

鹤山不同植被土壤有机碳分布特征^①

汤松波^{1,2,3}, 习丹⁴, 任文丹^{1,2,3}, 旷远文^{1,3*}

(1 中国科学院华南植物园退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650; 4 福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要:不同植被类型下土壤有机碳 (SOC) 储量和动态变化是全球变化研究的热点之一。对南亚热带鹤山 6 种不同植被类型(灌草、马尾松林、桉树林、乡土树林、马占相思林、季风常绿阔叶林) SOC 干湿季、空间 (0~10, 10~20, 20~40 cm) 变化特征、土壤惰性指数及其与土壤有效氮 (TAN) 的关系研究表明: 6 种植被中, 干季 SOC 含量显著高于湿季, SOC 含量随土层深度降低, 马占相思林 SOC 含量最高, 马尾松林和灌草最低; 6 种植被 SOC 储量在 0~10 cm 土层所占比例最高, 占 0~40 cm 土层 SOC 含量 40% 以上; 土壤惰性指数随土壤深度增加而下降, 常绿阔叶林、乡土树林和马占相思林烷基碳和 ROC 惰性指数高于桉树林和马尾松林, 揭示这 3 种植被 SOC 具有更高稳定性; SOC 与土壤 TAN 含量呈显著正相关。结果揭示, 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。

关键词:土壤有机碳; 总有效氮; 植被类型; 季节变化; 惰性指数

中图分类号: Q94; S154.1 **文献标识码:** A

土壤碳库是陆地生态系统三大主要碳库(土壤、大气和植被)中最大碳库^[1], 据估计, 全球森林土壤碳库约为 861Pg C^[2]。土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 作为森林土壤碳库的重要组成部分, 对调控全球气候变化具有重要作用^[3]。森林 SOC 主要来自凋落物输入和根系周转, 并在土壤生物作用下以 CO₂ 输出, 实现大气-植被-土壤碳库间的循环^[4]。受人类活动影响, 全球森林面积锐减, 森林土壤固碳能力被严重削弱^[5]; 同时, 全球变化背景下, 森林 SOC 储量和动态已发生显著变化, 森林土壤正逐渐由碳汇转变为碳源^[6], 对全球碳平衡造成极大影响。

森林 SOC 受植被类型^[7]、土壤氮含量^[8]、土壤水分^[9]和土壤微生物群落结构^[8]等多种因素影响, 不同森林生态系统 SOC 存在较大的时空差异。在时间上, 过去认为 SOC 随森林演替呈现先增加后稳定趋势。但最新研究表明, 成熟森林也具有一定的固碳能力^[10]; 在空间上, SOC 随着土壤深度增加而下降, 且主要集中在 0~100 cm 土层^[11-12]; 另外, 植被类型对 SOC 影响很大, 通常以常绿针叶林最大(约 6.81 Pg C), 其次是常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林和混

交林^[13-14]。

惰性有机碳 (recalcitrant organic carbon, ROC) 是土壤碳库中理化性质相对稳定的部分。根据质谱分析结果可将 ROC 分为烷基碳 (Alkyl-C)、烷氧碳 (O-alkyl-C)、芳香碳 (Aromatic-C) 和羧基碳 (Carboxyl-C)^[15] 4 种组分。随着凋落物分解进行, ROC 在土壤碳库中所占比例逐渐增加, 但当土壤中 ROC/TOC (土壤总有机碳) 值达到 60%~65% 时将会保持稳定或稍有减少^[16]; 植被类型对土壤 ROC 含量影响显著^[17], 如阔叶林或物种多样性较高的森林其 ROC 含量要大于针叶林或其他纯林^[17-18], 固氮植物类型土壤 ROC 含量大于非固氮植被类型^[19]等; 此外, 环境变化对 ROC 也影响较大, 如大气 CO₂ 浓度升高有利于土壤 ROC 积累^[20]。

本研究以南亚热带地区鹤山不同植被类型(灌草、马尾松林、桉树林、乡土树林、马占相思林、常绿阔叶林)不同深度(0~10, 10~20, 20~40 cm)土壤为对象, 分析 SOC 季节、空间变化规律及其与土壤总有效氮 (total available nitrogen, TAN, 定义为 NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 之和) 的关系, 并基于不同植

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41471443)资助。

* 通讯作者(kuangyw@scbg.ac.cn)

作者简介: 汤松波 (1992—), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: TangSongbo@scbg.ac.cn

被下 ROC (烷基碳, 烷氧碳, 芳香碳, 羧基碳) 比例及惰性指数空间变化规律, 以期揭示不同植被下 SOC 稳定特征, 为退化生态系统植被恢复过程中构建高效固碳人工林树种的选择和搭配提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样点概述

研究点为中国科学院鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 属典型南亚热带季风气候, 具明显干湿季节交替特征。年平均气温为 21.7 °C, 年均降水量为 1 700 mm^[21]。森林土壤为赤红壤, 呈酸性。早期受人为干扰严重, 部分植被退化为荒坡地。自 1984 年起, 鹤山站先后通过营造多种人工林开展植被恢复研究, 并构建林、果、草、渔复合农业生态系统示范模式。本研究的 6 种植被类型为: 灌草 (shrub-grass forest, SF): 主要优势种为芒萁 (*Dicranopteris pedata*) 及一些小灌木; 马尾松林 (masson pine forest, PF): 林龄 30 a 以上, 胸径 20 ~ 30 cm, 盖度 25% ~ 35%, 林下有豹皮樟 (*Litsea rotun-*

