可知, 幼龄林、中龄林、成熟林和过熟林土层 0—20 cm 土壤碳储量所占的比例分别为 58.06%, 70.18%, 62.27% 和 63.39%, 土壤碳储量主要集中于 0—20 cm 土层。中龄林 0—20 cm 土层所占比例相对较高, 不同林龄 20—40 cm 土层土壤碳储量所占比例相近。

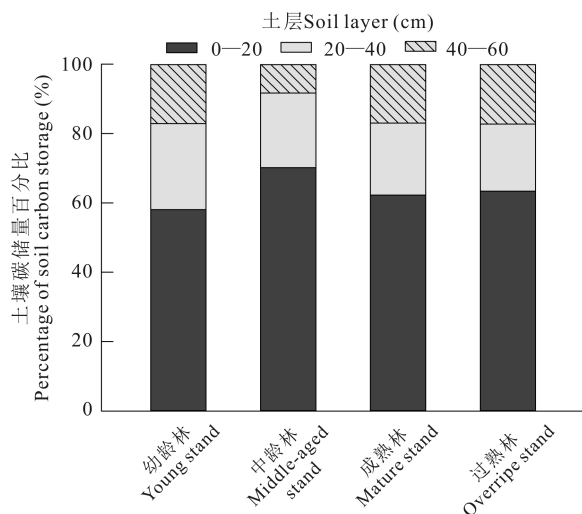


图3 不同林龄土壤碳储量在不同土层深度中的比例

Fig. 3 The proportion of soil carbon storage in different soil layers with different stand ages



### 2.3 植被群落特征及土壤相关指标对土壤有机碳含量、碳储量的影响

Pearson 相关性分析结果(表 2,3)表明,土壤有机碳含量、土壤碳储量与乔木层及灌木层 Shannon-Wiener 物种多样性指数、物种丰富度、凋落物层现存量、土壤 pH 值、总孔隙度、土壤含水量均无显著相关关系( $P > 0.05$ );与根系生物量呈极显著正相关关系

( $P < 0.01$ );与土壤容重呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),群落总生物量、地上部分生物量均与表层(0—20 cm)土壤有机碳含量和碳储量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与 20—40, 40—60 cm 土层土壤有机碳含量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),与后两个土层的土壤碳储量均不存在显著相关关系。

表 2 不同林龄土壤有机碳含量、碳储量与部分植被因子及土壤因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of soil organic carbon content, carbon storage, some vegetation factors, and soil factors in different stand ages

项目 Item	乔木层 Tree layer		灌木层 Shrub layer		根系生物量 Root biomass	凋落物层 现存量 Standing biomass in litter layer	pH 值 pH value	土壤容重 Soil bulk density (g/m <sup>3</sup> )	总孔隙度 Total porosity (%)	土壤含水量 Soil water content
	Shannon-Wiener 物种多样性指数 Shannon-Wiener species diversity index	物种丰富度 Species richness	Shannon-Wiener 物种多样性指数 Shannon-Wiener species diversity index	物种丰富度 Species richness						
土壤有机碳含量 Soil organic carbon content	0.782	0.843	-0.287	0.456	0.947**	0.370	-0.204	-0.840**	0.412	0.138
土壤碳储量 Soil carbon storage	0.860	0.890	-0.095	0.608	0.929**	0.413	-0.270	-0.797**	0.465	0.232

Note: \*\* means  $P < 0.01$

表 3 不同土层土壤有机碳含量、碳储量与群落及地上部分生物量的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient of soil organic carbon content, carbon storage, community and above ground biomass in different soil layers

项目 Item	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content			土壤碳储量 Soil carbon storage		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
群落总生物量 Community total biomass	0.958**	0.609*	0.696*	0.780**	0.168	0.470
地上部分生物量 Above-ground biomass	0.957**	0.604*	0.695*	0.776**	0.165	0.471

