

格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配

杨玉盛^{1,2}, 刘艳丽², 陈光水^{1,2}, 李 灵², 谢锦升², 林 鹏³

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建农林大学林学院, 南平 353001; 3. 厦门大学生命科学院, 厦门 361005)

摘要: 通过对福建三明格氏栲天然林及其采伐迹地上营造的 33 年生格氏栲人工林和杉木人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配的研究, 结果表明, 格氏栲天然林 0~100cm 土层内土壤有机 C 贮量分别是格氏栲人工林和杉木人工林的 1.17 倍和 1.35 倍, 轻组有机 C 贮量分别是后两者的 1.64 倍和 2.16 倍, 而颗粒有机 C 贮量则分别是后两者的 1.60 倍和 3.43 倍, 其土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 的分配比例亦显著高于后两者。不同林分间差异均以 0~10cm 土层为最大, 该层格氏栲天然林土壤有机 C 含量分别是格氏栲和杉木人工林的 1.52 倍和 1.63 倍, 轻组有机 C 含量分别是后两者的 1.70 倍和 2.14 倍, 而颗粒有机 C 含量则分别是后两者的 2.18 倍和 4.85 倍。这种差异与经营人工林时进行皆伐、炼山、整地等对林地干扰强度较大、幼林郁闭前产生水土流失及凋落物、枯死细根归还量减少等有关。土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 可作为土壤有机 C 库变化的较为敏感指标, 同时亦可指示土壤肥力演变。

关键词: 天然林; 人工林; 土壤非保护性有机 C; 轻组有机 C; 颗粒有机 C

Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China

YANG Yu-Sheng^{1,2}, LIU Yan-Li², CHEN Guang-Shui², LI Ling², XIE Jin-Sheng², LIN Peng³ (1. College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China; 3. College of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 1~8

Abstract Soil organic carbon (SOC) pool plays an important role in mitigating the rise of atmospheric CO₂. Due to its relatively unprotected (biochemical and physical) status, the unprotected SOC, be measured as either the light fraction (LFOC) or particulate organic carbon (POC), is sensitive to management practices and could contribute highly to rise in atmospheric CO₂ when inappropriate managements are employed. In South China, large-scale native forests have been converted to fast-growth and high yield commercial forest plantations in the last decades. Some silvicultural measures, such as planting pure stands, clear-cutting and slash-burning, have been widely applied during this conversion. In addition to soil degradation and yield decline, there are considerable concerns about the changes in pool of SOC, especially of unprotected SOC, following the conversion of natural forests into plantation forests. We chose a natural forest of *Castanopsis kawakamii* (NF), a *C. kawakamii* plantation forest (CK), and a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) (CF) plantation forest in Samming nature reserve, Fujian, China, to assess changes in SOC, and those in LFOC and POC as well.

The NF had a SOC pool of 123.88 t/hm² in the 100 cm soil profile, of which 13.43% and 23.22% appear as LFOC and POC, respectively. Compared with NF, CK and CF had reduced SOC pool by 14.5% and 25.9%, soil LFOC pool by 39.0% and 53.7%, and soil POC pool by 37.5% and 70.8%, respectively. Moreover, CK and CF had lower proportion of SOC as either LFOC (9.57% and 8.37%) or POC (16.96% and 9.11%) than NF. The maximum differences of unprotected SOC a-

基金项目: 教育部高校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 福建省基础研究重大资助项目(2000-F-004)

收稿日期: 2003-07-17; **修订日期:** 2003-10-20

作者简介: 杨玉盛(1964~), 男, 福建仙游人, 博士, 教授, 主要从事亚热带常绿阔叶林 C、N 循环研究。E-mail: ffccyys@public.np.pptt.fj.cn

Foundation item: Teaching and Research Award Program for MOE P. R. C. (TRAPOYT); Basic Research Program of Fujian (No. 2000-F-004)

Received date: 2003-07-17; **Accepted date:** 2003-10-20

Biography: YANG Yu-Sheng, Ph. D., Professor, major in research of C and N cycling in subtropical broad-leaved evergreen forests. E-mail: ffccyys@public.np.pptt.fj.cn

mong forests occurred in the 0~10 cm soil layer, where the NF had SOC, LFOC, and POC contents of 29.67 g/kg, 8.95 g/kg and 11.94 g/kg, respectively, being as much 1.52 times, 1.70 times, and 2.18 times as that in CK, and 1.63 times, 2.14 times, and 4.85 times as that in CF, respectively. The contents of soil LFOC and POC were highly correlated with the amounts of living fine roots and soil macro-aggregates. The intense disturbance of surface soil from clear-cutting, slash-and-burning, and soil preparation etc, the serious soil erosion prior to canopy closure, and the reduction in detritus input through litterfall and fine root turnover might be responsible for the decrease in both SOC and unprotected SOC pools of monoculture plantations. The high correlations of LFOC and POC with total N, total P, hydrolysable N and available P indicated that the unprotected SOC can serve as a good indicator for soil fertility. The sensitivity index to changes were much higher for LFOC (1.27) and POC (2.59) than for total SOC (0.41) also makes unprotected SOC a good predictor of changes in SOC pool.

