

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.021

王艳丹, 何光熊, 宋子波, 等. 酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化. 土壤, 2020, 52(6): 1256–1262.

## 酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化<sup>①</sup>

王艳丹<sup>1,2</sup>, 何光熊<sup>1,2</sup>, 宋子波<sup>3</sup>, 张梦寅<sup>1,2</sup>, 杨湜舟<sup>1,2</sup>, 史亮涛<sup>1,2\*</sup>

(1 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南元谋 651399; 2 元谋干热河谷植物园, 云南元谋 651399; 3 云南猫哆哩集团食品有限责任公司, 云南玉溪 659288)

**摘要:** 在野外采集酸角林下 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤, 分析不同坡位(坡顶、坡中和坡脚)对酸角林土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、颗粒有机碳(POC)和可溶性有机碳(DOC)的影响。研究表明: ①酸角林的坡顶 SOC 富集, 坡中 SOC 最低; 坡顶和坡中的 SOC 主要在土壤表层(0~20 cm)出现富集现象; ②ROC、POC、DOC 含量变化与 SOC 含量变化相似, ROC、POC、DOC 含量与 SOC 含量呈极显著的正相关( $P<0.01$ ); ③ROC 占 SOC 的比例范围为 33.11%~47.00%, DOC 占 SOC 的比例范围为 1.27%~1.89%, POC 占 SOC 的比例范围为 20.10%~26.51%; ④坡脚土壤碳库的稳定性最好, 易于积累有机碳。在元江干热河谷中种植乡土树种——酸角, 对 SOC 产生了有益影响, 促进了该区域 SOC 的库效益。

**关键词:** 罗望子; 坡位; 土壤有机碳; 垂直分布; 乡土树种

**中图分类号:** S153.6; S714.2 **文献标志码:** A

### Study on Soil Organic Carbon and Its Active Fractions at Different Slope Sites of *Tamarindus indica* Plantation

WANG Yandan<sup>1,2</sup>, HE Guangxiong<sup>1,2</sup>, SONG Zibo<sup>3</sup>, ZHANG Mengyin<sup>1,2</sup>, YANG Haozhou<sup>1,2</sup>, SHI Liangtao<sup>1,2\*</sup>

(1 Institute of Tropical Eco-Agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan 651399, China; 2 Yuanmou Dry-Hot Valley Botanical Garden, Yuanmou, Yunnan 651399, China; 3 Yunnan Maoduoli Group Food Co., Ltd., Yuxi, Yunnan 659288, China)

**Abstract:** Soil samples were collected from 0–20 and 20–40 cm depths in different slope sites (top of slope, middle of slope, and foot of slope) of *Tamarindus indica* plantation to analyze the variations of soil organic carbon (SOC), readily oxidizable carbon (ROC), particulate organic carbon (POC) and dissolved organic carbon (DOC). The results showed that SOC of *Tamarindus indica* plantation was the highest at top of slope and the lowest at foot of slope. SOC was enriched in topsoil (0–20 cm) at top and middle of slope, ROC, POC and DOC contents changed similarly as SOC, and there were extremely significant positive correlations between SOC and active soil organic carbon of ROC, POC and DOC ( $P<0.01$ ). The proportions of ROC, DOC and POC in SOC were 33.11%–47.00%, 1.27%–1.89%, and 20.10%–26.51%, respectively. Soil carbon at the foot of slope was the most stable, which is benefit to organic carbon accumulation. Thus, planting *Tamarindus indica*, a native tree species, in the dry and hot valley of Yuanjiang has a beneficial effect on SOC accumulation, it can promote the function of soil as organic carbon pool in this area.

