

陈小梅, 闫俊华, 林媚珍, 等. 南亚热带森林植被恢复演替中土壤有机碳组分及其稳定性[J]. 地球科学进展 2016, 31(1): 86-93. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.01.0086. [Chen Xiaomei, Yan Junhua, Lin Meizhen, et al. Variations in the fractions and stabilization of soil organic carbon with forest succession in southern China[J]. Advances in Earth Science 2016, 31(1): 86-93. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.01.0086.]

## 南亚热带森林植被恢复演替中 土壤有机碳组分及其稳定性\*

陈小梅<sup>1</sup>, 闫俊华<sup>2</sup>, 林媚珍<sup>1</sup>, 褚国伟<sup>2</sup>, 吴建平<sup>2</sup>, 张德强<sup>2\*</sup>

(1. 广州大学地理科学学院, 广东 广州 510006; 2. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650)

**摘要:**以鼎湖山森林植被恢复演替过程中的松林(初期)、混交林(中期)和季风林(后期)为研究对象,通过测定其土壤总有机碳(TOC)、易氧化有机碳(ROC)和不易氧化有机碳(NROC)及凋落物<sup>13</sup>C-NMR分析,以期阐明森林植被恢复演替过程中土壤有机碳组分变化规律及其原因。结果表明:①3个森林土壤ROC含量差异不显著;由松林向季风林演替过程中,ROC占TOC的比例下降。松林新鲜凋落物层的烷氧基碳含量(57.03%)高于季风林(49.10%)和混交林(54.50%)。②3个森林土壤NROC含量差异显著,大小顺序为:季风林>混交林>松林。混交林和季风林凋落物半分解层和已分解层的惰性指数明显高于松林。TOC趋势与NROC一致。南亚热带森林由松林向季风林恢复演替过程中,土壤有机碳的稳定性增加,惰性有机碳的持续积累可能是季风林和混交林土壤TOC积累的一个重要过程。

**关键词:**森林恢复演替;土壤碳积累;土壤碳固持;有机碳组分;南亚热带森林

中图分类号: P935; Q148

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2016)01-0086-08

### 1 引言

森林生态系统总碳量估计为6380亿t,约占全球陆地生态系统的45%,其中约50%存储于土壤(表层30cm)和枯枝落叶层<sup>[1,2]</sup>。近十几年来,国内外学者开展了大量森林土壤碳积累的研究<sup>[3]</sup>,认为森林土壤的巨大碳汇功能在缓解大气CO<sub>2</sub>浓度升高中发挥着重要作用<sup>[4,5]</sup>。但至今对森林土壤碳积累机制的认识仍有限,因此,森林生态系统土壤碳积累过程是全球变化生态学研究最为核心的问题之一。

森林土壤有机碳的积累机制具有很大的不确定

性,其主要原因之一是土壤有机碳组成及其形态的复杂性<sup>[6]</sup>。土壤有机碳是由活性有机碳(周转期小于10年)和惰性有机碳(周转期10年以上,甚至几千年)等不同碳组成的复合体<sup>[7,8]</sup>。活性有机碳包括易氧化有机碳、颗粒有机碳和烷氧基碳等,是指易被分解矿化、对植物直接提供养分的那部分有机碳,大部分由植物残体分解物质、微生物菌丝和微生物及其产物组成<sup>[9]</sup>。惰性有机碳包括不易氧化有机碳、芳香碳等,主要指理化性质稳定、难分解的那部分有机碳<sup>[9,10]</sup>。不同组分碳代表着不同功能碳库,具有不同周转期,对环境变化响应也不一致<sup>[11,12]</sup>。针对土壤有机碳组成及其形态结构的复杂性,揭示

\* 收稿日期: 2015-09-05; 修回日期: 2015-12-14.

\* 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“南亚热带地带性森林土壤有机碳形态结构对降水格局改变的响应”(编号: 31400415); 广东省普通高校青年创新人才项目“城乡梯度上亚热带森林土壤碳积累机理分析”(编号: 2014KQNCX110)资助。