Key words: natural forest; monoculture plantations; unprotected soil organic carbon; light fraction; particulate organic carbon
文章编号: 1000-0933(2004)01-0001-08 中图分类号: Q14, Q948, S718.5 文献标识码: A

全球陆地约有 1500Gt 碳是以有机质形态贮存于土壤中, 约是陆地植被总碳贮量的 3 倍、全球大气碳库的 2 倍, 而森林生态系统土壤碳库则占全球土壤有机 C 库的 70%, 是森林生态系统地上部分 C 库的 2~3 倍。土壤有机 C 库特别是森林土壤有机 C (Soil organic carbon, SOC) 贮量的微小变化, 都可显著地引起大气 CO₂ 浓度的改变^[1,2]。鉴此, 对森林土壤有机 C 库动态及调控机理的研究成为预测和控制全球气候变化的一项重要基础性工作^[3,4]。由于土壤有机 C 库组成的复杂性及影响其因素的多样性, 目前国内外对土壤 C 库的各种形态、动态过程及调控机理等研究仍十分薄弱^[5~9]。

土壤非保护性有机 C (Unprotected SOC) 由新近凋落的、部分分解的、与土壤矿质结合不紧的植物残体组成^[5]。一般认为土壤非保护性有机 C 库可用轻组有机 C (Light fraction organic carbon, LFOC) 或颗粒有机 C (Particulate organic carbon, POC) 这两个在概念上相近、但性质有所差异的组分来衡量^[5]。LFOC 和 POC 常分别用密度 (density) 和颗粒大小 (size) 分组。密度分组用来分开与矿质部分结合相对松散的部分, 其中轻组有机质为土粒密度小于 1.6~2.0 g/cm³ 组分中的土壤有机质, 主要包括游离腐殖酸和植物残体及其腐解产物等, 周转期 1~15a, 是植物残体分解后形成的一种过渡有机质库, 实际上是一种有机矿质复合体^[10~13]。用颗粒大小分组法分出的颗粒有机质, 周转期 5~20a, 是与沙粒结合 (53~2000 μm) 的有机 C 部分, 属于有机质中慢库, 这个库中有机 C 主要来源于分解速率中等的植物残体分解产物^[11~13]。许多研究表明, LFOC 和 POC 相对较易分解且易受耕作措施影响^[5,12,14], 表明它们处于相对的 (生化和物理上的) 非保护状态。作者已对格氏栲天然林与人工林土壤肥力、根际土壤微生物及生化特性、凋落物、细根等进行过报道^[15~18], 本文仅探讨格氏栲天然林与人工林土壤有机 C、轻组有机 C 和颗粒有机 C 的含量与分配差异, 为我国森林土壤 C 库的估算及揭示人类经营活动对森林 C 吸存能力的影响提供基础数据。

1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口镇, 试验地自然概况及格氏栲天然林 (NF)、格氏栲人工林 (CK) 和杉木人工林 (CF) 林分特征、土壤性质请参见文献^[17,18]。

2 研究方法

2.1 土样采集

分别于 2002 年的 1 月 (冬)、4 月 (春)、7 月 (夏)、10 月 (秋) 在每个林分的每个样地内按 S 形布 5 点, 按 0~10, 10~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100cm 分层取土样, 相同层次混合, 自然风干后过 2mm 及 0.25mm 筛待进一步分析。同时用环刀和小饭盒取原状土, 土壤容重采用室内环刀法, 土壤水稳性团聚体含量采用机械筛分法^[20]。

2.2 土壤有机 C 含量测定及贮量计算

土壤有机 C 含量采用浓硫酸-重铬酸钾高温外加热氧化-硫酸亚铁滴定法^[20], 土壤有机 C (SOC) 贮量采用土壤容重和有机 C 含量推算。

2.3 土壤轻组有机 C 测定

取过 2mm 风干土 5.00g, 放入 25ml 的 CaCl₂ (1.60g/cm³) 重液中, 震荡 18 h (90 r/min), 然后用真空管吸取悬浮部分, 抽滤, 并用重液反复 (3 次) 冲洗瓶底的样品, 用同样方法吸取悬液部分, 抽滤。残留在漏斗上的样品 (轻组), 于 60 °C 下烘 48h 后称重 (计算其所占比重), 取其中部分样品用于分析轻组中有机 C 含量。根据轻组所占比例和其有机 C 含量, 计算土壤轻组有机 C 含量。轻组有机 C 含量除以土壤有机 C 含量即为轻组有机 C 的分配比例^[9,11,21]。

2.4 土壤颗粒有机 C 测定

取过 2mm 风干土 20.00g, 放入 250ml 塑料瓶, 加入 100ml NaOH (0.5mol/L), 先手摇 3 min, 震荡 18 h (90 r/min)。把土壤悬液过 53μm 筛, 并反复用蒸馏水冲洗。把所有留在筛子上方的物质, 在 60 °C 下烘 48h 后称重 (计算其所占比例)。取其中部分

样品分析有机 C 含量, 根据颗粒所占比例和有机 C 含量, 推算颗粒有机 C 含量, 颗粒有机 C 含量除以土壤有机 C 含量即为颗粒有机 C (POC) 的分配比例^[9, 11, 12, 21]。

2.5 统计分析

土壤有机 C、轻组有机 C 和颗粒有机 C 变化的敏感性指标采用下式计算^[22]。

$$\text{敏感性指标} = (\text{变量最大值} - \text{变量最小值}) / \text{变量最小值}$$

相关分析和差异显著性检验均用 SPSS10.0 软件包进行。

3 结果

3.1 土壤有机 C 贮量及分布

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林 0~100cm 土层内有机 C 含量和有机 C 贮量两两之间均差异显著 ($P < 0.01$), 格氏栲天然林有机 C 含量分别是格氏栲和杉木人工林的 1.21 倍和 1.41 倍, 而有机 C 贮量则分别是格氏栲和杉木人工林的 1.17 倍和 1.35 倍 (表 1)。