**Key words:** *Tamarindus indica*; Slope position; Soil organic carbon; Vertical distribution; Native species

有机碳在全球碳循环中处于核心地位<sup>[1]</sup>。森林是陆地生态系统最大的有机碳库之一, 对于调节全球碳平衡和减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升具有不可替代的作用<sup>[2]</sup>。干热河谷区域干旱少雨, 土壤侵蚀强烈, 植被退化严重, 是我国西南一类特殊的脆弱生态系统。

长久以来, 植被恢复困难是制约干热河谷区域生态环境治理的重要因素, 目前这一问题已引起社会和学界广泛关注, 并在植被恢复的理论及模式构建、物种筛选、综合治理评价等方面开展了深入研究, 为区域生态治理奠定了重要基础。然而, 目前尚缺乏干热河谷

①基金项目: 云南省科技厅重点研发计划项目(2019BC001-02)和云南省科技计划项目农业联合青年项目(2017FG001-(099))资助。

\* 通讯作者(282547489@qq.com)

作者简介: 王艳丹(1990—), 女, 云南大理人, 硕士, 研究实习员, 主要从事土壤生态学的研究。E-mail: wangyandankm@163.com

植被恢复对我国西南、全国、乃至全球碳库构建的有效评估,亦缺乏对该区土壤碳库特征的认识,制约了干热河谷及其相关区域植被恢复措施的宏观决策过程。酸角(*Tamarindus indica* L.), 又称罗望子、酸梅(海南)、木罕(傣语), 属豆科(Leguminosae)罗望子属(*Tamarindus*)多年生植物, 主要分布于云南金沙江、怒江、元江干热河谷及西双版纳一带。酸角树耐干旱、喜光照, 适宜炎热气候, 根系庞大、树形优美、枝繁叶茂, 是防止水土流失较好的树种, 同时也是净化空气、美化环境较好的观赏性植物。因而成为区域植被恢复的重要乔木树种, 在干热河谷典型区金沙江流域元谋段、红河流域元江段等区域进行了大面积的乡土乔木造林。然而, 目前尚缺乏酸角树种植对干热河谷土壤碳库影响的有效评价。

土壤有机碳(SOC)是土壤碳库的容量指标, 但其对短期内的人为活动和环境因子变化的响应不敏感<sup>[3]</sup>, 需要通过一些活性指标反映 SOC 和土壤质量的变化<sup>[4]</sup>, 如颗粒态有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)等。ROC 周转时间短, 能反映土壤碳库的短期变化, 控制着土壤养分的流失<sup>[5]</sup>。DOC 是土壤微生物分解的活性底物, 是有机碳中最易变的组分<sup>[6]</sup>。POC 周转期 5~20 年, 属于慢变库(slow pool), 对土壤环境和管理措施的变化十分敏感<sup>[7]</sup>。土壤中活性碳组分占 SOC 的比例, 可在一定程度上反映 SOC 的质量和稳定程度<sup>[8]</sup>。自然界中, SOC 及其组分特征会受到环境因素的影响, 地形作为成土过程中的一个重要因素, 它不但支配着地表和土壤中水热资源的重新分配, 而且影响着土壤生态系统的物质循环过程和强度, 对 SOC 分布和储量有着深远影响<sup>[9]</sup>。坡位是描述地形特征的主要指标, 是影响 SOC 坡面尺度变异的重要地形因素, 通过土壤侵蚀与堆积作用, 使有机碳在坡面上重新分配<sup>[10]</sup>。干热河谷地形破碎、土壤侵蚀严重, 因此, 研究不同坡位 SOC 及其不同组分的动态变化与分配比例, 对认识土壤碳固定过程及维持土壤碳库平衡具有重要意义。

本试验以元江干热河谷 7 年龄酸角人工林为对象, 通过野外调查采样与室内分析相结合的方法, 对酸角林 SOC 含量及其组分进行研究, 在分析不同坡位(坡顶、坡中和坡脚)酸角林 SOC 及其组分含量变化特征的基础上, 探讨干热河谷植被恢复中乡土乔木酸角为主体的植被恢复模式的碳固定效益, 旨在为相关区域退化土壤有机碳库重建及生产力提升提