difolia)、银柴 (*Aporosa dioica*)、阴香 (*Cinnamomum burmanni*)、九节 (*Psychotria rubra*) 等; 桉树林 (eucalyptus forest, EF): 树高 15 m 以上, 盖度 25% ~ 35%, 林下有红车 (*Syzygium hancei*)、浓子茉莉 (*Fagerlindia scandens*)、紫玉盘 (*Uvaria microcarpa*) 等; 乡土树林 (native-species forest, NF): 林龄 25 a 以上, 盖度 75% ~ 85%, 主要以荷木 (*Schima superba*) 为主, 伴生九节 (*Psychotria rubra*)、银柴 (*Aporosa dioica*)、潺槁木姜子 (*Litsea glutinosa*) 等; 马占相思林 (acacia forest, AF): 林龄 25 a 以上, 乔木层盖度 40% ~ 60%; 胸径 20 ~ 25 cm, 林下有竹节树 (*Carallia brachiata*)、白车 (*Syzygium levinei*)、黑咀蒲桃 (*Syzygium cumini*) 等; 季风常绿阔叶林 (monsoon evergreen broadleaved forest, MF): 盖度达 95% 以上, 主要有小果山龙眼 (*Helicia cochinchinensis*)、黄桐 (*Endospermum chinense* Benth.) 和橄榄 [*Canarium album* (Lour.) Raeusch.] 等高大乔木, 林下灌木与草本植物种类较少, 地表凋落物较多。本研究中 6 种植被类型立地条件见表 1。

表 1 鹤山 6 种植被类型立地条件
Table 1 Site conditions of 6 forest types in Heshan

植被类型	母岩	母质	地形	坡度	坡向
灌草(SF)	砂页岩	红壤	丘陵	-	-
马尾松林(PF)	砂页岩	红壤	丘陵	8°~20°	西北至东南
桉树林(EF)	砂页岩	红壤	丘陵	8°~20°	西北至东南
乡土树林(NF)	砂页岩	红壤	丘陵	22°~28°	东北
马占相思林(AF)	砂页岩	红壤	低山丘陵	18°~23°	-
常绿阔叶林(MF)	砂页岩	红壤	丘陵	-	-

注: 表中“-”表示数据未记录。

1.2 土样采集与化学分析

分别从上述 6 种不同植被样地上、中、下 3 个坡位, 用内径 2 cm、长 60 cm 土钻分 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层采集土样。每个样地内采集 10 管土合成 1 个混合样, 每个样地保证 3 个混合样。土样带回实验室自然风干, 挑去根系和石砾, 粉碎, 过 2 mm 筛干燥保存, 备分析。土样采集时间为 2011 年 8 月 (代表湿季) 和 2012 年 2 月 (代表干季)。

土壤 SOC 测定采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 油浴外加热法。土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 采用凯氏定氮法测定, 二者之和即为土壤总有效性氮 (TAN)。烷基碳、烷氧碳、芳香碳、羧基碳测定方法见 Mathers 等^[15]和张晋京等^[22]: 称量 5 g 风干土于 100 ml 塑料离心管中, 加 50 ml HF 溶液 (10%, v/v), 盖上盖子, 震荡 1 h, 离心 10 min (3 000 r/min), 上清液去掉, 残余物继续

用 HF 溶液处理, 重复 8 次, 8 次处理过程中样品在摇床上振荡的时间为: 第 1 ~ 4 次均 1 h, 第 5 ~ 7 次均 12 h, 第 8 次为 24 h。土壤样品经 HF 处理完以后, 用双蒸水洗残余物 4 次, 去除土壤样品中残留的 HF。经 HF 处理的残余物, 在 40 °C 的烘箱中烘干, 磨细过 60 目。将经 HF 预处理过的土壤样品进行固态魔角旋转-核磁共振测定 (AVANCE II 300 MH)。试验采用 7 mm CPMAS 探头, 观测频率为 100.5 MHz, MAS 旋转频率为 5 000 Hz, 接触时间为 2 ms, 循环延迟时间为 2.5 s。化学位移的外标物为六甲基苯 (Hex methylbenzene, HMB, 甲基 17.33)。所测图谱可分为 4 个共振区域: 0 ~ 50 (烷基碳)、50 ~ 110 (烷氧碳)、110 ~ 160 (芳香碳)、160 ~ 220 (羧基碳)。对谱峰曲线进行区域积分, 获得 4 种碳化学组分的相对含量, 根据公式 (烷基碳 + 芳香碳)/(烷氧

碳 + 羧基碳)^[23]计算出惰性指数。土壤容重参考文献[24-25],土壤碳密度和碳储量分别按照如下公式计算:

$$SOCD_h = \sum(1-\theta_h) \times BD_h \times C_h \times T_h/100 \quad (1)$$

$$SOCS = Area_i \times SOCD_h \quad (2)$$

式中:SOCD_h:h层土壤碳密度(kg/m²);θ_h:第h层砾石含量(% , v/v);BD_h:第h层土壤容重(g/cm³);C_h:第h层土壤有机碳含量(C, g/kg);T_h:第h层土层厚度(cm)。SOCS:h层碳储量(kg);Area_i:林型面积(m²)。

1.3 数据分析

土壤SOC含量的差异显著性采用多因素方差分析(Multi-way ANOVA)检验和新复极差法(SSR)比较不同林型和不同土层之间的差异。SOC与土壤TAN相关性采用线性相关进行分析。

2 结果与分析

2.1 SOC随季节、土层深度及植被类型变化规律

三因素方差分析结果(表2)表明,6种植被SOC含量受季节、土层深度、植被类型及其交互作用影响显著(P<0.05)。SOC含量干季显著大于湿季,在0~10cm土层含量最高,且随土层深度显著降低(P<0.05);在6种植被中,SOC含量表现为马占相思林 >