Note: \* means  $P < 0.05$ , \*\* means  $P < 0.01$

## 3 讨论

### 3.1 土壤有机碳含量特征

土壤有机碳含量主要由土壤中有机质的生物积累以及分解能力决定<sup>[21]</sup>,可作为土壤含碳丰富度的直接表征<sup>[11]</sup>,同时可作为土壤肥力高低的重要化学指标之一。本研究中,0—20 cm 土层有机碳含量为(25.97±5.30) g/kg,与全国马尾松人工林 0—20 cm 土层有机碳含量平均值(22.0 g/kg)接近<sup>[22]</sup>。各林龄土壤有机碳含量为 2.52—32.84 g/kg,广西桂林马尾松人工林(37 a)0—60 cm 土层土壤有机碳含量<sup>[11]</sup>在本研究范围之内。不同林龄马尾松人工林 0—60 cm 土层土壤有机碳含量均高于广西柳州<sup>[23]</sup>

及贵州省马尾松人工林各林龄 0—60 cm 土层土壤有机碳含量<sup>[24]</sup>。主要原因可能是南亚热带地区具有较好的水热条件,对有机碳积累有抑制作用<sup>[25]</sup>。

随着林龄递增,土壤有机碳含量总体表现出不断增加趋势,这与已有研究结果一致<sup>[24]</sup>,可能是植被胸径、郁闭度不断增大等因素导致的。在垂直空间分布上,各林龄土壤有机碳含量均随着土层加深而降低,表层(0—20 cm)土壤有机碳含量明显高于下层土壤,具有明显表聚现象,表明林龄主要影响土壤表层的碳含量,这与已有结论一致<sup>[3,11,26]</sup>。其原因可能是样地中马尾松人工林植被较为丰富,根系及凋落物层分解物首先积累于表层土壤,使得表层土壤有机碳含量明显高于深层土壤,即不同林龄土壤有机碳含量具

有典型的表聚性<sup>[26]</sup>。

### 3.2 土壤碳储量变化特征

本研究中,幼龄林、中龄林、成熟林和过熟林土壤碳储量分别为 $(80.23 \pm 4.54) \text{ t/hm}^2$ ,  $(80.25 \pm 5.34) \text{ t/hm}^2$ ,  $(100.52 \pm 1.18) \text{ t/hm}^2$  和  $(104.92 \pm 18.08) \text{ t/hm}^2$ , 均低于我国森林土壤碳储量的平均值  $107.8 \text{ t/hm}^2$ <sup>[9]</sup>, 高于肖欣等<sup>[27]</sup>对江西马尾松人工林土壤碳储量的研究结果, 低于贵州省马尾松人工林各林龄 0—60 cm 土层土壤碳储量<sup>[24]</sup>, 土壤碳储量的区域差异性较明显, 这可能与各区域的气候、环境条件、土壤理化性质及人为干扰有关。

在一定林龄范围内,马尾松人工林由幼龄林近自然恢复到过熟林,森林土壤通常表现为碳积累过程,即土壤碳储量呈增加趋势,这与前人大多数研究结果一致<sup>[24,25]</sup>。随着林龄增长,林木间存在竞争愈烈,林分凋落物处于增加的状态,促进土壤有机碳的积累,土壤固碳能力得到增强,研究表明过熟林具有较高的碳固持能力<sup>[28]</sup>。因此,在不影响生产力和经济效益的前提下,适当延长人工林的培育周期将有助于固碳能力提升<sup>[24]</sup>。进一步研究表明过熟林通过改善林地土壤结构,促进土壤有机质的形成和积累,进而有效提高林地土壤肥力<sup>[21]</sup>。本研究显示,不同林龄土壤碳储量均随着土层深度增加而下降,不同林龄 0—20 cm 土层土壤碳储量所占比例分别为 58.06%, 70.18%, 62.27% 和 63.39%, 表明马尾松林主要通过影响土壤表层碳含量进而对其碳储量产生重要作用。因此,应加强地表植被层的保护,减少人为活动的干扰,有利于提高和维持土壤层有机碳库的稳定<sup>[2]</sup>。