供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于玉溪市新平县漠沙镇曼线村委会大曼线村牛独山上的猫哆哩庄园。该区为气候干燥酷热、终年无霜的干热河谷坝区, 属于亚热带季风气候。平均海拔 564 m, 年平均气温 24.9℃, 年降雨量 711.8 mm, 降雨量多集中在 6—10 月。试验地的猫哆哩庄园始建于 2012 年, 地处哀牢山东麓, 为红河流域干热河谷典型地段, 是目前全国最大的人工酸角连片林区。试验区酸角引种自云南省农业科学院热区生态农业研究所, 引种时树龄 2 年。建林早期采用埋管灌溉管理, 成林后以雨养林管理为主。酸角林在建植期, 距树约 1 m 处大量使用有机肥(羊粪)进行沟施, 后期未再施肥。酸角林树种单一, 林下无其他配置, 株距 6 m。土壤类型为砂质黏壤土, 土壤由岩石风化、土壤沙化等方式形成, 土层浅薄, 其渗水性较好, 为易发生土壤水蚀类型。该地区地质结构复杂, 河谷区成土母质为第四纪洪积冲积物和近代河流冲积物<sup>[11]</sup>。

### 1.2 样地设置与样品采集

2017 年 6 月, 选择 3 座东北向的酸角人工林山坡, 地理坐标 23.76° N、101.80° E, 平均坡长约 305 m, 坡度约为 27°~35°, 平均海拔为 600.83 m。在每个山坡的坡顶、坡中和坡脚随机选取 3 个样地, 采集土样包括环刀样, 采样深度为 0~20、20~40 cm; 将同一坡位 0~20 cm 土层 3 个取样点的土壤进行充分混合, 四分法保留约 500 g 带回实验室待分析; 20~40 cm 土层土样按照相同方法处理。共采得不同坡位、不同土层的 18 个混合样。采样后的土壤剖面坑进行回填处理, 防止土壤流失。为避免建植期所施肥料的影响, 采样时开挖的土壤剖面应当远离肥料沟。

### 1.3 测定项目及方法

将土壤样品去除杂物和植物根系后, 自然风干, 过 2 mm 筛待测。土壤含水量采用烘干法测定, 容重采用环刀法测定, 土壤 pH 使用 pH 计进行测定, 土壤全氮含量采用凯氏蒸馏法测定, 土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定, 具体测定方法参照鲁如坤的《土壤农业化学分析方法》<sup>[12]</sup>。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 不同坡位土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physiochemical properties of tested soils at different slope sites

坡位	土层深度 (cm)	土壤含水量 (g/kg)	容重(g/cm <sup>3</sup> )	pH	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)
坡顶	0~20	58.60	1.55	5.25	0.66	0.51
	20~40	65.16	1.43	5.32	0.50	0.38
坡中	0~20	81.76	1.53	6.34	0.46	0.37
	20~40	95.69	1.51	6.61	0.34	0.31
坡脚	0~20	91.88	1.57	6.93	0.53	0.38
	20~40	100.88	1.69	7.13	0.47	0.35

另一部分风干样品用于测定 SOC、ROC、POC 和 DOC。SOC 含量采用油浴加热后,重铬酸钾-硫酸氧化法测定<sup>[13]</sup>; ROC 含量采用 KMnO<sub>4</sub> 氧化法测定<sup>[14]</sup>; DOC 含量采用水土质量比 2:1,重铬酸钾容量法-外加热法测定; POC 含量采用六偏磷酸钠分散,重铬酸钾氧化-外加热法测定<sup>[15]</sup>。

SOC 活性组分在 SOC 中的分配比例计算公式为:

$$\text{POC 的分配比例: } P_p = \text{POC}/\text{SOC} \quad (1)$$

$$\text{ROC 的分配比例: } P_r = \text{ROC}/\text{SOC} \quad (2)$$

$$\text{DOC 的分配比例: } P_d = \text{DOC}/\text{SOC} \quad (3)$$

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 进行数据处理和统计分析,采用单因素方差分析和 LSD 多重比较对不同坡位酸角林土壤的 SOC、DOC、POC、ROC 及其分配比例进行差异显著性检验,采用 Pearson 相关法分析 SOC、DOC、POC 和 ROC 的相关关系。显著性水平  $\alpha=0.05$ 。用 Origin 8.0 进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 不同坡位土壤有机碳的变化

0~20 cm 土层坡顶 SOC 含量显著大于坡中、坡脚( $P<0.05$ , 图 1), 坡中与坡脚的 SOC 相近( $P>0.05$ ); 20~40 cm 土层的 SOC 含量在坡顶与坡脚位置差异不明显( $P>0.05$ ), 但都显著大于坡中( $P<0.05$ )。