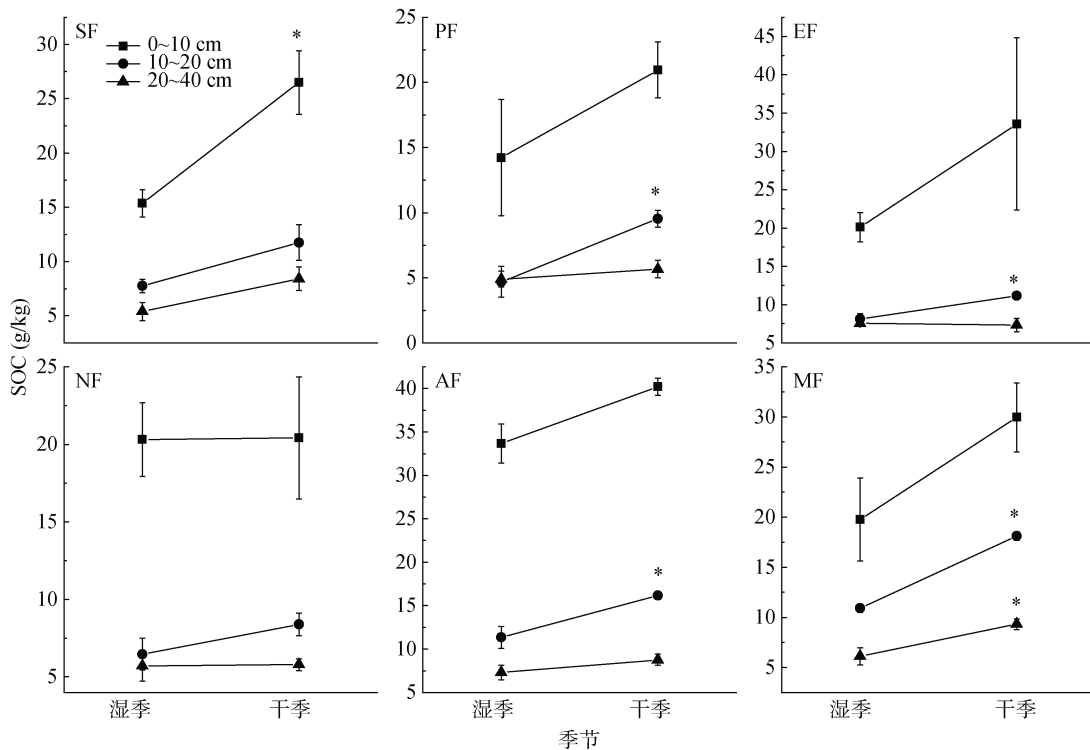
常绿阔叶林 > 桉树林 > 乡土树林 = 马尾松林 = 灌草,马占相思林SOC显著高于其他5种植被(P<0.05)。

表2 季节、土壤深度和植被类型对SOC影响三因素方差分析结果

影响因子	自由度	F值	P值
季节	1	27.51	<0.000 1
植被类型	5	11.16	<0.000 1
季节×植被类型	5	1.02	0.409 3
土壤深度	2	168.27	<0.000 1
季节×土壤深度	2	4.73	0.011 5
植被类型×土壤深度	10	3.51	0.000 7
植被类型×土壤深度×季节	10	0.43	0.926 1

2.2 SOC储量及分布特征

6种植被土层SOC季节变化特征见图1,除桉树林和乡土树林20~40cm土壤层外,其余植被类型干季SOC含量均高于湿季,灌草0~10cm、松林10~20cm、桉树林10~20cm、马占相思林10~20cm、常绿阔叶林10~20cm和20~40cm土壤层干湿季差异均达到显著水平(P<0.05),其他土层SOC在干湿季无显著差异。



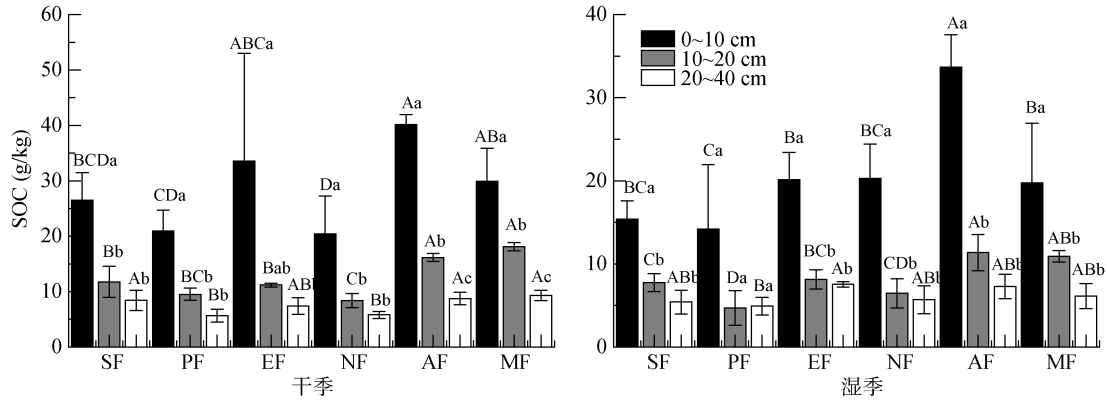
(SF: 灌草, PF: 马尾松林, EF: 桉树林, NF: 乡土树林, AF: 马占相思林, MF: 季风常绿阔叶林, 下同; 误差柱表示一倍的标准误(SE), *表示干湿季差异显著(P<0.05))

图1 鹤山6种植被土层SOC季节变化特征

Fig. 1 SOC contents between dry and wet seasons in different soil layers under 6 forest types