### 3.3 土壤有机碳含量、土壤碳储量的影响因素

不同林龄土壤有机碳含量、土壤碳储量与植被因子、土壤因子间均存在不同相关性。植物物种多样性的升高对于植物根部土壤碳的积累具有积极影响,有利于土壤有机碳积累,增加土壤碳储量<sup>[29]</sup>。各林龄阶段,土壤有机碳含量、土壤碳储量与乔木层及灌木层的 Shannon-Wiener 物种多样性指数、物种丰富度间均无显著相关,这与前人大多数研究结果一致<sup>[17,30]</sup>。Andrew 等<sup>[31]</sup>研究认为,土壤有机碳含量与 Shannon-Wiener 物种多样性指数之间不存在明显相关关系,这与本研究结果一致,可能是因为马尾松林地氮磷存储较少,而氮磷含量对于植物多样性具有一定的抑制作用<sup>[32]</sup>。

近自然恢复过程中,土壤理化性质的变化是影响

有机碳库的重要原因<sup>[2]</sup>。研究表明,土壤 pH 值可用于预测微生物对土壤有机碳稳定性的直接或间接控制,较低的土壤 pH 值,对于微生物活性和数量具有抑制作用,从而促进有机碳积累<sup>[33]</sup>,这与杜虎等<sup>[5]</sup>研究结果一致。土壤有机碳含量和土壤碳储量均与土壤容重呈极显著( $P < 0.01$ )负相关关系<sup>[2]</sup>,土壤容重变小,土壤含水量和土壤总孔隙度升高,致使土壤有机碳含量增加。土壤含水量通过影响溶质和氧气的扩散进而影响土壤有机碳矿化,如果含水量过低或过高,则会抑制土壤有机碳的分解<sup>[33]</sup>。土壤有机碳含量和碳储量与根系生物量、群落总生物量和地上部分生物量的表层土壤呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ )<sup>[2]</sup>,而与其他指标相关性较弱,表明这些因子对土壤表层碳含量影响较大,可能是研究样地的水热条件、气候特征、森林经营管理、土壤发育状况以及各种扰动等因素的综合作用,影响了有机碳含量的输入与输出,使其呈现出一定的动态变化,其影响因子表现出多样性和复杂性<sup>[34]</sup>。植被生物量对植被生产力和固碳能力具有重要指示作用,随着林龄增长,群落植物种类增加,物种多样性指数整体增大,群落总生物量和地上部分生物量增加,根系<sup>[2]</sup>及地表枯落物层现存量<sup>[35]</sup>逐渐增多,使得凋落物层质量明显改善,有机碳来源增加<sup>[2]</sup>。

## 4 结论

本研究表明,随着林龄增长,土壤碳储量呈现增加趋势,总体上表现出碳汇效应,说明马尾松人工林由幼龄林近自然恢复到过熟林的过程中,林下土壤有机碳含量及碳储量等生态功能指标均有所提升,有利于土壤碳的累积和土壤质量的提高。森林土壤有机碳含量、碳储量受到多种因子调控,在今后的研究中应综合考虑植被、土壤、地形及人类活动等生物和环境因子。本研究结果为研究土壤碳储量动态变化提供了科学依据,有利于实现马尾松人工林多目标可持续经营。

### 参考文献

- [1] 王荔,曾辉,张扬建,等. 青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3506-3515.
- [2] 辜翔,张仕吉,刘兆丹,等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 595-608.
- [3] MAYER M, PRESCOTT C E, ABAKER W E A, et al.