作者简介: 陈小梅(1985-),女,福建南安人,讲师,主要从事全球变化与森林生态系统碳循环研究。E-mail: xmchen@scib.ac.cn

\* 通信作者: 张德强(1963-),男,广东惠州人,研究员,主要从事全球变化与生态系统关系研究。E-mail: zhangdeq@scib.ac.cn

森林土壤有机碳积累机制关键之一,就是要准确研究土壤不同组分有机碳对环境变化的响应规律。

森林植被恢复演替是一个重要的环境变化过程,在这个过程中,地上部分植被逐步变化,地下碳积累也随之发生改变<sup>[13,14]</sup>。周国逸等<sup>[13]</sup>研究发现,1978—2002年,鼎湖山季风常绿阔叶林(顶级群落)、针阔叶混交林(演替中期)和马尾松林(演替早期)地下部分碳的年平均增长速度分别为 $(383 \pm 97)$ 、 $(193 \pm 85)$ 和 $(213 \pm 86)$   $g/(m^2 \cdot a)$ ,不同演替阶段森林土壤有机碳积累速率明显不同。鉴于土壤有机碳组成及其形态结构的复杂性,分析演替过程中森林土壤有机碳的组分变化,有助于揭示演替过程中森林土壤有机碳积累的可能机制。而目前国内关于森林演替过程中土壤有机碳组分变化的研究较少<sup>[15-17]</sup>,大部分集中于农田、草原和土地利用变化背景下土壤有机碳组分变化<sup>[18-20]</sup>。且已有的关于森林演替的研究,主要集中在观测土壤活性有机碳的变化<sup>[15,16]</sup>,关于惰性有机碳分析较少<sup>[17]</sup>。范跃新等<sup>[15]</sup>通过观测中亚热带3个不同演替阶段森林发现,演替后期和中期土壤活性有机碳(微生物碳和可溶性有机碳)含量显著高于初期;孙伟军等<sup>[16]</sup>发现湘中丘陵区天然次生林随着演替进展,土壤微生物碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳含量逐渐提高。马文济<sup>[17]</sup>通过<sup>13</sup>C核磁共振技术分析土壤有机碳官能团结构发现,在森林演替过程中,土壤烷基碳占总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)的比例升高。另外,随着演替进行,森林凋落物质量也会发生相应变化,作为土壤有机碳的主要来源,其凋落物有机碳组分的变化势必会影响土壤有机碳积累。利用<sup>13</sup>C固体核磁共振技术可获得不经任何化学处理的凋落物有机质中各种官能团碳的比例<sup>[21]</sup>。因此,通过土壤活性和惰性有机碳组分,结合其凋落物源的碳组分特征,将有利于揭示森林演替过程中土壤有机碳的积累机制。

综上所述,本文以广东省鼎湖山植被演替序列为研究对象,通过<sup>13</sup>C核磁共振碳谱分析、易氧化有机碳(Readily Oxidizable Organic Carbon, ROC)和不易氧化有机碳(Non-Readily Oxidizable Organic Carbon, NROC)测定,旨在揭示:①南亚热带森林演替过程中土壤活性和惰性有机碳的变化趋势;②恢复演替过程中森林土壤有机碳的可能积累机制。通过以上研究,以为森林土壤有机碳积累机制的揭示及森林土壤固碳潜力的估算提供数据支撑和科学依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究样地概况

本研究在广东省鼎湖山自然保护区内(112°10'E 23°10'N)进行。该区属南亚热带季风性气候,年平均降雨量为1956 mm,其中80%的降雨分布在4~9月。年平均相对湿度为80%,年平均气温为21.5℃,最冷月(1月)和最热月(7月)的平均气温分别为12.6℃和28.0℃。保护区面积约1100 hm<sup>2</sup>,主要分布着处于不同植被恢复演替阶段的3种森林<sup>[22]</sup>:①马尾松针叶林(简称松林,PF):林地海拔50~200 m,为1960年前人工种植的马尾松纯林,马尾松(*Pinus massoniana*)是现存唯一乔木层,林下灌木主要为桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、三叉苦(*Euodia lepta*)等,偶见荷木(*Schima superba*)等阔叶树种幼苗。该森林群落处在南亚热带森林植被恢复演替的初级阶段。②针阔叶混交林(简称混交林,MF):林地海拔100~250 m,由人工种植的马尾松群落被先锋阔叶树种入侵后自然演变而成,是马尾松群落向季风常绿阔叶林演替的一个中间过渡类型。针叶树为马尾松,阔叶树种主要有荷木、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、红皮紫椴(*Craibiodendron kwangtrugense*)和藜蒻(*Castanopsis fissa*)等,针、阔叶树的比例为4:6。③季风常绿阔叶林(简称季风林,BF):林地海拔200~400 m,是有着近400年保护历史的南亚热带地带性植被类型,整个群落处于由阳性植物占优势的森林向中生性和耐阴性植物占优势的演替顶极群落类型演变的最后阶段。群落终年常绿,垂直结构复杂,群落优势树种主要有锥栗、荷木、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)和鼎湖钓樟(*Lindera chunii*)等。该区土壤由不同颜色、硬度与质地的砂岩、砂页岩、页岩和石英砂岩发育而成,主要土壤类型为赤红壤和黄壤。本文所研究的3种森林下的土壤均为赤红壤。3种森林植被和土壤部分相关特征见表1<sup>[23,24]</sup>。

### 2.2 样品采集

2010年8月下旬,在松林、混交林和季风林3种森林中,分别选取坡度(25~30°)、坡向(东北向)、坡位(中坡位)和地上植物结构基本一致的观测样地,在3种林地分别设置3个3 m×3 m的样方。在每个样地内随机选取3个点,用土钻分别取0~10 cm和10~20 cm层次的土壤样品,装入布袋,带回实验室处理去除样品中可见的根系等动植