6 种不同植被 SOC 含量在湿季和干季垂直变化特征相似 (图 2),除湿季松林外,0~10 cm 土层 SOC 含量均显著高于 ($P < 0.05$) 10~20 cm 和 20~40 cm 土层,但 10~20 cm 与 20~40 cm 土层 SOC 含量无显著性差异 ($P > 0.05$)。方差分析显示,在 0~10 cm 土层, SOC 含量表现为马占相思林显著 ($P < 0.05$)

高于其他几种植被,而马尾松林显著 ($P < 0.05$) 低于桉树林和常绿阔叶林,其余植被间无显著性差异 ($P > 0.05$);在 10~20 cm 土层,马占相思林和常绿阔叶林 SOC 含量相似且显著 ($P < 0.05$) 高于其余植被类型 SOC;20~40 cm 土层 SOC 含量在不同植被间无显著差异。



(图中大写字母不同表示同一土层不同植被类型间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平,小写字母不同表示同一植被类型不同土层间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平,下同)

图 2 鹤山 6 种不同植被不同土层 SOC 含量

Fig. 2 SOC contents in different soil layers under 6 forest types

就储量看,无论干季还是湿季,0~40 cm 土层中总 SOC 有 43% 以上储存在 0~10 cm 土层中 (表 3);对 0~10 cm 土层 SOC 储量所占比例方差分析表明,6 种植被类型 0~10 cm 土层 SOC 储量差异不显著 ($P > 0.05$),采样季节、植被类型对 0~10 cm 土层 SOC 储量在 0~40 cm 土层总 SOC 储量比例影响不显著。但马占相思林 0~10 cm 土层 SOC 占 0~40 cm 土层 SOC 百分数最高,表明相对其他植被,豆科植物马占相思能有效在森林土壤表层累积 SOC。

表 3 干湿季 0~10 cm 土层 SOC 储量占 0~40 cm 土层 SOC 比例(%)

Table 3 Ratios of SOC storages between in 0~10 cm soils and in 0~40 cm soils in wet and dry seasons under 6 forest types

植被类型	干季	湿季
SF	48.2 ± 0.9a	45.5 ± 6.1a
PF	47.8 ± 3.2a	44.8 ± 13.7a
EF	50.6 ± 14.7a	44.2 ± 8.6a
NF	46.4 ± 7.4a	49.9 ± 11.2a
AF	53.1 ± 2.1a	55.3 ± 1.9a
MF	43.7 ± 4.0a	44.2 ± 12.3a

注:表中小写字母相同表示不同植被间差异没有达到显著水平($P > 0.05$)。

2.3 惰性碳组分及惰性指数随植被类型的变化

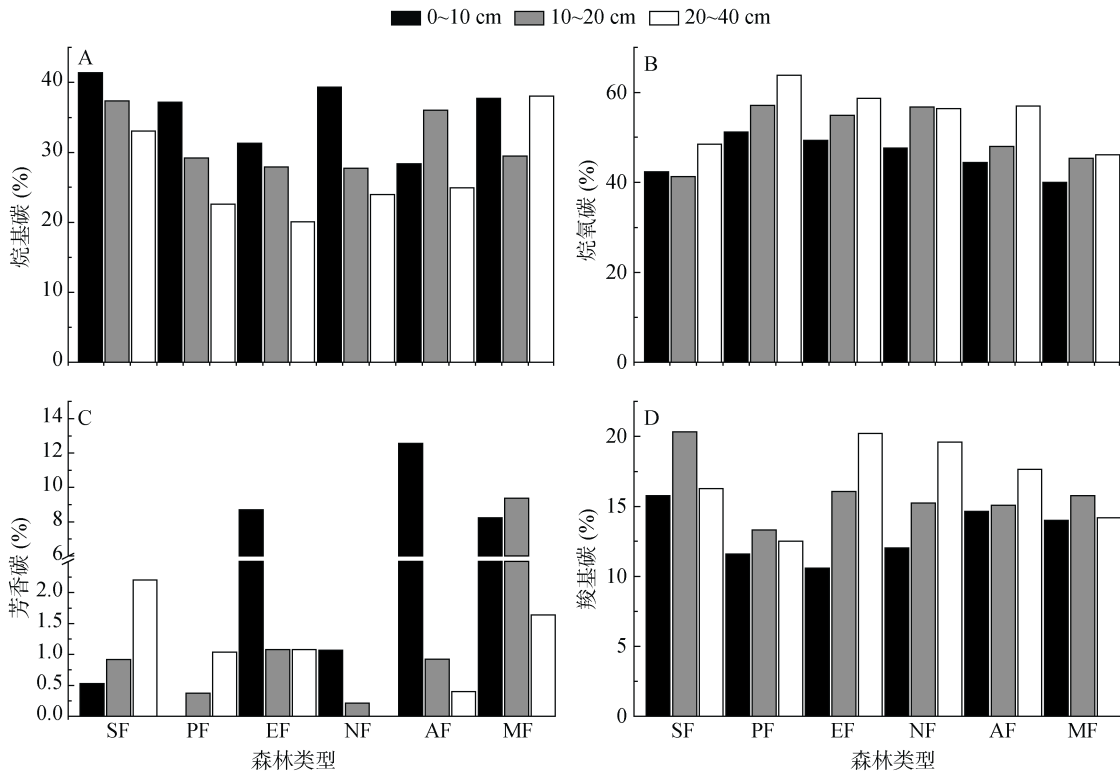
6 种植被土壤在各土层中 4 种 ROC 组分比例从

大到小顺序依次为:烷氧碳 > 烷基碳 > 羧基碳 > 芳香碳。烷基碳比例除季风阔叶林和马占相思林外,均随土壤深度增加而下降 (图 3A),烷氧碳和羧基碳比例随土壤深度增加而增大 (图 3B、3D)。对 6 种植被各土层惰性指数分析结果表明,惰性指数均随土层深度降低 (表 4),变化趋势与烷基碳一致。常绿阔叶林惰性指数各层均最大,马尾松林、乡土树林和桉树林土壤惰性碳分别在 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层中最小。