格氏栲天然林 0~10cm 和 10~20cm 土层有机 C 含量均与格氏栲、杉木人工林差异显著 ($P < 0.05$), 且以 0~10cm 土层的差异最显著 ($P < 0.01$)。格氏栲天然林 0~10cm 土壤有机 C 含量分别是格氏栲和杉木人工林的 1.52 倍和 1.63 倍; 3 种林分 20cm 以下土层的有机 C 含量差异均不显著 ($P > 0.05$) (图 1)。格氏栲人工林和杉木人工林相同土层土壤有机 C 含量间差异均未达显著水平 ($P > 0.05$)。

表 1 不同林分 0~100cm 土层土壤有机 C 含量及贮量

Table 1 C concentration and C storage of SOM in different forests at 0~100 cm depth

| 林分 Forest | 有机 C 含量 SOC concentration (g/kg) | 有机 C 贮量 SOC storage (t/hm ²) |
|--------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| NF | 10.50 ± 0.70a | 123.88 ± 14.02a |
| CK | 8.71 ± 0.60b | 105.87 ± 11.36b |
| CF | 7.45 ± 0.70c | 92.06 ± 8.71c |

* 表中相同字母间为无显著差异 ($P > 0.05$), 不同字母间有显著差异 ($P < 0.05$), 下表同 The data are mean ± SD followed by letters; Different letter in a column indicated significant difference ($P < 0.05$) between forests and otherwise no significant difference ($P > 0.05$); The same in table 2

3.2 土壤轻组有机 C 含量及其分配

格氏栲天然林、人工林和杉木人工林的土壤轻组有机 C 含量、贮量两两之间均有显著差异 ($P < 0.05$), 其中格氏栲天然林 0~100cm 土层内的轻组有机 C 贮量分别是格氏栲和杉木人工林的 1.64 倍和 2.16 倍, 格氏栲人工林则是杉木人工林的 1.32 倍 (表 2)。格氏栲天然林土壤轻组有机 C 分配比例显著高于格氏栲和杉木人工林的 ($P < 0.01$), 而两种人工林间土壤轻组有机 C 分配比例差异则不显著 ($P > 0.05$)。

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土层轻组 C 含量在 0~20cm 土层内两两间差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 且以 0~10cm 土层差异最大, 该层格氏栲天然林土壤轻组有机 C 含量分别为格氏栲和杉木人工林的 1.70 倍和 2.14 倍; 而 20cm 土层以下的差异则均不显著 ($P > 0.05$) (图 2)。在 0~20cm 土层内, 格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤轻组有机 C 分配比例两两之间均差异显著 ($P < 0.05$) (图 2)。在 20~60cm 土层内, 格氏栲天然林土壤轻组有机 C 的分配比例均与格氏栲和杉木人工林的有显著差异 ($P < 0.05$), 但格氏栲人工林与杉木人工林间则无显著差异 ($P > 0.05$)。

3.3 土壤颗粒有机 C 含量及其分配

格氏栲天然林、人工林和杉木人工林 0~100cm 土壤颗粒有机 C 含量、贮量及分配比例两两之间均有显著差异 ($P < 0.05$), 其中格氏栲天然林的分别是格氏栲人工林的 1.65 倍、1.60 倍和 1.37 倍, 分别是杉木人工林的 3.59 倍、3.43 倍和 2.55 倍; 格氏栲人工林的则分别是杉木人工林的 2.18 倍、2.14 倍和 1.86 倍 (表 2)。

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤颗粒 C 含量在 0~20cm 土层两两之间均有显著差异 ($P < 0.05$), 且以 0~10cm 土层差异最大, 该层格氏栲天然林土壤颗粒 C 含量分别是格氏栲和杉木人工林的 2.18 倍和 4.85 倍; 而在 20cm 土层以下差异不显著 ($P > 0.05$) (图 3)。0~40cm 土层内 3 种林分土壤颗粒有机 C 分配比例均两两之间差异显著 ($P < 0.05$), 且以

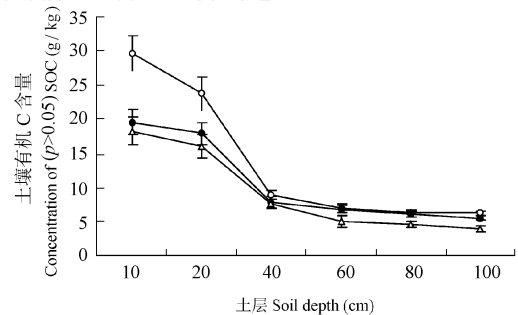


图 1 不同林分土壤有机 C 含量垂直分布

Fig 1 Vertical distribution of SOC concentration in different forests

格氏栲天然林 NF; 格氏栲人工林 CK; 杉木人工林 CF;

下同 the same below

0~10cm 土层的差异最大, 该层格氏栲天然林土壤颗粒有机 C 分配比例分别是格氏栲和杉木人工林的 1.43 倍和 2.99 倍(图 3); 40cm 土层以下, 格氏栲天然林和格氏栲人工林之间的土壤颗粒有机 C 分配比例差异未达显著水平($P > 0.05$), 但格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林的差异在 40~80cm 土层内仍达显著水平($P < 0.05$)。