表 1 鼎湖山森林植被恢复演替序列的样地特征

Table 1 Vegetation characteristics and soil properties of three forests at Dinghushan

	松林	混交林	季风林
演替阶段	早期	中期	成熟
林龄/a	60~70	约 110	约 400
年凋落物输入量/(g/(m <sup>2</sup> ·a))	587.6(115.8)	702.5(79.3)	891.8(120)
土壤(0~20 cm) 细根生物量/(g/m <sup>2</sup> )	166.08(35.27)	214.25(26.92)	226.37(20.58)
土壤(0~10 cm) pH 值	4.06(0.10)	3.97(0.08)	3.97(0.03)
土壤(0~5 cm) 湿度/%	18.13(0.94)	28.46(1.14)	27.40(1.20)
土壤(0~10 cm) 容重/(g/cm <sup>3</sup> )	1.32(0.04)	1.10(0.08)	0.86(0.06)
土壤(0~20 cm) 微生物量碳/(mg/g)	442.05(86.99)	526.97(19.81)	711.46(88.51)

注: 括号内数字代表标准差

物残体和石块, 并过 2 mm 筛, 自然风干后备测。同时, 在每个样方内随机选取 3 个 20 cm × 20 cm 的点, 用铲子和镊子采取未分解层、半分解层和已分解层的凋落物, 装入布袋, 带回实验室处理与分析。未分解层、半分解层凋落物用去离子水清洗烘干, 已分解层直接烘干, 烘箱温度为 60 °C。烘干后样品研磨过 100 目筛, 密封保存备测。

### 2.3 样品测定

#### 2.3.1 土壤总有机碳、易氧化有机碳和不易氧化有机碳

土壤总有机碳测定按照重铬酸钾氧化—外源加热法进行<sup>[25]</sup>。易氧化有机碳为能被 333 mmol/L 高锰酸钾氧化的有机碳<sup>[26]</sup>。取过 100 目筛, 含有 15~30 mg 有机碳的风干土样, 装入 100 mL 离心管, 加 333 mmol/L 的高锰酸钾溶液 25 mL, 密封瓶口, 以 250 r/min 振荡 1 h, 空白和土壤样品一样。振荡后的样品以 2 500 r/min 离心 5 min, 然后取上清液用去离子水按 1:250 稀释, 在 565 nm 的分光光度计上比色。根据高锰酸钾的消耗量, 可求出土壤样品易氧化有机碳含量。不易氧化有机碳的含量即为土壤总有机碳扣除易氧化有机碳含量。

#### 2.3.2 凋落物<sup>13</sup>C 核磁共振谱分析 (CPMAS solid state-<sup>13</sup>C NMR)

该实验在北京化工大学核磁共振分析室完成, 仪器为 Bruker 公司 AV 300 型号。固体<sup>13</sup>C NMR 采用交叉极化—魔角旋转技术 (CP-MAS), <sup>13</sup>C 的共振频率为 75.5 MHz, 魔角自旋频率为 12 kHz, 样品的接触时间为 35 ms, 循环时间为 5 s, 数据点为 2 000。所测图谱可分为 4 个共振区域: 0~50 × 10<sup>-6</sup> (烷基碳, Alkyl C)、50 × 10<sup>-6</sup>~110 × 10<sup>-6</sup> (烷氧碳, O-Alkyl C)、110 × 10<sup>-6</sup>~160 × 10<sup>-6</sup> (芳香碳, Aromatic C)、160 × 10<sup>-6</sup>~220 × 10<sup>-6</sup> (羰基碳, Carbonyl C)<sup>[27]</sup>。惰性指数

(The recalcitrance index) 用于表示凋落物中不易分解有机碳组分的比例<sup>[21]</sup>, 计算公式为:

$$\text{The recalcitrance index}(\%) = (\text{Alkyl C} + \text{Aromatic C}) / (\text{O-alkyl C} + \text{Carbonyl C}) \quad (1)$$

#### 2.3.3 统计分析

应用 SPSS 18.0 软件, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同林型间的差异, 显著水平设置为  $p < 0.05$ 。通过 SigmaPlot 12.0 作图。

## 3 结果分析

### 3.1 土壤总有机碳、易氧化有机碳和不易氧化有机碳

在表层土壤 0~10 cm (图 1a), 季风林和混交林总有机碳含量显著高于松林 ( $p = 0.017$ ), 而季风林和混交林之间差异不显著。在 10~20 cm 3 种森林土壤有机碳含量差异显著, 大小顺序为: 季风林 > 混交林 > 松林。

松林、混交林和季风林表层土壤 (0~10 cm) 的易氧化有机碳含量差异不显著 ( $p > 0.05$ )。在 10~20 cm, 虽然季风林易氧化有机碳含量明显高于混交林和松林, 但是 3 种森林之间差异不显著。易氧化有机碳占总有机碳含量的比例依次为: 松林 > 混交林 > 季风林 (表 2)。