对不同土层中 4 种 ROC 组分与 ROC 含量作相关分析发现,在 0~10 cm 土层除芳香碳外 ($P = 0.034$),其余组分与 ROC 含量均无显著相关 (相关系数及 P 值分别是: $r_1 = -0.738, P = 0.094$; $r_2 = -0.417, P = 0.41$; $r_3 = 0.846, P = 0.034$; $r_4 = 0.480, P = 0.336$);10~20 cm 和 20~40 cm 土壤层各组分与 ROC 含量均无显著相关性,且土壤 ROC 含量随芳香碳增加而增加,表明芳香碳对森林表层土壤中 ROC 的稳定性具有一定影响。

2.4 SOC 与 TAN 相关性

6 种植被下土壤 TAN 含量空间分布规律与 SOC 相似,随土层深度降低。除马尾松林和湿季常绿阔叶林外,0~10 cm 土层 TAN 含量均显著 ($P < 0.05$) 高于 10~20 cm 和 20~40 cm 土层。干季,以马占相思林高,季风常绿阔叶林最低 (图 4);湿季,0~10 cm 土层 TAN 含量则以灌草和乡土树林含量最高,常绿阔叶林最低 (图 4)。



(A. 烷基碳; B. 烷氧碳; C. 芳香碳; D. 羧基碳)

图 3 6 种植被类型不同土层惰性碳组分比例

Fig. 3 Recalcitrant carbon fractions in different soil layers under 6 forest types

表 4 不同植被类型不同土层惰性指数

Table 4 Carbon recalcitrant indexes (RIC) in different soil layers under 6 forest types

植被类型	土层 (cm)		
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40
SF	0.721	0.621	0.545
PF	0.592	0.420	0.310
EF	0.668	0.409	0.268
NF	0.678	0.388	0.316
AF	0.694	0.586	0.339
MF	0.851	0.636	0.658

不同植被 SOC 含量与 TAN 相关性分析发现,干季除马尾松林外,其余 5 种植被 SOC 含量与 TAN 呈显著正相关;湿季,除常绿阔叶林外,其他 5 种植被 SOC 含量与 TAN 也具显著正相关性 (图 5)。

3 讨论

3.1 SOC 季节与空间变化解析

森林 SOC 含量主要受凋落物输入、死亡根分解、土壤微生物活动、土壤理化性质等因子影响。研究表明,湿季土壤呼吸显著大于干季,且与土壤微生物生

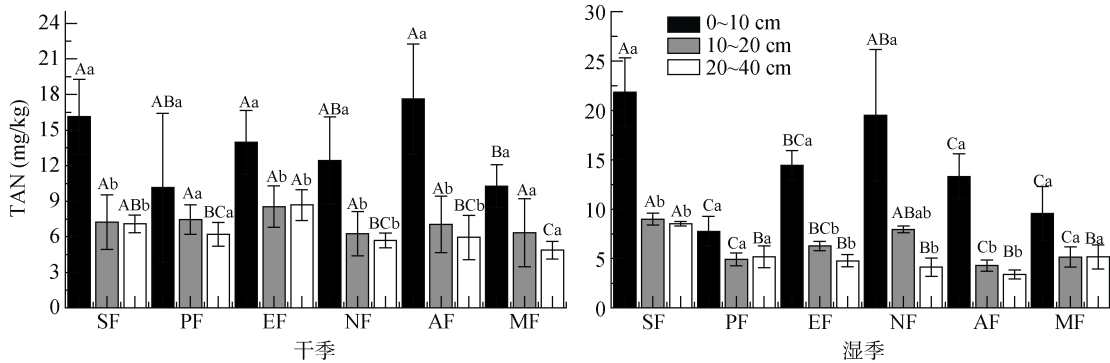
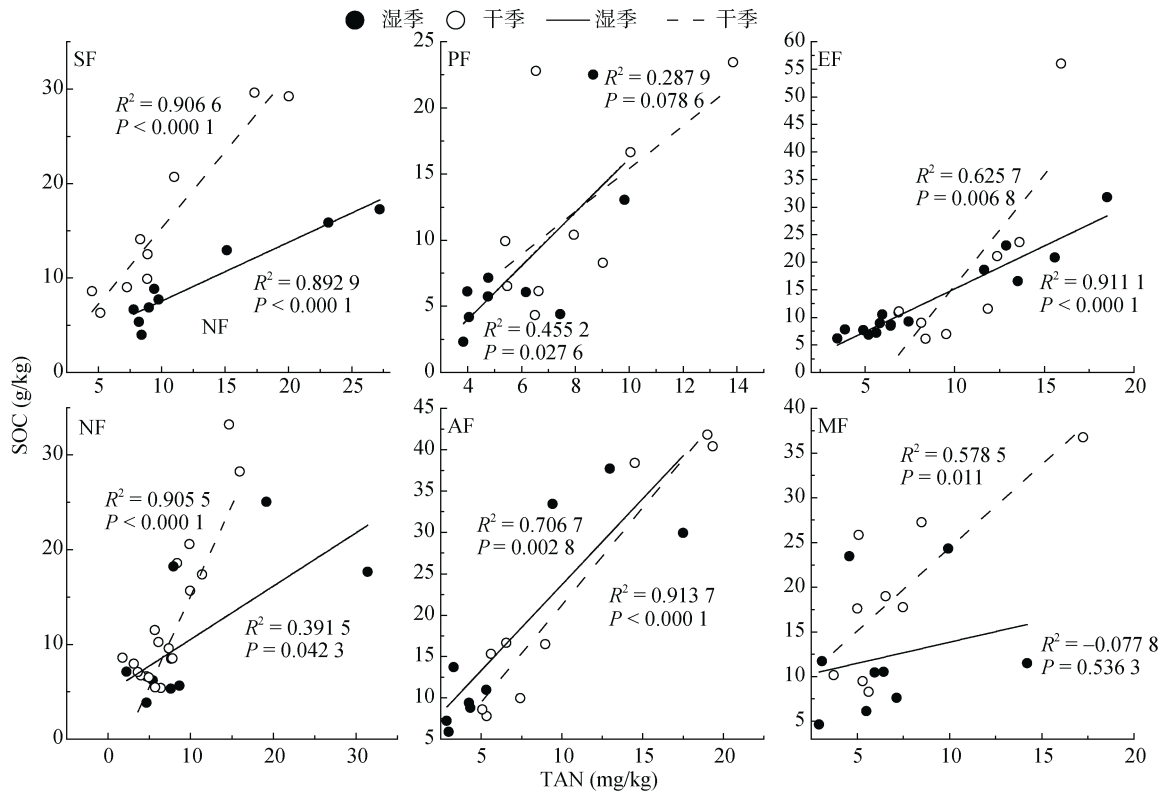