相较于 0~20 cm 土层, 20~40 cm 土层的 SOC 含量在坡顶和坡中都显著减少( $P<0.05$ ), 在坡脚略增加但两土层间没有显著差异( $P>0.05$ )。

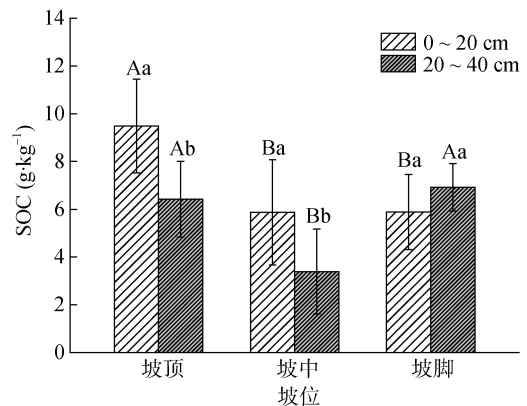
### 2.2 不同坡位土壤有机碳各组分的变化

**2.2.1 POC、ROC 和 DOC 的含量** 0~40 cm 土层 SOC 活性组分 DOC、ROC 含量随坡位的变化均表现为坡顶>坡脚>坡中(图 2A、C)。0~20 cm 土层的 ROC 含量坡顶显著大于坡中( $P<0.05$ , 图 2A), 与坡脚差异不显著( $P>0.05$ ); 20~40 cm 土层坡顶、坡脚 ROC 含量显著大于坡中( $P<0.05$ ), 坡顶与坡脚差异不显著( $P>0.05$ )。0~20 cm 土层的 DOC 含量在坡中和

坡脚没有明显差异( $P>0.05$ , 图 2C), 在坡顶 DOC 含量显著大于坡中、坡脚( $P<0.05$ ); 20~40 cm 土层变化比表层更明显( $P<0.05$ ), DOC 含量坡顶>坡脚>坡中。

0~20 cm 土层的 POC 含量随坡位的变化与 ROC 相似(图 2B); 20~40 cm 土层的 POC 含量变化则很不相同, 在坡脚处最大( $P<0.05$ ), 坡顶和坡中没有显著差异( $P>0.05$ )。

坡顶和坡中的酸角林随着土层深度增加, ROC、POC、DOC 含量均显著减少( $P<0.05$ , 图 2); 坡脚的酸角林在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层没有显著变化( $P>0.05$ )。



(图中不同大写字母表示在同一土层不同坡位间差异显著( $P<0.05$ ), 不同小写字母表示同一坡位不同土层间的差异显著( $P<0.05$ ); 下同。)

图 1 不同坡位的 SOC 含量变化

Fig. 1 SOC contents at different slope sites

**2.2.2 POC、ROC 和 DOC 的分配比例** 0~20 cm 土层的 ROC/SOC 值在各个坡位没有显著性差异( $P>0.05$ , 图 3A), 20~40 cm 土层坡中大于坡顶( $P>0.05$ ), 显著大于坡脚( $P<0.05$ )。0~20 cm 和 20~40 cm 土层 POC/SOC 值随坡位均没有显著变化( $P>0.05$ , 图 3B)。0~20 cm 土层的 DOC/SOC 值在各个坡位没有显著性差异( $P>0.05$ ), 但在 20~40 cm 土层随坡位下降 DOC/SOC 值明显减小, 坡顶与坡脚具有显著差异( $P<0.05$ , 图 3C)。