表 2 森林植被恢复演替序列的土壤易氧化有机碳 (ROC) 占总有机碳 (TOC) 比例 (单位: %)

Table 2 The percentages of ROC to TOC at three forest types (unit: %)

	松林	混交林	季风林
0~10 cm	41.60 (3.87) <sup>a</sup>	37.12 (1.60) <sup>ab</sup>	32.45 (3.10) <sup>b</sup>
10~20 cm	39.62 (6.73) <sup>a</sup>	32.47 (5.76) <sup>a</sup>	34.55 (5.34) <sup>a</sup>

注: 括号内数字代表标准差; 同行不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ) 相同字母表示差异不显著 ( $p > 0.05$ )

松林、混交林和季风林表层土壤(0~10 cm)的不易氧化有机碳含量分别为(10.81±0.04)、(17.48±1.56)和(19.74±3.08) g/kg(图 1c)。季风林和混交林显著高于松林;10~20 cm 土壤的不易氧化有机碳含量分别为(4.69±1.39)、(7.83±1.14)和(10.77±0.17) g/kg,3 种林型之间差异显著。土壤不易氧化有机碳含量呈现季风林>混交林>松林的趋势。

### 3.2 凋落物<sup>13</sup>C 核磁共振碳谱分析

从 3 种林型的凋落物 CPMAS <sup>13</sup>C-NMR 分析的官能团百分比结构图(图 2)中可以看出,凋落物中官能团碳以 O-alkyl C 为主(39.98%~57.03%),且随着分解进行,O-alkyl C 的百分比含量从未分解层到已分解层逐渐下降。Alkyl C 在季风林和混交林的半分解层和已分解层中 Alkyl C 的百分比含量高于未分解层,在松林 3 种层次差异不明显。季风林中 3 种不同分解程度凋落物中的 Aromatic C 百分比含量差异不明显,而在混交林和松林中,半分解层和已分解层的 Aromatic C 百分比含量高于未分解层。在 3 种林型不同凋落物分解层中,已分解层的 Carbonyl C 百分比含量最高。

在 3 种林型中凋落物层的惰性指数为:已分解层>半分解层>未分解层(表 3),这表明随着分解进行,凋落物不易分解的有机碳成分占总有机碳比例增加。在半分解层和已分解层,混交林和季风林的惰性指数明显高于松林。

## 4 讨论

### 4.1 恢复演替系列下土壤活性有机碳含量变化趋势

易氧化有机碳是一种活性有机碳,周转周期短,主要来源于植物残体<sup>[9,26]</sup>,对环境变化响应灵敏。土壤活性有机碳含量变化与其凋落物质量、细根生物量、微生物活性与土壤温湿度变化密切联系<sup>[15]</sup>。鼎湖山不同演替阶段森林土壤易氧化有机碳含量差异并不显著(图 1b),一方面可能与微生物活性影响下的土壤碳的输入与输出平衡有关<sup>[28,29]</sup>。虽然演替中期(混交林)和后期(季风林)的年凋落物量和细根生物量高于松林(表 1),有利于土壤活性有机碳的积累,但是我们也发现季风林和混交林的土壤湿度和微生物碳含量高于松林(表 1),高的土壤湿度和微生物活性会促进活性有机碳的分解<sup>[30]</sup>,不利于其积累。邓琦等<sup>[31]</sup>通过野外观测 3 种森林的土壤呼吸速率也发现,随着演替进行,土壤呼吸速率增加。土壤有机碳稳定性的变化取决于碳输入和矿化

过程的动态平衡<sup>[32]</sup>。因此,高分解速率抵消了高植物碳源输入速率,最终导致 3 种林型活性有机碳含量差异不显著。另外,土壤活性含量与其凋落物质量密切相关。不同林型凋落物具有各自的化学特性,这也会影响其土壤有机碳性质<sup>[33]</sup>。虽然演替初期森林(松林)的年凋落物量低于演替中、后期的混交林和季风林,但是其新鲜凋落物层的 O-alkyl C 含量(57.03%)高于季风林(49.10%)和混交林(54.50%)。O-alkyl C 主要包括多糖,属于易氧化分解的碳水化合物<sup>[28,34]</sup>。松林新鲜凋落物含有更高浓度的 O-alkyl C,表明其可为土壤提供的活性有机碳组分也高。因此,南亚热带森林植被恢复演替过程中的土壤活性有机碳含量差异不显著。