- Tamm review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 1-25.
- [4] DAVID W, FRANK K, TADESSE F, et al. A natural tropical freshwater wetland is a better climate change mitigation option through soil organic carbon storage compared to a rice paddy wetland [J]. *SN Applied Science*, 2020, 2: 325 - 336. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2746-8>.
- [5] 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 282-291.
- [6] 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 等. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J]. *世界林业研究*, 2009, 22(1): 20-27.
- [7] 明安刚, 刘世荣, 李华, 等. 近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(23): 7833-7842.
- [8] 潘小梅, 李明金, 杨章旗, 等. 广西南亚热带不同林龄马尾松人工林林下植物区系研究[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 37(4): 136-143.
- [9] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [10] RIAL M, MARTÍNEZ CORTIZAS A, RODRÍGUEZ-LADO L. Understanding the spatial distribution of factors controlling topsoil organic carbon content in European soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1411-1422.
- [11] 马姜明, 梁士楚, 杨栋林, 等. 桂北地区桉树林及其他三种森林类型土壤有机碳含量及密度特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1282-1287.
- [12] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素——以后寨河喀斯特小流域为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1056-1067.
- [13] ZHANG Z M, ZHOU Y C, WANG S J, et al. The soil organic carbon stock and its influencing factors in a mountainous karst basin in P. R. China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2019, 34(3): 1031-1043.
- [14] 李翀, 周国模, 施拥军, 等. 不同经营措施对毛竹林生态系统净碳汇能力的影响[J]. *林业科学*, 2017, 53(2): 1-9.
- [15] O'ROURKE S M, ANGERS D A, HOLDEN N M, et al. Soil organic carbon across scales [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 3561-3574.
- [16] 秦佳双, 李玉凤, 马姜明, 等. 广西不同气候条件下马尾松人工林生物量模型构建及分配格局[J]. *广西科学*, 2020, 27(2): 165-174.
- [17] 朱育锋, 肖智华, 彭晚霞, 等. 广西不同龄级桉树人工林植物多样性和群落结构动态变化特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(12): 38-44.
- [18] 温远光, 张祖峰, 周晓果, 等. 珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响[J]. *广西科学*, 2020, 27(2): 111-119.
- [19] 马姜明, 刘世荣, 刘兴良. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中根系生物量研究[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 28(3): 56-60.
- [20] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [21] 惠淑荣, 颜翎羽, 胡万良, 等. 不同红松林型下土壤理化性质差异的初步研究[J]. *福建林业科技*, 2008, 35(1): 117-119, 175.
- [22] 王大鹏, 王文斌, 郑亮, 等. 中国主要人工林土壤有机碳的比较[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 698-704.
- [23] 陶玉华, 向达永, 郭耆, 等. 柳州市三种人工林土壤有机碳储量的空间分布[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(10): 1990-1993.
- [24] 秦晓佳, 丁贵杰. 不同林龄马尾松人工林土壤有机碳特征及其与养分的关系[J]. *浙江林业科技*, 2012, 32(2): 12-17.
- [25] 陈莉, 宋敏, 宋同清, 等. 广西不同林龄阔林碳储量及其分配格局[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 592-600.
- [26] 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.
- [27] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(6): 105-111.
- [28] CHEN S, WAN W, XU W, et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4027-4032.
- [29] LUYSSAERT S, SCHULZE E D, BÖRNER A, et al. Old-growth forests as global carbon sinks [J]. *Nature*, 2008, 455(7210): 213-215.
- [30] 向凯旋, 张喜, 刘济明, 等. 石漠区柏木林植物多样性指数与土壤理化指标的相关性[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(8): 1771-1778.
- [31] ANDREW S M, TOTLAND O, MOE S R. Spatial variation in plant species richness and diversity along human disturbance and environmental gradients in a tropical wetland [J]. *Springer Netherlands*, 2015, 23(3): 395-404.
- [32] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 等. 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 732-738.
- [33] SUN D, MINGMING Z, SHIYU L, et al. The effects of the soil environment on soil organic carbon in tea plantations in Xishuangbanna, southwestern China [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2020, 297: 1-12.
- [34] 许仁智, 齐国翠, 谢彦军, 等. 广西东兰坡豪湖湿地表层土壤理化性质相关性分析[J]. *河池学院学报*, 2019, 39(5): 44-50.
- [35] 田思惠, 柳鑫, 金宝成, 等. 三工河流域琵琶柴群落凋落物对土壤有机碳固定的影响[J]. *生态学报*, 2019,

39(14):5339-5347.