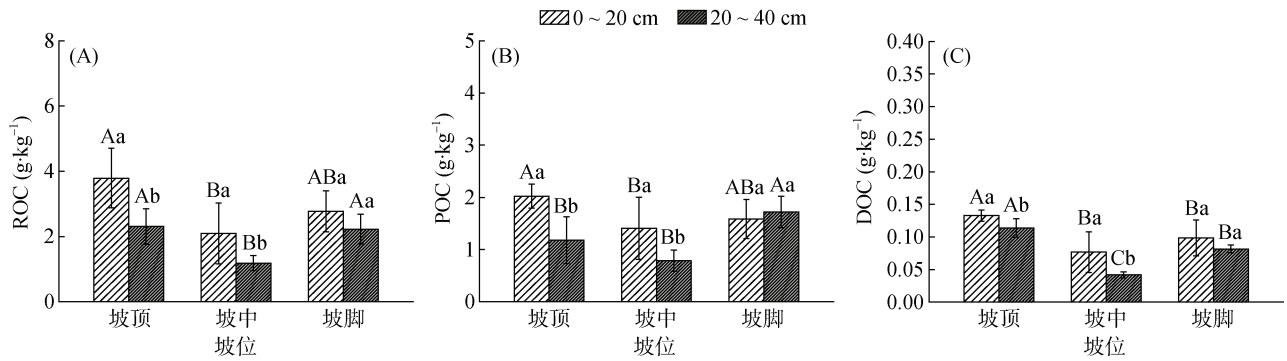


图 2 不同坡位的 DOC、ROC 和 POC 含量变化  
Fig. 2 Contents of DOC, ROC and POC at different slope sites

0~20 cm 和 20~40 cm 土层的 ROC/SOC 值在坡顶和坡中没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 在坡脚表层明显高于 20~40 cm 土层 ( $P < 0.05$ )。0~20 cm 和 20~40 cm 土层的 POC/SOC 值和 DOC/SOC 值在坡顶、坡中、

坡脚均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

整体上, 研究区酸角林土壤 ROC/SOC 比值介于 33.11% ~ 47.00%, POC/SOC 比值介于 20.10% ~ 26.51%, DOC/SOC 比值介于 1.27% ~ 1.89%。

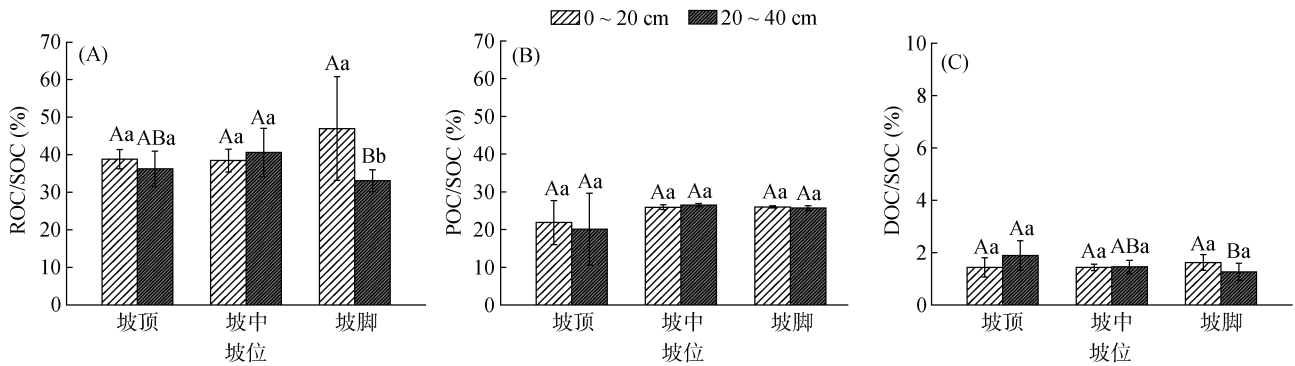


图 3 不同坡位的 ROC/SOC、POC/SOC 和 DOC/SOC 的变化  
Fig. 3 Ratios of ROC/SOC, POC/SOC and DOC/SOC at different slope sites

### 2.3 土壤有机碳及其组分的相关性

不同坡位的酸角林 SOC 活性组分 ROC、POC 和 DOC 含量均与 SOC 含量呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ , 表 2)。由此可见, 土壤活性有机碳组分含量在很大程度上取决于 SOC 的含量。

POC 与 ROC、DOC 与 ROC、POC 与 DOC 含量之间也呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ , 表 2)。