### 4.2 恢复演替系列下土壤惰性有机碳含量变化趋势

不易氧化有机碳属于惰性有机碳,对环境变化响应缓慢<sup>[26]</sup>,其含量变化与凋落物碳形态结构和惰性有机碳周转速度相关<sup>[21,35]</sup>。季风林和混交林的不易氧化有机碳含量显著高于松林(图 1c),这与凋落物的<sup>13</sup>C 核磁共振分析结果相符合(图 2)。随着凋落分解进行,凋落物的惰性指数增高(表 3)。惰性指数高意味着解速率较慢的 Alkyl C 和 Aromatic C 含量较高。在半分解层和已分解层,季风林和混交林的惰性指数高于松林,这表明演替中期和后期森林凋落物中惰性有机碳含量随着分解进行积累量大于演替早期的森林。季风林和混交林的年凋落物量也显著高于松林(表 1),且随着分解进行,凋落物中分解速率较慢的 Alkyl C 和 Aromatic C 比例也较高<sup>[26]</sup>,这表明季风林和混交林对矿质土壤层的惰性有机碳的供给大于松林,所以季风林和混交林的不易氧化有机碳含量显著高于松林。马文济<sup>[17]</sup>通过<sup>13</sup>C核磁共振技术分析浙江宁波常绿阔叶林演替系列土壤的有机碳官能团结构也发现,随着演替进行,土壤有机碳惰性指数也升高。另外,惰性有机碳较难被微生物分解利用,周转期 10 年以上,甚至几千年<sup>[6]</sup>。而森林演替是一个养分积累的过程,鼎湖山的演替中期与后期森林林龄大约分别比初期的松林大 40 年和 330 年<sup>[13]</sup>。因此,周转速率慢的惰性有机碳随之积累量可能会更多。从惰性有机碳含量变化可以看出,在南亚热带森林恢复演替过程中,土壤有机碳的稳定性随之增加。

### 4.3 恢复演替系列下土壤总有机碳含量变化趋势

与惰性有机碳变化趋势一样,由松林向季风林恢复演替过程中,土壤总有机碳含量呈增加趋势(图 1a)。这一结果与土壤活性有机碳占总有机碳

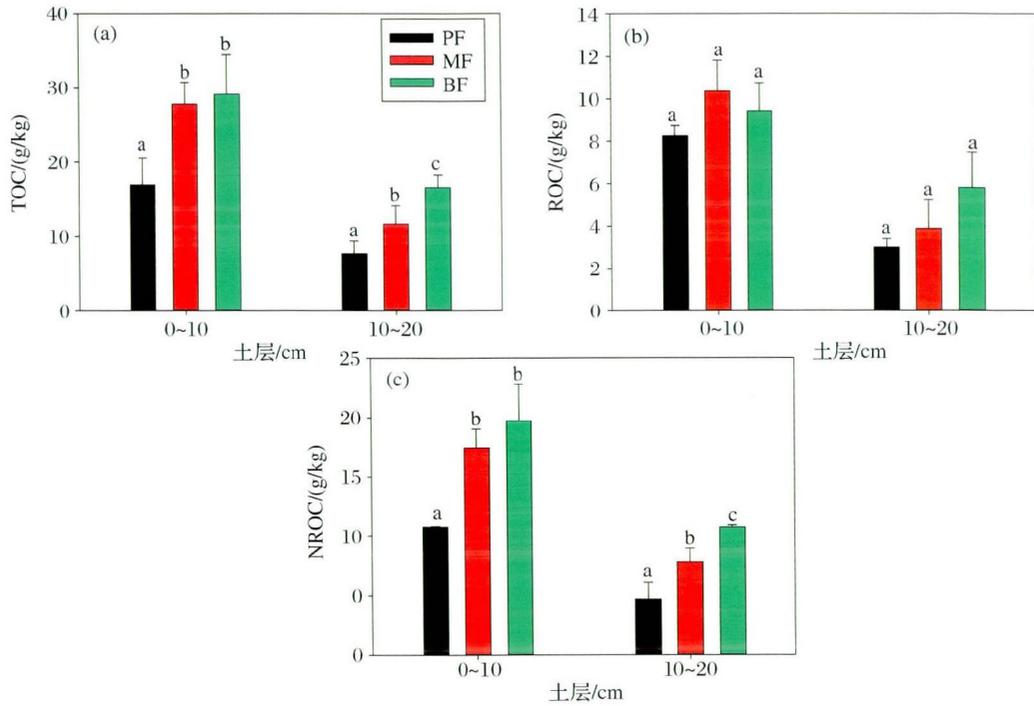


图 1 森林植被恢复演替序列的土壤总有机碳、易氧化有机碳和不易氧化有机碳含量

Fig. 1 The soil TOC, ROC and NROC in three forests

图中误差棒代表标准差, 每幅图不同字母代表在该森林相同土壤层次中相差不显著

Bars are means and error bars are standard deviations. Means with different letters are significantly different among the forest types in each soil layer in each panel