表 2 不同林分 0~100cm 土层非保护性有机 C 含量、贮量和分配比例

| 林分 Forest | LFOC | | | POC | | |
|--------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | 含量 Concentration (g/kg) | 贮量 Storage (t/hm ²) | 分配比例 Proportion (%) | 含量 Concentration (g/kg) | 贮量 Storage (t/hm ²) | 分配比例 Proportion (%) |
| NF | 1.41 ± 0.11a | 16.64 ± 1.01a | 13.43 ± 1.14a | 2.44 ± 0.19a | 28.77 ± 2.11a | 23.22 ± 2.23a |
| CK | 0.83 ± 0.06b | 10.13 ± 0.89b | 9.57 ± 1.03b | 1.48 ± 0.13b | 17.95 ± 1.13b | 16.96 ± 2.57b |
| CF | 0.62 ± 0.04c | 7.70 ± 0.56c | 8.37 ± 1.11b | 0.68 ± 0.05c | 8.38 ± 0.68c | 9.11 ± 1.72c |

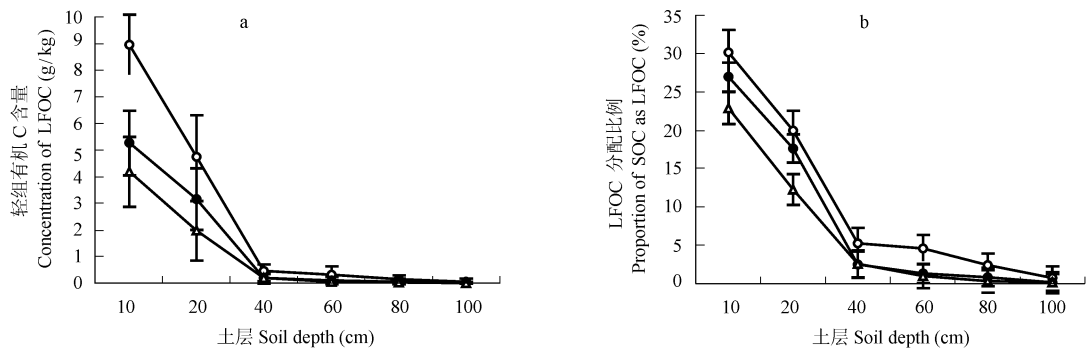


图 2 不同林分类型土壤 LFOC 含量及分配比例垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of concentration and proportion of soil LFOC in different forests

a. Concentration of LFOC; b. Proportion of SOC as LFOC

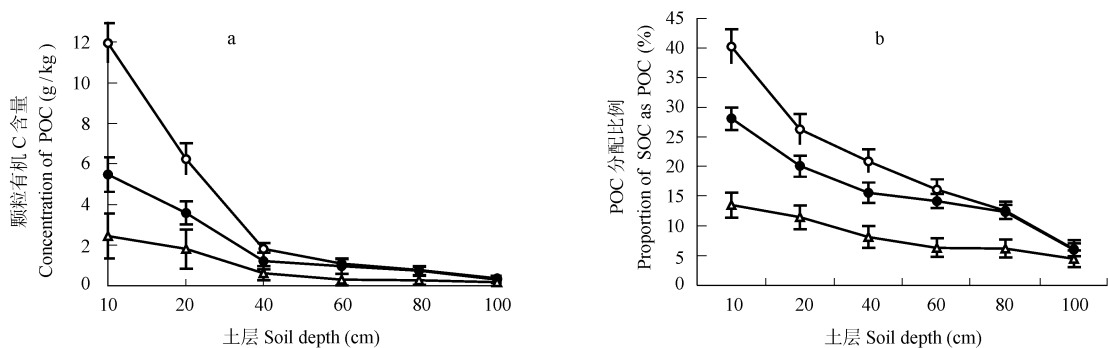


图 3 不同林分类型土壤 POC 含量及分配比例的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of concentration and proportion of soil POC in different forests

a. Concentration of POC; b. Proportion of POC

4 讨论

4.1 土壤有机 C 贮量及分布

本研究中 3 种林分土壤有机 C 贮量均低于我国森林土壤平均碳贮量(193.55 t/hm²) 和世界土壤平均碳贮量(189.00 t/hm²)^[1], 仅与中纬度美国大陆土壤贮量(108.00 t/hm²) 相近^[1], 但高于苏南丘陵次生栎林(70.03 t/hm²) 和杉木人工林(48.64 t/hm²)^[23,24]。与相同立地的人工林相比, 格氏栲天然林的土壤有机 C 贮量均高于 33 年生的格氏栲人工林和杉木人工林, 亦高于 33 年生的福建柏人工林(102.818 t/hm²)、27 年生的杉木观光木混交林(80.281 t/hm²) 和杉木人工林(68.616 t/hm²)^[25,26]。