表 2 SOC 及其组分的相关性  
Table 2 Correlations of SOC and its components

项目	SOC	ROC	POC	DOC
SOC	1	-	-	-
ROC	0.880**	1	-	-
POC	0.717**	0.666**	1	-
DOC	0.732**	0.679**	0.734**	1

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

## 3 讨论

### 3.1 酸角林土壤有机碳的基本特征

酸角林 0~20 cm 土层 SOC 含量 ( $7.08 \pm 2.46$ ) g/kg, ROC 含量为 ( $2.88 \pm 1.02$ ) g/kg, POC 含量为 ( $1.67 \pm 0.54$ ) g/kg, DOC 含量为 ( $0.10 \pm 0.04$ ) g/kg。20~40 cm 土层的 SOC、ROC、POC 和 DOC 含量分别为 ( $5.58 \pm 2.46$ )、( $1.90 \pm 1.02$ )、( $1.23 \pm 0.54$ )、( $0.08 \pm 0.03$ ) g/kg。与在元谋干热河谷生态恢复区的人工林相比较, 本研究酸角林 SOC 含量高于印楝<sup>[16]</sup>、大叶相思<sup>[16-17]</sup>、新银合欢林<sup>[16]</sup>土壤。与在元阳干热河谷区的 9 年生麻疯树人工林<sup>[18]</sup>相比, 0~40 cm 土层麻疯树林 SOC ( $10.57 \sim 20.51$  g/kg) 和 DOC 含量 ( $259.55 \sim 736.92$  mg/kg) 更高, 但 ROC 含量 ( $1.63 \sim 3.56$  g/kg) 与本研究的酸角林相差不大。树种、林龄、坡位、不同水热条件等可能是造成干热河谷地区 SOC 及其组分含量差异的

原因,研究区酸角林也表现出了良好的有机碳积累效益,起到“碳汇”的作用。有研究表明<sup>[19]</sup>,在植被恢复过程中,选择豆科植物,辅以乡土树种营造常绿阔叶林,有利于提高森林潜在碳汇功能。干热河谷地区生态极端脆弱进行生态恢复或造林时需慎重选择树种,相较于外引树种(银合欢、印楝、大叶相思、麻疯树等),乡土树种更能适应干旱环境。因此从植物适应性和土壤固碳能力的角度综合考虑,建议在元江干热河谷优先选择用豆科的酸角进行生态恢复或造林,实现当地退化生态系统植被的可持续恢复。

### 3.2 坡位对酸角林土壤有机碳的影响

坡位作为重要的地形因子,主要通过水土流失和土壤侵蚀影响 SOC 的空间分布,进而对 SOC 储量产生深远影响。在土壤侵蚀或雨水冲刷作用下,坡位由上至下 SOC 含量会逐渐增加<sup>[20]</sup>。但是本研究中, SOC 含量从坡顶到坡中呈现明显的降低,从坡中到坡脚逐渐增加(图 1)。研究表明,从坡脚到坡中再到坡顶,分解系数(枯枝落叶量/枯枝落叶层)略减小,分解率明显降低<sup>[21]</sup>,导致上坡位 SOC 含量要高于下坡位<sup>[22]</sup>。研究区属于半干旱地区,缺乏定期灌溉,土壤水分来源于降雨,降雨冲刷坡面并产生侵蚀,坡顶土壤含水量最低(表 1),水分丧失较快无法为微生物分解提供足够的水分,土壤微生物对碳的分解速率低,保证了坡顶 SOC 的富集。相较于坡顶位置,坡中和坡脚的成土过程和淋溶过程较弱,地表侵蚀则相对较强<sup>[23]</sup>。根据坡面侵蚀理论,水蚀主要发生在中坡与下坡,因为这两个位置是坡面径流汇集的场所<sup>[24]</sup>,因此酸角林坡中和坡脚的 SOC 会明显减少。而坡脚由于接受了来自于坡顶和坡中的侵蚀土壤,导致其 SOC 含量有所上升。对于 SOC 含量较低的坡下区域,尤其是坡中,应该增施有机肥,减少除草等耕作行为,减小侵蚀及径流携带的泥沙,从而增加区域内 SOC 含量。