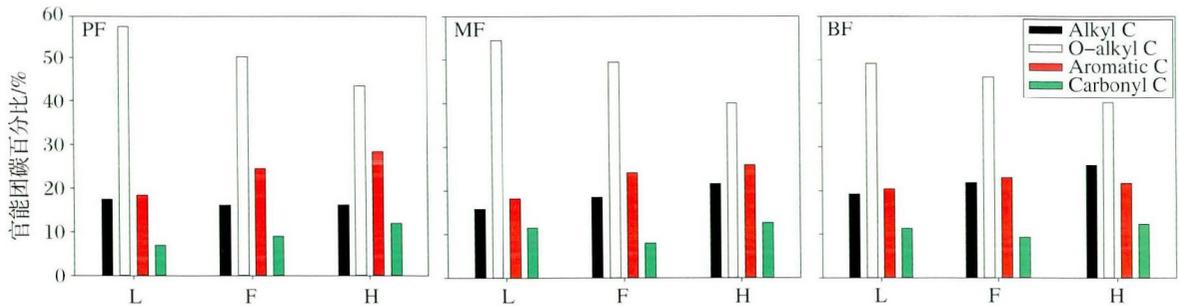


图 2 森林植被恢复演替序列的凋落物官能团碳相对含量(单位: %)

Fig. 2 Distribution of C functional groups in the forest floor layers among the three forests (unit: %)

L: 未分解层, Fresh litter layer; F: 半分解层, Fermentation layer; H: 已分解层, Humus layer

表 3 鼎湖山森林植被恢复演替序列的凋落物惰性指数(单位: %)

Table 3 The recalcitrance index in the forest floor of three forests (unit: %)

凋落物层次	松林	混交林	季林
未分解层	56.18	51.64	65.56
半分解层	68.88	74.23	80.85
已分解层	80.60	90.29	90.68

比例的变化也一致(表 2)。活性有机碳占总有机碳

的比例可以反映土壤有机碳的稳定性<sup>[36]</sup>, 森林植被由松林向季风林演替过程中, 土壤活性有机碳占总有机碳的百分比含量下降, 反映了土壤有机碳的稳定性不断增加。季风林和混交林群落结构复杂, 系统稳定, 土壤湿度高, 对环境变化有较好的缓冲性<sup>[37]</sup>。而松林林冠稀疏, 群落结构单一, 土壤湿度低, 对环境变化响应敏感。Martin 等<sup>[38]</sup>的研究结果也表明更低土壤湿度且林冠处于发育阶段的年轻森林系统的分解速率较低。松林的低土壤湿度会导致

凋落物和根的分解速率较慢,同时土壤密度大、孔隙度小,不利于可溶性有机碳向次表层甚至深层土壤的淋溶下渗。因此,松林中低有机碳输入量可能导致其土壤总有机碳含量低于季风林和混交林。南亚热带森林演替促进土壤有机碳的积累,且土壤碳库周转速率远低于大气和植被碳库,这表明该区域森林正向演替可能对缓解全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高具有积极影响。

综上所述,南亚热带处于不同恢复演替阶段森林土壤有机碳形态组成不一致。森林由松林向季风林演替过程中,土壤活性有机碳含量差异不显著,但是活性有机碳占总有机碳的百分比含量下降。3 个森林土壤惰性有机碳含量差异显著,松林、混交林和季风林 0~10 cm 土壤的不易氧化有机碳含量分别为(10.81 ± 0.04)、(17.48 ± 1.56)和(19.74 ± 3.08) g/kg; 10~20 cm 土壤的不易氧化有机碳含量分别为(4.69 ± 1.39)、(7.83 ± 1.14)和(10.77 ± 0.17) g/kg。南亚热带森林恢复演替过程中,土壤有机碳的稳定性不断增加,演替后期的森林土壤积累有机碳的效应大于前期的森林。惰性有机碳的积累可能是南亚热带森林土壤总有机碳积累的一个重要过程。