当格氏栲天然林改为格氏栲和杉木人工林 33a 后, 土壤有机 C 贮量仍分别比天然林低 17% 和 35%, 且不同土层中以 0~20 cm 土层内的有机 C 含量降低最大(图 1)。这与人工林经营措施干扰(皆伐、炼山、整地)和天然林与人工林 C 归还特性有关。在皆伐炼山过程中, 枯枝落叶层(含采伐剩余物)C 库损失殆尽, 如 Galdwell 发现白冷杉林火烧后, 枯枝落叶层碳损失 6.1~17.98 t/hm²^[27]; 哥伦比亚西部海岸铁杉林规定火烧造成 48 t/hm² 的碳挥发^[28]。表层土壤有机 C 因火直接灼烧导致挥发而损失, 如杨玉盛报道炼山过程中杉木幼林地 0~10cm 土层有机质降低了 6.64%^[29]; 整地亦因疏松表层土壤而增强土壤透气性, 促进微生物活动而加速了有机质的分解^[30]; 另外, 造林后 3~5a 时间内幼林地由于缺少覆盖, 地温较高, 加速了表层土壤有机质的分解^[29]。同时, 由于强度的林地干扰和缺少覆盖, 人工幼林地水土流失较为严重, 使大量 C 通过固体和液体径流而流失, 如炼山后第 1 年杉木幼林地流失有机 C 高达 283.87 kg/hm²^[29]; 而西黄松/扭叶松林火烧 1a 后土壤(0~60cm)有机 C 量比对照林地土壤低 25 t/hm², 其中面蚀和细沟侵蚀造成的土壤有机 C 流失量达 280 kg/hm²^[31]。“刀耕火种”地每年排放的 CO₂ 量为 14.48 t/hm², 比有林地多 37.9%, 相当于 20 cm 土壤有机质(或有机 C)年递减 0.8%^[32]。其次, 在人工林幼林郁闭前, 林地上通过凋落物和枯死细根的有机 C 归还极少, 即使至近成熟林时(33 年生), 格氏栲和杉木人工林的凋落物(9.537 和 5.468 t/hm²)和枯死细根(5.148 和 2.492 t/hm²)有机质的潜在年归还量亦显著低于天然林的(11.008 和 8.632 t/hm²)^[17, 18], 同时人工林凋落物和细根的分解速率亦低于天然林的^[17, 18], 使人工林每年凋落物和细根 C 的实际归还量亦低于天然林的, 从而导致了土壤有机 C 的净损失。而天然林表层土壤有机 C 库贮量显著高于人工林的, 除与人工林表层土壤干扰较大和天然林年凋落物归还量较高有关外, 还与天然林表层土壤细根的密集(数量和所占比例均较高)而导致表层枯死细根归还量较高有关^[18]。而格氏栲和杉木人工林土壤特别是表层土壤有机 C 库的差异则与两个树种的凋落物、枯死细根的 C 归还量和表层土壤细根密集程度不同等有关^[17, 18]。

4.2 土壤轻组和颗粒有机 C 含量及分配

本研究中不同林分 0~100cm 土层土壤轻组有机 C 分配比例均明显低于暖温带的天然次生林(0.23~0.35)和落叶松人工林(0.307~0.344)^[9], 这可能与气候、立地条件、林分类型不同等有关。本研究所处的中亚热带气候条件温暖、湿润, 有机质中非保护性有机 C 部分可能比暖温带的更易遭分解, 而导致该部分有机 C 在土壤中的积累较少。3 种林分 0~10cm 土层轻组有机 C 分配比例为 22.9%~30.2%, 略低于 Douglas-fir 人工林的 0~15cm 土层(40%)^[33]。本研究中 0~100cm 土层颗粒有机 C 分配比例除杉木林外(表 2)均落入 Garten 等报道的森林土壤颗粒有机 C 分配比例范围(11%~44%)^[21], 与暖温带的天然林的(19%~23.1%)接近, 但低于该气候带的落叶松人工林的(28.9%~32.8%)^[9]。与农业土壤颗粒有机 C 和轻组有机 C 含量基本相似^[34]不同, 本研究中不同林分(杉木林除外)土壤颗粒有机 C 含量均显著高于土壤轻组有机 C 含量, 这可能与本研究中使用重液密度较低有关。

格氏栲天然林改为人工林后, 土壤中轻组有机 C 和颗粒有机 C 的含量、贮量及分配比例均显著降低, 这与人工林经营过程中(特别是幼龄期)土壤非保护性有机 C 遭分解和人工林有机物质归还数量少有关; 另外, 与天然林相比, 人工林枯落物(凋落物和细根)归还量少及分解速率低(特别是针叶树)^[17, 18], 而土壤中轻组和颗粒有机 C 主要来源又是植物残体^[5], 这是人工林中非保护性有机 C 低的原因之一。由于人工林经营过程中营林措施如火烧、整地、幼林抚育管理等的使用, 造成土壤有机质大量分解^[29, 30], 而首先遭分解的部分应该是性质相对不稳定的非保护性有机 C。而吴建国等认为天然林转变为人工林后使土壤颗粒有机 C 的分配增加, 并认为这主要与营林措施使土壤保护性有机 C 组分受破坏而形成了非保护性的颗粒有机 C 有关^[9], 这与本文的研究结果有一定差异。

格氏栲和杉木人工林轻组和颗粒有机 C 贮量差异与其凋落物和枯死细根归还量有关, 而轻组和颗粒有机 C 分配比例的差异则可能与其凋落物和枯死细根的质量有关。由于格氏栲凋落物和枯死细根更易分解^[17, 18], 使得前者有更高比例的分解产物进入土壤轻组或颗粒有机 C 库而使其分配比例较高。

4.3 土壤轻组和颗粒有机 C 的分布

森林土壤轻组和颗粒有机 C 在土壤剖面分布的差异主要与不同土层植被根系分布、生物活动、人工扰动等有关。3 种林分土壤轻组和颗粒有机 C 含量、贮量和分配比例均明显随土壤深度的增加而降低, 这与前人的研究结果相似^[7, 9]。天然林与人工林土壤轻组和颗粒有机 C 含量和贮量最大差异出现在表层 0~10cm, 这与该层土壤所受营林措施干扰频率高及凋落物和枯死细根密集表层土壤有关^[17, 18]。而格氏栲和杉木人工林轻组和颗粒有机 C 分布差异则主要与阔叶树和针叶树凋落物归还量和细根垂直分布差异有关^[17, 18]。