图 4 不同植被类型土壤 TAN 含量

Fig. 4 Soil total available nitrogen (TAN) contents in different soil layers under 6 forest types



(实心点、实线代表湿季；空心点、虚线代表干季)

图 5 不同植被类型 SOC 和 TAN 相关分析

Fig. 5 Correlation analyses between SOC and TAN under 6 forest types

物量、细根生物量及土壤碳存在显著正相关^[26]，凋落物分解速率湿季显著高于干季^[27]；降水量也与森林 SOC 周转速率呈正相关^[28]。本研究中，除乡土树林外，其余植被类型 SOC 在湿季均小于干季或具有下降趋势（图 1）。其主要原因可能在于：湿季土壤含水量及土壤温度高于干季，土壤微生物活动增强，加速 SOC 分解^[29]；同时，湿季植物生长比干季快，植物凋落物、细根输入量大，受激发效应影响 SOC 分解加快^[30]。

森林 SOC 大部分储存在土壤表层，研究发现 0~20 cm 土层的 SOC 占土壤 1 m 深 SOC 50% 以上，且随土层深度迅速下降^[11-12]。植被类型对 SOC 在土壤中的垂直分布影响显著^[12]，不同植被下 0~20 cm 土壤中 SOC 占 1 m 土壤总 SOC 比例以森林最大，草地次之，灌丛最少^[7]。深层土壤 SOC 主要由稳定性有机质输入量决定^[31]，还与土壤自身结构、质地紧密相关^[32]。本研究发现 0~10 cm 土层 SOC 含量超过 0~40 cm 土层 40% 以上（表 3），无论干湿季，马占相思 0~10 cm 土层 SOC 最高，灌草、马尾松林最低，可能与植物生长和群落生产力有关。马占相思林作为豆科植物，具有较高生产力，且土壤微生物对氮素获取并不完全依赖于 SOC 分解；灌草和马尾松林可能

由于生产力较低，尤其是灌草地凋落物积累相对较少，表层 SOC 含量较低，植被根系主要分布浅层土壤，深层土壤 SOC 的输入也相对较少。因此，在植被恢复前期，选择豆科树种能有效提高表层土壤 SOC 含量。

3.2 土壤速效氮对 SOC 的影响

碳和氮参与生态系统诸多过程，如物质循环、能量流动，且互相耦合^[33]。氮主要通过促进植物生长、提高生态系统生产力来增加凋落物输入^[34-36]；另一方面，生态系统氮饱和和容易导致土壤酸化，抑制土壤微生物活动，减少 SOC 分解^[8]。鹤山 6 种植被土壤 TAN 含量存在明显干湿季变异特征（图 4），但 6 种植被 SOC 含量均与 TAN 呈显著正相关（图 5），可能原因在于：鹤山植被均属于非氮限制，尤其是马占相思林本身具固氮功能，植物具有较高生产力；其次，在氮沉降增加背景下^[37]，鹤山森林土壤酸化对土壤微生物具有抑制作用，SOC 分解减少^[38]。尽管灌草和乡土树林湿季 TAN 含量高于另外 4 种植被，但其 SOC 含量仍较低，可能由于灌草郁闭度较低，减少了林冠对大气氮沉降截留效应^[39-41]，加之凋落物输入少，使 SOC 处于较低水平。随植被恢复时间的延长，SOC 逐渐积累，但土壤中氮逐年减少^[42]。因此，在植被