#### 参考文献(References):

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations: State of the World's Forests 2012 [R/OL]. ROME, 2012 [2015-07-01]. <http://www.fao.org/docrep/016/i3010e/i3010e00.htm>.
- [2] He Jinsheng. Carbon cycling of Chinese forests: From carbon storage, dynamics to models [J]. *Science in China (Series C)* 2012, 42(3): 252-254. [贺金生. 中国森林生态系统的碳循环: 从储量、动态到模式 [J]. 中国科学: C 辑, 2012, 42(3): 252-254.]
- [3] Luo Y Q, Weng E S. Dynamic disequilibrium of the terrestrial carbon cycle under global change [J]. *Trends in Ecology & Evolution* 2011, 26(2): 96-104.
- [4] Liu Shirong, Wang Hui, Luan Junwei. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5 437-5 448. [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): 5 437-5 448.]
- [5] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. *Nature* 2013, 500(7 462): 287-295.
- [6] Lützow M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2 183-2 207.
- [7] Bradford M A, Fierer N, Reynolds J F. Soil carbon stocks in experimental mesocosms are dependent on the rate of labile carbon, nitrogen and phosphorus inputs to soils [J]. *Functional Ecology*, 2008, 22(6): 964-974.
- [8] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1 781-1 796.
- [9] Rovira P, Jorba M, Romanyà J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(4): 355-369.
- [10] Jagadamma S, Lal R. Integrating physical and chemical methods for isolating stable soil organic carbon [J]. *Geoderma*, 2010, 158: 322-330 doi: 10.1016/j.geoderma.2010.05.04.
- [11] Bruun S, Ågren G I, Christensen B T, et al. Measuring and modeling continuous quality distributions of soil organic matter [J]. *Biogeosciences* 2010, 7: 27-41.
- [12] Lopez-Sangil, Rovira P. Sequential chemical extractions of the mineral-associated soil organic matter: An integrated approach for the fractionation of organ-mineral complexes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62(3): 57-67.
- [13] Zhou G Y, Zhou C Y, Liu S G, et al. Belowground carbon balance and carbon accumulation rate in the successional series of monsoon evergreen broad-leaved forest [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(3): 311-321.
- [14] Sun Baowei, Yang Xiaodong, Zhang Zhihao, et al. Relationships between soil carbon pool and vegetation carbon return through succession of evergreen broad-leaved forests in Tiantong region [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 2013, 37(9): 803-810. [孙宝伟, 杨晓东, 张志浩, 等. 浙江天童常绿阔叶林演替过程中土壤碳库与植被碳归还的关系 [J]. 植物生态学报 2013, 37(9): 803-810.]
- [15] Fan Yuexin, Yang Yusheng, Yang Zhijie, et al. Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural secession [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5 751-5 759. [范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5 751-5 759.]
- [16] Sun Weijun, Fang Xi, Xiang Wenhua, et al. Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan' China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 7 765-7 773. [孙伟军, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(14): 7 765-7 773.]
- [17] Ma Wenji. Effect of Succession on Soil Carbon Pool of Evergreen Broad-Leaved Forests in Ningbo, Zhejiang [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015. [马文济. 浙江宁波常绿阔叶林演替对土壤碳库结构的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.]
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1 367-1 377.

- [19] Compton J E , Boone R D. Long-term impacts of agriculture on soil carbon and nitrogen in new England forests [J]. *Ecology* , 2000 , 81( 8) : 2 314-2 330.
- [20] Pan Genxing , Lu Haifei , Li Lianqing , *et al.* Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management [J]. *Advances in Earth Science* , 2015 , 30( 8) : 940-951. [潘根兴 路海飞 李恋卿 等. 土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿 [J]. 地球科学进展 , 2015 , 30( 8) : 940-951. ]
- [21] Ostertag R , Marín-Spiotta E , Silver W L , *et al.* Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico [J]. *Ecosystems* , 2008 , 11: 701-714 ,doi: 10. 1007/s10021-0028-9152-1.
- [22] Peng Shaolin , Wang Bosun. Forest succession at Dinghushan , Guangdong , China [J]. *Botanical Journal of South China* , 1993 , 2( Trial issue 1) : 34-42. [彭少麟, 王伯荪. 鼎湖山森林群落演替之研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 1993 , 2( 试刊 I) : 34-42. ]
- [23] Zhang Deqiang , Ye Wanhui , Yu Qingfa , *et al.* The litter-fall of representative forest of successional series in Dinghushan [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2000 , 20( 6) : 938-944.
- [24] Huang W J , Liu J X , Zhou G Y , *et al.* Effects of precipitation on soil acid phosphatase activity in three successional forests in southern China [J]. *Biogeosciences* , 2011 , 8: 1 901-1 910 ,doi: 10. 5194/bg-8-1901-2011.
- [25] Liu Guangsong. Soil Physical and Chemical Analysis , Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standard Press of China , 1996. [刘光松. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996. ]
- [26] Blair G J , Lefroy R B , Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation , and the development of a carbon management index for agricultural system [J]. *Australian Journal of Agricultural Research* , 1995 , 46( 7) : 1 459-1 466.
- [27] Zhang T , Li Y F , Chang S X , *et al.* Converting paddy field to Lei bamboo ( *Phyllostachys praecox* ) stands affected soil nutrient concentrations , labile organic carbon pools , and organic carbon chemical compositions [J]. *Plant Soil* , 2013 , 367( 1/2) : 249-261.
- [28] Tirol-Padre A , Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal* , 2004 , 68( 3) : 969-978.
- [29] Yang Y S , Guo J F , Chen G S , *et al.* Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China [J]. *Plant Soil* , 2009 , 323( 1/2) : 153-162.
- [30] Gabriel C , Kellman L. Investigating the role of moisture as an environmental constraint in the decomposition of shallow and deep mineral soil organic matter of a temperature coniferous soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry* , 2004 , 68: 373-384 ,doi: 10. 1016/j. soilbio. 2013. 10. 009.
- [31] Deng Qi , Liu Shizhong , Liu Juxiu , *et al.* Contributions of litter-fall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China [J]. *Advances in Earth Science* , 2007 , 22( 9) : 976-986. [邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素 [J]. 地球科学进展 , 2007 , 22( 9) : 976-986. ]
- [32] Liu Manqiang , Chen Xiaoyun , Guo Juhua , *et al.* Soil biota on soil organic carbon stabilization [J]. *Advances in Earth Science* , 2007 , 22( 2) : 152-158. [刘满强, 陈小云, 郭菊华, 等. 土壤生物对土壤有机碳稳定性的影响 [J]. 地球科学进展 , 2007 , 22( 2) : 152-158. ]
- [33] Zhou Li , Li Baoguo , Zhou Guangsheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. *Advances in Earth Science* , 2005 , 20( 1) : 99-105. [周莉 李保国 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展 , 2005 , 20( 1) : 99-105. ]
- [34] Alarcón-Gutiérrez E , Floch C , Ziarelli C , *et al.* Characterization of a Mediterranean litter by <sup>13</sup>C CPMAS NMR: Relationships between litter depth , enzyme activities and temperature [J]. *European Journal of Soil Science* 2008 , 59( 3) : 486-495.
- [35] Ono K , Hiradate S , Morita S , *et al.* Humification processes of needle litters on forest floors in Japanese cedar ( *Cryptomeria japonica* ) and Hinoki cypress ( *Chamaecyparis obtusa* ) plantations in Japan [J]. *Plant Soil* 2011 , 338( 1) : 171-181.
- [36] Lü Maokui , Xie Jinsheng , Zhou Yanxiang , *et al.* Dynamics of unprotected soil organic carbon with the restoration process of Pinus massoniana plantation in red soil erosion area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2014 , 25( 1) : 37-44. [吕茂奎, 谢锦升, 周艳翔, 等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复演替过程中土壤非保护性有机碳的变化 [J]. 应用生态学报, 2014 , 25( 1) : 37-44. ]
- [37] Zhang D Q , Sun X M , Zhou G Y , *et al.* Seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> effluxes with responses to environmental factors in lower subtropical forest of China [J]. *Science in China ( Series D)* , 2006 , 49( Suppl. ) : 139-149.
- [38] Martin P H , Sherman R E , Fahey T J. Forty years of tropical forest recovery from agriculture: Structure and floristic of secondary and old-growth riparian forests in the Dominican Republic [J]. *Biotropica* 2004 , 36: 297-317.