细根周转是土壤轻组和颗粒有机 C 的重要来源^[5, 18]。本研究中格氏栲天然林和人工林不同土层轻组和颗粒有机 C 含量的

表 3 不同林分土壤 LFOC 和 POC 含量与活细根生物量相关性

Table 3 Correlation between concentrations of LFOC and POC and living fine root biomass

| 林分 Forest | LFOC | | POC | |
|--------------|----------------|----------|----------------|----------|
| | R ² | 显著性 Sig. | R ² | 显著性 Sig. |
| NF | 0.802 | 0.016 | 0.848 | 0.009 |
| CK | 0.779 | 0.020 | 0.852 | 0.009 |
| CF | 0.204 | 0.369 | 0.276 | 0.285 |

变化约 80% 以上可由活细根生物量分布变化得到解释, 而杉木人工林轻组和颗粒有机 C 与活细根生物量的垂直分布间则无明显相关性(表 3), 其原因还待进一步探讨。

4.4 土壤轻组、颗粒有机 C 与土壤结构稳定性的关系

土壤轻组和颗粒有机 C 含量与土壤大水稳性团体含量和破坏率密切相关, 而以与 2~ 5mm 的水稳性团聚体含量相关性最好, 且均较土壤有机 C 和土壤大水稳性团聚体间的相关性高(表 4), 表明土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 与土壤水稳性团聚体的形成有关, 土壤大团聚体间的胶结物质主要为轻组或颗粒有机质, 这与 Six 等的研究结果相似^[7]。同时水稳性团聚体又可提供一定程度的物理保护而使土壤轻组和颗粒有机 C 得到暂时的贮存^[5]。天然林改为人工林后, 由于土壤水稳性团聚体稳定性降低, 土壤团聚结构受到严重破坏(表 4), 从而亦导致土壤轻组和颗粒有机 C 的加速分解而大量丧失, 这与 Six 等的研究一致^[7]。

表 4 土壤非保护性有机 C 含量与土壤水稳性团聚体相关性

Table 4 Correlation between LF-C concentration and water-stability of soil aggregates

| 指标 Indice | 径级 Size (mm) | | | | | | | | 结构体破坏率 Destroyed ratio of ped | | |
|--------------|--------------|-------|-------|--------|-----------|--------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|
| | > 5 | 2~ 5 | 1~ 2 | 0.5~ 1 | 0.25~ 0.5 | > 0.25 | > 0.5 | > 1 | | > 2 | |
| LFOC | R^2 | 0.305 | 0.882 | 0.615 | 0.016 | 0.203 | 0.409 | 0.454 | 0.733 | 0.724 | 0.709 |
| | 显著性 Sig | 0.148 | 0.003 | 0.040 | 0.391 | 0.712 | 0.102 | 0.086 | 0.019 | 0.020 | 0.022 |
| POC | R^2 | 0.682 | 0.987 | 0.689 | 0.268 | 0.183 | 0.576 | 0.682 | 0.895 | 0.949 | 0.805 |
| | 显著性 Sig | 0.043 | 0.000 | 0.041 | 0.293 | 0.398 | 0.080 | 0.043 | 0.004 | 0.001 | 0.015 |
| SOC | R^2 | 0.273 | 0.802 | 0.559 | 0.021 | 0.220 | 0.399 | 0.408 | 0.691 | 0.690 | 0.687 |
| | 显著性 Sig | 0.105 | 0.006 | 0.054 | 0.398 | 0.768 | 0.106 | 0.095 | 0.025 | 0.025 | 0.023 |

4.5 土壤轻组、颗粒有机 C 与土壤养分的关系

土壤有机 C、轻组有机 C、颗粒有机 C、易氧化性 C 和微生物生物量 C 含量均与土壤全 N、全 P、水解性 N 和速效 P 含量呈显著相关($P < 0.01$)(表 5), 表明不同土壤有机 C 形态均能在一定程度上指示土壤养分供应水平和肥力高低, 但均以土壤微生物生物量 C 与土壤各项养分指标的相关最紧密, 这与他人的研究结果较为一致^[35, 36]。相对而言, 土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 含量在表征土壤养分水平高低的作用低于其它形态 C, 这与森林土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 的木质素含量和 C/N、C/P 均较高^[5, 37], 分解过程中常发生 N、P 的微生物固定, 掩盖了其表征土壤养分水平能力有关^[38]。

表 5 不同形态土壤有机 C 与部分土壤养分间的相关性

Table 5 Correlation between different nutrient indices and different forms of SOC

| 土壤养分 Soil nutrient | 指标 Index | SOC | LFOC | POC | OXC | MBC |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全 N Total N | R^2 | 0.936 | 0.912 | 0.926 | 0.939 | 0.948 |
| | 显著性 Sig | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 全 P Total P | R^2 | 0.830 | 0.791 | 0.807 | 0.818 | 0.962 |
| | 显著性 Sig | 0.006 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.000 |
| 水解性 N Hydrolyzable N | R^2 | 0.879 | 0.829 | 0.789 | 0.838 | 0.947 |
| | 显著性 Sig | 0.002 | 0.006 | 0.011 | 0.005 | 0.000 |
| 速效 P A available P | R^2 | 0.929 | 0.909 | 0.919 | 0.928 | 0.964 |
| | 显著性 Sig | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

* OXC 易氧化性有机 C Oxidizable organic carbon, MBC 微生物生物量 C Microbial biomass carbon

4.6 土壤轻组和颗粒有机 C 与土壤活性有机 C 关系

不同林分类型土壤轻组有机 C 含量与颗粒有机 C 含量高度相关(表 6), 这表明两种有机 C 的起源、成分相似, 并受相同因素的影响, 这与 Haynes 的研究结果相一致^[6]。不同林分土壤轻组有机 C 含量、颗粒有机 C 含量均与土壤有机 C 含量呈极显著相关(表 6), 表明土壤轻组和颗粒有机 C 含量高低与土壤有机 C 数量大小有关^[8]。不同林分土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 含量垂直分布亦与土壤易氧化性 C 和微生物生物量 C 含量呈极显著相关(表 6), 表明土壤轻组有机 C、颗粒有机 C 一定程度上可作为土壤易变性 C 的指标^[6, 8, 10]。