恢复过程中,生态系统固碳能力受土壤氮限制。

3.3 ROC 组分和惰性指数特征及其在植被恢复中的指示意义

SOC 是植被退化生态系统恢复效果的重要指标之一。ROC 对 SOC 稳定性贡献较其他组分大,ROC 惰性指数被广泛关注,惰性指数越高,SOC 稳定性越大^[23,36]。如 Jien 等^[43]和陈小梅等^[44]发现,松林凋落物中烷氧碳含量多于季风林和混交林,而烷基碳含量后者高于前者,并推测 SOC 稳定性与土壤惰性指数正相关。本研究中,季风常绿阔叶林惰性指数最高(表 4),可能与其较高烷基碳含量有关(图 3);6 种不同植被类型惰性指数均随土壤深度下降,其原因可能是土壤中小分子碳水化合物及蛋白质可以形成土壤胶质体或被黏土矿物质通过物理过程等方式长期保存在深层土壤中^[45];同时,生态系统凋落物输入增加可以产生激发效应,使深层土壤宿存、惰性有机碳稳定性下降,分解加速^[30,46],导致深层土壤惰性指数降低。惰性指数随土壤深度变化规律提示我们在研究生态系统固碳过程时不能简单认为土壤越深 SOC 越稳定或惰性碳含量越高。本研究中虽然常绿阔叶林和灌草惰性指数高于其他植被类型,但由于灌草凋落物分解速率快^[47],导致土壤中烷氧碳含量偏低(表 4),其固碳能力并不强;而常绿阔叶林中凋落物含量高,加之较高的生产力和惰性指数(表 4),表现出很强的固碳能力。

本研究还发现,芳香碳对表层土壤 ROC 含量具有重要影响,同 Ma 等^[48]研究结果相似;同时,对不同土层惰性碳组分分析结果显示(图 3),烷基碳对惰性指数影响较大,且烷基碳含量越高,惰性指数越大。因此增加凋落物中具有较高烷基碳、芳香碳、酚类化合物或它们的前体化合物含量的物种有助于提高森林土壤尤其是表层土壤固碳能力。在鹤山 6 种植被中,常绿阔叶林、乡土树林和马占相思林土壤中烷基碳含量(图 3A)和惰性指数均处于较高水平,表明它们对 SOC 的保存能力较其他几种植被类型强。因此在选择物种对退化森林生态系统进行恢复时可以优先考虑选用,如在恢复初期选择固氮植物为先锋种,快速增加土壤表层有机质含量,再辅以乡土树种,构建稳定常绿阔叶林,在提高森林 SOC 储量同时,提升 SOC 稳定性,实现退化生态系统植被的持续性恢复。

4 结论

南亚热带鹤山森林 SOC 含量受季节、土壤深度

和植被影响显著:干季 SOC 含量显著高于或具高于湿季趋势,0~10 cm 土层 SOC 含量最高且随土层深度降低,马占相思林 SOC 含量最高,马尾松林和灌草最低;6 种植被中,0~40 cm 土层内 SOC 有 43% 存在 0~10 cm 土层中,马占相思林 0~10 cm 土层较其他植被更容易积累 SOC;常绿阔叶林、乡土树林和马占相思林烷基碳和 ROC 惰性指数高于桉树林和马尾松林,揭示这 2 种植被 SOC 具有更高稳定性;SOC 与土壤 TAN 含量呈显著正相关。基于以上结果,建议在退化森林生态系统植被恢复实际中,可在初期营造豆科马占相思林,快速提高表层土壤 SOC,中期辅以乡土树种营造常绿阔叶林,能利于提高森林 SOC 稳定性。

参考文献:

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163
- [2] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22
- [4] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173
- [5] Wei X R, Shao M G, Gale W, et al. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(4): 4062
- [6] Lewis S L. Tropical forests and the changing earth system[J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society B-Biological Sciences*, 2006, 361(1465): 195-210
- [7] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecology Application*, 2000, 10: 423-436
- [8] Amend A S, Matulich K L, Martiny J B H. Nitrogen addition, not initial phylogenetic diversity, increases litter decomposition by fungal communities[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6 (109): 109
- [9] Zhang X, Zhang Y, Sha L, et al. Effects of continuous drought stress on soil respiration in a tropical rainforest in southwest China[J]. *Plant Soil*, 2015, 394(1/2): 343-353
- [10] Zhou G Y, Liu S G, Li Z, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils[J]. *Science*, 2006, 314(5804): 1417
- [11] De Vos B, Cools N, Ilvesniemi H, et al. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey[J]. *Geoderma*, 2015, 251: 33-46
- [12] 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, 25(6): 1226-1236