酸角林土壤剖面 SOC 分布存在差异,坡顶和坡中表层 0~20 cm 土层的 SOC 含量显著大于 20~40 cm 土层(图 1),说明外源有机物质的输入和枯枝落叶分解输入的有机碳均主要聚集在土壤表层,随着土层深度的增加,有机碳来源减少。而坡脚 20~40 cm 土层的 SOC 含量略高于 0~20 cm 土层,是因为元江流域 25° 以上的陡坡山地极易带来土壤侵蚀<sup>[25]</sup>,因而推测这一结果是由于坡顶、坡中的土壤在侵蚀作用下被搬运迁移、堆积在坡脚,将原始的富含有机碳的土壤掩埋所致。有研究表明,土壤侵蚀导致的被掩埋的土壤,其养分和碳库更稳定<sup>[26]</sup>,这也可能是造

成酸角林坡脚 POC 含量相对较高的原因。

### 3.3 坡位对酸角林土壤有机碳活性组分的影响

SOC 的数量只是一个矿化输入和损失(矿化和流失)平衡的结果,研究 SOC 活性组分有利于揭示 SOC 质量的变化及其转化速率。不同活性有机碳组分差异表明有机碳库变化速率对不同环境变量的响应差异。ROC、POC、DOC 含量依赖于 SOC 含量的变化,因此酸角林 SOC 含量的特殊变化规律,导致了其组分也发生相似的变化(图 2)。表 2 结果也证明 ROC、POC、DOC 含量与总 SOC 含量呈极显著的正相关( $P < 0.01$ ),这与石亚攀等<sup>[27]</sup>、郇建红等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

本研究中,酸角林土壤 ROC 和 DOC 含量在不同坡位、不同土壤剖面上的分布与 SOC 含量分布特征相近(图 2A、C)。有研究表明,土壤湿度的增加会加速 SOC 的分解,从而降低 ROC 含量<sup>[29]</sup>; DOC 具有易溶于水、流动性强的特点,会在原位下渗或在径流、机械耕作作用下向下坡方向迁移。本研究结果显示,从坡顶到坡脚,酸角林土壤含水量逐渐增多(表 1),导致坡中和坡脚的 ROC、DOC 含量变化符合这个规律,不同的是坡顶 SOC 的富集导致了其活性组分 ROC、DOC 含量的增多。

POC 含量在 0~20 cm 土层不同坡位的变化与 SOC 含量变化相似,但在 20~40 cm 土层却有些不同,坡脚的 POC 含量明显高于坡顶和坡中(图 2B)。一方面,POC 易受植物根系分布的影响,酸角林在水分含量最高的坡脚位置,根系生长更为旺盛,增加了 POC 含量。另一方面,POC 是与砂粒(53~2 000 μm)结合的那部分有机碳,由于水蚀对土壤颗粒有分选作用<sup>[30]</sup>,在向下迁移过程中,细小的土壤颗粒携带大量养分在下坡位聚集,坡脚的 0~20 cm 土层是酸角林建植期机械扰动和近 5 年土壤侵蚀造成的新淤积土层,而 20~40 cm 土层 POC 含量最高是长期以来土壤颗粒自然分选造成的结果,进一步证明了坡脚土壤 20~40 cm 土层应是该坡位的原始表层。

土壤活性有机碳与总有机碳的比值称为活性有机碳的分配比例。表层 0~20 cm 由于人为干扰较大,坡位对 ROC 和 DOC 的分配比例均没有显著性影响(图 3A、C)。在 20~40 cm 土层,ROC/SOC 比值变化:坡中>坡顶>坡脚(图 3A),说明坡中养分循环速率越快,土壤碳的稳定性越差,不利于土壤碳库的积累。由此可知,坡中 ROC 含量低,但分配比例高,土壤碳库不稳定,也是导致坡中 SOC 含量低的原因之一。在 20~40 cm 土层,DOC/SOC 比值坡顶>坡中>坡脚,DOC/SOC 比值越小越不利于 SOC 的矿化,