由于轻组有机 C 和颗粒有机 C 对经营管理措施变化十分敏感, 并可作为土壤有机 C 库变化的早期预示指标^[10, 14, 22, 39]。本文研究表明, 0~ 100cm 土层土壤有机 C、轻组有机 C 和颗粒有机 C 变化的敏感性指标分别为 0.41、1.27 和 2.59(表 7), 表明轻组有机 C 和颗粒有机 C 的敏感性均高于土壤有机 C, 这与 Bremner 等研究的结果相似^[22]; 而颗粒有机 C 的敏感性高于轻组有机 C, 这与土壤颗粒有机 C 的高度易变性和易受流失有关^[40]。不同土层 3 种敏感性指标均以 0~ 10cm 土层的最高, 这与表层土壤受营林措施干扰强度最大有关^[29, 30]。

表 6 土壤非保护性 C 与土壤有机 C 和土壤活性有机 C 间的相关关系

Table 6 Correlation between unprotected SOC and SOC and active SOC

| 林分 Forest | LFOC~ SOC | | POC~ SOC | | LFOC~ POC | | LFOC~ OXC | | POC~ OXC | | LFOC~ MBC | | POC~ MBC | |
|--------------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| | R ² | 显著性 Sig | R ² | 显著性 Sig | R ² | 显著性 Sig | R ² | 显著性 Sig | R ² | 显著性 Sig | R ² | 显著性 Sig | R ² | 显著性 Sig |
| NF | 0.952 | 0.001 | 0.937 | 0.001 | 0.994 | 0.000 | 0.992 | 0.000 | 0.993 | 0.000 | 0.978 | 0.000 | 0.976 | 0.000 |
| CK | 0.929 | 0.001 | 0.939 | 0.001 | 0.986 | 0.000 | 0.989 | 0.000 | 0.983 | 0.000 | 0.985 | 0.000 | 0.991 | 0.000 |
| CF | 0.857 | 0.005 | 0.986 | 0.000 | 0.944 | 0.001 | 0.986 | 0.000 | 0.931 | 0.001 | 0.980 | 0.000 | 0.967 | 0.000 |

5 小结

格氏栲天然林改为格氏栲和杉木人工林后, 土壤有机 C 库储量显著下降, 土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 的下降则更为显著; 且这种变化的最大处均发生在表层 0~ 10cm 土层内, 这与人工林该层土壤受皆伐、炼山、整地等营林措施的强度干扰, 人工林郁闭前幼林地水土流失及凋落物、枯死细根归还量

减少等密切相关。土壤轻组有机 C 和颗粒有机 C 可作为土壤有机 C 库变化的较为敏感指标, 亦可指示土壤肥力演变。目前, 在我国南方林区应加强对现存天然林和次生林的保护力度; 同时, 应改进传统人工林经营措施(皆伐、炼山、全垦等), 以增加幼林地覆盖为中心, 控制水土流失及幼林地的 CO₂ 排放, 保持和增加森林土壤各类 C 库特别是非保护性有机 C 库储量。

References

- [1] Dixon R K, Houghton R A, *et al*. Carbon pools and flux of global forest ecosystems, *Science*, 1994, **263**: 185~ 190
- [2] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget *Science*, 1993, **259**: 935~ 941.
- [3] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance *Journal of Environmental Science* 1996, **8**: 249~ 254
- [4] Goto N, Sakoda A, Suzuki M. Modelling of soil carbon dynamics as a part of carbon cycle in terrestrial ecosystems *Ecological Modelling*, 1994, **74**: 183~ 204
- [5] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al*. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils *Plant and Soil*, 2002, **241**: 155~ 176
- [6] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil biology and biochemistry*, 2001, **32**(2): 211~ 219
- [7] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al*. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **64**(2): 681~ 689
- [8] Alvarez R and Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **64**(1): 184~ 189.
- [9] Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, *et al*. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil *Scientia Sinica*, 2002, **38**(4): 19~ 29.
- [10] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations *Soil Sci Soc Am. J.*, 1992, **56**: 1799~ 1806
- [11] Christensen B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates *Advances in Soil Science* Springer Verlag, New York, Inc, 1992, **20**: 1~ 90
- [12] Cambardella C A, & Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence *Soil Sci Soc Am. J.*, 1992, **56**: 777~ 782
- [13] Cambardella C A & Elliott E T. Methods for physical separation and characterization of soil organic fractions *Geoderma*, 1993, **56**: 449~ 457.
- [14] Solomon D, Lehmann J and Zech W H. Use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, **78**: 203~ 213
- [15] Yang Y S, Li Z W, Liu A Q. Studies on soil fertility for natural forest of *Castanopsis kawakamii* replaced by broadleaf plantation. *Journal of Northeast Forestry University*, 1993, **21**(5): 14~ 21.
- [16] Yang Y S, He Z M, Zhou S Q. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kawakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2): 198~ 202
- [17] Yang Y S, Lin P, Guo J F, *et al*. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1278~ 1289
- [18] Yang Y S, Chen G S, Lin P, *et al*. Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1719~ 1730
- [19] Lin P, Qiu X Z. Study on the *Castanopsis kawakamii* forest in the Wakeng area of Sanming city, Fujian province, *Acta Phytocol. Geobot Sinica*, 1986, **10**(4): 241~ 252