## Dynamic Changes of Soil Carbon Storage of *Pinus massoniana* Plantations at Different Stand Ages in Guangxi

LI Yufeng<sup>1,2</sup>, MA Jiangming<sup>1,2,3</sup>, HE Jinghua<sup>1,2</sup>, QIN Jiashuang<sup>1,2,4</sup>, LING Tianwang<sup>5</sup>,  
LI Mingjin<sup>5</sup>, YANG Zhangqi<sup>3</sup>, WANG Yongqi<sup>1,2</sup>, SONG Zunrong<sup>1,2</sup>

(1. Institute for Sustainable Development and Innovation, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guilin, Guangxi, 541006, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning, Guangxi, 530002, China; 4. Guangxi Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China; 5. Zhenlong Forest Farm of Hengxian, Nanning, Guangxi, 530327, China)

**Abstract:** The objective of this study was to understand the dynamic changes of soil carbon storage in *Pinus massoniana* plantations of different stand ages. The *P. massoniana* plantations of different ages (young stand, middle-aged stand, mature stand, and overripe stand) of Zhenlong Forest Farm of Hengxian in Guangxi were selected as the research object to study the change characteristics of forest soil organic carbon content and soil carbon storage, and discuss its influencing factors. The results showed that with the growth of stand age, the soil organic carbon content and soil carbon storage of each soil layer showed an overall increasing trend, and there were significant differences in different forest ages of the same soil layer. The soil organic carbon content in the 0–60 cm soil layer at different stand ages was as follows: Overripe stand ( $16.82 \pm 0.23$  g/kg) > mature stand ( $13.47 \pm 0.14$  g/kg) > middle-aged stand ( $10.91 \pm 0.38$  g/kg) > young stand ( $10.74 \pm 0.14$  g/kg), and the difference was significant ( $P < 0.05$ ). The soil carbon storage in the 0–60 cm soil layer at different stand ages was as follows: Overripe stand ( $104.92 \pm 18.08$  t/hm<sup>2</sup>) > mature stand ( $100.52 \pm 1.18$  t/hm<sup>2</sup>) > middle-aged stand ( $80.25 \pm 5.34$  t/hm<sup>2</sup>) > young stand ( $80.23 \pm 4.54$  t/hm<sup>2</sup>), and the difference was significant ( $P < 0.05$ ). The soil organic carbon content and soil carbon storage of each stand age were mainly concentrated in the 0–20 cm soil layer, and decreased with the increase of soil layer depth, which was manifested as the phenomenon of soil carbon accumulation. The proportion of soil carbon storage in surface layer (0–20 cm) was significantly higher than that of other soil layers, indicating that the *P. massoniana* plantations of different ages mainly affected the carbon content of the soil surface layer. There was no significant correlation between the soil organic carbon content, soil carbon storage of different stand ages and the Shannon-Wiener index, species richness, litter layer existing stock, total porosity, soil water content, soil pH value of trees and shrubs ( $P > 0.05$ ), and it had a extremely significant positive correlation with root biomass ( $P < 0.01$ ), and a extremely significant negative correlation with soil bulk density ( $P < 0.01$ ). The total biomass and above-ground biomass of the community were significantly positively correlated ( $P < 0.01$ ) with the soil organic carbon content and soil carbon storage in the surface layer (0–20 cm), and were significantly positively correlated with the soil organic carbon content in the 20–40 and 40–60 cm layers ( $P < 0.05$ ), but there was no significant correlation with the soil carbon storage in the latter two layer. The results provided a scientific basis for studying the dynamic changes of soil carbon storage, which was ultimately conducive to the realization of multi-objective sustainable management of *P. massoniana* plantations.

**Keywords:** soil organic carbon content, soil carbon storage, influencing factors, stand ages, *Pinus massoniana* plantations

责任编辑:符支宏