但可以提高 SOC 的稳定性<sup>[31]</sup>。在 0~40 cm 土层, 不同坡位的 POC 分配比例没有显著差异(图 3B)。因此, 根据 ROC、POC 和 DOC 的分配比例可知, 坡脚土壤碳库的稳定性最好, 可以增加碳储量。虽然目前坡脚 SOC 及其组分含量没有坡顶高, 但是长期继续种植酸角林, 坡脚的 SOC 及活性组分会逐渐积累。

#### 4 结论

1) 坡位显著影响酸角林 SOC 的分布, 其含量坡顶>坡脚>坡中, SOC 的明显损失主要发生在坡中位置, 特别是在 20~40 cm 土层。

2) 酸角林 SOC 表聚特征在坡顶和中坡十分明显, 在坡脚土层间没有显著差异。

3) ROC、POC、DOC 含量与 SOC 含量呈极显著的正相关, ROC、POC、DOC 含量变化与 SOC 含量变化相似。

4) ROC/SOC 比值>POC/SOC 比值>DOC/SOC 比值, 坡脚土壤有机碳库更稳定, 易于积累更多的有机碳。

#### 参考文献:

- [1] Batjes N H. Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe[J]. *Soil Use and Management*, 2002, 18(4): 324-329.
- [2] 蔚海东, 马祥庆, 刘爱琴, 等. 森林生态系统碳循环研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 188-192.
- [3] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2005: 221-268.
- [4] 徐江兵, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥处理红壤生物活性有机碳变化及与有机碳组分的关系[J]. *土壤*, 2007(4): 627-632.
- [5] 何伟, 王会, 韩飞, 等. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 425-434.
- [6] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 211-219.
- [7] Wander M. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function[M]//*Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [8] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130-135.
- [9] 李林海, 郜二虎, 梦梦, 等. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 179-187.
- [10] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 443-453.
- [11] 汪汇海, 李德厚, 张业海, 等. 元江干热河谷山地土壤资源的垂直分异特征及其合理利用[J]. *资源科学*, 2004, 26(2): 123-128.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Guo M X. Soil sampling and methods of analysis[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(1): 375.
- [14] Mirsky S B, Lanyon L E, Needelman B A. Evaluating soil management using particulate and chemically labile soil organic matter fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1): 180-185.
- [15] Six J, Guggenberger G, Paustian K, et al. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(4): 607-618.
- [16] 唐国勇, 李昆, 张昌顺. 施肥对于热河谷生态恢复区林木生长及土壤碳氮含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 185-189.
- [17] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 551-557.
- [18] 谷丽萍, 郭永清, 泽桑梓, 等. 云南干热河谷不同密度麻疯树人工林土壤活性有机碳特征[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(2): 26-31.
- [19] 汤松波, 习丹, 任文丹, 等. 鹤山不同植被土壤有机碳分布特征[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 122-130.
- [20] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 2930-2935.
- [21] Liao C C. Altitudinal variation in composition, structure, diversity and distribution pattern of the subtropical rain forest in Nanjenshan[D]. Taiwan: Graduate Institute of Botany, National Taiwan University, 1995.
- [22] Sigua G C, Coleman S W. Spatial distribution of soil carbon in pastures with cow-calf operation: effects of slope aspect and slope position[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(2): 240-247.
- [23] Hseu Z Y, Chen Z S, Tsai C C, et al. Using micromorphology to interpret the genesis of tropical forest

- soils in the Nanjenshan area of Taiwan[J]. *Taiwan Journal of Forest Science*, 2001, 16(1): 25–38.
- [24] Govers G, Lobb D, Quine T. Tillage erosion and translocation: Emergence of a new paradigm in soil erosion research. Preface[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 51(3/4): 167–174.
- [25] 尹龙, 顾治家, 汪南. 元江干热河谷区坡耕地景观格局变化研究[J]. *云南地理环境研究*, 2017, 29(2): 48–56.
- [26] Quinton J N, Govers G, van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 311–314.
- [27] 石亚攀, 陈立新, 段文标, 等. 红松阔混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 186–192.
- [28] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同农业利用方式土壤有机碳矿化及其与有机碳组分的关系[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 178–183.
- [29] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 342–350.
- [30] 程静霞, 聂小军, 刘昌华. 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2495–2500.
- [31] 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1407–1414.