表 7 土壤有机 C、轻组有机 C 和颗粒有机 C 变化的敏感性指标

Table 7 Sensitivity index of SOC, LFOC, and POC to forest conversion

| 土层 Soil depth (cm) | SOC | LFOC | POC |
|--------------------|------|------|------|
| 0~ 100 | 0.41 | 1.27 | 2.59 |
| 0~ 10 | 0.59 | 2.14 | 3.85 |

- [20] Department of National Forestry. *Forest soil analysis methods*. Beijing: Chinese Criteria Press, 2000.
- [21] Garten jr C T, Post W M, Hanson P J, *et al*. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian mountains. *Biogeochemistry*, 1999, **45**: 115~ 145.
- [22] Bremer E, Janzen H H and Johnston A M. Sensitivity of total, light and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, **74**: 131~ 138.
- [23] Ruan H H, Jiang Z L, Gao S M. Preliminary studies of carbon cycling in three types of forests in the hilly regions of southern Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **16**(6): 17~ 21.
- [24] Fang X, Tian D L, Xian W H. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(3): 14~ 19.
- [25] Yang Y S, Xie J S, Wang Y X, *et al*. Carbon stock and carbon sequestration on mixed forest of *cunninghamia lanceolata* and *tsongiodendron odorum*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, **25**(5): 10~ 14.
- [26] He Z M, Li L H, Wang Y X, *et al*. Carbon stock and carbon sequestration of a 33-year-old *Fokienia hodginsii* plantation. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(3): 298~ 303.
- [27] Galdwell T G, Johnson D W, Miller W W, *et al*. Forest floor carbon and nitrogen losses due to prescription fire. *Soil Sci Soc Am. J.*, 2002, **66**: 262~ 267.
- [28] Belillas C M, Feller M C. Relationships between fire severity and atmospheric and leaching nutrient losses in British Columbia's coastal western hemlock zone forests. *Int. J. Wildland Fire*, 1998, **8**: 87~ 101.
- [29] Yang Y S. *Sustainable management of Chinese fir plantations*. Beijing: China Forestry Press, 1998.
- [30] Ma X Q, Liu A Q, He Z Y, *et al*. Effects of site preparations on ecosystem of Chinese fir plantations. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18**(3): 237~ 243.
- [31] Baird M, Zabowski D, Everett R L. Wildfire effects on carbon and nitrogen in inland coniferous forests. *Plant and Soil*, 1999, **209**: 233~ 243.
- [32] Wu Z M, Li Y D, Zeng Q B, *et al*. Carbon pool of tropical mountain rain forests in Jianfengling and effect of clear-cutting on it. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(4): 341~ 344.
- [33] Cromack Jr K, Miller R E, Helgeson O T, Smith R B, and Anderson H W. Soil carbon and nutrients in a coastal Oregon Douglas-fir plantation with red alder. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(1): 232~ 239.
- [34] Chan K Y. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 1376~ 1382.
- [35] Smolander A, Kurka A, Kitunen V, *et al*. Microbial biomass C and N, and respiratory activity in soil of repeatedly limed and N- and P-fertilized Norway Spruce stands. *Soil Biol. & Biochem.*, 1994, **26**: 957~ 962.
- [36] Garcia F O, Rice C W. Microbial biomass dynamics in tallgrass prairie. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1994, **58**: 816~ 824.
- [37] Guggenberger G, Christensen B T and Zech W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. *Eur. J. Soil Sci.*, 1994, **45**: 449~ 458.
- [38] Recous S, Aita C and Mary B. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, **31**: 119~ 133.
- [39] Biederbeck V O, Janzen H H. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in arid environment. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, **26**(10): 1647~ 1656.
- [40] Balesdent J, Besnard E, Arrouays D, *et al*. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant Soil*, 1998, **201**: 49~ 57.

参考文献:

- [9] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机C分配的影响. *林业科学*, 2002, **38**(4): 19~ 29.
- [15] 杨玉盛, 李振问, 刘爱琴. 人工阔叶林取代格氏栲天然林后土壤肥力变化的研究. *东北林业大学学报*, 1993, **21**(5): 14~ 21.
- [16] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性差异的研究. *生态学报*, 1998, **18**(2): 198~ 202.
- [17] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬, 等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解(英文). *生态学报*, 2003, **23**(7): 1278~ 1289.
- [18] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. *生态学报*, 2003, **23**(9): 1719~ 1730.
- [19] 林鹏, 丘喜昭. 三明瓦坑格氏栲林的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1986, **10**(4): 241~ 252.
- [20] 国家林业局. *森林土壤分析方法*. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [23] 阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究-含量与分布规律. *生态学杂志*, 1997, **16**(6): 17~ 21.
- [24] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素养密度、贮量和分布. *林业科学*, 2002, **38**(3): 14~ 19.
- [25] 杨玉盛, 谢锦升, 王义祥, 等. 杉木观光木混交林C库与C吸存. *北京林业大学学报*, 2003, **25**(5): 10~ 14.
- [26] 何宗明, 李丽红, 王义祥, 等. 33年生福建柏人工林碳库与碳吸存. *山地学报*, 2003, **21**(3): 298~ 303.
- [29] 杨玉盛. *杉木林可持续经营的研究*. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [30] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 等. 整地方式对杉木人工林生态系统的影响. *山地学报*, 2000, **18**(3): 237~ 243.
- [32] 吴仲民, 李意德, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林C素库及皆伐影响的初步研究. *应用生态学报*, 1998, **9**(4): 341~ 344.