- [13] 孔涛, 张德胜, 寇涌苹, 等. 浑河上游典型植被河岸带土壤有机碳、全氮和全磷分布特征[J]. 土壤, 2014, 46(5): 793–798
- [14] Wang H, Liu S, Wang J, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 4–13
- [15] Mathers N J, Xu Z H. Solid-state C-13 Nmr spectroscopy: Characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia[J]. Geoderma, 2003, 114(1/2): 19–31
- [16] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in Soil: An acid hydrolysis approach[J]. Geoderma, 2002, 107(1/2): 109–141
- [17] Wang D, Wang B, Niu X. Effects of natural forest types on soil carbon fractions in north-east China[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2014, 26(3): 362–370
- [18] Wang Q K, Wang S L, Zhong M C. Ecosystem carbon storage and soil organic carbon stability in pure and mixed stands of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei*[J]. Plant Soil, 2013, 370(1/2): 295–304
- [19] 刁丹, 李炯, 旷远文, 等. 鹤山不同植被类型土壤惰性碳含量及其季节变化特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(3): 203–210
- [20] Cheng L, Leavitt S W, Kimball B A, et al. Dynamics of labile and recalcitrant soil carbon pools in a sorghum free-air CO₂ enrichment (Face) agroecosystem[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(9): 2250–2263
- [21] 申卫军, 彭少麟, 周国逸, 等. 鹤山丘陵草坡的水文特征及水量平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 162–168
- [22] 张晋京, 窦森, 朱平, 等. 长期施用有机肥对黑土胡敏素结构特征的影响—固态 ¹³C 核磁共振研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2223–2228
- [23] Ostertag R, Marin-Spiotta E, Silver W L, et al. Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence on Puerto Rico[J]. Ecosystems, 2008, 11(5): 701–714
- [24] 傅声雷, 林永标, 饶兴权, 等. 中国生态系统定位观测与研究数据. 森林生态系统卷. 广州鹤山站:1998 ~ 2008[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 101–103
- [25] 余作岳, 彭少麟. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究[M]. 广州: 广州科技出版社, 1996: 163
- [26] Bae K, Lee D K, Fahey T J, et al. Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems[J]. Agroforestry Systems, 2013, 87(1): 131–139
- [27] Wang H Q, Cornell J D, Hall C A S, et al. Spatial and seasonal dynamics of surface soil carbon in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico[J]. Ecological Modelling, 2002, 147(2): 105–122
- [28] Brunn M, Spielvogel S, Sauer T, et al. Temperature and precipitation effects on delta ¹³C depth profiles in SOM under temperate beech forests[J]. Geoderma, 2014, 235: 146–153
- [29] Langley J A, Mckinley D C, Wolf A A, et al. Priming depletes soil carbon and releases nitrogen in a scrub-oak ecosystem exposed to elevated CO₂[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 54–60
- [30] Bernal B, Mckinley D C, Hungate B A, et al. Limits to soil carbon stability; deep, ancient soil carbon decomposition stimulated by new labile organic inputs[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 85–94
- [31] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 35–66
- [32] Grimm R, Behrens T, Marker M, et al. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using random forests analysis[J]. Geoderma, 2008, 146(1/2): 102–113
- [33] 于贵瑞, 王秋凤, 方华军. 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环的基本科学问题、理论框架与研究方法[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 683–698
- [34] Norby R J, Warren J M, Iversen C M, et al. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America, 2010, 107(45): 19368–19373
- [35] Lebauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. Ecology, 2008, 89(2): 371–379
- [36] Du Z, Wang W, Zeng W, et al. Nitrogen deposition enhances carbon sequestration by plantations in northern China[J]. Plos One, 2014, 9(2): 1–9
- [37] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462
- [38] Li H C, Hu Y L, Mao R, et al. Effects of nitrogen addition on litter decomposition and CO₂ release: Considering changes in litter quantity[J]. Plos One, 2015, 10(12): 1–18
- [39] Nair R K F, Perks M P, Weatherall A, et al. Does canopy nitrogen uptake enhance carbon sequestration by trees?[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 875–888
- [40] Houle D, Marty C, Duchesne L. Response of canopy nitrogen uptake to a rapid decrease in bulk nitrate deposition in two eastern Canadian boreal forests[J]. Oecologia, 2015, 177(1): 29–37
- [41] Zhang W, Shen W, Zhu S, et al. Can canopy addition of nitrogen better illustrate the effect of atmospheric nitrogen deposition on forest ecosystem?[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1–18
- [42] Deng Q, Cheng X L, Yang Y H, et al. Carbon-nitrogen interactions during afforestation in central China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 69: 119–122
- [43] Jien S H, Chen T H, Chiu C Y. Effects of afforestation on soil organic matter characteristics under subtropical forests with low elevation[J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(4): 275–283

- [44] 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
- [45] Mylotte R, Sutrisno A, Farooq H, et al. Insights into the composition of recalcitrant organic matter from estuarine sediments using Nmr spectroscopy[J]. Organic Geochemistry, 2016, 98: 155–165
- [46] Iglesias Briones M J, Garnett M H, Ineson P. Soil biology and warming play a key role in the release of ‘old C’ from organic soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(6): 960–967
- [47] Solly E F, Schoening I, Boch S, et al. Factors controlling decomposition rates of fine root litter in temperate forests and grasslands[J]. Plant Soil, 2014, 382(1/2): 203–218
- [48] Ma W M, Li Z W, Ding K Y, et al. Stability of soil organic carbon and potential carbon sequestration at eroding and deposition sites[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(6): 1705–1717

Characteristics of Soil Organic Carbon Under Different Forest Types in Heshan of Southern China

TANG Songbo^{1,2,3}, XI Dan⁴, REN Wendan^{1,2,3}, KUANG Yuanwen^{1,3*}

(1 Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, Guangzhou 510650, China; 4 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The storage and dynamics of soil organic carbon (SOC) under different forest types is one of the important concerns of global change. We determined the seasonal (dry and wet seasons) and spatial (0–10, 10–20 and 20–40 cm depths) variations of SOC under six forest types (Shrub-grass forest, SF; Masson pine forest, PF; Eucalyptus forest, EF; Native-species forest, NF; Acacia forest, AF; Monsoon evergreen broadleaved forest, MF) in Heshan, southern China. Carbon recalcitrant indexes (RIC) and its relationships with total available nitrogen (TAN) in soils of the forest types were also detected. The results showed that: 1) the contents of SOC under 6 forest types were higher in wet season than in dry season with a declining trend with the increase of soil depth, SOC content was highest in AF while lowest in PF and SF; 2) 0–10 cm depth soils had highest proportion of SOC storage (more than 40%) for 0–40 cm depth soils; 3) RIC decreased with increase of soil depth. The higher contents of Alkyl-C and ROC in MF, NF and AF than in EF and PF implied that SOC in the former three forest types had higher stability; and 4) SOC contents significantly positively correlated with soil TAN contents in all forest types. The results suggested that in the process of vegetation restoration, the selection of legume species coupled with native species constructing evergreen broadleaved forest would improve potential carbon sink of forests.

Key words: Soil organic carbon; Total availability nitrogen; Forest types; Seasonal pattern; Carbon recalcitrant index