## Variations in the Fractions and Stabilization of Soil Organic Carbon with Forest Succession in Southern China<sup>\*</sup>

Chen Xiaomei<sup>1</sup>, Yan Junhua<sup>2</sup>, Lin Meizhen<sup>1</sup>, Chu Guowei<sup>2</sup>,  
Wu Jianping<sup>2</sup>, Zhang Deqiang<sup>2\*</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;  
2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** Soil Organic Carbon (SOC) fractions play a critical role in the stabilization of SOC. It is essential to clarify the variations in SOC fractions along forest succession for predicting soil carbon (C) source/sink capacity as forest develops. In the present study, we collected and analyzed soil samples in Total Organic Carbon (TOC) content and the concentration of its Readily Oxidizable Organic Carbon (ROC) and Non-Readily Oxidizable Organic Carbon (NROC) fractions in a Pine Forest (PF), a pine and broadleaf Mixed Forest (MF), and an old-growth monsoon evergreen Broadleaf Forest (BF) in the subtropical China. The three forests represent different successional stages of forest in southern China, with the PF being at the early, the MF at the middle and the BF at the climax stages, respectively. To clarify the reasons for why SOC fractions changed with forest succession, litterfalls in these forests were also collected to assay C functions by means of <sup>13</sup>C Nuclear Magnetic Resonance (NMR) analysis. Results showed that although there was no significant difference in the content of ROC among the three forests, the ratio of ROC to TOC in the PF was significantly higher than that in both of the BF and MF. This was likely due to the higher content of O-alkyl C in fresh litter in the PF than in the other two forests. Unlike ROC, however, NROC content was the highest in the BF, followed by the MF and then PF, which could be attributed to the lower recalcitrance index in the partly-decomposed and decomposed litterfall layers in the PF than in the MF and PF. Finally, TOC concentration was significantly the highest in the climax BF, the lowest in the youngest PF, and in between in the MF. Our results suggest that the accumulation of NROC, which is the recalcitrant fraction of SOC, may be the major reason for why forests at the middle and late stages (*i. e.*, the MF and BF, respectively) maintain higher TOC content and Organic Carbon (OC) stabilization in soils.

**Key words:** Forest succession; Soil C accumulation; Soil C sequestration; SOC fractions; Lower subtropical forest.

\* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Responses of soil organic carbon fractions to precipitation patterns change in a subtropical zonal forest in southern China" (No. 31400415); Education Department of Guangdong Province "Mechanism of soil carbon accumulation in subtropical forests along an urban-to-rural gradient in Southern China" (No. 2014KQNCX110).

**First author:** Chen Xiaomei (1985-), female, Nan'an City, Fujian Province, Lecture. Research areas include responses of forest ecosystems to global changes. **E-mail:** xmchen@scib. ac. cn

**Corresponding author:** Zhang Deqiang (1963-), male, Huizhou City, Guangdong Province, Professor. Research areas include the relationship between global change and ecosystems. **E-mail:** zhangdeq@scib. ac. cn